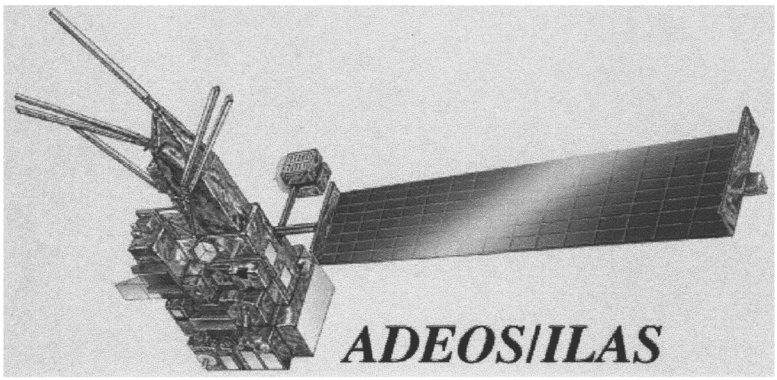
国立環境研究所研究報告　第169号

R-169-2002/NIES

ISSN 1341-3643

平成12年度
ILAS プロジェクト報告

ILAS Project Report
FY2000



衛星観測プロジェクト
笹野泰弘 編

Edited by Y. Sasano
ILAS Project

平成 14 年 1 月
January 2002

独立行政法人 国立環境研究所
NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

はじめに

本報告書は、独立行政法人国立環境研究所の委託により財団法人日本気象協会が「平成13年度ILASプロジェクトデータブック作成業務」としてとりまとめたものを基に、ILAS プロジェクトにおいて取得、処理された観測データおよび検証実験データの解析、及び検証・比較の結果について、利用者へ基礎情報を提供することを目的として再編集を行ったものである。

改良型大気周縁赤外分光計 ILAS は、極域成層圏のオゾンを監視・研究するために環境庁が開発し、地球観測プラットフォーム技術衛星 ADEOS に搭載された大気センサーである。ADEOS は、1996年8月17日に宇宙開発事業団(NASDA)の H-II ロケットにより種子島宇宙センターから打ち上げられ、1997年6月30日に太陽電池パネルの故障により電源供給が止まり、運用を停止した。約 8 ヶ月間という短い期間ではあるが、ILAS により貴重なデータが取得され、またこの間国内外の研究機関、施設の協力を得た大規模な検証実験も行われ、データベースが構築された。これらのデータは国立環境研究所によって処理、提供されているが、それと併行してデータ質の評価、各種検証データによる検証・比較解析が進められ、それらの検討結果に基づく処理アルゴリズムの改訂とデータの再処理も継続して行われている。

本書では、平成12年度末の時点で最新のデータプロダクトである Version 5.20 および 5.23 について、データの概要、検証実験データ・他衛星データとの比較等を中心に記述した。検証・比較の作業には、ILAS 検証実験として各国の多くの研究者の手により取得され、ILAS 検証実験データベース(ILAS CMDB)に登録されたデータの他、HALOE、SAGE II、POAM II、MLS 等の衛星データを用いた。ここにILAS CMDBデータの使用を許可された検証実験参加の研究者の皆様に感謝申し上げる。また、本年度はILAS Version 5.20 データの一般ユーザーへの公開を行った。そのため、例年の報告書の内容に加えて、ILAS データの利用に当たって目を通していただくべき資料として本書の後半に技術資料を掲載した。ILAS の装置とアルゴリズムの概要や導出データの検証結果を収録した。ILAS Version 5.20 データの利用に際しては、本技術資料を参考にして頂きたい。

編集作業の多くは、(財)日本気象協会の工藤泰子・椿貴博 両氏の手を煩わせた。しかし、内容について不備があるとすれば、すべて編者の責任である。読者の皆様の忌憚のないご意見、ご批判を賜れば幸いである。

平成14年2月

衛星観測プロジェクト

笹野泰弘

目　次

はじめに

第1章　ILASプロジェクトの概要
1.1　ILASプロジェクトの概要 ---------- 1
1.1.1　ILASプロジェクトの目的 ---------- 1
1.1.2　ILASプロジェクトの推進体制 ---------- 1
(1)　ハードウェア開発体制 ---------- 3
(2)　ILAS・RISデータ処理運用システム開発体制 ---------- 3
(3)　ILASサイエンスチーム ---------- 3
1.2　ILASの概要 ---------- 4
1.2.1　ADEOS ---------- 4
1.2.2　ILASの測定原理と測定対象 ---------- 6
(1)　ILASの測定原理 ---------- 6
(2)　ILASの測定対象 ---------- 10
1.3　ILASの検証実験とCMDB ---------- 10
1.3.1　検証実験の目的と概要 ---------- 10
1.3.2　CMDBの概要 ---------- 16
1.3.3　CMDの登録・利用状況 ---------- 17
1.4　ILASデータの処理・提供のしかた ---------- 18
1.4.1　ILASデータの処理 ---------- 18
1.4.2　ILASデータの提供 ---------- 20
1.4.3　ILASホームページ ---------- 21

第2章　ILASデータ処理・提供状況
2.1　ILASデータ処理アルゴリズムの変遷 ---------- 26
2.2　ILASデータ処理状況 ---------- 39
2.3　ILASデータ提供状況 ---------- 42

第3章　ILAS公開プロダクト (version 5.20)
3.1　プロファイル（数値データ・グラフ） ---------- 45
3.2　高度－時間断面（3-Week Plot, 12-Week Plot） ---------- 47
3.3　高度－経度断面　(One-day Plot) ---------- 48

第4章　ILASデータの検証 ---------- 69

第5章　ILASデータの統計（月平均プロファイル） ---------- 105

第6章　ILASプロジェクトの主な研究成果
(1) 衛星オゾン観測などに関する解説、論文 ---------- 134
(2) ILASプロジェクトの出版物 ---------- 138
(3) ILASおよびILASプロジェクトに関する報告、講演記録、論文 ---------- 139
(4) ILAS-II, ILAS-III, FTS ---------- 146

付録　　ILAS IIの概要 ---------- 148

ILAS 技術資料

1. ILAS（改良型大気周縁赤外分光計）の特性と稼働時の性能 ---------- 155
2.改良型大気周縁赤外分光計（ILAS）データリトリーバル
アルゴリズム（Version 5.20） ---------- 181
3.太陽掩蔽法を用いた衛星搭載センサーILAS の接線高度決定：
Version 5.20 の新しい手法 ---------- 215
4. 改良型大気周縁赤外分光計（ILAS）によるオゾン観測値
の検証 ---------- 236
5. 改良型大気周縁赤外分光計（ILAS）Ver.5.20 の NO_2 と
HNO_3 データの検証 ---------- 269
6. ILAS による亜酸化窒素とメタン観測値の検証 ---------- 286
7. 改良型大気周縁赤外分光計（ILAS）Ver.5.20 による
H_2O データの特性と検証 ---------- 339
8. 参考文献 ---------- 373

第1章　ILASプロジェクトの概要

改良型大気周縁赤外分光計 ILAS (Improved Limb Atmospheric Spectrometer)は、地球観測プラットフォーム技術衛星「みどり」ADEOS (Advanced Earth Observing Satellite)に搭載された大気センサーのひとつで、対流圏上部から成層圏全体にわたるオゾン濃度とそれに関連する微量ガス・エアロゾルの濃度、および気温・気圧の高度分布など、高層大気における化学・力学過程を理解する上で必要なデータを取得するために開発されたものである。

1.1 ILASプロジェクト

1.1.1　ILASプロジェクトの目的

クロロフルオロカーボン（CFC）をはじめとする人工の化学物質による成層圏オゾン破壊は、南極域におけるオゾンホールばかりでなく、最近では北極域や南北両半球の中緯度域でも顕著に進行しているといわれている。CFC に含まれる塩素によるオゾン破壊反応がその主因をなしていると考えられているが、同時にこの反応に好条件を提供するような環境が整っているかどうかがこの問題を理解する上での鍵となっている。したがって、成層圏オゾンの挙動を理解しその変動を予測するには、オゾンだけではなくオゾン層化学に関係する窒素酸化物、水酸化物、塩素酸化物等の各種微量成分、エアロゾル、極成層圏雲（PSCs）、さらに気温の分布とその変動などを総合的に把握する必要がある。

環境省（プロジェクト発足当時は環境庁）は、オゾン層保護に係る科学的知見の集積を図り、保護対策の一層の推進に貢献するため、国産の人工衛星を利用したオゾン層の監視・観測のためのプロジェクトを開始した。改良型大気周縁赤外分光計（Improved Limb Atmospheric Spectrometer ; ILAS）はこの衛星（地球観測プラットフォーム技術衛星 ; ADEOS）に搭載するために開発され、対流圏上部から成層圏全体にわたる高層大気中の化学過程、力学過程を理解する上で必要なこれらのデータを取得することを目的とする。

1.1.2　ILASプロジェクトの推進体制

1988 年、ILAS および地上衛星間レーザー長光路吸収測定用リトロリフレクタ（RIS）が最終的に ADEOS に搭載する環境庁提案センサとして選定された後、ILAS・RIS プロジェクトは当初環境庁企画調整局環境研究技術課が担当、その後 1990 年に地球環境部研究調査室が発足した段階で担当は同課に移り、室長補佐がプロジェクトマネージャーとなった。プロジェクトマネージャーは、プロジェクト全般の責任を負う他、NASDA との協定関係、予算関係、機器開発・検証実験等の契約関係を担当した。1994 年度から研究調査室に置かれたアシスタントプロジェクトマネージャーは、国立環境研究所衛星観測研究チームに常駐し、技術面ではプロジェクトリーダーの監督下にあった。

国立環境研究所は 1990 年 2 月から、当時の大気物理研究室の研究者を中心とした衛星研究チーム（仮称）を設置した。その後、国立公害研究所から国立環境研究所への組織変更に伴い、1990 年 7 月に地球環境研究グループオゾン層研究チームが、1991 年 10 月に衛星

観測研究チームが新設され、後者が全面的に業務を引き継いだ。プロジェクトは、同チームを中心として、大気圏環境部高層大気研究室、および地球環境センターの参画のもとに推進され、同チームにプロジェクトオフィスを置き、同チーム総合研究官（現在は大気圏環境部長）がプロジェクトリーダーの任にあたった。プロジェクトリーダーの下にはILASサイエンスチーム、RIS サイエンスチーム、ILAS 検証実験チームが置かれ、また、研究公募で採択された研究者グループがプロジェクトリーダーのもとに組織化された。

地上データ処理運用に関するソフトウェア・計算機設備の構築とデータ処理運用施設の運用は国立環境研究所が担当した。ILAS・RIS 衛星データ処理運用施設は、地球環境研究センター研究管理官（衛星観測担当）をマネージャーとし、1995 年度後半からはデータマネージャーが置かれ、データ提供・検証実験データの収集など外部研究者とのインターフェースを担当した。

また、国立環境研究所内には研究推進委員会のもとに衛星観測プロジェクト小委員会が設置され、衛星観測に係る重要事項の審議が行われた他、サイエンスチームミーティングなどの機会を利用してILASプロジェクト検討委員会を持ち、外部有識者のレビューが行われた。ILASプロジェクトの推進体制を図1.1に示す。

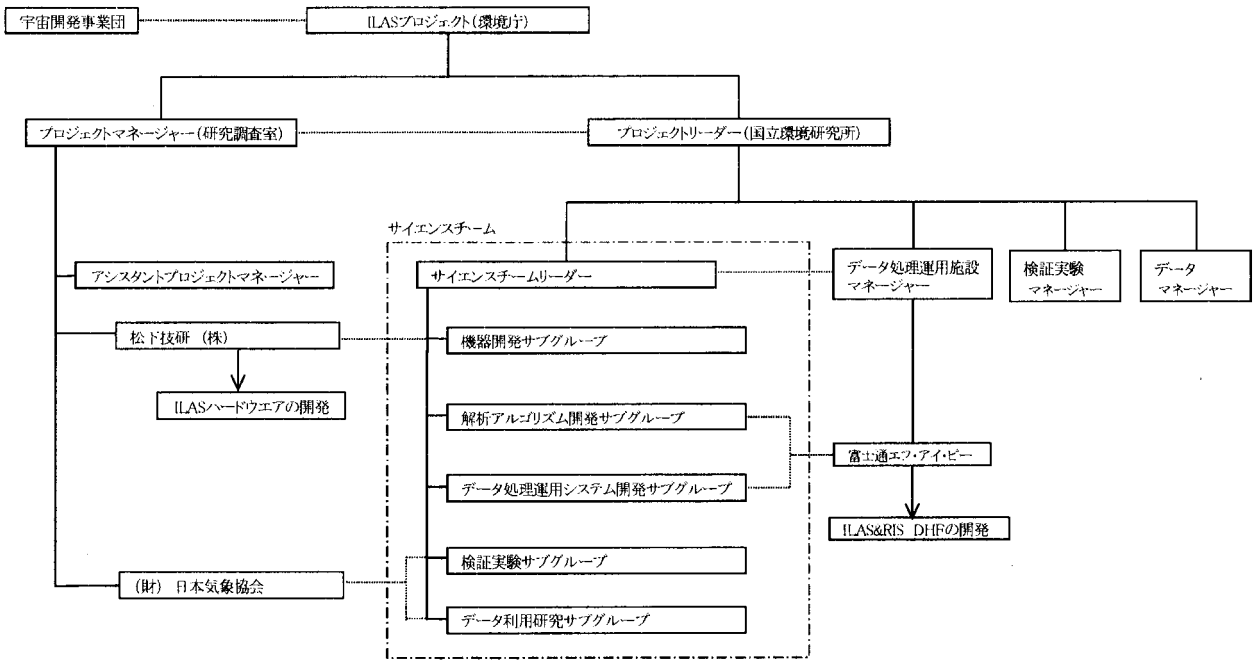


図 1.1　ILAS プロジェクトの推進体制

プロジェクトマネージャー（環境庁（現環境省）研究調査室）はプロジェクト全般管理、NASDA との協定、機器制作者との契約等を担当、プロジェクトリーダー（国立環境研究所）は主にサイエンスチームの運営、データ処理・解析システムの開発等にあたる。

（1）ハードウェア開発体制

ILAS は、かつて文部省宇宙科学研究所が開発した LAS（Limb Atmospheric Infrared Spectrometer）を原型としたため、LAS のキーデバイスの開発を行った松下技研（株）が、これを改良する形で概念設計・開発を行った。開発は松下技研（株）社内および松下電器グループ各社の協力の下に進められ、電子基板作成は松下通信工業（株）、構造解析は松下電機産業（株）が受け持った。また、ADEOS 衛星の開発を担当した三菱電機（株）との技術的な調整は環境庁・NASDA を介し、インターフェース調整会議、技術連絡書によって行われた。概念設計にあたっては、当時の国立公害研究所、宇宙科学研究所などの研究者が検討作業に加わり、ILAS 機器の設計・製作・試験に際しては国立環境研究所の研究者がサイエンスチームメンバーとともに多面にわたる技術的な支援を行った。

（2）ILAS・RIS データ処理運用システム開発体制

観測データの処理運用のための地上施設として、ILAS・RIS 衛星データ処理運用施設（ILAS & RIS Data Handling Facility ; ILAS & RIS DHF）が国立環境研究所内に新たに整備され、国立環境研究所地球環境研究センターの地球環境モニタリング事業の一環として運営された。国立環境研究所は、機器開発に関わる科学的支援等の他にデータ処理運用を担当し、データ処理アルゴリズム研究を進める一方、データ処理運用システムソフトウェアの開発を行ってきた。

ILAS・RIS データ処理運用システムについては、国立環境研究所の研究者が中心となって基本概念の検討を行い、平行して富士通エフ・アイ・ピー（株）がシステムのあり方に関する基礎調査を行った。この基礎調査の結果を受けて、同じく富士通エフ・アイ・ピー（株）が基本設計、詳細設計、プログラム開発、試験を担当した。

（3）ILAS サイエンスチーム

ILAS サイエンスチームは、プロジェクト開始当初の 1990 年から活動を開始した。当初の、機器開発に係る科学的な立場からの支援に始まり、検証実験計画立案、データ処理運用のための地上システムの開発支援、データ利用研究計画立案などに関与してきた。メンバーは、レギュラーメンバーとそのアソシエイトからなり、基本的に研究者としての個人参加になっている。レギュラーメンバーは、日本人の場合は国立環境研究所の客員研究員として登録され、外国人の場合は NASDA と所属機関間の ADEOS 衛星に関する協力関係の中で、各機関から指名されて ILAS プロジェクトに参画した。サイエンスチームメンバーの担当研究課題は、機器性能評価、機器検証、アルゴリズム開発・検証、データ利用研究などである。

なお、検証実験計画については、準備作業の本格化に伴い、サイエンスチーム以外のメンバーの関与が多くなったこともあり、作業を効率良く進めるため、1995 年より新たに検証実験チームをサイエンスチームとは別に設置した。検証実験チームには、ILAS 検証実験

に関わるすべての研究者が参加し、具体的な実験計画の立案・調整にあたった。また、事務局は（財）日本気象協会が担当した。

1.2 ILAS の概要

1.2.1 ADEOS

ADEOS は、地球温暖化、オゾン層の破壊、熱帯雨林の減少、異常気象の発生などの環境変化に対応した全地球規模の観測データを取得し、国際協力による環境監視に役立てるとともに、次世代地球観測システムに必要なプラットフォーム・バス技術等の開発を行うことを目的として開発された。搭載されたセンサーは ILAS の他、RIS（地上・衛星間レーザ長光路吸収測定用リトロリフレクタ）、OCTS（海色海温走査放射温度計）、AVNIR（高性能可視赤外域放射計）、NSCAT（NASA 散乱計）、TOMS（オゾン全量分光計）、POLDER（地表反射光観測装置）、IMG（温室効果気体センサー）である（図 1.2、表 1.1）。

ADEOS の主要諸元を表 1.2 に示す。ADEOS の打ち上げは 1996 年 8 月 17 日に、宇宙開発事業団 (NASDA ; National Space Development Agency of Japan) の H-II 型ロケット 4 号機により種子島宇宙センターで行われ、打ち上げ前の計画にほぼ則った軌道（傾斜角 98.6°、高度約 800km で、約 101 分かけて地球を一周する太陽同期準回帰軌道）に投入された。打ち上げ後は正常に稼働していたが、1997 年 6 月 30 日太陽電池パドルの破損による電源系統異常が発生し、データの送信が途絶した。回復の可能性は極めて低いとの判断からその後の運用を断念することになり、ADEOS による観測は、開始以来約 8 ヶ月で終了した。

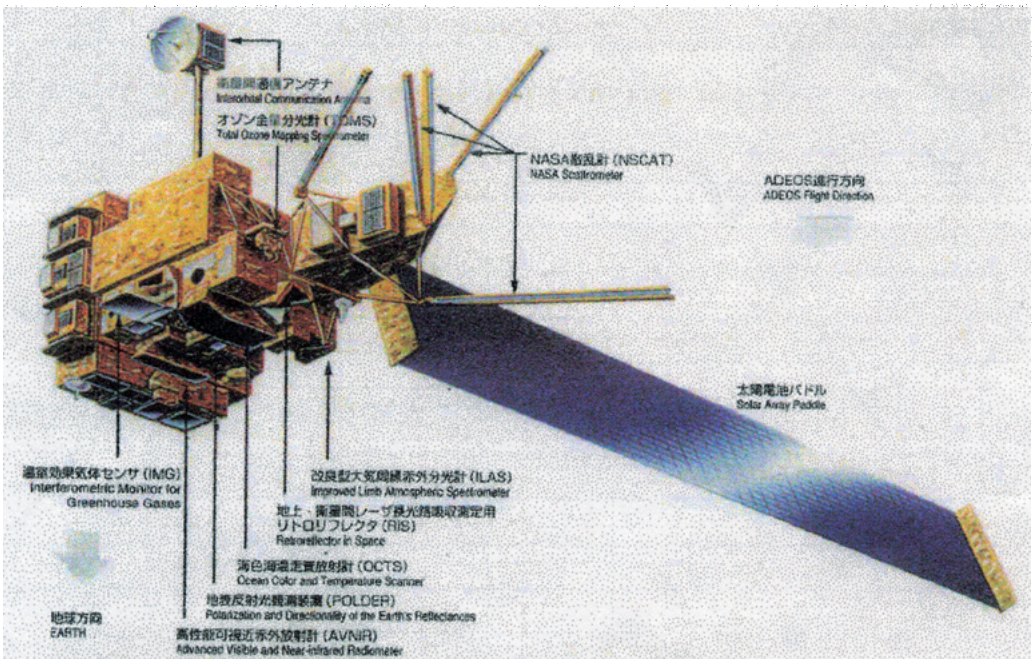


図 1.2　ADEOS 外観図（ILAS/RIS パンフレット、国立環境研究所より）

表 1.1　ADEOS 搭載センサー

センサー名	開発機関	観測目的
ILAS **(Improved Limb Atmospheric Spectrometer)** 改良型大気周縁赤外分光計	環境庁（現環境省）	極域における大気微量成分（O_3, HNO_3, NO_2, CH_4, H_2O, エアロゾル、フロン）の高度分布の測定
RIS **(Retroreflector in Space)** 地上・衛星間レーザー長光路吸収測定用リトロリフレクタ	環境庁（現環境省）	地上局上空の O_3, CO_2, フロンなどの濃度測定
OCTS **(Ocean Color and Temperature Scanner)** 海色海温走査放射計	NASDA 宇宙開発事業団	海色及び海表面温度測定
AVNIR **(Advanced Visible and Near-Infrared Radiometer)** 高性能可視近赤外放射計	NASDA 宇宙開発事業団	陸域及び沿岸域の地表面の観測
NSCAT **(NASA Scatterometer)** NASA 散乱計	NASA/JPL 米国航空宇宙局/ジェット推進研究所	海上風の風向・風速の測定
TOMS **(Total Ozone Mapping Spectrometer)** オゾン全量分光計	NASA/GSFC 米国航空宇宙局/ゴダード宇宙飛行センター	オゾン量及び二酸化硫黄のグローバルな分布
POLDER **(Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances)** 地表反射光観測装置	CNES フランス国立宇宙開発センター	地球表面や大気で反射される太陽光の偏光と方向性の測定
IMG **(Interferometric Monitor for Greenhouse gases)** 温室効果気体センサ	通商産業省	大気中の CO2, CH4, N2O その他の温室効果ガスの地域分布の測定

表 1.2　ADEOS 主要諸元

形状	一翼式太陽電池パドルを有するモジュール方式 本体　約 4×4×5（m）（ミッション、バスモジュール） 太陽電池パドル　約 3×26（m）	
重量	打ち上げ時　約 3.5 トン	
姿勢安定方式	ゼロモーメンタム三軸制御ストラップダウン方式	
設計寿命	3 年	
打ち上げロケット	H･II ロケット（5mΦフェアリング）	
打ち上げ場所	種子島宇宙センター	
打ち上げ日時	1996 年 8 月 17 日 10 時 53 分	
軌道	種類	太陽同期準回期軌道（東方移動） （周回数：14＋11/41 周／日）
	高度	796.75 k m
	傾斜角	98.59 度
	周期	100.92 分
	回帰日数	41 日
	周回数／回帰	585 周回
	最小軌道間距離	68.5 k m（赤道上）
	降交点通過地方時	午前 10 時 30 分±15 分
データ送信	直接送信及び衛星間通信（記録装置搭載）	

1.2.2 ILASの測定原理と測定対象

ILASは、対流圏上部から成層圏全体にわたるオゾン濃度やそれに関係する窒素酸化物、水酸化物などの微量成分、エアロゾルの濃度、気温・気圧の高度分布など高層大気中の化学過程、力学過程を理解する上で必要なデータを取得することを目的として、環境庁（現環境省）により開発された。ILASの主要諸元を表1.3に示す。

表1.3　ILASの主要諸元

項目		諸元等
観測波長	赤外	6.211～11.765 μ m（1,610～850cm^{-1}）
	可視	0.753～0.784 μ m（13,280～12,755cm^{-1}）
寸　法		1.630 × 800 × 550 mm
重　量		130.2 kg
消費電力		78.3 W　（運用時最大）
データレート		517 kbps
視　野（接線高度10kmの時）	赤外	2km（鉛直）× 13km（水平）
	可視	2km（鉛直）× 2km（水平）

（1）ILASの測定原理

ILASは測定法としてSAGE IIやHALOEと同様、太陽掩蔽法（solar occultation method）を採用している。太陽掩蔽法は周縁吸収測定法の一種で、太陽光が地球縁辺の大気層を通過する際に受ける吸収量をスペクトル分解して測定するものである。物質は固有の吸収波長特性を持つことから、吸収スペクトルにより光が通過した大気層に存在する物質の同定・定量化ができるが、図1.3に示すように、衛星の進行に伴って連続的に異なる高度の大気層を通過する太陽光を測定することにより、気体成分濃度が高度別に求められる。この高度とは、図中の接線高度のことで、地球中心から各光路に下ろした垂線で定義される海抜高度にあたり、ILASは約10～60kmの高度範囲を測定することができる。太陽掩蔽法の特徴としては、輝度の高い太陽を光源とすることから極めて高い精度の測定が可能であること、大気圏外での光源の測定を毎回行い、これを参照光として大気微量成分による光の減衰を求めることから、機器の劣化などの影響を受けにくく、信頼性が高いことなどがあげられる。

太陽掩蔽法では、観測位置の決定精度が大気成分の高度分布の最終的な測定精度に大きく影響する。ADEOSの位置については、週3回の軌道決定により3軸方向（地球方向、進行方向、水平方向）とも150m（3σ）の精度で決定され、時刻についても17ミリ秒という極めて高い精度で求められる。さらに、ILASは瞬時視野の位置を太陽上端からの角度で精度良く（約8秒）決定する太陽エッジセンサーを搭載しているため、観測位置を高い精度で決定することができる。

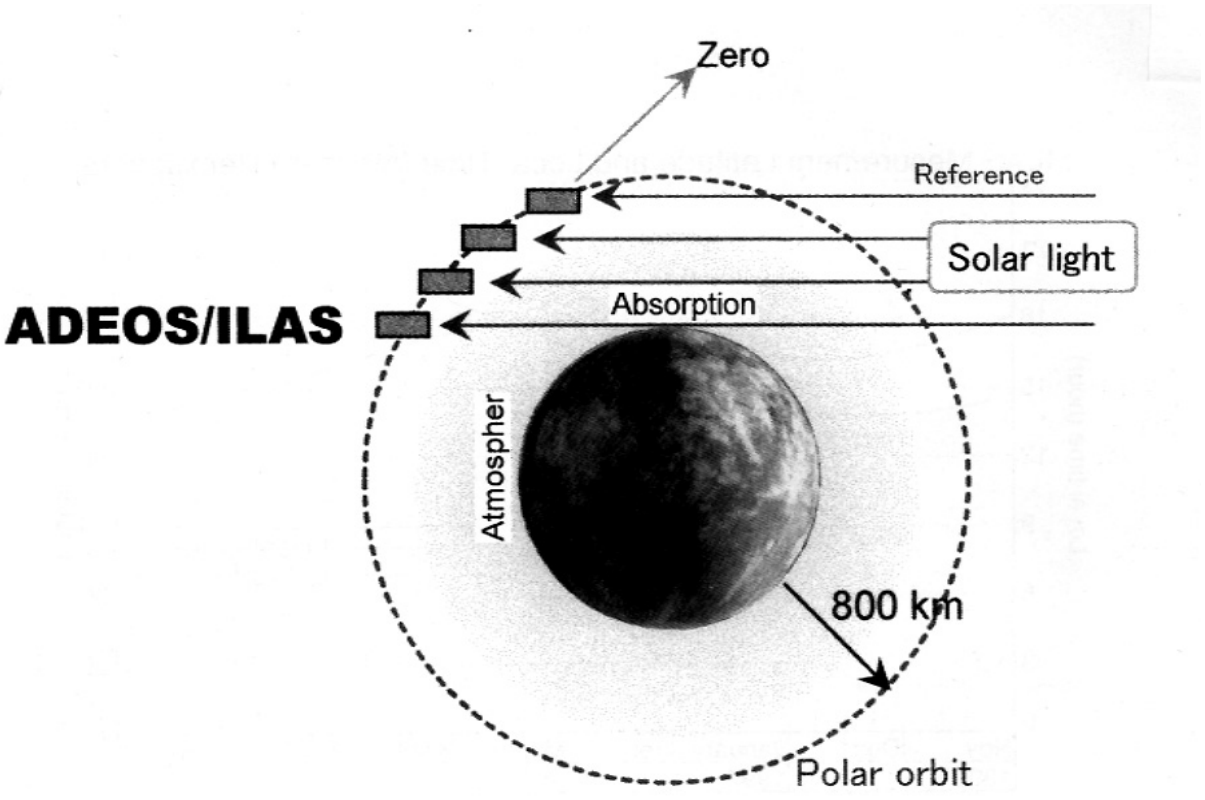


図 1.3　ILAS の観測原理（ADEOS/ILAS パンフレット、国立環境研究所より）

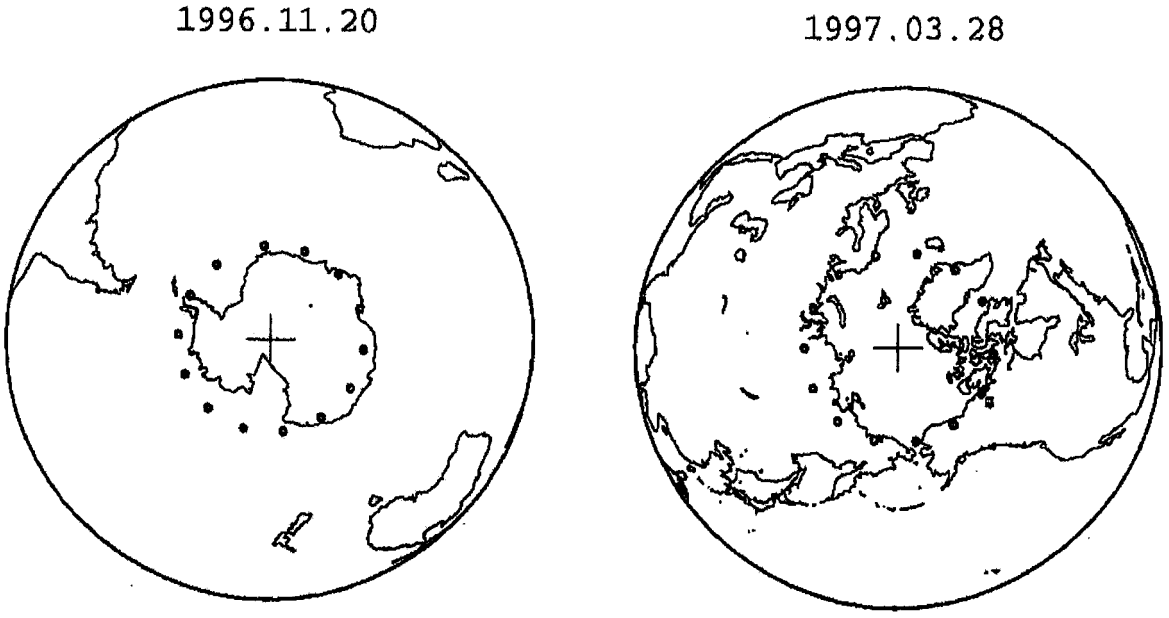
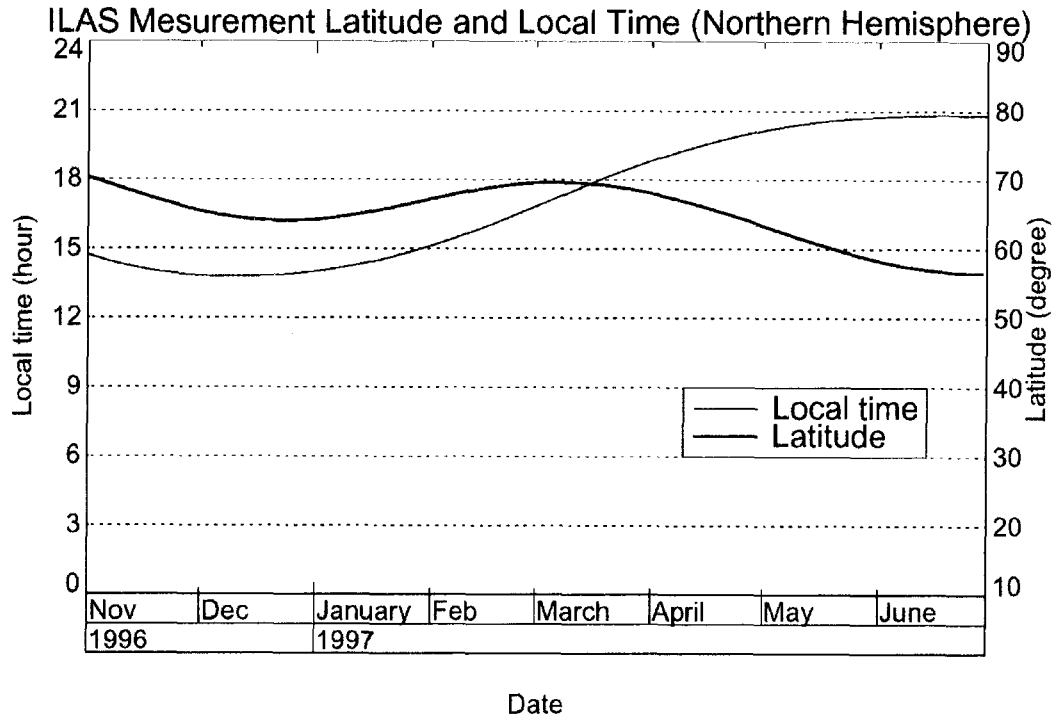


図 1.5　ILAS の測定地点
（1996 年 11 月 20 日（南半球）と 1997 年 3 月 28 日（北半球）の例）



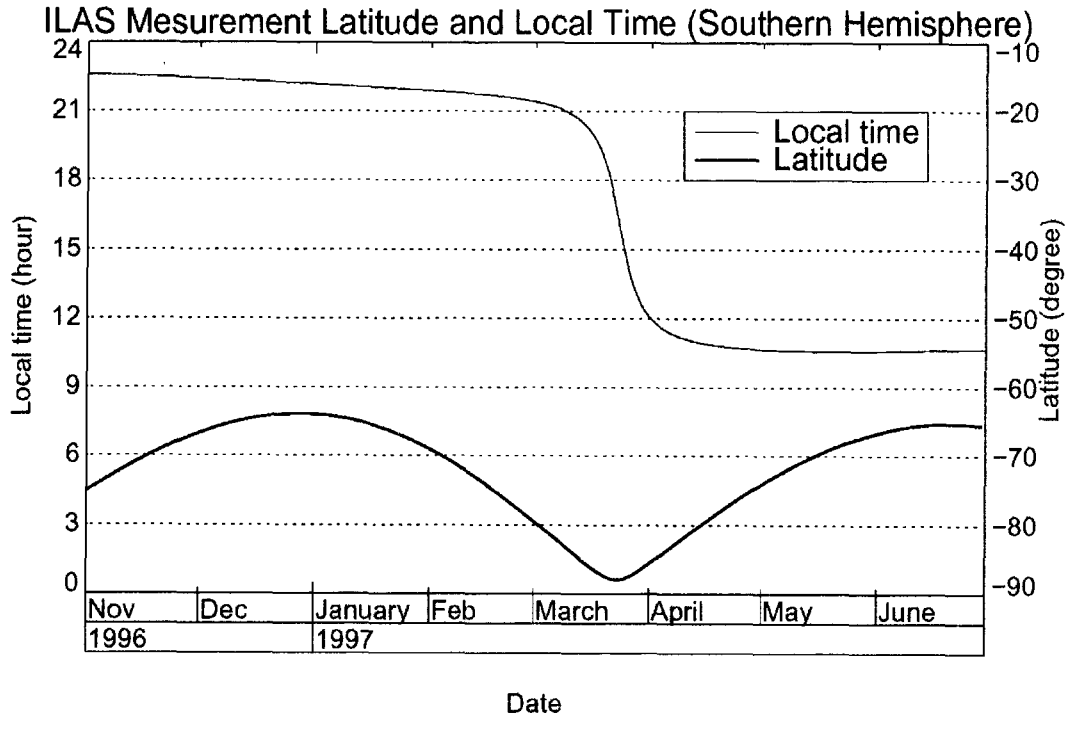


図 1.4　ILAS 測定位置の緯度（太線）と地方時での測定時刻（細線）の変化（ver.5.20）
（1996 年 11 月～1997 年 6 月）

ADEOS が太陽同期準回帰極軌道衛星であり、ILAS が太陽を光源とすることから、図 1.4 に示されるように ILAS の測定領域は南北両半球の高緯度地域に限られ、南半球では南緯 63～87 度、北半球では北緯 55～70 度である。測定緯度は太陽の赤緯によってゆるやかに年変化し、南北両半球とも春分・秋分の頃に観測位置が最も極側になり、夏至・冬至の頃に最も赤道側になる。一方、ADEOS は 1 日に地球のまわりをほぼ 14 周するため、1 日の測定点は南北両半球の同一緯度帯の円周上に各 14 地点あり、測定地点は ADEOS が地球を 1 周する毎に約 25° づつ西へずれる（図 1.5)。これらの測定位置は、地球の自転と反対向きに移動するので太陽に対しては同じ位置が保たれており、ILAS から見て北半球では常に日の出の状態、南半球では常に日の入りの状態での観測となる。

図 1.6 は ILAS の内部構造、図 1.7 は ILAS による測定の概念図である。ILAS は、太陽追尾ミラー、望遠鏡、赤外分光器／検出器、可視分光器／検出器、電子回路系から構成されている。ILAS に入射した太陽光は、２軸制御のジンバルミラー（太陽追尾ミラー）により望遠鏡光軸に導かれ、瞬時視野に相当する視野スリット上に集光される。集光された光は、まずビームスプリッタによって赤外光と可視光に分離され、赤外光は赤外分光器で分光後、焦電型リニアアレイ検出器で検出され、可視光も同様にリニアイメージセンサ（フォトダイオードアレイ）により検出される。物質はそれぞれ固有の吸収波長を持ち、分光波長域と検出器の各素子の位置が対応しているため、特定ガスの吸収の情報は吸収波長に対応する素子の出力を観測することにより得られる。

なお、ILAS のハードウェア・測定原理の詳細は、Nakajima (2001)を参照されたい。

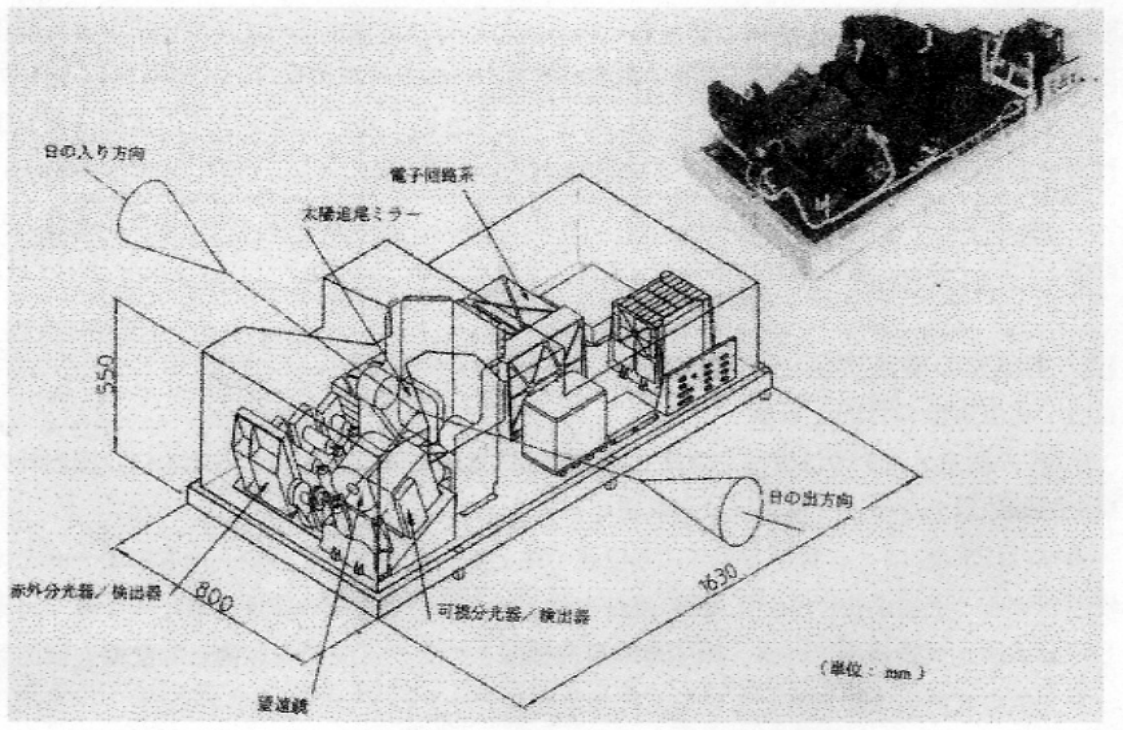


図 1.6　ILAS の内部構造

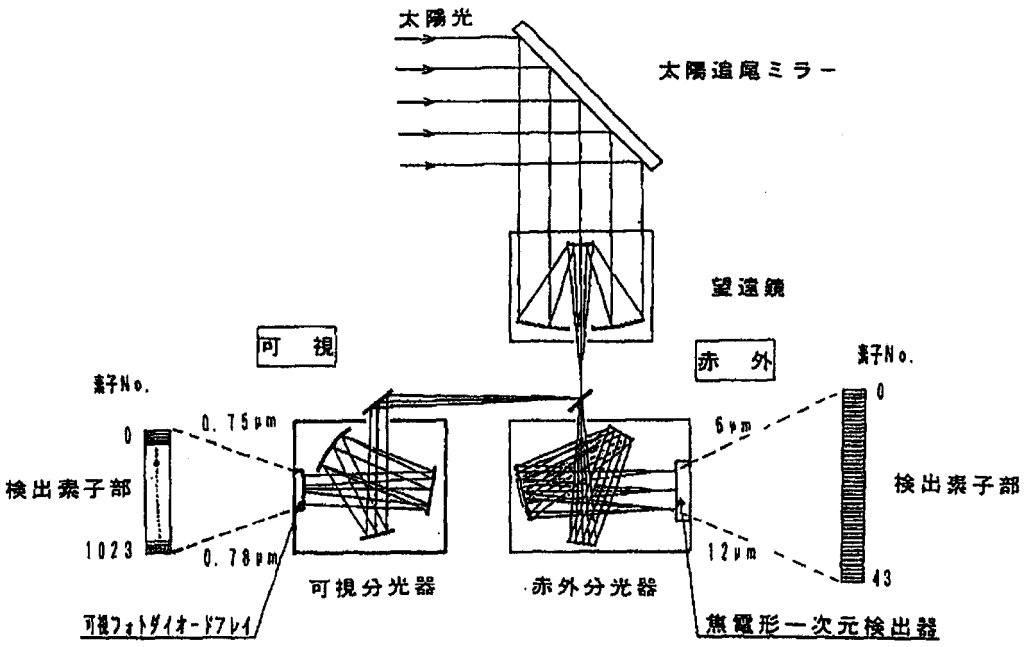


図 1.7　ILAS による測定の概念図

（2）ILAS の測定対象

ILAS は赤外波長（6.211～11.765μm）の吸収測定から、オゾン（O_3）、一酸化二窒素（N_2O）、硝酸（HNO_3）、二酸化窒素（NO_2）、メタン（CH_4）、水蒸気（H_2O）、クロロフルオロカーボン（CFC-11、CFC-12）、五酸化二窒素（N_2O_5）の濃度の高度分布、エアロゾル消散係数（7.12、8.27、10.6、11.76μm）の高度分布が得られる。ただし、クロロフルオロカーボンと五酸化二窒素については、高度分解能や測定精度が劣る。一方、可視波長（0.753～0.784μm）の吸収測定からは、酸素分子による吸収に着目することにより、気温と気圧の高度分布およびエアロゾル消散係数（0.780μm）が導出される。

なお、ILAS による測定対象高度範囲は約 10～60km、高度分解能（瞬時視野の高度方向の幅）は約 1.6km、水平視野は赤外が 13km、可視が 2km である。

1.3　ILAS の検証実験と CMDB

1.3.1　検証実験の目的と概要

ILAS の測定データの信頼性を確認し、科学的に意義のあるものにするために、国内外の研究機関の協力を得て、検証実験が計画され遂行された。

検証は、ILAS による測定と同時に同位置で地上等からの測定を行い、両者のデータを比較検討することにより行う。ILAS の検証実験データは、環境庁（現環境省）の予算で実施したコア検証実験観測データ、国内外の研究機関とのデータ交換を原則とした協力観測データ、気象観測機関が実施している定常気象観測データの 3 つに区分される。

（Ⅰ）コア検証実験

環境庁（現環境省）のILASプロジェクト経費によるもので、国内外の研究機関や観測機関への委託による観測も含んでいる。

（Ⅱ）協力観測

国内外の研究機関、観測機関の独自の予算によって実施された観測で、ILASデータと協力観測者の測定データの交換を行うことを原則としている。

（Ⅲ）定常気象観測

一般に気象観測機関が実施している国際的かつ定常的な観測で、データが公開されているものをさす。主にWMOのルーチン観測網による観測がこれに当たり、日本では気象庁から気象業務支援センターを介してデータを入手できる。

コア検証実験の観測地点は、北極域ではスウェーデンのKiruna (68N, 20E)及びアメリカのFairbanks (65N, 148W)、南極域では昭和基地 (69S, 40E)及びArrival Heights (78S, 167E)である。ただし、Arrival Heightsについては、従来の観測の結果を入手するという形である。このうちKirunaにおける実験はフランスの宇宙研究センター (CNES) と共同で行った大規模な気球キャンペーンで、日仏の研究者グループおよび、ドイツ、アメリカのグループなど計16グループが参加した。

協力実験の観測地点は、北極域ではFairbanksの他、ロシアのYakutsk (62N, 130E)、Zhigansk (67N, 127E)、グリーンランドのScoresbysund (71N, 27W)、ノルウェーのALOMAR (69N, 16E)、フィンランドのSodankyla (67N, 26E)、南極域では昭和基地の他、ロシアのMirny (66S, 93E)、フランスのDumont d'Urville (67S, 140E)、アメリカのMcMurdo (78S, 166E)、ドイツのNeumayer (71S, 8W)、中国のZhongshan (69S, 77E)である。これらの観測地点の位置を図1.8に示す。

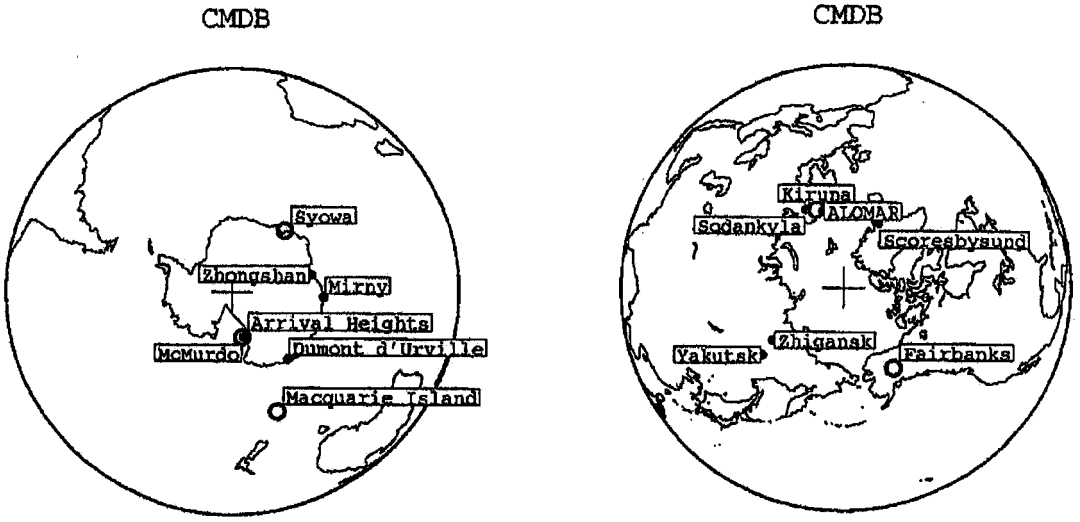


図1.8　コア検証実験、協力実験の観測地点

（○：コア検証実験、●：協力実験）

検証実験は、得られるデータのタイプから鉛直プロファイルの測定、及びカラム全量の測定の２種類に大別できる。

① 鉛直プロファイルの測定

Kiruna における気球キャンペーンでは、ILAS が測定する全ガスと気象要素についての鉛直プロファイル測定が行われたほか、数地点でオゾンゾンデ、エアロゾルゾンデ、ライダーによるオゾン・エアロゾル・気温・水蒸気の鉛直プロファイルの測定が行われた。

② カラム全量の測定

FTS、UV 可視分光計、レーザーヘテロダイン分光計、ドブソン分光計などにより、地上でのオゾン量等の測定が行われた。

南極域と北極域についての ILAS 検証実験の概要を、それぞれ表 1.4、表 1.5 に示す。また、表 1.6 は検証実験で使われた主な観測機器のリストである。

表 1.4　ILAS 検証実験の概要（南極域）

観測地点名	観測位置	観測方法	観測機器
Macquarie Island	55S, 159E	**Ground based**	**UV-visible**
Mirny	66S, 93E	Ground based	Photometer ABAS
Dumont d'Urville	67S, 140E	Ground based Ground based Ground based	SAOZ (UV-visible) Ozone lidar Rayleigh/Mie lidar Small balloon Ozonesonde
Syowa	69S, 40E	**Ground based** Ground based Ground based **Small balloon**	**UV-visible** Photometer EKO 120 Photometer SP-1A **Ozonesonde**
Zhongshan	69S, 77E	Ground based Ground based Small balloon	Brewer and UV-spectrometer Mie ruby lidar Ozonesonde
Neumayer	71S, 8W	Ground based Small balloon Small balloon	Photometer SP-2H ECC ozonesonde Radiosonde
Arrival Heights	78S, 167E	**Ground based** **Ground based** **Ground based**	**UV-visible** **Dobson spectrophotometer** **FTS**
McMurdo	78S, 166E	Balloon Small balloon	Aersol counter Ozonesonde

注）太字はコア検証実験を示し、細字は協力観測を示す。

表 1.5　ILAS 検証実験の概要（北極域）

観測地点名	観測位置	観測方法	観測機器
Scoresbysund, Greenland	71N, 27W	Ground based	SAOZ (UV-visible)
ALOMAR, Norway	69N, 16E	Ground based	Rayleigh/Mie/Raman lider
Kiruna, Sweden	68N, 21E	**Balloon**	**CLD** (Chemiluminescence Detector)
		Balloon	**ECC ozonesonde**
		Balloon	**Aerosol counter**
		Balloon	**CAESR** (IR radiometer)
		Balloon	**ASTRID** (Grab sampler)
		Balloon	**BONBON** (Cryogenic sampler)
		Balloon	**SAKURA** (Cryogenic sampler)
		Balloon	**LPMA** (FTS)
		Balloon	**DOAS**(Optical absorption spectroscopy)
		Balloon	**SAOZ** (UV-visible solar occultation)
		Balloon	**ELHYSA** (Hygrometer,Aerosol counter)
		Balloon	**RADIBAL/BALLAD/BOCCAD**
		Balloon	**AMON** (Star occultation)
		Balloon	**MIPAS-B** (FTS)
		Balloon	**FISH** (Hygrometer)
		Balloon	**BROCOLI** (ClO/BrO monitor)
		Balloon	DESCARTES (Grab sampler)
		Small balloon	**Frost point hygrometer**
		Small balloon	**ECC ozonesonde**
		Ground based	**FTS**
		Ground based	**UV-visible**
		Ground based	Rayleigh/Mie/Raman lidar
		Ground based	University of Bonn lidar
		Aircraft	Sub-millimeter wave sensors
		Aircraft	NOx/NOy/O3-Measuring System
		Aircraft	HAAMAS (Mass Spectrometer)
		Aircraft	TRISTAR (Infrared Absorption spectroscopy)
		Aircraft	FISH(Lyman-alpha photofragment fluorescence)
Sodankyla, Finland	67N, 26E	Ground based	SAOZ (UV-visible)
Zhigansk, Russia	67N, 127E	Ground based	SAOZ (UV-visible)
Fairbanks, USA	65N, 148W	**Ground based**	**TDLHS**(Laser heterodyne spectrometer)
		Ground based	**Rayleigh/Mie lidar**
		Ground based	FTS
		Balloon	SAO FIRS-2 Interferometer
		Balloon	JPL Mk IV Interferometer
		Balloon	JPL ozone photometer
		Balloon	JPL SLS spectrometer
		Balloon	DU CAESR spectrometer
		Balloon	Aerosol sampler
		Small balloon	ECC ozonesonde
		Aircraft	Chemiluminescence/ER-2
		Aircraft	UV ozone photometer/ER-2
		Aircraft	Lyman-alpha hygrometer/ER-2
Yakutsk, Russia	62N, 130E	Ground based	TDLHS (Laser heterodyne spectrometer)
		Ground based	Brewer spectrophotometer
		Small balloon	Ozonesonde,Optical hygrometer, Backscattersonde (with Ozone, Radiosonde)

注）太字はコア検証実験を示し、細字は協力観測を示す。

表 1.6 検証実験で使われた主な観測機器

観測方法	区　分	種　　類	観　測　機　器　名
Ground Based	Spectrometer	Dobson Spectrophotometer*	
		Brewer Spectrophotometer*	
		FTS (Fourier Transform Infrared Spectrometer)	
		TDLHS (Tunable Diode Laser Heterodyne Spectrometer)	
		UV-Visible spectrometer*	SAOZ
	Lidar	Ozone lidar	
		Mie lidar	Mie ruby lidar
		Rayleigh/Mie lidar	Rayleigh/Mie/Raman lidar
		Lidar	Univ. Bonn lidar
	Others	Photometer*	Photometer ABAS
			Photometer EKO 120
			Photometer SP-1A
			Photometer SP-2H
Baloon	Sonde	Ozonesonde	ECC ozonesonde
		Aerosol sonde	
		Radio sonde	
		Backscatter sonde	
		Hygrometer	ELHYSA
			FISH
			Frost point hygrometer
			Optical hygrometer
	Spectrometer	Spectrometer	JPL SLS spectrometer
			DU CAESR spectrometer
		FTS (Fourier Transform Infrared Spectrometer)	LPMA
			MIPAS-B
		UV-Visible solar occultation	SAOZ
		UV-Visible star occultation	AMON
		Interferometer	SAO FIRS-2 Interferometer
			JPL Mk IV Interferometer
	Radiometer	IR radiometer	CAESR
	Sampler	Cryogenic sampler	BONBON
			SAKURA
		Grab sampler	ASTRID
			DESCARTES
	Others	CLD (Chemiluminescence Detector)	
		Aerosol counter	ELHYSA
		Optical absorption spectroscopy	DOAS
		ClO/BrO monitor	BROCOLI
		Photometer	JPL ozone photometer
			RADIBAL
Aircraft	Spectrometer	Mass spectrometer	HAAMAS
		Infrared absorption spectroscopy	TRISTAR
	Photometer	Photometer	UV ozone photometer/ER2
	Hygrometer	Hygrometer	Lyman-alpha hygrometer/ER2
		Lyman-alpha photofragment fluorescence	FISH
	Others	Sub-millimeter wave sensors	
		$NO_x/NO_y/O_3$-Measuring system	
		Chemiluminescence	Chemiluminescence/ER2

* 印は気柱量のみを測定するもの。他はすべてプロファイルを測定できる。

検証実験で用いられた主な観測機器の特徴を以下に示す。

UV-Visible

AMON : Steller occultation method (UV-visible spectrometer)

恒星（シリウス）を光源とした掩蔽法を利用する、紫外－可視分光計。反転法によって大気微量成分の鉛直プロファイルに必要な情報が抽出される。

SAOZ : UV-visible spectrometer using solar occultation

気球搭載型のダイオードアレイ分光計。分光分解能は0.8nm。太陽掩蔽法を採用しており、紫外域・可視域（290～630nm）を対象とする。

Sampler

SAKURA : Balloon-borne cryogenic sampler

極低温サンプラー。大気を直接採取する機器。気球を所定の高度まで浮揚させて試料を採取した後、実験室に持ち帰り、ガスクロマトグラフで一酸化二窒素、メタン、フロン11、フロン12の濃度を求める。

BONBON : Whole air sampler (cryosampler)

低温サンプラー。1回のフライトで15～16の試料を採取して実験室に持ち帰り、ガスクロマトグラフィーで分析する。一酸化二窒素、メタン、フロン11、フロン12を含め、何種類もの微量ガスを分析することができる。

ASTRID : Whole air sampler (grabsampler)

グラブサンプラー。限られた種類のガス、たとえば一酸化二窒素、フロン11、フロン12などを分析できる。

Aerosol Counter

Optical counter

ワイオミング大学の気球搭載型エアロゾルカウンター。チャンバーを通過する個々の粒子による散乱光を測定して光学的に粒子をカウントする。凝結核の濃度も測定できる。粒径毎の濃度から粒径分布が推測できる。

ELHYSA : Balloon borne hygrometer and aerosol counter

霜点湿度計とレーザーダイオードエアロゾルカウンター。湿度計は冷却した鏡面につく霜を光学的に検知することにより湿度を求める。エアロゾルカウンターは、レーザーを照射されている検知器の中を粒子が通過するときの前方散乱光の強度を測定してエアロゾル濃度を求める。粒径の範囲は、0.3～3μm、測定精度は粒径の決め方にもよるが、10～3個／cm^3のときは80%、1個／cm^3のときは20%である。

Spectrometer

LPMA : Limb Profile Monitor of the Atmosphere

気球搭載型赤外分光計（FTIR）で、フランスCNESのCamy-Peyret博士らのグループによって開発された。分光器としてマイケルソン型干渉計を使用し、検知器と

してはHgCdTe及びInSbを使用している。これらの検知器は液体冷却窒素型である。観測原理としては太陽掩蔽法を採用しており、太陽を光源として地球大気の赤外スペクトルを測定する。

MIPAS-B : Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding Balloon experiment

センサーは気球搭載型低温フーリエ変換型赤外分光計（FTIR)。分光にはマイケルソン型干渉計が用いられている。周縁放射観測によって、大気微量成分の鉛直分布を得る。

Hygrometer

FISH : Fast In-situ Stratospheric Hygrometer

高速応答型成層圏湿度計。ライマンーアルファ蛍光を利用した湿度計で、平均時間で0.2ppmvの水蒸気量の変化を感知できる。

Others

RADIBAL : Photopolarimeter

偏光光度計。気球の上昇・下降時に、いろいろな散乱角での大気による散乱光の放射輝度と偏光比を測定する。1650nmと850nmの測定ダイアグラムからエアロゾルの屈折指数と粒径分布が求まる。

CLD : Chemiluminescence Detector

蛍光放射検出器。化学反応によって生じる化学蛍光（Chemiluminescence）の放射強度が、一酸化窒素の濃度に比例することを利用して濃度を測定する。検証実験で使用したのは気球搭載型。

1.3.2 CMDBの概要

CMDB (Correlative Measurement Data Base)は、ILAS検証実験データを収集・保存したデータベースで、ILAS研究者を対象に、研究用としての検証実験データおよびその他の相関観測データを提供するために構築されたもので、1997年9月に発足した。このデータベースの基本的なコンセプトは、各研究グループの代表とプロジェクトリーダーの間で取り交わされたMOU (Memorandum of Understanding for Participating in the ILAS Project)に記載されている。CMDBの管理はプロジェクトリーダーが指名したILASデータマネージャーが行い、提供されたデータはデータ評価委員会によってデータファイルの形式的な面を中心に点検・評価された後、データマネージャーによってCMDBへの登録を決定される。当初、CMDBの利用資格はILAS MOUの定めるところにより、①データを提供した検証実験チームのメンバー、②検証解析チーフ、および③ILASプロジェクトのスタッフサイエンティストの3カテゴリーに限られていた。しかしその後、利用資格枠は1997年12月からILASサイエンスチームメンバー、さらに1998年4月にはILAS公募研究(JRA; Joint Research Announcement)のPI (Principal Investigator)に拡大された。ただし、このデータをILAS検証解析その他の研

究に使用し、それを公表する際には、MOUに基づき当該データ提供者の書面による了解が必要である。

1.3.3 CMDの登録・利用状況

CMD (Correlative Measurement Data)として登録されているデータは、①コア検証実験データ、②協力実験データである。最新のCMD保管情報は、ILASホームページのCMDBページ中にCMDB Registration Informationとして掲載されている。

1996～1997年度に実施されたILAS検証実験のうち、2001年8月までにCMDBに登録されたコア検証実験データおよび協力実験データの一覧をそれぞれ表1.7、表1.8に示す。

表1.7　CMDBに登録されているILASコア検証実験データの一覧
(2001年8月31日現在)

登録日	PI	観測機器	観測点	観測項目
【南極域】				
97/12/18	Wood	FTS	Arrival Heights	column HNO_3, HCl
99/04/07	Wood	UV/vis monochromator	Arrival Heights	slant column densities and vertical column NO_2
00/04/06	Kanzawa	Ozonesonde	Syowa	O_3, T
【北極域】				
97/09/12	Deshler	Ozonesonde UW-optical counter	Andoya,Kiruna	O_3, Aerosols, etc.
97/09/12	Kanzawa	Ozonesonde	Kiruna	O_3, T, etc.
97/10/07	Overlez	ELHYSA	Kiruna	Aerosols size distrtibution
97/10/07	Overlez	Frostpoint Hygrometer	Kiruna	H_2O, T
97/10/21	Brogniez	RADIBAL	Kiruna	Aerosols
97/10/21	Schiller	FISH	Kiruna	H_2O
97/10/24	Renard	AMON	Kiruna	O_3, NO_2, Aerosols
97/12/04	Engel	Whole air samplers	Kiruna	N_2O, CFC11/12, T, etc.
97/12/04	Pommereau	SAOZ	Kiruna	O_3, NO_2, P, T, etc.
97/12/18	Kondo	Chemiluminescence detecter	Kiruna	O_3, NO_y, Aerosols, T
98/01/09	Camy-Peyret	LPMA	Kiruna	O_3, CH_4, H_2O, NO_2, N_2O, etc.
98/05/13	Oelhaf	MIPAS	Kiruna	CH_4, H_2O, HNO_3, NO_2, N_2O
98/08/06	Nakazawa/Aoki	Cryogenic sampler	Kiruna	CH_4, N_2O, CFC11/12
98/04/28	Iwasaka	Aerosol lidar	Pokerflat	Aerosols
98/04/07	Pfeilsticker	DOAS	Kiruna	O_3, NO_2
98/07/14	Fukunishi	TDLHS	Pokerflat	O_3, N_2O
99/04/19	Goutail	SAOZ,UV/VIS spectrometer	Andoya,Kiruna	O_3, NO_2
99/04/19	Johnston	UV/VIS monochromator	Kiruna	slant column densities and vertical column densities O_3, NO_2

表 1.8　CMDB に登録されている ILAS 協力実験データの一覧
(2001 年 8 月 31 日現在)

登録日	PI	観測機器	観測点	観測項目
【南極域】				
97/12/10	Gernandt	Ozonesensor Radiospnde	Neumayer	O_3, H_2O, T, etc.
97/12/24	Godin	Lidar	Dumontd'Urville	O_3, T, P
98/01/22	Goutail	Ozonesonde	Dumontd'Urville	O_3, T
【北極域】				
97/11/12	Margitan	UV Photometer	Fairbanks	O_3, P
98/02/10	Thomas	FTIR	Kiruna	Total column O_3, HNO_3, NO_2
98/03/13	Hauchecorne	R/M Raman Lidar	ALOMAR	T
98/03/13	Schlager	POLSTAR/FISH, etc.	Kiruna	O_3, NO_2
98/03/20	Kuellmann	Airborne Submillimeter	Kiruna	O_3, N_2O
98/09/08	Yushkov	Ozonesonde	Yakutsk	O_3
98/02/10	Traub	FIRS-2	Fairbanks	O_3, H_2O, N_2O, etc.
99/02/26	Proffitt	POLARIS	Arctic area	O_3, CH_4, H_2O, NO_2, HNO_3, N_2O, N_2O_5, CFC11/12, Aerosols, T, P
99/03/24	Toon	MkIV	Fairbanks	O_3, CH_4, H_2O, NO_2, HNO_3, N_2O_5
99/03/31	Stachnik	SLS	Fairbanks	ClO, O_3, HCl
99/04/19	Shibasaki	Ozonesonde	Fairbanks	O_3

1.4　ILAS データの処理・提供のしかた

宇宙開発事業団（NASDA）地球観測センターで受信された ILAS の測定データは、国立環境研究所内に設置されている「ILAS / ILAS II 衛星データ処理運用施設」（ILAS / ILAS II DHF (Data Handling Facility)）に転送され、処理・解析がなされた後、プロジェクト関連研究をはじめ、その他一般ユーザー等に提供される。

1.4.1　ILAS データの処理

NASDA 地球観測センターから送信されてくる ILAS ミッションデータ（レベル 0）は、DHF のデータ処理サブシステムにおいて処理される。データ処理の過程は、事前処理、レベル 0→1 処理、レベル 1→2 処理及び後処理の 4 段階に大別される（表 1.9)。

事前処理は、P－T テーブル、装置特性テーブル、太陽光源テーブル等の計算・作成と参照用標準大気モデルの作成、ミッションデータ処理に必要な計算条件等の設定を行うもので、初期設定時及び変更が必要な時にのみ行われる。

レベル 0→1 処理の段階では、観測データの有効成分の抽出、スパイクノイズの除去等の異常値・欠測値の処理、相対輝度電圧補正、観測時刻及び衛星位置データからの観測位置決定を行う。

レベル 1→2 処理の段階では、気温・気圧、エアロゾル消散係数、ガス成分濃度等の算出を行う。まず、可視チャンネル透過率スペクトルデータをエアロゾル・空気分子の散乱による寄与分と酸素分子の吸収による寄与分とに分離する。分離はベースラインを推定し、それに基づいて行われる。次に酸素分子の吸収スペクトルから非線形最小二乗法により、

気温と気圧のプロファイルを導出する。導出された気温・気圧データ*2 からレイリー散乱分を計算し、酸素の吸収以外の寄与分からレイリー散乱の寄与分を差し引くと、残りはエアロゾルによる透過率となる。これから、エアロゾル消散係数のプロファイルを高度方向のインバージョン（反転）により求める。

赤外チャンネルデータからは、すでに求められている気温・気圧のプロファイルを利用して、赤外エアロゾルと吸収気体のプロファイルを導出する。まず、赤外の窓チャンネルと呼ばれる 4 素子におけるエアロゾル消散係数を導出し、次に赤外全素子分のエアロゾル消散スペクトル（ベースライン）を推定する。次に吸収気体（O_3, HNO_3, N_2O, CH_4, NO_2, H_2O 等）の体積混合比の高度分布を未知パラメータとして、大気上層から下層に向かって順次導出する。各高度では、非線形最小二乗法により複数の未知パラメータの値が同時に導出される。

後処理は、必要に応じてログ情報の抽出・編集及びログ情報リストの出力等を行う。

表 1.9　ILAS データの処理

区　　分	概　　要
事前処理	P－T テーブルの計算・編集 装置特性テーブルの計算 太陽光源テーブル作成 計算条件等の設定
レベル 0→1 処理	観測データの有効成分の抽出 異常値・欠測値の処理 相対輝度電圧補正 観測位置の計算
レベル 1→2 処理	気温・気圧の算出 エアロゾル消散係数の算出 ガス成分濃度の算出
後処理	ログ情報の編集

表 1.10 に ILAS のデータレベルとその内容を示す。観測データ（レベル 0）は、DHF に転送された後処理されるが、処理されたデータは、その処理される段階によって、レベル 0、レベル 0a、レベル 0b、レベル 1 及びレベル 2 に区分される。また、軌道データを予測値で示すデータも DHF に転送される。これは、軌道予測値を用いて予備的に処理されるもので、データ質等を迅速に把握することを目的としている。なお、レベル 2 のデータ量は 1 日分で 2 MB 程度、1 年で 700MB 程度である。

表 1.10　ILAS のデータレベルとその内容

レベル	内　　容	
レベル 0	地球観測センターから提供される ILAS 観測データ	(軌道:決定値)
レベル 0'	地球観測センターから提供される ILAS 観測データ	(軌道:予測値)
レベル 0a	0%、100%、有効部観測データの抽出済みデータ	(軌道:決定値)
レベル 0a'	0%、100%、有効部観測データの抽出済みデータ	(軌道:予測値)
レベル 0b	異常値／欠測値処理済みデータ	(軌道:決定値)
レベル 0b'	異常値／欠測値処理済みデータ	(軌道:予測値)
レベル 1	相対輝度電圧値補正済みデータ	(軌道:決定値)
レベル 1'	相対輝度電圧値補正済みデータ	(軌道:予測値)
レベル 2	リトリーバル処理結果データ (各観測地点毎の大気微量成分濃度、物理量と、 その測定誤差の鉛直分布データ)	(軌道:決定値)
レベル 2'	リトリーバル処理結果データ (各観測地点毎の大気微量成分濃度、物理量と、 その測定誤差の鉛直分布データ)	(軌道:予測値)

1.4.2　ILAS データの提供

DHF において処理されたデータが研究者等に提供されるまでには、データ質評価、検証解析、機器トレンド評価などの作業が行われる。このため、データ利用目的、研究者登録区分によって、データの提供に際しての条件が異なる。

定常的なデータ質の評価は、測定対象パラメータ（例えば、オゾン等の高度分布）の平均的な値（ILAS データ質評価用参照大気モデルデータと呼ばれる）と予想される変動幅についてあらかじめデータセットを用意しておき、処理された個々のデータが、その変動幅の中に入っているかどうか自動的に判定することが行われる。仮に、自動判定で警告が出された場合には、データ質評価の担当者がその原因を調査し、自然現象であるか、機器の異常によるものであるか等の検討を行う。

検証解析は、前節で述べた検証実験等で取得されたデータを用いて行われるもので、現在進行中である。未検証データはすでに提供が行われているが、検証済みデータの提供は、検証解析の完了後になる。

機器トレンド評価は、機器自身の劣化等の影響を調べるために、12 ヶ月程度の期間のデータを時系列的に評価するものである。

データ利用の目的は、アルゴリズム研究、検証実験・解析、データ利用解析研究に大きく分けられる。研究者はプロジェクトスタッフ（国立環境研究所）、プロジェクト検討委員を含むサイエンスチーム、公募研究者、検証実験チーム、その他一般研究者に区分される。あらかじめ登録された研究者に対するデータ検索、取得要求、提供配布は、オンライン、オフラインのいずれも可能であり、一般の研究者等についてもオフラインだけでなく、ILAS ホームページを通してのデータ検索、取得要求が可能である。ただし、近年の実状は、すべて Web 上でのデータ提供になっている。データ提供条件に係る詳細は、国立環境研究所

ILASプロジェクトオフィスから入手することができる。また、データフォーマット等についての詳細については、「ILASユーザーズハンドブック第1.0版」に記載されている。

1.4.3 ILASホームページ

ILASホームページのURLはhttp://www-ilas.nies.go.jpである。ホームページ上では、ILASやILASプロジェクトの内容が紹介されている他、データの検索や取得ができる。以下にILASホームページの内容（日本語バージョン）を示す。

トップページ

新着情報

プロジェクトリーダーからのニュース、プロダクトの登録・更新情報、ニュースレター発行情報など

ILASプロジェクト

「ILASによる高層大気環境の観測」笹野泰弘

"ILAS project; ILAS instrument, performance and validation plan" Y. Sasano *et al.*

ILASおよびILAS-II関係者による学会発表等

April 1999 to March 2000
April 1998 to March 1999
April 1997 to March 1998

ILASプロジェクトメンバーの一覧（英語のみ）

ILAS Project Managing Office
ILAS Project Staff
ILAS Project Advisory Committee
ILAS Science Team
JRA PIs and Co-Is
ILAS Validation Experiments Team
French Balloon Campaign Team
Contractors
Others related

ILASプロジェクトスタッフのスナップ写真（英語のみ）

現在の状況

現在の状況

プロジェクトリーダーからのニュース（英語のみ）

データ検索・注文（英語のみ）

データ検索・画像データ提供

ADEOSの運用断念

記者発表文

ILASデータギャラリー（英語のみ）

オゾン濃度プロファイル（初期チェックアウトデータ）

ILAS初データ取得結果

ILAS/ILAS-II ニュースレター

ILAS/ILAS-II　ニュースレターバックナンバー
目次一覧およびキーワード検索

ILAS Science Team News　No.0 – No.18
ILAS NEWSLETTER No.19 – No.48
ILAS/ILAS-II NEWSLETTER No.49 – No.53

ILAS 成果集パンフレット（英語版）

ILAS & RIS DHF

What is DHF?
Software Systems
Data Processing and Management
Block Diagram
Functions
DHF Computers
Computer system configuration
Specification
Status of operation and Future plans of DHF
Contact to ILAS & RIS DHF

ドキュメント・出版物

Publications (HTML, PDF)
ILAS overview paper (Sasano *et al.*, G.R.L., **26**, 197-200,1999)
Ozone profile above Kiruna (Kreher *et al.*, G.R.L., **26**, 715-718,1999)
ILAS V3.10 ozone validation paper (Sasano *et al.*, G.R.L., **26**, 831-834,1999)
Comparison of ILAS and HALOE ozone (Lee *et al.*, G.R.L., **26**, 835-838,1999)
Comparison of aerosol extinction between ILAS V3.10 and SAGE II (Burton *et al.*, G.R.L., **26**,1719-1722,1999)
平成 10 年度 ILAS&RIS プロジェクト報告（PDF）
平成 9 年度 ILAS&RIS プロジェクト報告（PDF）
平成 8 年度 ILAS&RIS プロジェクト報告（PDF）
ILAS ユーザーズハンドブック第 1.0 版（PDF / PS）
ILAS Correlative Measurement Plan (PDF / PS)
Memorandum of Understanding for Participating in the ILAS Project (MOU) (PDF / PS)
Correlative Measurement Data Registration Manual (PDF / PS)
Guideline for writing papers on ILAS validation

Web 利用状況

ILAS Web 総アクセス状況
ILAS Web 月別アクセス状況

メール

データ提供についての問い合わせ先
ILAS プロジェクトについての問い合わせ先
ILAS ニュースレターに関するコメント・提案、または記事についての送付先
本ドキュメントに関するコメント・提案等についての送付先

Validation Experiments

Measurement Location Prediction
Validation Experiment Plan
Validation Calendar and Map

ILAS CMD Registration

CMDB Registration Information
MOU for participation to ILAS Project (pdf)
CMDB Registration Manual

ILAS Data Search and Ordering

【Project Members】

ILAS Products Inventory Search and Order
Ver.5.23, 5.20, 5.10/5.11/5.12, 4.22, 4.21, 4.20, 3.47, 3.10, 3.00, 2.00, 1.00

ILAS and Correlative Measurement Plots
Comparison plots for ILAS (ver.5.20, 4.20, 3.10) with Kiruna/Syowa ozonesondes and satellites (SAGE II, HALOE, POAMII, MLS) data
Comparison plots for ILAS (ver.5.10, 4.20, 3.10) with Kiruna/Syowa ozonesondes and satellites (SAGE II, HALOE, POAMII) data

ILAS (Ver.05.23) Image Browser
Altitude vs Longitude Cross Section (one-day plot)
Time vs Altitude Cross Section (3-week plot)
Time vs Altitude Cross Section (12-week plot)

ILAS (Ver.05.20) Image Browser
Altitude vs Longitude Cross Section (one-day plot)
Time vs Altitude Cross Section (3-week plot)
Time vs Altitude Cross Section (12-week plot)
Time vs Altitude Cross Section (8-month plot)

ILAS (Ver.05.11 & 05.10) Image Browser
Altitude vs Longitude Cross Section (one-day plot)
Time vs Altitude Cross Section (3-week plot)
Time vs Altitude Cross Section (12-week plot)
Time vs Altitude Cross Section (8-month plot)

ILAS (Ver.04.20) Image Browser
Altitude vs Longitude Cross Section (one-day plot)
Time vs Altitude Cross Section (3-week plot)
Time vs Altitude Cross Section (12-week plot)

Link to General Users page (ver.4.20 and ver.3.10 Products Inventory Search and Image Browser)
ILAS Overview
About ILAS Version 4.20 Products Overview
About ILAS Version 3.10 Products Overview
ILAS Publications
ILAS Data You Can Get
User Registration
ILAS Digital Data Download and Profile Graphs
ILAS Image Browser
Altitude vs Longitude Cross Section (one-day plot) : ver.4.20, 3.10
Time vs Altitude Cross Section (12-week plot): ver.4.20
Time vs Altitude Cross Section (3-week plot): ver.4.20, ver.3.10

UKMO Products Inventory Search (ver.3.10 ILAS measurement location)
Temperature, Pressure, Potential temperature, Potential vorticity
* On Dec.15,1998, revision was made for the UKMO temperature and pressure data sets.

UKMO Products for Correlative Measurement (Under Reconstruction)
Temperature, Pressure, Potential temperature, Potential vorticity, Modified potential Vorticity
ILAS Validation Data
Kiruna ozonesonde data (1997.2.1 – 1997.3.25)
Syowa station ozonesonde data (1996.11.15 – 1997.8.16)
ILAS Correlative Measurement Data Base
This database is available to the restricted members defined in MOU.
ILAS measurement locations mapped with TOMS total ozone distribution
1996/10 – 1997/6
ILAS measurement locations (ver.3.47) mapped with potential vorticity distribution
1996/10 – 1997/6
Potential Vorticity Map at 475K (UKMO)
1996/10 – 1997/6
Northern Hemisphere Vortex Edge Calculations (by Greg Bodecker)
1996/11/2 – 1997/6/30
Manual for UKMO PV calculation tools (Under Reconstruction)
Manual for UKMO trajectory calculation tools (Japanese)

【ILAS Correlative Measurement Data Base】

【General Users (other than the above)】
ILAS プロジェクト
About ILAS Version 4.20 Products Overview
About ILAS Version 3.10 Products Overview
ILAS 出版物
ILAS ユーザー図ハンドブック（第 1.0 版）
ILAS Correlative Measurement Plan
平成 8 年度 ILAS & RIS プロジェクト報告
平成 9 年度 ILAS & RIS プロジェクト報告
公開データについて
ユーザー登録
ILAS Digital Data (ver.3.10) Download and Profile Graphs
ILAS Image Browser
Altitude vs Longitude Cross Section (one-day plot) : ver.4.20, 3.10
Time vs Altitude Cross Section (12-week plot): ver.4.20
Time vs Altitude Cross Section (3-week plot): ver.4.20, ver.3.10
Data Use Report
Publication, Oral presentation and Others

データ検索・画像データ提供
ILAS プロジェクト
About ILAS Version 4.20 Products Overview
About ILAS Version 3.10 Products Overview
ILAS 出版物
公開データについて
ユーザー登録
ILAS Digital Data (ver.3.10) Download and Profile Graphs
ILAS Image Browser
Altitude vs Longitude Cross Section (one-day plot) : ver.4.20, 3.10
Time vs Altitude Cross Section (12-week plot): ver.4.20
Time vs Altitude Cross Section (3-week plot): ver.4.20, ver.3.10
Data Use Report
Publication, Oral presentation and Others

- **Sun Spots on BBSO Sun Image**
- **ILAS II**
  - **最新情報**
  - **ILAS-II の情報**
    - ILAS-II の観測原理
      - ILAS-II の概要
      - ADEOS-II の概要
      - 観測原理説明
      - 観測地点（緯度帯）の季節変化
      - 観測スペクトル
      - ILAS の観測結果
  - **ILAS-II ニュース**
  - **主な成果／計画**
    - ILAS-II 開発スケジュール
    - 現在の状況
  - ドキュメント
  - Q／A
  - **LINK 集**
  - **データ検索・注文**
  - **登録研究者メニュー**
  - **ユーザー登録**
  - **ILAS**
  - **HOT NEWS**
- **HOT NEWS**

第２章　ILAS データ処理・提供状況

2.1 ILAS データ処理アルゴリズムの変遷

ILAS データ処理・解析アルゴリズムは、プロダクトを登録研究者に提供することによりデータ質を吟味、アルゴリズムの検討をしつつ改訂が進められている。表 2.1 に示す通り、1997 年 2 月のバージョン 1.00 公開以来、2001 年 8 月現在バージョン 5.20 まで、解析・検証に基づく検討の結果更新されたアルゴリズムによるデータプロダクトが提供されている。

表 2.1　ILAS 処理アルゴリズムバージョン別データ内容　（2001 年 8 月現在）

バージョン	最新登録日	パラメータ	データ期間	シーン数
1.00	1997/02/26	O3, HNO3, aer(V)	1996/11/04 ～ 1996/11/17	291
2.00	1997/05/30	O3, HNO3, NO2, N2O, H2O, CH4, CFC11, CFC12, aer(I), aer(V)	1996/11/18 ～ 1997/04/30	2530
3.00	1997/08/18	O3, HNO3, NO2, N2O, H2O, CH4, CFC11, CFC12, aer(I), aer(V)	1996/10/16 ～ 1997/06/29	5642
3.10	1997/11/26	T, P, O3, HNO3, NO2, N2O, H2O, CH4, CFC11, CFC12, aer(I), aer(V)	1996/10/14 ～ 1997/06/29	5770
3.47	1998/11/09	T, P, O3, HNO3, NO2, N2O, H2O, CH4, CFC11, CFC12, aer(I), aer(V), T(U), P(U), PT, PV	1996/10/16 ～ 1997/06/29	5847
4.20	1999/07/27	T, P, O3, HNO3, NO2, N2O, H2O, CH4, CFC11, CFC12, COF2, aer(I), aer(V), T(U), P(U), PT, PV	1996/11/01 ～ 1997/06/29	5763
4.21	1999/11/26	T, P, O3, HNO3, NO2, N2O, H2O, CH4, CFC11, CFC12, COF2, aer(I), aer(V), T(U), P(U), PT, PV	1996/11/01 ～ 1997/06/29	568
4.22	2000/01/17	T(U), P(U), PT, PV	1996/11/01 ～ 1997/06/29	5763
5.10	2000/12/21	O3, HNO3, NO2, N2O, H2O, CH4, CFC11, CFC12, COF2, aer(I), aer(V), T(U), P(U), PT, PV, ML	1996/09/18 ～ 1997/06/29	5823
5.11	2000/12/21	O3, HNO3, NO2, N2O, H2O, CH4, CFC11, CFC12, COF2, aer(I), aer(V), T(U), P(U), PT, PV, ML	1997/03/07 ～ 1997/04/08	423
5.12	2000/12/21	O3, HNO3, NO2, N2O, H2O, CH4, CFC11, CFC12, COF2, aer(I), aer(V), T(U), P(U), PT, PV, ML	1996/09/18 1996/10/14 ～ 1996/10/18 1996/10/30 ～ 1996/10/31	65
5.20	2001/04/20	T, P, O3, HNO3, NO2, N2O, H2O, CH4, CFC11, CFC12, COF2, aer(I), aer(V), T(U), P(U), PT, PV, ML	1996/09/18 ～ 1997/06/29	5827

一般ユーザーに対しては、1998 年 6 月 1 日からバージョン 3.10 のプロダクトのうちデータの妥当性が認められたオゾン、硝酸、エアロゾル消散係数（780nm）の高度分布（数値データ、グラフ）、高度－経度断面図（one-day plot）、高度－時間断面図（3-week plot）が公開され、1999 年 11 月からはバージョン 4.20 の高度－経度断面図（one-day plot）、高度－時間断面図（12-week plot, 3-week plot）が追加された。

以下にそれぞれのバージョン 3.00 以降の主な改良点の概要を述べる。

(1)　バージョン 3.00

① 可視域信号、赤外域信号のどちらについてもスペクトルデータのデータベースとして、

HITRAN92 の代わりに HITRAN96 を用いた。

② 赤外域信号から得られたプロファイルは事前に平滑化を行わずに、導出プロファイルに適用した。

③ バージョン 2.00 では同位体ガスの寄与が過小評価されていたが、同位体を扱うときに生じるエラーが補正された。

(2) バージョン 3.10

① 接線高度は、本来、サンエッジセンサー（太陽輪郭センサー）のデータを用いて幾何学的に導出されることになっていたが、観測開始当初その光学特性に問題があることが判明した。そのため、バージョン 3.10 までは代替的に、酸素分子Aバンドによる吸収スペクトルの平均透過率を、UKMO 同化データ（気温、気圧）に基づく理論計算値と観測値を比較することによって接線高度を求めた。このバージョンでは酸素分子 A バンド吸収スペクトルの R ブランチ（～バージョン 3.00）の代わりに、よりスペクトルフィッティングの良い P ブランチを用いた。

② ガスプロファイル導出時、赤外分光計データ（44 チャンネル）でのエアロゾル/PSCs による減衰の補正の第１歩として、初歩的な手法を試みた。赤外データの 4 つの窓チャンネルで導出される消散係数は、7.1～11.8μm の他のチャンネルの消散係数を与えるために線形内挿される。7.1μm以下および 11.8μm以上については、それぞれ 7.1μm および 11.8μm と同じ一定値を仮定した。このようにして線形内挿された硝酸係数を用いて、赤外領域全体で硝酸スペクトルを見積もった。この手法は、エアロゾルや PSCs のタイプを同定する必要がない点では好都合であるが、おおまかなやり方であるため、プロダクトを解釈するときには注意を要する。

③ 可視のエアロゾル消散係数の計算には、これまで波長 780nm の１要素のみが用いられていたが、このバージョンでは波長 780nm 付近の 12 素子の平均透過率データを用いた。

④ 赤外の窓チャンネルから得られるエアロゾル消散係数の導出については、高度の上限を 30km とした。

⑤ プロファイル導出の際はＰブランチの信号のみが用いられていたが、高度 40km より上空では気温に対するＰブランチの信号感度が悪く、妥当な気温プロファイルを導出できない。この導出スキームについてはさらに検討が必要で、特に装置関数について調査する必要がある。気温と気圧のプロファイルの問題は未解決であるが、UKMO 同化データから内挿して得られた気温・気圧プロファイルとともに提供されている。

⑥ 消散係数のプロファイルは 5 つの波長で導出される。1 つは可視の 780nm、残りは赤外の 7.1、8.3、10.6、11.8μm である。赤外域での消散係数を求めるにはガスによる吸収分を補正する必要があるが、その目的で気候値（ガスプロファイル導出の過程でイニシャル値として使われている）を用いている。したがって、気候値と実際のプロファイルが異なっている場合は系統誤差が生じることが予想される。赤外域における消

散係数は12～30kmで導出されるため、エアロゾル/PSCs補正はこの範囲に限られ、ガスプロファイルの下限も12kmということになる。

(3) バージョン3.47

① 酸素分子Aバンドを利用して接線高度を求める方法では数百mの誤差が見積もられていた。その後、サンエッジセンサーの特性評価、実データ吟味を経てデータが利用可能であると判断され、バージョン3.47ではこれを用いて、太陽位置、衛星位置、地球位置の情報に基づき幾何学的に接線高度を求める方法が採用された。

② サンエッジセンサーアレイ検出器を参照して、可視分光計と赤外分光計の瞬時視野方向の角度の違いを考慮することにより正確にデータを扱えるようにした。瞬時視野の幅を再度検討した結果、可視分光計・赤外分光計ともに接線高度20kmで（以前言われていたように2kmではなく）約1.57kmであることがわかった。この値が変わったことによるリトリーバルアルゴリズムへの影響はない。

③ 赤外測定値の、サンエッジセンサーデータ取得時刻からの相対的な時間遅れを再評価した。太陽追尾の不安定さに起因する赤外信号とサンエッジセンサー信号の変動に見られる位相の違いを比較することにより、赤外信号用ロックインアンプの応答時間（応答するまでの時間）について再解析が行われた。応答時間補正に関連したプログラムの不具合も修正された。

④ 大気圏外測定時に得られる100%信号レベルのドリフト直線の評価方法が改良され、これによって大気圏測定時への外挿がより正確になった。

⑤ 一般的な平滑手法（11点移動平均）を可視信号、赤外信号、サンエッジセンサーデータに適用した。（ILASデータは12Hz毎に取得されている。）

⑥ バージョン3.10では、太陽の位置を計算するのに慣性座標系（1950年分点）が使われていたが、このバージョンでは衛星、太陽両方の位置を計算するのに慣性座標系（True-of-Date）を導入することにより、観測位置計算における不具合を修正した。この修正による観測位置の違いは、バージョン3.47と3.10でおおよそ30～75kmになる。

⑦ バイアスを補正するために、$ClONO_2$、CFC14、CFC114、COF_2などのマイナーガスをそれぞれにプロファイルを与えて取り込んだ。

⑧ 可視のエアロゾル消散係数のエラーバーは、ランダム誤差、すなわち100%値を外挿したことに起因する誤差、気温・気圧データの不確実さから生じるレイリー成分の誤差の合計として計算した。

(4) バージョン4.20

① 可視エアロゾル消散係数から、太陽周縁減光寄与分の影響を取り除いて、可視チャンネル周縁減光補正を行った。

② 赤外チャンネルにおける太陽周縁減光寄与分の効果を取り除く補正を行った。

③ バージョン 3.47 までの導出上限高度は、ガスにより信号が微弱になるものがあるためそれぞれ異なっていたが、バージョン 4.20 ではガス濃度算出処理における導出高度上限を一律 70km とした。ただし、提供プロダクトの高度上限はバージョン 3.47 と同様である。また、バージョン 3.47 の下限高度はデータがある限り最低 12km であったが、気候値の下限高度の改訂に伴い、下限高度はデータがある限り最低 7km として処理を行い、提供の段階で高度範囲を決めることとした。

④ 気候値は、ガス濃度算出処理の初期値と同ノンガス補正におけるガス寄与分の算定、赤外エアロゾル消散係数のガス寄与分の算定等に用いている。このバージョンでは HNO_3、H_2O、N_2O_5、$ClONO_2$ の気候値の改訂（UARS 気候値→UARS 新気候値）を行った。また、気候値改訂に伴い気候値の使用法を変更した。すなわち、①平均値に替えて中央値を使用すること。②気候値のない高度範囲におけるデータ外挿値の与え方を、AFGL 標準大気モデルから気候値最上下層の値を一定値で与える方法に変更した。

⑤ 内部誤差とトータル誤差を別々に表示するようにした。トータル誤差は内部誤差と外部誤差の２乗和の平方根である。内部誤差は、可視および赤外のエアロゾル消散係数の場合は信号のランダム誤差と 100%値直線外挿に起因する誤差との２乗和の平方根、赤外のガスプロダクトの場合は最小２乗法における収束残差から算出される誤差である。外部誤差は、可視のエアロゾル消散係数の場合は気温推定誤差に起因するレイリー要素の誤差、赤外のエアロゾル消散係数の場合は窓チャンネルにおけるノンガス効果の見積もり時における誤差、赤外ガスプロダクトの場合は線形内挿による誤差以外のノンガス補正における誤差である。

⑥ マイナーガスは他のガスを導出するために考慮しており、既知として固定した値を与えている。バージョン 3.47 ではその対象は CO2, N2O5, ClONO2, CFC14、CFC114 であったが、このうち CFC14、CFC114 を削除した。

⑦ 赤外領域には全部で 44 の素子があるが、その中で常に装置関数との間に系統的な残差が残る 5 素子（#1,12,24,25,26）の観測透過率を、フィッティング対象から除外した。

⑧ 高度 30～40km については、赤外の窓チャンネル消散係数プロファイルを log 上で直線近似してガス濃度算出時のノンガス補正に用いることとした。

⑨ データ品質フラグを非収束およびデータ導出段階でのオーバーフローに基づいて付加した。

⑩ レベル 2 データプロダクトのフォーマットをバージョン 4.20 から AMES2160 に変更し、データプロダクトのファイルネームの拡張子は、"****txt"から AMES フォーマットでは、"****ames"に変わった。これらのファイルでは、データのオーバーフローと欠測データは、温位については"999.99"、渦位については"9.999E+99"、その他の項目については"999999"で表示され、ILAS の導出で反復計算が収束しなかったデータは、"-99999"と表示される。旧フォーマットでデータを読むためのプログラムや手持ちのアプリケーションは、新フォーマットには使えないことに注意されたい。同じプロ

ダクトは、利用者の便宜上、旧バージョンで使われていたフォーマットでも供給されている。このサービスは近い将来終了する予定になっているので、新フォーマットを扱えるようにプログラムを変えておくことをおすすめする。

(5) バージョン 4.21

バージョン 4.21 はバージョン 4.20 アルゴリズムのバグを修正したバージョンである。バージョン 4.20 では、1265～1325cm^{-1} に吸収帯を持つ ClONO2 をマイナーガスの１つとして考慮に入れているが、その体積混合比の単位 ppm を ppt と読み違えていた。ClONO2 の吸収の中心は#12 素子にあるが、この素子におけるスペクトルフィッティングの残差は相対的に大きく、バージョン 4.20 および 4.21 では#12 素子をデータ導出アルゴリズムから除外している。にもかかわらず、ClONO2 の吸収帯は#11 および#13 素子をカバーし、これらの素子は NO2、CH4、HNO3、H2O の吸収帯とオーバーラップしている。ClONO2 の単位読み違えの影響は、CH4、HNO3、H2O についてはほとんどないが、N2O プロダクトについてはバージョン 4.20 と 4.21 の間にバイアスが見られる。

(6) バージョン 4.22

① 気圧と気温

UKMO 同化データから気圧と気温を内挿する方法を改良した。気温と UARS 標準気圧面のジオポテンシャル高度を ILAS 測定地点に対して、ILAS 測定範囲内の４つの格子点（経度 3.75° ×緯度 2.5° ）間の線形内挿によって空間内挿する。次にすべての標準気圧面について内挿されたジオポテンシャル高度を幾何学高度に変換する。ILAS がカバーする連続する 2 日間の 12:00UTC における気温・気圧値と幾何学高度の解析的関係を用いて、3 次のスプライン内挿によって気圧・気温値を鉛直分解能 1km の ILAS 接線高度（幾何学高度）グリッドに内挿する。ILAS 測定時刻に対する気温・気圧の時間内挿は、２つのプロファイル間の線形内挿による。以前は時間内挿を行わず、ILAS の測定時刻に最も近い 12:00UTC の気温・気圧を使っていた。高度 15～40km における旧手法と現手法との気温の差異は、北半球で 0.07K±0.76K、南半球で 0.00K±0.55K である。

② 渦位と温位

UKMO 同化データから渦位と温位を内挿する方法を改良した。以前は UARS 標準気圧面に対応させて範囲 1000～0.3162hPa の 22 の等圧面で渦位を計算していたが、バージョン 4.22 では UKMO の計算ツールを用いて、全格子点（経度 3.75° ×緯度 2.5° ）について範囲 260～2500K の 37 の等温位面上で毎日 12:00UTC における渦位を計算する。等温位面に対応するジオポテンシャル高度を、温位とジオポテンシャル高度の解析的関係を用いて 3 次のスプライン内挿によって求める。内挿したジオポテンシャル高度から幾何学高度への変換を行って全格子点・全等温位面における渦位・温位 vs 幾何学

高度の24時間毎の表を作成する。ILASがカバーする連続する2日間、4格子点を選び、上記の表を用いて3次のスプライン内挿を行って、鉛直分解能1kmの幾何学高度グリッドに、渦位・温位の鉛直内挿を行う。ILAS測定地点に対する毎日（12:00UTC）の渦位・温位の空間内挿は、ILAS測定範囲内の4つの格子点間の線形内挿によって行う。ILAS測定時刻に対する渦位・温位の時間内挿は、2つの空間内挿された渦位・温位間の線形内挿による。以前は時間内挿を行わず、ILASの測定時刻に最も近い12:00UTCの渦位・温位を使っていた。高度15～40kmにおける旧手法と現手法との渦位の差の平均は、北半球で3.1±7.7%、南半球で3.7±6.8%である。

(7) バージョン5.10

① バージョン4.20で使われていた高度決めの方法（サンエッジセンサーデータを用いた幾何学的計算に基づく方法）を補うために、各測定イベントについて、サンエッジセンサー検出アレイ上の分光計IFOV（瞬時視野）の位置に対応する素子番号を決める（修正する）ことにした。この補正を行うのに、ILAS可視チャンネルで測定された酸素分子Aバンドの吸収スペクトルをUKMOの気温・気圧データから得た理論的なスペクトルと比較することで求めた高度データを、接線高度30kmの参照値として用いた。その結果、検証データとの比較で見られたILASデータプロダクトの季節依存性はほぼ解消された。

② レベル2データの処理に使うためUKMOの気温・気圧同化データに時間内挿を施した。その結果、ILASの測定時刻に対応したより適切な気象データが使えるようになった（位置の内挿はすでに前のバージョンで導入されている）。

③ 時間・空間内挿を施したUKMO同化データから抽出した気温・気圧データを用いることによって、光路に沿った大気による光の屈折がより精密に決められるようになった。バージョン4.20では、ILASの測定位置は近似として1976年米国標準大気のみで決められていたが、バージョン5.10では、1976年米国標準大気で決めた位置における気温・気圧はUKMO同化データから抽出され、内挿されたものである。光路に沿った大気による光の屈折が、この気温・気圧データを用いて再計算され、ILASの測定位置も再決定された。結果として、ILAS測定位置はより正確に決められるようになったが、バージョン4.20と比較すると、接線高度20kmにおいて水平方向に最大およそ20kmのずれがある。

④ ILAS測定データの時系列の平滑化に用いる方法を、シグナルの単純な移動平均に基づいたものから、ノイズを効果的に減らせるローパスフィルターを使用した方法に変更した。これが功を奏し、高高度でガス種のプロファイル、特にH2OやNO2データに見られた振動が減少した。

⑤ 赤外、可視どちらのチャンネルの装置関数も更新された。

⑥ ILAS赤外チャンネルにおける酸素分子の連続吸収を計算するサブルーチンを、

FASCOD3P バージョンから LBLRTM バージョン（Thibault *et al.*, 1997）に更新した。結果として、データ質、特に低高度における NO2 が改善された。

⑦ 透過率のフォワード計算については、シミュレートされたスペクトルにおける CFC-14 (CF4)の影響を検討するために、CFC-14 を新たに加えた。その結果、データ質、特に NO2 が改善された。

⑧ ILAS 可視チャンネルデータのベースラインを修正するのに用いていた O3 Wulf バンドクロスセクションデータを、MODTRAN バージョンから Brion *et al.* (1998)の結果に変更した。

⑨ Wulf バンドにおいてオゾンが吸収する部分の見積もり誤差は、ベースラインフィッティングに起因するが、これを可視のエアロゾル消散係数の内部誤差に加えることにした。

⑩ ILAS 測定位置（緯度、経度）と各接線高度についての太陽方位角データを新たにリリースした。

【Reference】

Thibault, F. *et al.* (1997) : Infrared collision-induced absorption by O2 near 6.4 micron for atmospheric applications : measurements and empirical modeling. *Appl.Opt.*, **36**, 563 – 567.

Brion, J. *et al.* (1998) : Absorption spectra measurements for the ozone molecule in the 350 – 830 nm region. *J. Atmos. Chem.*, **30**, 291 – 299.

(8) バージョン 5.11

ILAS データの処理においては、エアロゾルの窓チャンネルでのエアロゾル消散係数プロファイルをノンガス補正用の赤外分光計データから得るときに、ガスプロファイルの気候値のデータベースをガスの標準プロファイルとして用いる。これは、ガスプロファイルを導出する際のガス混合比の初期値としても用いられる。このデータベースは、ILAS データを処理するために特別に作られたもので、UARS のような先だって行われている衛星測定値と組み合わせて統計的に加工され、各月について 5 度間隔の緯度帯毎のデータセットになっている。また、このデータベースは衛星データのない南緯 82.5 度～南極の緯度帯以外は、ILAS が測定を行っている月、緯度のほとんどをカバーしている。

バージョン 5.10 までは、AFGL 標準大気モデル（亜極域の夏冬モデル）からの代用データセットと MODTRAN 3.5 のモデルプロファイルが、南緯 82.5 度～南極の緯度帯で得られた ILAS データの処理に用いられていた。しかしながら、時間と高度の関数としてデータプロダクトを詳細に調べた結果、測定位置が緯度 82.5 度を横切るとき、小さな不連続が存在することが明らかになった。これは、代用データセットを用いたことが原因と考えられ、ノンガス補正を通してプロダクトに影響している可能性がある。この不連続を除去するために、代用データセットの代わりに、同じ月で近接する緯度帯（この場合南緯 77.5～82.5

度）についての気候値を利用してILASデータを再処理することにした。再処理が必要だったILASデータは1997年3月7日～1997年4月8日の合計423イベントで、すべて南緯82.5度～南極の緯度帯で得られたものである。詳細を以下に示す。

1) バージョン5.11として再処理されたデータ

1997年3月7日21:33～1997年4月8日20:00の（接線高度20kmの代表時刻は可視分光計データで定義した）、南緯82.5度～南極で得られた423イベントのデータ。

2) 気候値データベース

・3月および南緯77.5～82.5度の気候値を、1997年3月の南緯82.5度～南極で得られたILAS測定値の代わりに用いた。

・4月および南緯77.5～82.5度の気候値を、1997年4月の南緯82.5度～南極で得られたILAS測定値の代わりに用いた。

【バージョン5.11プロダクトの提供】

バージョン5.11のデータプロダクトは通常通りILASホームページで配布されているが、以下の点に注意が必要である。

・バージョン5.11プロダクト開始にあたり、これまで利用できた対応するバージョン5.10プロダクトはホームページから削除した。

・バージョン5.10とバージョン5.10プロダクトは、別々に「Archived Data」として保存する。バージョン5.11データは上記のイベントのみである。一方、バージョン5.10データは、バージョン5.11プロダクトに対応するデータプロダクトを除いて保存した。

・"Data Search and Order (individual)"ではバージョン5.10、5.11のどちらのプロダクトも検索できる。

・次のプロダクトについては内容に変更はないが、混乱を避けるためバージョン5.11として名前を変更した。

1) エアロゾル消散係数（780nm）

2) UKMOプロダクト（気温、気圧、温位、渦位）

3) 測定位置（緯度、経度）と各接線高度についての太陽方位角

【各掩蔽イベントの観測日と時刻】

掩蔽イベント（occultation event (O.E.)）は1日の中で終了するとは限らず、場合によっては、次の日まで続く。そのような場合は注意深くID番号を付ける。

AMES新旧フォーマットで、期日と時刻に関する情報は下表の通りである。

	ヘッダー	データ
新フォーマット	・観測開始日 ・観測時刻（接線高度 20km） ・観測開始時刻	各高度における時刻は、観測開始日 0:00UTC からの経過時間で示される。
旧フォーマット	・観測開始日	

「観測開始時刻」とは、ILAS センサーが観測データの取得を開始した時刻を意味し、ILAS による大気観測の開始時刻の 2～3 分前である。また、「観測開始期日」は「観測開始時刻」を含む期日を指す。

一般に、「経過時間」は観測開始時刻からの積算時間を指すが、ここでは、「経過時間」を観測開始日の 0:00UTC からカウントした時間と定義する。したがって、O.E.（掩蔽イベント）が 1 日で終わらず次の日まで続いた場合は、期日と時刻を以下の様に扱うことにした。

1) 接線高度 20km における観測時刻について；

期日：観測開始と同じ期日とする。

時刻：接線高度 20km での観測時刻が観測開始日の次の日になる場合は、24:00 の後ろに表示する。（例；1997 04 04 24:00:21.168）

2) 各高度における時刻について；

観測開始期日の 0:00UTC からの経過秒数を用いる。すなわち、経過秒数はリセットされず、86400 秒（＝24 時間×60 分×60 秒）より大きくなることもある。

(9) バージョン 5.12

ILAS バージョン 5.12 データは登録研究者に対して提供され、バージョン 5.10、5.11 には含まれなかった 1996 年 9 月と 10 月の観測期間もカバーしている。この期間は ILAS の初期および運用前チェックのためのものであるから、利用者は以下の項目、特にバージョン 5.12 を科学的研究目的に利用する場合には注意を払う必要がある。バージョン 5.12 に使われたデータ導出アルゴリズムはバージョン 5.10、5.11 のものと変わっていない。以下にバージョン 5.12 データについての注意点を示す。

① ILAS の状態が不安定だったこと

1996 年の 9 月と 10 月は、各センサーのイニシャルチェックと衛星システムのテスト期間であった。基本的に、この期間の観測データはセンサーと衛星の状態をチェックするためだけの期間である。1996 年 9 月から 10 月中旬の検出器周辺の ILAS の温度は約 9℃で、運用期間の温度より低かった。10 月末の運用開始時には ILAS の温度は急に約 6～7℃上昇した。このような装置温度の変化は ILAS データプロダクトの品質に影響を及ぼしている可能性がある。

② ILAS 可視チャンネルの装置関数

1996 年の 9 月から 10 月中旬の可視チャンネルの装置関数（VIS-1 inst fn）は、精密に調整されていない。接線高度を決める過程において、酸素分子Aバンドの吸収面積（可視装置関数と UKMO の気温・気圧プロファイルを用いて理論的に計算される）を ILAS で測定されたスペクトルと比較する。この比較にしたがって、合致した（内挿された）接線高度の値は、データの主要な枠組みに割り当てられる。そのため、可視装置関数（VIS-1 inst fn）の品質が決定された高度に影響していることになる。可視装置関数の調整はバージョン 5.10 以降、運用期間の毎週、各半球について、いくつかの素子のピーク位置を調整することにより行われた。その結果、ピーク位置は季節変化し、その季節変化とセンサーの温度変化との間には強い相関があることがわかった。したがって、装置関数は運用期間中毎週調整する必要がある。

1996 年 9 月の可視装置関数は 10 月中旬のものに置き換えられた。この期間、センサーの温度は相対的に安定していたため、これは深刻な問題ではない。一方、10 月下旬の可視装置関数は、センサーの温度が大きく変化する遷移期にあたっているため、いくつかの問題がある。

③ 導出のためのガスプロファイル気候値データセット

9 月と 10 月の気候値データセットは、ガス導出過程のノンガス補正に使われるが、ILAS の観測が行われている緯度帯を完全にカバーしていない。したがって、データセットは部分的に他の期間のデータで補われており、そのためノンガス補正の不確実さが幾分大きく、導出されたガスプロファイルに影響しているようである。

バージョン 5.12 で使われている気候値データセットを以下にリストアップする。水蒸気の気候値については、ILAS の旧バージョン導出プロファイルの統計が計算に使われている。9 月と 10 月の ILAS 測定データは不完全であるため、水蒸気の気候値は、この期間については提供されていない。その上、9 月の南半球における ILAS の観測領域は南極周辺である。この緯度帯で他の衛星センサーが提供している気候値データセットはほとんどなく、したがって、水蒸気以外の他の多くのガス種の気候値データも作成できない。これらのデータをカバーするため、次の気候値データセットが用いられた。

・1996 年 9・10 月北半球の水蒸気：同じ緯度帯の 11 月の水蒸気気候値データで補う。

・1996 年 9・10 月南半球の水蒸気：南緯 75 度帯の 11 月の水蒸気気候値データで補う。

・9 月の南半球の水蒸気以外のガス：10 月の南緯 80 度帯の気候値データで補う。

④ ILAS 観測の最低高度

1996 年 9 月 10 月は、太陽追尾コントロールのために粗太陽センサーと精太陽センサーのスイッチに利用する信号のしきい値を調整する期間であった。第 1 ステージでは、しきい値が大きすぎたために十分に強い太陽シグナルがあったにもかかわらず太陽追尾が停止してしまった。そのため、最低高度は、北半球 9 月の観測では約 28～29km、南半球 9 月の観測では 23km であった。10 月中・下旬について、しきい値を適切な値に調整した

後は、最低観測高度が次第に低くなり、11 月以降の観測値と同じレベルに達した。

【バージョン 5.12 プロダクトの供給】

1) バージョン 5.12 として処理されたデータの観測期間

バージョン 5.12 のデータ総数は 65 である。これらのデータの観測期間は：

- 1996 年 9 月 18 日：12 イベント
- 1996 年 10 月 14～18 日：7 イベント
- 1996 年 10 月 30～31 日：46 イベント

2) プロダクトの供給

バージョン 5.12 データプロダクトは、これまでどおり ILAS ホームページを通じて配布されている。なお、以下の事項に注意されたい。

- バージョン 5.10、5.11、5.12 プロダクトは別々に “Archived Data”に保存されている。バージョン 5.12 データは、上記のイベントのみである。
- ”Data Search and Order (individual)”で、バージョン 5.10、5.11、5.12 プロダクトからデータを検索できる。

(10) バージョン 5.20

ILAS バージョン 5.20 プロダクトは、以下に示すいくつかのマイナーチェンジを施した以外は、基本的にバージョン 5.10、5.11、5.12 を組み合わせたデータである。

①掩蔽イベントの一部についてレベル 0 データの異常値を除去

メディアンフィルターを用いた異常値の除去プロセスが、旧バージョンでは 116 の掩蔽イベント（OEs）についてスキップされていたことが判明した。バージョン 5.20 では、このプロセスが 116 の OEs に施された。バージョン 5.20 と旧バージョンの間のレベル 2 ガスプロダクトにおける差異は、v0520_diff_plot ファイルの中に、”overwrite plot”、”relatove difference plot”として示されている。いくつかの OEs についての差異は無視できないため、このファイルの図に示すような差異に注意を払う必要がある。さらに 4 つの OEs は、旧バージョンでは疑わしいイベントとして削除されたが、このフィルターの適用によって有効なプロダクトとして修復された。

②データ品質フラグの変更

導出データのオーバーフローを判定するしきい値がバージョン 5.20 では変更されたため、レベル 2 プロダクトに割り当てられていたデータ品質フラグの定義も変更された。バージョン 5.20 レベル 2 プロダクトのデータ品質フラグの意味は以下の通りである：

1) GOOD：非収束・オーバーフローのある高度レベルを含まない。
2) FAIR：非収束のある高度レベルを含まないが、オーバーフローした高度はある。
3) POOR：非収束が高度 60km 以上の高度レベルに見られる。
4) REJECT：非収束が高度 60km 以下の高度レベルに見られる。

旧バージョンでは、999999 より大きい値と-999999 より小さい値をオーバーフローとしていたが、データ表示にマイナスの符号も含めて数字 6 文字までという制限があるため、バージョン 5.20 では-99999 より小さい値をオーバーフローとして新たに扱うことにした。バージョン 5.20 では、オーバーフロー値は正でも負でも-99999 と表すことにし、欠測を 999999 と表し、オーバーフロー値と区別できるようにした。なお、旧バージョンと同様に、オーバーフロー値と同じ表現になってしまうが、非収束値も-99999 で表す。非収束かオーバーフローかは、内部エラー値、トータルエラー値で区別できる。非収束の場合、導出結果のすべての値は内部エラーで、トータルエラーは-99999 である。内部エラー値・トータルエラー値は、オーバーフローがある場合に有効である。

③レベル 2 プロダクトのテキストフォーマットの変更

AMES フォーマットのルールにより厳密に従い、テキストファイルの "new format" に以下の項目に変更を施した。図 2.1 に新旧ファイルのサンプルを示す。なお、下記の番号が変更箇所に対応している。

1) ヘッダーレコード番号の変更
2) スケールファクターと時間データの欠損値の変更
3) 補助変数の変更；パスナンバー、緯度、経度の項目を削除した。
4) スペシャルコメントの変更；緯度・経度を追加、異常値についてのコメントを変更。
5) すべてのパラメータの合併プロダクトに、データ質についての情報および観測位置と各高度における太陽方位角の情報を加えた。

④ UKMO の渦位（PV）と温位（PT）データプロダクトの変更

PV 値と PT 値は、バージョン 4.22 の処理以来作成している PV データテーブルから、時間、高度、位置を内挿して計算している。PV データテーブルは、12:00UT の UKMO 日別同化データから、37 の PT レベル（260K～2500K）の幾何学的高度と PV 値を計算することによって毎日 12:00UT に作成されている。PT 値も PT レベルと高度を用いて PV 計算と矛盾のないように内挿して計算される。PV テーブル、PV 値、PT 値の計算についての詳細は、バージョン 4.22 の Readme ファイルに記載されている。PT／PV 値で PT レベルの最低層、最高層の外側（260K より低いか 2500K より高い）の値は、バージョン 5.12 で処理するようになるまでは、PV テーブルの外挿によって求めていたが、高度 10km 付近より下や高度 40km 付近より上を外挿した場合の精度は疑わしいことが分かった。そのため、バージョン 5.20 では外挿を行なわず、それらの高度の PV／PT 値は欠測としている。計算される最高高度が 50km から 60km になったので、もしデータの内挿をこの領域で行うことができれば、計算された値は有効なプロダクトとして保存される。なお、PV の欠測値は 1E+30、PT の欠測値は 999999 とした。

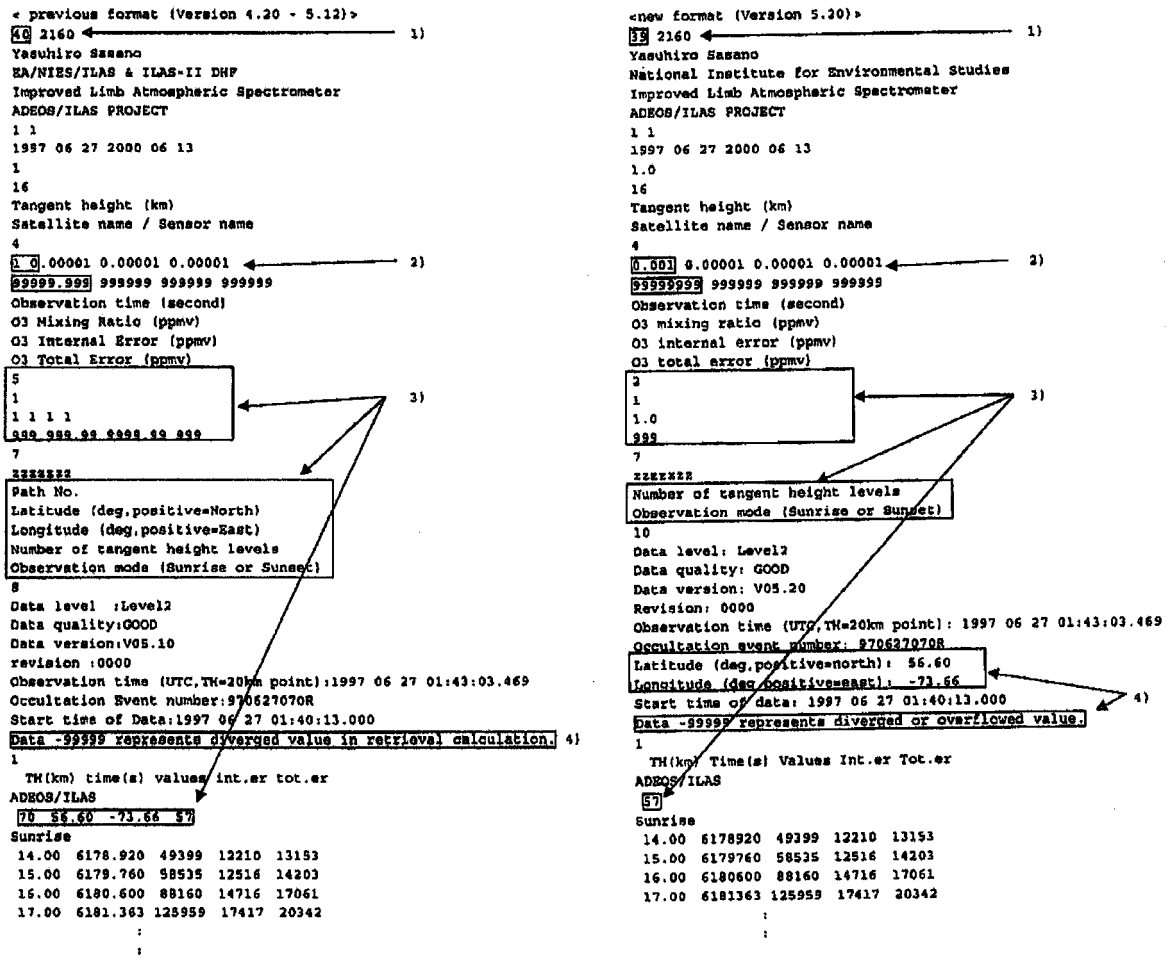


図 2.1　新旧データフォーマットの比較

⑤ ILAS が観測した気温・気圧データ

バージョン 4.21 以降、ILAS の気温（T）、気圧（P）データは、詳細な調査が必要な問題がいくつかあったため提供されていなかった。これらの問題はまだ残っているが、気温・気圧データによりさらに研究が進むことを期待して、今後の研究に登録研究者に対して ILAS の気温・気圧データを提供することにした。気温・気圧の導出アルゴリズムの概説とエラー解析については Sugita *et al.*(2001?)に詳しい。ここでは、導出された気温と気圧の重要な特色のみ記しておく。

- 高度 30km 以下の ILAS データと UKMO データを同じ位置で比較すると、気温については両半球とも 12 月～2 月の期間、両者の間には数 K の差があるに過ぎない。しかし、3 月～6 月は平均して、北半球で 10K、南半球で-10K の差がある。
- このバージョンでは、酸素分子 A バンド P-ブランチの分光素子をスペクトルフィッティングに用いた。その結果、R-ブランチを用いた導出値とかなり異なる値が得られた。
- 導出された気温と気圧の多くのプロファイルには特に高度 40km 以上で大きな振動が

見られるが、これはおそらくオニオンピーリング法を使っていることによる。

・導出された気温・気圧データを用いた静力学方程式で計算したジオポテンシャル高度は、特に高度 40km 以上で、ILAS のサンエッジセンサーを用いて求めた幾何学高度と一致しない。

注:酸素分子Aバンドのラインパラメータについては、バージョン 5.20 では HITRAN1996 を用いているが、今後のバージョンでは HITRAN2000 に置き換えるべきである。HITRAN1996 の air-broadened halfwidth は、HITRAN2000 より最大 15%小さい。この変化が、高度 30km 以下においては導出された気温が最大 5K 高くなる原因になる。現在のフォワードモデルで使われている太陽スペクトルデータ（MODTRAN Ver.3.5）は、太陽に向かう衛星の動きに起因するドップラー偏移については修正されていない。分光分解能が 0.025cm-1 の太陽スペクトルデータセット（バージョン 5.21 LBLRTM から利用可能）は、分解能 1cm-1 のデータセット（バージョン 5.20 で使われている）が使われていたケースとの比較では、導出された気温・気圧の高度 40km 付近の振動を抑制することができる（抑制効果はシーンによる）。

2.2 ILAS データ処理状況

2001 年 8 月 31 日現在の ILAS データバージョン別処理状況を表 2.2(1)～(3)に示す。NASDA の地球観測センターから送信され、DHF が受信した ILAS ミッションデータ（レベル 0）は、再編集されたものも含めると、NASDA の運用計画による予定イベント数（6,892）の 98.2%である。表 2.3 (1) に示すように、NASDA によるレベル 0 データの再編集イベント数は 810 でそのうち利用可能になったものは 241（29.8%）である。

処理状況は、バージョン 3.00、3.10、3.47、5.10/5.11/5.12、5.20 については処理率 100%である。バージョン 4 シリーズは 1996 年 10 月のデータは処理していないため、10 月以外の処理率が 100%のバージョン 4.20 で全体の処理率 99.1%、バージョン 4.20 の UKMO プロダクトを改善したバージョン 4.22 は 87.0%、アルゴリズムテストバージョンである 4.00 およびバグ修正バージョンである 4.21 についてはどちらも 8.8%である。

このうちレベル 2 データの処理を正常に終了したものを予定イベント数に対する割合（かっこ内は DHF が受信したイベント数に対する割合）で示すと、バージョン 3.00 が 81.9%、バージョン 3.10 が 83.7%（85.6%）、バージョン 3.47 が 84.8%（86.7%）、バージョン 4.00 が 8.6%（8.7%）、バージョン 4.20 が 85.2%（87.0%）、バージョン 4.21 が 8.6%（8.7%）、バージョン 4.22 が 85.2%（87.0%）、バージョン 5.10/5.11/5.12 が 84.5%（86.1%）、バージョン 5.20 が 84.5%（86.1%）である。

データ処理が正常に終了できなかったイベント数は、バージョン 4.10 の場合を例にとると（表 2.3(2)）トータルで 828 で、そのうちレベル 0 データの異常が 496（59.9%）、データ処理の異常終了が 321（38.8%）、ガスプロファイルの異常が 11（1.3%）であった。

Ver.3.xx

2001年8月30日現在

		OPL1	ORST	DHF-1	DHF-2		V03.47 (February 18, 1999)					V03.10(July 8, 1998)					V03.00(May 22, 1998)			
		(*1)	(*2)	(*3)	(*4)	(%)	Processed(%)		L2 o.k	(%)	(%)	Processed(%)		L2 o.k	(%)	(%)	Processed(%)		L2 o.k	(%)
Month	Hem.	a		b	c	(c)/(a)	d	(d)/(c)	e	(e)/(c)	(e)/(a)	f	(f)/(c)	g	(g)/(c)	(g)/(a)	h	(h)/(c)	i	(i)/(a)
October, 1996	North	35	35	34	34	97.1	34	100.0	23	67.6	65.7	34	100.0	20	58.8	57.1	34	100.0	18	51.4
	South	32	32	30	30	93.8	30	100.0	23	76.7	71.9	30	100.0	23	76.7	71.9	30	100.0	23	71.9
	Total	67	67	64	64	95.5	64	100.0	46	71.9	68.7	64	100.0	43	67.2	64.2	64	100.0	41	61.2
November, 1996	North	425	425	415	414	97.4	414	100.0	345	83.3	81.2	414	100.0	320	77.3	75.3	415	100.0	313	73.6
	South	410	410	401	402	98.0	402	100.0	367	91.3	89.5	402	100.0	351	87.3	85.6	401	100.0	354	86.3
	Total	835	835	816	816	97.7	816	100.0	712	87.3	85.3	816	100.0	671	82.2	80.4	816	100.0	667	79.9
December, 1996	North	440	440	415	419	95.2	419	100.0	354	84.5	80.5	419	100.0	346	82.6	78.6	415	100.0	332	75.5
	South	435	435	411	414	95.2	414	100.0	387	93.5	89.0	414	100.0	380	91.8	87.4	411	100.0	380	87.4
	Total	875	875	826	833	95.2	833	100.0	741	89.0	84.7	833	100.0	726	87.2	83.0	826	100.0	712	81.4
January, 1997	North	441	441	434	435	98.6	435	100.0	365	83.9	82.8	435	100.0	356	81.8	80.7	434	100.0	335	76.0
	South	437	437	425	429	98.2	429	100.0	330	76.9	75.5	429	100.0	321	74.8	73.5	425	100.0	318	72.8
	Total	878	878	859	864	98.4	864	100.0	695	80.4	79.2	864	100.0	677	78.4	77.1	859	100.0	653	74.4
February, 1997	North	398	398	392	392	98.5	392	100.0	354	90.3	88.9	392	100.0	344	87.8	86.4	392	100.0	327	82.2
	South	395	395	387	388	98.2	388	100.0	358	92.3	90.6	388	100.0	351	90.5	88.9	387	100.0	344	87.1
	Total	793	793	779	780	98.4	780	100.0	712	91.3	89.8	780	100.0	695	89.1	87.6	779	100.0	671	84.6
March, 1997	North	441	441	438	438	99.3	438	100.0	388	88.6	88.0	438	100.0	387	88.4	87.8	438	100.0	371	84.1
	South	440	440	433	434	98.6	434	100.0	377	86.9	85.7	434	100.0	399	91.9	90.7	433	100.0	394	89.5
	Total	881	881	871	872	99.0	872	100.0	765	87.7	86.8	872	100.0	786	90.1	89.2	871	100.0	765	86.8
April, 1997	North	427	427	424	425	99.5	425	100.0	365	85.9	85.5	425	100.0	366	86.1	85.7	424	100.0	339	79.4
	South	428	428	426	426	99.5	426	100.0	358	84.0	83.6	426	100.0	379	89.0	88.6	426	100.0	382	89.3
	Total	855	855	850	851	99.5	851	100.0	723	85.0	84.6	851	100.0	745	87.5	87.1	850	100.0	721	84.3
May, 1997	North	442	442	429	430	97.3	430	100.0	382	88.8	86.4	430	100.0	373	86.7	84.4	429	100.0	351	79.4
	South	439	439	425	426	97.0	426	100.0	394	92.5	89.7	426	100.0	374	87.8	85.2	425	100.0	391	89.1
	Total	881	881	854	856	97.2	856	100.0	776	90.7	88.1	856	100.0	747	87.3	84.8	854	100.0	742	84.2
June, 1997	North	413	413	404	404	97.8	404	100.0	355	87.9	86.0	404	100.0	352	87.1	85.2	404	100.0	323	78.2
	South	414	413	403	403	97.3	403	100.0	322	79.9	77.8	403	100.0	328	81.4	79.2	403	100.0	347	83.8
	Total	827	826	807	807	97.6	807	100.0	677	83.9	81.9	807	100.0	680	84.3	82.2	807	100.0	670	81.0
Total	North	3,462	3,462	3,385	3,391	97.9	3,391	100.0	2,931	86.4	84.7	3,391	100.0	2,864	84.5	82.7	3,385	100.0	2,709	78.2
	South	3,430	3,429	3,341	3,352	97.7	3,352	100.0	2,916	87.0	85.0	3,352	100.0	2,906	86.7	84.7	3,341	100.0	2,933	85.5
	Total	6,892	6,891	6,726	6,743	97.8	6,743	100.0	5,847	86.7	84.8	6,743	100.0	5,770	85.6	83.7	6,726	100.0	5,642	81.9

表2.2(1) ILASデータバージョン別処理状況（バージョン3シリーズ）

Ver.4.xx

2001年8月30日現在

		OPL1	ORST	DHF-1	DHF-2		(*5) V04.22 (Jan. 17, 2000)					V04.21: 594 scenes (Nov. 16, 1999)					V04.20: 6679 (Sep. 6, 1999)					V04.00 (March 23, 1999)				
		(*1)	(*2)	(*3)	(*4)	(%)	Processed(%)		L2 o.k	(%)	(%)	Processed(%)		L2 o.k	(%)	(%)	Processed(%)		L2 o.k	(%)	(%)	Processed(%)		L2 o.k	(%)	(%)
Month	Hem.	a		b	c	(c)/(a)	d	(d)/(c)	e	(e)/(c)	(e)/(a)	f	(f)/(c)	g	(g)/(c)	(g)/(a)	h	(h)/(c)	i	(i)/(c)	(i)/(a)	j	(j)/(c)	k	(k)/(c)	(k)/(a)
October, 1996	North	35	35	34	34	97.1	0	0.0	0	0.0	0.0	0	0.0	0	0.0	0.0	0	0.0	0	0.0	0.0	0	0.0	0	0.0	0.0
	South	32	32	30	30	93.8	0	0.0	0	0.0	0.0	0	0.0	0	0.0	0.0	0	0.0	0	0.0	0.0	0	0.0	0	0.0	0.0
	Total	67	67	64	64	95.5	0	0.0	0	0.0	0.0	0	0.0	0	0.0	0.0	0	0.0	0	0.0	0.0	0	0.0	0	0.0	0.0
November, 1996	North	425	425	415	414	97.4	351	84.8	351	84.8	82.6	21	5.1	21	5.1	4.9	414	100.0	351	84.8	82.6	21	5.1	21	5.1	4.9
	South	410	410	401	402	98.0	368	91.5	368	91.5	89.8	114	28.4	114	28.4	27.8	402	100.0	368	91.5	89.8	114	28.4	114	28.4	27.8
	Total	835	835	816	816	97.7	719	88.1	719	88.1	86.1	135	16.5	135	16.5	16.2	816	100.0	719	88.1	86.1	135	16.5	135	16.5	16.2
December, 1996	North	440	440	415	419	95.2	353	84.2	353	84.2	80.2	14	3.3	14	3.3	3.2	419	100.0	353	84.2	80.2	14	3.3	14	3.3	3.2
	South	435	435	411	414	95.2	387	93.5	387	93.5	89.0	35	8.5	34	8.2	7.8	414	100.0	387	93.5	89.0	35	8.5	34	8.2	7.8
	Total	875	875	826	833	95.2	740	88.8	740	88.8	84.6	49	5.9	48	5.8	5.5	833	100.0	740	88.8	84.6	49	5.9	48	5.8	5.5
January, 1997	North	441	441	434	435	98.6	364	83.7	364	83.7	82.5	17	3.9	17	3.9	3.9	435	100.0	364	83.7	82.5	17	3.9	17	3.9	3.9
	South	437	437	425	429	98.2	330	76.9	330	76.9	75.5	37	8.6	37	8.6	8.5	429	100.0	330	76.9	75.5	37	8.6	37	8.6	8.5
	Total	878	878	859	864	98.4	694	80.3	694	80.3	79.0	54	6.3	54	6.3	6.2	864	100.0	694	80.3	79.0	54	6.3	54	6.3	6.2
February, 1997	North	398	398	392	392	98.5	355	90.6	355	90.6	89.2	59	15.1	59	15.1	14.8	392	100.0	355	90.6	89.2	59	15.1	59	15.1	14.8
	South	395	395	387	388	98.2	358	92.3	358	92.3	90.6	74	19.1	74	19.1	18.7	388	100.0	358	92.3	90.6	74	19.1	74	19.1	18.7
	Total	793	793	779	780	98.4	713	91.4	713	91.4	89.9	133	17.1	133	17.1	16.8	780	100.0	713	91.4	89.9	133	17.1	133	17.1	16.8
March, 1997	North	441	441	438	438	99.3	387	88.4	387	88.4	87.8	69	15.8	68	15.5	15.4	438	100.0	387	88.4	87.8	69	15.8	68	15.5	15.4
	South	440	440	433	434	98.6	404	93.1	404	93.1	91.8	0	0.0	0	0.0	0.0	434	100.0	404	93.1	91.8	0	0.0	0	0.0	0.0
	Total	881	881	871	872	99.0	791	90.7	791	90.7	89.8	69	7.9	68	7.8	7.7	872	100.0	791	90.7	89.8	69	7.9	68	7.8	7.7
April, 1997	North	427	427	424	425	99.5	369	86.8	369	86.8	86.4	24	5.6	24	5.6	5.6	425	100.0	369	86.8	86.4	24	5.6	24	5.6	5.6
	South	428	428	426	426	99.5	392	92.0	392	92.0	91.6	8	1.9	8	1.9	1.9	426	100.0	392	92.0	91.6	8	1.9	8	1.9	1.9
	Total	855	855	850	851	99.5	761	89.4	761	89.4	89.0	32	3.8	32	3.8	3.7	851	100.0	761	89.4	89.0	32	3.8	32	3.8	3.7
May, 1997	North	442	442	429	430	97.3	383	89.1	383	89.1	86.7	24	5.6	24	5.6	5.4	430	100.0	383	89.1	86.7	24	5.6	24	5.6	5.4
	South	439	439	425	426	97.0	393	92.3	393	92.3	89.5	65	15.3	65	15.3	14.8	426	100.0	393	92.3	89.5	65	15.3	65	15.3	14.8
	Total	881	881	854	856	97.2	776	90.7	776	90.7	88.1	89	10.4	89	10.4	10.1	856	100.0	776	90.7	88.1	89	10.4	89	10.4	10.1
June, 1997	North	413	413	404	404	97.8	355	87.9	355	87.9	86.0	3	0.7	3	0.7	0.7	404	100.0	355	87.9	86.0	3	0.7	3	0.7	0.7
	South	414	413	403	403	97.3	320	79.4	320	79.4	77.3	30	7.4	28	6.9	6.8	403	100.0	320	79.4	77.3	30	7.4	28	6.9	6.8
	Total	827	826	807	807	97.6	675	83.6	675	83.6	81.6	33	4.1	31	3.8	3.7	807	100.0	675	83.6	81.6	33	4.1	31	3.8	3.7
Total	North	3,462	3,462	3,385	3,391	97.9	2,917	86.0	2,917	86.0	84.3	231	6.8	230	6.8	6.6	3,357	99.0	2,917	86.0	84.3	231	6.8	230	6.8	6.6
	South	3,430	3,429	3,341	3,352	97.7	2,952	88.1	2,952	88.1	86.1	363	10.8	360	10.7	10.5	3,322	99.1	2,952	88.1	86.1	363	10.8	360	10.7	10.5
	Total	6,892	6,891	6,726	6,743	97.8	5,869	87.0	5,869	87.0	85.2	594	8.8	590	8.7	8.6	6,679	99.1	5,869	87.0	85.2	594	8.8	590	8.7	8.6

表2.2(1) ILASデータバージョン別処理状況（バージョン4シリーズ）

表2.2(1) *1) OPL1: Operation Plan

(2) *2) ORST: Operation Result Status

*3) DHF-1: Data sent from NASDA (?Feb. 09, 1998)

*4) DHF-2: Data sent from NASDA (Include data reedited by NASDA)

*5) V04.22: Revised UKMO products for V04.20

Ver.5.xx

2001年8月30日現在

Month	Hem.	OPL1 (*1) a	ORST (*2)	DHF-1 (*3) b	DHF-2 (*4) c	(%) (c)/(a)	(*5) V05.20 (Apr. 20, 2001) Processed (%) e	(e)/(c)	L2 o.k d	(%) (d)/(c)	(%) (d)/(a)	V05.12/V05.11/V05.10 (Dec. 21, 2000) Processed (%) f	(f)/(c)	L2 o.k g	(%) (g)/(c)	(%) (g)/(a)
September, 1996	North				14		14	100	6	42.9		14	100	6	42.9	
	South				8		8	100	6	75.0		8	100	6	75.0	
	Total				22		22	100	12	54.5		22	100	12	54.5	
October, 1996	North	35	35	34	34	97.1	34	100	29	85.3	82.9	34	100	29	85.3	82.9
	South	32	32	30	30	93.8	30	100	24	80.0	75.0	30	100	24	80.0	75.0
	Total	67	67	64	64	95.5	64	100	53	82.8	79.1	64	100	53	82.8	79.1
November, 1996	North	425	425	415	414	97.4	414	100	326	78.7	76.7	414	100	326	78.7	76.7
	South	410	410	401	402	98.0	402	100	339	84.3	82.7	402	100	339	84.3	82.7
	Total	835	835	816	816	97.7	816	100	665	81.5	79.6	816	100	665	81.5	79.6
December, 1996	North	440	440	415	419	95.2	419	100	352	84.0	80.0	419	100	352	84.0	80.0
	South	435	435	411	414	95.2	414	100	384	92.8	88.3	414	100	384	92.8	88.3
	Total	875	875	826	833	95.2	833	100	736	88.4	84.1	833	100	736	88.4	84.1
January, 1997	North	441	441	434	435	98.6	435	100	357	82.1	81.0	435	100	355	81.6	80.5
	South	437	437	425	429	98.2	429	100	329	76.7	75.3	429	100	329	76.7	75.3
	Total	878	878	859	864	98.4	864	100	686	79.4	78.1	864	100	684	79.2	77.9
February, 1997	North	398	398	392	392	98.5	392	100	352	89.8	88.4	392	100	352	89.8	88.4
	South	395	395	387	388	98.2	388	100	358	92.3	90.6	388	100	357	92.0	90.4
	Total	793	793	779	780	98.4	780	100	710	91.0	89.5	780	100	709	90.9	89.4
March, 1997	North	441	441	438	438	99.3	438	100	383	87.4	86.8	438	100	383	87.4	86.8
	South	440	440	433	434	98.6	434	100	402	92.6	91.4	434	100	402	92.6	91.4
	Total	881	881	871	872	99.0	872	100	785	90.0	89.1	872	100	786	90.0	89.1
April, 1997	North	427	427	424	425	99.5	425	100	366	86.1	85.7	425	100	366	86.1	85.7
	South	428	428	426	426	99.5	426	100	392	92.0	91.6	426	100	392	92.0	91.6
	Total	855	855	850	851	99.5	851	100	758	89.1	88.7	851	100	758	89.1	88.7
May, 1997	North	442	442	429	430	97.3	430	100	379	88.1	85.7	430	100	379	88.1	85.7
	South	439	439	425	426	97.0	426	100	393	92.3	89.5	426	100	393	92.3	89.5
	Total	881	881	854	856	97.2	856	100	772	90.2	87.6	856	100	772	90.2	87.6
June, 1997	North	413	413	404	404	97.8	404	100	349	86.4	84.5	404	100	348	86.1	84.3
	South	414	413	403	403	97.3	403	100	301	74.7	72.7	403	100	301	74.7	72.7
	Total	827	826	807	807	97.6	807	100	650	80.5	78.6	807	100	649	80.4	78.5
Total	North	3,462	3,462	3,385	3,405	98.4	3,405	100	2,894	85.0	83.6	3,405	100	2,896	85.1	83.7
	South	3,430	3,429	3,341	3,360	98.0	3,360	100	2,928	87.1	85.4	3,360	100	2,927	87.1	85.3
	Total	6,892	6,891	6,726	6,765	98.2	6,765	100	5,827	86.1	84.5	6,765	100	5,823	86.1	84.5

*1) OPL1: Operation Plan
*2) ORST: Operation Result Status
*3) DHF-1: Data sent from NASDA (?Feb. 09, 1998)
*4) DHF-2: Data sent from NASDA (Include data reedited by NASDA)
*5) V05.20: Merged data of Version 5.10, 5.11, and 5.12

表2.2(3)　ILASデータバージョン別処理状況（バージョン4シリーズ）

Re-processing

<L0 data re-edited by NASDA>

Month	Hem.	DHF received	Result OK	%
October, 1996	North	6	3	50.0
	South	3	2	66.7
	Total	9	5	55.6
November 1996	North	75	23	30.7
	South	30	13	43.3
	Total	105	36	34.3
December 1996	North	75	19	25.3
	South	26	3	11.5
	Total	101	22	21.8
January 1997	North	83	21	25.3
	South	51	17	33.3
	Total	134	38	28.4
February 1997	North	69	35	50.7
	South	28	4	14.3
	Total	97	39	40.2
March 1997	North	43	11	25.6
	South	34	5	14.7
	Total	77	16	20.8
April, 1997	North	76	33	43.4
	South	29	5	17.2
	Total	105	38	36.2
May 1997	North	50	15	30.0
	South	27	3	11.1
	Total	77	18	23.4
June 1997	North	60	25	41.7
	South	45	4	8.9
	Total	105	29	27.6
Total Sum.	North	537	185	34.5
	South	273	56	20.5
	Total	810	241	29.8

LD/DP/GP (V04.1 LD: L0 data abnormal
DP: Data processing abnormal end
GP: Gas profile abnormal

Month	Hem.	LD	DP	GP
October, 1996	North	9	2	0
	South	5	2	0
	Total	14	4	0
November 1996	North	37	25	0
	South	29	5	0
	Total	66	30	0
December 1996	North	23	41	1
	South	12	15	0
	Total	35	56	1
January 1997	North	36	32	0
	South	83	16	0
	Total	119	48	0
February 1997	North	14	23	2
	South	18	12	0
	Total	32	35	2
March 1997	North	31	20	1
	South	12	18	1
	Total	43	38	2
April, 1997	North	39	16	4
	South	21	12	0
	Total	60	28	4
May 1997	North	30	17	1
	South	25	7	0
	Total	55	24	1
June 1997	North	34	14	1
	South	38	44	0
	Total	72	58	1
Total Sum.	North	253	190	10
	South	243	131	1
	Total	496	321	11

表2.3 レベル0データの再処理状況

2.3 ILAS データ提供状況

ILAS データは、データ処理アルゴリズムの検討およびデータ質の吟味のために ILAS プロジェクトの登録研究者に限って提供されている。1997 年 2 月から、Web 上（ILAS プロジェクトホームページ；http://www-ilas.nies.go.jp）および FTP でのデータ提供が行われていたが、1998 年 5 月以降 FTP によるデータ提供の実績はなくなった。2001 年 8 月末現在、Web 上ではバージョン 1.00 からバージョン 5.23 までのテストプロダクトが登録されている。この他、で高度－経度断面図（1day plot）や高度－時間断面（3-week plot, 12-week plot)）、他衛星・オゾンゾンデとの比較図、UKMO プロダクト、ILAS Validation data の一部、渦位等の計算ツールなども提供されている（サイトマップ参照)。

一般ユーザーに対しては、1998 年 6 月から妥当性が確認された一部のデータ（バージョン 3.10）の提供が Web 上で開始され、1999 年 11 月からはバージョン 4.20 も追加された。公開されているのは以下の数値情報および画像情報で、ユーザー登録を Web 上で行った上で利用することができる。

（1）高度分布（数値データ、グラフ）

バージョン 3.10；オゾン、硝酸、エアロゾル（780nm）

（2）高度－経度断面図（1-day plot、要素毎）

バージョン 4.20；オゾン、硝酸、二酸化窒素、亜酸化窒素、水蒸気、メタン、エアロゾル（780nm）

バージョン 3.10；オゾン、硝酸、エアロゾル（780nm）

（3）高度－時間断面図（12-week plot、3-week plot）

バージョン 4.20；12 週間分 1 組

ILAS 測定位置、気温（UKMO）、modified PV、オゾン全量（ADEOS/TOMS）、オゾン、二酸化窒素、硝酸、亜酸化窒素、メタン、水蒸気、エアロゾル消散係数（780nm）

バージョン 3.10；3 週間分、4 種 1 組

ILAS 測定位置、気温（UKMO）、modified PV、オゾン全量（ADEOS/TOMS）、オゾン、気温（ILAS）、二酸化窒素、硝酸、亜酸化窒素、メタン、水蒸気、エアロゾル消散係数（780nm）

ただし、ILAS データの検証作業は現在も進行中であり、これらのデータはいずれも「未検証」であることが注記されている。

なお、利用者がデータを研究報告・授業・講演等、第 3 者に対して公表する場合、以下の様な要求事項がある。

・データの提供元を以下の様に明示すること。

「ここで使用した ILAS データは、環境庁が開発した改良型大気周縁赤外分光計（ILAS）センサーによって取得されたもので、国立環境研究所 ILAS 衛星データ処

理運用施設において処理されたものである。」

・別に定める様式に従って、「データ利用報告」を提出すること。

また、商業的な目的での利用およびディジタルデータの第3者への無断配布は禁止されている。

ILAS Webからのレベル2プロファイルデータの提供状況を表2.4(1)～(3)に示す。傾向は、これまでとほぼ同様である。登録研究者へのデータ提供では、登録研究者数、提供されたデータ量ともに約6割が国内、約4割が海外である。国内での利用のうち、約4割は国立環境研究所内プロジェクト関係者、約6割は大学（教育）機関によるもので、おおよそ登録者数に見合っている。一方、海外からの利用はフランス、アメリカ、ドイツが多く、提供されたデータ量でみると、フランス、アメリカの政府（研究）機関、およびアメリカ、ドイツ、韓国の大学（教育）機関への配信が多い。

提供されたデータ量でみた一般ユーザーによる利用は、約7割が国内、約3割が海外である。国内では、大学（教育）機関による利用が約8割と大部分を占め、海外ではイギリスの大学（教育）機関、アメリカの政府（研究）機関による利用が多い。

表2.4(1)　登録研究者に対する国立環境研究所内・所外別データ提供状況

2001年8月31日現在

所内・所外別		国内	海外	合計
所内 プロジェクト関係者	登録者数 プロファイル数 データ量（KB）	35 3,291,298 9,450,133		35 3,291,298 9,450,133
所外 登録研究者	登録者数 プロファイル数 データ量（KB）	51 4,523,117 12,486,828	49 4,695,958 14,398,972	100 9,219,075 26,885,799
合計	登録者数 プロファイル数 データ量（KB）	86 7,814,415 21,936,960	49 4,695,958 14,398,972	135 12,510,373 36,335,932

表 2.4(2)　登録研究者に対する国別・機関別データ提供状況　　上段：登録者数

2001 年 8 月 31 日現在　　中段：プロファイル数

下段：データ量（KB）

機関	国内	フランス	アメリカ	ドイツ	イギリス	韓国	その他	海外計	合計
政府	26	10	10	10	0	0	4	34	60
(研究)	3,394,798	2,390,107	1,003,192	254,897	0	0	10	3,648,206	7,043,004
機関	9,718,574	7,071,122	2,871,471	1,029,942	0	0	31	10,972,567	20,691,140
大学	35	1	6	3	2	2	1	15	50
(教育	4,205,144	0	307,879	233,109	0	471,198	35,566	1,047,752	5,252,896
機関)	11,440,293	0	985,292	665,821	0	1,655,592	119,700	3,426,405	14,866,698
民間	12	0	0	0	0	0	0	0	23
(企業)	144,879	0	0	0	0	0	0	0	144,879
	553,564	0	0	0	0	0	0	0	553,564
その他	2	0	0	0	0	0	0	0	2
(財団)	69,594	0	0	0	0	0	0	0	69,594
	224,530	0	0	0	0	0	0	0	224,530
合計	86	11	16	13	2	2	5	49	135
	7,814,415	2,390,107	1,311,071	488,006	0	471,198	35,576	4,695,958	12,510,373
	21,936,960	7,071,122	3,856,763	1,695,763	0	1,655,592	119,731	14,398,972	36,335,932

表 2.4 (3)　一般ユーザーに対する国別・機関別データ提供状況　　上段：登録者数

2001 年 8 月 31 日現在　　中段：プロファイル数

下段：データ量（KB）

機関	国内	フランス	アメリカ	ドイツ	イギリス	韓国	その他	海外計	合計
政府	21	5	9	3	1	0	3	21	42
(研究)	9,851	20,030	31,006	349	0	0	0	51,385	61,236
機関	28,405	55,063	90,890	1,121	0	0	0	147,074	175,479
大学	60	0	8	5	10	2	9	34	94
(教育	248,438	0	17,108	3,192	33,793	1	3,302	57,396	305,834
機関)	696,715	0	51,974	9,867	100,184	3	10,618	172,646	869,361
民間	40	0	3	0	0	0	1	4	44
(企業)	32,123	0	6,450	0	0	0	0	6,450	38,573
	93,727	0	19,313	0	0	0	0	19,313	113,040
その他	10	1	1	0	1	0	2	5	15
(財団)	3,901	0	0	0	0	0	0	0	3,901
	12,508	0	0	0	0	0	0	0	12,508
合計	131	6	21	8	12	2	15	64	195
	294,313	20,030	54,564	3,541	33,793	1	3,302	115,231	409,544
	831,354	55,063	162,178	10,988	100,184	3	10,618	339,033	1,170,388

第３章　ILAS 公開プロダクト

登録研究者は、ILAS ホームページ上の「ILAS Data Search and Ordering」から各種 ILAS データを検索し、ダウンロードすることができる。その他、他衛星・オゾンゾンデとの比較図、高度－経度断面図、時間－高度断面図、UKMO プロダクト、オゾン全量分布図や渦位分布図上にプロットされた ILAS 測定位置図、475K 渦位分布図（UKMO）、北半球極渦の縁の位置計算結果、UKMO 渦位計算ツール・流跡線計算ツールのマニュアルがあり、さらに、ILAS MOU で定められたメンバーは CMDB (Correlative Measurement Data Base)にアクセスすることができる。

一般ユーザーは、ILAS ホームページ上の「データ検索・画像データ提供」でユーザー登録をすれば、各ガスについての数値データ、鉛直プロファイル、高度－時間断面図、高度－経度断面図を利用することができる。データはテキストデータ、図は pdf ファイルである。なお、バージョン 3.10 プロダクトは 1998 年 6 月 1 日に登録、7 月 24 日・28 日に更新され、バージョン 4.20 プロダクトは 1999 年 11 月 9 日に登録されたものである。

なお、以下のファイルは利用にあたって特別な注意が必要であるため、別個に保管されている。

・太陽黒点がプロファイルに影響している可能性を持つイベントのファイル。
（2001 年 4 月 6 日更新）

・極成層圏雲が出現していたと考えられるイベントのファイル。このような場合はガスプロファイルの誤差が大きくなりがちである一方、エアロゾル消散係数（780nm）は影響されない。（2001 年 4 月 6 日更新）

3.1 レベル 2 プロダクト

一般ユーザー向けのプロダクト（数値データおよび鉛直プロファイル）は、バージョン 3.10 のオゾン、硝酸、エアロゾル消散係数（780nm）が利用できる。圧縮形式のアーカイブデータ（半球・ガス・月別）の他、個々のファイルはデータの期間や範囲を画面上で指定すれば検索、ダウンロードできる。図 3.1 に数値データ、図 3.1 にプロファイル図のサンプルを示す。

ILAS 数値データのフォーマットは、NASA Ames Format for Data Exchange (NASA Ames Format) のフォーマット番号 2160 に準拠している。このフォーマットはデータ交換を容易にするためと、異なるデータセットを解析・表示するためのソフトウェアを最小限の数でシェアするために作られたもので、以下の条件を満たすようにできている。(1) portable であること（プログラム言語によらず、どんなマシンでも読める。）、(2) self-describing であること（データがそれを読み、理解し、解釈するためのすべての情報を含む付属部分を持つ）、(3) 人間が読めること。したがって、データファイルはテキスト形式（ASCII）で、データ情報を記載したヘッダー部分と、それに続くデータ部分を持つ。

39 2160	[ヘッダーの行数] [ファイルフォーマットインデックス]
Yasuhiro Sasano	[名前]
National Institute for Environmental Studies	[機関]
Improved Limb Atmospheric Spectrometer	[プラットフォーム]
ADEOS/ILAS PROJECT	[ミッション]
1 1	[ファイル番号] [データセットの総ファイル数]
1996 11 17 2001 03 29	[データ取得開始時の日付 [データを処理した日付]
1.0	[第１独立変数（接線高度）のインターバル]
16	[独立変数の文字数]
Tangent height (km)	[第１独立変数の名前]
Satellite name / Sensor name	[第２独立変数の名前]
4	[従属変数の数]
0.001 0.00001 0.00001 0.00001	[従属変数のスケールファクター]
99999999 999999 999999 999999	[従属変数の欠測値もしくは異常値]
Observation time (second)	[従属変数の名前(1)]
O3 mixing ratio (ppmv)	[従属変数の名前(2)]
O3 internal error (ppmv)	[従属変数の名前(3)]
O3 total error (ppmv)	[従属変数の名前(4)]
2	[補助変数の数（第１補助変数は第１独立変数（接線高度）の数）]
1	[補助変数のうち文字で表されるものの数]
1.0	[補助変数のスケールファクター]
999	[補助変数の欠測値]
7	[補助変数の文字数]
zzzzzzz	
Number of tangent height levels	[補助変数の名前(1)]
Observation mode (Sunrise or Sunset)	[補助変数の名前(2)]
10	[特別コメント行の行数]
Data level: Level2	[特別コメント(1)]
Data quality: GOOD	[特別コメント(2)]
Data version: V05.20	[特別コメント(3)]
Revision: 0000	[特別コメント(4)]
Observation time (UTC,TH=20km point): 1996 11 17 20:48:43.218	[特別コメント(5)]
Occultation event number: 961117503S	[特別コメント(6)]
Latitude (deg,positive=north): -69.65	[特別コメント(7)]
Longitude (deg,positive=east): 25.46	[特別コメント(8)]
Start time of data: 1996 11 17 20:45:07.000	[特別コメント(9)
Data -99999 represents diverged or overflowed value.	[特別コメント(10)]
1	[コメント行の行数]
TH(km) Time(s) Values Int.er Tot.er	[コメント]
ADEOS/ILAS	[第２独立変数の値]
63	[第１独立変数（接線高度）の数]
Sunset	[第２補助変数の値]

8.00	74934486	8178	7578	11735
9.00	74933142	14982	7891	14454
10.00	74931966	23977	7724	15598
11.00	74930790	32590	8060	13745
		.		
		.		
		.		
68.00	74905630	41060	3663	26755
69.00	74905294	10568	4382	14659

【データ部分】

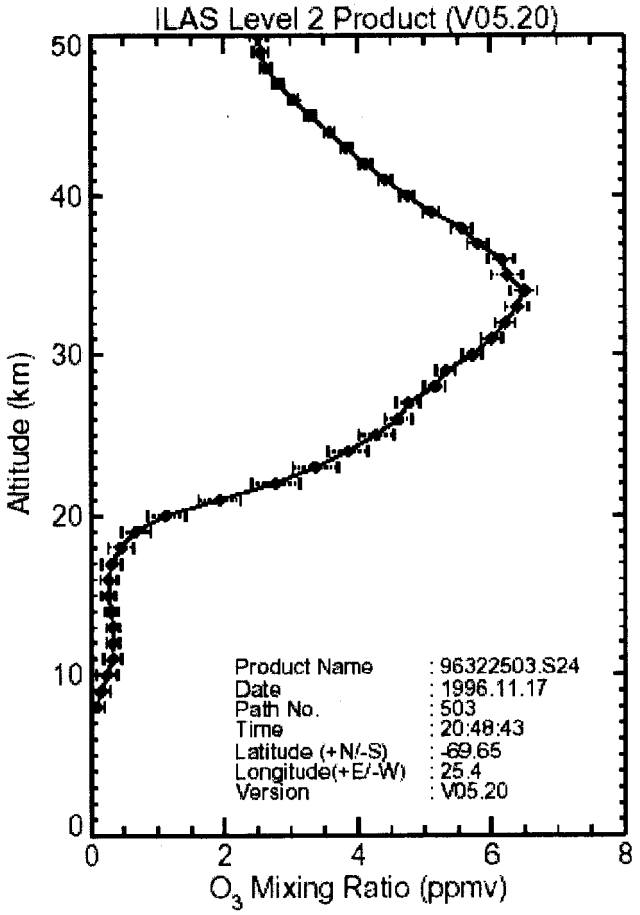


図 3.2　プロファイル図のサンプル

3.2 高度－時間断面

(1) 3-week plot（バージョン 5.20）

3-week plot は 3 週間を単位として 4 つの項目の高度－時間断面を 1 枚の図に表したものである。南半球・北半球それぞれにつき 3 枚 1 組で、1 枚目に ILAS の測定位置、英国気象局（UKMO）全球気象データによる気温と渦位、NASA/TOMS のオゾン全量、2 枚目に ILAS の観測によるオゾン・二酸化窒素・硝酸・亜酸化窒素の濃度、3 枚目にメタン・水蒸気・フロン（CFC12）の濃度および可視域（780nm）のエアロゾル消散係数の変化を示している。図 3.3 は 3-week plot の例で、南半球の 1996 年 11 月 17 日～1996 年 12 月 7 日、および北半球の 1997 年 3 月 23 日～1997 年 4 月 12 日のものである。

横軸は 1 月 1 日からの日数で、ILAS データが測定された順に並んでいる。ADEOS 位置図では、菱形のマークが測定位置の経度の変化、直線が緯度の変化を示している。ADEOS は 1 日に地球の周りをほぼ 14 周するため、1 日の測定点は、南北両半球の同一緯度帯の円周上に各 14 地点あり、測定位置は ADEOS が地球を一周するごとに約 25° ずつ西へずれる。一方、測定緯度は図 1.4 に示すように太陽の赤緯によってゆるやかに変化する。菱形のマークがないところは正常なデータが得られなかった部分で、各項目の時系列ではそれに対応

する部分が白く抜けている。

Modified PV (potential vorticity)はUKMOのデータを用いて算出されたもので、極渦の強さを示す指標である。ただし、高度－時間断面での渦位の変化を見るのに適するように通常の渦位に多少の変形を施してある。これは、Lait (1993)が提案したもので、渦位と同様の保存特性は残しながらも、高度に対する依存性が除去されるようにくふうされている。通常の渦位は絶対渦度に温位の気圧による変化率が乗じられているが、成層圏が安定な成層をしていることもあり、この変化率が高度とともに指数関数的に変化するため、渦位も高度に強く依存してしまう。このような性質は、鉛直断面図の考察や異なる温位面間の比較には不都合であるため、通常の渦位に$(\theta/\theta_0)^{-9/2}$（ここでは、$\theta_0=250$K）という簡単な無次元のスケーリングファクターを乗じたものがModified PVである。

TOMS Dataは、ADEOSに搭載されたNASAのTOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer、図1.1参照）で測定されたオゾン全量の値で、DU（ドブソン単位）で示されている。

(2) 12-week plot（バージョン5.20）

12-week plotは3-week plotと形式は同じであるが、各測定項目の12週間分の高度－時間断面を1枚の図に表したものである。北半球・南半球それぞれにつき各項目3枚1組で、ILAS観測期間全体の時系列を見ることができ、項目は3-week plotと同じで12種類ある。図3.4に12-week plotのオゾンの例で、南半球と北半球の1996年10月30日～1997年6月29日のものである。

(3) 8-month plot（バージョン5.20）

8-month plotは3-week plotや12-week plotと形式は同じであるが、各測定項目の8ヶ月分（ほぼ全観測期間）の高度－時間断面を1つの図で表したもので、おおよその季節変化を見るのに便利である。北半球・南半球それぞれにつき、オゾン・硝酸・二酸化窒素、水蒸気・メタン・亜酸化窒素、気温（UKMO）・エアロゾル消散係数の図が各1ファイルになっている。図3.5にこれらをすべて示す。

3.3 高度－経度断面 One-day plot（バージョン5.20）

ILASの観測位置は同じ緯度帯を1日でほぼ1周するので、毎日1枚の高度－経度断面図ができる。高度－経度断面は、各半球のオゾン、硝酸、二酸化窒素、亜酸化窒素、メタン、水蒸気、エアロゾル消散係数（780nm）のそれぞれについて1日1枚の図になっている。これにより、ある日ILASが測定した緯度における各ガスの分布がわかる。図4.3に南半球の1996年11月17日、北半球の1997年3月25日の例を示す。

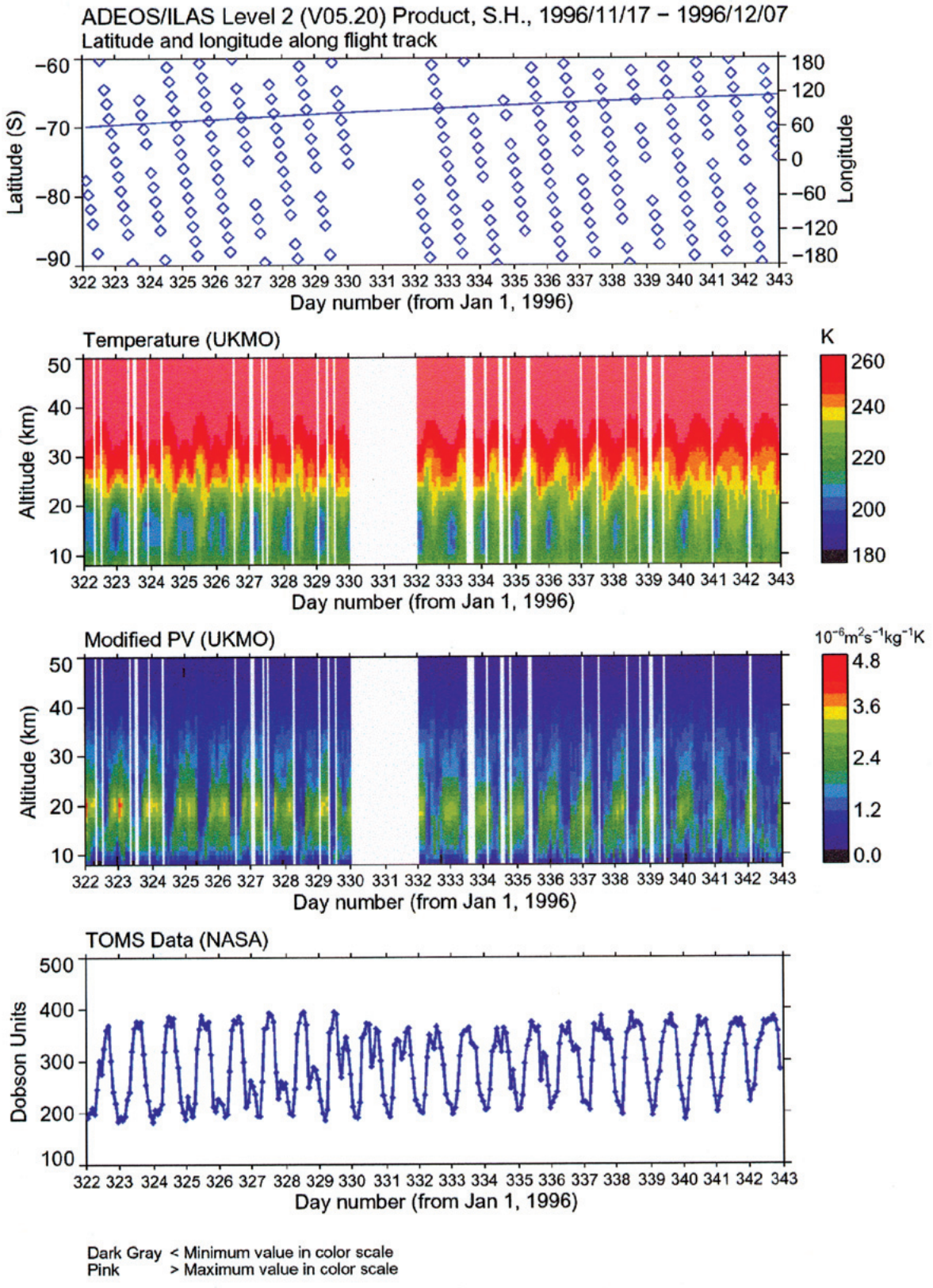


図 3.3(1)　3-week plot (ver.5.20)（南半球；1996/11/17 - 1996/12/07）
測定位置、気温(UKMO)、渦位、オゾン全量

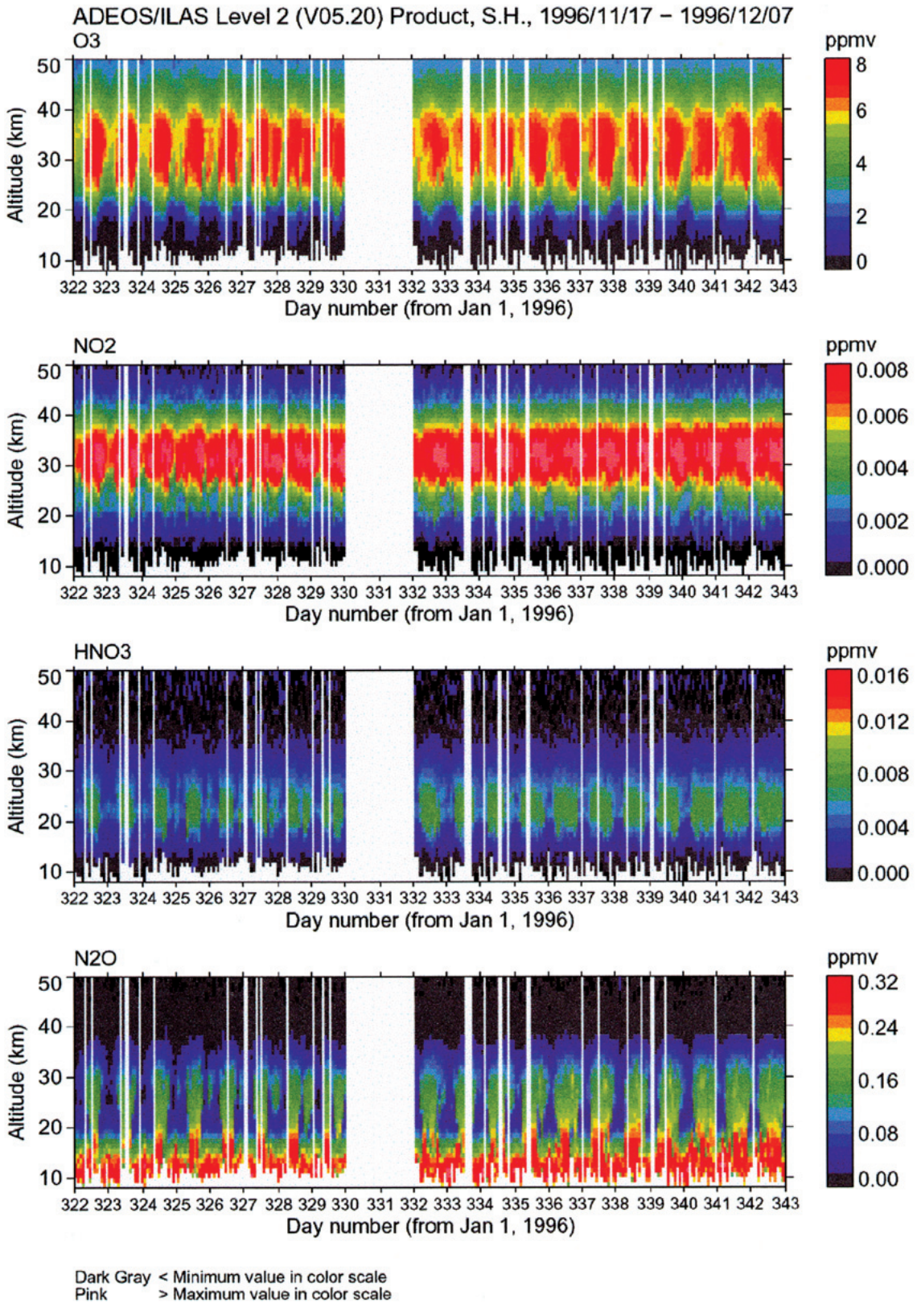


図 3.3(2)　3-week plot (ver.5.20)（南半球；1996/11/17 - 1996/12/07）
オゾン、二酸化窒素、硝酸、亜酸化窒素

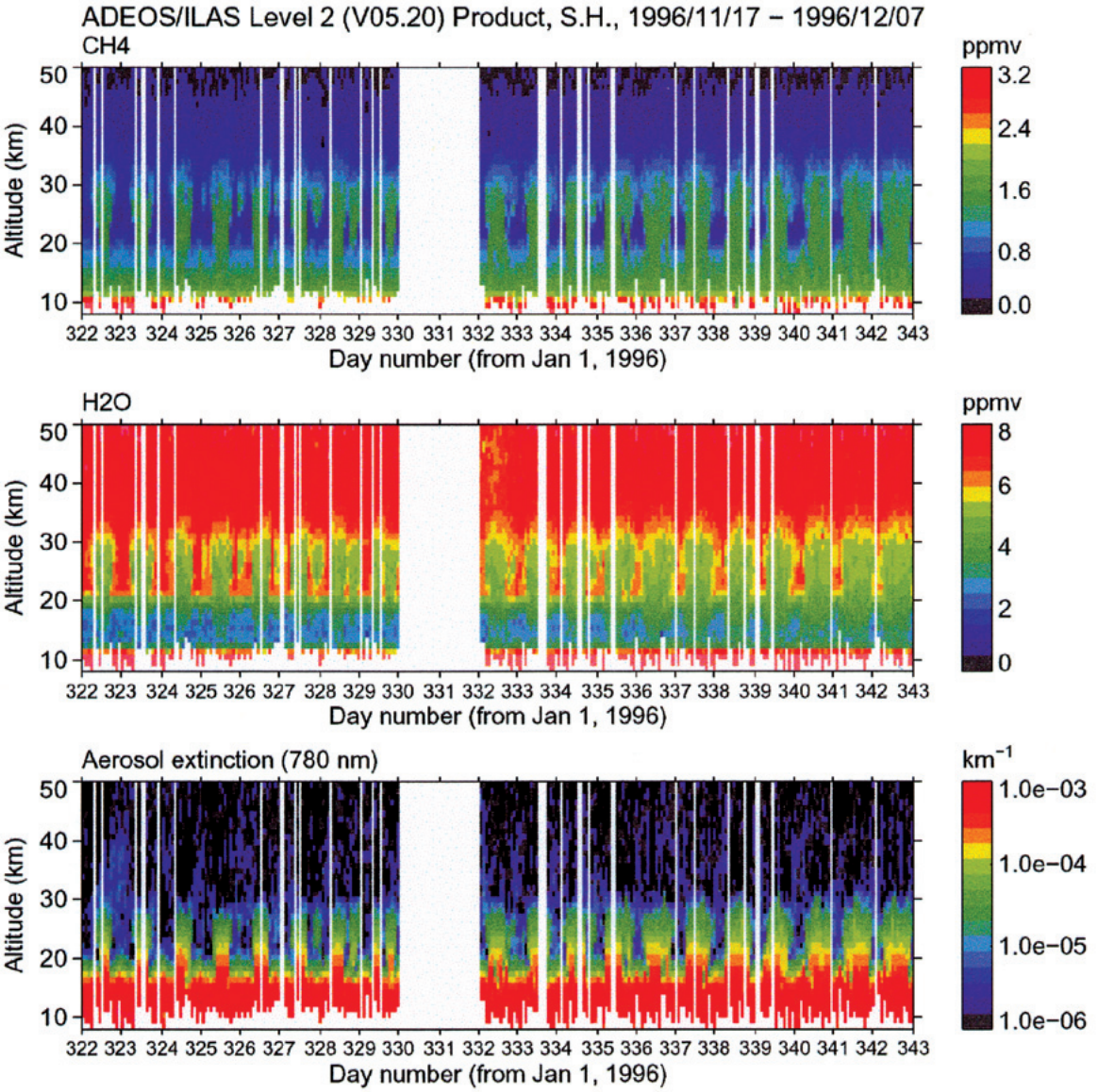


図 3.3(3)　3-week plot (ver.5.20)（南半球；1996/11/17 - 1996/12/07）
メタン、水蒸気、エアロゾル消散係数(780nm)

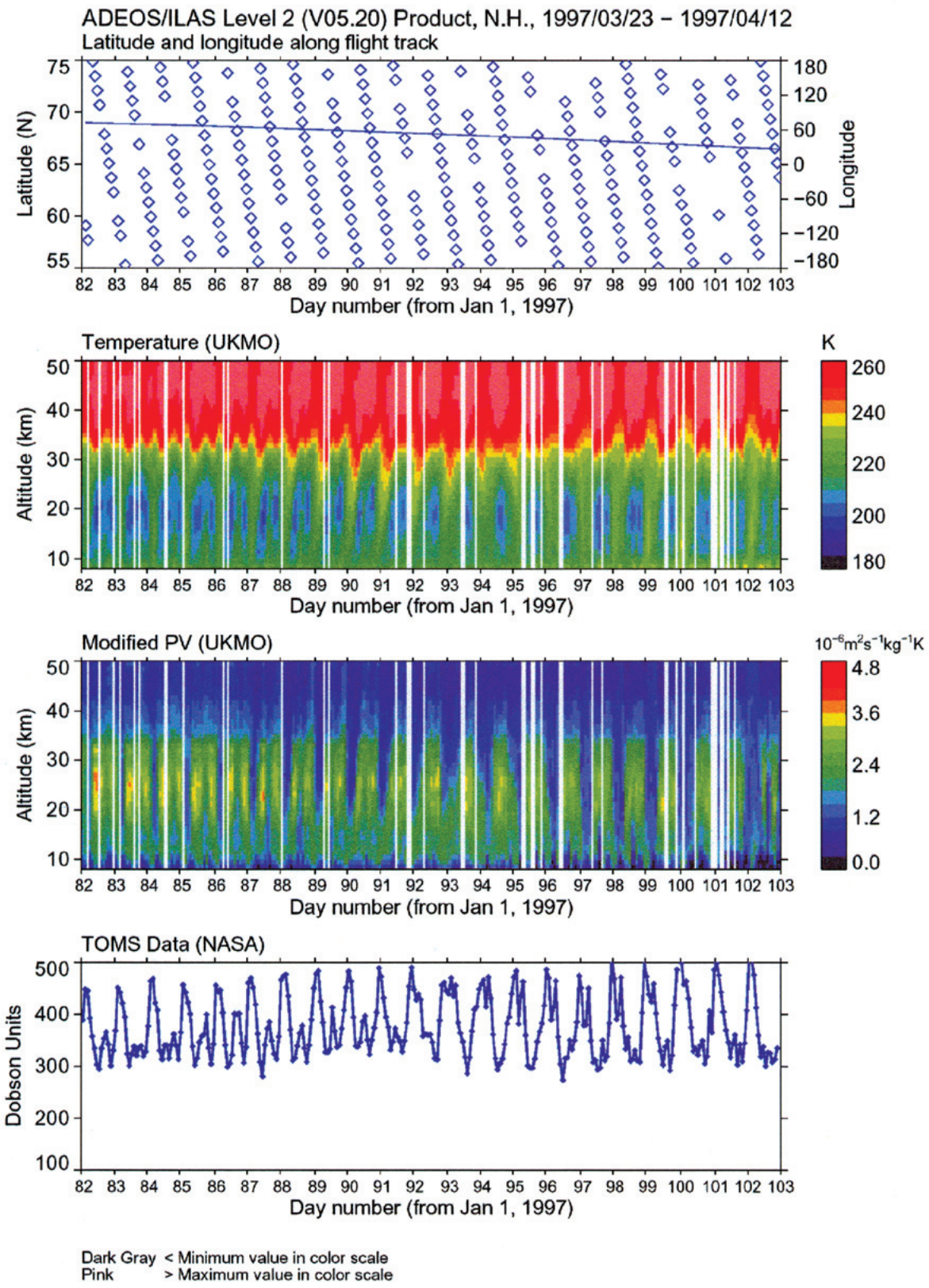


図 3.3(4)　3-week plot (ver.5.20)（北半球；1997/03/23 - 1997/04/12）
測定位置、気温(UKMO)、渦位、オゾン全量

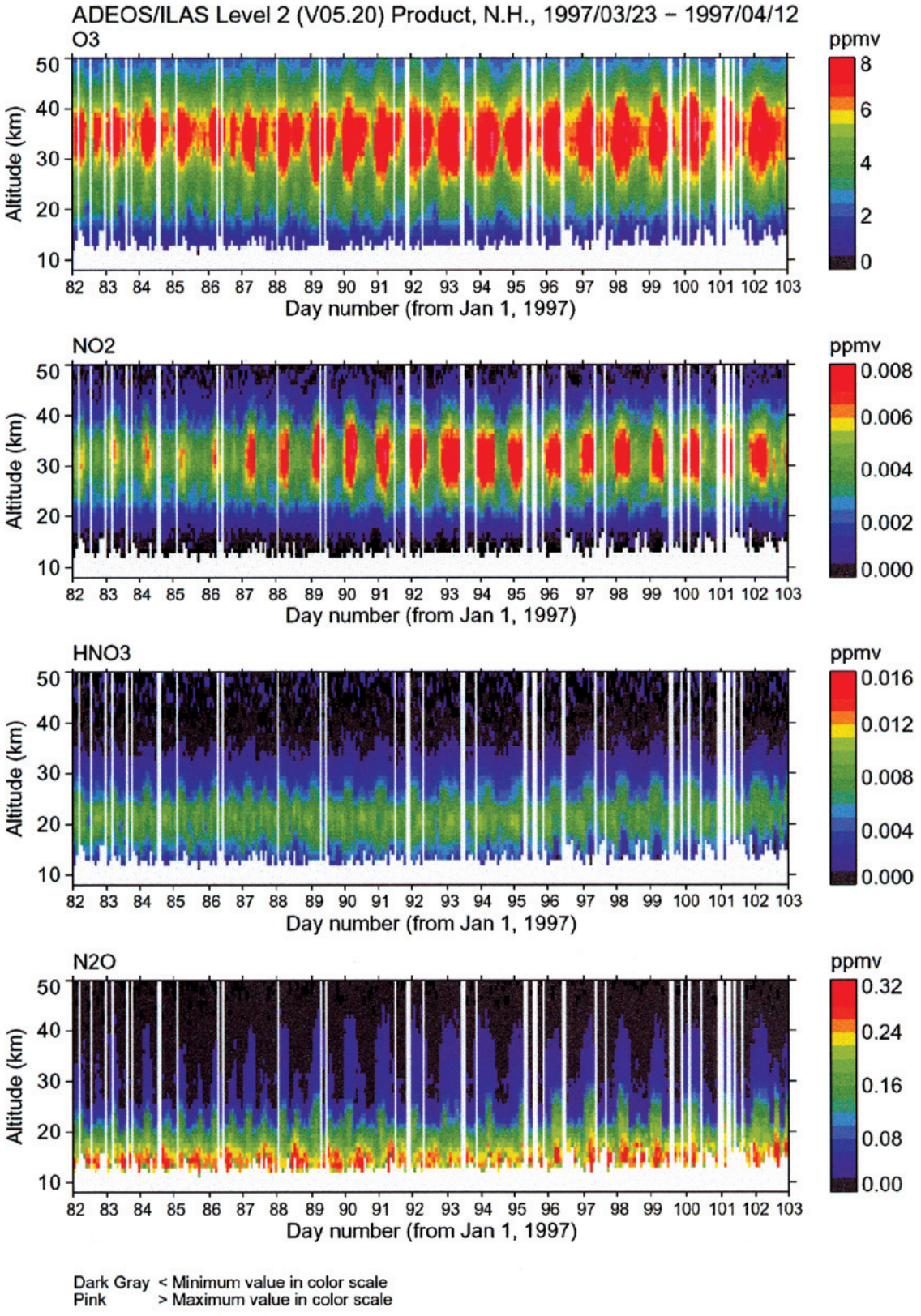
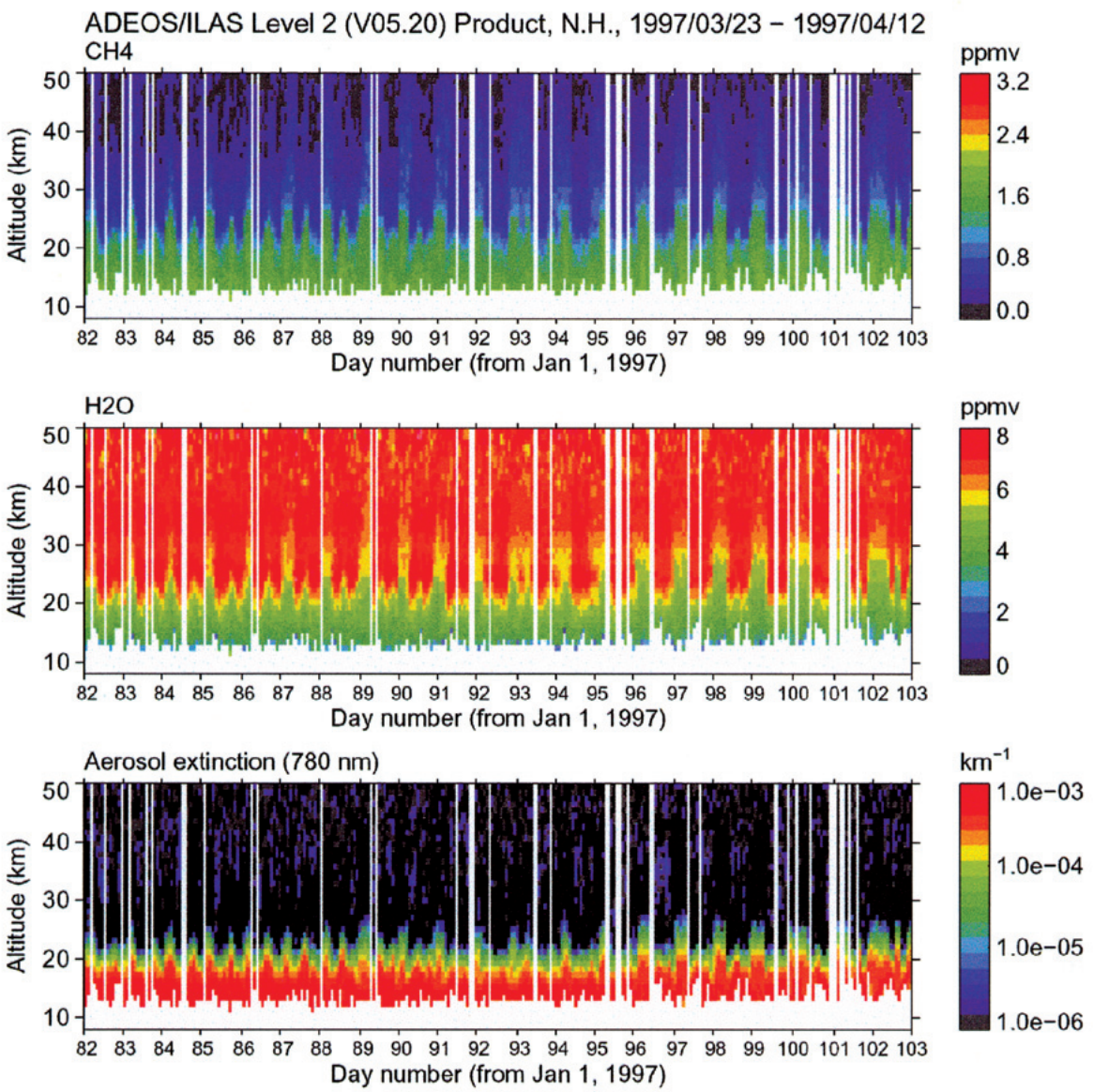


図 3.3(5)　3-week plot (ver.5.20)（北半球；1997/03/23 - 1997/04/12）
オゾン、二酸化窒素、硝酸、亜酸化窒素



Dark Gray < Minimum value in color scale
Pink > Maximum value in color scale

図 3.3(6)　3-week plot (ver.5.20)（北半球；1997/03/23 - 1997/04/12）
メタン、水蒸気、エアロゾル消散係数(780nm)

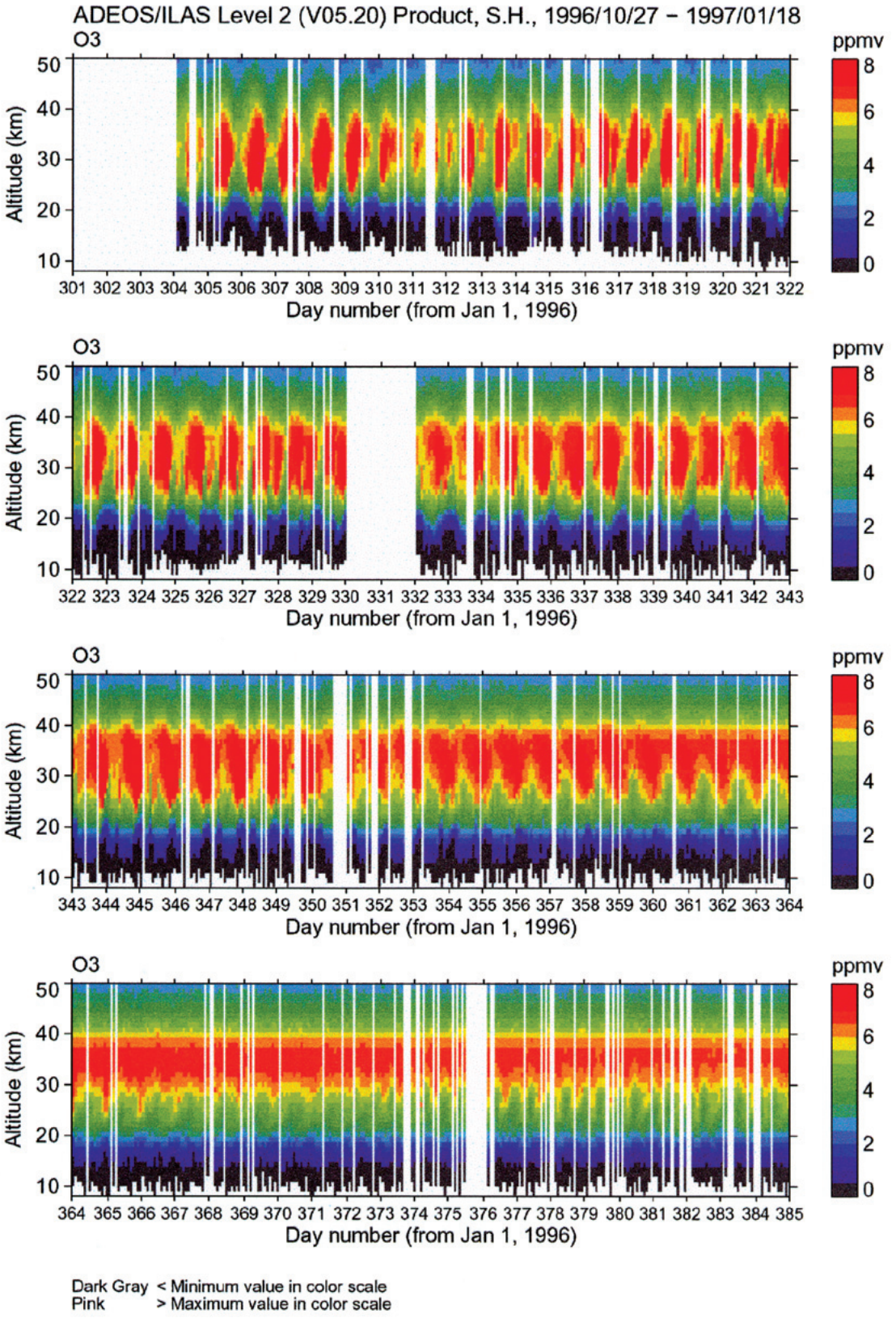


図 3-4(1)　12-week plot (ver.5.20)

南半球；オゾン；1996/10/27 - 1997/01/18

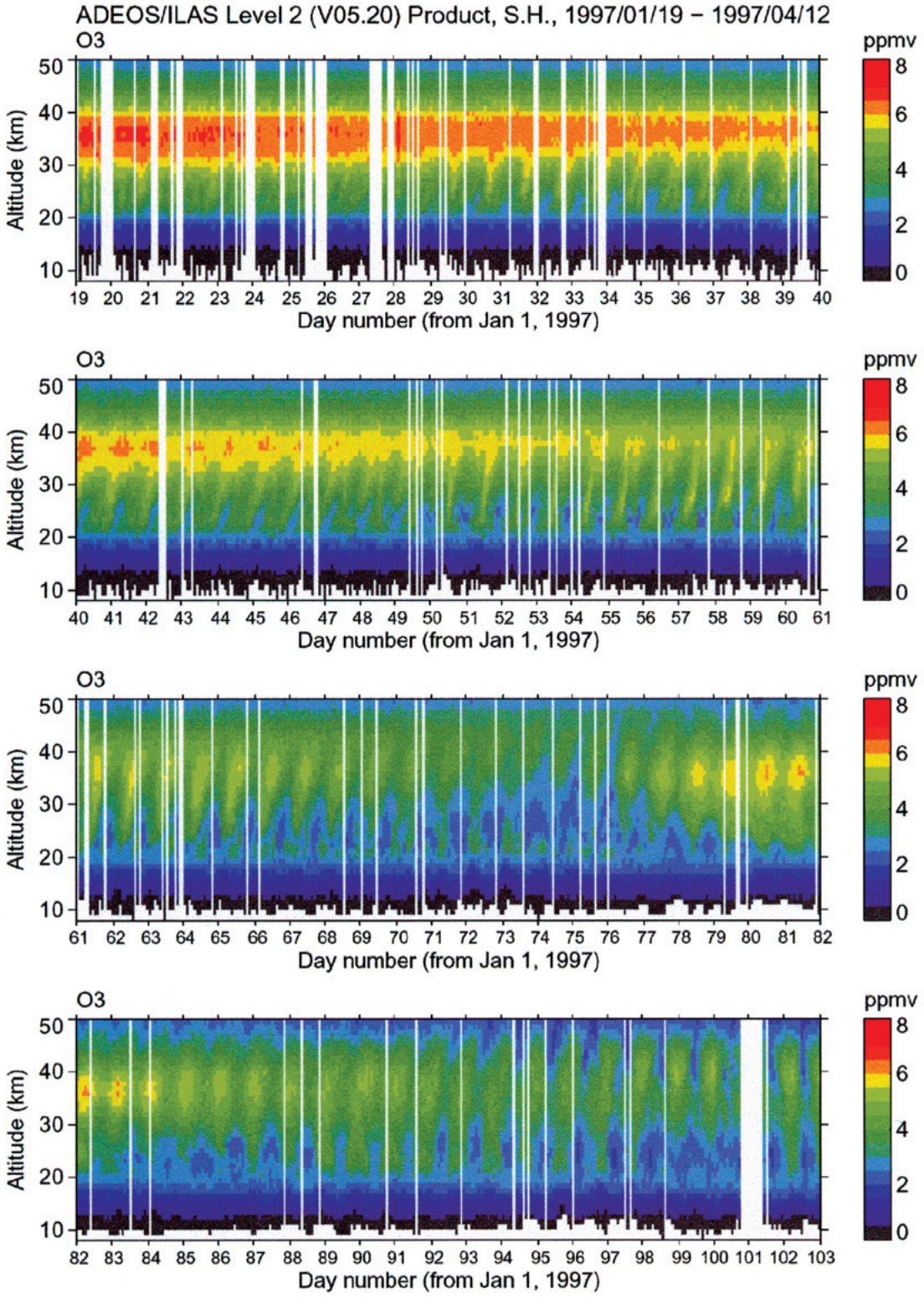


図 3-4(2)　12-week plot (ver.5.20)

南半球；オゾン；1997/01/19 - 1997/04/12

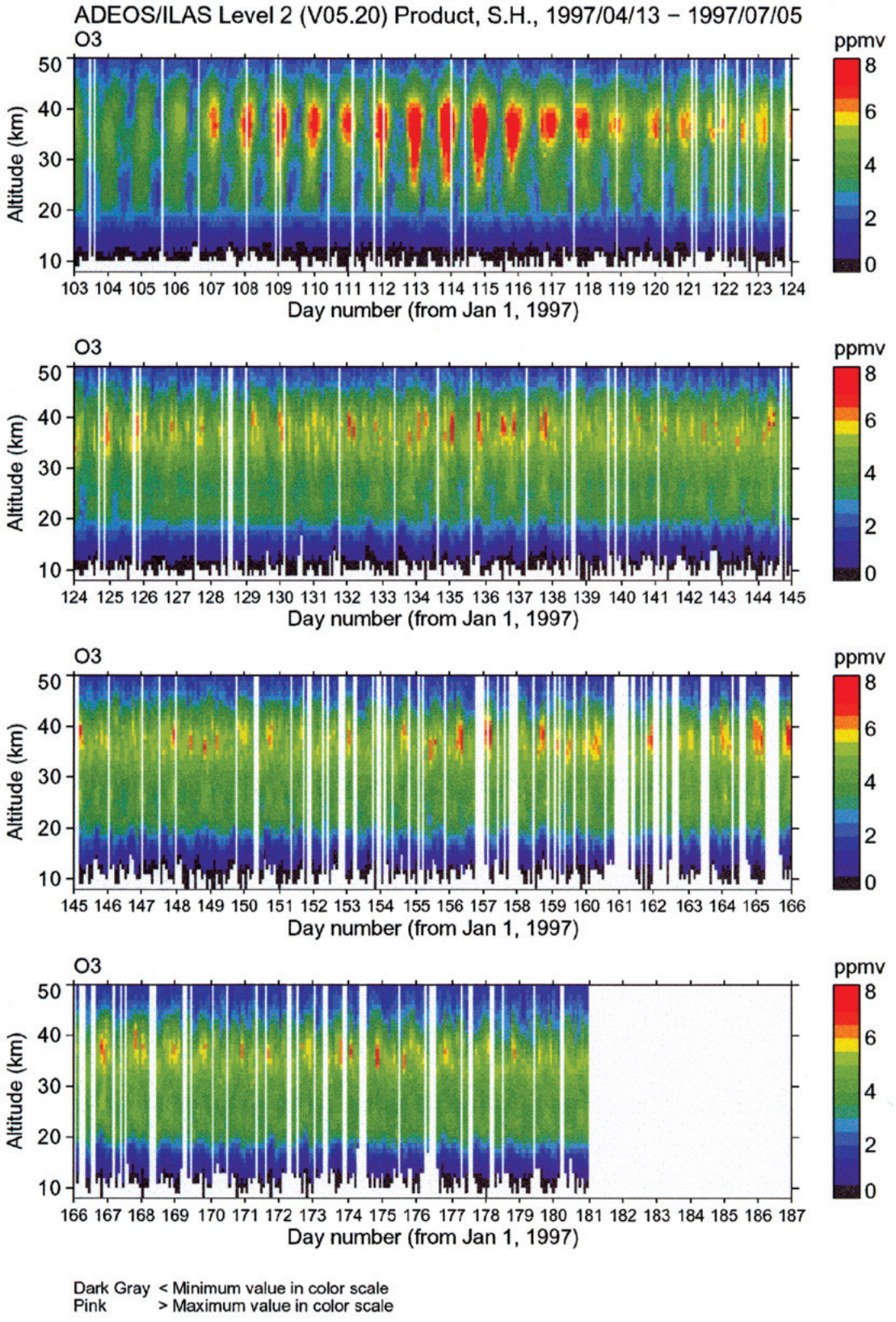


図 3-4(3)　12-week plot (ver.5.20)

南半球；オゾン；1997/04/13 - 1997/07/05

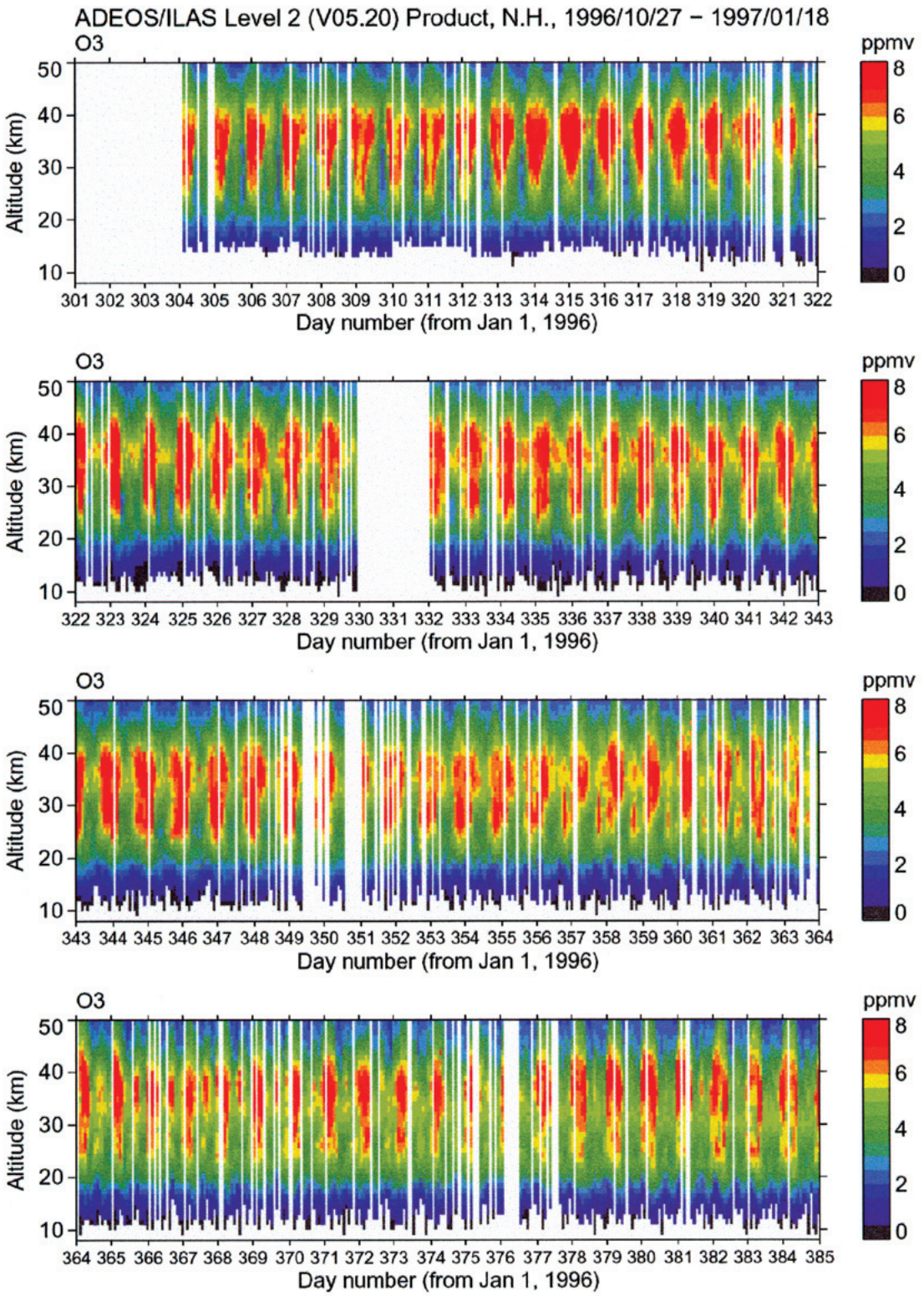


図 3-4(4)　12-week plot (ver.5.20)

北半球；オゾン；1996/10/27 - 1997/01/18

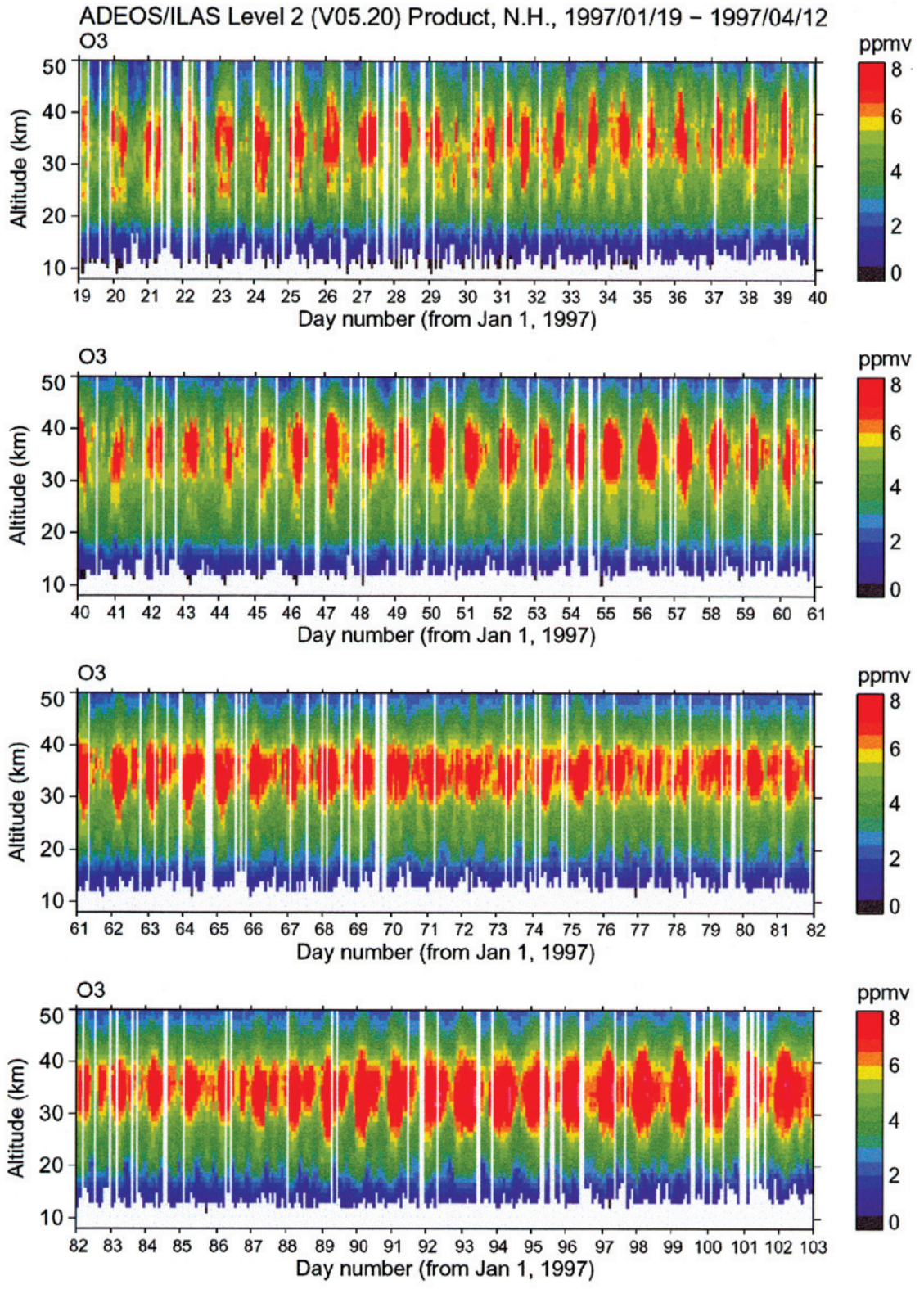


図 3-4(5)　12-week plot (ver.5.20)

北半球；オゾン；1997/01/19 - 1997/04/12

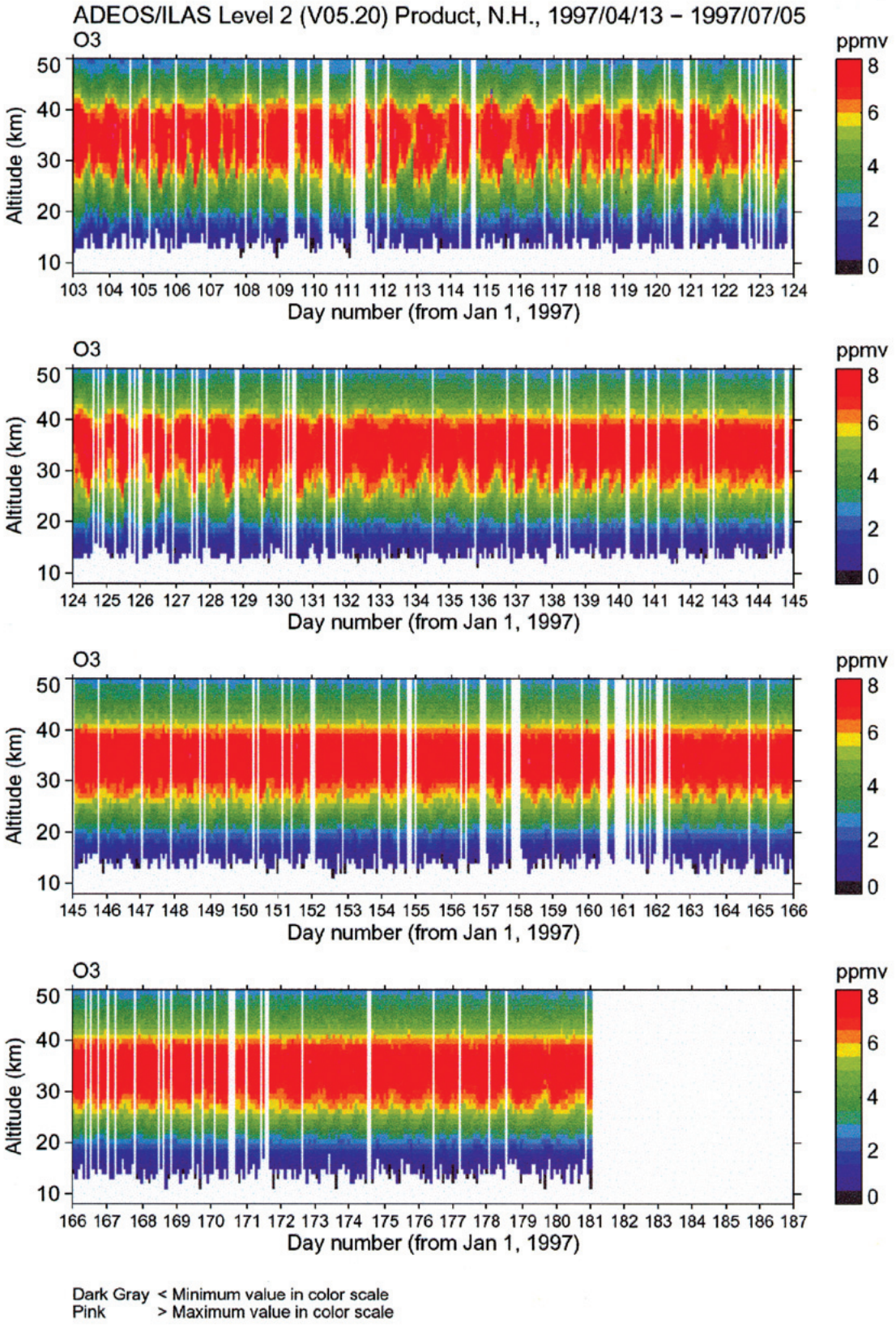


図 3.4(6)　12-week plot (ver.5.20)

北半球；オゾン；1997/04/13 - 1997/07/05

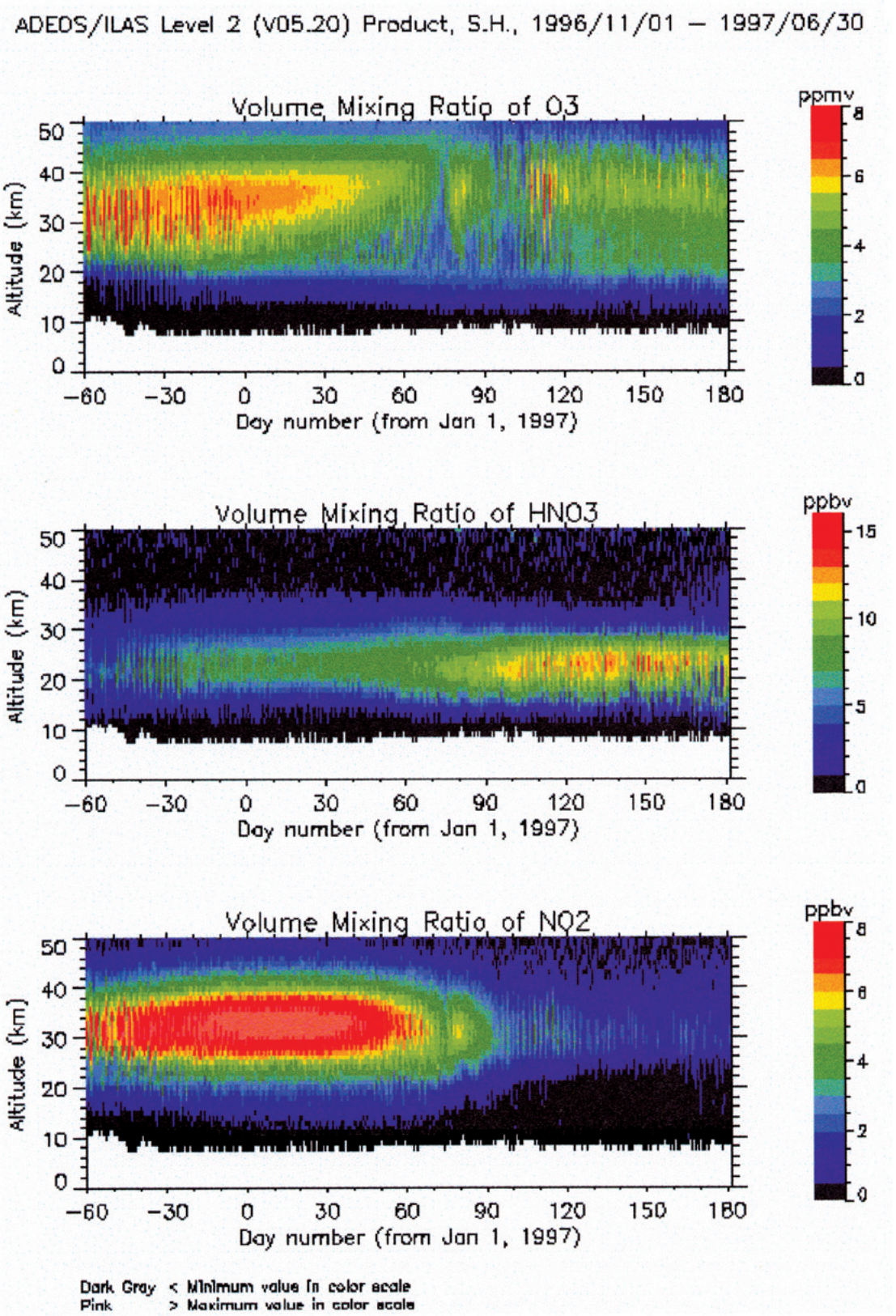


図 3.5(1)　8-month plot (ver.5.20)（南半球；1996/11/01 - 1997/06/30）
オゾン、硝酸、二酸化窒素

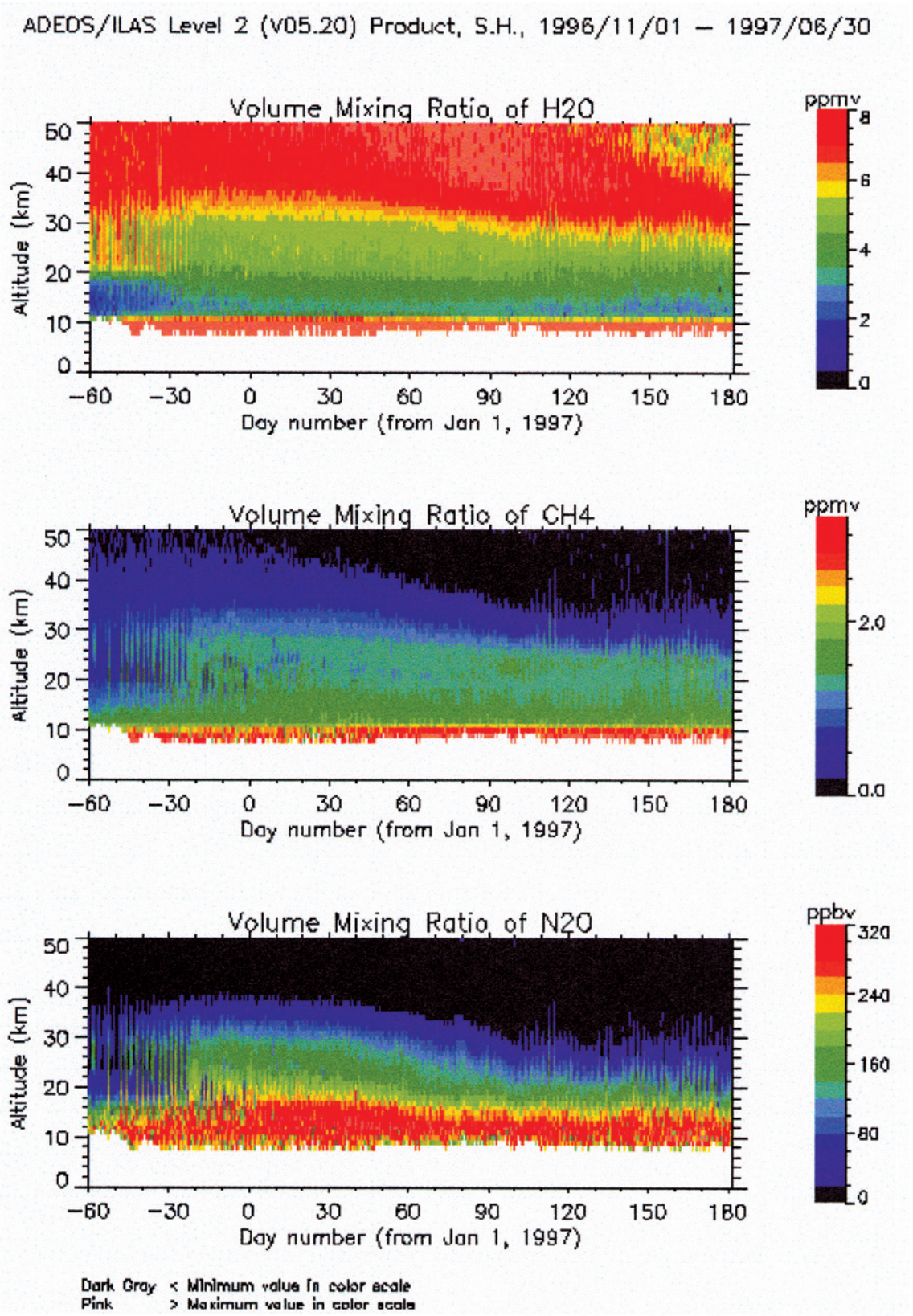


図 3.5(2)　8-month plot (ver.5.20)（南半球；1996/11/01 - 1997/06/30）
水蒸気、メタン、亜酸化窒素

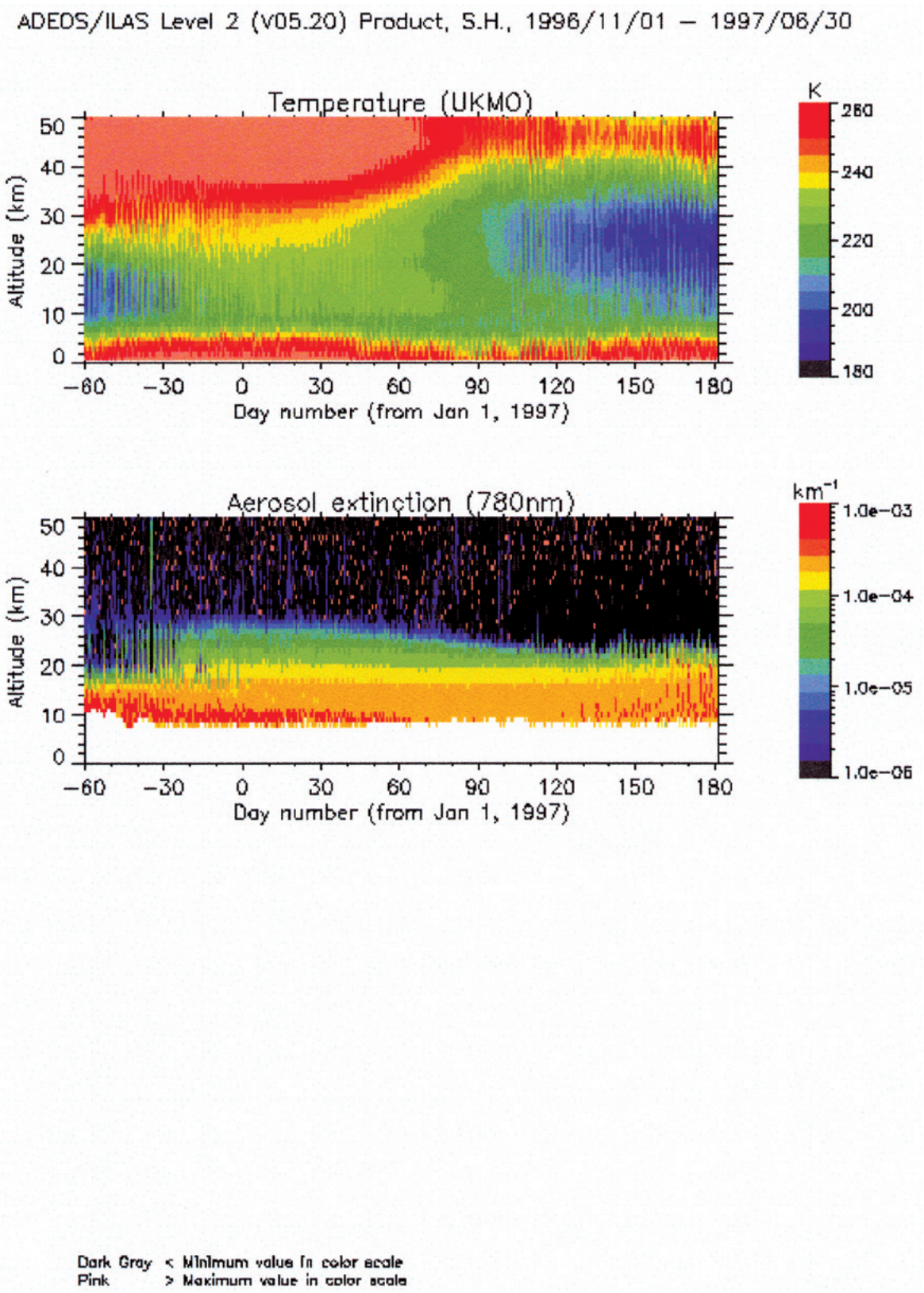


図 3.5(3)　8-month plot (ver.5.20)（南半球；1996/11/01 - 1997/06/30）
気温(UKMO)、エアロゾル消散係数(780nm)

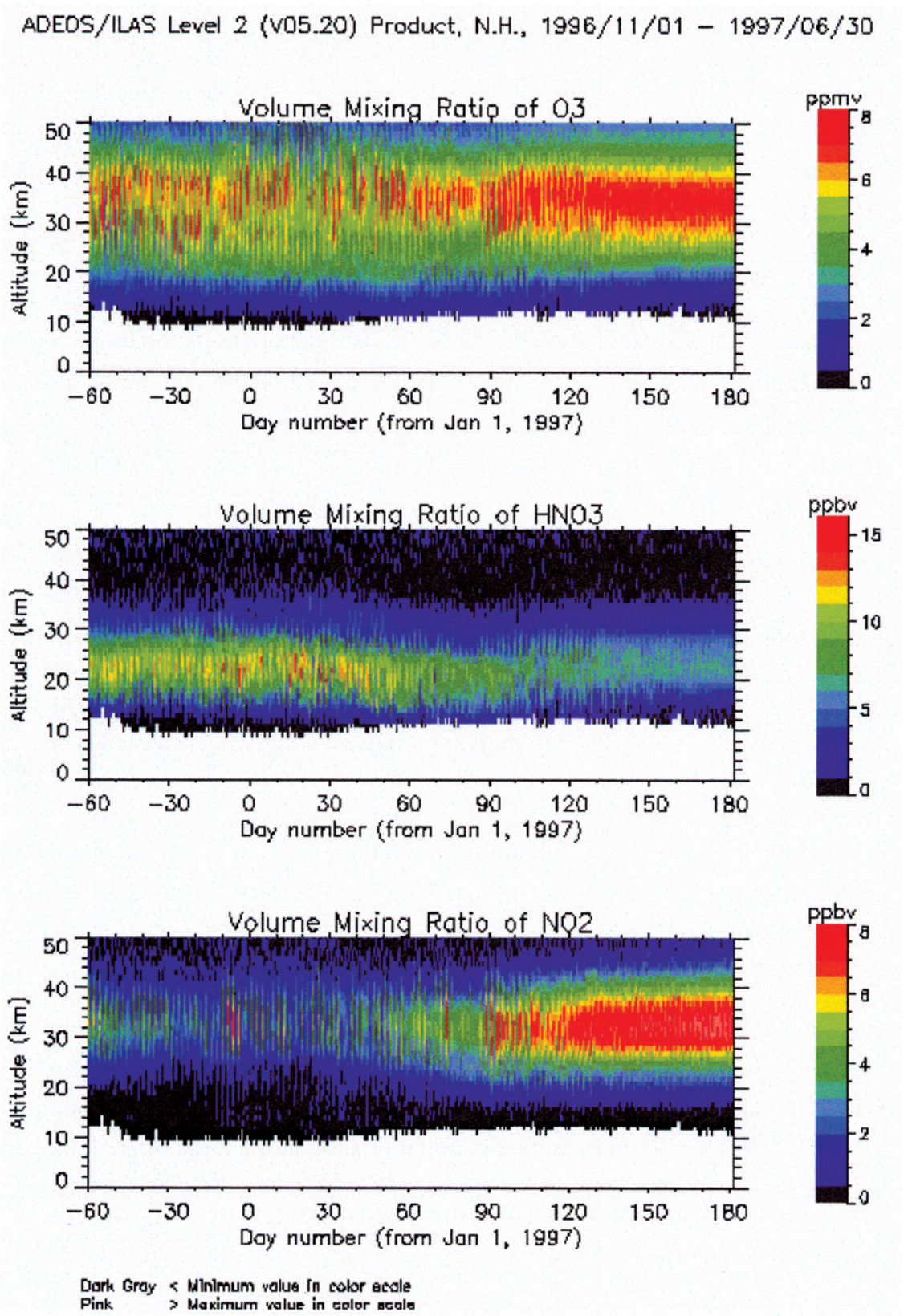


図 3.5(4)　8-month plot (ver.5.20)（北半球；1996/11/01 - 1997/06/30）
オゾン、硝酸、二酸化窒素

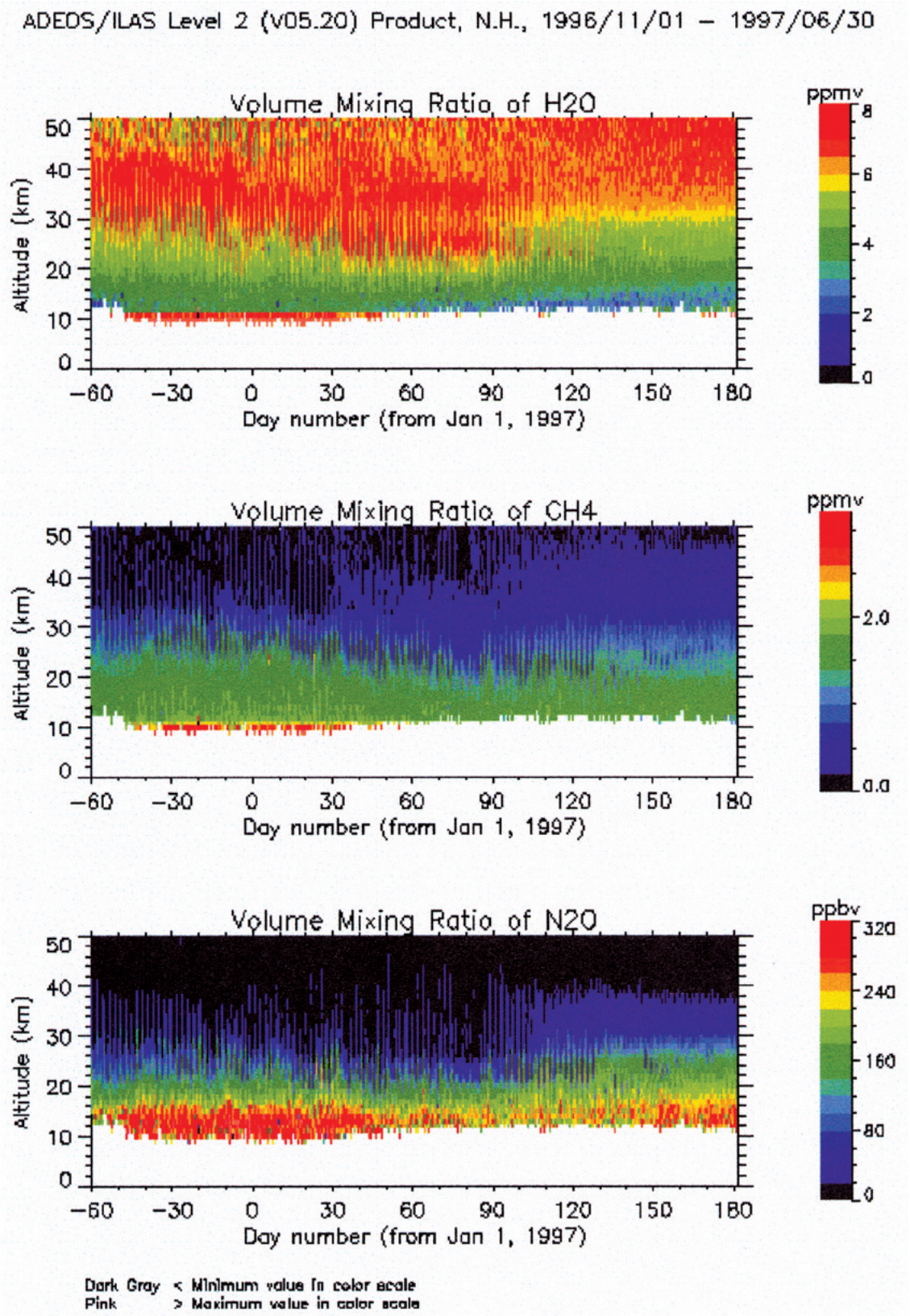


図 3.5(5)　8-month plot (ver.5.20)（北半球；1996/11/01 - 1997/06/30）
水蒸気、メタン、亜酸化窒素

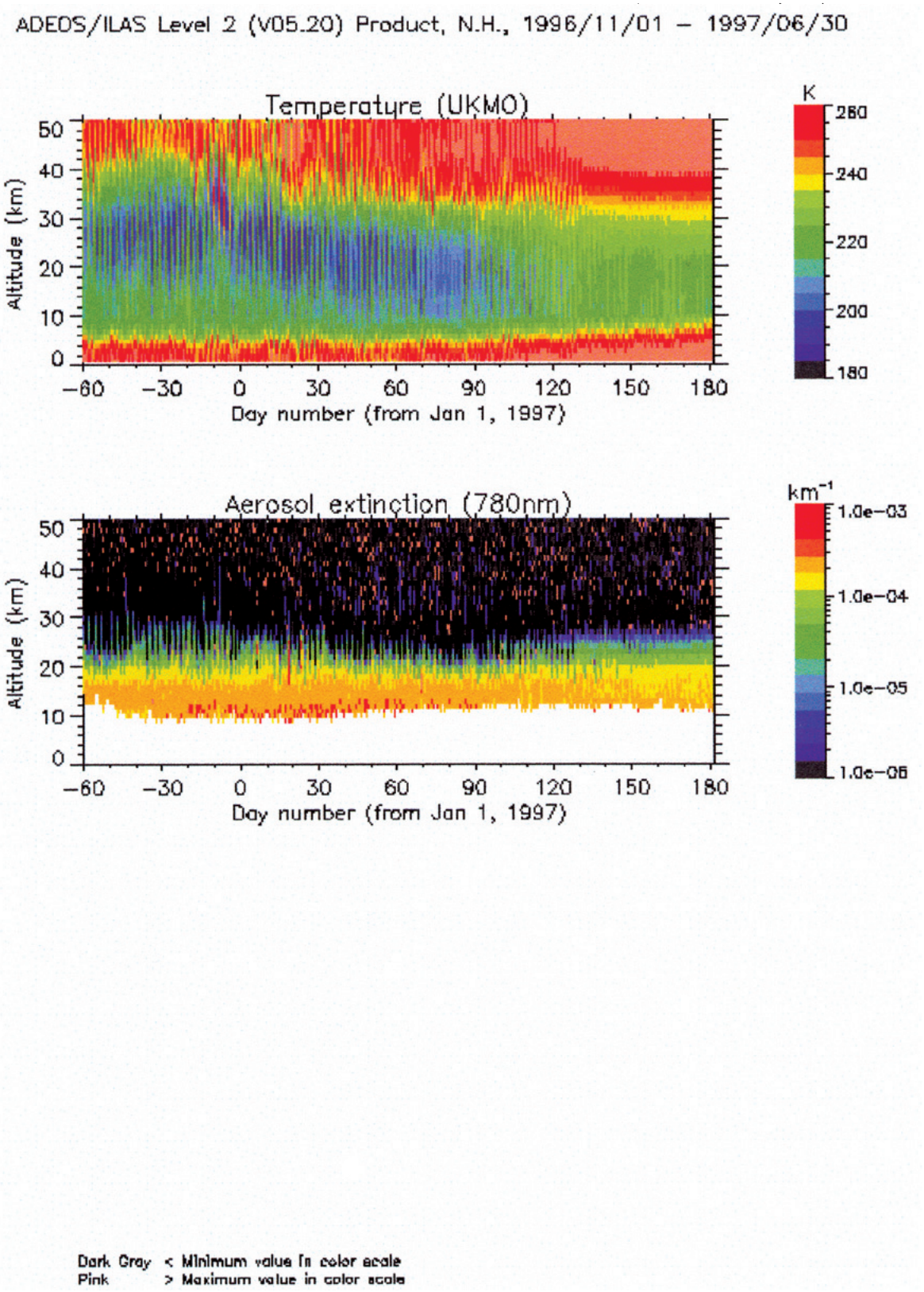


図 3.5(6)　8-month plot (ver.5.20)（北半球；1996/11/01 - 1997/06/30）
気温(UKMO)、エアロゾル消散係数(780nm)

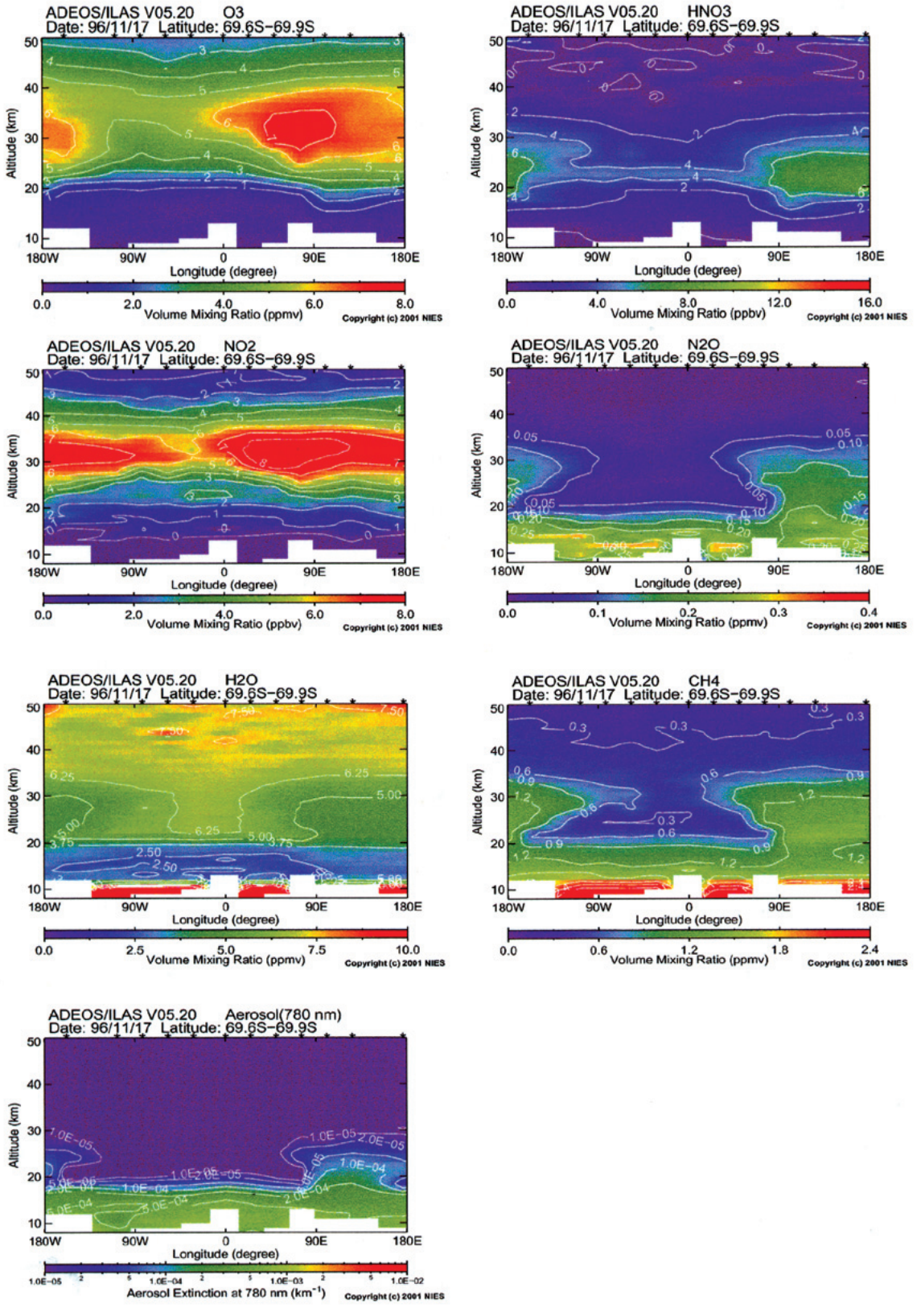


図 3.6(1)　one-day plot　（南半球；1996/11/17）
オゾン、硝酸、二酸化窒素、亜酸化窒素、水蒸気、メタン、エアロゾル消散係数(780nm)

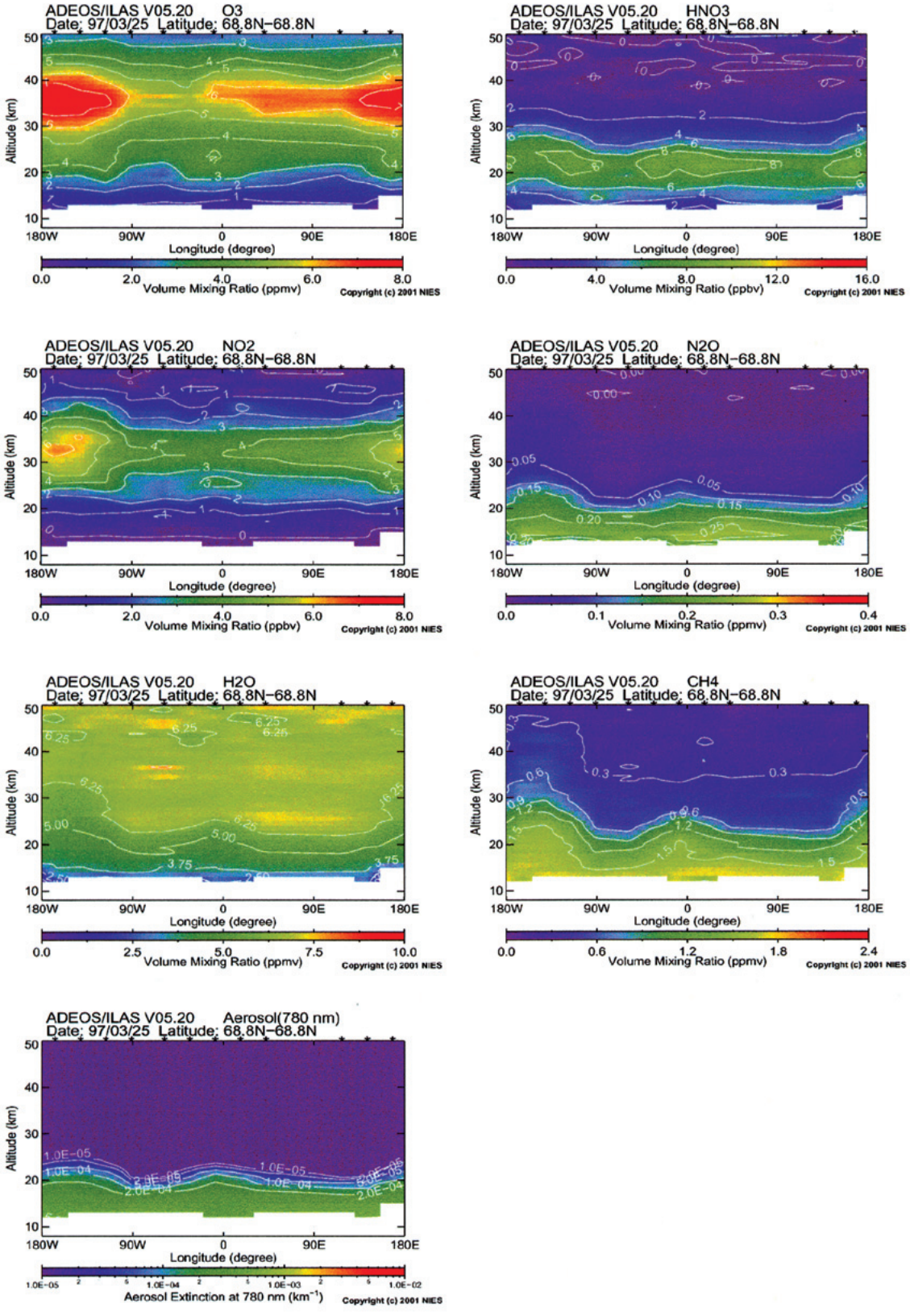


図 3.6(2)　one-day plot　（北半球；1997/03/25）

オゾン、硝酸、二酸化窒素、亜酸化窒素、水蒸気、メタン、エアロゾル消散係数(780nm)

第４章　ILASデータの検証

ILASデータの各ガスについての検証は、巻末の各論文に詳しいので、ここでは、ILASホームページ上に公開されている他衛星（HOLOE、SAGE II、POAM II、MLS）との比較結果のみを示す。

比較を行った衛星センサーは、HALOE（Halogen Occultation Experiment）、SAGE II（Stratospheric Aerosol and Gas Experiment II）、POAM II (Polar Ozone and Aerosol Measurement II)、およびMLS (Microwave Limb Sounder)である。MLSは周縁放射観測法、その他はILASと同じく太陽掩蔽法で観測を行う大気微量成分センサーで、搭載衛星はHALOEとMLSがUARS (Upper Atmosphere Research Satellite)、SAGE IIがERBS (Earth Radiation Budget Satellite)、POAM IIがSPOT-3である。表4.1に各衛星センサーの概要と測定項目を示す。ILASと各衛星センサーの検証結果として、HALOE（ver.19）はオゾン・二酸化窒素・メタン・水蒸気、SAGE II（ver.6）はオゾン・二酸化窒素・水蒸気・エアロゾル消散係数（780nm）、POAM II（ver.6）はオゾン・二酸化窒素、MLS（ver.5）はオゾン・硝酸・水蒸気についてのプロファイル比較例と平均相対誤差の図（ILASはver.3.10, 4.20, 5.20）を、図4.1～図4.19に示す。

表4.1　ILAS、およびHALOE、SAGE II、POAM IIの概要

センサー	ILAS	HALOE	SAGE II	POAM II	MLS
搭載衛星	ADEOS	UARS	ERBS	SPOT-3	UARS
軌道	太陽同期準回帰軌道	回帰軌道	非太陽同期回帰軌道	太陽同期極軌道	回帰軌道
回帰日数	41日				
軌道高度	約797km	～585km	650km	832km	～585km
軌道傾斜角	約98.6度	約57度	57度	98.7度	約57度
周期	約101分	約97分	96.8分	101分	約97分
稼働期間	1996年10月～1997年6月	1991年9月～	1984年10月～	1993年5月～1996年11月	1991年9月～
観測波長	6.21～11.77μm 753～784nm	2.43～10.25μm	0.385～1.02μm	0.35～1.06μm	中心周波数 205,183,63Hz
分解能	1.6km（鉛直） 2km（水平;可視） 13km（水平;赤外）	1.6km（鉛直） 6.2km（水平）	0.5km	0.6km	5km（鉛直） 10～30km（水平）
観測緯度帯	約63～87S 約55～70N	80S～80N		約63～88S 約55～71N	45N～72S 80N～34S
測定項目	オゾン、硝酸 二酸化窒素 亜酸化窒素 メタン、水蒸気 エアロゾル消散 係数（赤外,可視） クロロフルオロカーボン 五酸化二窒素 気温、気圧	オゾン 二酸化窒素 一酸化窒素 水蒸気 メタン 塩化水素 フッ化水素 エアロゾル 気温、気圧	オゾン 二酸化窒素 水蒸気 エアロゾル	オゾン 二酸化窒素 水蒸気 エアロゾル 気温	オゾン 硝酸 水蒸気 一酸化塩素 火山性SO2 気温 気圧

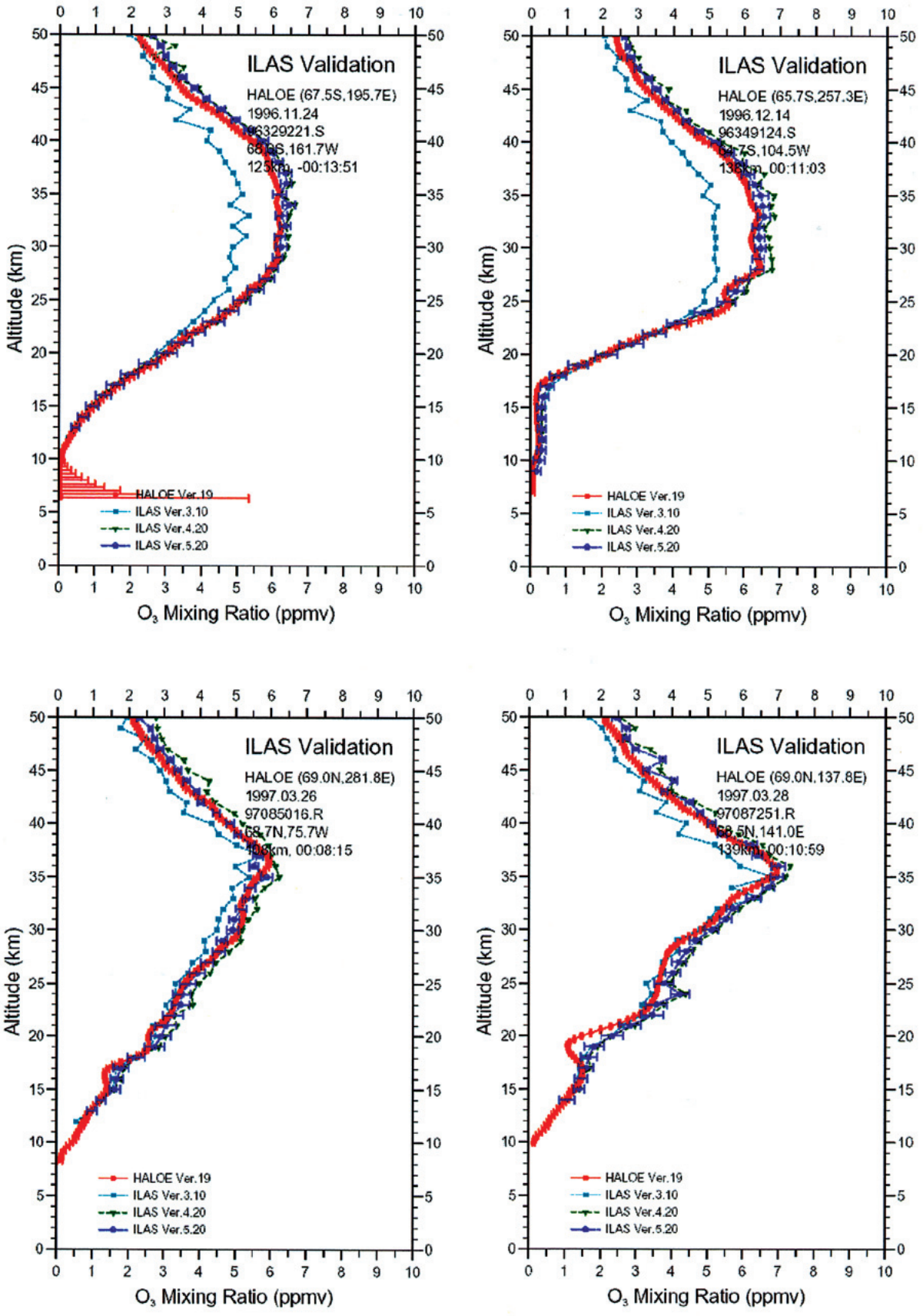


図 4.1(1)　HALOE と ILAS の比較（オゾン）

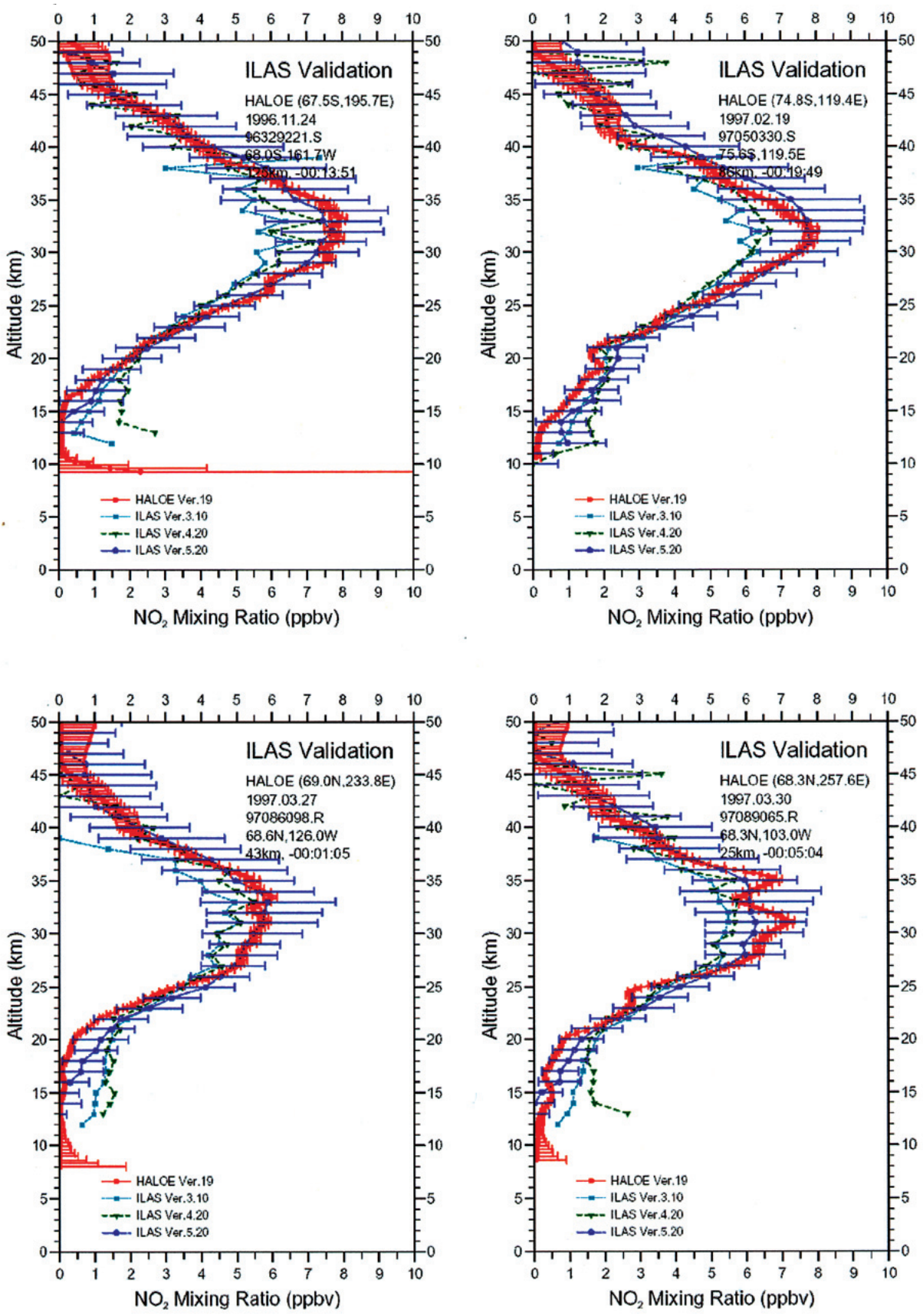


図 4.1(2)　HALOE と ILAS の比較（二酸化窒素）

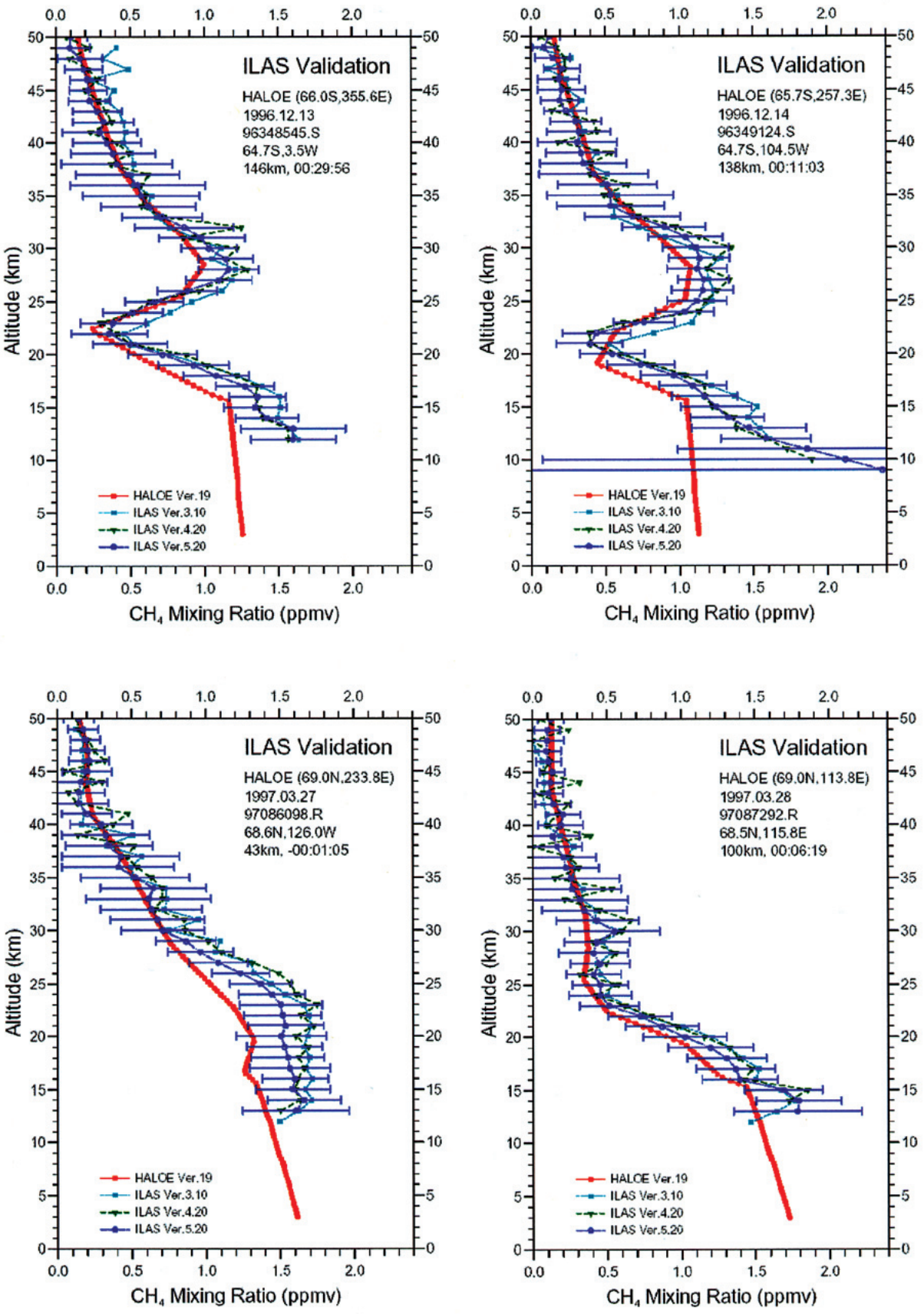


図 4.1(3)　HALOE と ILAS の比較（メタン）

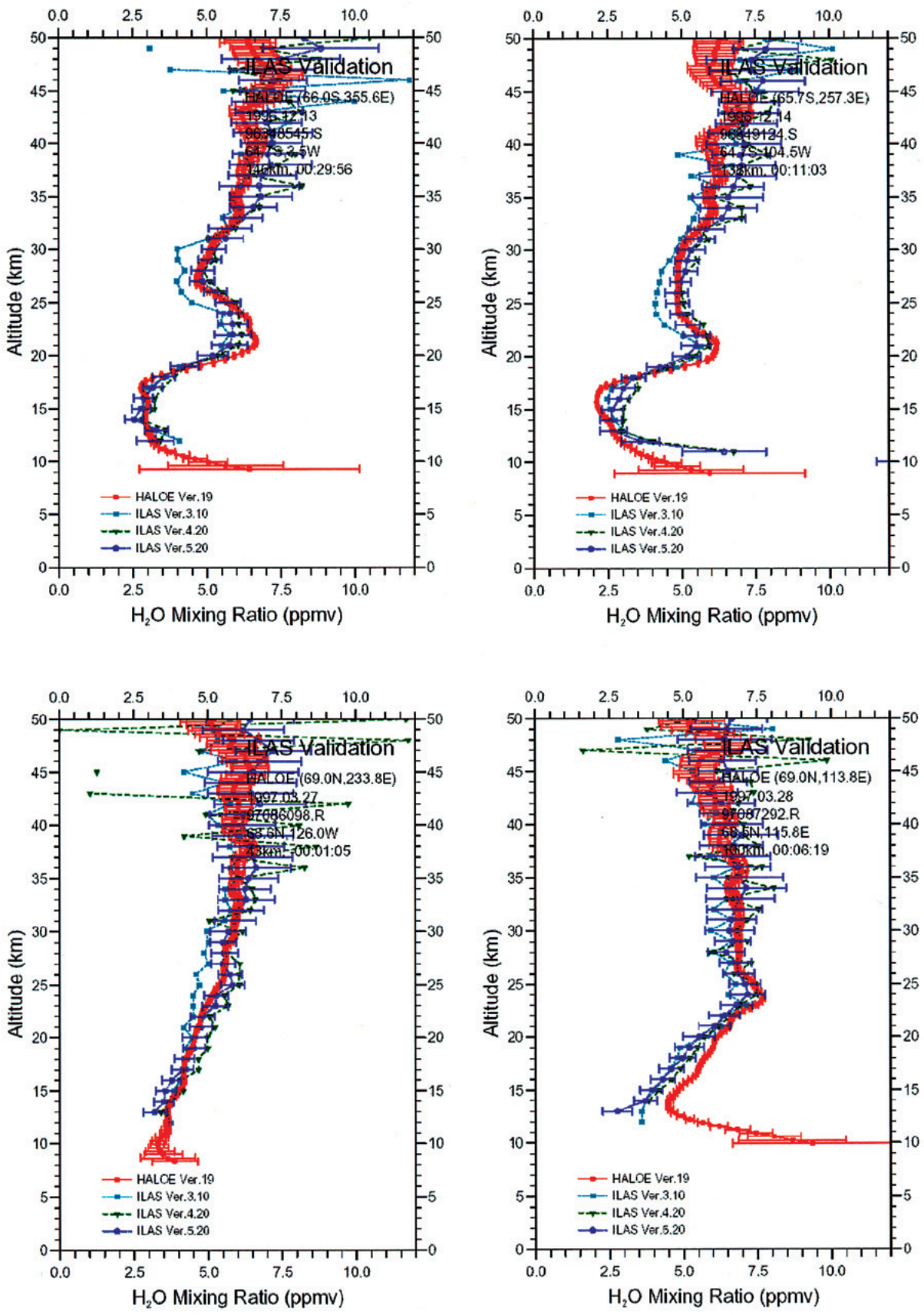


図 4.1(4)　HALOE と ILAS の比較（水蒸気）

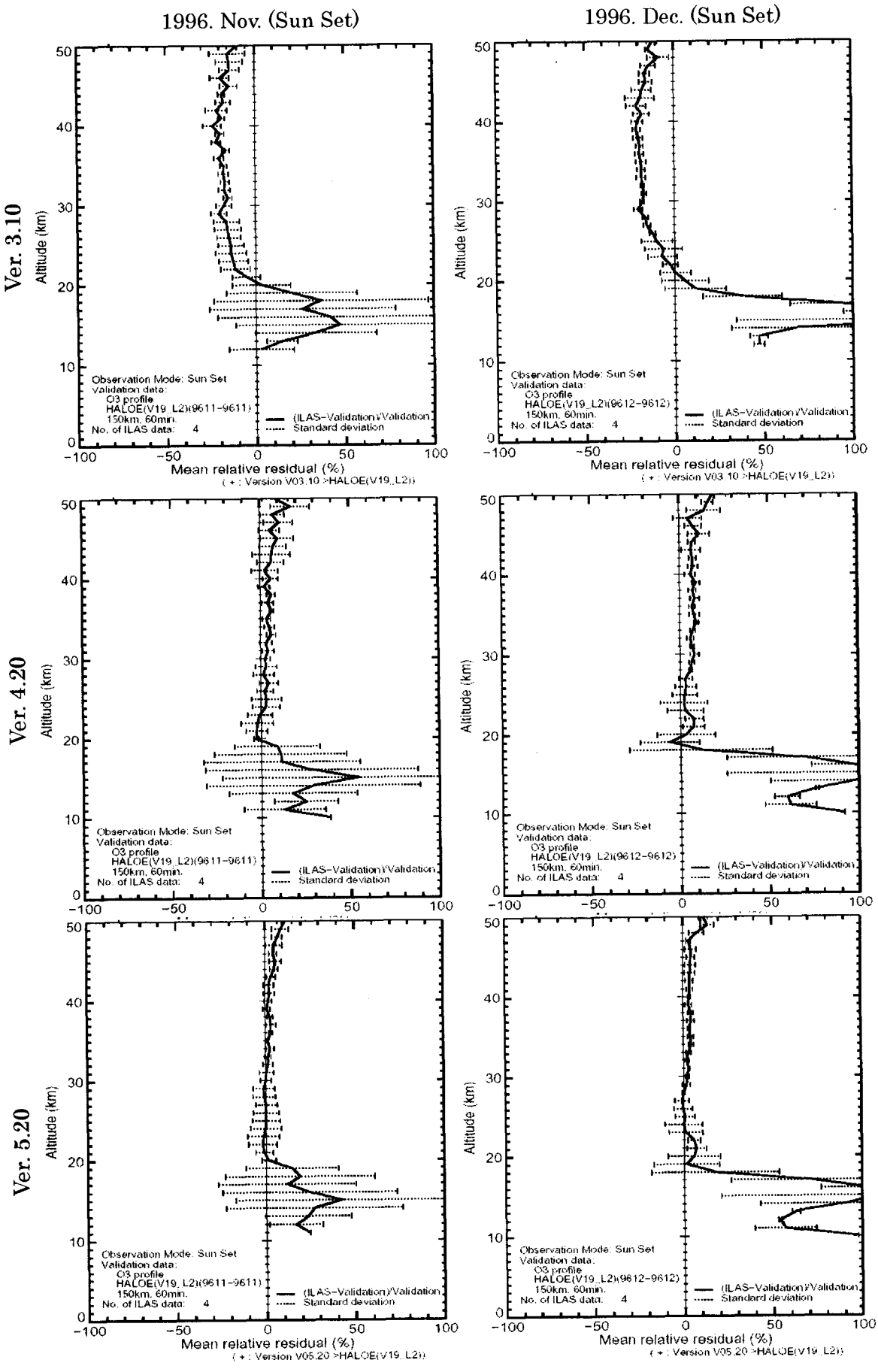


図 4.2(1) HALOE に対する ILAS の平均相対誤差プロファイル(1)（オゾン）

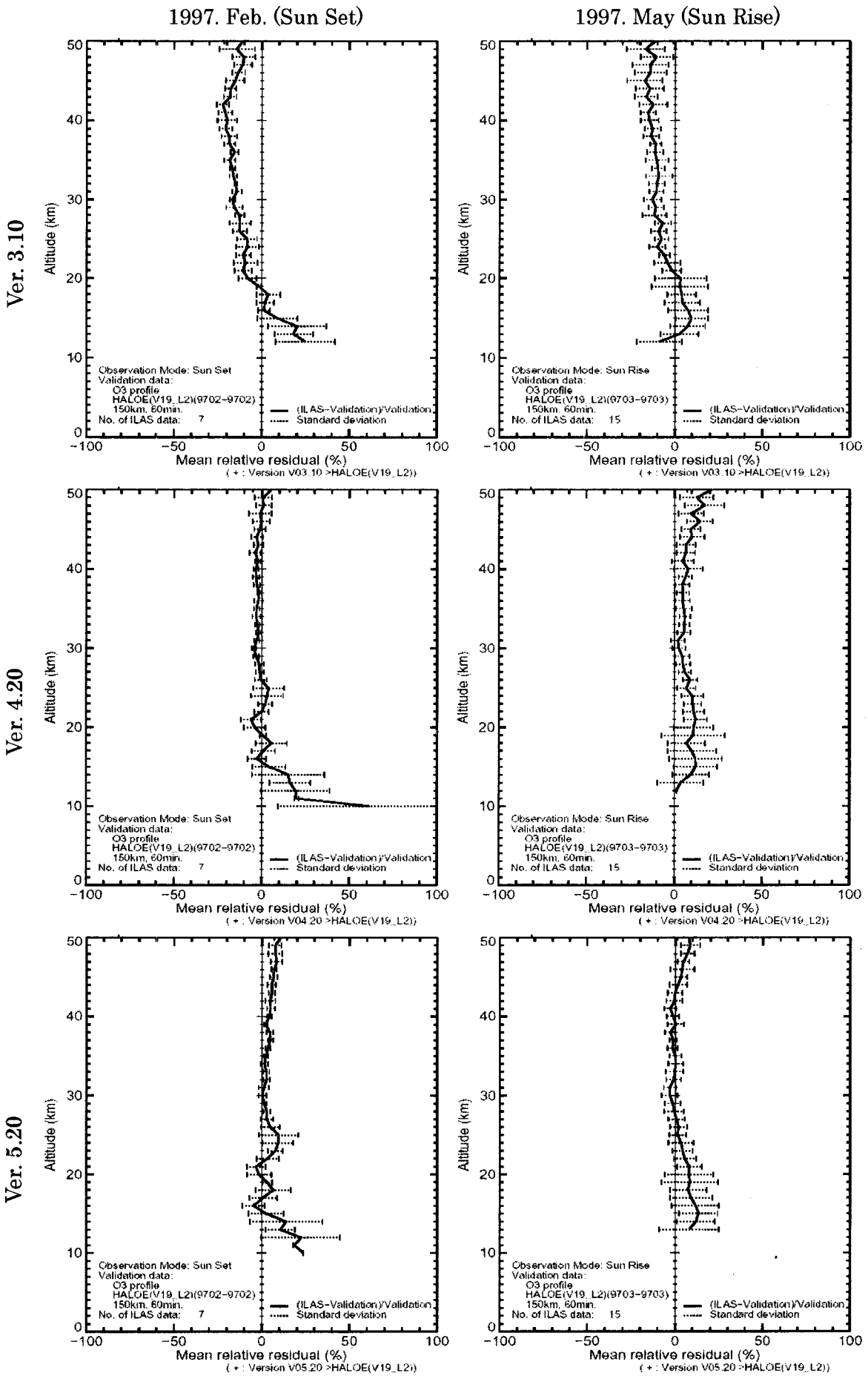


図 4.2(2) HALOE に対する ILAS の平均相対誤差プロファイル(2)（オゾン）

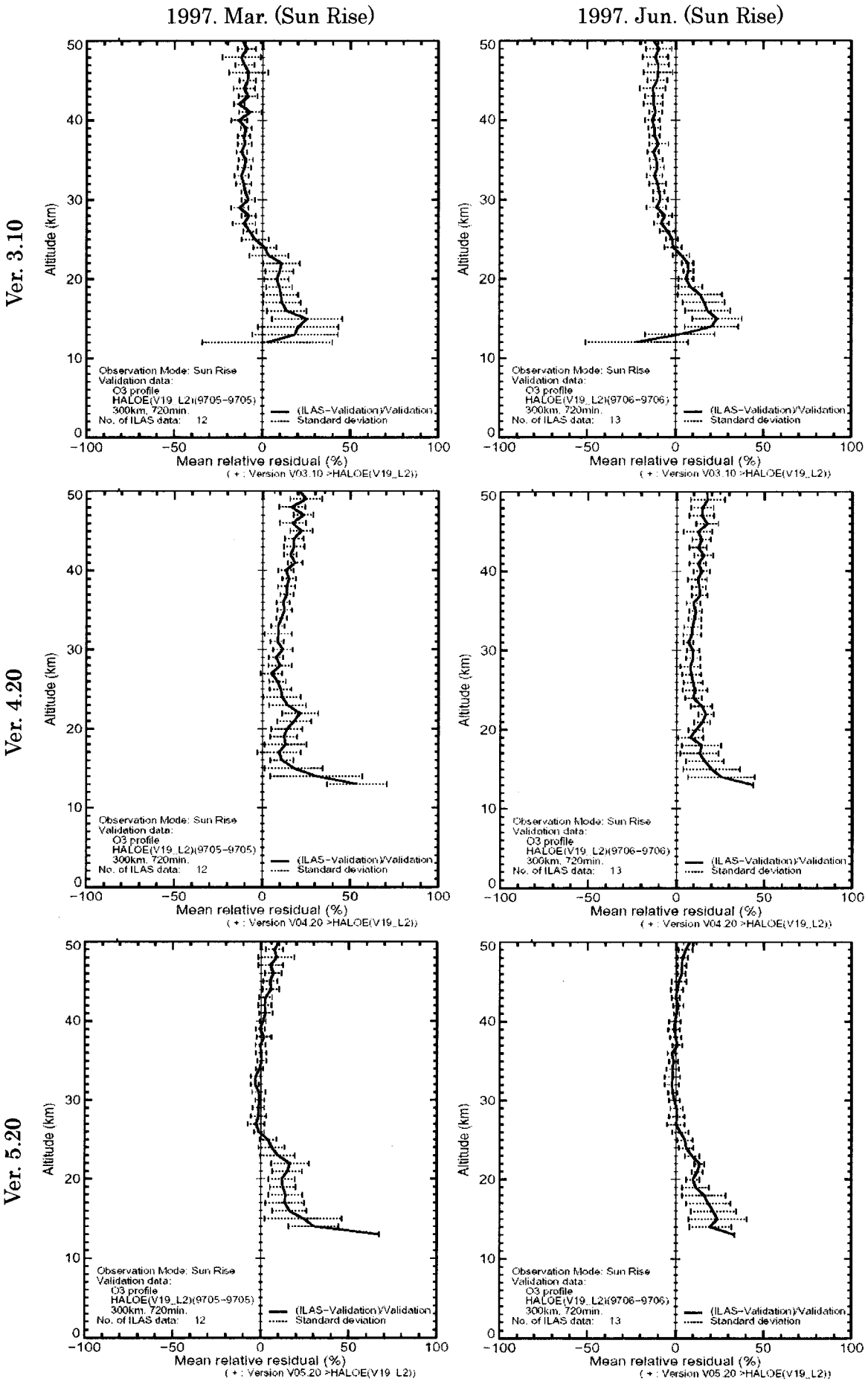


図 4.2(3) HALOE に対する ILAS の平均相対誤差プロファイル(3)（オゾン）

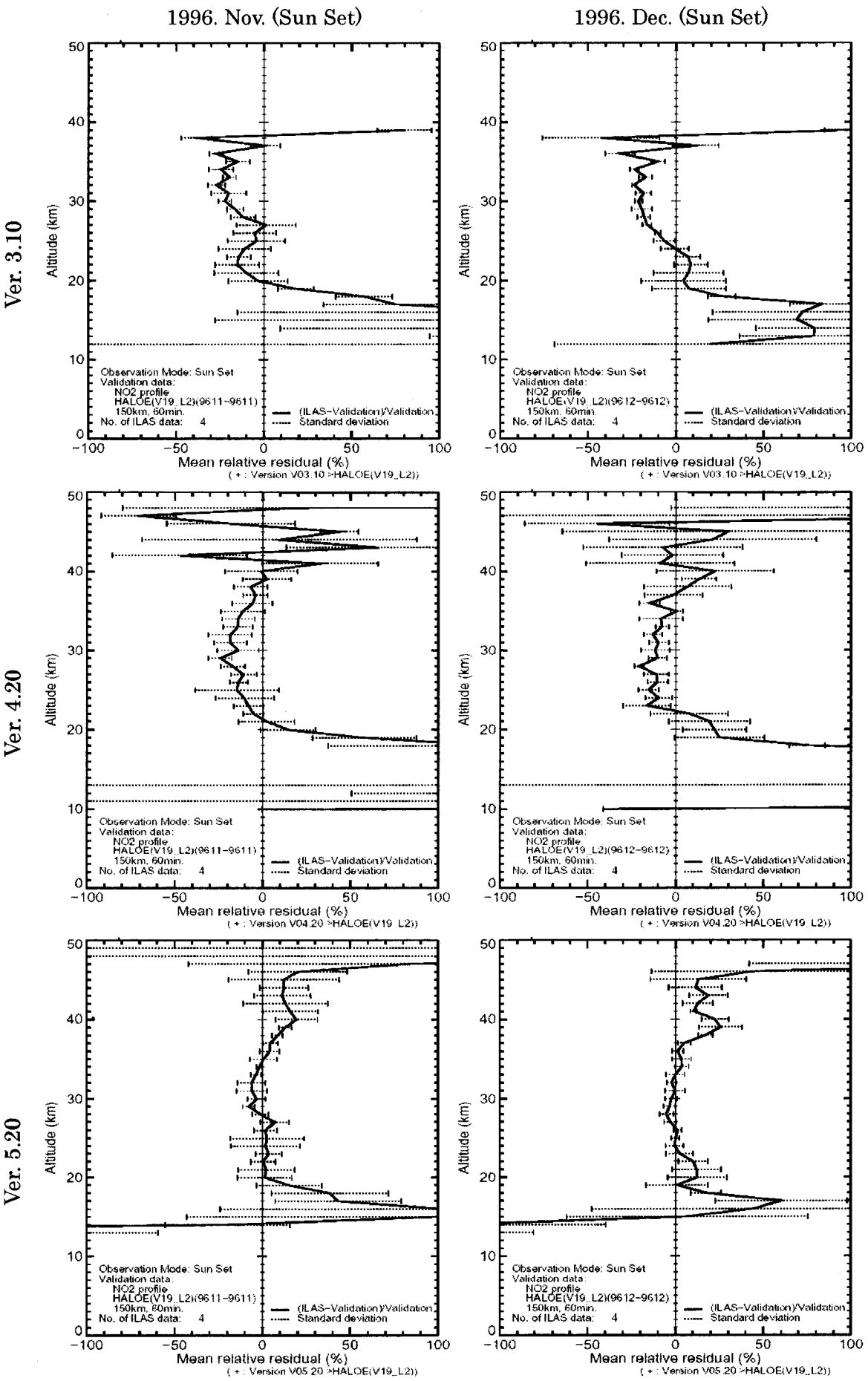


図 4.3(1) HALOE に対する ILAS の平均相対誤差プロファイル(1)（二酸化窒素）

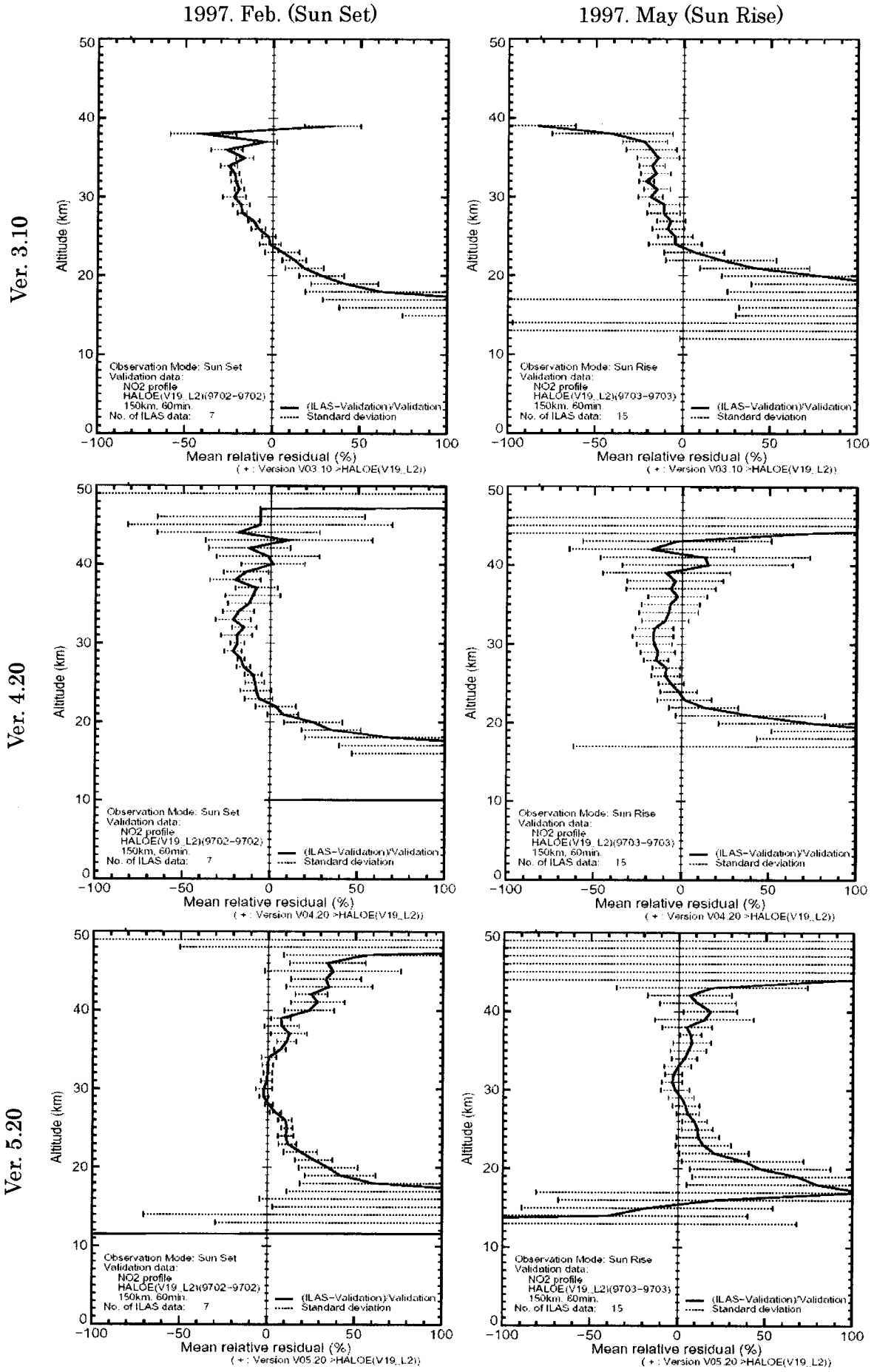


図 4.3(2) HALOE に対する ILAS の平均相対誤差プロファイル(2)（二酸化窒素）

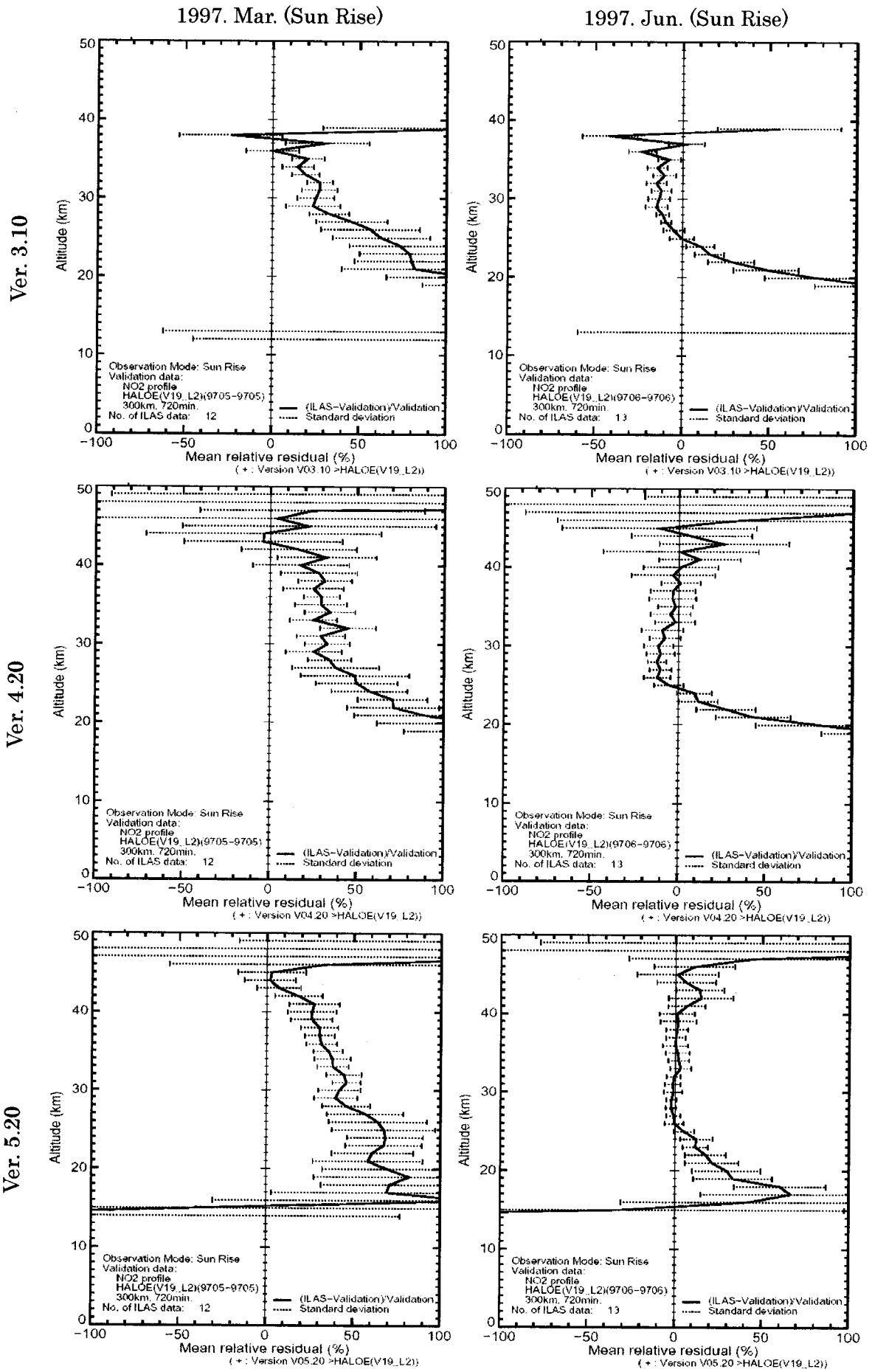


図 4.3(3) HALOE に対する ILAS の平均相対誤差プロファイル(3)（二酸化窒素）

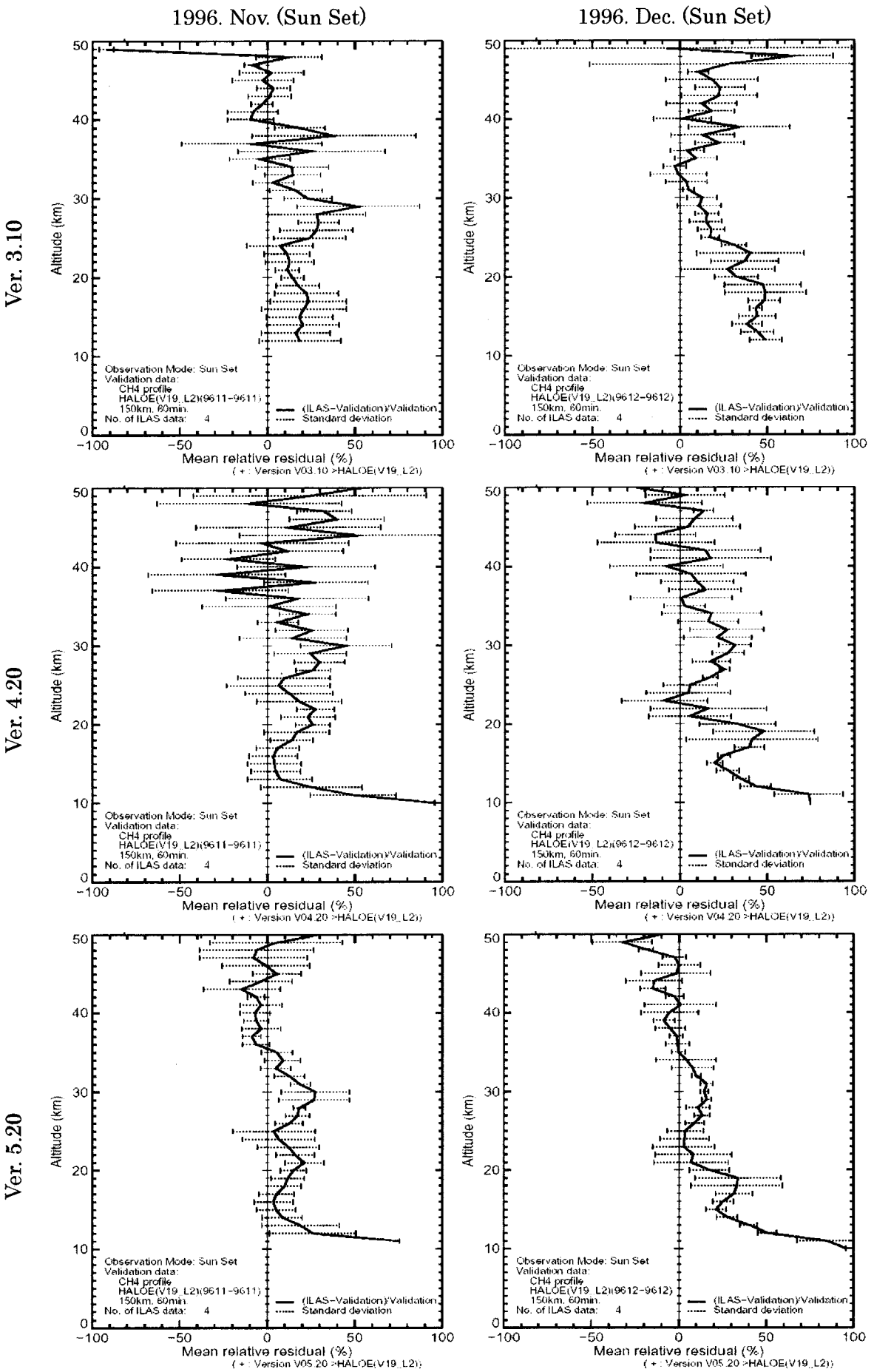


図 4.4(1) HALOE に対する ILAS の平均相対誤差プロファイル(1)（メタン）

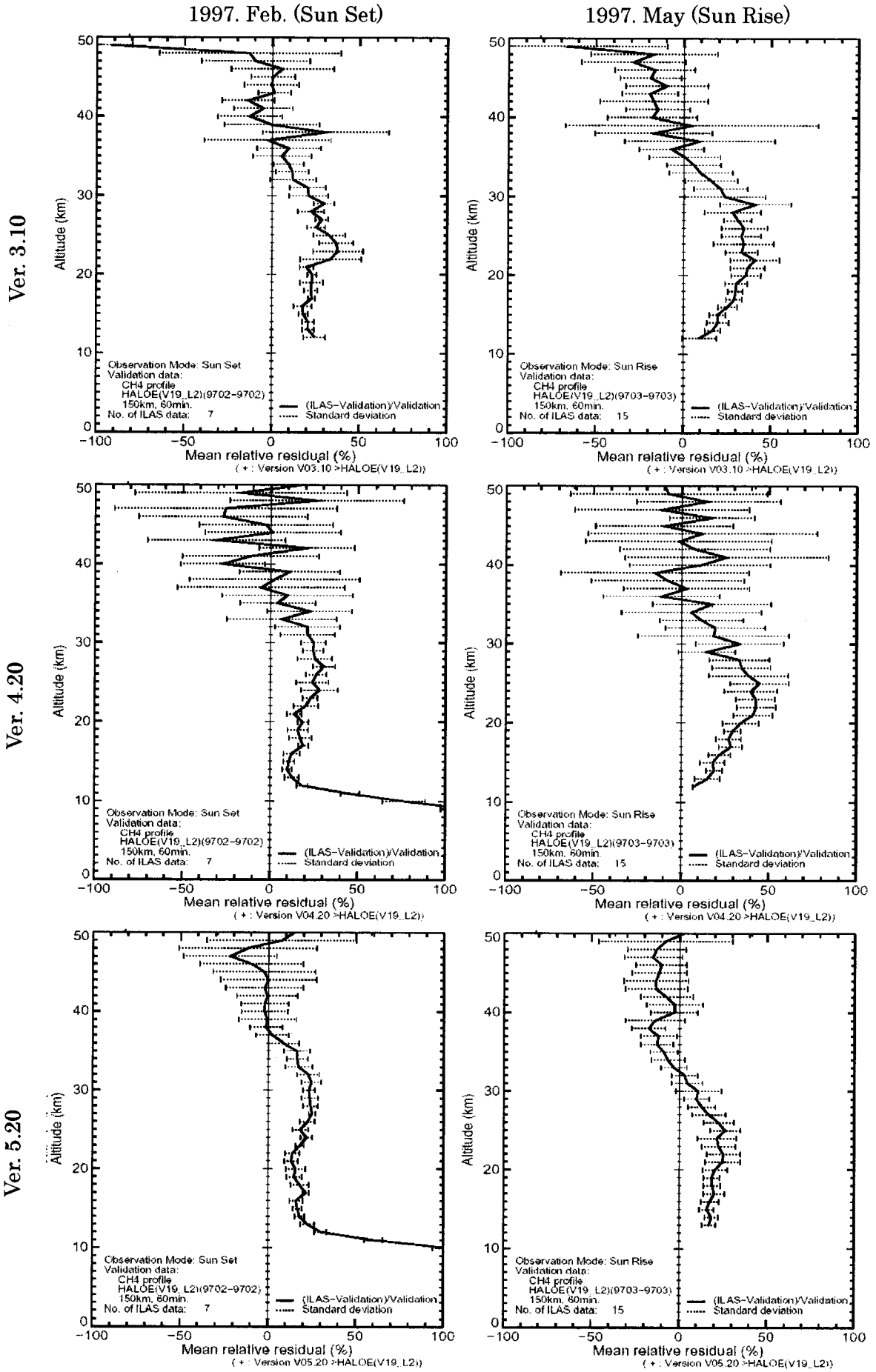


図 4.4(2) HALOE に対する ILAS の平均相対誤差プロファイル(2)（メタン）

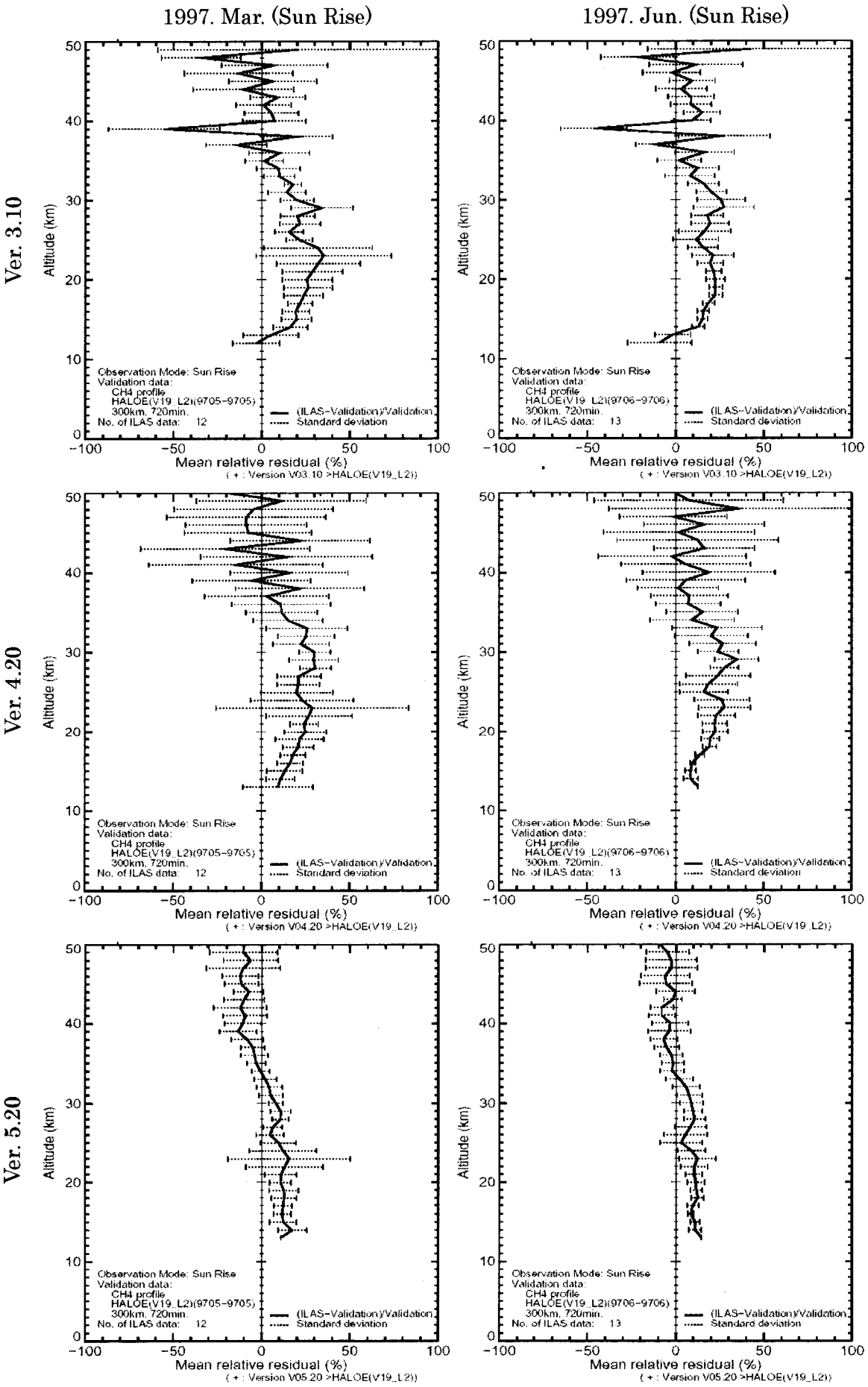


図 4.4(3) HALOE に対する ILAS の平均相対誤差プロファイル(3)（メタン）

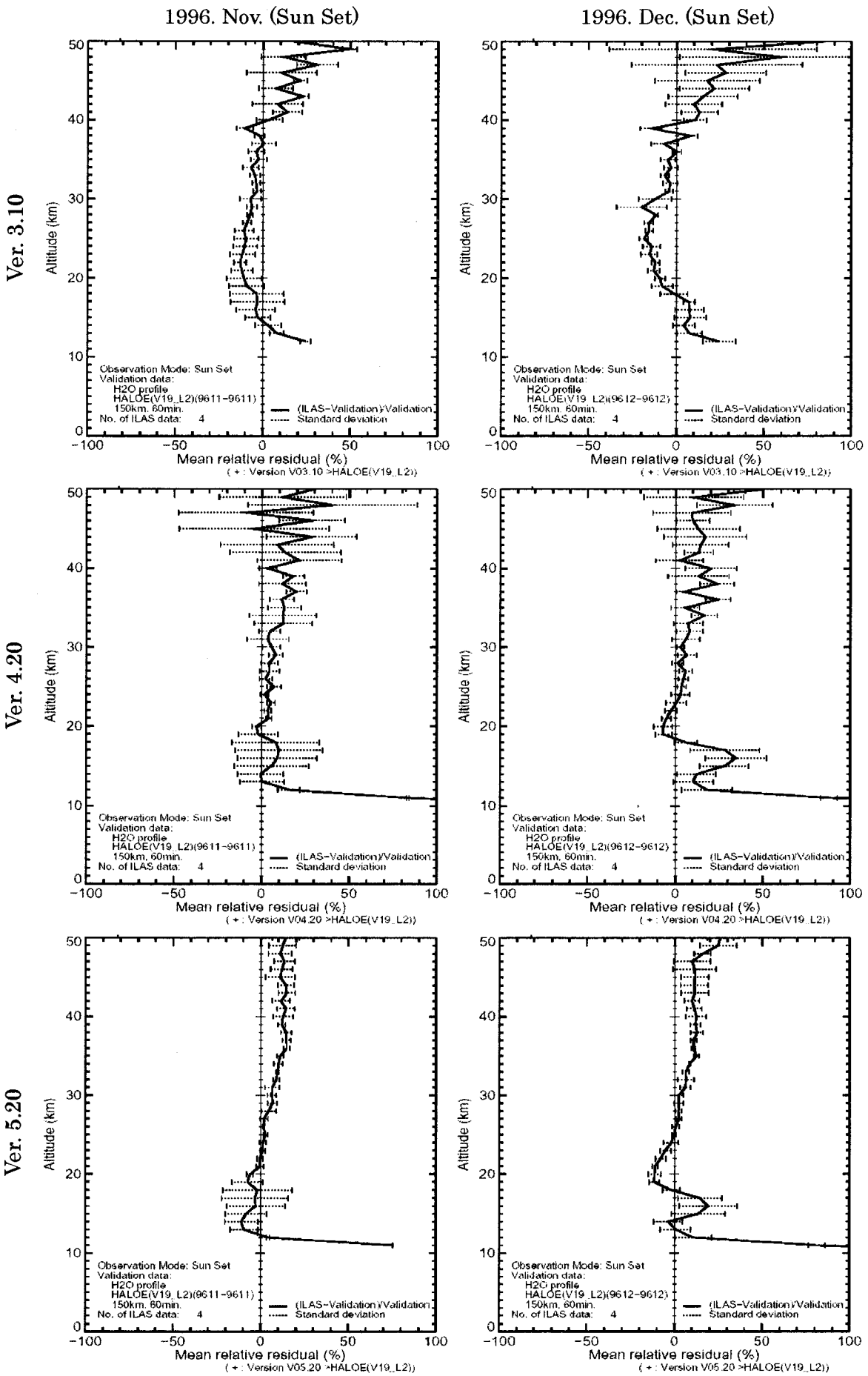


図 4.5(1) HALOE に対する ILAS の平均相対誤差プロファイル(1)（水蒸気）

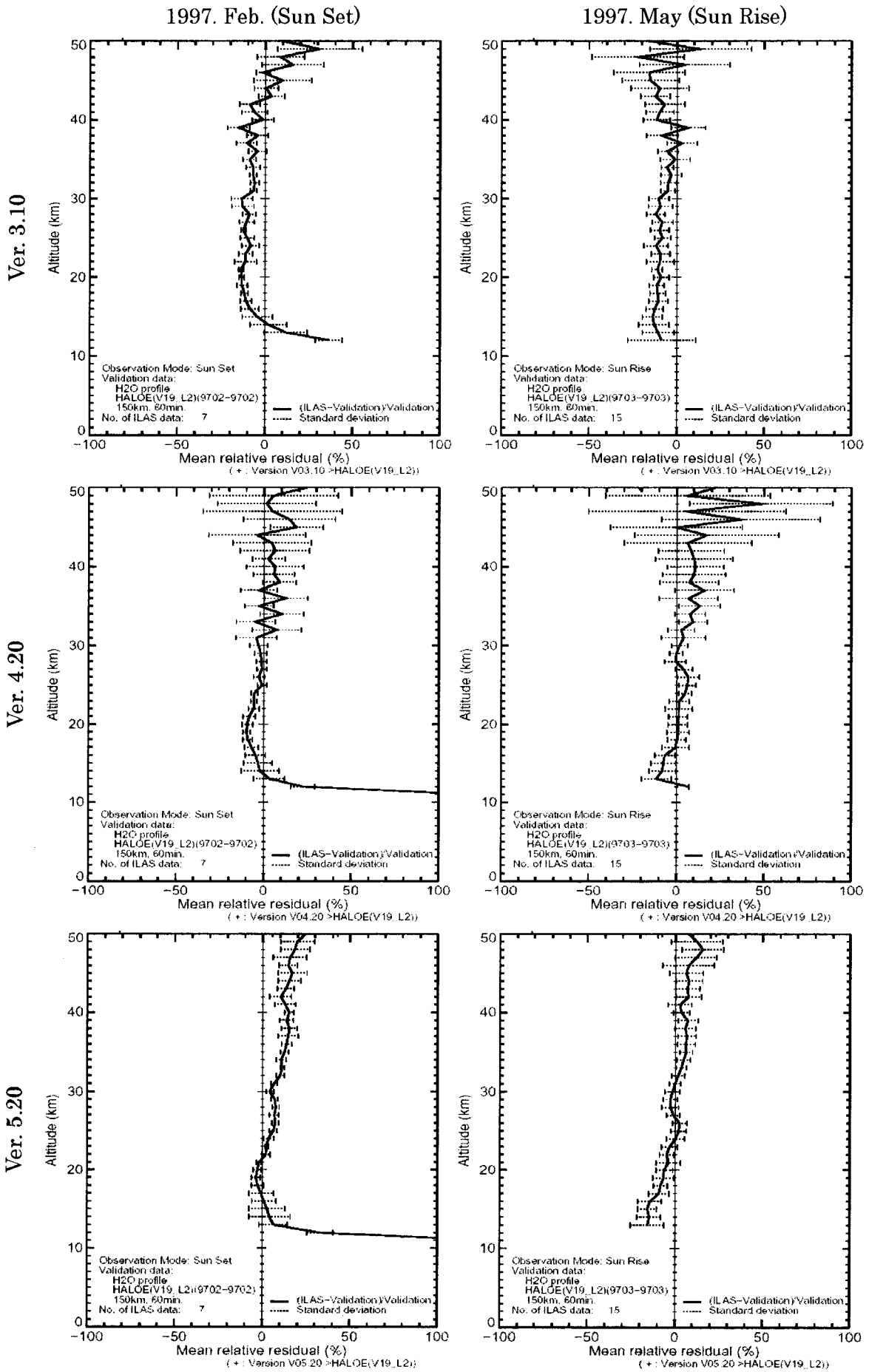


図 4.5(2) HALOE に対する ILAS の平均相対誤差プロファイル(2)（水蒸気）

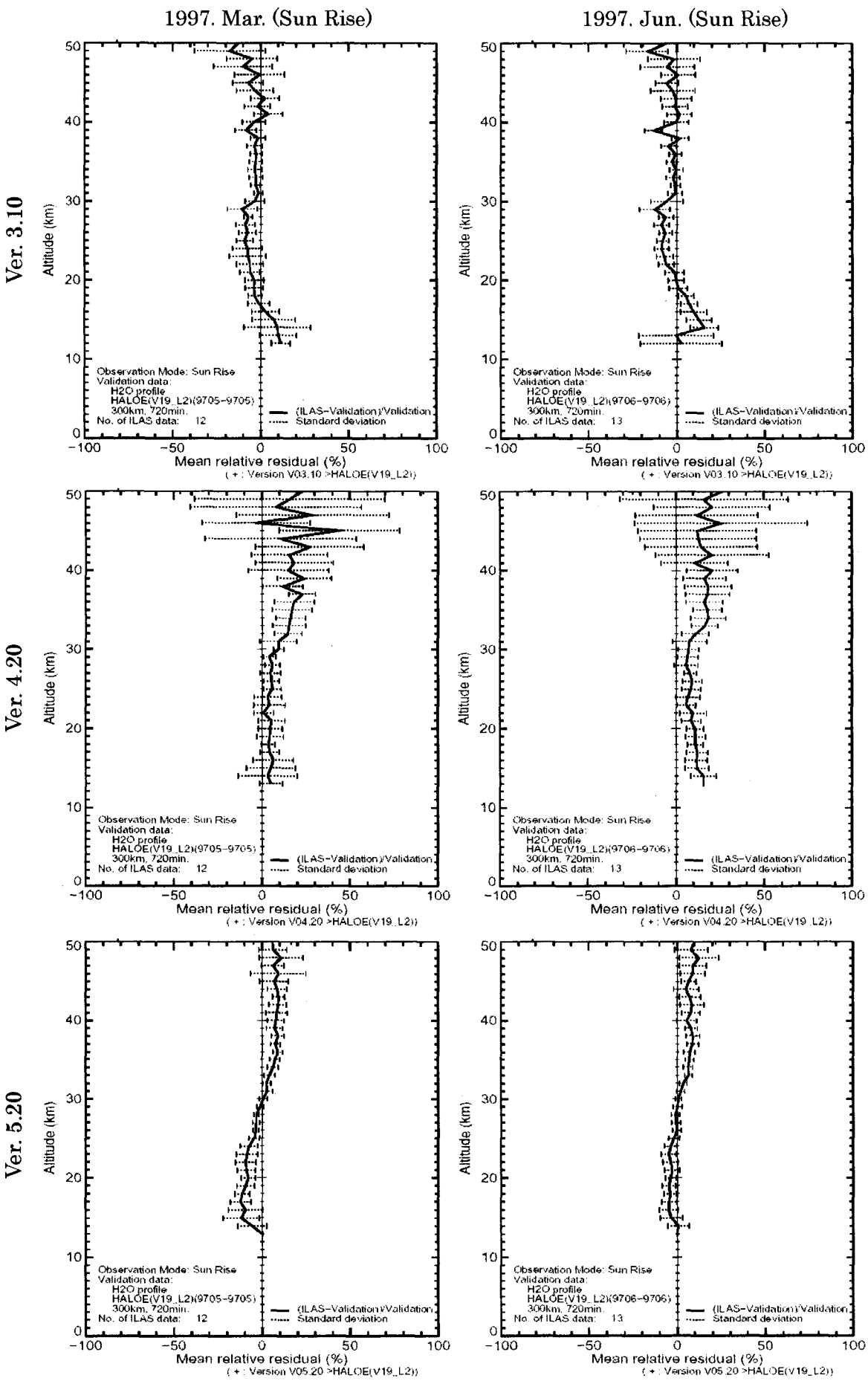


図 4.5(3) HALOE に対する ILAS の平均相対誤差プロファイル(3)（水蒸気）

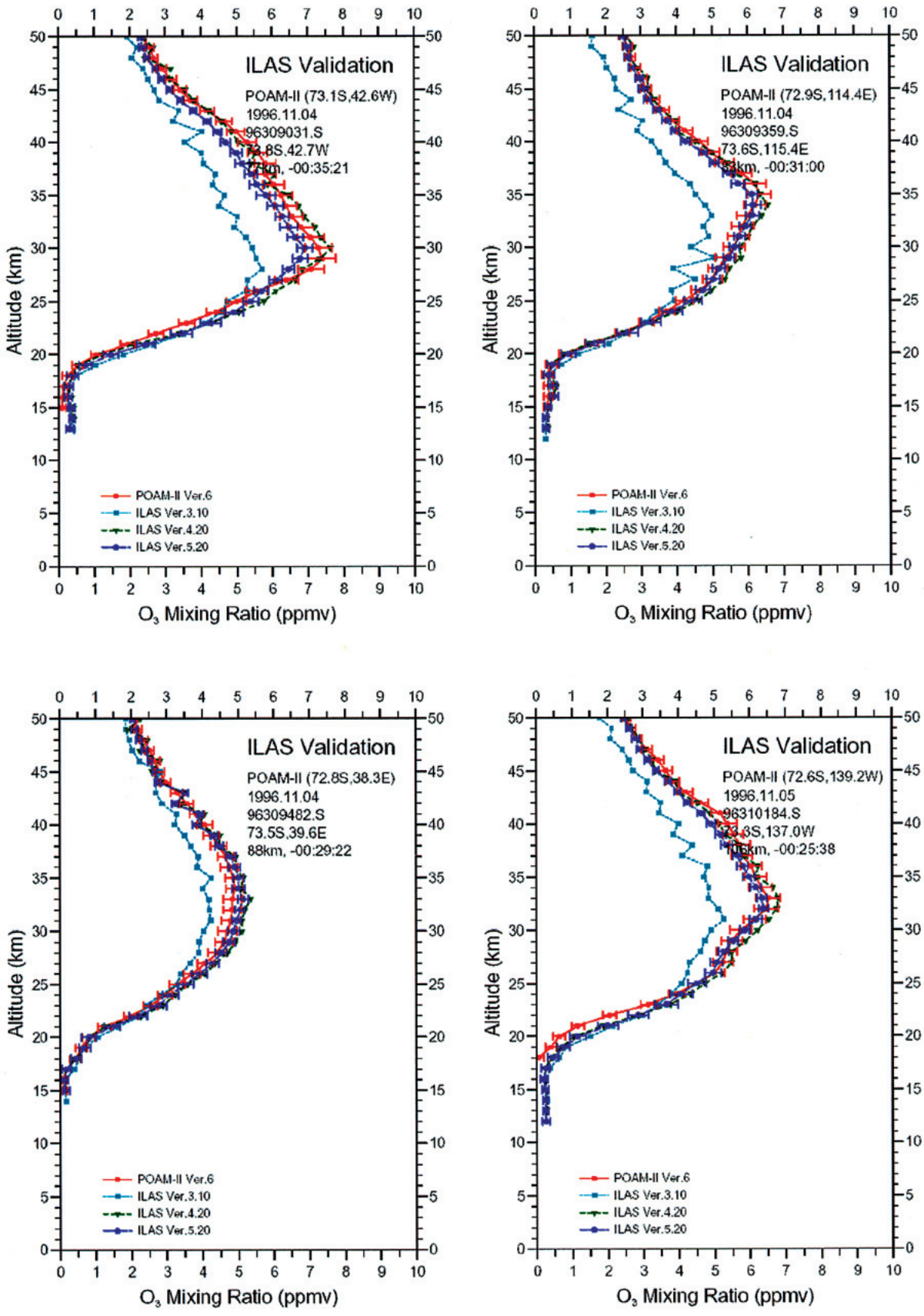


図 4.6(1)　POAM II と ILAS の比較(1)（オゾン）

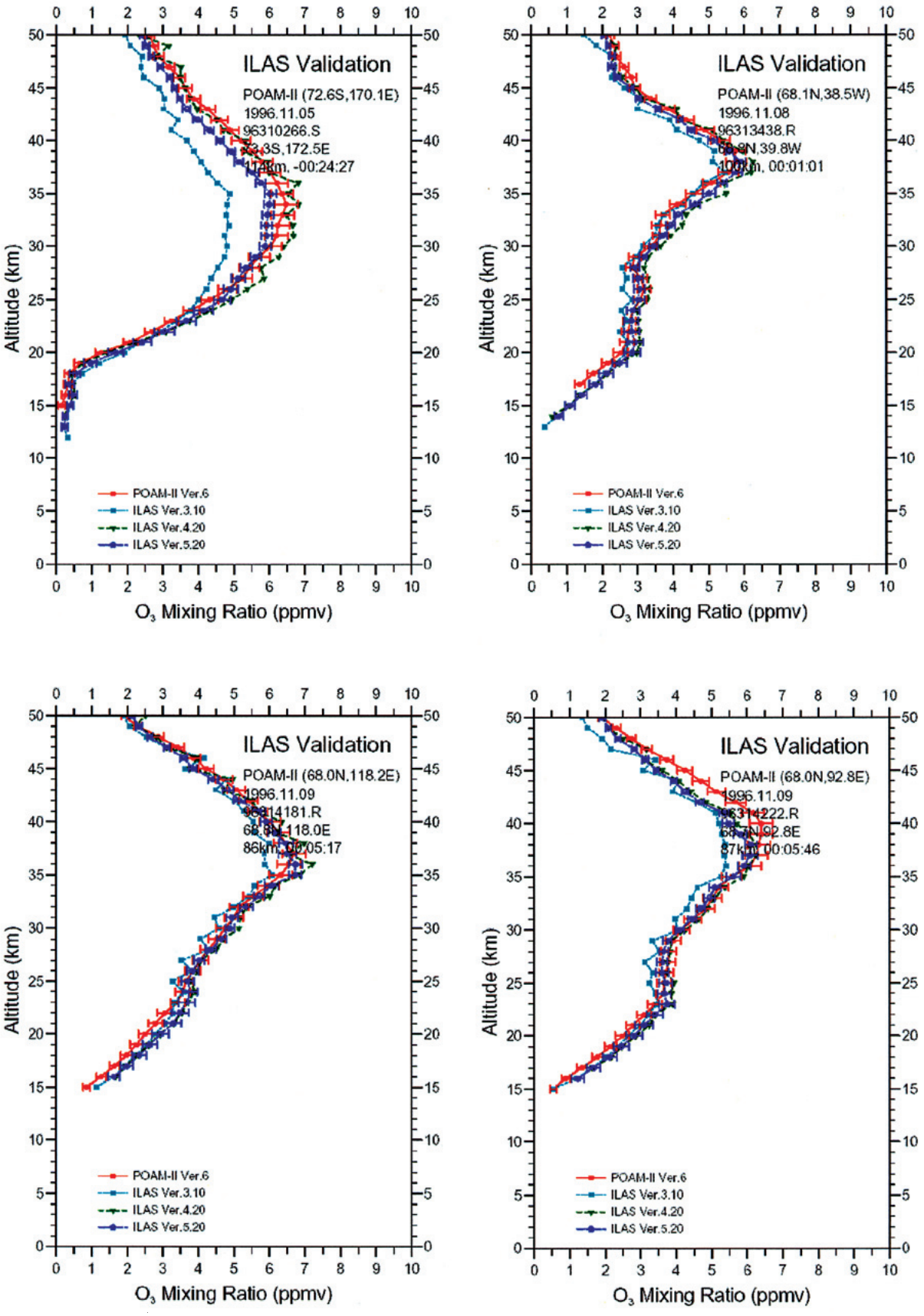


図 4.6(2)　POAM II と ILAS の比較(2)（オゾン）

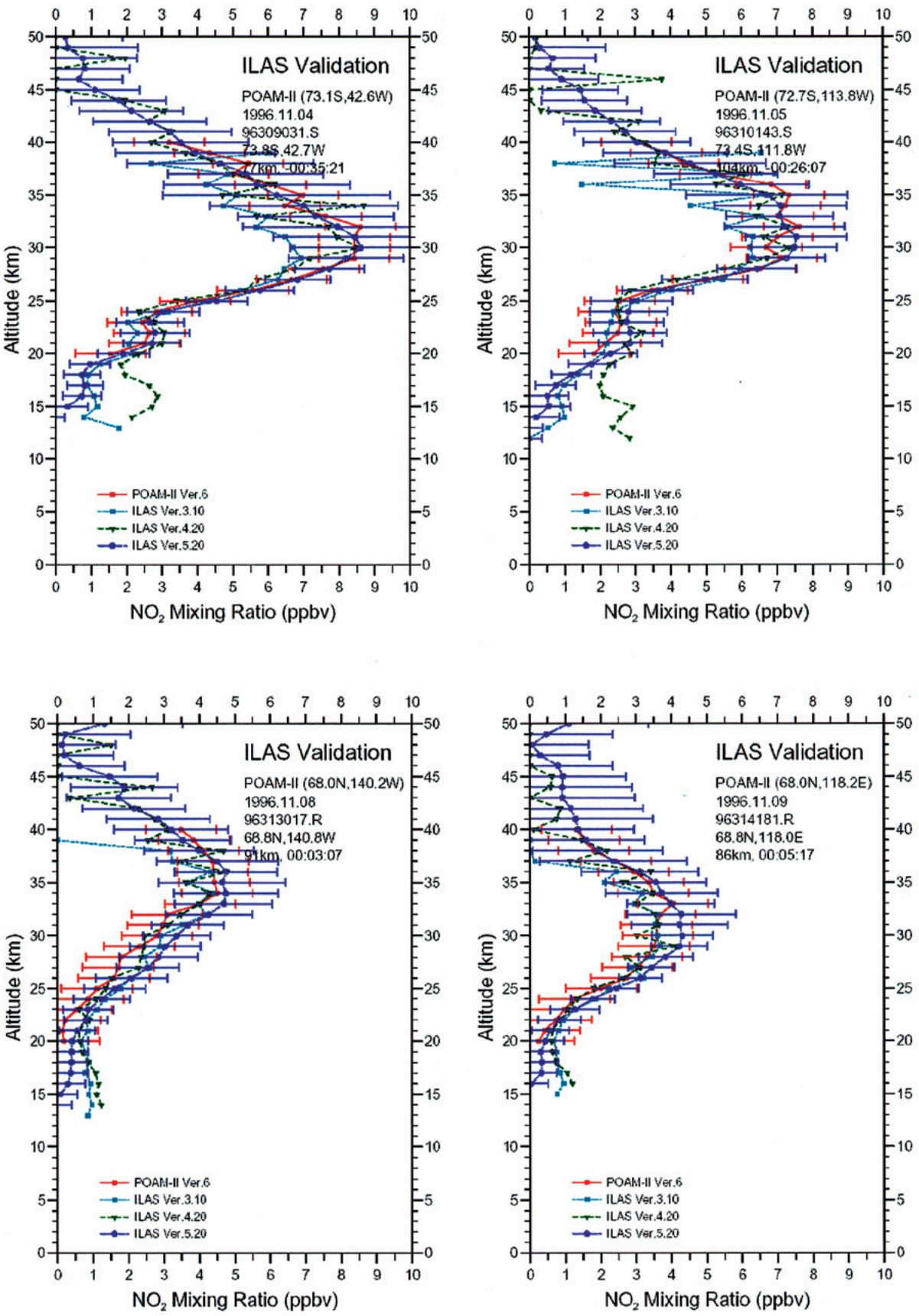


図 4.7　POAM II と ILAS の比較（二酸化窒素）

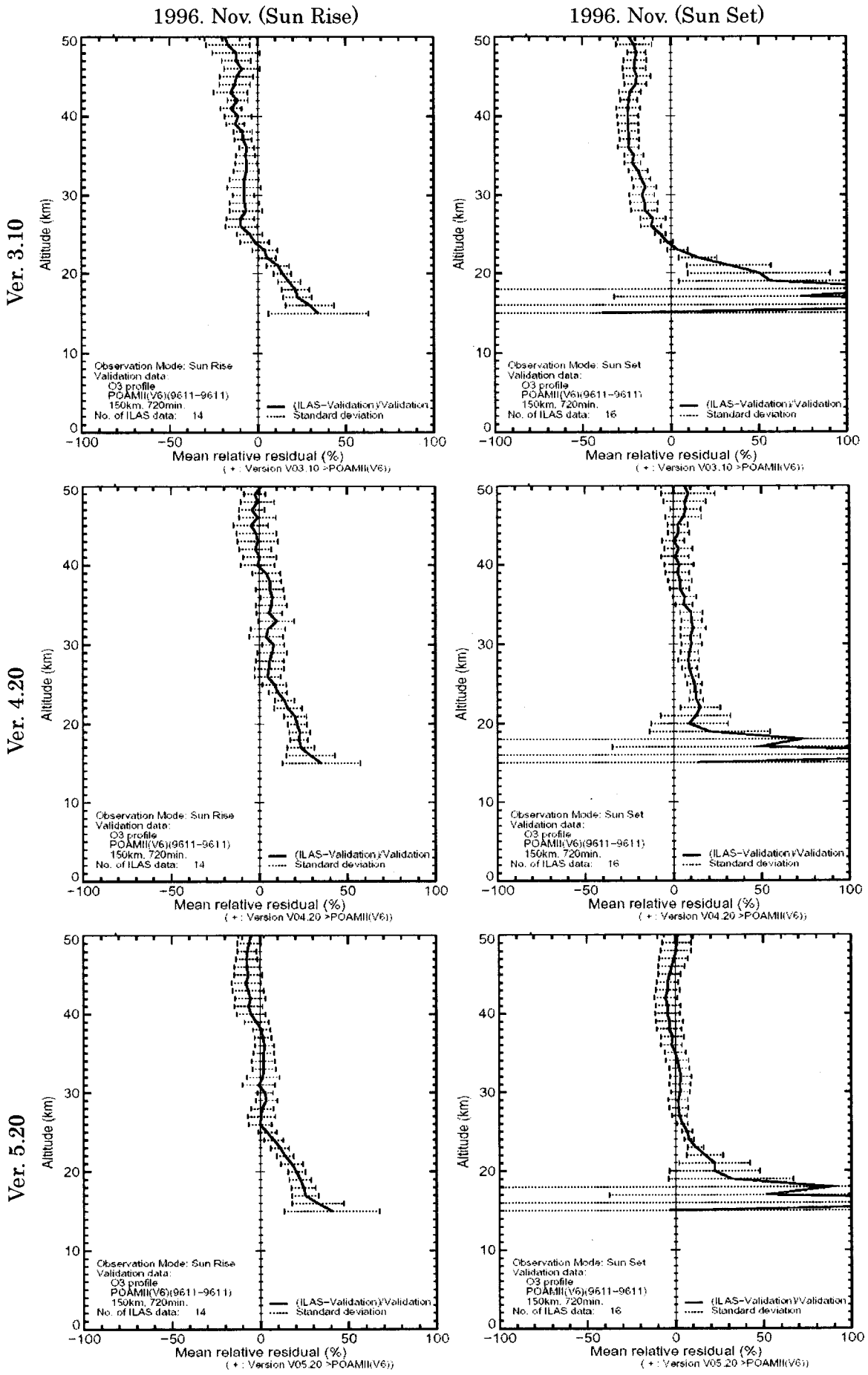


図 4.8　POAM II に対する ILAS の平均相対誤差プロファイル（オゾン）

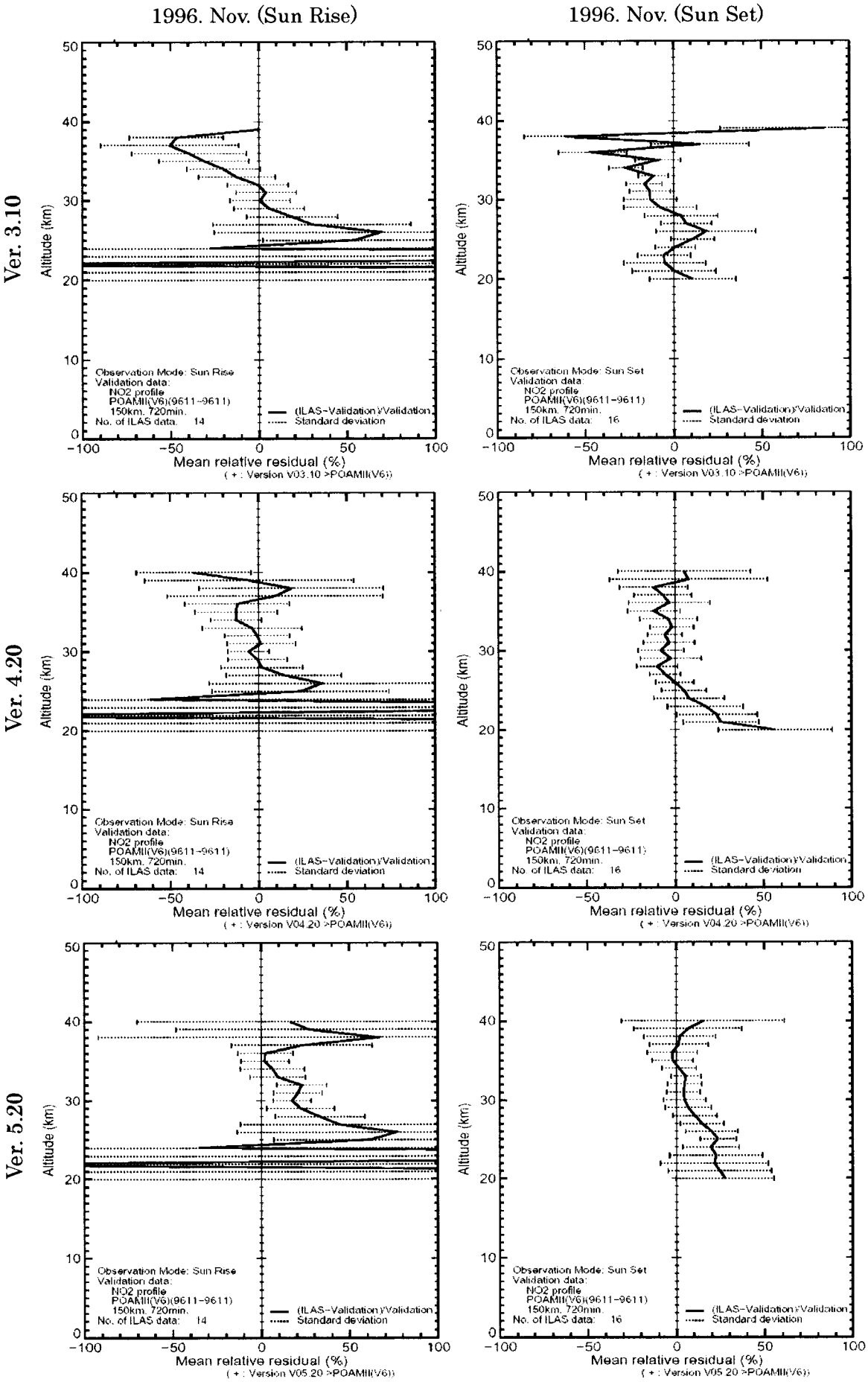


図 4.9　POAMⅡに対する ILAS の平均相対誤差プロファイル（二酸化窒素）

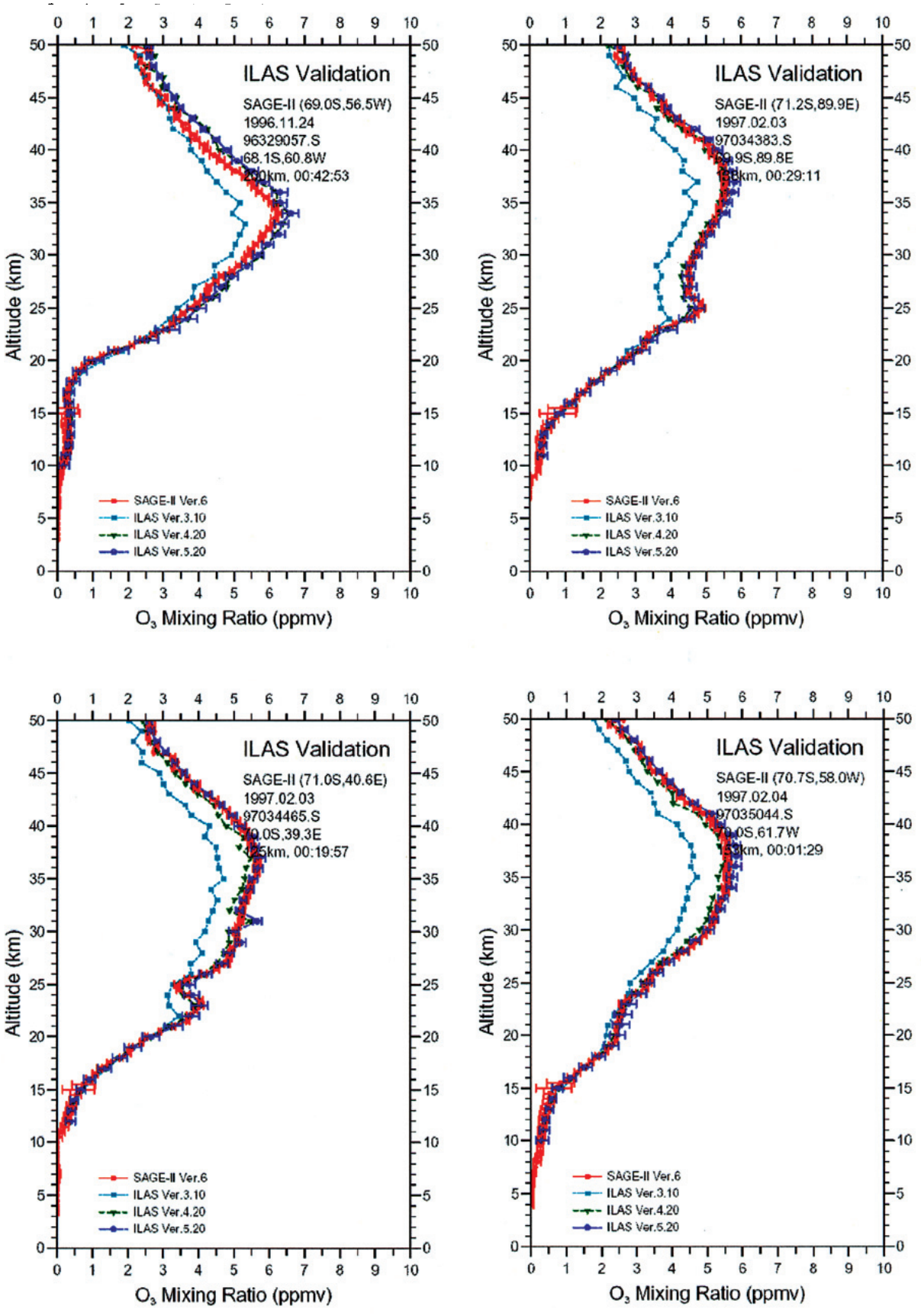


図 4.10(1)　SAGE Ⅱ と ILAS の比較(1)（オゾン）

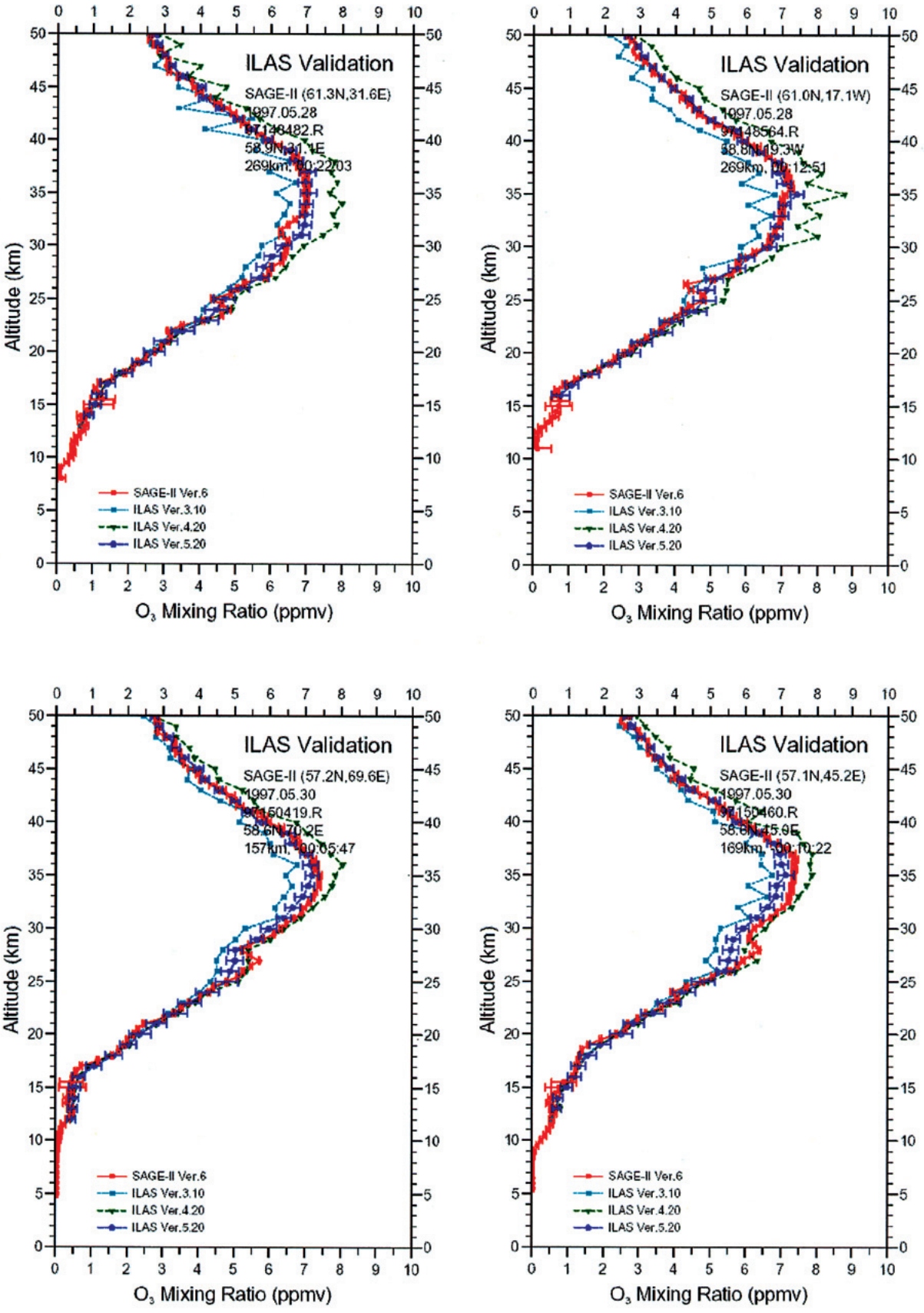


図 4.10(2)　SAGE II と ILAS の比較(2)（オゾン）

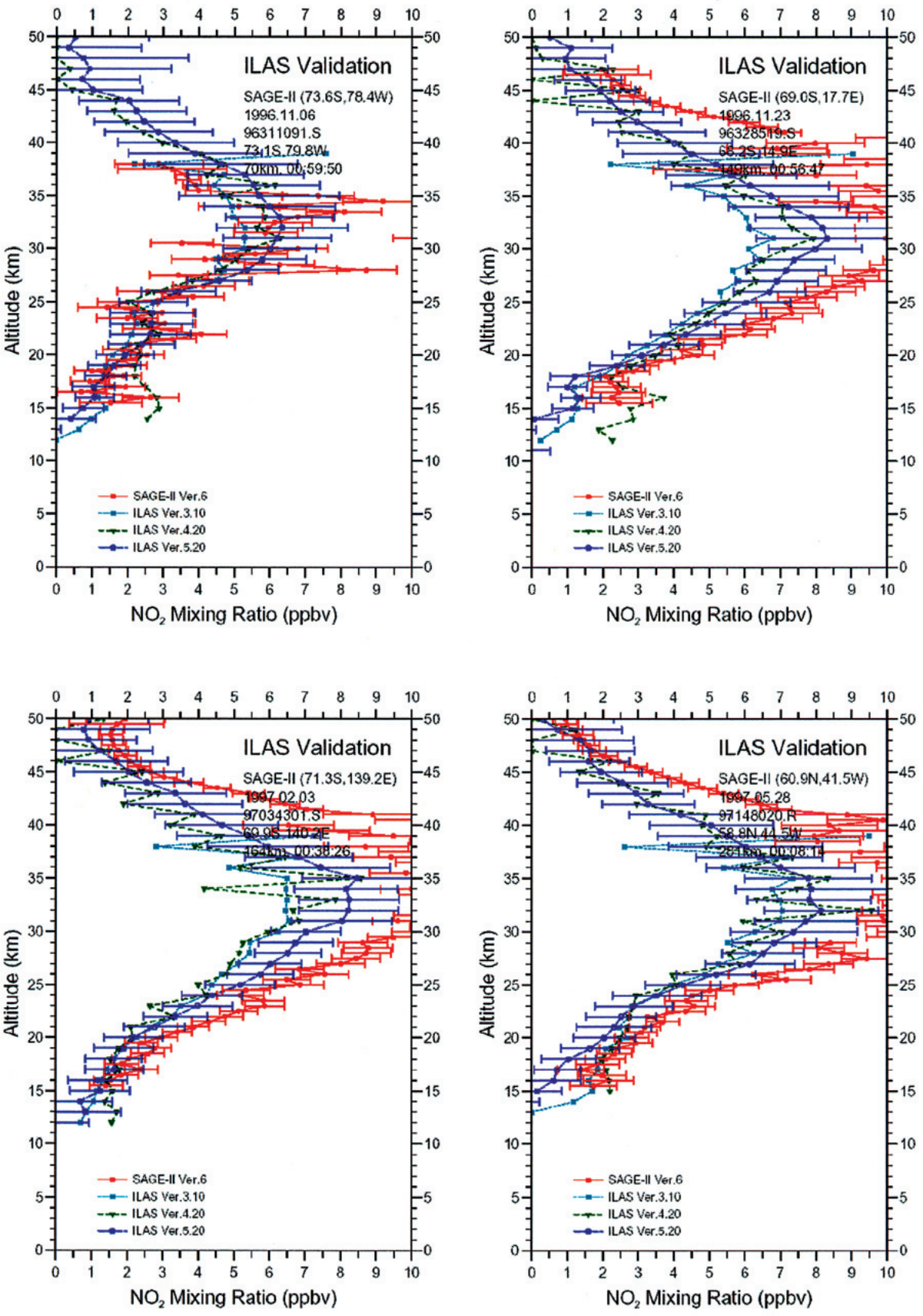


図 4.11　SAGE II と ILAS の比較（二酸化窒素）

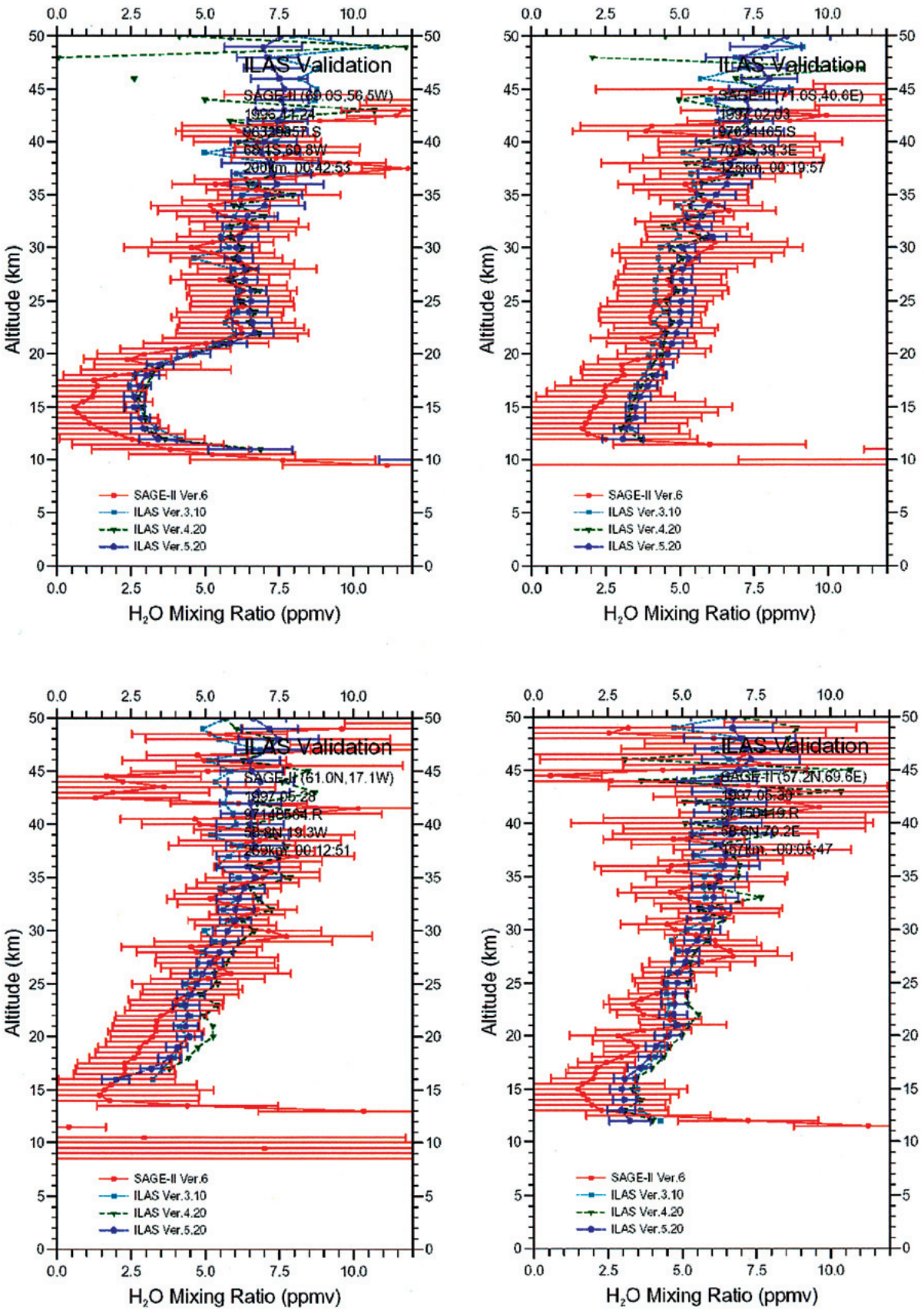


図 4.12　SAGE II と ILAS の比較（水蒸気）

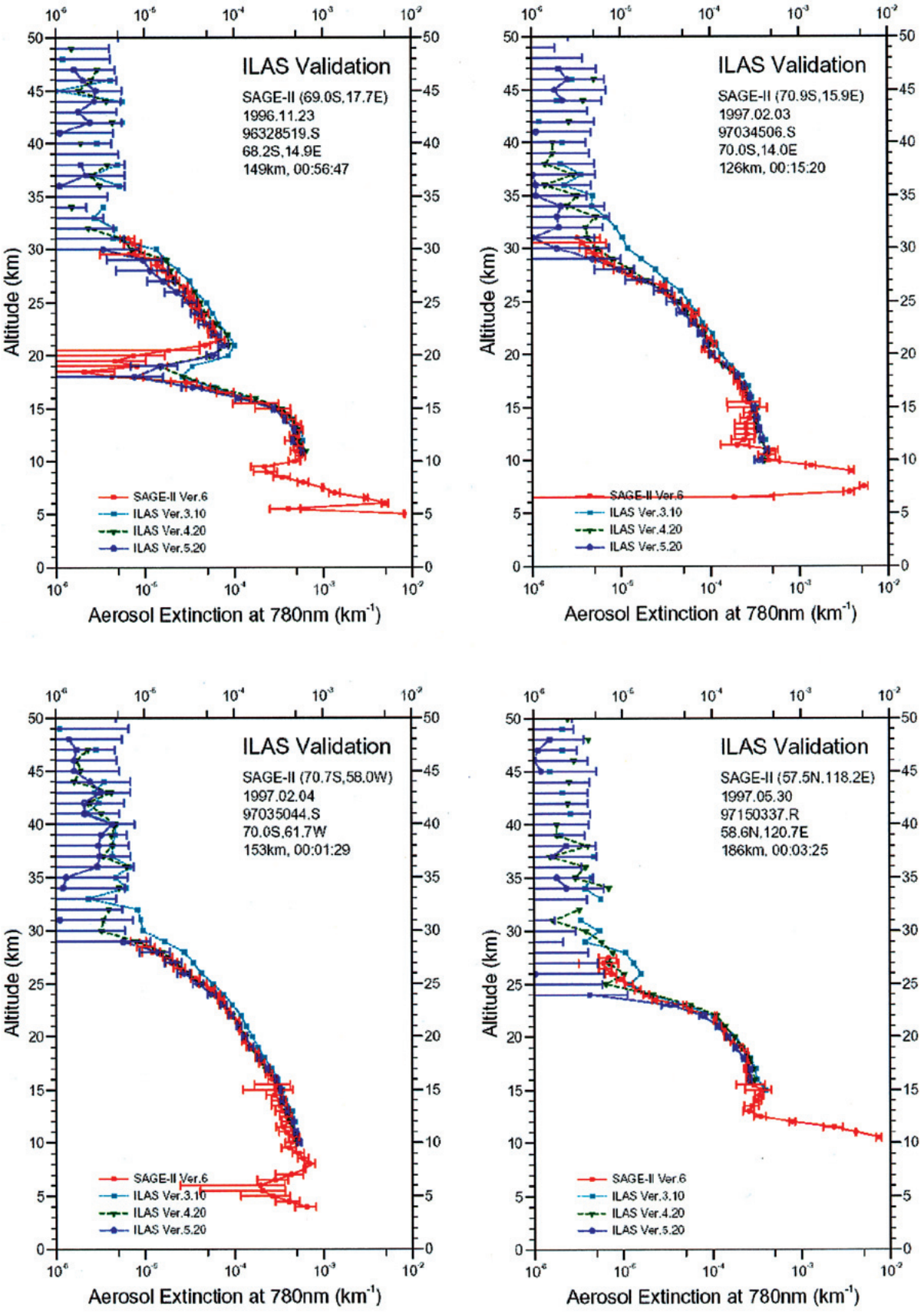


図 4.13　SAGE II と ILAS の比較（エアロゾル消散係数(780nm)

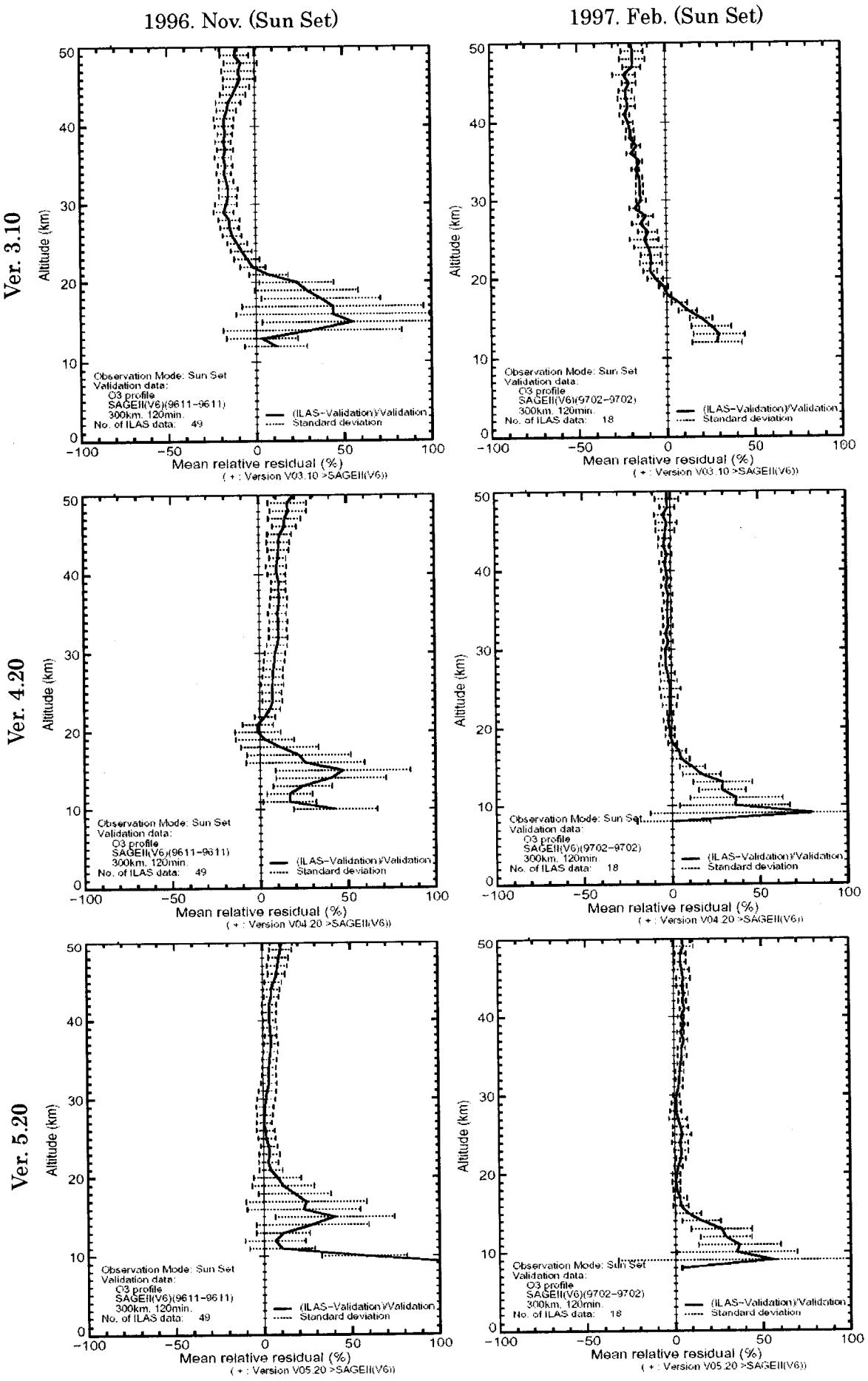


図 4.14(1)　SAGE II に対する ILAS の平均相対誤差プロファイル(1)（オゾン）

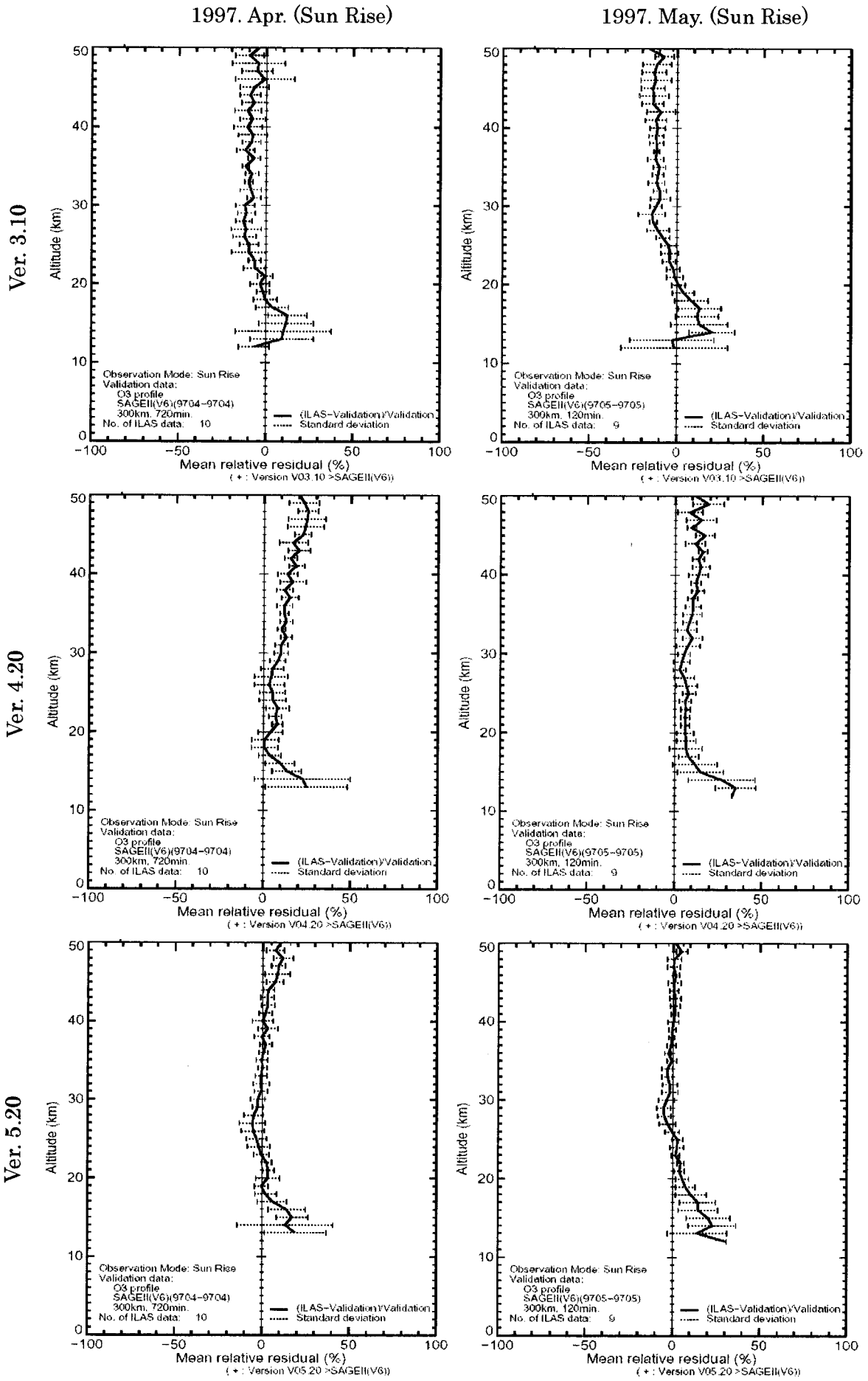


図 4.14(2)　SAGE Ⅱに対する ILAS の平均相対誤差プロファイル(2)（オゾン）

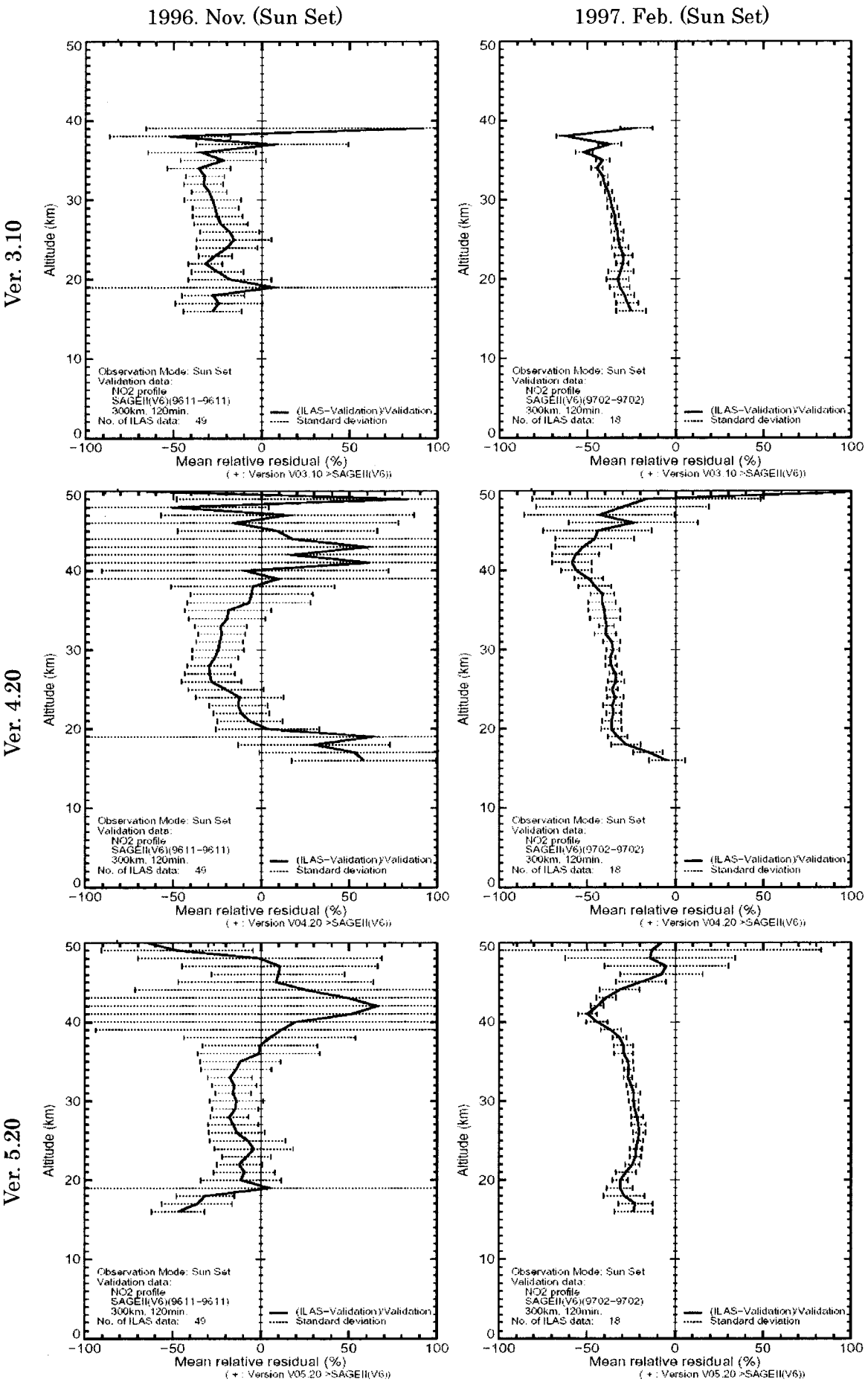


図 4.15(1)　SAGE II に対する ILAS の平均相対誤差プロファイル(1)（二酸化窒素）

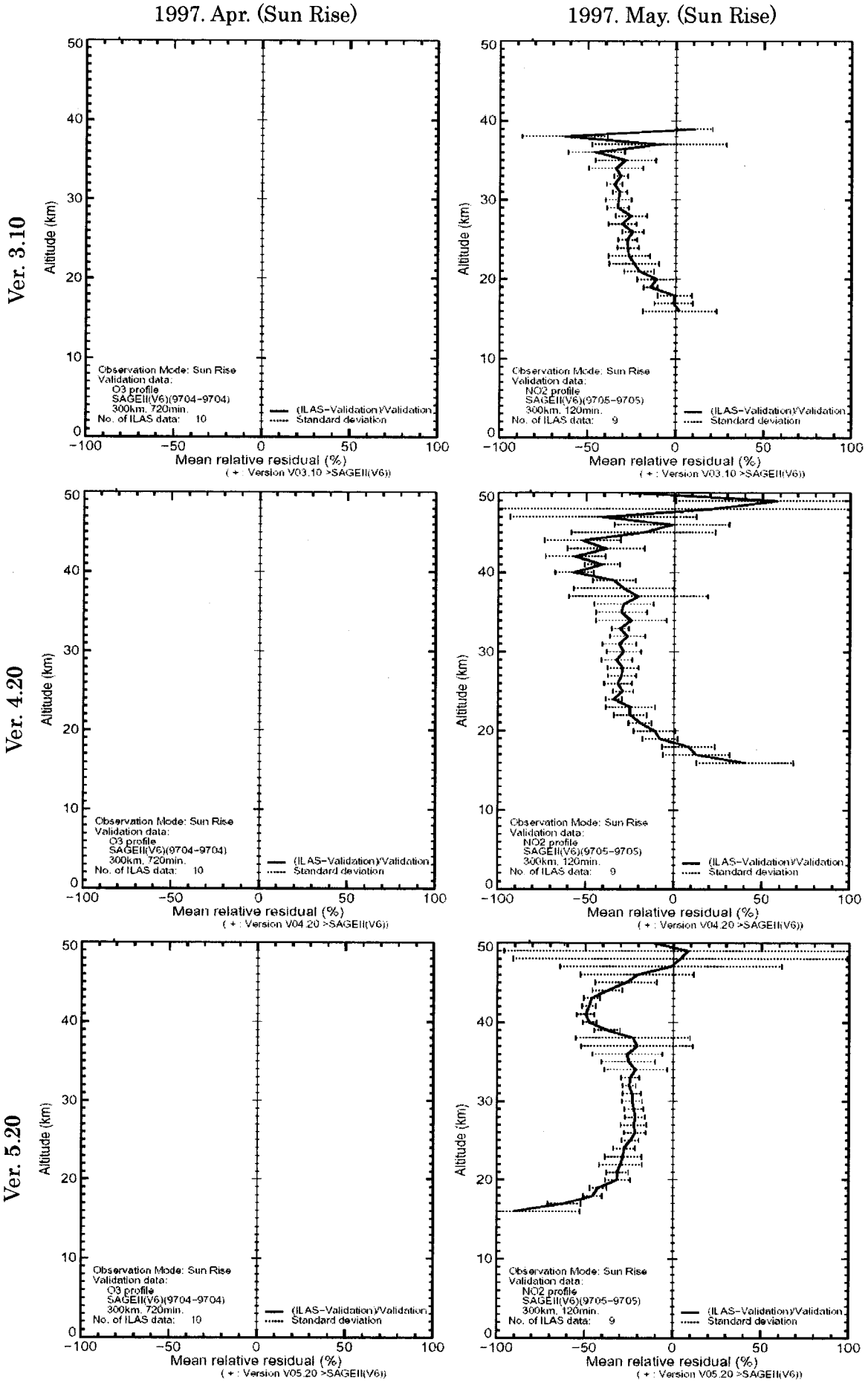


図 4.15(2)　SAGE II に対する ILAS の平均相対誤差プロファイル(2)（二酸化窒素）

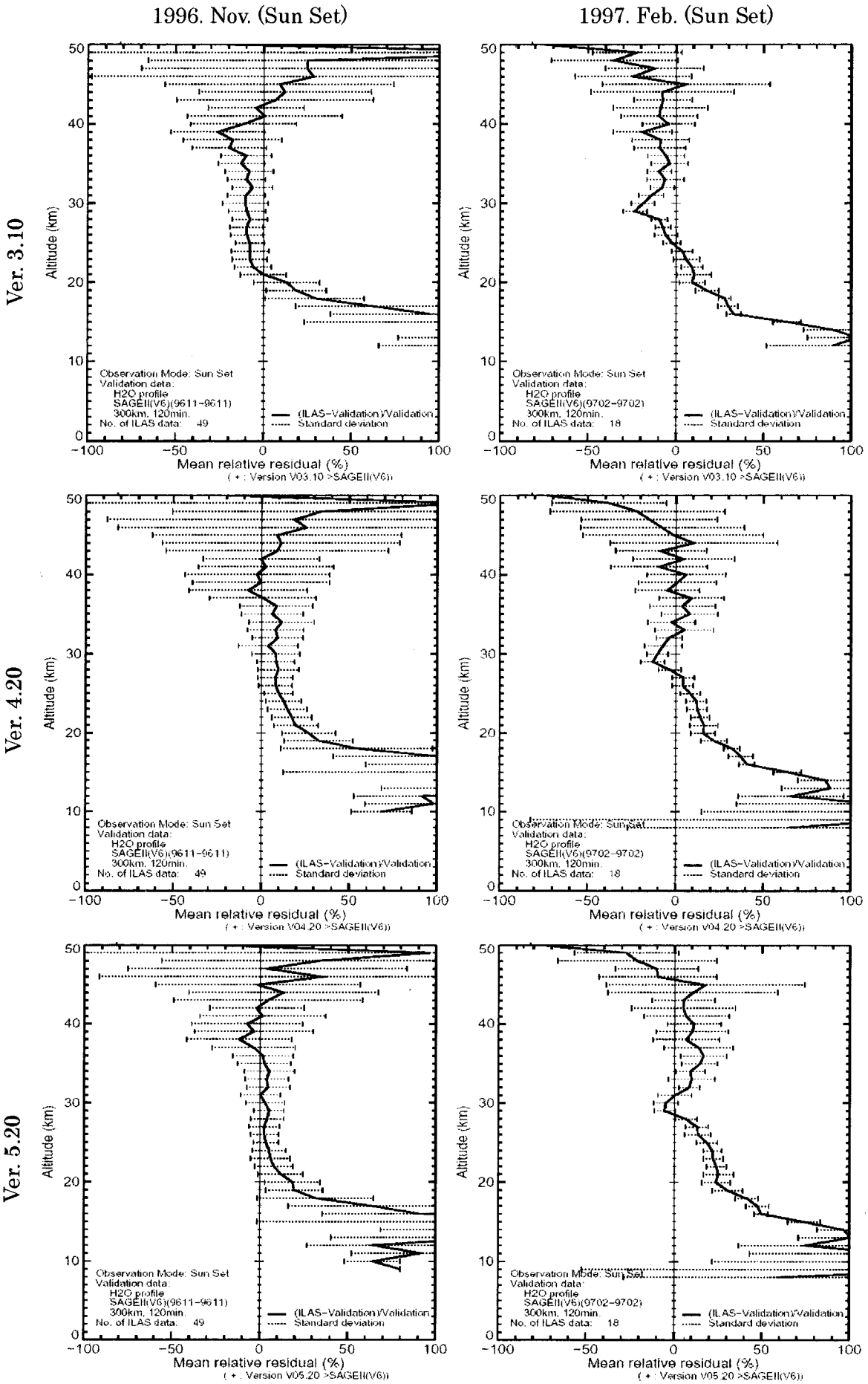


図 16(1)　SAGE Ⅱに対する ILAS の平均相対誤差プロファイル(1)（水蒸気）

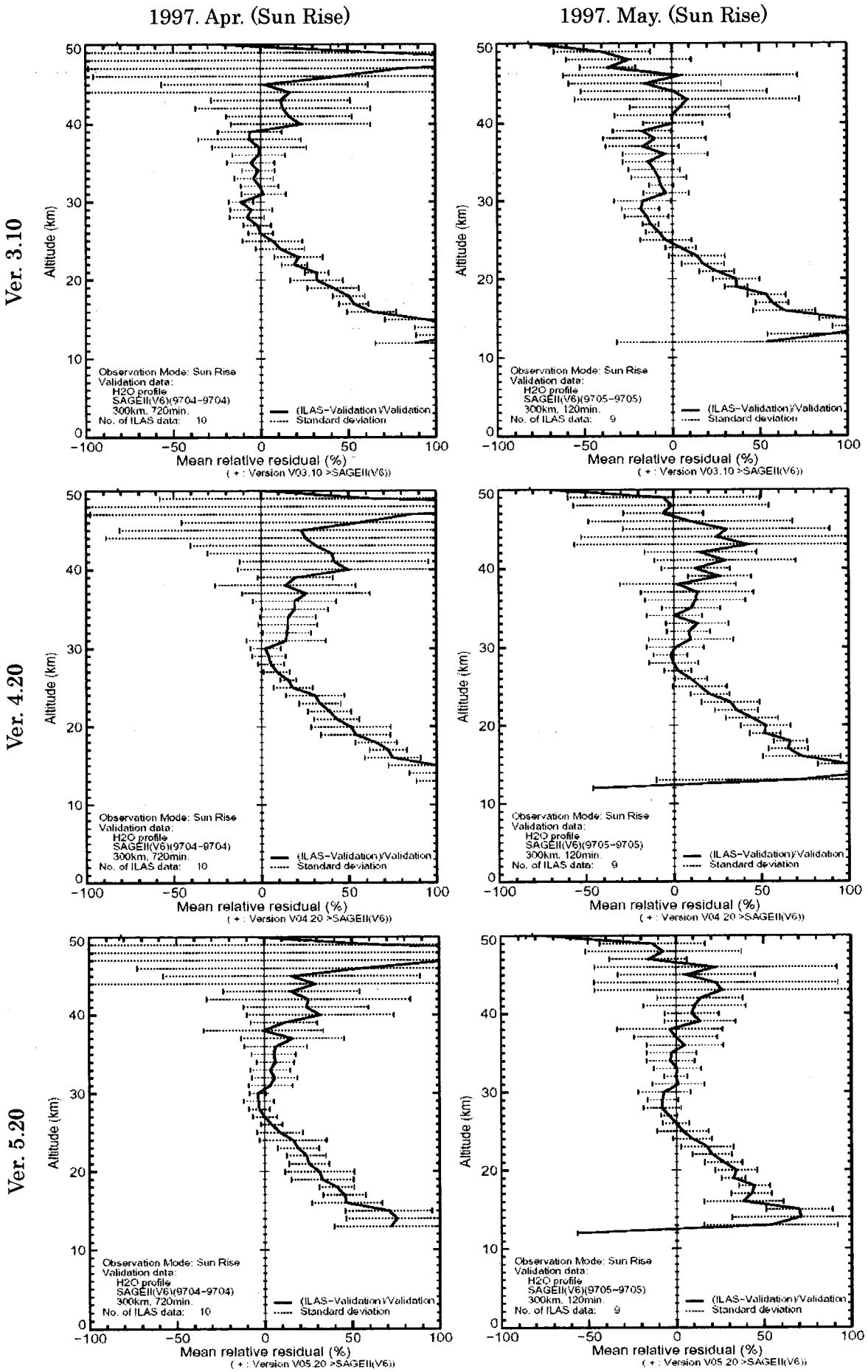


図 4.16(2)　SAGE II に対する ILAS の平均相対誤差プロファイル(2)（水蒸気）

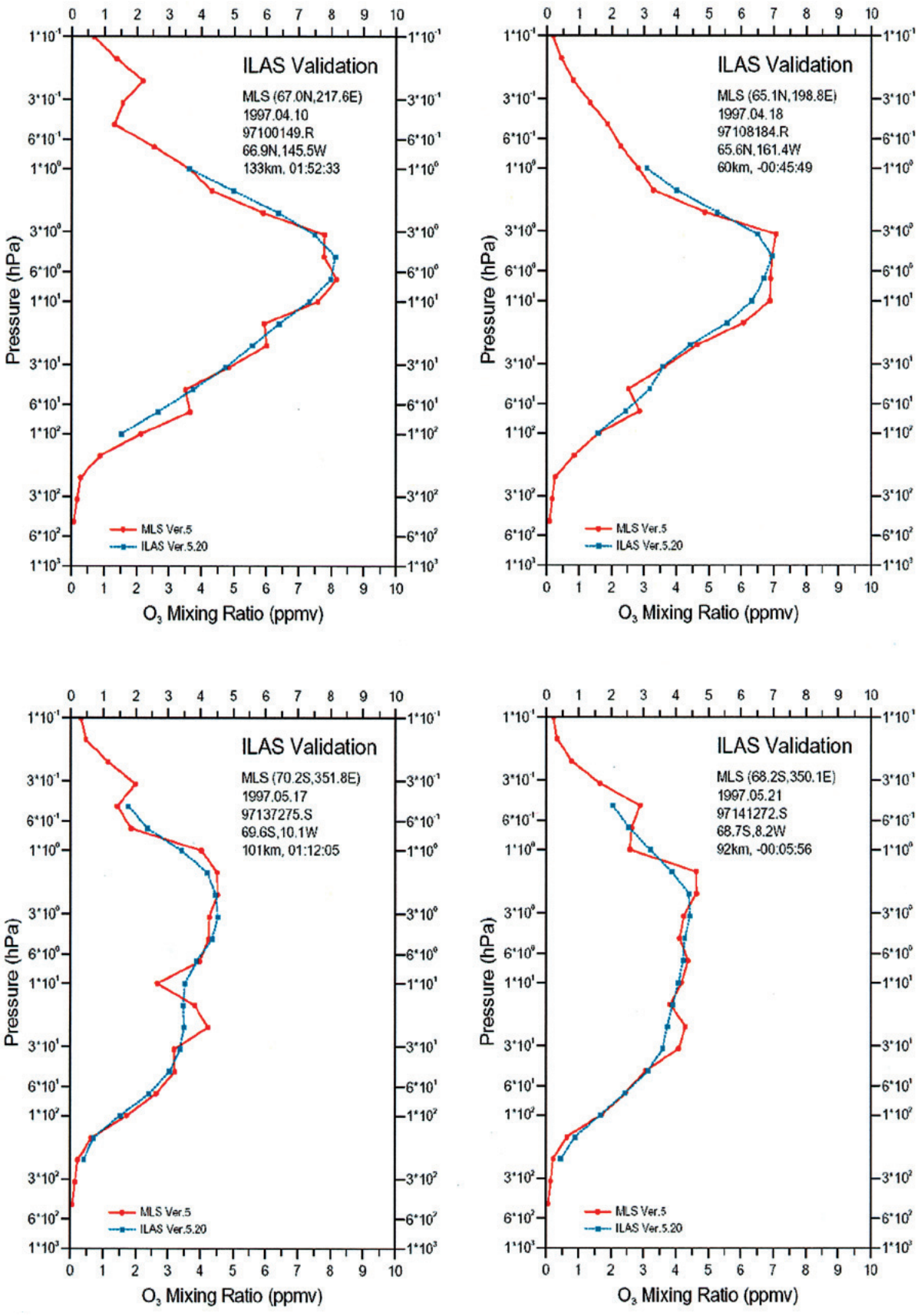


図 4.17　MLS と ILAS の比較（オゾン）

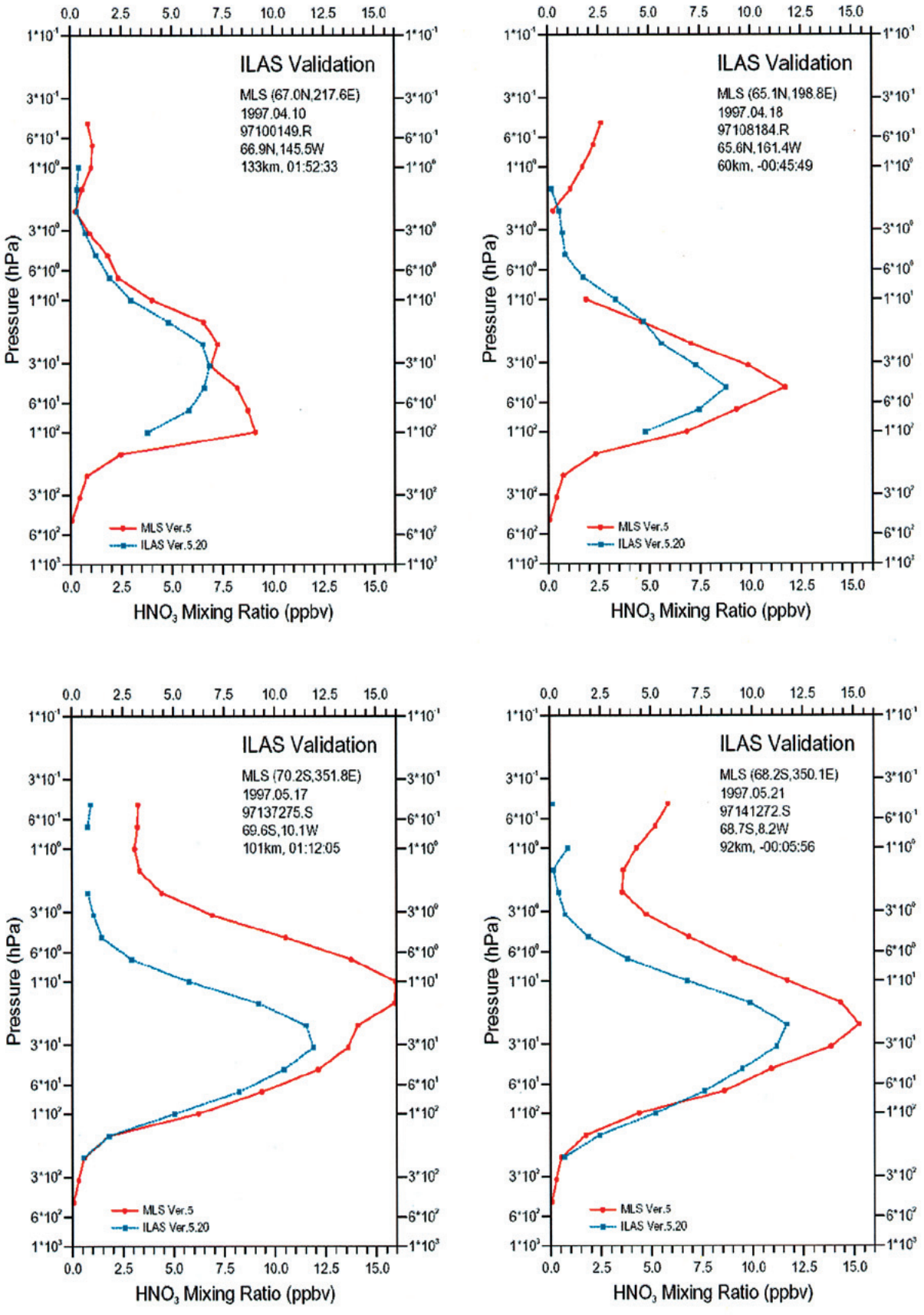


図 4.18　MLS と ILAS の比較（二酸化窒素）

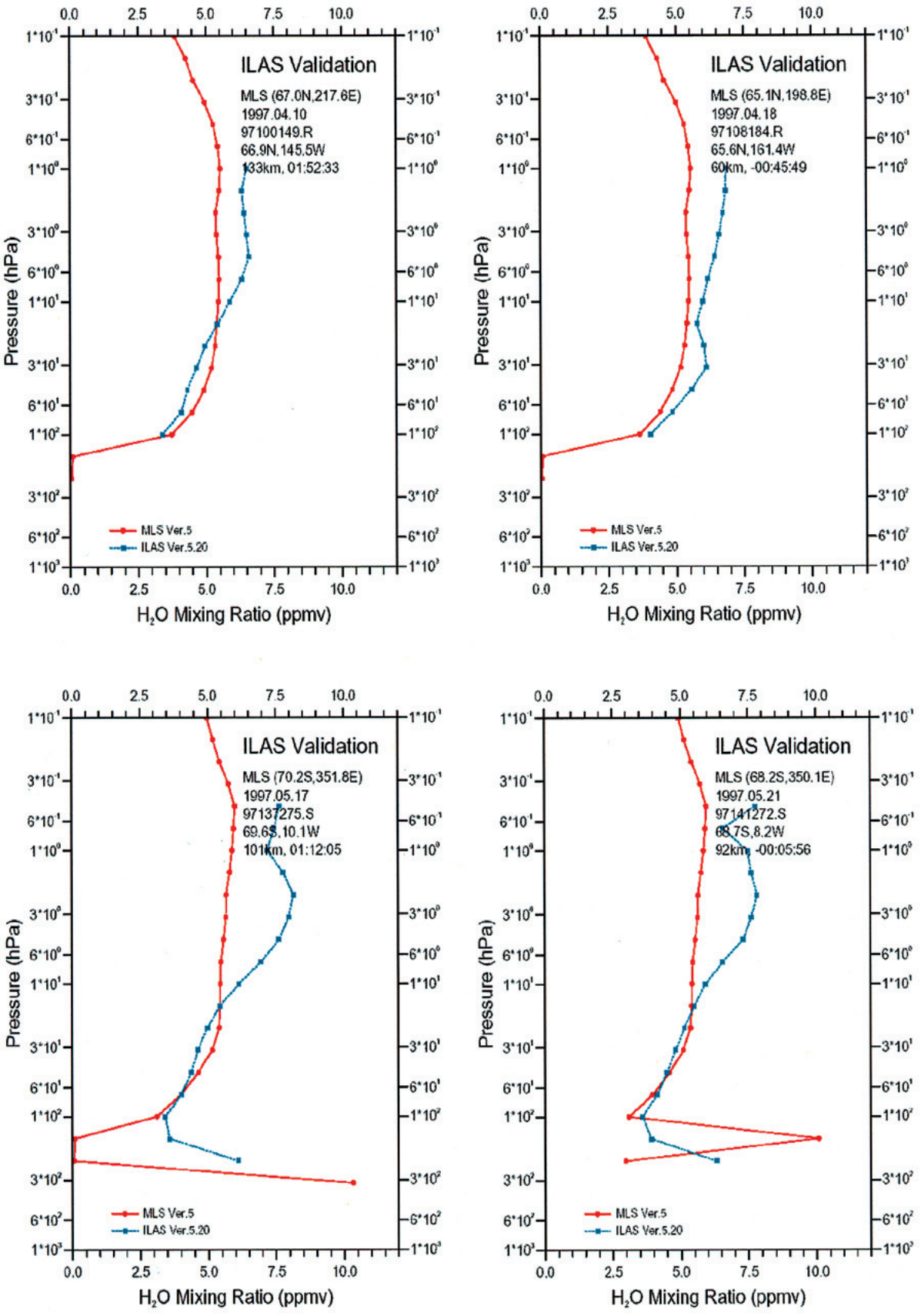


図 4.19　MLS と ILAS の比較（水蒸気）

第5章　ILASデータの統計（月平均プロファイル）

ILASで観測したオゾン、硝酸、二酸化窒素、亜酸化窒素、メタン、水蒸気、エアロゾル消散係数（780nm）についてバージョン 5.20 データを用いて月別、緯度帯別に平均プロファイル（1996年11月～1997年6月）を求めた。ILASが測定を行う緯度帯は、その時点の太陽の赤緯によって変化する（図1.4参照）。ILAS稼働期間中の測定位置は、南半球では極近傍（春分の頃）から南緯65度付近（冬至、夏至の頃）まで変化し、北半球では冬季に北緯70度付近（春分の頃）から北緯57度付近（夏至の頃）まで変化する。表5.1に平均値を計算するために用いた月別のデータ数と測定が行われた緯度帯を示す。

表5.1　各月の測定が行われた緯度帯と計算に用いたデータ数

年月	緯度帯	オゾン	硝酸	二酸化窒素	亜酸化窒素	メタン	水蒸気	エアロゾル
	【南半球】							
1996. 11	72.5S-67.5S	205	205	205	205	205	205	205
1996. 12	67.5S-62.5S	384	384	384	384	384	384	383
1997. 01	67.5S-62.5S	261	261	261	261	261	261	261
1997. 02	77.5S-72.5S	163	163	163	163	163	163	163
1997. 03	82.5S-77.5S	82	82	82	82	82	82	82
1997. 04	77.5S-72.5S	125	125	125	125	125	125	125
1997. 05	72.5S-67.5S	273	273	273	273	273	273	226
1997. 06	67.5S-62.5S	301	301	301	301	301	301	271
	【北半球】							
1996. 11	67.5N-72.5N	178	178	178	178	178	178	72
1996. 12	62.5N-67.5N	352	352	352	352	352	352	279
1997. 01	62.5N-67.5N	357	357	354	357	357	357	294
1997. 02	67.5N-72.5N	322	322	322	322	322	322	154
1997. 03	67.5N-72.5N	383	383	383	383	383	383	78
1997. 04	62.5N-67.5N	306	306	306	306	306	306	172
1997. 05	57.5N-62.5N	321	321	321	321	321	321	303
1997. 06	57.5N-62.5N	100	100	100	100	100	100	99

上の表に示された月、緯度帯について求めた各ガスの平均プロファイルを図5.1～図5.7に示す。図において、実線は平均値、横線の右端は全データの90パーセント点、左端は10パーセント点を示す。点線は比較のために加えた参照大気データの同じ緯度帯での平均鉛直分布で、中央が平均値、左側が10パーセント点、右側が90パーセント点である。

参照大気データは、オゾンと水蒸気がUARS MLS 3ATデータ（1991-1994）、硝酸、二酸化窒素、メタンがUARS CLAES 3ATデータ（1992-1993）（いずれも周縁観測法）のそれぞれ1992年のデータ、エアロゾル消散係数(780nm)はNimbus 7 SAM IIの1986～1990年のデータである。ただし、北半球の3～6月はNimbus 7 SAM IIに該当する緯度帯のデータがないため、ERBS SAGE IIのデータ（1986-1990）を用いている。これら（SAM II、SAGE II）はどちらも太陽掩蔽法を採用したセンサーである。

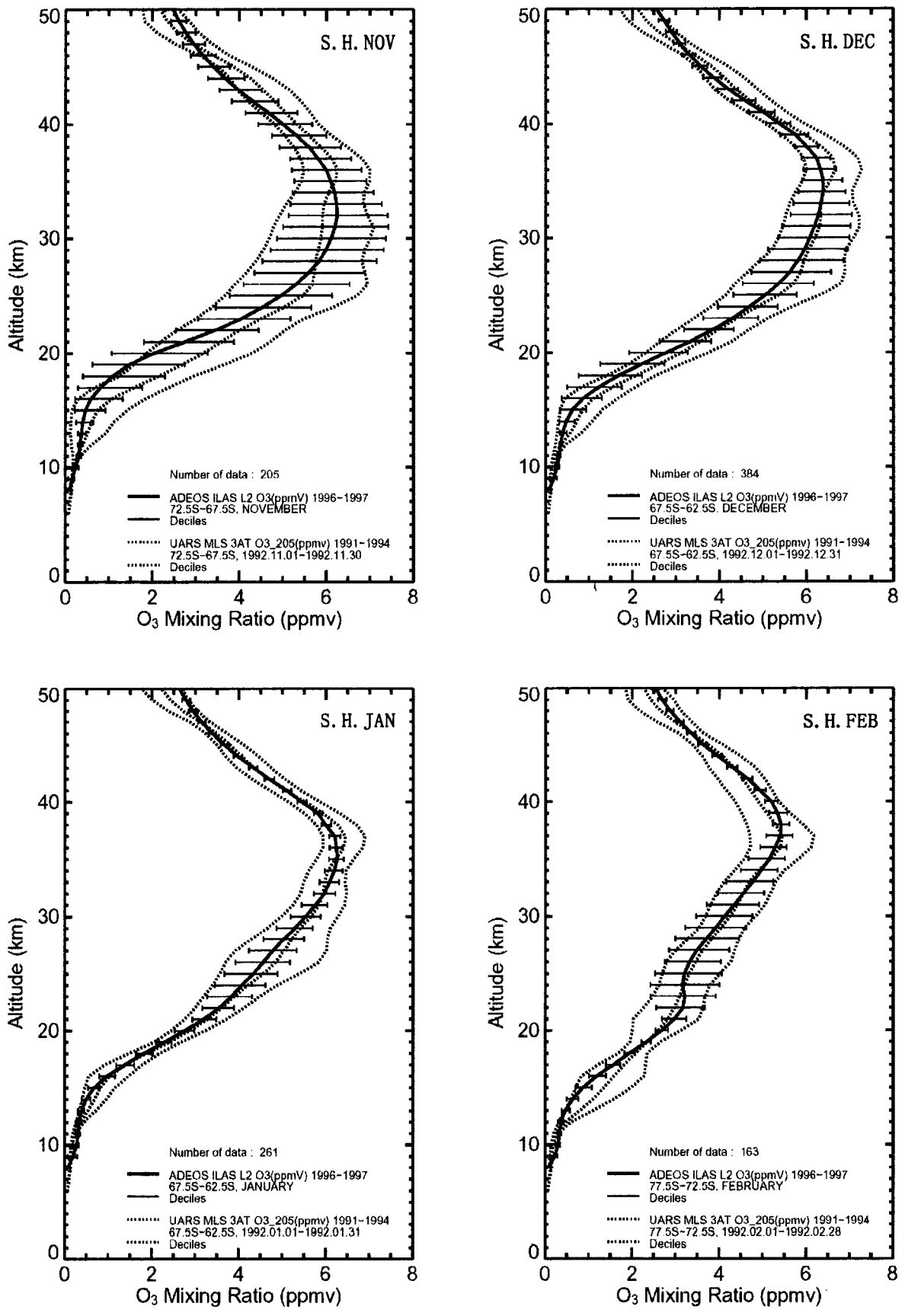


図 5.1(1)　オゾンの月別緯度帯別平均プロファイル（南半球）

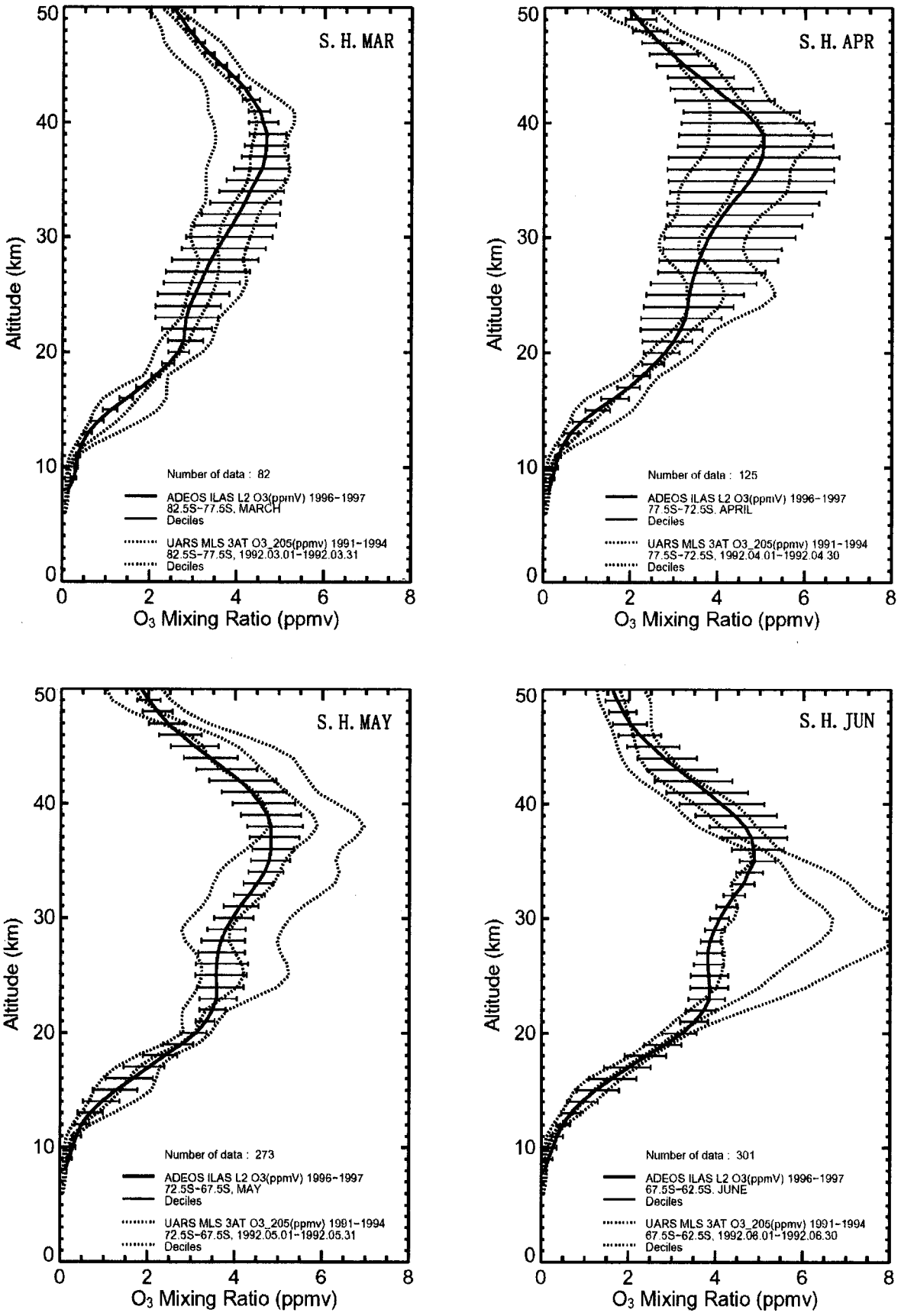


図 5.1(2)　オゾンの月別緯度帯別平均プロファイル（南半球）

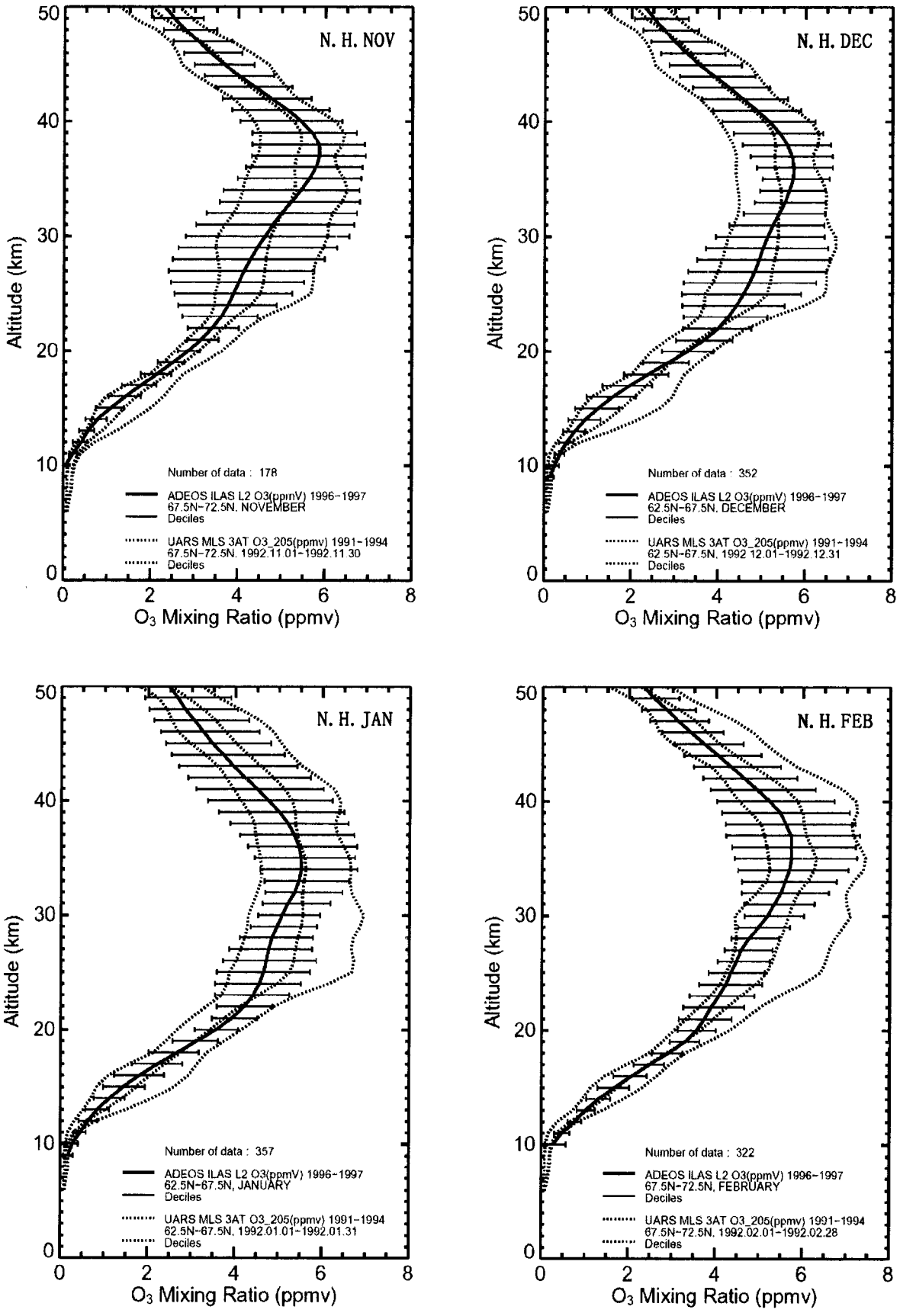


図 5.1(3)　オゾンの月別緯度帯別平均プロファイル（北半球）

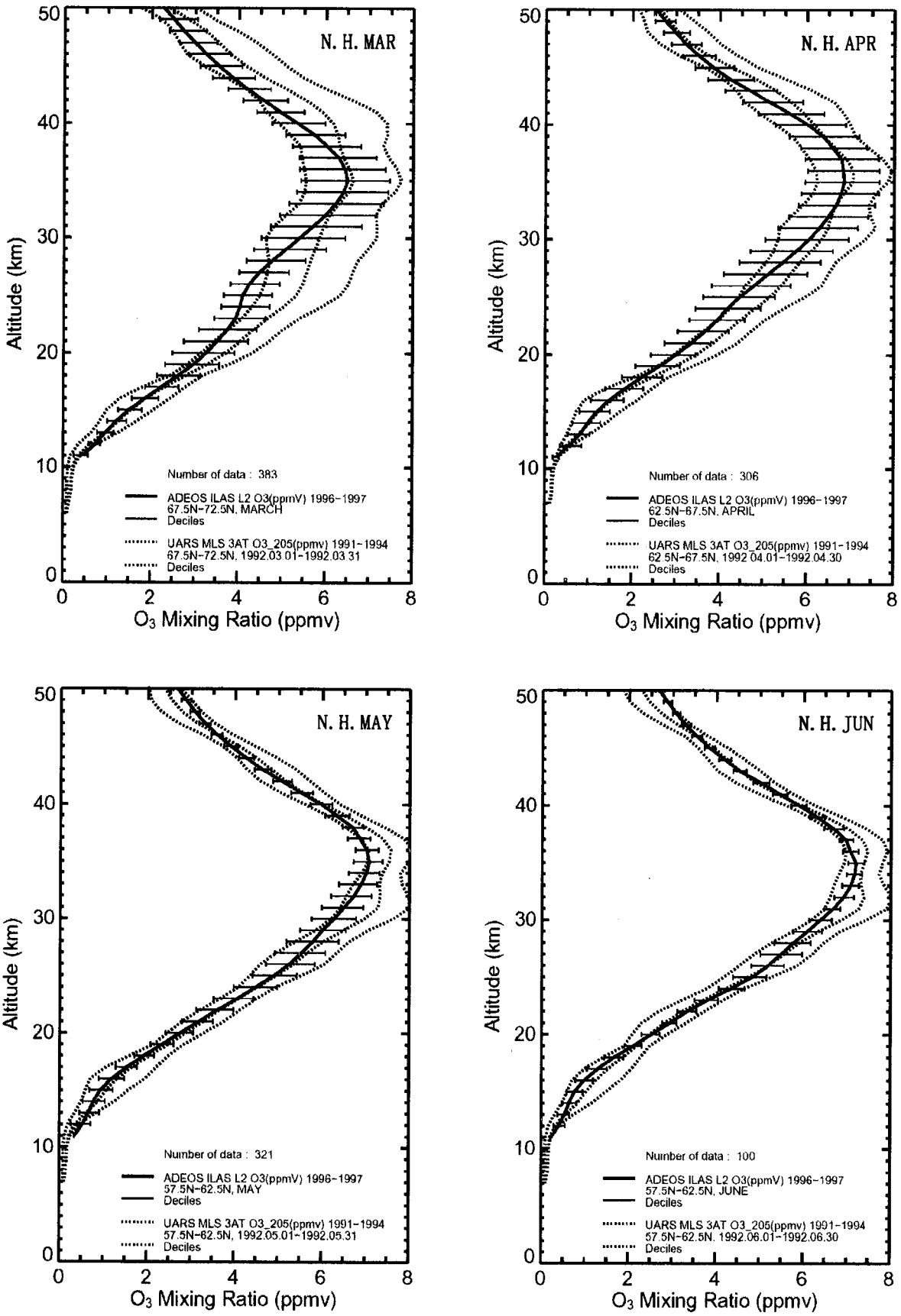


図 5.1(4)　オゾンの月別緯度帯別平均プロファイル（北半球）

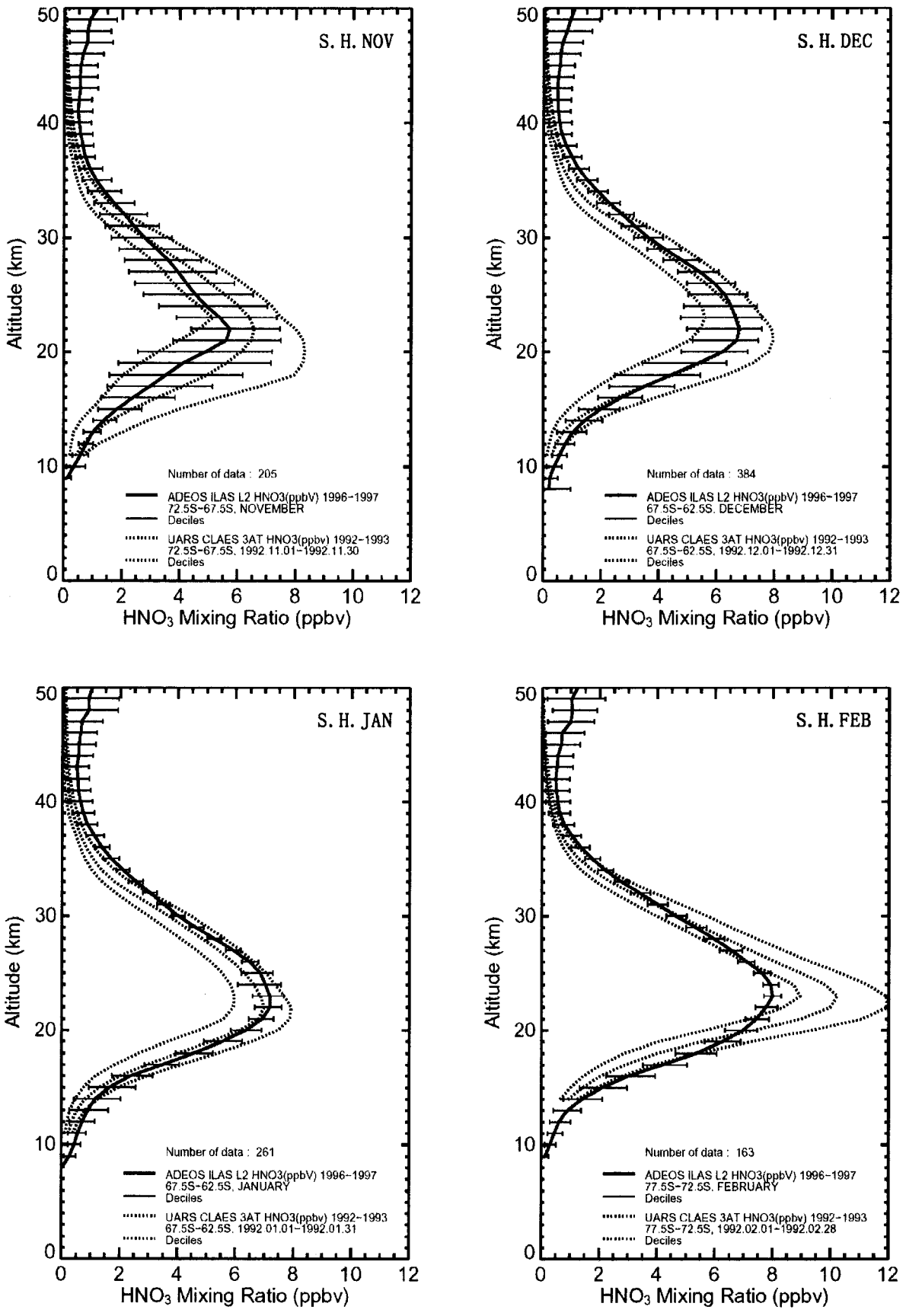


図 5.2(1)　硝酸の月別緯度帯別平均プロファイル（南半球）

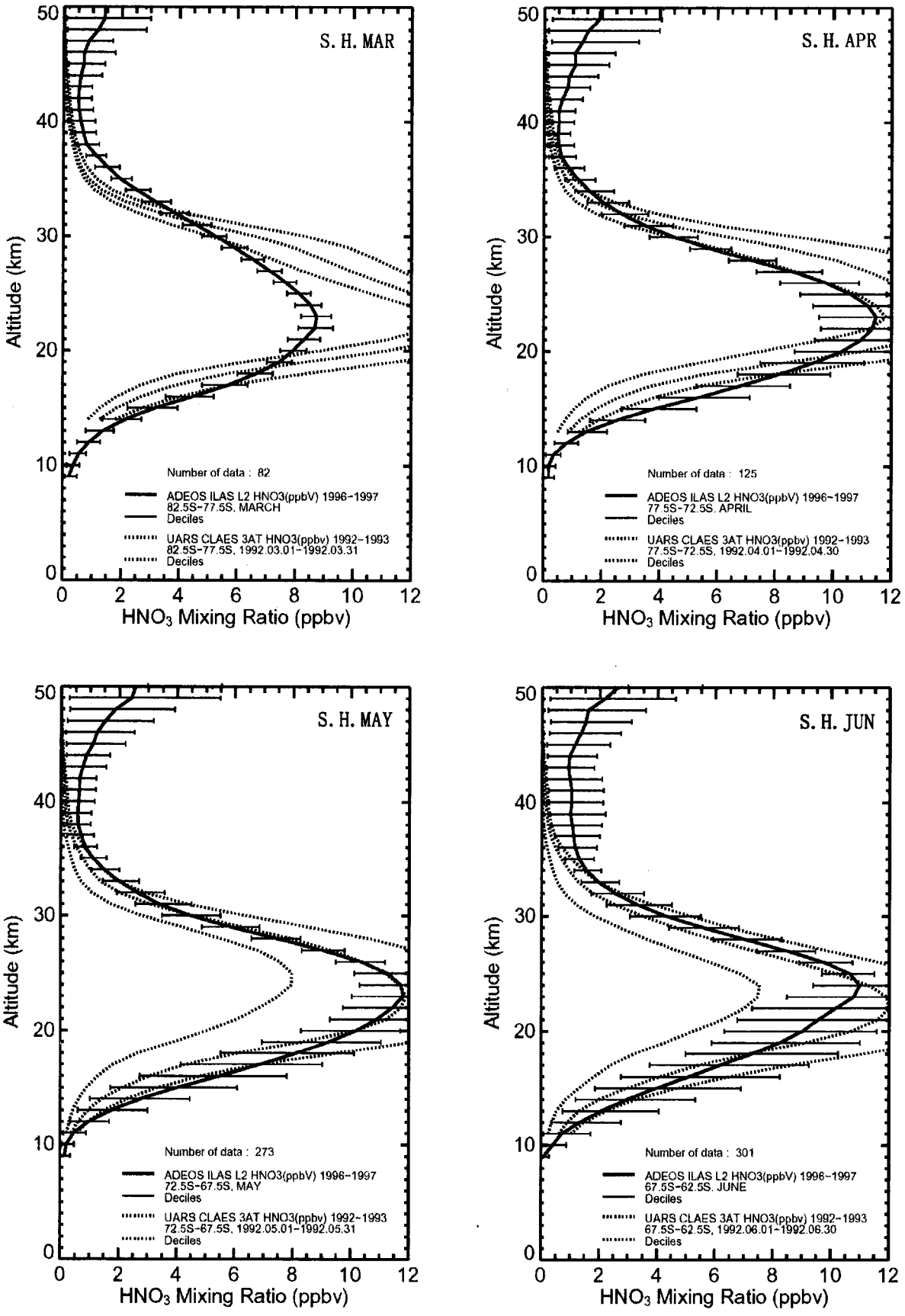


図 5.2(2)　硝酸の月別緯度帯別平均プロファイル（南半球）

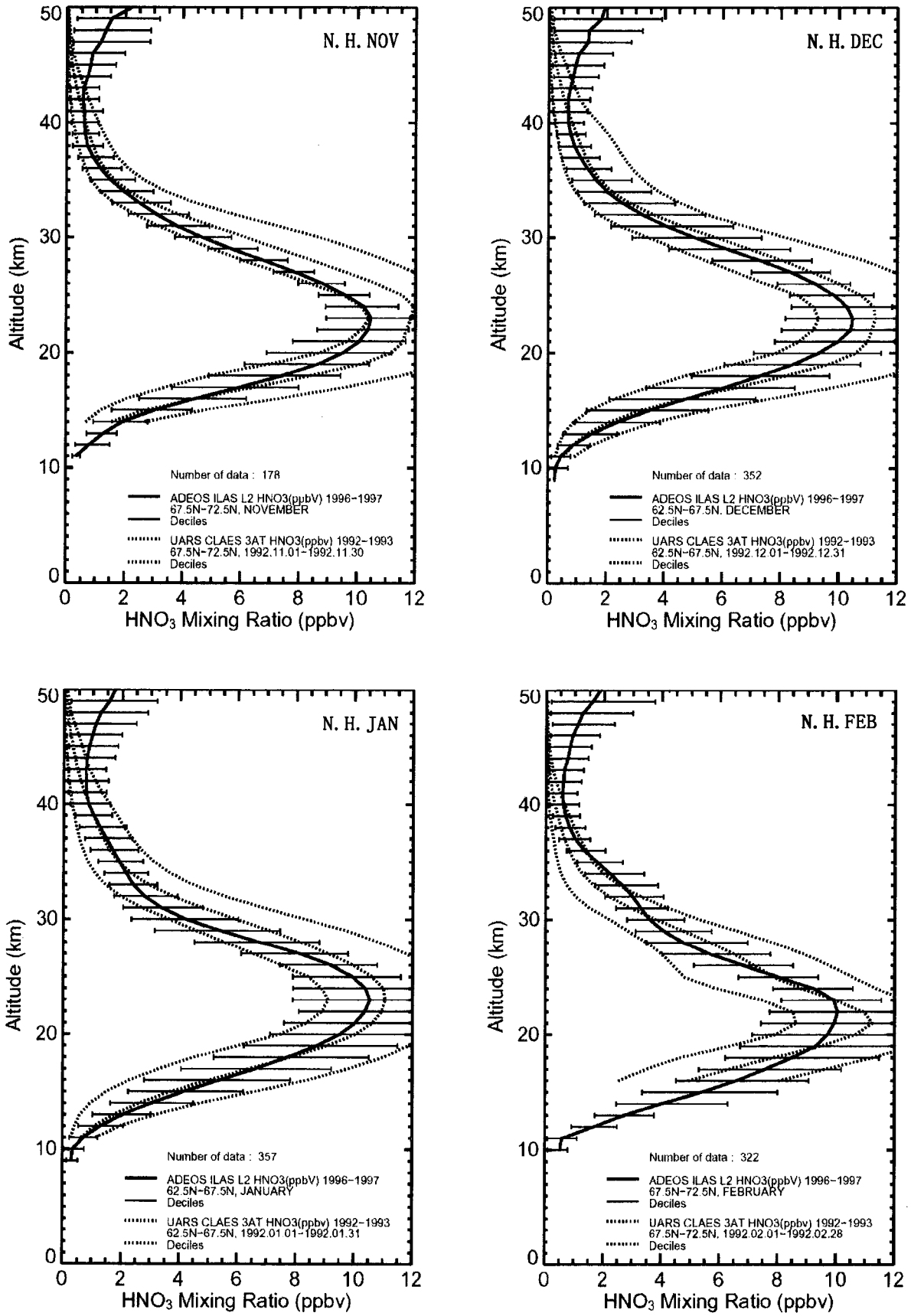


図 5.2(3)　硝酸の月別緯度帯別平均プロファイル（北半球）

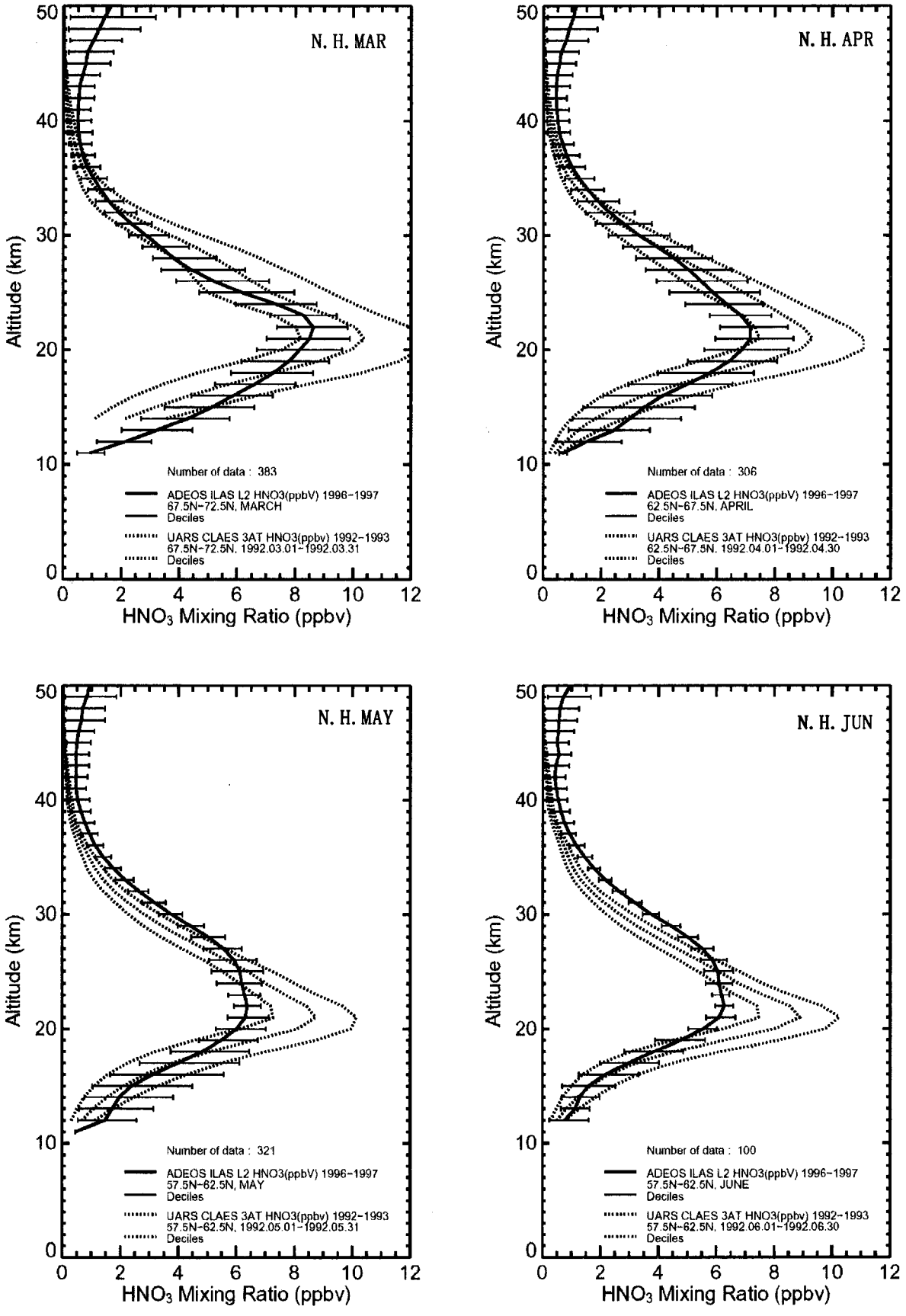


図 5.2(4)　硝酸の月別緯度帯別平均プロファイル（北半球）

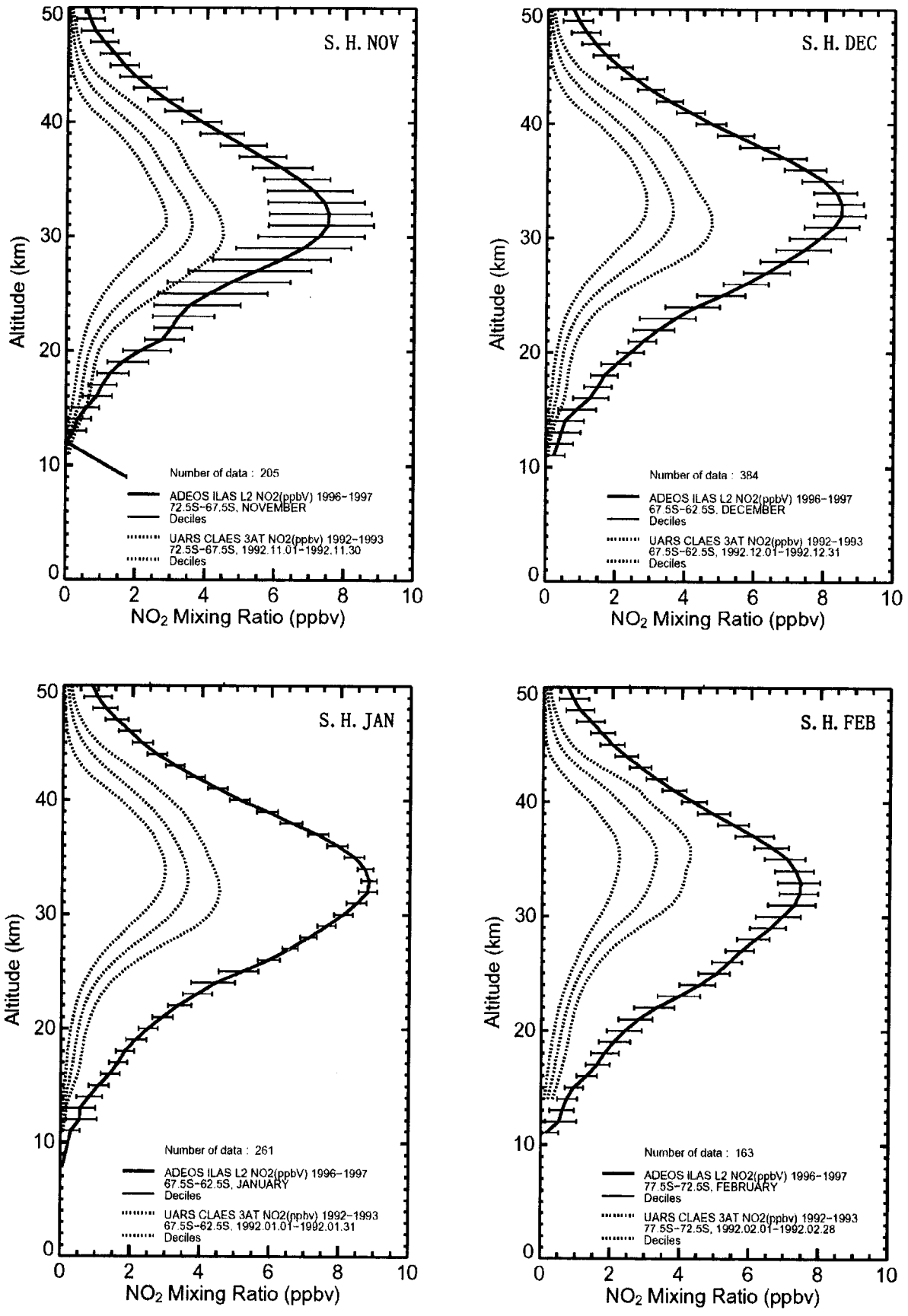


図 5.3(1)　二酸化窒素の月別緯度帯別平均プロファイル（南半球）

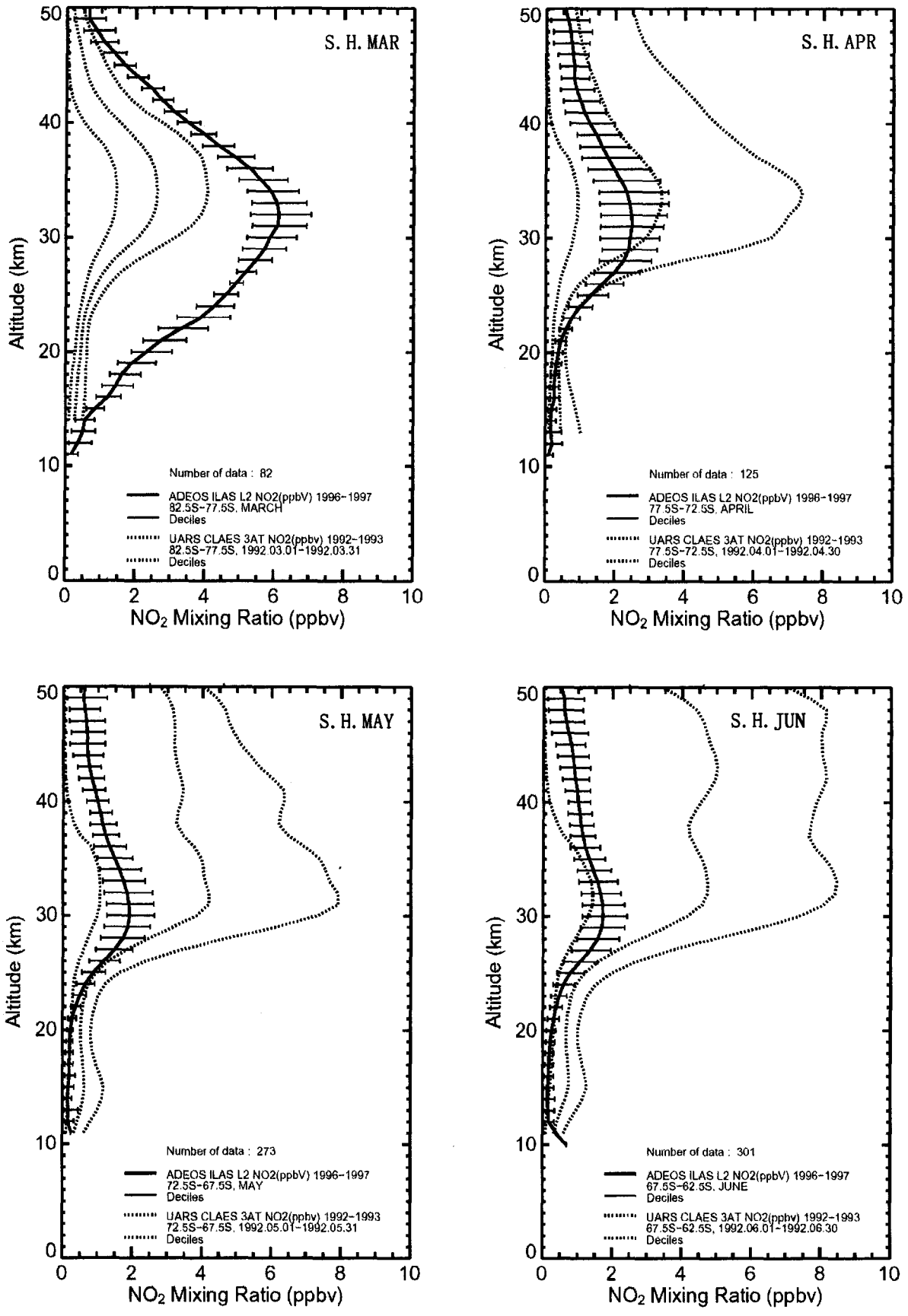


図 5.3(2)　二酸化窒素の月別緯度帯別平均プロファイル（南半球）

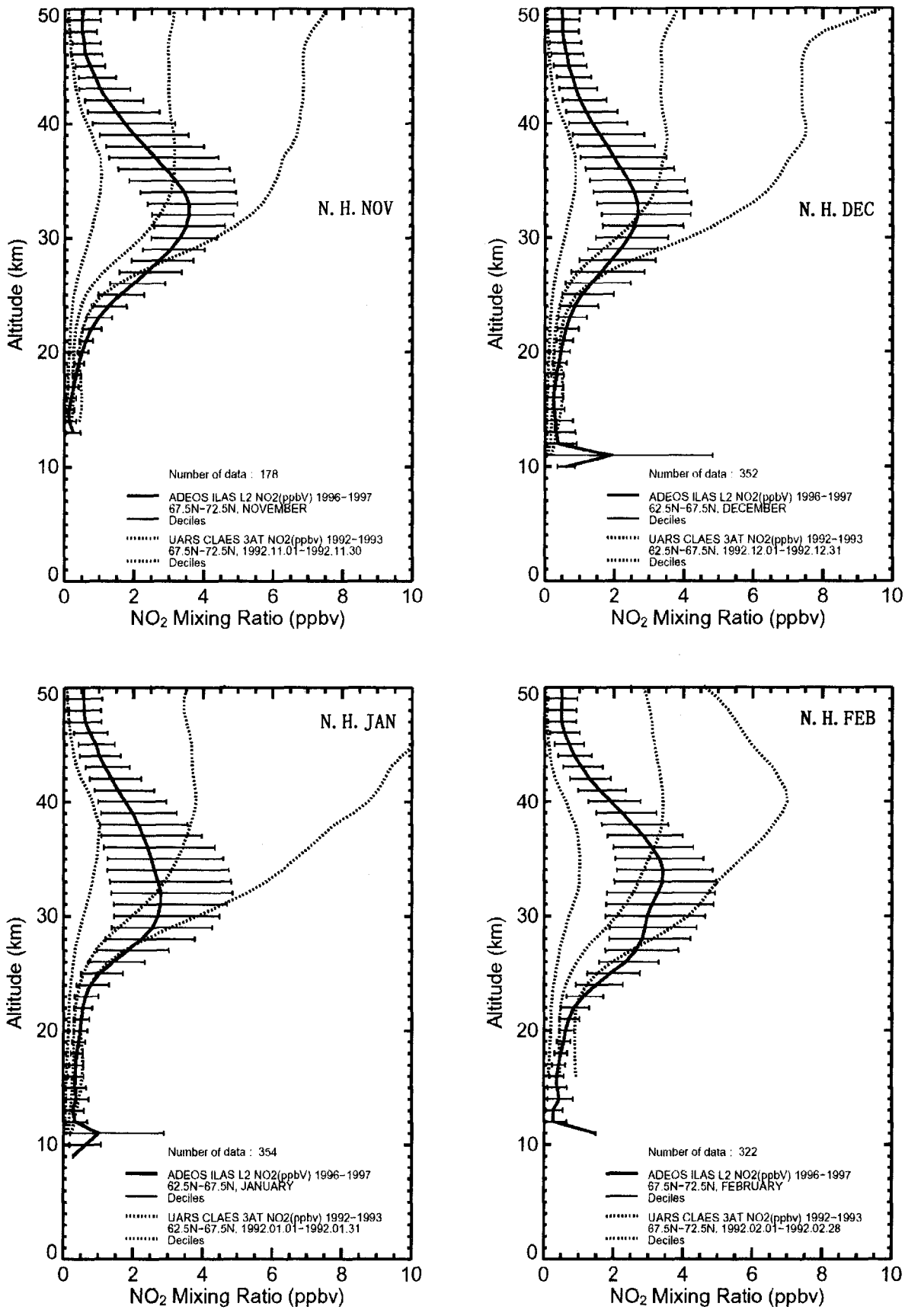


図 5.3(3)　二酸化窒素の月別緯度帯別平均プロファイル（北半球）

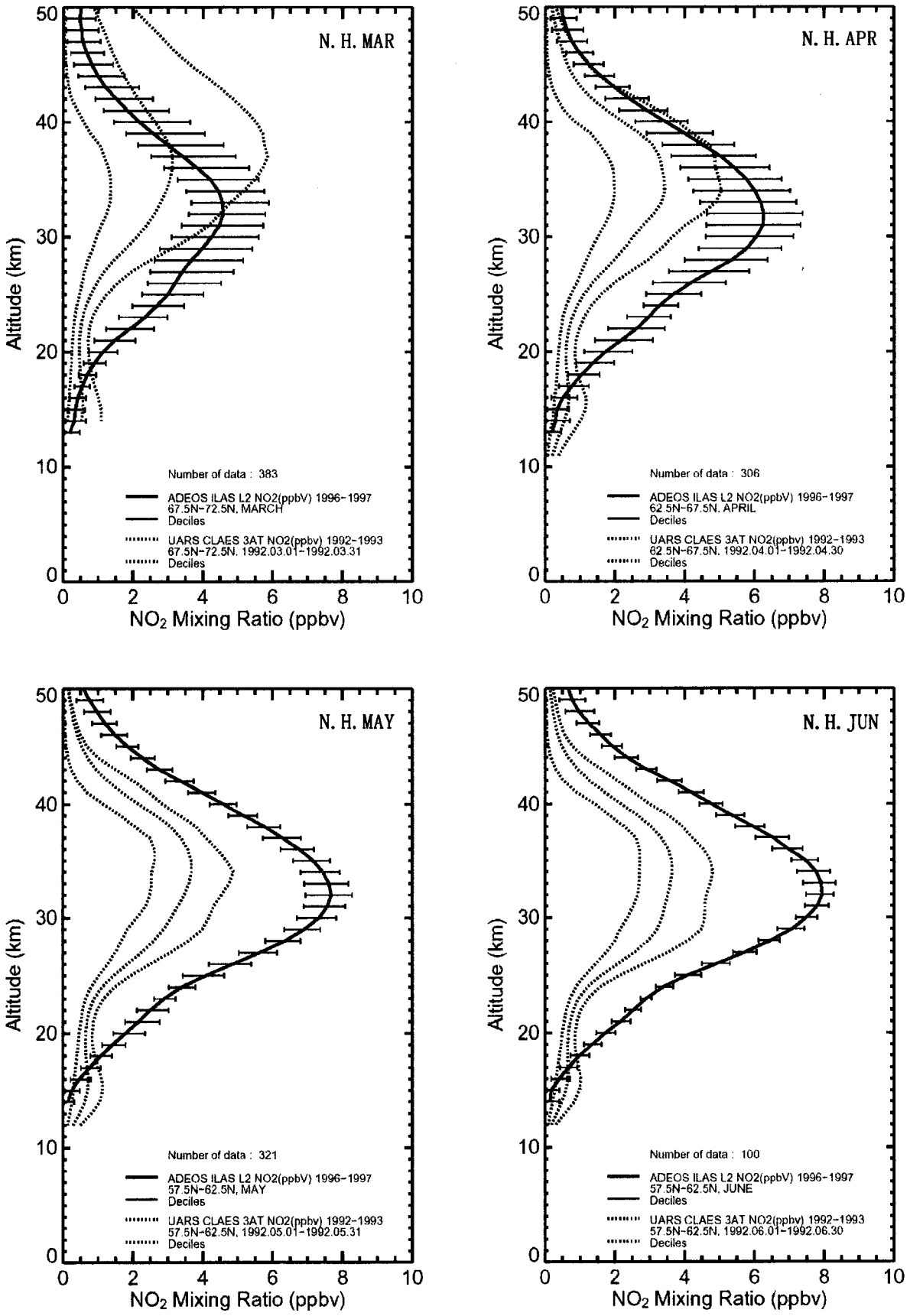


図 5.3(4)　二酸化窒素の月別緯度帯別平均プロファイル（北半球）

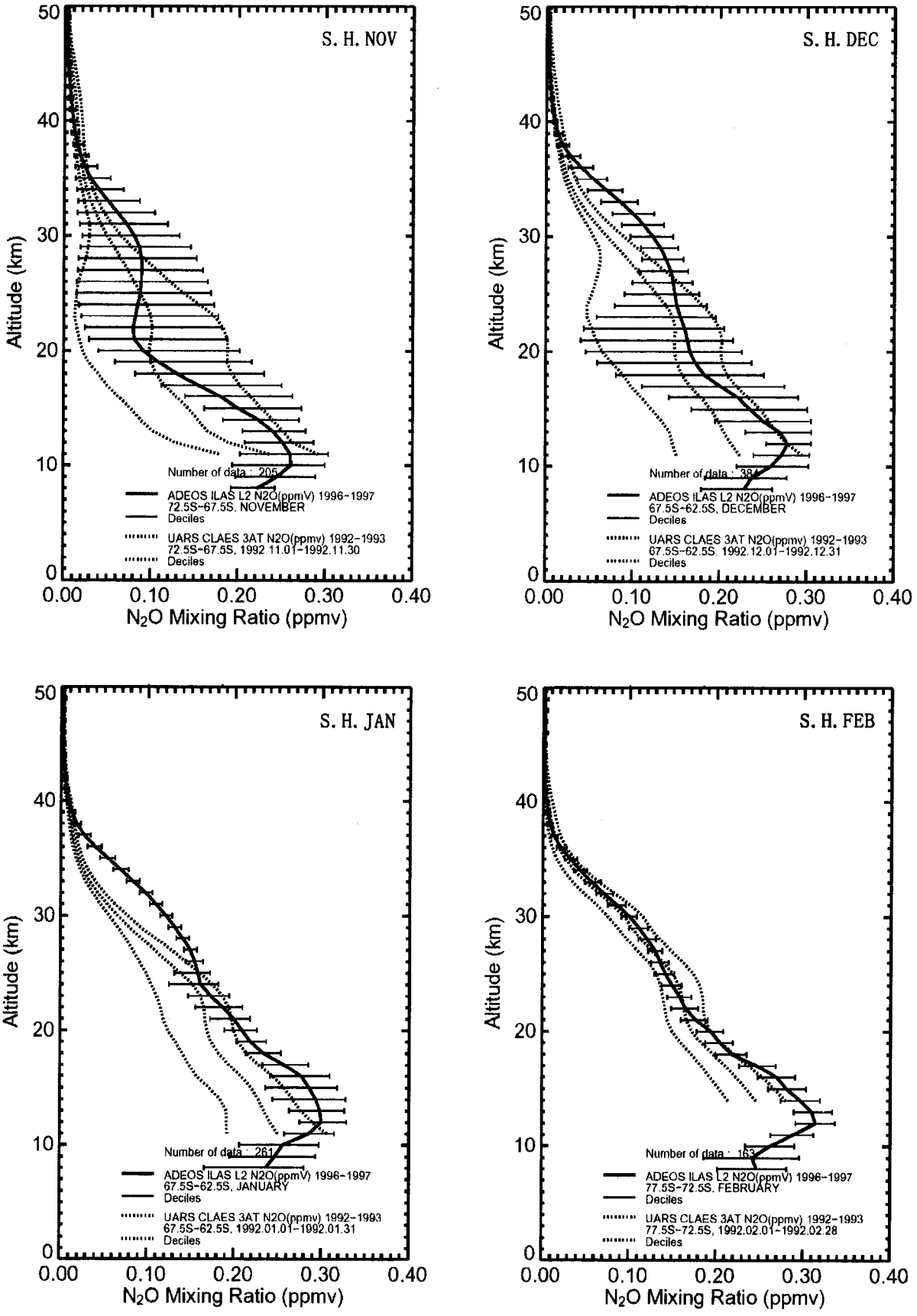


図 5.4(1)　亜酸化窒素の月別緯度帯別平均プロファイル（南半球）

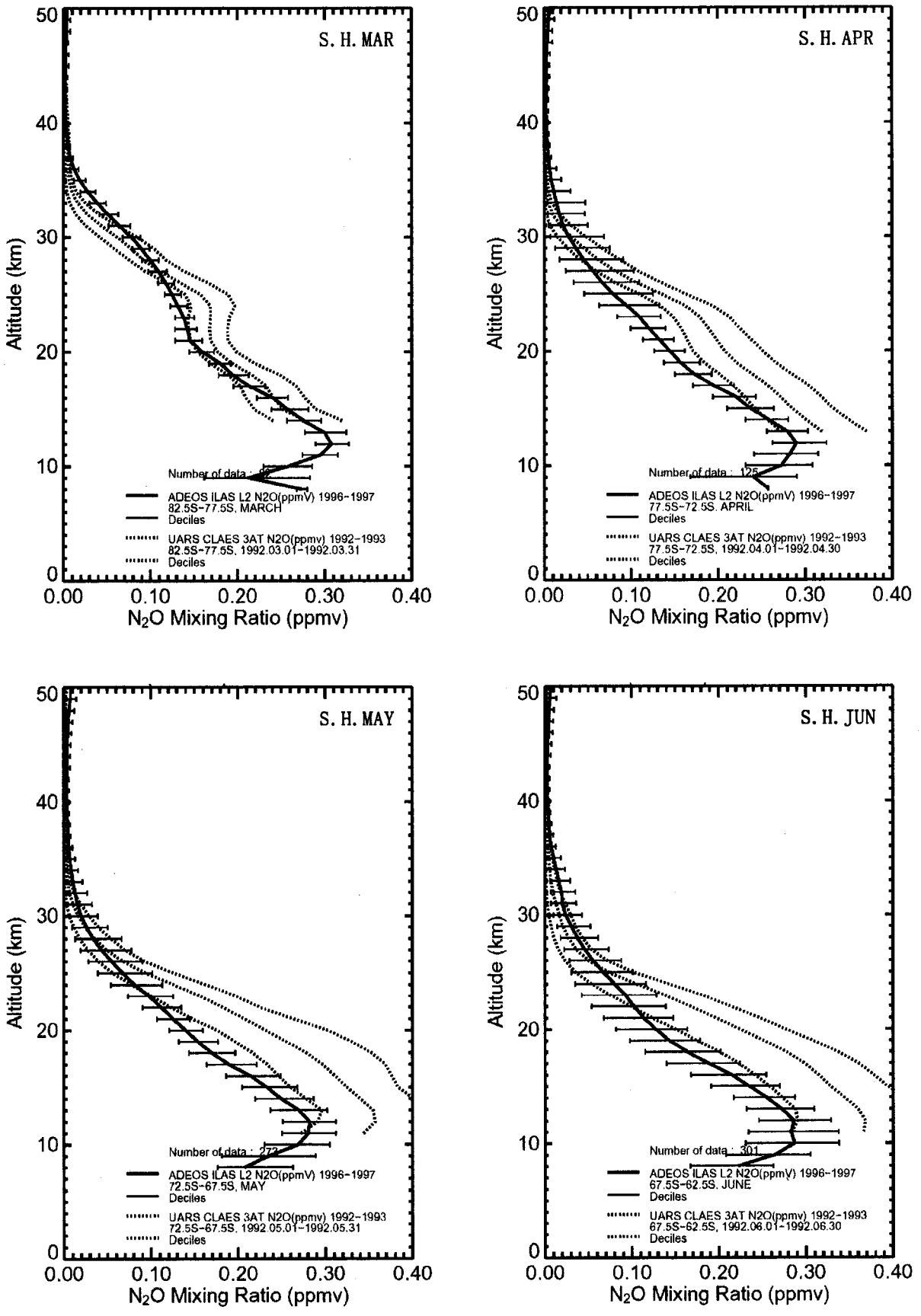


図 5.4 (2)　亜酸化窒素の月別緯度帯別平均プロファイル（南半球）

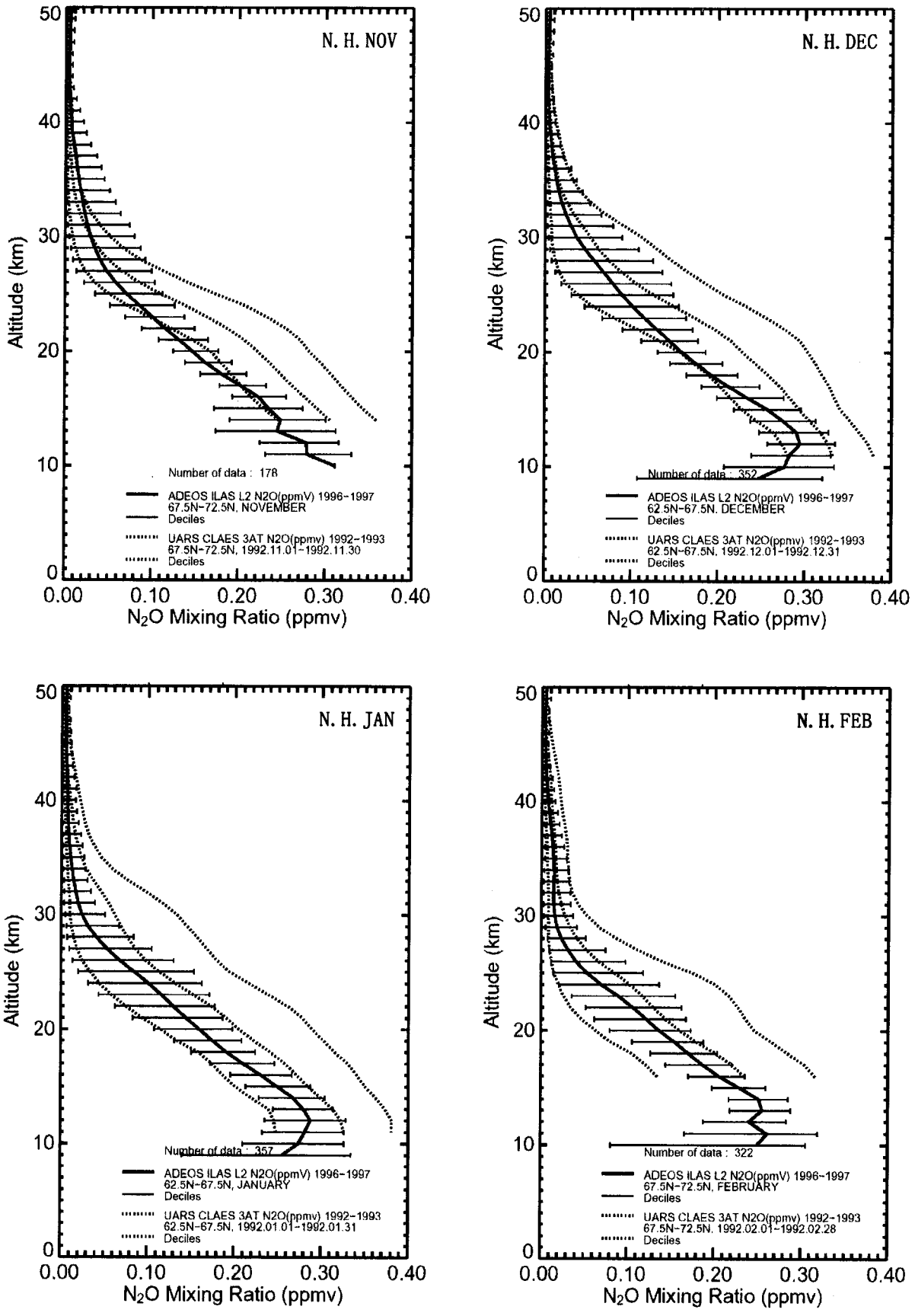


図 5.4(3)　亜酸化窒素の月別緯度帯別平均プロファイル（北半球）

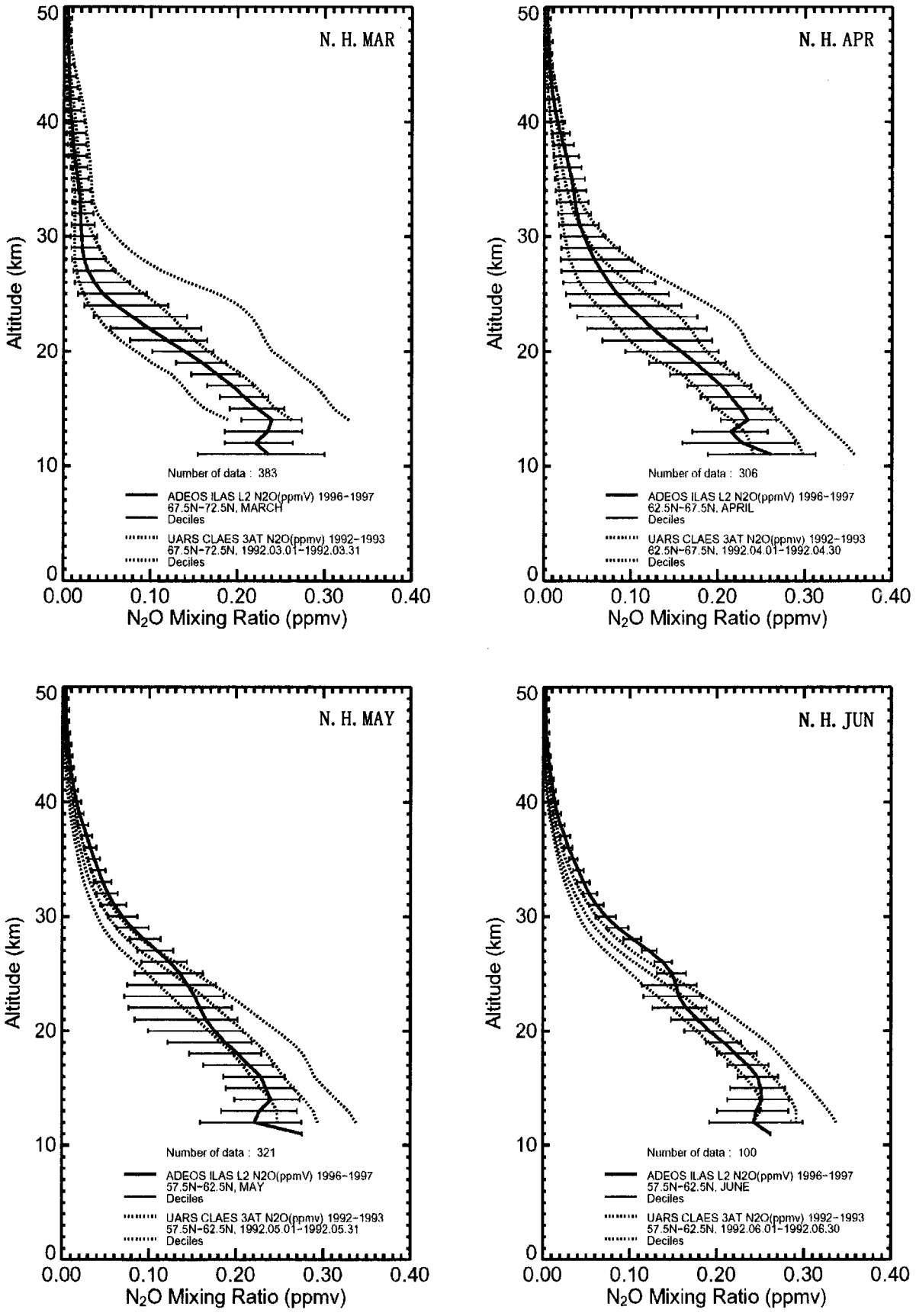


図 5.4(4)　亜酸化窒素の月別緯度帯別平均プロファイル（北半球）

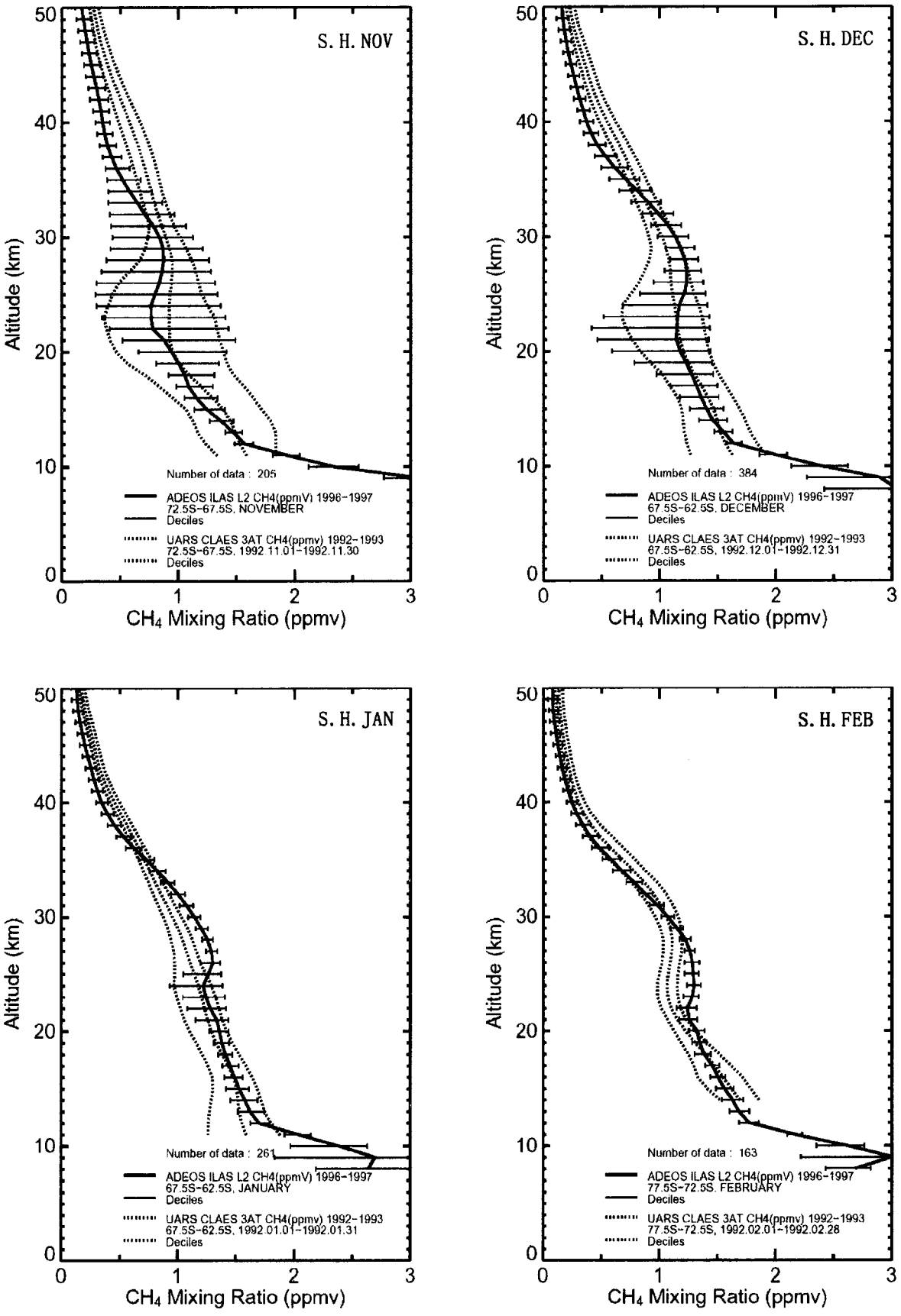


図 5.5(1)　メタンの月別緯度帯別平均プロファイル（南半球）

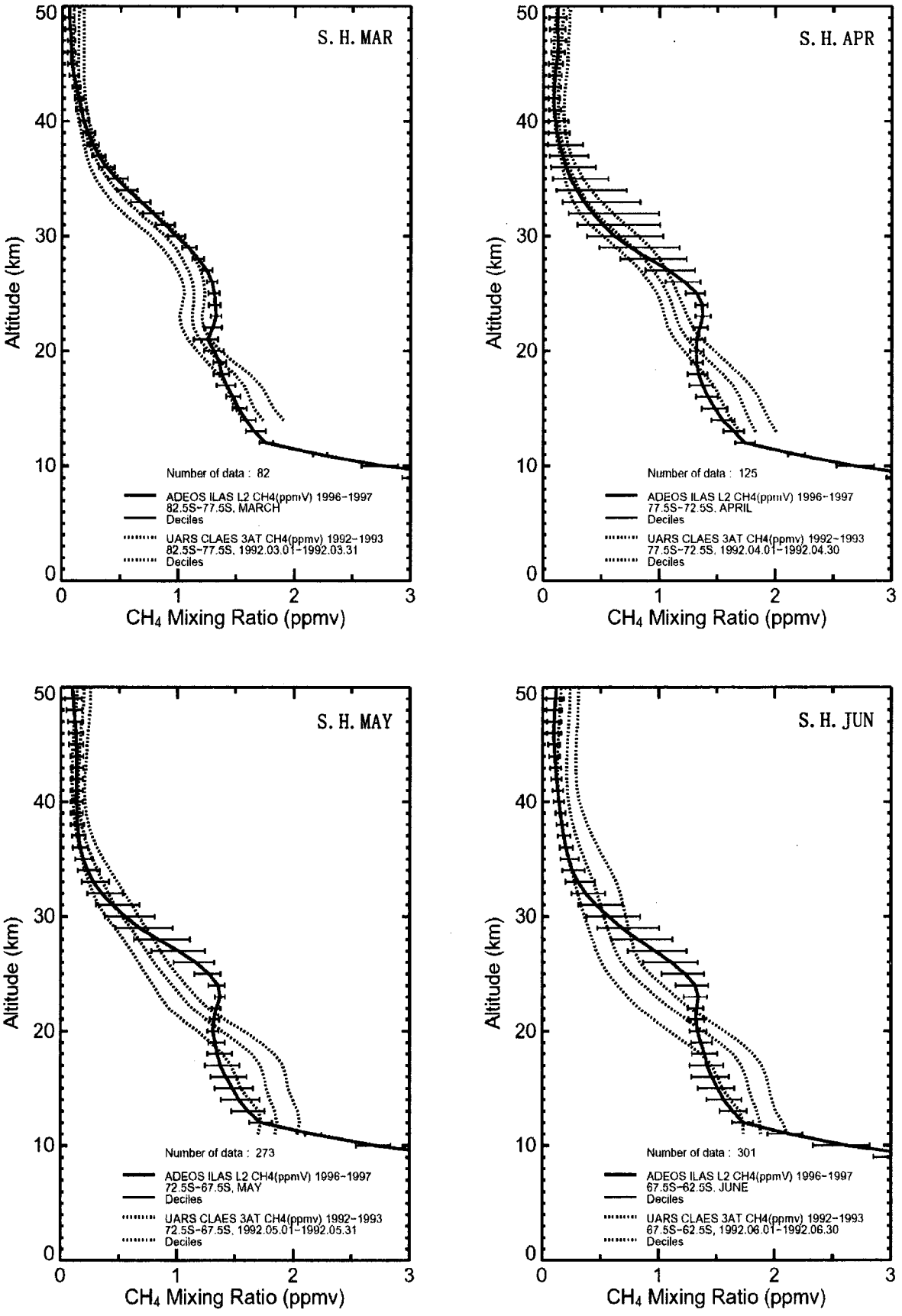


図 5.5(2)　メタンの月別緯度帯別平均プロファイル（南半球）

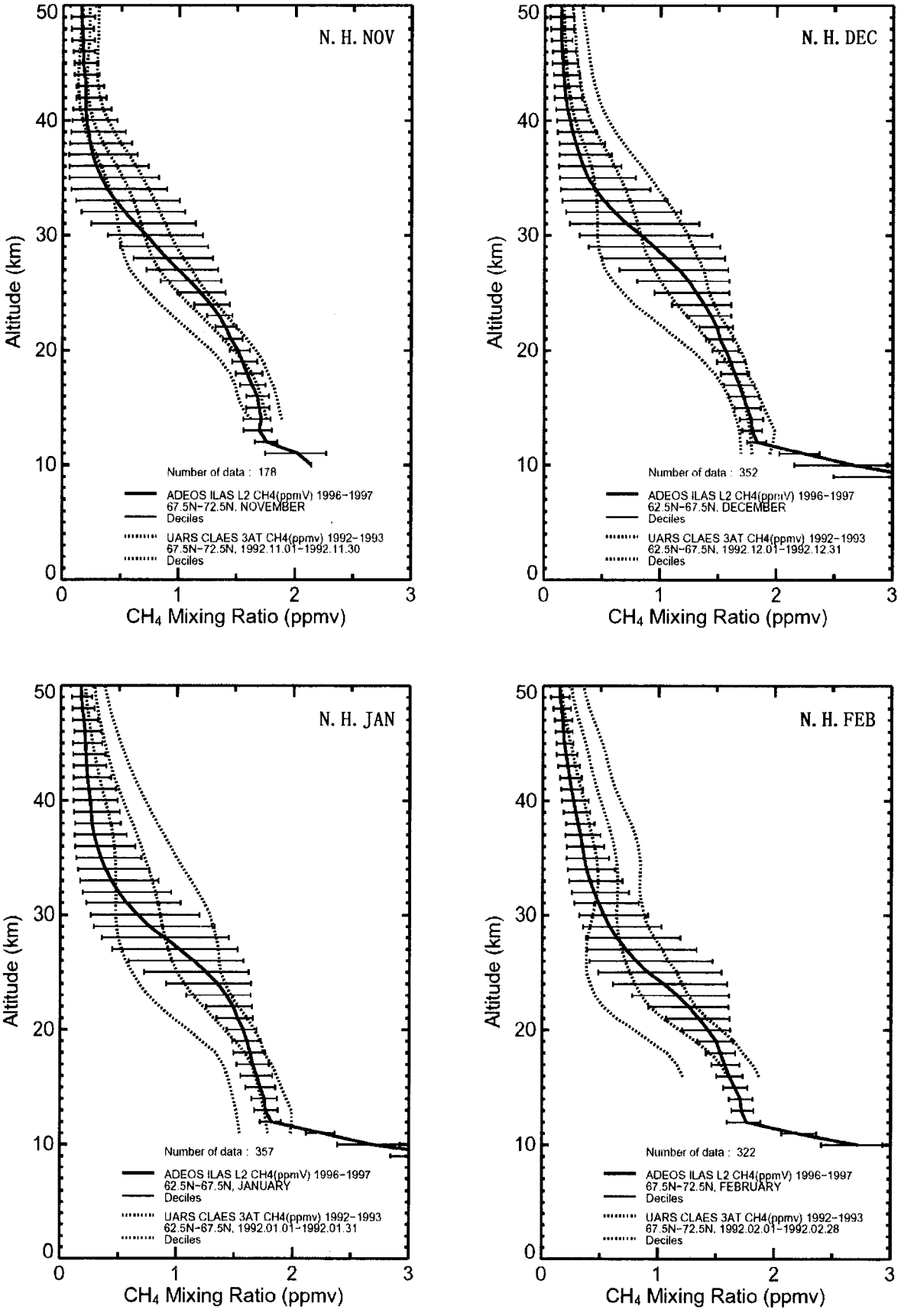


図 5.5(3)　メタンの月別緯度帯別平均プロファイル（北半球）

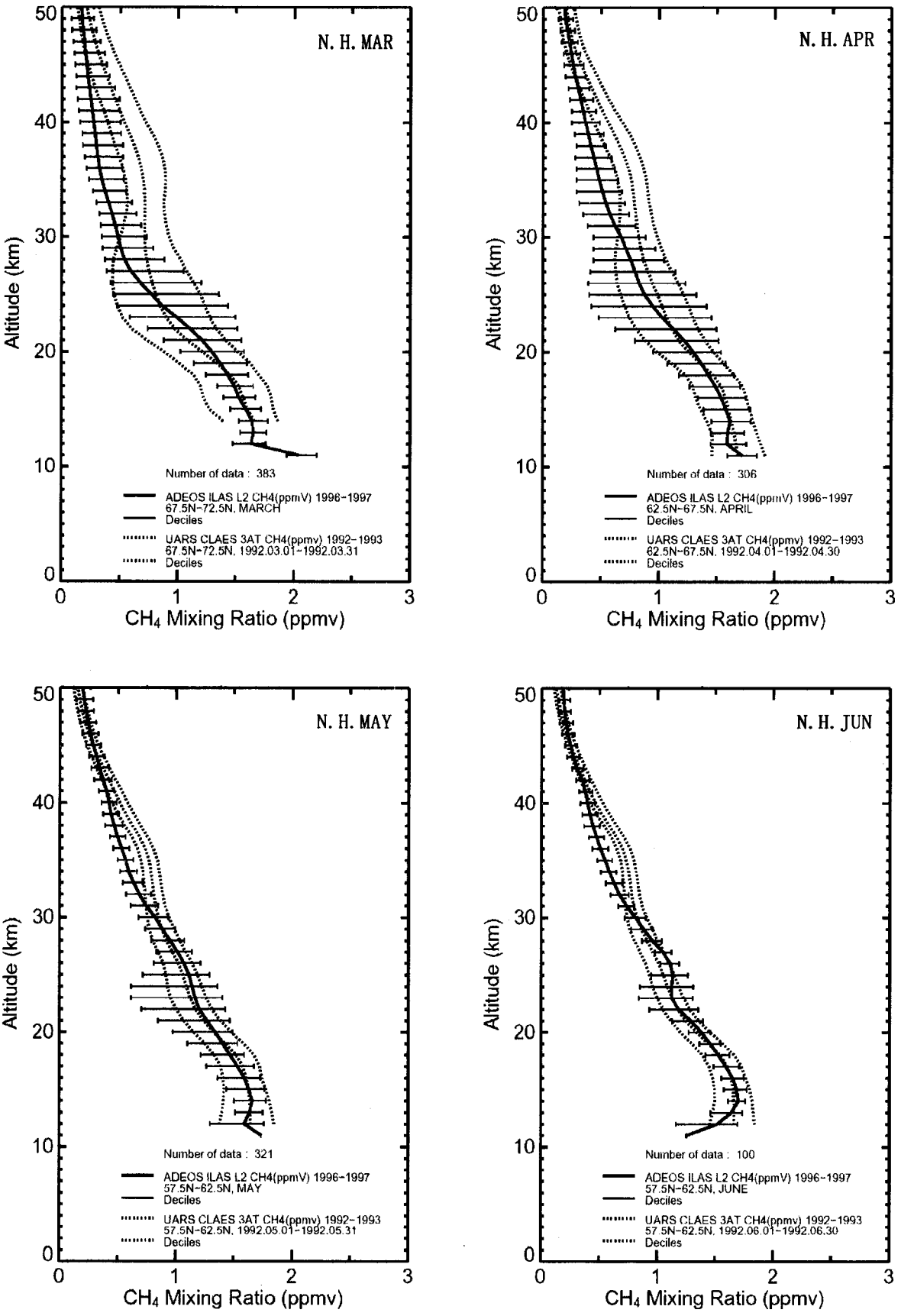


図 5.5(4)　メタンの月別緯度帯別平均プロファイル（北半球）

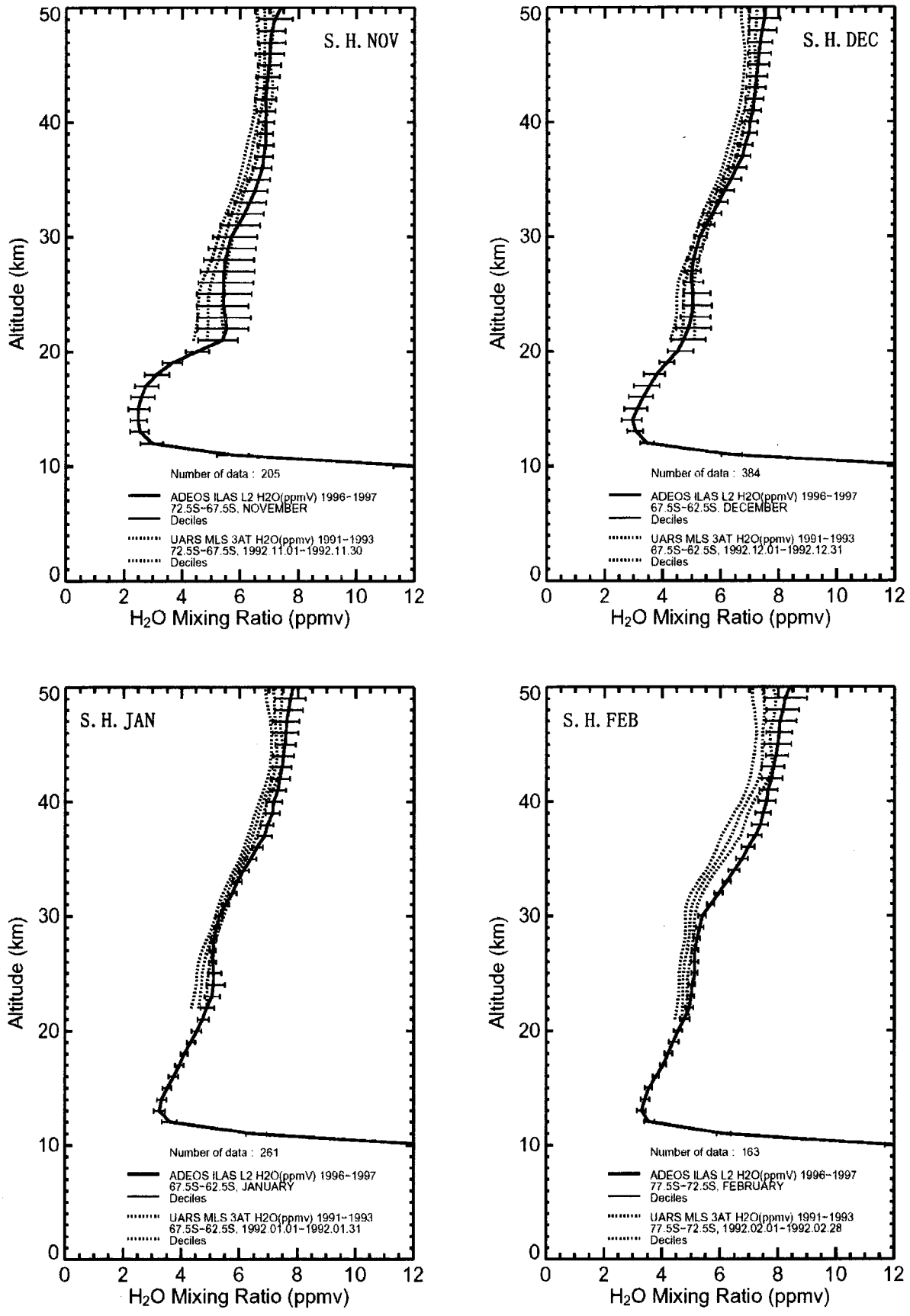


図 5.6(1)　水蒸気の月別緯度帯別平均プロファイル（南半球）

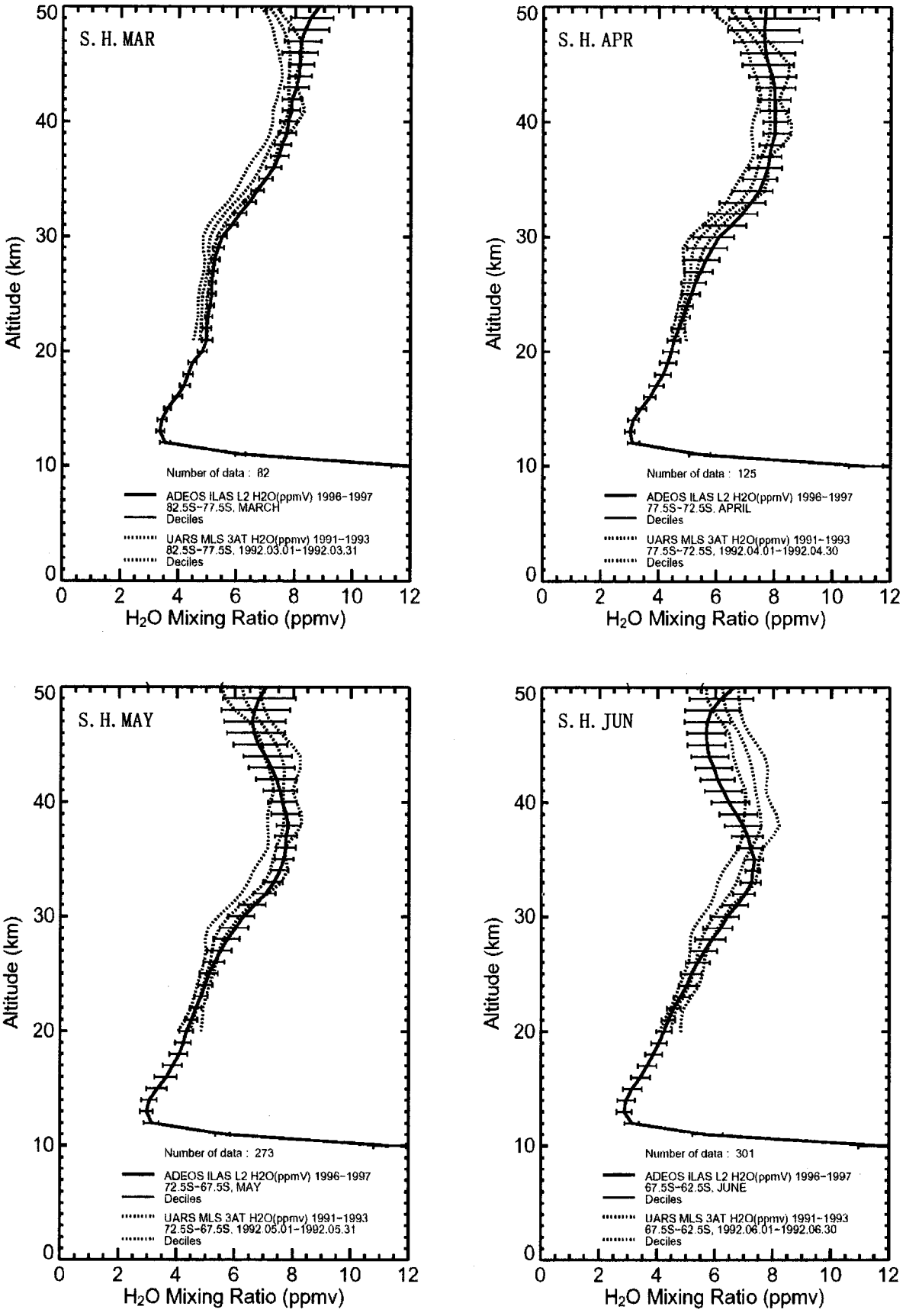


図 5.6(2)　水蒸気の月別緯度帯別平均プロファイル（南半球）

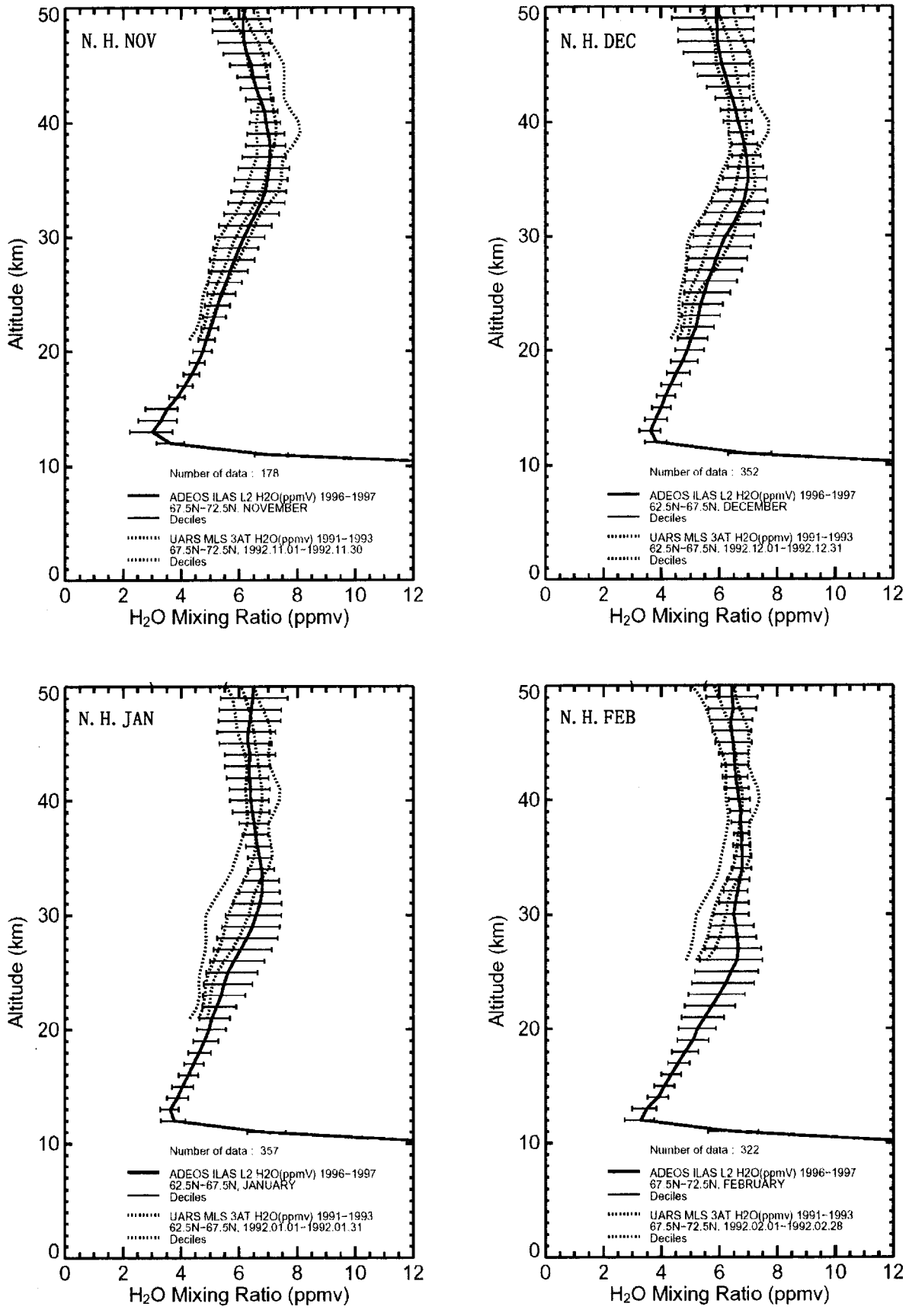


図 5.6(3)　水蒸気の月別緯度帯別平均プロファイル（北半球）

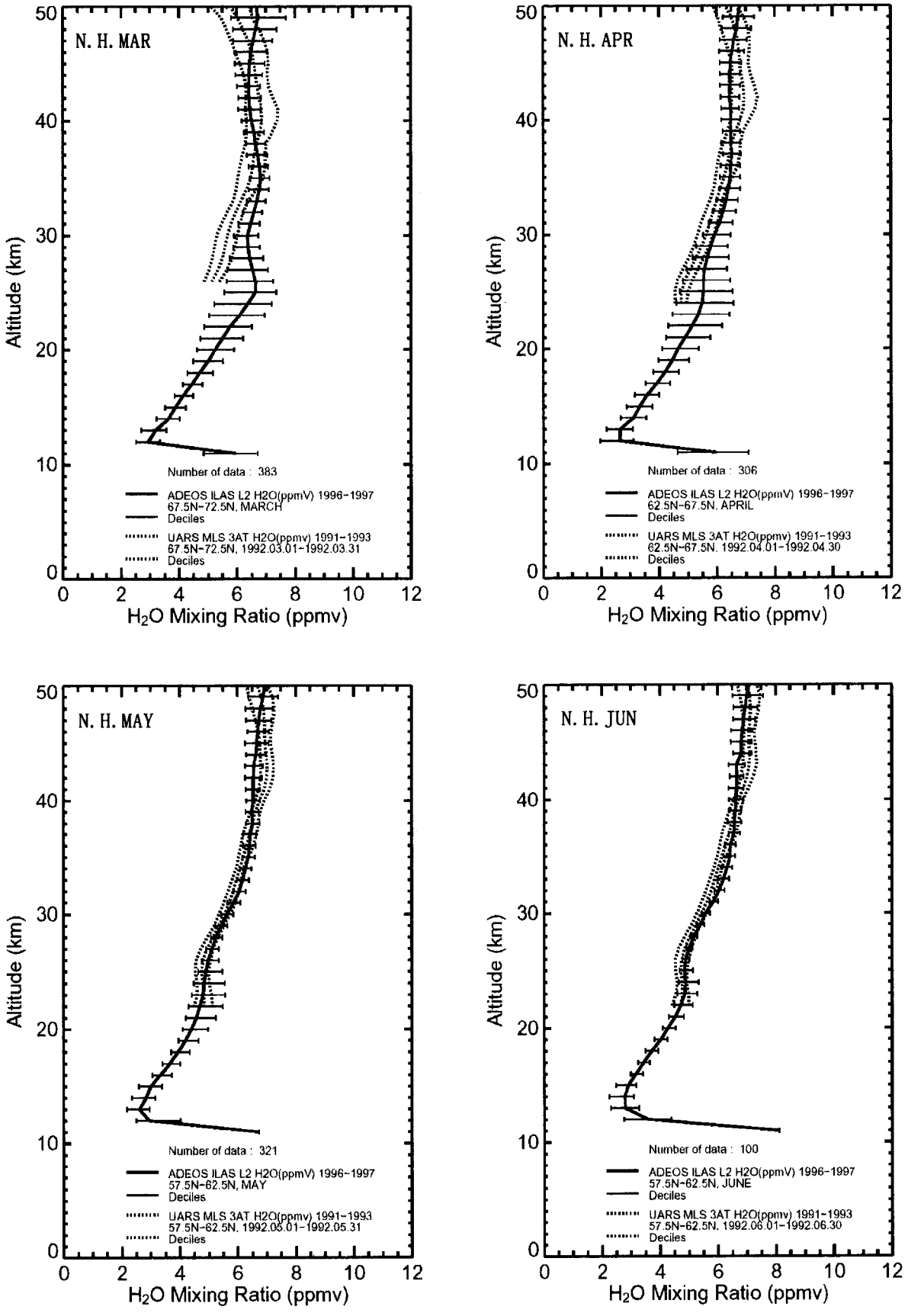


図 5.6(4)　水蒸気の月別緯度帯別平均プロファイル（北半球）

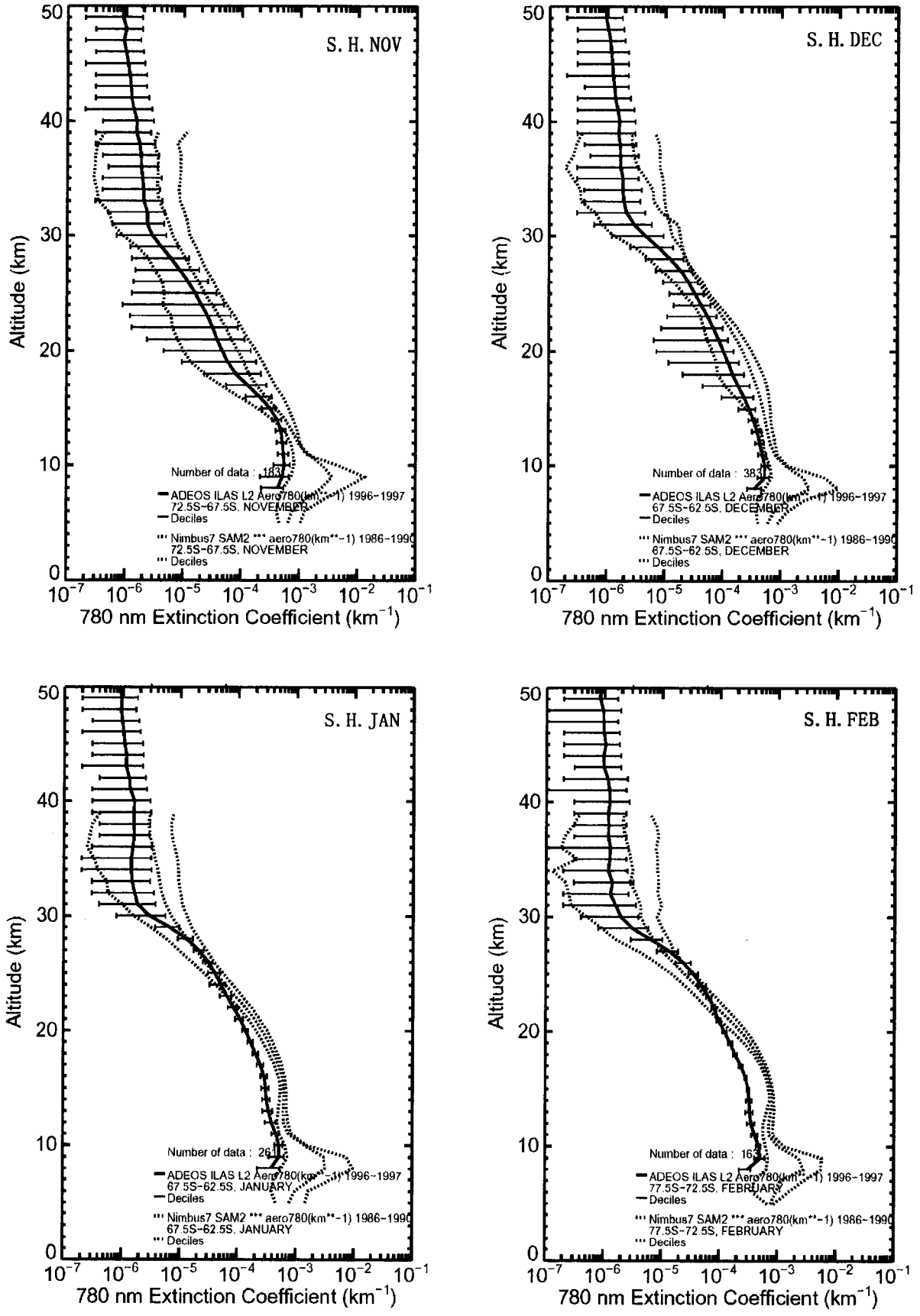


図 5.7(1)　エアロゾル消散係数(780 ㎚)の月別緯度帯別平均プロファイル（南半球）

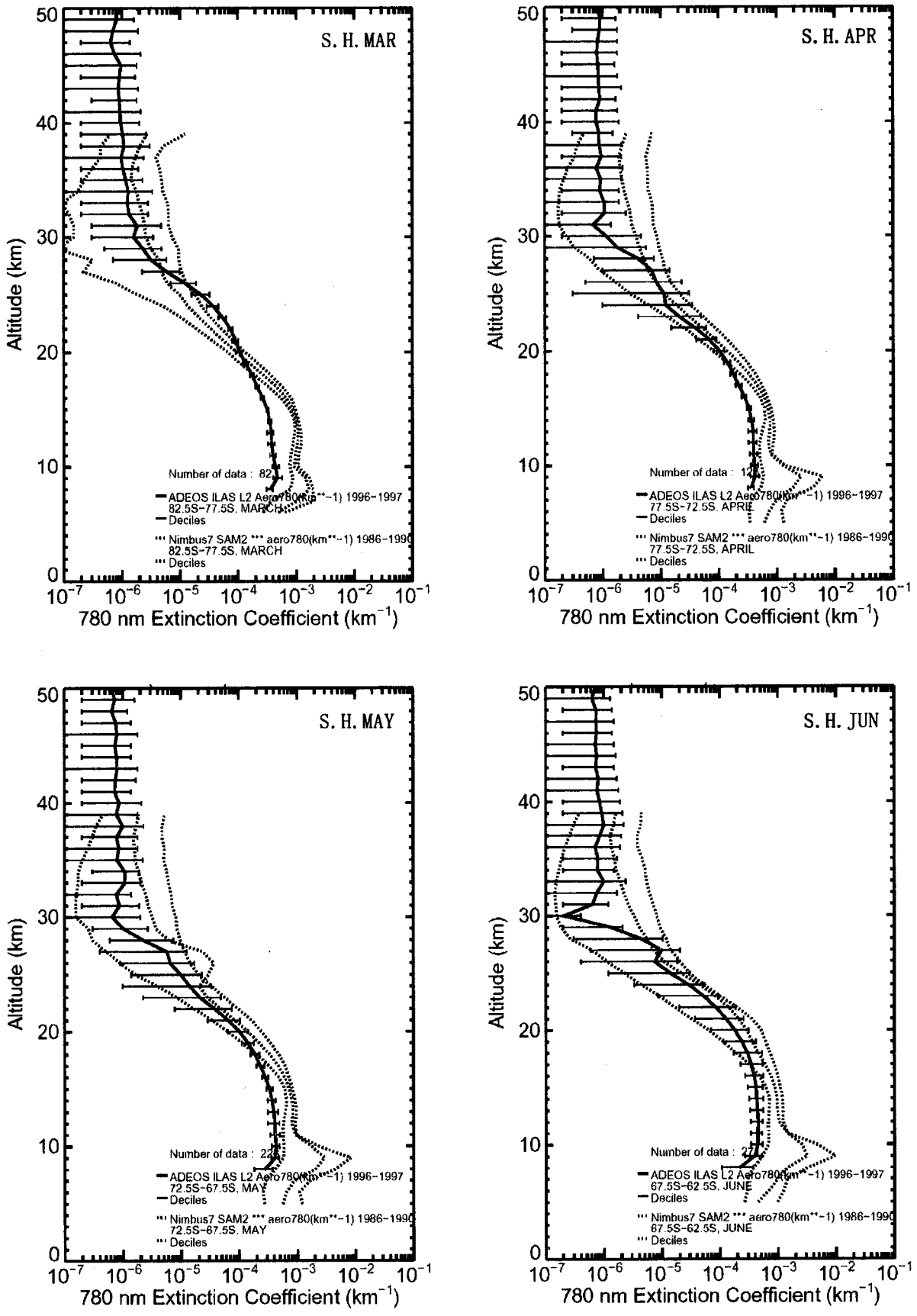


図 5.7(2)　エアロゾル消散係数(780 ㎚)の月別緯度帯別平均プロファイル（南半球）

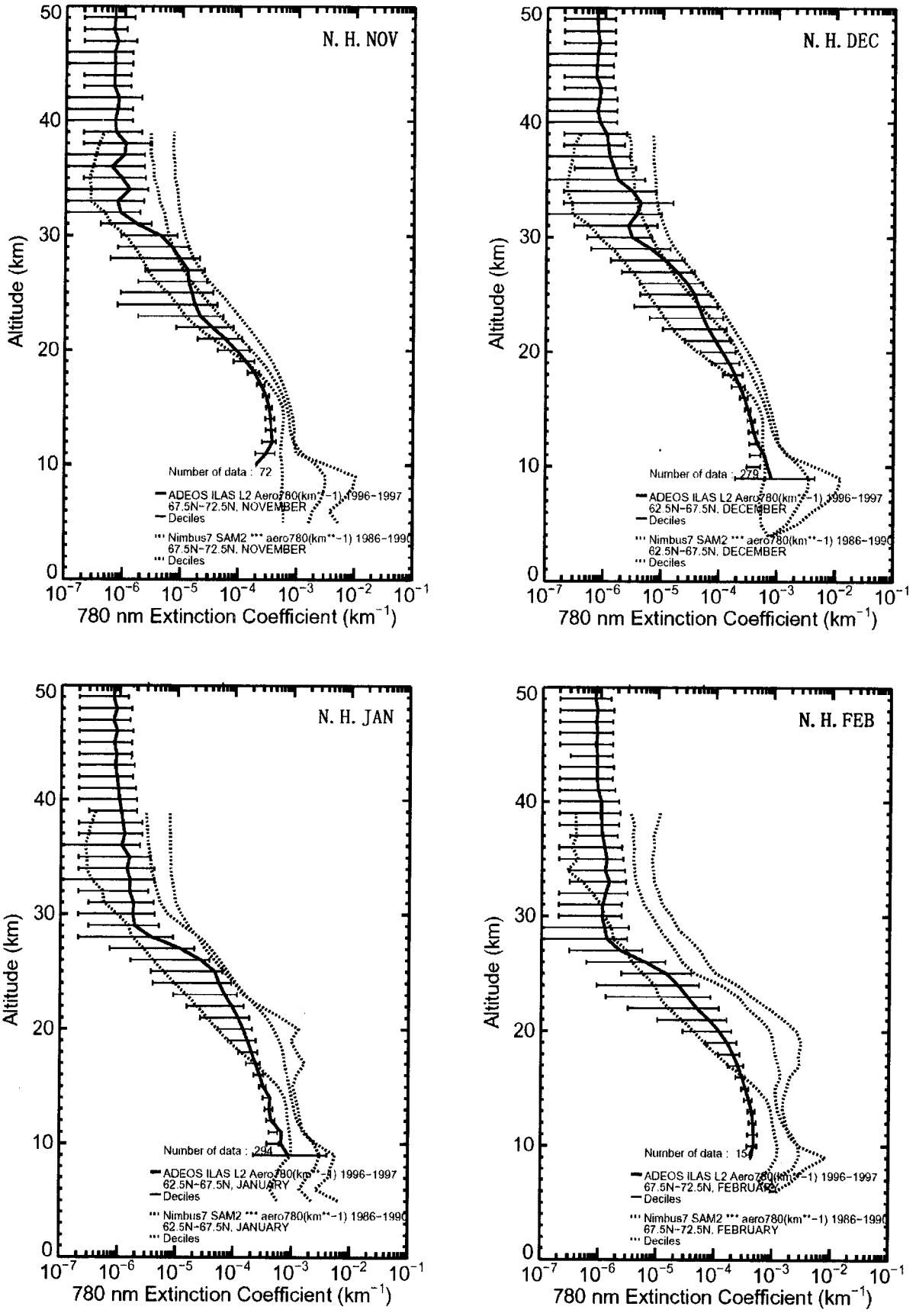


図 5.7(3)　エアロゾル消散係数(780 ㎚)の月別緯度帯別平均プロファイル（北半球）

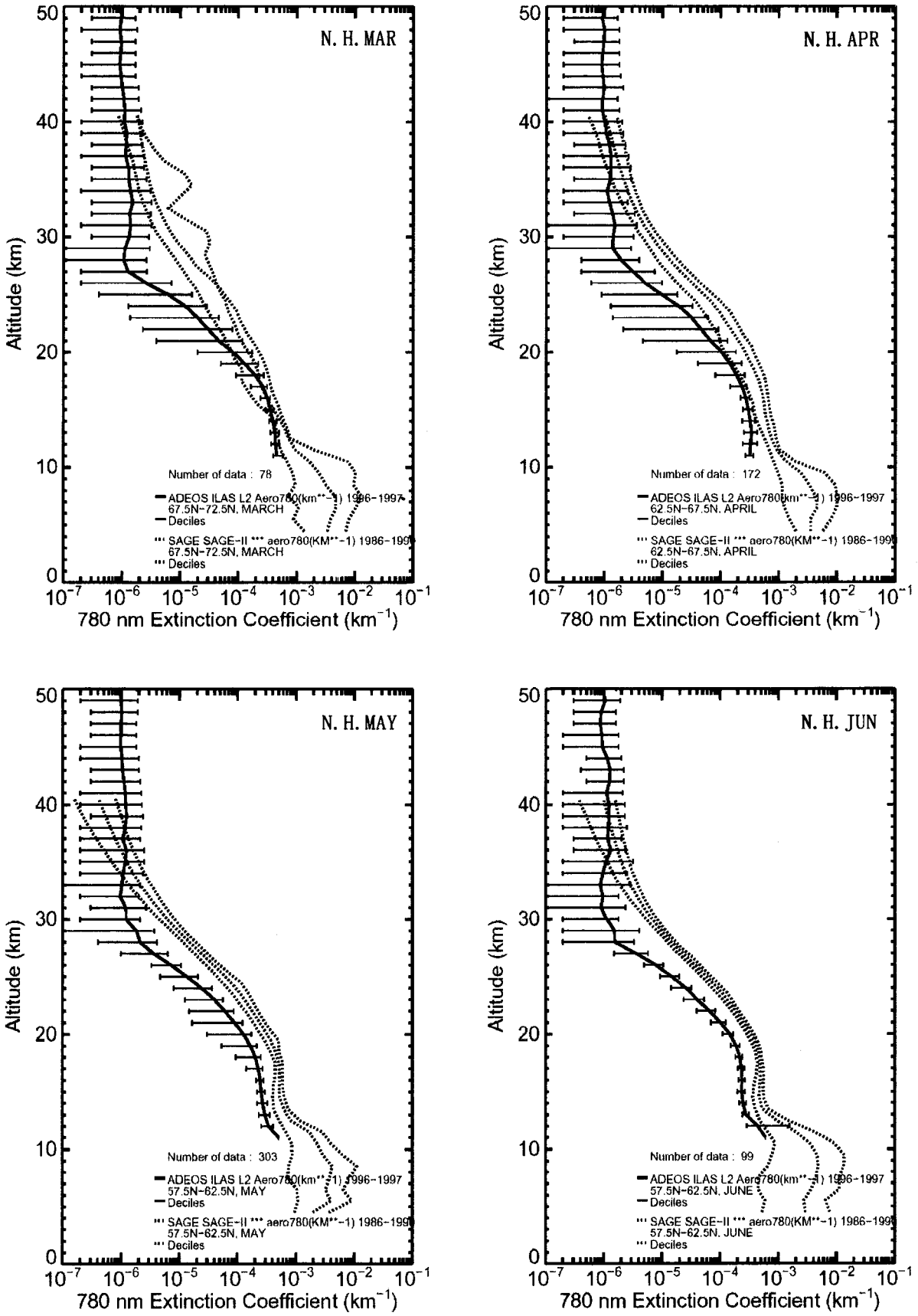


図 5.7(4)　エアロゾル消散係数(780 ㎚)の月別緯度帯別平均プロファイル（北半球）

第6章　ILASプロジェクト関連の研究成果

2001年3月末現在のILASプロジェクトに関連する主な印刷発表を以下に示す。

(1) 衛星オゾン観測などに関する解説、論文

荒木信博, 木村教夫, 茂木勇治, 高橋庄三, 仙福明, 田部哲夫, 森昭寿, 木戸省一, 石垣武夫, 鈴木睦, 笹野泰弘 (1993) : 衛星搭載用オゾン層観測センサ, *National Technical Report*, **39**, 457-465.

Bodeker, G.E., I.S. Boyd and W.A. Matthews (1997) : Long-Term Trends in Tropospheric Ozone Profiles Measured at 45° S, *International Symposium on Atmospheric Chemistry and Future Global Environment*, 51-54.

深堀正志, 青木忠生, 青木輝夫, 鈴木睦, 森山隆, 石田英之, 渡辺猛 (1995) : 近赤外領域におけるメタン、二酸化炭素の吸収線強度の測定, 分光研究, **44**, 187-192.

Hayashida, S., N. Saitoh, M. Horikawa, Y. Amemiya, C. Brogniez, T. Deshler and Y. Sasano (2000) : Stratospheric Background Aerosols and Polar Stratospheric Clouds Observed with Satellite Sensors –Inference of particle composition and sulfate amount-, *Proc. of SPIE*, **4150**,76-86.

樋口聡, 鈴木勝久, 森山智弘, 中島英彰, 近藤豊 (1998) : 陸別・母子里におけるエタン気柱全量の季節変化 (1995-1997), 平成 9 年度第 8 回大気化学シンポジウム研究集会講演集, 98-101.

Jucks, K.W., D.G. Johnson, K.V. Chance, W.A. Traub, J.J. Margitan, G.B. Osterman, R.J. Salawitch and Y. Sasano (1998) : Observations of OH, HO_2, H_2O, and O_3 in the upper stratosphere: Implications for HOx photochemistry, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 3935-3938.

神沢博 (1996) : 衛星データを用いた大気中の物質循環の研究 －ADEOS 及び ADEOS-II 以後－, 衛星による成層圏・対流圏化学の研究に関するワークショップ報告書, 327-342.

神沢博, 山中大学 (1998) : 気象データベース「大気組成変動予測研究に関わる研究の現状と今後の課題－化学天気図の作成を目指して－」, 地球科学技術フォーラム／地球変動研究委員会アジア太平洋大気組成変動予測グループ編（第 9 章）, 47-52.

神沢博 (1998) : 南極観測, 気象化学事典（日本気象学会編）, 東京書籍, 409-411.

神沢博 (1998) : オゾンホール, 流体力学ハンドブック（日本流体力学会編）, 丸善, 1161-1162.

神沢博 (1999) : 人工衛星のオゾン全量データが示す南極オゾンホールのダイナミックな動き、ながれ, 日本流体力学会誌, **18**(3), 131-132.

神沢博 (1999) : オゾンホールの力学、ながれ, 日本流体力学会誌, **18**(3), 147-155.

神沢博, 牧野行雄 (2000) : 北極圏における成層圏化学観測, 日本の地球大気化学研究 1989-1999 －10 年間の統括と今後の研究戦略－, 199-122.

Kanzawa, H and S. Sugata (2000) : Isolation of the polar vortex estimated by the time threshold diagnostics, *SPARC CD-ROM* **No.1**.

Kawashima, T., A. Kuze, S. Mori, M. Suzuki, Y. Sasano, H. Nakajima, M. Chamberland (1999) : Feasibility study for space-borne compact FTS and preliminary test results of laboratory model. *Proc. SPIE*, **3759**, 294-304.

川島高弘, 久世暁彦, 森重隆, 鈴木睦, 笹野泰弘, 中島英彰, 植村暢之, M. Chamberland (1999) : 太陽掩蔽法フーリエ干渉分光計の要素試作試験結果, 第9回大気化学シンポジウム講演集, 79-82.

北和之, 松川茂久, 近藤豊, 小池真, 池田響, 趙永浄, 杉田考史 (1999) : 秋期北部大西洋域における Reactive nitrogen の分布と起源,第9回大気化学シンポジウム講演集, 141-146.

Knudsen, B.M, N. Larsen, I.S. Mikkelsen, J.-J. Morcrette, G.O. Braathen, E. Kyro, H. Fast, H. Gernandt, H. Kanzawa, H. Nakane, V. Dorokhov, V. Yushkov, G. Hansen, M. Gil and R.G. Shearman (1998) : Ozone depletion in and below the Arctic vortex for 1997, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 627-630.

Koike, M., Y. Kondo, H. Ikeda, G.L. Gregory, B.E. Anderson, G. Sachse, D. Blake, S.C. Liu, H.B. Singh, A. Thompson, K. kita, Y. Zhao, T. Sugita, R.E. Shetter and N. Toriyama (2000) : Impact of aircraft emissions on reactive nitrogen over the North Atlantic Flight Corridor region, *J.Geophys.Res..*, **105**, 3665-3677.

Koike, M., Y. Kondo, H. Irie, F. J. Murcray, P. Williams, P. Blatherwick, C. Camy-Peyret, S. Payan, H. Oelhaf, G. Wetzel, W. Traub, D. Johnson, K. Jucks, G. C. Toon, B. Sen, J. -F. Blavier, H. Schlager, H. Ziereis, N. Toriyama, M. Y. Danilin, J. M. Rodoriguez, H. Kanzawa, Y. Sasano (2000) : A comparison of Arctic HNO3 profiles measured by the Limb Atomospheric Spectrometer and balloon-borne sensors., *J. Geophys. Res.*., 105, 6761-6771.

Koike, M., Y. Kondo, H. Ikeda, G.L. Gregory, B.E. Anderson, G.W. Sachse, D.R. Blake, S.C. Liu, H.B. Singh, A. Thompson, K. kita, Y. Zhao, T. Sugita, R.E. Shetter and N. Toriyama (2000) : Impact of aircraft emissions on NOy in the lowermost stratosphere at northern midlatitudes, *J. Geophys. Res.*, **105**, 3665-3677.

小池真, 近藤豊, 趙永浄, 池田響, 北和之、杉田考史 (1999) : SONEX 航空機観測の概要, 第9回大気化学シンポジウム講演集, 137-140.

Kojima, Y., M. Nakajima, T. Moriyama, T. Aoki and M. Suzuki (1994) : Japan's strategy for earth observation by spaceborne infrared instruments, *Proc. Infrared Spaceborne Remote Sensing II*, **2268**, 23-30.

Kondo, Y., M. Koike, A. Engel, U. Schmidt, M. Mueller, T. Sugita, H. Kanzawa, T. Nakazawa, S. Aoki, H. Irie, N. Toriyama, T. Suzuki and Y. Sasano (1999) : NOy-N2O correlation observed inside the Arctic vortex in February 1997 : Dynamical and chemical effects, *J. Geophys. Res.*, **104**(D7), 8215-8224.

Kondo, Y., M. Koike, H. Ikeda, B.E. Anderson, K.E. Brunke, Y. Zhao, K. Kita, T. Sugita, H.B. Singh,

S.C. Liu, A. Thompson, G.L. Gregory, R.E. Shetter, G. Sachse, S.A. Vay, E.V. Browell and M.J. Mahoney (1999) : Impact of aircraft emissions on NOx in the lowermost stratosphere at northern midlatitudes, *Geophys. Res. Lett .*, **26**(20), 3065-3068.

Kondo, Y., H. Irie, M. Koike and G.E. Bodeker (2000) : Denitrification and nitrification in the Arctic stratosphere during the winter of 1996-1997, *Geophys. Res.Lett.,* **27**(3), 337-340.

Kondo, Y., T. Sugita, M. Koike, S.R. Kawa, M.Y. Danilin, J.M. Rodriguez, S. Spreng, K. Golinger and F. Arnold (2000) : Partitioning of reactive nitrogen in the midlatitude lower stratosphere, *J.Geophys.Res.*, **105**(D1), 1417-1424.

森山智宏，鈴木勝久，中島英彰，趙永浄，近藤豊，小池真，樋口聡 (1998) : エタン気柱全量導出時のフィッティング残差のプロファイル依存性, 第 8 回大気化学シンポジウム平成 9 年度研究集会講演集，102-105.

Mukai, S., I. Sano, Y. Sasano, M. Suzuki and T. Yokota (1995) : Optical Properties of stratospheric aerosols, *Adv. Space Res.*, **17**, 64-70.

Murata, I., N. Fukuma, Y. Ohtaki, H. Fukunishi, H. Kanzawa, H. Nakane and K. Shibasaki (1999) : Measurements of O3 and N2O in Alaska with a tunable diode laser heterodyne spectrometer, *Adv. Space Res.*, **24**(12), 1623-1626.

Nakajima, H., X. Liu, I. Murata, Y. Kondo, F. J. Murcray, M. Koike, Y. Zhao and H. Nakane (1998) : Retrieval of height profiles of stratospheric ozone from ground-based infrared solar spectra obtained at Rikubetsu, Japan, *Proceedings of 18th Quadrennial Ozone Symposium*, **2**, 955-958.

中島英彰，横田達也，飯田隼人，笹野泰弘 (1999) : UARS データに基づく大気微量成分統計量データベースの作成，天気，**46**(9), 55-60.

中村邦雄 (1995) : 赤外計測によるオゾンセンサ，次世代センサ, **5**, 6-10.

Oltmans, S.J., K.H. Rosenlof, H. Kanzawa, et al., (2000) : Chapter 2 Data Quality, *SPARC Assessment of Upper Tropospheric and Stratospheric Water Vapour*, 93-193.

Remsberg, E.E., C. Schiller, H. Kanzawa., et al. (2000) : Chapter 1 Instrumentation and Data Sets, *SPARC Assessment of Upper Tropospheric and Stratospheric Water Vapour*,10-92.

笹野泰弘編 (1992) : 衛星からの大気観測データの利用に関するワークショップ講演記録集, F-41-'92.

笹野泰弘編 (1993) : 衛星からの大気観測データの利用に関するワークショップ（第２回）講演記録集, F-53-'93

笹野泰弘，鈴木睦，横田達也，古田直紀 (1993) : 大気微量成分の高精度観測に関する研究，平成 4 年度地球環境遠隔探査技術等の研究 －研究成果集－, 14-22.

笹野泰弘，安岡善文 (1993) : 宇宙からの地球環境モニタリング －衛星リモートセンシング－, PETROTECH（社）石油学会, **16**, 592-597.

笹野泰弘 (1994) : 人工衛星からオゾン層を監視する, *SCIENCE & TECHNONEWS TSUKUBA*, **31**, 20-21.

笹野泰弘 (1994)：人工衛星によるオゾン層のリモートセンシング，計装，**37**, 57-61.

笹野泰弘 (1994)：オゾン層破壊,地球環境経済論「上」,67-92，慶應義塾大学経済学部環境プロジェクト，慶應通信株式会社, 257pp.

笹野泰弘 (1995)：人工衛星からオゾン層を観測する，化学工学，**59**, 423-424.

笹野泰弘，横田達也，中根英昭，杉本伸夫 (1996)：オゾン層変動解明のための大気センサー複合利用技術の開発，マイクロ波センサデータ利用等によるリモートセンシング高度化のための基盤技術開発（第 1 期）成果報告書 (科学技術庁編, 264pp), 66-73.

笹野泰弘 (1996) : 3. 進行中の観測計画，宇宙からの地球大気化学観測, 77-82.

笹野泰弘，鈴木睦，神沢博 (1996)：太陽掩蔽法赤外センサーによるオゾン層化学関連物質と温室効果気体の観測，衛星による成層圏・対流圏化学の研究に関するワークショップ報告書 (地球環境観測委員会 ATMOS-CI チーム, 264pp), 71-80.

Sasano, Y., K. Asai, N. Sugimoto, Y. Kawamura, K. Tatsumi and T. Imai (1998) : NASDA Mission Demonstration Satellite Lidar Project and its sciences, *Proceedings of SPIE*, **3504**, ??-??.

Sasano, Y., T. Yokota, H. Nakane and N. Sugimoto (1998) : Development of multiple satellite sensor data utilization technique and its application to ozone layer studies, *Reports on Basic Researches on Technology Development for Advanced Remote Sensing Using Microwave Sensor Data*, 67-78.

笹野泰弘 (1998)：人工衛星からのオゾン層の観測，電気評論, 56-57.

笹野泰弘，横田達也，中根英昭，杉本伸夫 (1998)：大気センサー・データ複合利用技術の高度化とオゾン層変動解明への適用性実証の研究，マイクロ波センサデータ利用等によるリモートセンシング高度化のための基盤技術開発（第 1 期平成 7 年度～平成 8 年度）成果報告書, 67-78，科学技術庁研究開発局, 317pp.

笹野泰弘(2000)：衛星による大気環境観測に何を期待するか，新しい地球環境学第 13 章, 267-284.

Schulz, A., M. Rex, J. Steger, N. R. P. Harris, G. O. Braathen, E. Reimer, R. Alfier, A. Beck, M. Alpers, J. Cisneros, H. Claude, H. DeBacker, H. Dier, V. Dorokhov, H. Fast, S. Godin, G. Hansen, H. Kanzawa, B. Kois, Y. Kondo, E. Kosmidis, E. Kyro, Z. Litynska, M. J. Molyneux, G. Murphy, H. Nakane, C. Parrondo, F. Ravegnani, C. Varotsos, C. Vialle, P. Viatte, V. Yushkov, C. Zerefos and P. von der Gathen (2000) : Match observations in the Arctic winter 1996/97 : High stratospheric ozone loss rates correlate with low temperatures deep inside the polar vortex, *Geophys. Res. Lett.*, **27**(2), 205-208.

柴崎和夫，小川利紘，笹野泰弘，杉本伸夫，鈴木勝久 (1997) : ADEOS(みどり）衛星による大気観測，大気圏シンポジウム第 11 回平成 8 年度, 101-104.

菅田誠，神沢博 (1998) : Time threshold Lagrangian diagnostics を用いたトレーサー輸送解析，JEM/SMILES サイエンスワークショップ報告書，67-68.

Sugita, T., Y. Kondo, H. Nakajima, U. Schmidt, A. Engel, H. Oelhaf, G. Wetzel, M. Koike and P. A. Newman (1998) : Denitrification observed inside the Arctic vortex in February 1995, *J. Geophys.*

Res., **103**(D13), 16221-16223.

Sugita, T., Y. Kondo, T. Deshler, M. Koike, N. Kanada, N. Toriyama, H. Nakajima and R. Imasu (1999) : Balloon-borne optical counter for in situ aerosol measurements, *J. Atmos. Chem.*, **32**, 183-204.

鈴木睦 (1994) : Comparison of fast calculation codes for Voigt function, *CGER'S SUPER-COMPUTER ACTIVITY REPORT 1992*, **1**, 71-75.

鈴木睦, 笹野泰弘, 横田達也, 古田直紀 (1994) : アレー検出器型回析格子分光計を用いた大気微量成分の高精度観測に関する研究, 平成 5 年度地球環境遠隔探査技術等の研究 －成果報告書－, 15-23.

鈴木睦, 笹野泰弘, 横田達也, 神沢博 (1995) : アレー検出器型回折格子分光計を用いた大気微量成分の高精度観測に関する研究,地球環境遠隔探査技術等の研究平成 6 年度成果報告書, 20-29.

鈴木睦 (1996) : データシステムについて, 宇宙からの地球大気化学観測 (地球環境観測委成層圏・対流圏化学サイエンスチーム編), 204-209.

鈴木睦 (1996) : 搭載プラットフォームについて, 宇宙からの地球大気化学観測 (地球環境観測委成層圏・対流圏化学サイエンスチーム編), 169-183.

Suzuki, M. and Y. Sasano (1997) : Stratospheric and tropospheric trace species measurements by a solar occultation sensor, *Proc. of the Tsukuba International Workshop on Stratospheric Change and Its Role in Climate and on the ATMOS-C1 Satellite Mission*, 69-76.

内野修, 神沢博, 小寺邦彦, 永井智宏, 廣田道夫, 牧野行雄 (1998) : 成層圏変動とその気候に及ぼす影響に関するつくば国際ワークショップの報告, 天気, **45**(7), 553-558.

横田達也 (1995) : 大気成分の鉛直分布センサ, アドバンスセンサハンドブック, 9-14. 高橋清, 佐々木昭夫編, 培風館, 763pp.

横田達也 (1995) : 地球環境計測とリモートセンシング, ESTRELA ('95 3 月号), 9-14.

Yokota, T., T. Sugita, H. Nakajima and Y. Sasano (2000) : Study on data retrieval for the SOFIS aboard GCOM-A1, ASSFTS9, 58-60.

(2) ILAS プロジェクトの出版物

Kanzawa, H. ed. (1996): ILAS & RIS Data handling Facility USAGE GUIDE (Version 1.0), F-104-'97/NIES.

Kanzawa, H. ed. (1996): ILAS & RIS 衛星データ処理運用処理施設利用の手引き, F-103-'97/NIES.

Kanzawa, H. ed. (1997): ILAS Correlative Measurements Plan, NIES Technical Report, F-105-'97/NIES, 178pp.

笹野泰弘編 (1996) : ILAS ユーザーズハンドブック第 1.0 版, 国立環境研究所,F-101-'97/NIES.

Sasano, Y. ed. (1997) : ILAS User's Handbook (Version1.0), F-102-'97.

笹野泰弘, 杉本伸夫編 (1998) : 平成 9 年度 ILAS/RIS プロジェクト報告.
笹野泰弘編 (1999) : 平成 10 年度 ILAS プロジェクト報告.
笹野泰弘編 (2000) : 平成 11 年度 ILAS プロジェクト報告.
Yokota, T. and J.H. Park (1991) : Spectral Transmittance Simulation for the ILAS, Spectral Transmittance Simulation for the ILAS, F-35-'91/NIES.

(3) ILAS および ILAS プロジェクトに関する報告、講演記録、論文

① ILAS および ILAS プロジェクトに関する報告

神沢博 (1996) : 衛星搭載オゾン層観測センサーILAS 初データ取得, 地球環境研究センターニュース, vol.7, No.6, 1-5.
中島英彰, 笹野泰弘 (1999) : ILAS によるオゾン層科学への貢献, 可視化情報, **19**, 57-60.
笹野泰弘 (1993) : ADEOS 衛星を利用する大気微量成分観測のための ILAS/RIS プロジェクト, 天気, **40**, 42-45.
笹野泰弘 (1993) : 改良型大気周縁分光計(ILAS)による高層大気環境の観測, 日本リモートセンシング学会誌, **13**, 73-77.
笹野泰弘 (1995) : ILAS (Improved Limb Atmospheric Spectrometer), 天気, **42**, 49-50.
笹野泰弘 (1996) : 人工衛星から地球大気環境の変動を監視する －オゾン層の衛星観測と ILAS プロジェクト－, 化学と工業, **49**, 671-672.
笹野泰弘 (1998) : 「衛星からの大気環境監視」－改良型大気周縁赤外分光計による成層圏オゾン層の観測－, 分光研究, **47**, 253-267.
笹野泰弘, 塩谷雅人, 中根英昭, 神沢博, 鈴木睦, 林田佐智子 (1998) : ILAS 検証実験・解析に関するパリ会議に出席して, 天気, **45**, 279-285.
笹野泰弘 (1999) : 改良型大気周縁赤外分光計 (ILAS) データ処理運用とデータ利用研究, かんきょう, **24**(6), 40-41.
鈴木睦, 横田達也, 笹野泰弘 (1994) : ADEOS ILAS の概要, 電子情報通信学会技術研究報告書, **93**, 59-66.
鈴木睦 (1996) : ADEOS 衛星搭載センサーILAS の校正について, 計測と制御, **35**, 669-674.

② proceedings など

Bodeker, G.E., H. Nakajima, M. Koike, Y. Kondo, K. Kreher, M. Suzuki, T. Yokota, H. Kanzawa and Y. Sasano (1997) : Nitric acid profile measurements by ILAS during the Arctic winter of 1996/1997, *Polar stratospheric ozone 1997*, 415-418.
Dubovik, O.V., T. Nakajima, T. Yokota and Y. Sasano (1996) : Development of Global Inversion Algorithm for ADEOS/ILAS Spectrometer, *IRS'96:Current Problems in Atmospheric, Radiation, Smith and Stamnes (Eds)*, 541-544.
Hauchecorne, A., F. Fierli and H. Kanzawa (1998) : Validation of ILAS data on polar stratospheric

clouds using RMR ALOMAR lidar, Air Pollution Report 66 : Polar Stratospheric Ozone 1997, 665-668.

Hayashida, S., N. Saitoh, K. Uesugi, R. Nakagawa, A. Tanaka, T. Yokota, M. Suzuki, H. Kanzawa and Y. Sasano (1998) : Polar Stratospheric Cloud Occurrence Observed with Improved Limb Atmospheric Spectrometer over the Arctic in the Winter of 1996/1997 and Comparison with Total Ozone Mapping Spectrometer Board on ADEOS, 平成 9 年度第 8 回大気化学シンポジウム研究集会講演集, 166-169.

林田佐智子, 斎藤尚子, 堀川真理子, 濱村翠, 笹野泰弘 (2000) : ILAS で観測された 1997 年北極 PSC の解析—1.硝酸との対応に注目して, 第 10 回大気化学シンポジウム講演集, 1-4.

石川喜徳, 長谷部文雄, 杉田考史, 横田達也, 笹野泰弘 (2000) : POLARIS データを用いた ILAS(Ver.4.20)データの検証, 1997 年春から夏にかけての微量気体成分の相互関係, 第 10 回大気化学シンポジウム講演集, 40-41.

Kanzawa, H., Y. Kondo, C. Camy-Peyret and Y. Sasano (1995) : Balloon campaigns at Kiruna -Esrange planned in ILAS correlative measurements program, *Proc. 12th ESA Symp. Rocket & Balloon Programmes & Related Res.*, ESA-SP370, 345-349.

神沢博, 近藤豊, 中澤高清, 本田秀之, 矢島信之 (1996) : キルナにおける ILAS 検証気球キャンペーンについて, 大気球シンポジウム 平成 7 年度, 37-40.

Kanzawa, H., C. Camy-Payret, Y. Kondo and N. Papineau (1997) : Implementation and first scientific results of the ILAS Validation Balloon Campaign at Kiruna-Esrange in February-March 1997, *Proc. 13th ESA Symp. Eur. Rocket & Balloon Programmes & Relat. Res.*, ESA SP-397, 211-215.

Kanzawa, H., M. Shiotani, M. Suzuki, T. Yokota and Y. Sasano (1997) : Structure of the polar vortex of the Northern Hemisphere winter of 1996/1997 as observed from long-lived tracer data of ILAS, *Proc. Tsukuba International Workshop on Stratospheric Change and Its Role in Climate and on the ATMOS-C1 Satellite Mission (Tsukuba, 20-22 October 1997)*, 158-162.

Kanzawa, H., M. Suzuki, T. Yokota, Y. Sasano and M. Shiotani (1998) : Analysis of the Polar Vortex Structure Using Long-lived Tracer Data of ILAS, 第 8 回大気化学シンポジウム研究集会講演集, 160-165.

Kanzawa, H., M. Suzuki, T. Yokota, and Y. Sasano (1998) : Behavior of the polar vortex of the northern hemisphere winter of 1996/1997 as observed from ILAS, *Air Pollution Report 66: Polar Stratospheric Ozone 1997,* N.R.P. Harris, I. Kilbane-Dawe, G. T. Amanatidis Eds, 459-462.

神沢博 (1998) : 衛星センサーILAS による北極成層圏の観測（日本気象学会 1997 年度秋季大会シンポジウム「北極圏の大気循環と物質循環」の報告 4, 天気, **45**, 770-772.

Kanzawa, H. (1999) : Validation experiment activities in ILAS and ILAS-II, *Proc. International Workshop on Submillimeter-wave Observation of Earth's Atmosphere from Space,* 199-205.

Kuze, A., M. Suzuki, K. Nakamura, J. Tanji and Y. Sasano (1998) : Design and performance of

ILAS-II echelle grating spectrometer for ClONO2 measurement, *Proceedings of SPIE*, **3437**, 240-248.

神沢博，笹野泰弘，横田達也，中島英彰，鈴木睦，塩谷雅人 (1999) : ILAS 長寿命トレーサーデータ質の評価とその解析，第 9 回大気化学シンポジウム講演集, 51-53.

Murata, I., N. Fukuma, Y. Ohtaki, H. Fukunishi, H. Kanzawa, H. Nakane and K. Shibasaki (1998) : The validation experiments for ILAS with a tunable diode laser heterodyne spectrometer, *Proceedings Atmospheric Chemistry Symposium*, 189-192.

Nakajima, T., Y. Sasano, M. Suzuki (1993) : Visible Remote Sensing Algorithms the Improved Limb Atmospheric Spectrometer Aboard ADEOS Satellite, *Current Problems in Atmospheric Radiation*, 383-385.

Nakajima, H., Y. Kondo, M. Koike, Y. Zhao, P. Thomas, A. Meier, A. Steen, X. Liu and F. J. Murcray (1998) : Validation of ILAS O3 and HNO3 data using ground-based FTIR measurement at Kiruna, *Proceedings of 3rd ADEOS Symposium / Workshop and 13th ILAS Science Meeting*, 287-299.

Nakajima, H and Y. Sasano (1999) : ILAS validation status and some preliminary analysis on the 1997 spring arctic ozone depletion observed by ILAS, *Proc. International Workshop on the Arctic Atmosphere Observation*, 155-160.

Nakajima, H., Y. Sasano, H. Kanzawa, H. Nakane, H. Gernandt, V. Yushkov, V. Drokhov and T. Deshler (1998) : ILAS ozone validation with correlative ozonesonde measurements, *Proceedings of 2nd ILAS Paris Meeting*, 137-160.

Nakajima, H., Y. Sasano, T. Yokota and H. Kanzawa (1999) : Measurements of stratospheric trace constituents by Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) on board the ADEOS satellite, Fourier Transform Spectroscopy : *New Methods and Applications,* 19-21.

Nakajima, H., Y. Sasano, T. Yokota, H. Kanzawa and M. Suzuki (1999) : Measurements of stratospheric trace constituents by Improved limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) on board the ADEOS satellite, *Proc. Optical Remote Sensing of the Atmosphere*, 19-21.

中島英彰，笹野泰弘，神沢博，中根英昭，二宮真理子(1999) : ILAS で測定された極渦内でのオゾン減少について，第 9 回大気化学シンポジウム講演集，54.

中島英彰，笹野泰弘(1999) : ILAS-II 後継機開発へ向けて，第 9 回大気化学シンポジウム講演集，19-22.

中島英彰，F. Lefevre，横田達也，笹野泰弘 (2000) : REPROBUS モデルと ILAS 観測の比較による，1997 年冬季北極域での PCS 生成と脱窒過程について，第 10 回大気化学シンポジウム講演集，52-56.

Nakajima, H., A. Kuze, T. Sugita, T. Yokota and Y. Sasano (2000) : Solar-Occultation FTS for Inclined-orbit Satellite (SOFIS), Scientific requirements and current status of development, *Proc. of SPIE,* **4150**, 165-173.

Nakajima, H., Y. Terao, T. Sugita and Y. Sasano (2000) : Current Status of ILAS- II (Improved Limb

Atmospheric Spectrometer-Ⅱ) Onboard the ADEOS-Ⅱ Satellite to be Launched in 2001, and Results from ILAS Measurements on Ozone Depletion in 1996/1997 Winter in the Northern Hemisphere, Proceeding of SOLVE. *THESEO 2000 SCIENCE MEETING*, 75-76.

Nakane, H. and Y. Sasano (1998) : Arctic Ozone Depletion in Spring 1997 Revealed by ILAS, *The Third ADEOS Symposium/ Workshop and The 13th ILAS Science Team Meeting*, 13-22.

Oelhaf, H., H. Fischer, G. Wetzel, M. Stowasser, F. Friedl-Vallon, G. Maucher, O. Trieschmann, R. Ruhnke and Y. Sasano (1998) : Intercomparison of ILAS/ADEOS with MIPAS-B measurements in late March 1997, *Proceedings of SPIE*, **3501**, 92-99.

Oelhaf, H., M. Stowasser, R. Ruhnke, F. Friedl-Vallon, A. Kleinert, W. Kuker, M. Suzuki, T. Yokota, H. Kanzawa and Y. Sasano (1997) : Intercomparison of ILAS Target Species with Vertical Profiles Obtained by MIPAS-B in late March 1997, *Polar stratospheric ozone 1997*, 716-719.

Okamoto, H., Y. Sasano, S. Mukai, I. Sano, H. Ishihara, T. Matsumoto, L. Thomason and M. Pitts (1998) : ADEOS/ILAS Aerosol Retrieval Algorithm with 5 channels, *Adv. Space Res.*, **21**, 443-446.

Pitts, M.C., L.W. Thomason, Y. Sasano and H. Okamoto (1996) : Determination of polar stratospheric cloud properties utilizing observations from the Improved Limb Atmospheric Spectrometer, *1st. SPARC Gen. Assem.*, 206.

齋藤尚子，林田佐智子，香川晶子，中島英彰、笹野泰弘 (1999) : ILAS による 1996/97 年冬期北極域 PSC の解析－流跡線解析による気温ヒストリーに着目して－、第 9 回大気化学シンポジウム講演集，55-58.

齋藤尚子，林田佐智子，笹野泰弘 (2000) : ILAS で観測された 1997 年北極域 PSC の解析 2 —気温との対応に着目して—，第 10 回大気化学シンポジウム講演集, 48-51.

笹野泰弘 (1992) : ILAS による成層圏化学環境の観測，第三回大気化学シンポジウム講演集, 115-117.

Sasano, Y., M. Suzuki and T. Yokota (1993) : Stratospheric trace gas measurements with Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) for ADEOS satellite, Optics for protection of man and Environment against Natural and technological Disasters, 43-48. Gert von Bally, Hans. I. Bjelkhagen, ELSEVIER.

笹野泰弘，神沢博，鈴木睦，横田達也 (1994) : ILAS/ADEOS による成層圏オゾン層観測プロジェクト －地上検証とデータ利用計画－，大気圏シンポジウム第8回平成5年度 (宇宙科学研究所), 48-51.

Sasano, Y. (1995) : Stratospheric ozone monitoring from space: ILAS (Improved Limb Atmospheric Spectrometer) Project, *NASDA EA MITI The first ADEOS Symp./ Workshop*, **1**, 55-69.

Sasano, Y., M. Suzuki, T. Yokota and H. Kanzawa (1996) : Improved limb atmospheric spectrometer (ILAS) project: ILAS instrument, performance and validation plan, *Proc. Europe ser. Adv. Next-Generation Satellite*, **2583**, 193-216.

Sasano, Y., H. Kanzawa, M. Suzuki and T. Yokota (1996) : Preliminary results of ILAS (Improved Limb Atmospheric for stratospheric ozone layer, *1st. SPARC Gen. Assem.*,114.

笹野泰弘, 神沢博 (1996) : ILAS/ILAS-II プロジェクト状況報告, 第 6 回大気化学シンポジウム講演集, 117-120.

笹野泰弘, 横田達也 (1996) : 衛星搭載センサーILAS によるオゾン層の変動, 第 22 回リモートセンシングシンポジウム.

Sasano, Y. and N. Sugimoto (1997) : Atmospheric trace species measurements by ILAS and RIS, *IGARSS '97 Proceedings*, **IV**, 2078-2081.

Sasano, Y. and T. Yokota (1997) : ILAS observation of high latitude stratospheric ozone layer, *Proceedings of International Workshop on the Arctic Atmospheric Environment*, 65-82.

Sasano, Y. (1997) : ILAS Project Report, *The Second ADEOS Symposium /Workshop*, 307-352.

Sasano, Y., H. Kanzawa, T. Yokota and M. Suzuki (1997) : Overview of ILAS measurements for the northern high latitude stratosphere in 1996/1997 winter, *Polar Stratospheric Ozone 1997*, 486-489.

Sasano, Y., H. Kanzawa, M. Suzuki and T. Yokota (1997) : Preliminary Results of ILAS (Improved Limb Atmospheric Spectrometer) Measurements Stratospheric Ozone Layer, *Proc. of the First SPARC General Assembly*, **1**, 255-258.

笹野泰弘, 神沢博, 鈴木睦, 横田達也 (1997) : ILAS(改良型大気周縁赤外分光計) 観測がねらうもの, 第 7 回大気化学シンポジウム平成 8 年度研究集会講演集, 64-67.

Sasano, Y., M. Suzuki, T. Yokota, H. Kanzawa, H. Nakajima, H. Nakane, M. Shiotani, Y. Kondo and S. Hayashida (1998) : Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS): Validation and Preliminary Scientific Results, *Proceedings of SPIE*, **3501**, 61-71.

Sasano, Y. (1998) : ILAS Project Status Report: Data Processing and Validation, *The Third ADEOS Symposium/Workshop*, 85-94.

Sasano, Y., H. Kanzawa, T. Yokota and M. Suzuki (1998) : Overview of ILAS measurements for the northern high latitude stratosphere in 1996/1997 winter, Air Pollution Report 66: Polar Stratospheric Ozone 1997 (Harris, N. R. P., I. Kilbane-Dawe, G. T. Amamatidis Eds.), 486-489.

笹野泰弘, 神沢博, 鈴木睦, 横田達也, 中島英彰, 中根英昭, 塩谷雅人, 近藤豊, 林田佐智子 (1998) : ILAS データ処理状況と検証作業の概要, 第 8 回大気化学シンポジウム研究集会講演集, 155-159.

笹野泰弘, 横田達也, 中島英彰, 神沢博 (1999) : ILAS データ処理と検証解析の最新状況, 第 9 回大気化学シンポジウム講演集, 48-50.

笹野泰弘 (2000) : 成層圏オゾン層観測センサーILAS/ILAS-II とそのデータ利用研究, 特定領域研究 B, 成層圏力学過程とオゾンの変動およびその気候への影響, 平成 11 年度公開シンポジウム, 11-16.

佐藤佳宏, 中島英彰, 横田達也, 笹野泰弘 (2000) : フィルター補正逆投影法を用いた ILAS

エアロゾルの算出，第10回大気化学シンポジウム講演集，286-287.

杉田孝史，横田達也，中島英彰，中島映至，鈴木睦，伊藤康裕，笹野泰弘 (1999) : ILASによる気温高度分布導出における問題点について，第 9 回大気化学シンポジウム講演集，83-84.

Sugita, T., H. Nakajima, T. Yokota, Y. Sasano, H. Kanzawa, J.H. Park and L.W. Thomason (2000) : ILAS version 4.20 ozone comparison with HALOE, SAGE-Ⅱ, and ozonesonde measurements, *Proceeding of the fifth European symposium*, 738-741.

杉田考史，中島英彰，横田達也，笹野泰弘，神沢博 (2000) : ILAS Ver. 4.20 オゾンの検証 (HALOE, SAGEⅡ，POAMⅡ，オゾンゾンデとの比較)，第10回大気化学シンポジウム講演集，37-39.

Sugita, T., T. Yokota, T. Nakajima, H. Nakajima, K. Waragai, M. Suzuki, A. Matsuzaki, Y. Itou, H. Saeki and Y. Sasano (2000) : Temperature and pressure retrievals from O2 A-band absorption measurements made by ILAS, Retrieval algorithm and error analyses, *Proc, of SPIE*, **4150**, 94-105.

Suzuki, M. and T. Yokota (1994) : High-speed IR forward line-by-line retrieval system for limb observation using ILAS on board ADEOS spacecraft, *Proc. of the 5th Workshop on ASSFTS*, 15-23.

鈴木睦 (1994) : ILAS ハードウェア開発状況について，第4回大気化学シンポジウム講演集，28-33.

鈴木睦 (1994) : ILAS航空機検証実験の可能性について, IGBP/IGAC シンポジウム航空機観測ワークショップ報告書, 32-37.

Suzuki, M. and Y. Sasano (1995) : Improved Limb Atmospheric Spectrometer, ILAS, *Proceedings Infrared Spaceborne Remote Sensing II*, **2268**, 103-110.

Suzuki, M., A. Matsuzaki, T. Ishigaki, N. Kimura, N. Araki, T. Yokota, and Y. Sasano (1995) : ILAS, the Improved Limb Atmospheric Spectrometer on the Advanced Earth Observing Satellite, *IEICE Transactions Commun.*, **E78-13,12**, 1560-1570.

Suzuki, M., T. Yokota, H. Kanzawa, Y. Sasano, Y. Ito and K. Waragai (1998) : Brief overview of characteristics and performance of the ILAS in orbit, *Proceedings Atmospheric Chemistry Symposium*, 170-176.

寺尾有希夫，田中博，安西哲三，笹野泰弘，中島英彰，林田佐智子，斎藤尚子 (2000) : ILASデータによる1997年冬～春期北極域の成層圏オゾン減少の評価，第10回大気化学シンポジウム講演集，57-60.

Terao, Y., H.L. Tanaka, T. Yasunari and Y. Sasano (2000) : Analysis of chemical perturbation of stratosphere air parcel along the trajectory during the Arctic winter of 1996/1997 using ILAS data *Proc. of SPIE*, **4150**, 31-41.

横田達也，笹野泰弘 (1997) : ILASによるオゾンWulfバンド吸収の観測，第7回大気化学シ

ンポジウム平成８年度研究集会講演集, 68-71.

横田達也, 中島英彰, 神沢博, 笹野泰弘 (1998) : ILAS プロジェクトにおける参照大気モデルの作成, 第８回大気化学シンポジウム研究集会講演集, 177-179.

Yokota, T., M. Suzuki and Y. Sasano (1999) : Parallel computing of the satellite sensor ILAS data for measurement of the minor gas concentrations in the polar ozone layer, *Proceedings of ITC-CSCC'99*, 667-668.

横田達也, 笹野泰弘 (1999) : ILAS データに基づくオゾン気候値, 第９回大気化学シンポジウム講演集, 100-103.

Yushkov, V., V. Dorokhov, V. Khattatov, H. Nakane, Y. Sasano and T. Ogawa (1998) : Observational Ozone Study in Yakutsk, Eastern Siberia with Ground-Based, Balloon and ADEOS/ILAS, TOMS Measurement. *The Third ADEOS Symposium/Workshop and The 13th ILAS Science Team Meeting*, 387-393.

Yushkov, V., V. Dorokhov, I. Zaitcev, T. Patapova, H. Nakane, Y. Sasano and T. Ogawa (1998) : Some results of ozone sounding in Yakutsk for validation ILAS/ADEOS, *Polar Stratospheric ozone 1997*, N.R.P. Harris, I. Kilbane-Dawe, G. T. Amanatidis Eds, 239-242.

③Journal 掲載論文

Burton, S.P., L.W. Thomason, Y. Sasano and S. Hayashida (1999) : Comparison of aerosol extinction measurements by ILAS and SAGE II, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 1719-1722.

Choi, W., S. Kim and Y. Sasano (2000) : Investigation of high-latitude tracer characteristics in the strasphere by use of ILAS and HALOE data, *ASIAN-PACIFIC Remote Sensing And GIS Journal*, **12**(1), 53-60.

Dubovik, O.V., T. Yokota and Y. Sasano (1998) : Improved Technique for Data Inversion and Its Application to The Retrieval Algorithm for ADEOS/ILAS, *Adv. Space Res.*, **21**, 397-403.

Hayashida, S., N. Saitoh,, A. Kagawa, T. Yokota, M. Suzuki, H. Nakajima and Y. Sasano (2000) : Arctic polar stratospheric clouds observed with the Improved Limb Atmospheric Spectrometer during winter 1996/1997., *J.Geophys.Res.*, **150**(D20,24), 715-24, 730.

Koike, M., Y. Kondo, H. Irie, F.J. Murcray, J. Williams, P. Fogal, R. Blatherwick, C. Camy-Peyret, S. Payan, H. Oelhaf, G. Wetzel, W. Traub, D. Johonson, K. Jucks, G.C. Toon, B. Sen, J.-F. Blavier, H. Schlager, H. Ziereis, N. Toriyama, M.Y. Danilin, J.M. Rodoriguez, H. kanzawa and Y. Sasano (2000) : A comparison of Arctic HNO3 profiles measured by the Improved Limb Atomosheric Spectrometer and balloon-borne sensors, *J.Geophys.Res..*, **105**(D5),6761-6771.

Kreher, K., H. Kanzawa, H. Nakane, M. Suzuki, Y. Sasano and G.E. Bodeker (1998) : Arctic ozone depletion from February to April 1997 as seen by ozonesondes and ILAS above Kiruna, *Air Pollution Report* **66** : *Polar Stratospheric Ozone 1997*, N.R.P. Harris, I. Kilbane-Dawe, G. T. Amanatidis Eds, 293-296.

Kreher, K., G.E. Bodeker, H. Kanzawa, H. Nakane and Y. Sasano (1999) : Ozone and temperature profiles measured above Kiruna inside, at the edge of, and outside the Arctic polar vortex in February and March 1997, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 715-718.

Lee, K.-M., J.M. McInerney, Y. Sasano, J.H. Park, W. Choi and J.M. Russell III (1999) : Intercomparison of ILAS and HALOE ozone at high latitudes, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 835-838.

Payan, S, C. Camy-Peyret, P. Jeseck, T. Hawat, M. Pirre, J.-B. Renard, C. Robert, F. Lefevre, H. Kanzawa and Y. Sasano (1999) : Diurnal and nocturnal distribution of stratospheric NO2 from solar and stellar occultation measurements in the Arctic vortex: Comparison with models and ILAS satellite measurements, *J. Geophys. Res.*, **104**(D17), 21585-21593.

Sasano, Y., M. Suzuki, T. Yokota and H. Kanzawa (1997) : Early Results from Improved Limb Atmospheric Spectrometer(ILAS) Measurements, *GEOCARTO International*, **12**, 61-68.

笹野泰弘, 鈴木睦, 横田達也, 神沢博 (1997) : 改良型大気周縁赤外分光計(ILAS)による成層圏オゾン層観測「初期解析結果」, 日本リモートセンシング学会誌, **17**, 101-107.

Sasano, Y., M. Suzuki, T. Yokota and H. Kanzawa (1999) : Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) for stratospheric ozone layer measurements by solar occultation technique, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 197-200.

Sasano, Y., H. Nakajima, H. Kanzawa, M. Suzuki, T. Yokota, H. Nakane, H. Gernandt, A. Schmidt, A. Herber, V. Yushkov, V. Dorokhov and T. Deshler (1999) : Validation of ILAS Version 3.10 ozone with ozonesonde measurements, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 831-834.

Sasano, Y., M. Suzuki, T. Yokota and H.Kanzawa (1999) : ILAS for stratospheric ozone layer monitoring: Outline of data processing (Version 3.00 and 3.10) and validation experiments, *IEEE T. G. Rem. Sens*, **37**(3), 1508-1516.

Sasano, Y., Y. Terao, H. L. Tanaka, T. Yasunari, H. Kanzawa, H. Nakajima, T. Yokota, H. Nakane, S. Hayashida and N. Saitoh (2000) : ILAS observations of chemical ozone loss in the Arctic vortex during early spring 1997, *Geophys. Res. Lett.*, **27**(2), 213-216.

Yokota, T., M. Suzuki, O.V. Dubovik and Y. Sasano (1998) : ILAS (Improved Limb Atmospheric Spectrometer)/ADEOS Data Retrieval Algorithms, *Advanced Space Research*, **21**, 393-396.

(4) ILAS-II, ILAS-III, FTS

市橋宏基, 山下博, 木戸省一, 藁谷克則, 荒木信博, 鈴木睦 (1998) : ILAS-II 用分光計スリット関数の導出, 第 24 回リモートセンシングシンポジウム講演論文集, 117-120.

Kuze, A. and M. Suzuki (1998) : Conceptual study on SWIR scattered light measurements with a satellite borne compact FTS, *Proceedings Atmospheric Chemistry Symposium*, 180-183.

久世暁彦, 鈴木睦 (1998) : 衛星搭載用小型干渉計による近赤外大気散乱光測定の概念検討, 第 8 回大気化学シンポジウム平成 9 年度研究集会講演集, 180-183.

Kuze, A., T. Kawashima, M. Suzuki, H. Nakajima and Y. Sasano (1999) : Conceptual study on

SWIR scattered light measurements from space with a compact FTS, *Proc. ASSFTS8*, O22.

Kuze, A., H. Nakajima, J. Tanii and Y. Sasano (2000) : Conceptual Design of Solar Occultation FTS for Inclined-orbit Satellite (SOFIS) on GCOM-A1, *Proceedings of SPIE*, **4131**, 305-314.

Mukai, S., I. Sano, Y. Sasano, M. Suzuki and T. Yokota (1994) : Retrieval Algorithms for Stratospheric Aerosols Based on ADEOS/ILAS Measurements, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **32**, 1142-1127.

Sasano, Y. (1999) : ADEOS-II/ILAS-II and ADEOS-IIIA/ILAS-II follow-on, *Proc. International Workshop on Submillimeter-wave Observation of Earth's Atmosphere from Space,* 195-197.

Sasano, Y. and O. Mizuno (1999) : ILAS-III (Solar Occultation FTS) project, *8th International Workshop on Atmospheric Science from Space using Fourier Transform Spectrometry*, 43-46.

Sasano, Y., T. Yokota, H. Nakajima, T. Sugita and H. Kanzawa (2000) : ILAS-II instrument and data processing system for stratospheric ozone layer monitoring, *Proc.of SPIE*, **4150**,106-114.

Suzuki, M., A. Kuze, M. Chamberland, H. Nakajima, Y. Sasano and N. Uemura (1999) : A conceptual design study on solar occultation technique from space with a compact FTS, *Proc. ASSFTS8.*

藁谷克則、荒木信博、木村教夫，高橋庄三，仙福明，田部哲夫、森昭寿，山下博，木戸省一，竹内宏之、市橋宏基，守屋仁美、石垣武夫、茂木勇治，鈴木睦，中島英彰，笹野泰弘 (1999) : 衛星搭載用オゾン層観測センサ ILAS-II，Matsushita Technical Journal, **45**(3), 138-144

付録　ILAS II の概要

ILAS の後継機である改良型大気周縁赤外分光計 II 型（ILAS-II）は、2002 年 2 月下旬打ち上げ予定の環境観測技術衛星 ADEOS-II（Advanced Earth Observing Satellite – II）に搭載されることになっている。ILAS-II は、ILAS の機器構成を踏襲しながら、観測波長範囲を広げるとともに高度分解能を高めたものであり、大気微量成分やエアロゾル、気温、気圧などの高度分布をより精度良く測定することができる。

(1) ADEOS-II の概要

ADEOS-II は ADEOS（“みどり”）の後継機として、その観測ミッションを継承することを目的し、オゾン層の破壊、地球温暖化等の全球的環境変動のメカニズムの把握やグローバルな気候変動研究に寄与するとともに、気象や漁業などの実用面での活用が期待されている。

宇宙開発事業団（NASDA）は、ADEOS-II を 2002 年 2 月に種子島宇宙センターから打ち上げる予定である。ADEOS-II には ILAS-II の他に POLDER（地表反射光観測装置；フランス CNES）、AMSR（高性能マイクロ波放射計；NASDA）、GLI（グローバル・イメージャ；NASDA）、SeaWinds（海上風観測装置；アメリカ NASA）の 4 つのセンサが搭載される。

ADEOS-II の主要諸元を表 1 に示す。

表 1　ADEOS-II の主要諸元

寸法	本体	約 5×4×4m
	太陽電池パドル	約 3×24m
重量	全重量	約 3,680kg（打ち上げ時）
	ミッション機器重量	約 1,300kg
寿命	設計寿命	3 年
	搭載燃料	5 年分
軌道	種類	太陽同期準回帰軌道
	軌道高度	802.9km
	軌道傾斜角	98.62 度
	周期	101 分
	回帰日数	4 日
	降交点地方時	午前 10 時 30 分±15 分

(2) ILAS-II の概要

ILAS-II の主要諸元を表 2 に示す。ILAS-II の観測原理は ILAS と同様、太陽掩蔽法で、ADEOS-II の軌道上での日の出、日の入り時に地球周縁の大気を通して ILAS-II センサに到達する太陽光の透過率を波長毎に測定する。

掩蔽現象は高緯度域で起こるため、観測領域は ILAS と同じく南北両半球の高緯度域で、北半球（日昇観測）では北緯 57～72 度、南半球（日没観測）では南緯 65～90 度の範囲である。観測緯度は毎日少しずつ変化し、ILAS とだいたい同様の季節変化を示す。1 日の観測地点数は各半球でそれぞれ 14 地点で、非常に狭い範囲の緯度線上に限定される。

ILAS-II は 4 つの測定チャンネルを持っている。そのうち Ch.1～3 は赤外のチャンネルで、気体成分によって吸収を示す波長位置が異なることを利用して、これらの吸収の強さの情報から複数の気体の濃度を同時に推定する。Ch.4 は可視光のチャンネルで、可視のエアロゾル消散係数、気温と気圧の高度分布を得ることに使われる。

表 2　ILAS-II の主要諸元

観測波長域 （波数）		Ch.1: 6.21 – 11.76 μ m (1,610 – 850cm^{-1}) Ch.2: 3.0 – 5.7 μ m (3,333 – 1,754cm^{-1}) Ch.3: 12.78 – 12.85 μ m (782 – 778cm^{-1}) Ch.4: 753 – 784nm (13.280 – 12.755cm^{-1})
観測対象項目		O3, HNO3, CH4, H2O, N2O, NO2, CFC-11, CFC-12, ClONO2, エアロゾル, 気温, 気圧, CO2（圧力測定用）
測定高度		10 – 60km （雲頂高度から 250km まで連続観測）
目標精度	高度分解能	1km
	濃度分解能	オゾンは 1% ClONO2 以外の微量成分は 5% ClONO2 については検討中
測定領域 （緯度帯）		北半球：57 – 72 度 南半球：65 – 90 度
分光方式		Ch.1 – Ch.3：平面回折格子分光器 Ch.4：凹面回折格子分光器
データレート		453.7kbps（10Hz サンプリング）
重量		133kg（最大）
消費電力		120W（最大）

ILAS-II プロジェクト

ILAS-II プロジェクトは ILAS プロジェクトを引き継ぐ形である。検証実験については、ILAS-II 観測開始後、スウェーデンの Kiruna における大気球キャンペーン、Kiruna および昭和基地などにおける地上リモートセンサーによる観測が予定されている。

ILAS-II DHF

ILAS & ILAS-II 衛星データ処理運用施設は、2000 年 2 月 1 日より ILAS-II 衛星データ処理運用施設（ILAS-II DHF）と改称した。

ILAS-II データ処理運用施設システムのハードウェア構成およびソフトウェア構成は、ILAS-II ホームページ上で紹介されている他、ILAS ニュースレターに作業状況の報告と今後の予定が掲載されている。

ILAS 技術資料

1. ILAS（改良型大気周縁赤外分光計）の特性と稼働時の性能
2.改良型大気周縁赤外分光計（ILAS）データ解析アルゴリズム（Version 5.20）
3.太陽掩蔽法を用いた衛星搭載センサーILAS の接線高度決定：
Version 5.20 の新しい方法
4. 改良型大気周縁赤外分光計（ILAS）によるオゾン観測値の検証
5. 改良型大気周縁赤外分光計（ILAS）Ver. 5.20 の NO_2 と HNO_3 データの検証
6. 改良型大気周縁赤外分光計（ILAS）Ver. 5.20 による亜酸化窒素と
メタンプロファイルの検証とデータ特性
7. 改良型大気周縁赤外分光計（ILAS）Ver. 5.20 による水蒸気データの
特性と検証
8. 参考文献

本技術資料の内容は、以下の通り論文として英文化され、米国地球物理学会誌（Journal of Geophysical Research – Atmosphere）に投稿した。

1. Nakajima, H., M. Suzuki, A. Matsuzaki, T. Ishigaki, K. Waragai, Y. Mogi, N. Kimura, N. Araki, T. Yokota, H. Kanzawa, T. Sugita, and Y. Sasano : Characteristics and performance of the Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) in orbit, *J. Geophys. Res.*, (accepted).

2. Yokota, T., H. Nakajima, T. Sugita, H. Tsubaki, Y. Itou, M. Kaji, M. Suzuki, H. Kanzawa, J. H. Park, and Y. Sasano : Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) data retrieval algorithm for Version 5.20 gas profile products, *J. Geophys.Res.*, (accepted).

3. Nakajima, H., M. Suzuki, T. Yokota, T. Sugita, Y. Ito, M. Kaji, N. Araki, K. Waragai, H. Yamashita, H. Kanzawa, and Y. Sasano : Tangent height registration for the solar occultation satellite sensor ILAS: A new technique for Version 5.20 products, *J. Geophys. Res.*, (accepted).

4. Sugita, T., T. Yokota, H. Nakajima, H. Kanzawa, H. Nakane, H. Gernandt, V. Yushkov, Shibasaki, T. Deshler, Y. Kondo, S. Godin, F. Goutail, J.-P. Pommereau, C. Camy-Peyret, S. Payan, P. Jeseck, J-B. Renard, H. Bosch, R. Fitzenberger, K. Pfeilsticker, M. Von Konig, H. Bremer, H. Kullmann, H. Schlager, J. J. Margitan, B. Stachnik, G. C. Toon, K. Jucks, W. A. Traub, D. G. Johnson, I. Murata, H. Fukunishi, and Y. Sasano : Validation of ozone measurements from the Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS), *J. Geophys. Res.*, (accepted).

5. Irie, H., Y. Kondo, M. Koike, M. Y. Danilin, C. Camy-Peyret, S. Payan, J. P. Pommereau, F. Goutail, H. Oelhaf, G. Wetzel, G. C. Toon, B. Sen, R. M. Bevilacqua, J. M. Russell III, J. B. Renard, H. Kanzawa, H. Nakajima, T. Yokota, T. Sugita, and Y. Sasano : Validation of NO2 and HNO3 measurements from the Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) with the version 5.20 retrieval algorithm, *J. Geophys. Res.*, (accepted).

6. H. Kanzawa, T. Sugita, H. Nakajima, G.E. Bodeker, H. Oelhaf, M. Stowasser, G. Wetzel, A. Engel, U. Schmidt, I. Levin, G.C. Toon, B. Sen, J.-F. Blavier, S. Aoki, T. Nakazawa, K.W. Jucks, D.G. Johnson, W.A. Traub, C. Camy-Peyret, S. Payan, P. Jeseck, I. Murata, H. Fukunishi, M. von Koenig, H. Bremer, H. Kuellmann, J.H. Park, L.L. Pan, T. Yokota, M. Suzuki, M. Shiotani, and Y. Sasano : Validation and data characteristics of nitrous oxide and methane profiles observed by the Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) and

processed with the Version 5.20 algorithm, *J. Geophys. Res.*, (submitted).

7. Kanzawa, H., A. Engel, U. Schmidt, T. Nakazawa, S. Aoki, C. Camy-Peyret, H. Oelhaf, W. A. Traub, K. Jucks, D. G. Johnson, G. C. Toon, I. Murata, H. Fukunishi, J. Park, G. Bodeker, L. Pan, T. Sugita, H. Nakajima, T. Yokota, M. Suzuki, M. Shiotani, and Y. Sasano : Validation and data characteristics of water vapor profiles observed by the Improved Limb Atmospheric pectrometer (ILAS) and processed with Version 5.20 algorithm, *J. Geophys. Res.*, (accepted).

1．ILAS（改良型大気周縁赤外分光計）の特性と稼働時の性能

要旨

改良型大気周縁赤外分光計（**I**mproved **L**imb **A**tmospheric **S**pectrometer ; ILAS）は、日本の環境庁（Environment Agency ; EA）が成層圏オゾン層の環境を研究するために開発した、太陽掩蔽法を用いた衛星センサーである。この報告は、ILAS の特性と稼働時の性能について説明したものである。ILAS は、オゾン・硝酸・二酸化窒素・亜酸化窒素・メタン・水蒸気・気温・気圧・エアロゾル消散係数の高度分布を 1.6 km の鉛直分解能で測定するように設計されている。ILAS が搭載しているのは、瞬時視野の接線高度を決めるサンエッジセンサー（sun-edge sensor (SES)）および２つの分光器で、１つは非冷却焦電型リニアアレイ検出器を持つ赤外（IR）分光器で 6.21～11.76 μm 付近をカバーし、もう１つは、753～784 nm をカバーする可視分光器である。ILAS の２軸ジンバルコントロールシステムは、２つの太陽位置センサーを用いて掩蔽法測定時に太陽の輝度中心を追尾する。ILAS を地球観測プラットフォーム技術衛星（**Ad**vanced **E**arth **O**bserving **S**atellite ; ADEOS）に搭載し打上げる前に、その性能は、ガスセル測定、時間応答測定、太陽追尾試験、中空陰極ランプ測定などいくつもの方法により地上でチェックされた。1996 年 8 月 17 日の ADEOS の打上げ後、1996 年 10 月 30 日から 8 ヶ月間のルーチン運用では ILAS は正常に機能していたが、1997 年 6 月 30 日に太陽電池パドルの不具合が原因で ADEOS は運用を停止した。この間 6700 以上の太陽掩蔽測定データが得られている。赤外チャンネルの応答の遅れは、IR-ステップ入力信号を用いることにより特徴づけられた。ILAS の赤外・可視分光器の装置関数は、理論光学計算と打上げ前のガスセル実験測定値、軌道上でのデータを組み合わせて決められている。赤外チャンネル各素子の S/N 比は 400～1200、可視チャンネルのそれは 100%直達太陽光シグナルについて 1600～1800 と見積もられる。日没掩蔽時に ILAS は場合によって接線高度 10 km 以下で太陽を追尾できることがある。SES データから太陽の輪郭を決める方法は正しく機能しており、観測から適切な接線高度情報が得られている。SES、可視チャンネル、赤外チャンネルの出力信号レベルは、ILAS の運用期間中わずかな減少を示していたが、これは汚染物の付着に帰されると考えられる。しかしながら、絶対信号レベルの変動は、太陽掩蔽法の自己キャリブレーション原理によりデータ導出には影響しない。全体として、ILAS は軌道上での運用期間中、設計通り適切に稼働し、オゾン層研究にとって貴重なデータを得ることが出来た。

1.1 はじめに

改良型大気周縁赤外分光計（**I**mproved **L**imb **A**tmospheric **S**pectrometer ; ILAS）は、日本の環境庁（Environment Agency ; EA）が成層圏オゾン層の環境を研究するために開発した、太陽掩蔽法を用いた衛星センサーである〔Sasano *et al.*, 1997; Sasano *et al.*, 1999〕。ILAS は、1996 年 8 月 17 日に日本の宇宙開発事業団（NASDA）種子島宇宙センターから、地球観測プラットフ

ォーム技術衛星（**Ad**vanced **E**arth **O**bserving **S**atellite ; ADEOS）に搭載されて打上げられた。

ADEOS は日本で開発された初の純国産地球観測衛星で、地球表面と大気の観測を行う８つのセンサーが搭載されている。ADEOS の名目上の軌道は、高度約 800 km、傾斜角 98.6 度、周期 101 分の太陽同期準回帰軌道で、降交点における平均地方太陽時は 10 時 40 分である〔Shimoda, 1999〕。

ILAS の開発は 1989 年にスタートした。構造・熱モデル（STM）、エンジニアリングモデル（EM）、プロトフライトモデル（PFM）はそれぞれ 1992 年 2 月、1992 年 3 月、1994 年 9 月までに開発された〔Suzuki *et al.*, 1999〕。

ILAS は地球を１周する軌道上で日昇時と日没時の２回、太陽掩蔽法測定を行う。ILAS は２つの分光器を有している。１つは非冷却焦電型リニアアレイ検出器を持つ赤外（IR）分光器で 6.21～11.76 μm 付近をカバーし、もう１つは、753～784 nm をカバーする可視分光器である。ILAS は赤外分光器で、オゾン・硝酸・二酸化窒素・亜酸化窒素・メタン・水蒸気の鉛直プロファイルを測定し〔Yokota *et al.*, 2001〕、可視分光器では気温と気圧の鉛直プロファイル〔Sugita *et al.*, 2001〕と 780 nm におけるエアロゾル消散係数〔Hayashida *et al.*, 2000〕を測定する。これらの分光器の鉛直分解能は入射スリットにより 1.6 km になるようにセットされている。ILAS が観測する緯度範囲は高緯度地域で、ADEOS 軌道面と地球自転軸の相対的配置の季節変化により、北緯 56～70 度、南緯 63～88 度の範囲を変化する〔Sasano *et al.*, 1999〕。ADEOS の打上げ、チェックアウト期間終了後、ILAS は 1996 年 10 月 30 日より通常の運用を開始した。それ以後、ADEOS が 1997 年 6 月 30 日に運用を停止するまでの８ヶ月間にわたり ILAS は正常に機能し、約 6700 の掩蔽データを取得した〔Sasano *et al.*, 1999〕。

この論文は、打上げ後の詳細な解析から明らかになった軌道上における ILAS の光学的、熱的、機械的特性など ILAS の特性と性能について解説するものである。

1.2 ILAS 機器

ILAS は、太陽追尾系、望遠鏡・リレー光学系、赤外・可視分光器、赤外・可視検出器、サンエッジセンサー(SES)、信号処理系、電源系、構造体からなる。図 1.1 は ILAS の各コンポーネントの光学的レイアウトを、表 1.1 は ILAS の特性をまとめたものである〔Araki *et al.*, 1993; Suzuki *et al.*, 1995〕。

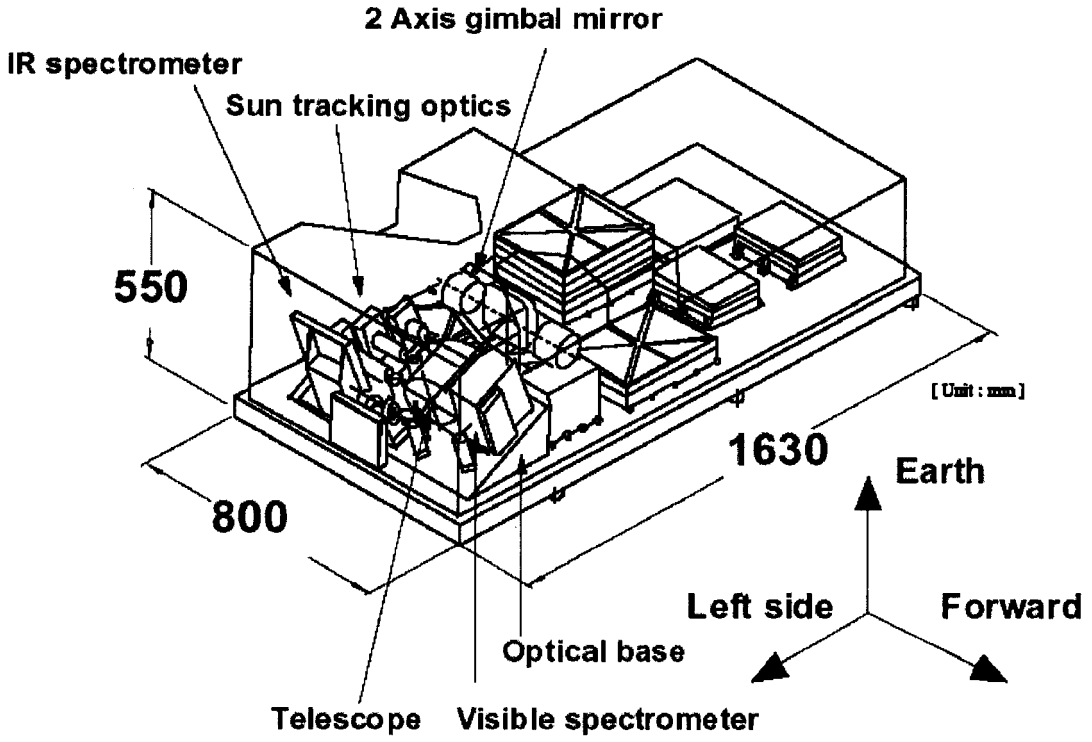


図 1.1　ILAS 機器の概観（unit : mm）

ILAS のカバーには２つの開口部があり、それぞれ日昇観測用（前面）、日没観測用である。太陽光は２軸ジンバルミラーで ILAS の光学系に導かれる。ILAS は ADEOS の前面（地球側）に搭載された。

表 1.1　ILAS の機器特性

寸法	800 ×1630 × 550 mm
重量	130 kg
消費電力	78 W
観測時間	1 occultation あたり 10 分間
データレート	517 kbps
サンプリングレート	12 Hz
太陽追尾装置	2 軸ジンバル
望遠鏡	12 cm カセグレイン
赤外チャンネル	850 – 1610 cm^{-1} (11.76 – 6.21 μm)
	44 素子
	１素子あたり 0.129 μm 間隔
	瞬時視野：1.6 km × 13.2 km
	(ターゲットガス：O_3, HNO_3, NO_2, N_2O, CH_4, H_2O)
可視チャンネル	1024 素子
	753 – 784 nm, 0.15 nm FWHM 分解能
	瞬時視野：1.6 km × 2.0 km
	(ターゲット項目：エアロゾル消散係数、気温、気圧)
サンエッジセンサー	1024 素子
	747±12.5 nm 光学フィルター
	１素子あたり 8 秒（角度）の分解能
スリット（高度分解能）	1.6 km

ILAS は２つの回折格子分光器を有している。１つはオゾンおよび他の化学種を測定する赤外領域用、もう１つは酸素分子Ａ－バンドの吸収を用いて気圧と気温を求めるための近可視領域用である。以降、後者については可視分光器と呼ぶことにする。これら２つの分光器は EXOS-C 衛星〔Matsuzaki *et al.*, 1985〕に搭載された LAS (Limb Atmospheric infrared Spectrometer)から継承されたもので、ロケット実験は 1980 年代に、文部省宇宙科学研究所（Institute for Space and Astronautical Science ; ISAS）で実施された〔Matsuzaki *et al.*, 1984〕。また、ILAS は瞬時視野（IFOV）方向を測定する SES を持っている。図 1.2 に ILAS のブロックダイアグラムを示す。

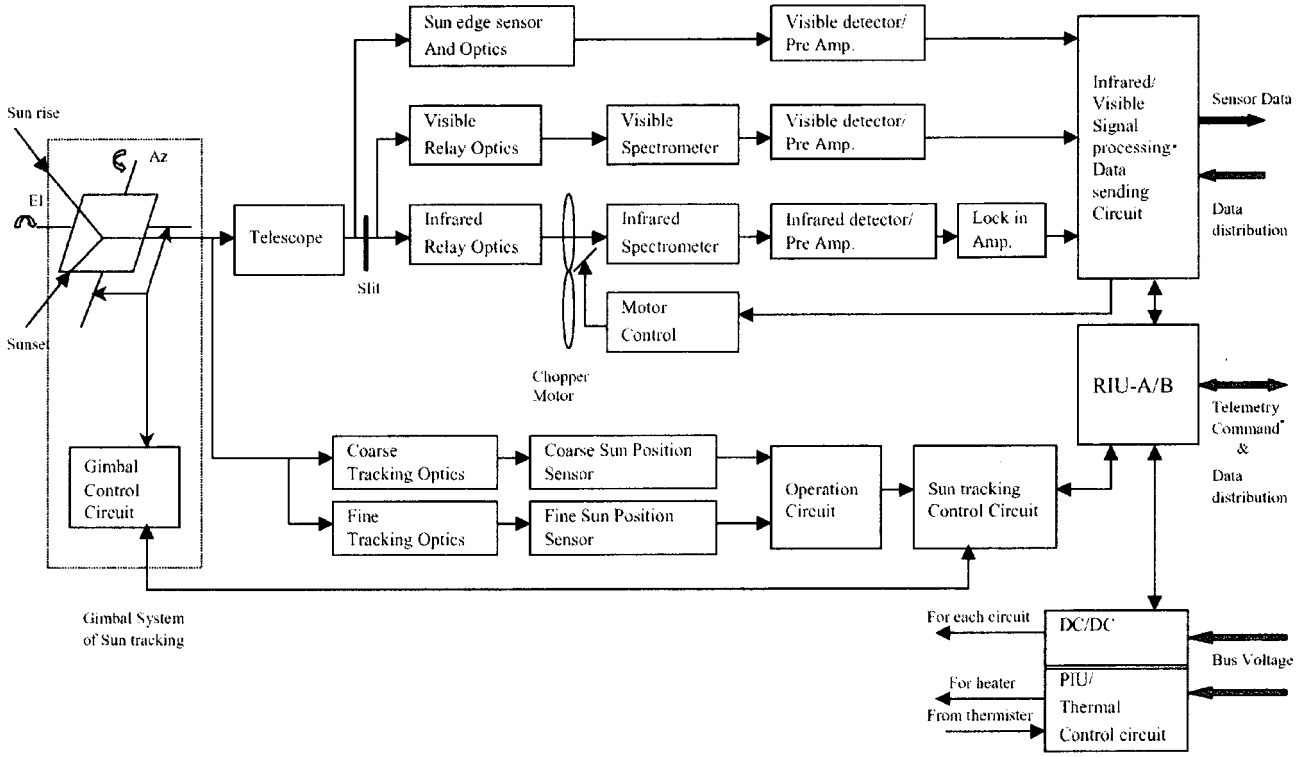


図 1.2　ILAS のブロックダイヤグラム

太陽追尾系から ADEOS 衛星へミッションデータを転送する機能を示す。

1.2.1 赤外分光器

ILAS 赤外分光器に入る前に、太陽光はダイクロイック（２色性）ミラーで分離され、シングルゲルマニウムリレーレンズ光学系（F/4.0）を用いて入射スリットに集光される。赤外分光器の瞬時視野は、幅 13'50"、高さ 2'08" になるよう設計されており、これは、軌道高度 800 km で ADEOS が接線高度 20 km を見ているとき、それぞれ 13.2 km、2.0 km に相当する。しかしながら、赤外分光器の入射スリットの中央部は、図 1.3 に示す望遠鏡の入射スリットと比較すると小さな（28"）オフセットがある。このオフセットは、打上げ前の環境試験の後に光学系を調節した結果である。結局、実際の IFOV は 1 '40" となり、接線高度で 1.6 km に相当する。これが ILAS 赤外分光器の鉛直分解能となる。

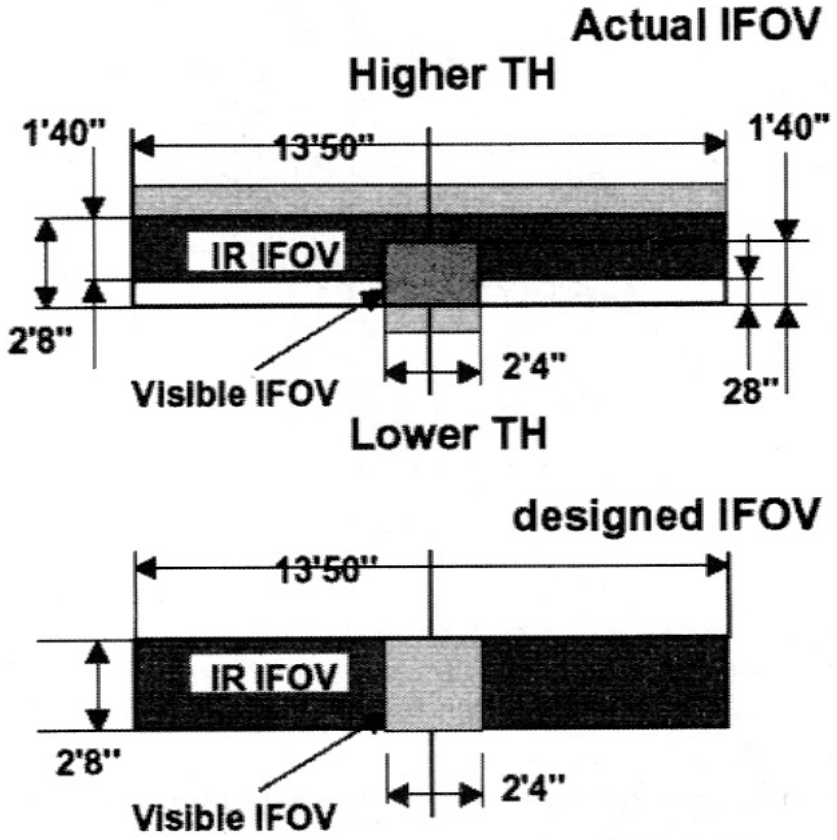


図 1.3　望遠鏡・赤外分光器・可視分光器間の瞬時視野の関係

実際の赤外瞬時視野は 28"上方の位置に置かれた。これは可視瞬時視野より 480 m高い位置に相当する。

分光器の入射スリットの前には光学チョッパーが配置されている。図 1.4 は、赤外分光器の光学系の構成である。赤外分光器はツェルニーターナー型回折格子分光器（F/4.0、D=10 cm）で刻線数 30/mm の平面回折格子を使用している。ILAS の赤外チャンネル（6.12 – 11.76 μm、分光分解能 0.129 μm）の信号検出器として、44 素子の $PbTiO_3$ 焦電アレイ検出器（松下電器製、Ishigaki [1997]）を用いている。この焦電アレイ検出器の長所は、センサーの冷却デバイスを必要としないことと、赤外領域の太陽掩蔽法観測に充分な信号対雑音比(SNR)

を持っていることである（等価雑音出力は 0.7nW/Hz$^{1/2}$）。アレイ検出器の鉛直方向は、回折格子の分散方向にとることにした。赤外検出器の鉛直方向の素子のサイズ（高さ 0.38 mm で 0.02 mm 間隔）は、スリットの像（高さ 0.4 mm）と鉛直方向の IFOV にほぼ等しく、水平方向の素子のサイズ（幅 2.0 mm）は、水平方向のスリットの像と水平方向の IFOV に相当する。近接した素子間には、光学的・熱的・電気的な干渉によって発生するクロストークがあることが判明し、各素子間のクロストークは約 3.0%であることが実験的に評価された。

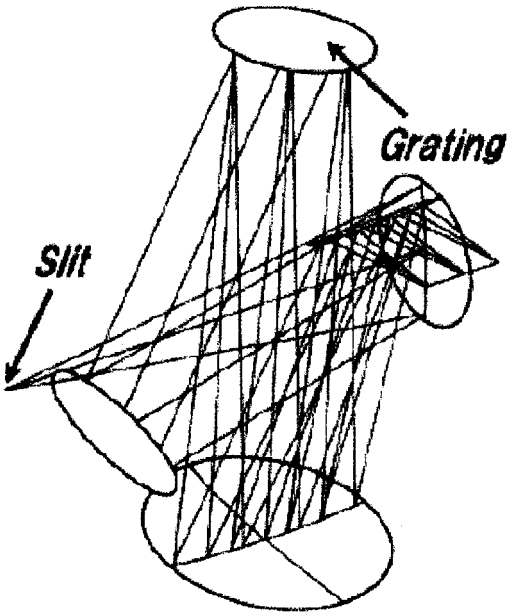


図 1.4　赤外分光器の光学系の構成

回折格子後段のミラーは、分光器の基礎板の外側に取り付けられている検出器アレイに向けて光線を屈曲させる。これにより分光器のサイズは縮小できるが、収差が大きくなる。

1.2.2　可視分光器

太陽の可視光は、ビームスプリッターの前で反射させ（F/4.0）、レンズ 4 枚のリレー光学系を用いて可視分光器の入射スリットへ集光させる（直交方向 F/8.0、スペクトル方向 F/16）。可視分光器は 12 cm 望遠鏡の一部（有効面積 3×1.5 cm）を使用することにより、太陽光エネルギーを弱め、より良質の像を得ている。可視分光器の IFOV は幅 2'04"、高さ 2'08" で、どちらも接線高度 20 km において 2.0 km に相当する。また、可視分光器の入射スリットの中心は、図 1.3 に示すように望遠鏡の入射スリットに対して 28" のオフセットを持っている。その結果、実質的な IFOV 高さは 1'40" となり、接線高度では 1.6 km に相当するが、この値が ILAS 可視分光器の鉛直分解能ということになる。また、可視と赤外分光器の IFOV には 28" のオフセットがあり、接線高度で 480 m に相当するものであることを注意しておく。この差は、データ導出の過程で補正される［Yokota et al., 2001］。

可視分光器の光学系の構成を図 1.5 に示す。可視分光器は凹面ホログラフィック回折格子

(F/8.0, f=400 mm, 1800 grooves/mm) を使用しており、検出器は 1024 素子金属酸化膜半導体 (MOS) フォトダイオードアレイ検出器で、753–784 nm の領域をカバーし、0.15 nm (FWHM：半値全幅) の分解能を持つ。

この高い波長分解能により、可視分光器は太陽フラウンホーファー線の観測データを用いて波長に関して正確にキャリブレートすることが可能である。

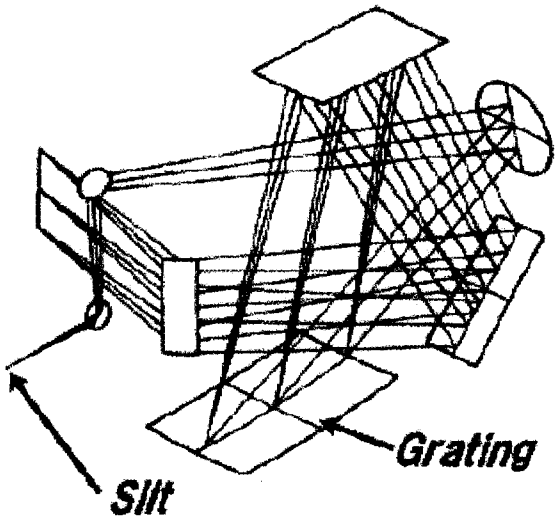


図 1.5　可視分光器の光学系の構成

可視分光器も、マルチフォールディング方式により、コンパクトになるよう設計された。

1.2.3　太陽エッジセンサー (SES)

太陽掩蔽法観測では、太陽を追尾する間の IFOV の絶対方向に関する正確な情報が非常に重要である。この目的を達するために、ILAS は太陽上端からの IFOV の角距離を決定するための SES (1024 素子、8 arc-sec / element、747±12.5 nm の光学フィルター付) を装備している。SES は 1024 素子の MOS フォトダイオードアレイと約 130 m の接線高度に相当する 8 arc–seconds の分解能を持つ望遠鏡 (f= 630 mm) を使用している。衛星の時計の精度 (12 msec of 1-σ uncertainty) と軌道決定の精度 (150 m of 3 –σ in XYZ direction)を考慮し、かつ屈折の効果を正しく補正したとき、ILAS 観測の接線高度は SES によって、絶対高度で約 150 m以内の精度で決定できる。接線高度の決定についての詳細な記述は他の論文に発表している [Nakajima et al., 2001]。SES を含む太陽追尾光学系のブロック図を図 1.6 に示す。

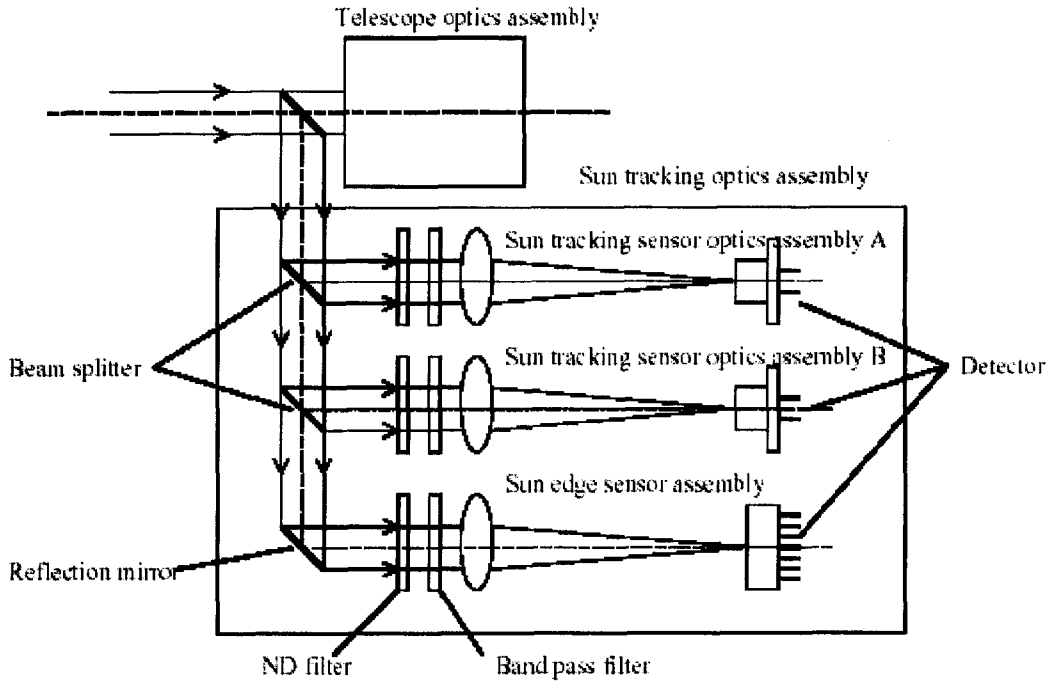


図 1.6　太陽追尾光学系のブロックダイアグラム

SES の光路はビームスプリッタによって太陽追尾の光路から分離される。

1.2.4　太陽追尾センサー

ILAS は太陽の輝度中心を追尾するように設計されている。図 1.7 に ILAS の 2 軸ジンバル制御システムを示した。太陽追尾は、視野が約±0.5° の 2×2 : 4 分割 Si フォトダイオード（精太陽センサー ; Fine Sun Position Sensor (FSPS)）を使用し、80 msec 毎にデジタル的なフィードバックをかけることによって行う。FSPS は図 1.6 に assembly B と示されている光学系で、直径 25.0 mm、焦点距離 72.0 mm の 4 枚レンズ望遠鏡を用いている。ILAS の追尾能力は方位・高度方向とも、視線方向について±2 arc – minutes よりも良い。FSPS による追尾を開始する前に、視野が約±5° の 2 次元位置検出器を用いた CSPS（Coarse Sun Position Sensor ; 粗太陽センサー）で、太陽を連続追尾する。CSPS は図 1.6 に assembly A と示された光学系で、直径 8.5 mm、焦点距離 21.7 mm の屈折望遠鏡を用いている。初期位置（方位、高度）は地上からデジタル的に指示する。

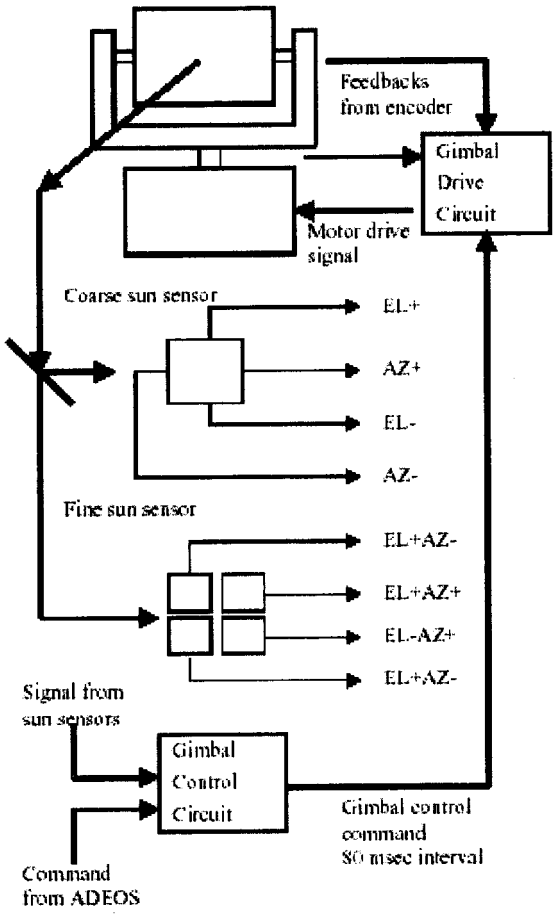


図 1.7　ILAS のジンバル制御装置の概略図

ジンバルの駆動回路は、160 ヘルツのバンド幅のメカニカルなフィードバックループを持っている。光学的フィードバックは、太陽センサシグナルを用いた計算に基づいて 80 ミリ秒ごとに動作する。

1.2.5　その他の装置

望遠鏡で受け取る赤外太陽放射は、15 Hz チョッパーで断続的に入射するようにし、回折格子分光器を経て 44 素子焦電アレイ検出器に送られる。検出器の第 0 素子は最も波長の短い 6.21 μm、第 43 素子は最も波長の長い 11.76 μm として定義されている。個々の焦電アレイ検出器の出力信号は、電界効果トランジスタ (FET) を用いたインピーダンス変換の後、単段プリアンプに送られ、高い SNR の信号を得るために、その後ロックインアンプ（BPF : fc = 15 Hz, Q = 5）に送られる。図 1.8 に、ILAS ロックインアンプシステムのブロック図と、信号特性を示す。赤外信号は、ステップ状の入力に対し約 400 msec 遅れの応答特性を持っているため、この時間遅れは、データ導出アルゴリズムでよく用いられるデコンボリューションの方法で補正しなければならない［Yokota et al., 2001］。厳密な時定数の決め方については以下の節で説明する。

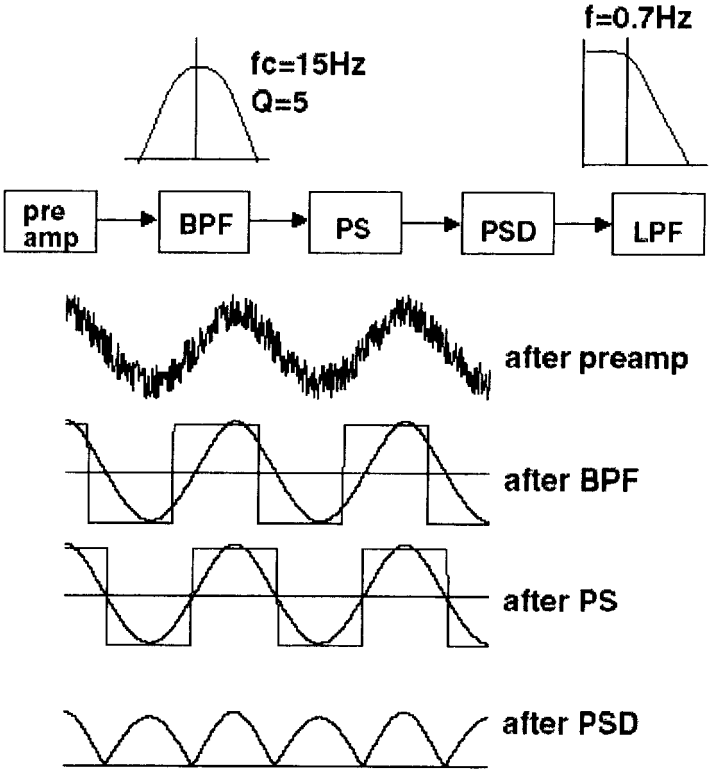


図 1.8　ILAS ロックインアンプシステムのブロックダイヤグラムと信号特性

検出器からのノイズを含んだ信号が増幅され、バンドパスフィルター（Band Pass Filter (BPF)）を通過する。フェーズシフター（Phase Shifter (PS)）によって位相を参照信号に基づいて調節したあと、AC 信号が位相検出器（Phase Sensitive Detector (PSD)）で検波される。その後、DC 出力を与えるために信号はローパスフィルター（Low Pass Filter (LPF)）によってフィルターされる。

並列処理された 44 素子の赤外データはシリアルデータに変換される。この赤外データ、1024 素子の可視データ、1024 素子の SES データを、12 ビット（11 ビット+符号 1 ビット）アナログ・デジタル (A/D) 変換器でデジタルデータに変換し、メインメモリーに保存する。これらのセンサーデータと payload collection データから成るミッションデータは、0.517Mbps の転送速度でミッションデータ処理回路へ送られる。可視分光器の検出器第 0 素子は最も短い波長 (753 nm)、第 1023 素子は最も長い波長 (784 nm)に対応していることに注意されたい。また、SES 検出器の素子番号の小さい方は高い接線高度に対応し、素子番号の大きい方は低い接線高度に対応することも併せて注意してほしい。

赤外および可視分光器、そして SES のサンプリング周波数は、すべて 12 Hz である。衛星の運動により見ている接線高度が変化する早さは、接線高度 20 km のとき 2.1 km / sec（より高高度では約 3.1 km / sec）なので、これらのセンサーのサンプリング間隔は接線高度 20 km で約 0.18 km に相当する（より高高度では約 0.25 km)。

1.2.6 ILAS 観測の手順

ILAS 運用モードの観測の順序を図 1.9 に示す。ADEOS 打上げ後 100 分間で、ILAS はスタンバイモードになる(2)。このスタンバイモードでは、ILAS の機能維持のためのヒータ電源のみを ON とする。日の出の掩蔽観測時、最初に点検のために測器ボックス内のあらかじめ決められた位置に ILAS を向ける(3)。その後、ILAS を 0%放射キャリブレーションのために外部宇宙に向ける(4)。次に、ADEOS の軌道要素から計算される日の出の予測位置に向け、太陽追尾センサーで太陽を探す。センサーが太陽を捉え追尾を開始した後、ILAS は日の出観測を行う(5)。そして太陽が地球大気から外れたときに、ILAS は 100%太陽放射のキャリブレーションを行う(6)。そして、再び ILAS を外部宇宙に向けて 0%放射のキャリブレーションを行い(4)、測器ボックス内のあらかじめ決められた場所に向けて(3)、スタンバイモードにする(2)。

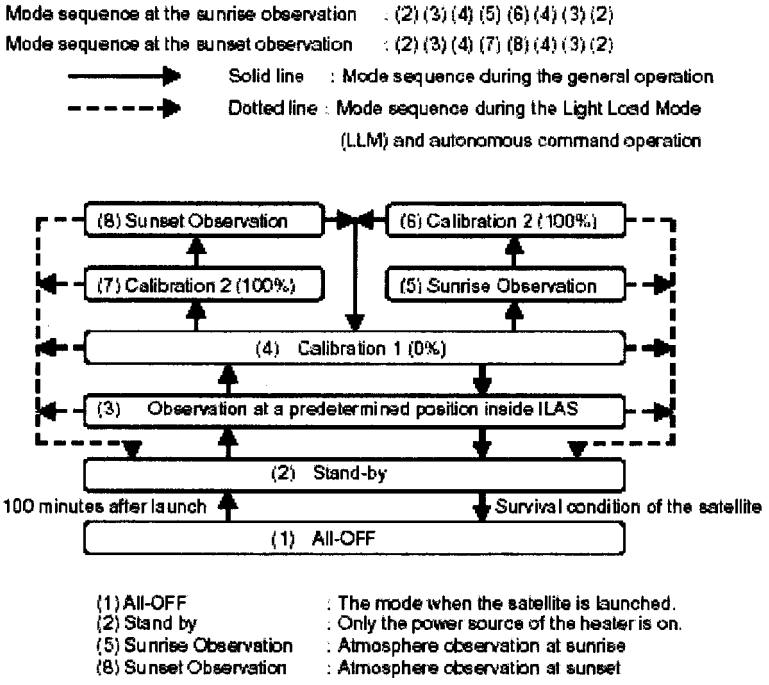


図 1.9　ILAS 運用手順チャート

ADEOS 打上げの 100 分後に、ILAS は(2)のスタンバイモードになる。
日昇時の観測順序は、(2),(3),(4),(5),(6),(4),(3),(2)、日没時の観測順序は、(2),(3),(4),(7),(8),(4),(3),(2)である。

日没の掩蔽観測時には、ILAS はステップ(3)と(4)を実施した後、100%太陽放射のキャリブレーションを行うために、太陽に向けられる(7)。そして、太陽が地球大気に入ってきたとき、日没観測を行い(8)、再度ステップ(4)、(3)、(2)を実行する。

ライトロードモード（Light Load Mode (LLM)）コマンドが、何らかの理由で ADEOS バスから出された場合、ILAS は(3)、(4)、(5)、(6)、(7)、(8)のどのモードにあっても自動的に、スタンバイモード(2)に移行する。ILAS のヒーター電源さえも供給できないような衛星の緊急事態の場合は、All-off モードになる。

1.3 各コンポーネントの性能

ILAS のハードウエア各コンポーネントの特徴と性能は、打上げ前の地上テストと、軌道投入後の ILAS ミッションデータの解析によって確定された。地上でのテストや実験は、測器が正しく動作するかを確認するだけでなく、ILAS データの実際のデータ処理に不可欠な測器パラメータを求める目的もあって実施された。これらの地上テストは以下の項目からなる：

(1) 光源として太陽を追尾した場合の赤外・可視分光器、SES の出力信号の測定

(2) 赤外分光器の装置関数を決めるための、ガスセルと標準光源を用いたいくつかの微量ガスの測定［Suzuki et al., 1995; Suzuki, 1996］

(3) 赤外信号処理回路の時間遅れ応答特性を決定するための、赤外チャンネルのステップ入力の応答の測定

(4) 擬似太陽光源を用いた太陽追尾の確認

ILAS の各コンポーネントの性能を確認するために、この他にいくつかの地上テストも実施されている。その結果、それらのテストの間、ILAS は適正に動作することが確認された。地上テスト(2)、(3)の結果については、この後詳細に記載した。これらのテストの結果は、ILAS データの運用時データ導出にとって重要な測器パラメータを決めるのに用いられた。

1.3.1 IR 信号処理システムの時間遅れ応答特性

検出器の 44 素子それぞれについて、ILAS/PFM の赤外チャンネル出力のステップ入力に対する時間遅れ応答を測定した。ステップ入力は、1400 ℃の黒体に対しシャッターを開くことによって行った。ILAS/PFM の赤外信号処理システムの時間遅れ応答は以下のような 3 次のディレイシステムモデルで近似できる：

$$F(t)=1-\frac{T_1^2}{(T_1-T_2)(T_1-T_3)}\exp\left(\frac{-(t-t_0)}{T_1}\right) -\frac{T_2^2}{(T_2-T_1)(T_2-T_3)}\exp\left(\frac{-(t-t_0)}{T_2}\right)$$

$$-\frac{T_3^2}{(T_3-T_1)(T_3-T_2)}\exp\left(\frac{-(t-t_0)}{T_3}\right). \qquad (1)$$

T_1、T_2、T_3 は各素子について決定される。実験によって得られた各素子に対する T_1、T_2、T_3 の平均値はそれぞれ 1 σ の不確定で T_1= 0.18915 ± 0.02030、T_2=0.11037 ± 0.01738、T_3=0.09317 ± 0.01219 msec である。

全ての素子に対する遅れ時間 t_0 を決めるのには、軌道上データの太陽追尾の変動を用いた。太陽掩蔽の間、太陽追尾にいくらか変動があった場合、赤外信号強度、太陽エッジの上端・下端の位置のどちらも変動すると推測される。それゆえ、遅れ時間 t_0 を変えて、赤

外信号強度と太陽エッジの位置の自己相関関数を計算すれば、その関数の最大値を与える遅れ時間として t_0 の値を求めることができる。このようにして決められた t_0 の値は 1-σ の不確かさを持って 65±22 msec である。

1.3.2 ガスセル実験

ILAS 赤外分光検出器の各素子の公称装置関数は光学的な理論計算で求められた。この公称装置関数は、実験測定でキャリブレーションすることが必要である。最初に、ILAS 各素子の絶対測定波長をモノクロメータとガスセルを用いて測定した。その結果、波長キャリブレーション専用の素子である第 43 素子の中心波長は 11.7634 μm で公称値(11.7647 μm)の 0.01%の範囲内、また各素子の分散は 0.1298 μm と測定され、公称値（0.12915 μm）の 0.1%の範囲内であった。

次に、ILAS 赤外分光器で測定したいくつかのサンプルガスの吸収スペクトルを、市販のフーリエ変換型 IR 分光器（Bomen 社製, MB-100, 分解能 1 cm^{-1}）を用いてキャリブレートした［Suzuki *et al.*, 1995 ; Suzuki, 1996］。図 1.10 はガスセル実験の配置図である。ガスセルは直径 140 mm、長さ 1.0 m のステンレスの容器で、内壁面は電解研磨されている。光源ボックスと ILAS ボックスの間のガスセル面には、BaF_2 の光学窓が取り付けてある。大気中の水蒸気の影響を少なくするために、これらのボックスは露点温度-10 ℃以下の乾燥空気を充填されている。光源ソースは 1400 ℃の黒体である。ILAS ボックスの内側には、ILAS の測定と FTIR の測定を切り替えるためのミラーが取りつけてある。測定を行ったサンプルガスは、O_3、CH_4、N_2O、C_2H_6、CFC-11、CFC-12、HCFC-21、HCFC-22、CCl_3CCF_3 である。サンプルガスは 0.1–1000 Torr のサンプル圧力を得るために N_2 で希釈・混合した。サンプル圧力は 4.5 桁の精度で測定した。

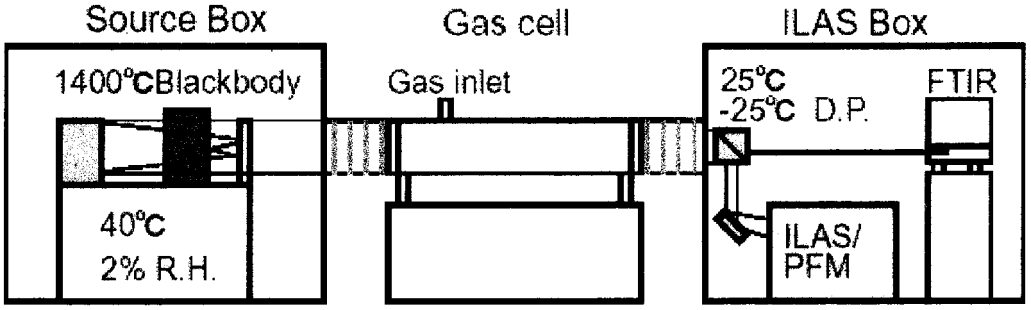
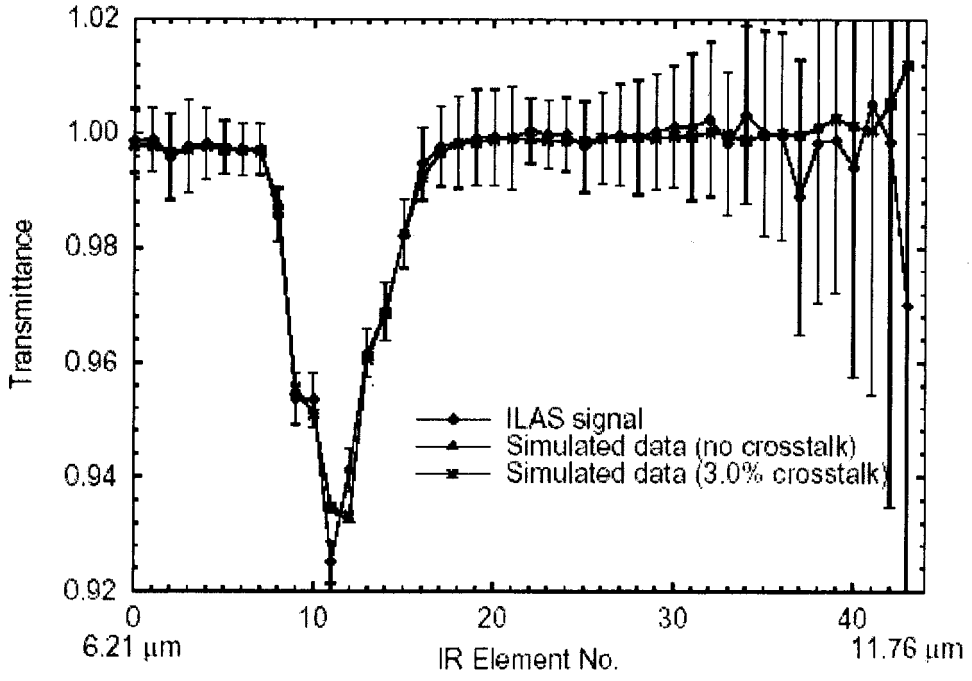


図 1.10　ガスセル実験の模式図

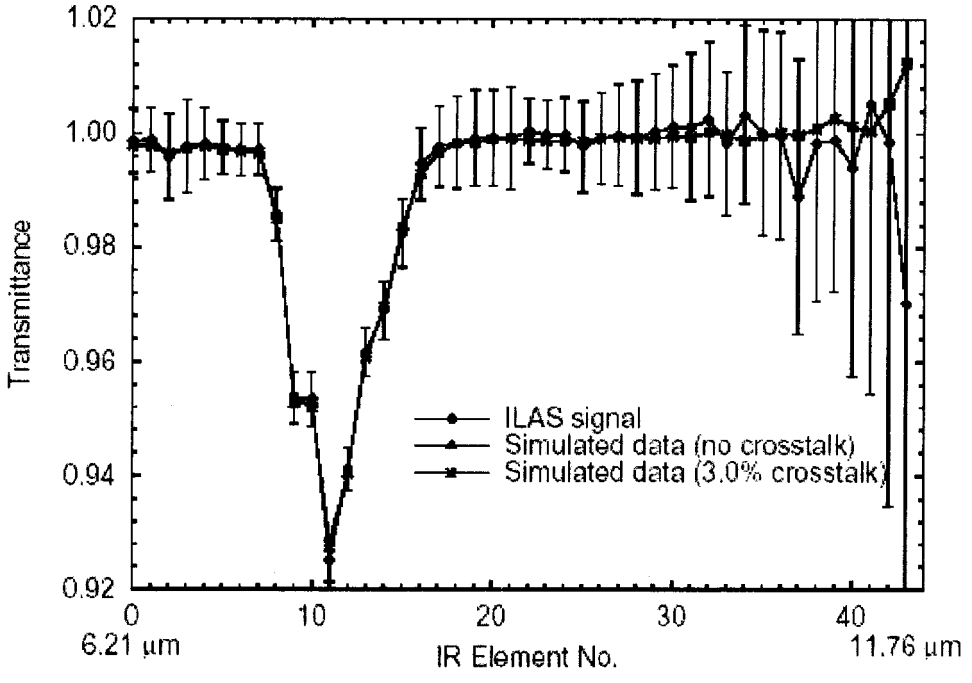
光源、ガスセル、参照用分光計（BOMEM 社製 MB100 型 FTIR、分解能 1 cm-1 のマイケルソン型干渉分光計）、ILAS は水蒸気の影響を最小限にするため、乾燥した空気を用いて露点をマイナス 10 ℃以下の条件下でセットアップされる。

次に、ILAS 赤外装置関数のキャリブレーションのために、ILAS と FTIR の透過率の出力を比較した。その結果、ILAS 赤外分光器のアライメント誤差は無視できるほど小さいので、ILAS 赤外分光器の各素子に対して、公称値の波長を用いて良いことが判った。図 1.11(a)(b)は、光路長 1 m、全圧 50.02 Torr のガスセルで、メタン 1.034 Torr の吸収スペクトルについて、ILAS で測定したもの（◇）と FTIR で測定したものを ILAS 赤外分光器の装置関数でコンボリュートして比較したものである。これらの計算において、回折格子分光器の収差も補正されている。FTIR スペクトルは 2 つの異なった記号で図中に示してあるが、近傍の素子との間の異なるクロストーク値（△：0%、＊：3%）を用いて計算したものである。図 1.11 (a)は波長の軸方向に 0.009 μm のオフセットを与えてコンボリューション計算を行った結果、図 1.11 (b)は公称値（オフセットなし）を用いた計算結果である。結果として、波長のオフセットが無く、3%のクロストークを与えた場合の FTIR スペクトルのコンボリューション計算は、図 1.11 (b)に示されているように、ILAS スペクトルとの残差が最小になっている。この装置関数は、Ver4.20 のデータプロダクトまでは、ILAS 赤外分光器の最初の運用データ処理に用いられた。

その後、赤外装置関数は、1999 年に Ver 5.10 以降のデータプロダクトのために再調整され、二つの大きな改良がなされた。ひとつは、スペクトルの分散関数を線形の関係から、光学的光線追跡法から得られる非線形の関係に改良したことである。この両者の差の最大値は、赤外チャンネルの中央の素子で 0.016 μm 程度である。もうひとつは赤外装置関数をガスセル実験データを用いて再調整する際に、透過率の計算値と実測値の差の自乗和はいくつかのガス測定結果について重みづけをして積算し、透過率の誤差を最小にするようにしたことである。



(a)



(b)

図 1.11　ILAS ガスセル実験データとスペクトルデータ（参照分光器が用いた吸収スペクトル）の理論計算値に基づいてシミュレートしたシグナルの比較。

(a) 誤差が 0.009 μm で収差がない場合、(b) 最適な位置で収差の影響がある場合。
実線（◇）：ILAS シグナル、△：シミュレートデータ（ロストークなし）、＊：シミュレートデータ（3%のクロストーク）。実験条件；CH4 : 1.034 Torr; 全圧:50.02 Torr; 光学的距離：1 m。

その結果、再調整した装置関数についての計算と実測の透過率の残差の加重和は、最初の装置関数に比べて 22.5%も減少した。また、実際のデータ導出での透過率の残差の加重和は、各層で減少した。それゆえに、赤外装置関数の再調整はデータ導出のフィッティング精度を向上させたとみなせる。

1.3.3 ILAS 可視チャンネルの装置関数の決定

ILAS 可視チャンネルの装置関数は、当初、可視分光器の検出器面上にできるスリットの像を光学理論的に計算して決めた。それに加えて、カリウム中空陰極ランプの線スペクトルを用いて、装置関数の絶対波長の補正を行っていた。その結果、ILAS 可視分光器の装置関数の FWHM は、設計より多少広く、スピン量子エネルギーの異なる O_2 A バンド P ブランチの 2 つの吸収線を区別することができなかった。

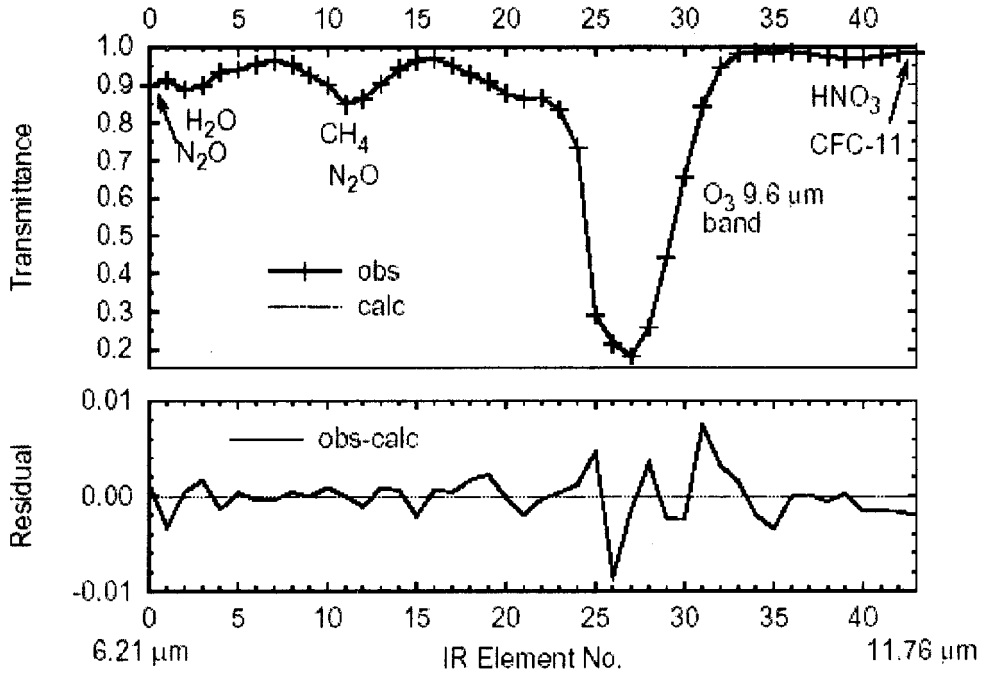
スペクトル分散の高い回折格子分光器には典型的なことだが、その環境温度が ILAS 可視分光器の装置関数の波長位置に影響を与える。ILAS 可視分光器の環境温度は、衛星－太陽間の距離の変化によって、半年間で約 4 ℃変化した。これが、可視分光器の焦点面において約 0.5 素子分の波長変化（0.5×0.03 nm = 0.015 nm）をもたらした。これは、光学ベースの熱膨張が、分光器の入射ビームの傾斜による焦点面の位置変化を起す原因になるからである。

結果として、日の出・日没のおのおのの場合について、毎週可視分光器の装置関数の波長軸を決めることにした。この目的のために、太陽の 100%信号に見られるフラウンホーファー線を用いて、計算スペクトルと観測スペクトルの 素子番号間の差の自乗和平方根（RSS）が最小になるようにした。その時、ILAS 可視分光器の装置関数は、地上設置の FTIR によって観測された高分解能太陽スペクトルでたたみこみされた［Wallance *et al.*, 1993］。可視装置関数の幅は、大気の透過スペクトルとシミュレートしたスペクトルの比較によっても評価され、残差が最小になるようにしている。

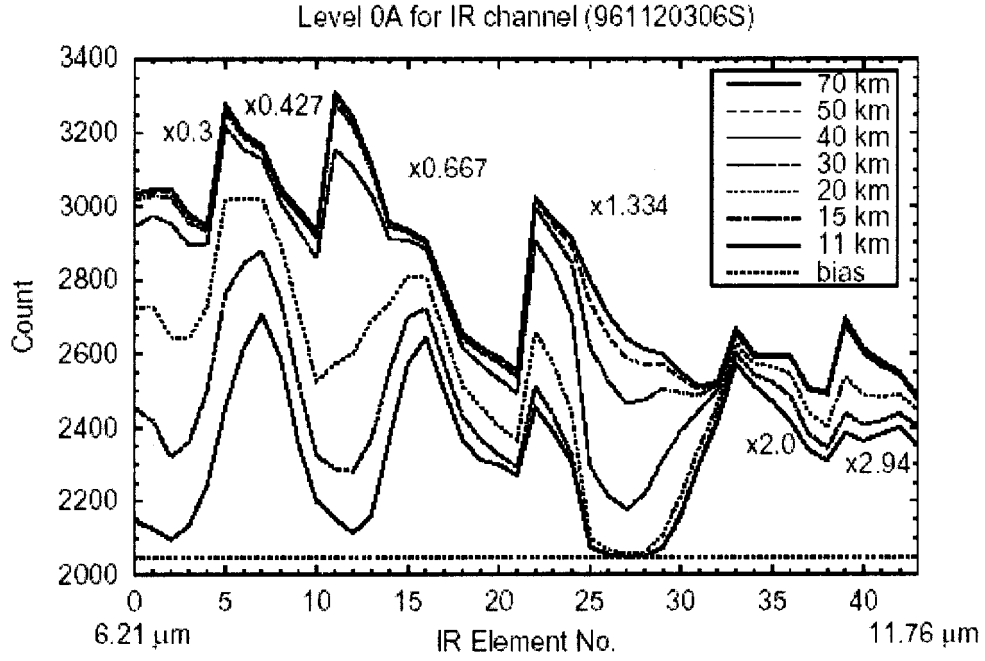
1.3.4 IR チャンネルの出力信号

図 1.12 (a)は、いくつかの接線高度における ILAS 赤外チャンネルの生の出力信号（Level 0A data ）である。ILAS 赤外チャンネルは 12 ビットの AD 変換器を用いているので、出力カウント数の最大値は 4095 に限られていた。2048 カウントのオフセットが信号に加えられていることに注意されたい。太陽放射強度の波長領域による違いを考慮に入れるために、44 の全ての素子は、図に示されているようにフォロイングアンプの異なる増幅定数で 6 つの波長領域に分割された。掩蔽観測時の出力カウント数は打上げ前に予測された値と一致した。図 1.12(b)は、接線高度 30 km における ILAS 赤外チャンネルの透過スペクトルの例で、大気を透過してきた生の出力信号を直接太陽信号（100%）で割ることで求められる。第 27 素（9.6 μm）付近に強いオゾンの吸収帯が見られる。Line-by-line 非線形最小自乗法［Yokota *et al.*, 2001］であてはめられたスペクトルも図中に示した。図 1.12(c)に示した

フィッティング残差は、9.6 μm のオゾン吸収帯の中心部を除いて非常に小さい（1%



(a)



(b) (c)

図 1.12　典型的掩蔽イベントにおける ILAS 赤外出力信号

(a) 日没掩蔽イベント（961120306S, 20NOV., path NO.306）時の各接線高度についての赤外センサーのカウント。図中の複数のファクターは、各素子の検出器のアンプの増幅率を示している。(b) 接線高度 30 km における同じイベントについての赤外チャンネル透過スペクトル（観測値、計算値）。(c) (b)を導出後の残差誤差。

以下)。これは、オゾン吸収帯付近の各素子（波長が異なる）の装置関数の部分的な不完全さに起因するようだ。

図 1.13 は直接太陽信号（100%）についての赤外チャンネル各素子の SNR の例を示したものである。SNR は、信号揺らぎの２乗平均（rms）に対する信号の絶対平均カウント数の比として定義される。図に示すように、素子番号の小さい方の SNR（1000 以上）は、素子番号の大きい方の SNR（第 43 素子で約 400）よりも大きい。これは、太陽が多かれ少なかれ約 6000K の黒体と見なされることから、太陽放射エネルギーが 530 nm 付近にピークを持ち、赤外領域では波長の増加とともに減少することによっている。

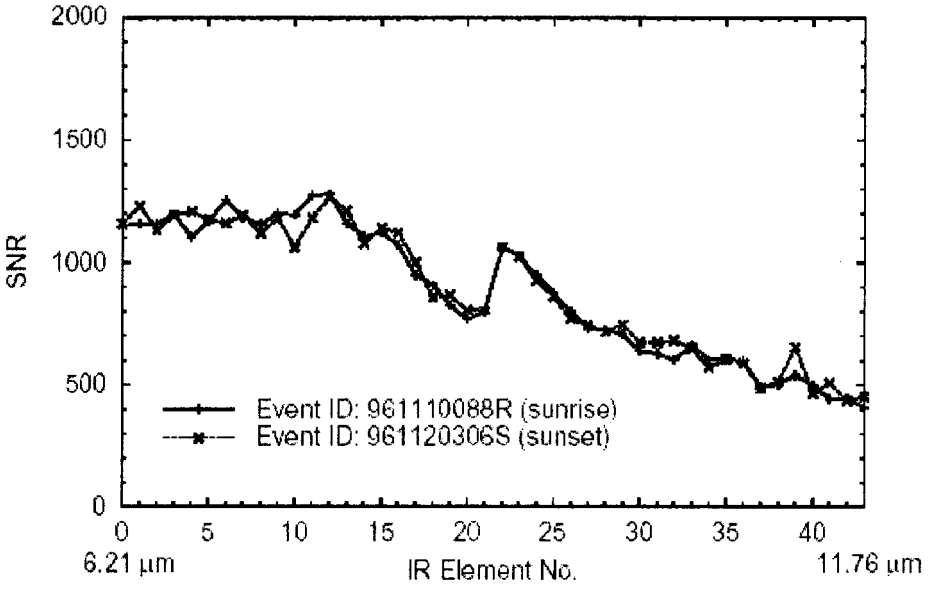


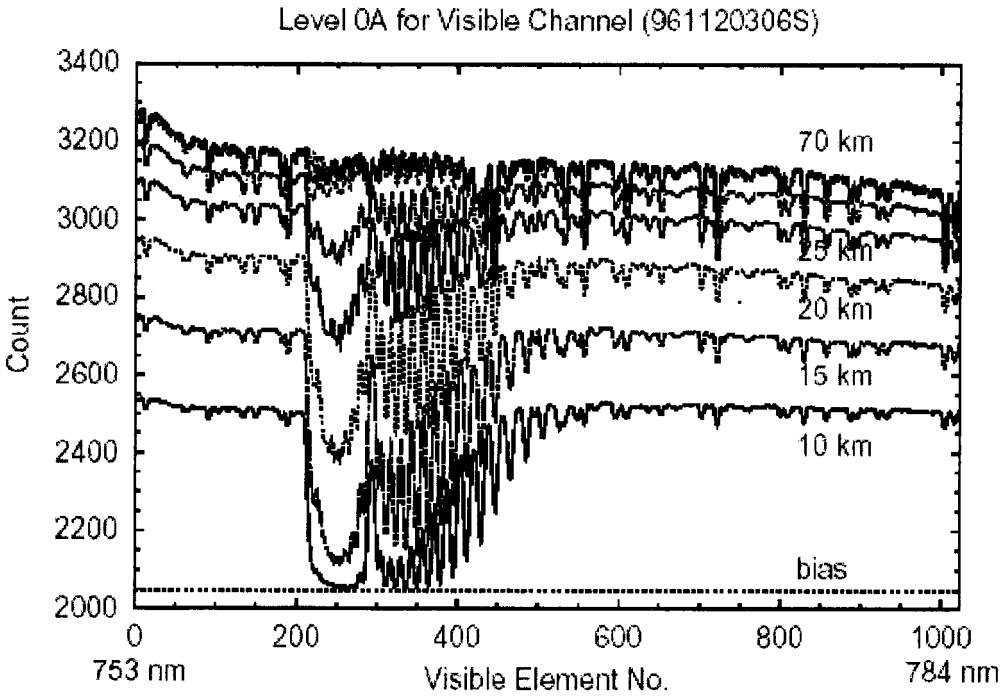
図 1.13　日昇（961110088R）および日没（961120306S）掩蔽イベントにおける直接太陽(100%)信号の赤外チャンネルのＳ/Ｎ比の例

1.3.5　可視チャンネルの出力信号

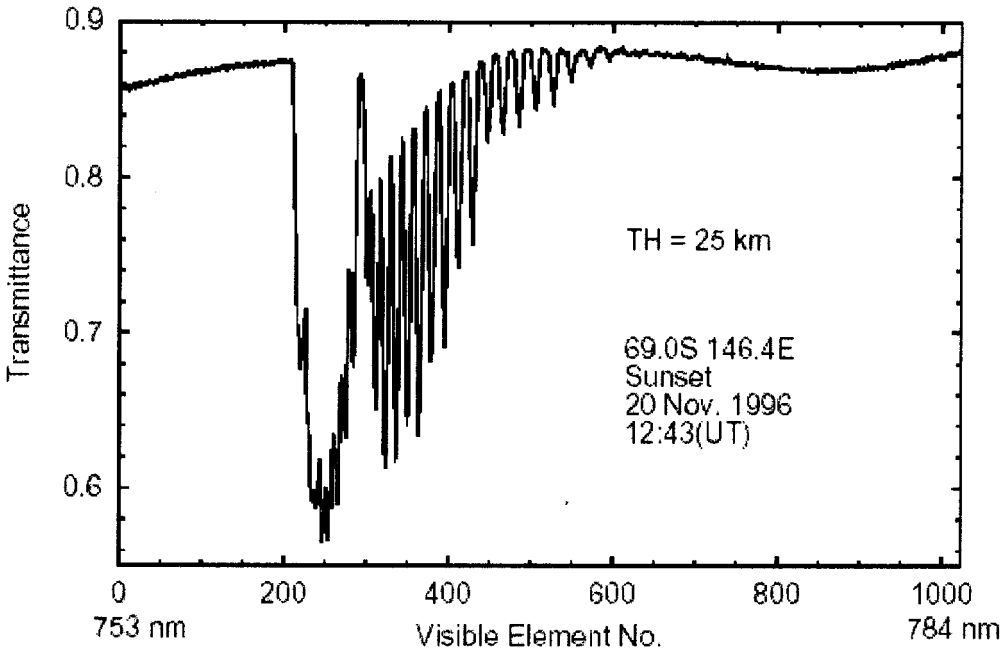
いくつかの接線高度における ILAS 可視チャンネルの生の出力信号を図 1. 14(a)に示す。酸素分子 A バンド R ブランチの吸収特性が第 200～300 素子に、P ブランチの吸収特性が第 300～500 素子に現れている。また、いくつかのフラウンホーファー線もスペクトルに見られる。

接線高度 25 km での ILAS 可視チャンネルの透過スペクトルの例を図 1.14(b)に示す。透過スペクトルとは、生の出力信号を直接太陽信号（100%）で割ったものである。酸素分子 A バンドの R ブランチと P ブランチによる強い吸収が、759～771 nm に見られる。この領域周辺の最大透過率は約 87%で 100%ではないことに注意されたい。この減衰は、(1)空気分子のレーリー散乱、(2)エアロゾルによるミー散乱、(3)オゾン Wulf band による吸収に起因する。これらの影響は、可視のエアロゾル消散係数導出時か[Yokota *et al.*, 2001; Hayashida, *et al.*, 2000]、ILAS 可視チャンネルの気温・気圧導出時に除去しなければならない［Sugita *et al.*,

2001]。



(a)



(b)

図 1.14　典型的な掩蔽イベントにおける ILAS の可視出力信号

(a) 日没掩蔽イベント（961120306S）の各接線高度に対する可視チャンネルのカウント

(b) 同じイベントでの可視チャンネル透過スペクトル

図 1.15 は、直接太陽信号（100%）の可視チャンネル各素子の SNR の例で、赤外チャンネルの場合と同様に定義されたものである。ここでも、大きい素子番号の方が SNR が減少する傾向が見られる（SNR は第 0 素子で約 1800；第 1023 素子で約 1600)。これもまた、太陽放射エネルギーの波長による変化が原因である。

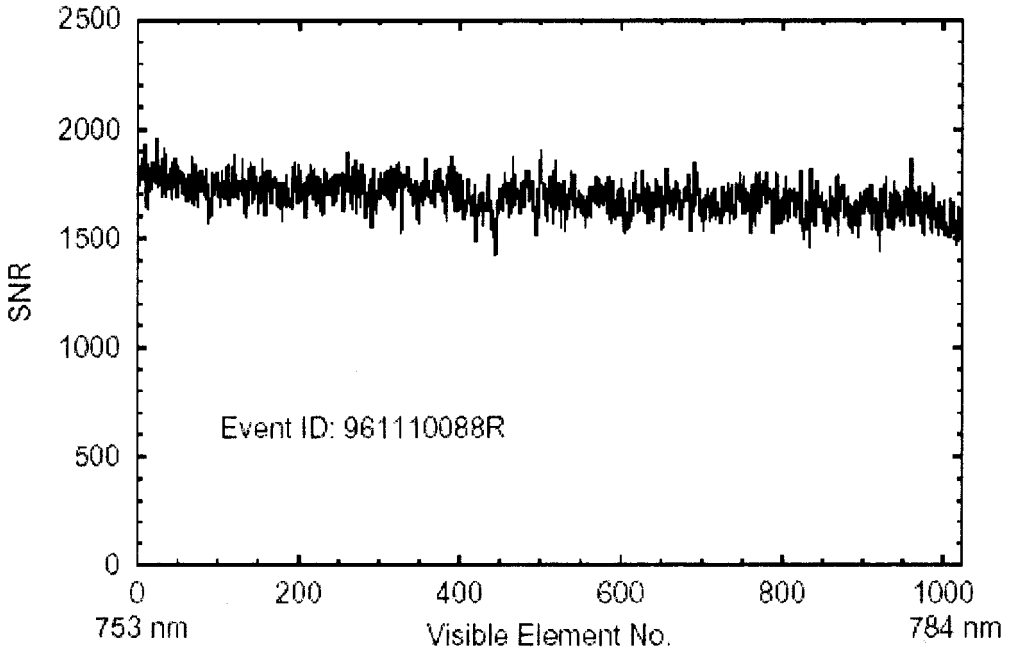


図 1.15　直接太陽信号（100%）についての可視チャンネル S/N 比の例
（日昇掩蔽イベント（961110088R））

1.3.6　太陽エッジセンサー（SES）の出力信号

ILAS は、ADEOS・太陽・地球の瞬間的な位置を用いて幾何学的な計算で IFOV の接線高度を決めるために SES を搭載している [Nakajima *et al.*, 2001]。図 1.16 は、いくつかの接線高度における SES の生の出力信号である。横軸の素子番号が小さいほど接線高度は高い。中心部の点線の四角形は、望遠鏡の入射スリットの位置と開口部の高度を示している。これらの出力信号の強度曲線から、太陽の上端・下端の位置は、各曲線の変曲点として求められる。接線高度が低くなるにつれて、空気分子とエアロゾルによる散乱によって、SES 信号強度は減少する。さらに、太陽の形状が太陽光線の屈折により楕円形になるため、太陽の上端～下端の幅も狭くなる。高度が低くなるほど、エアロゾルによる太陽光の消散が強くなるため、接線高度 30 km と 20 km の曲線の形状が明らかな非対称を示していることに注意されたい。

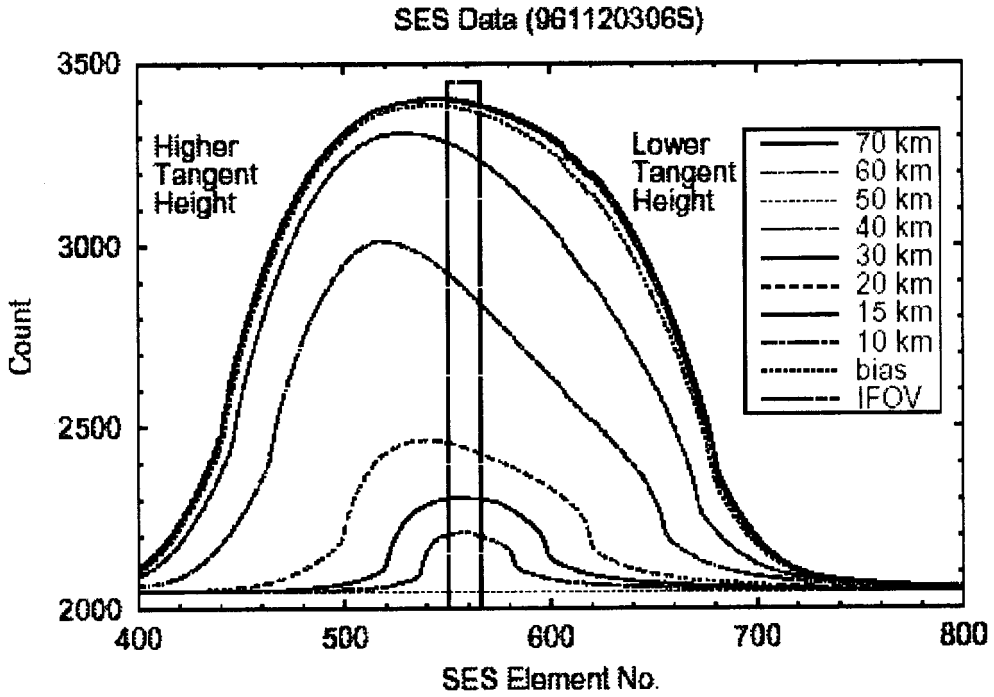


図 1.16　OE の各接線高度における SES 出力信号の例（日没時 961120306S）
図中央の長方形は、望遠鏡入射スリットの位置および開口高度に相当する。

図 1.16 に示すように、太陽のプロファイルは、我々が理論的に、そして EM テストから期待したように、図 1.17 の 747 nm の曲線のような氷丘状を示さなかった。この不一致の原因を ILAS/ PFM のバックアップ光学系を用いて調べた。その結果、予想していた波長（中心波長 747 nm、FWHM 12.5 nm）以外の望ましくない光が、光学フィルターの不完全さによって光学系を透過してきたことがわかった。図 1.17 は 590 nm 付近にピークのある 464～636 nm の光の侵入は、光学系の収差により、よりすその広がった形を持っていることを示している。その結果、図 1.17 の “Total” の曲線が、(すそがシャープに切れていないという意味で)、不鮮明な形状となっている。この影響があるにもかかわらず、各曲線の変曲点を用いて、太陽の上端・下端を決定することは、接線高度を決めるのに十分に正確な値を与えることが確認されている［Nakajima *et al.*, 2001］。

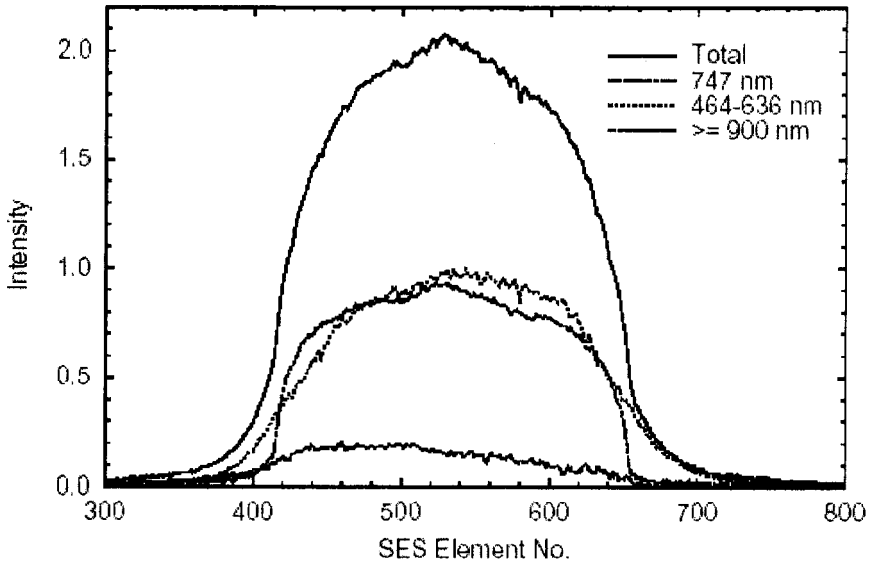


図 1.17　SES バックアップアセンブリを用いた各波長の光（747 nm, 464 – 636 nm (590 nm にピーク), 900 nm 以上）についての SES 出力シグナル

1.3.7　宇宙での 2 軸ジンバルによる太陽追尾

ILAS の 2 軸ジンバルを用いた太陽追尾は、太陽掩蔽観測にとって最も重要な技術である。太陽追尾には、3 つの基本的な必要事項がある。第 1 は、できる限り低い接線高度で太陽追尾を行うことで、これがガス導出の最低高度を決める。第 2 は導出誤差を減らすために、追尾の揺らぎを最小にすること。最後に、追尾中心位置が、太陽の輻射中心に対して、ランダムあるいは未知のオフセットを持たないこと。これが、観測と理論の透過率の違いから発生する導出の系統誤差を最小にするだろう。

図 1.18 は日の出・日没観測時の太陽追尾の最低高度の分布を示したものである。日没観測時の最低接線高度の分布は、9–10 km にピークを持っており、日の出観測時には、12 – 13 km にピークがある。この違いは 2 つの影響によって生じている。ひとつは、日の出直後、太陽の形が屈折の効果によって歪んでいる時に、短い時間で太陽の輝度中心を捕らえることの困難さである。もうひとつは、日の出観測開始時の、実際の太陽の位置と、衛星天文暦データを用いて計算した太陽位置の間の不一致である。コマンドの送信容量に制限があることから、この予測が実施され、地上から ILAS へ送信されるのは、2 日に 1 回だけである。

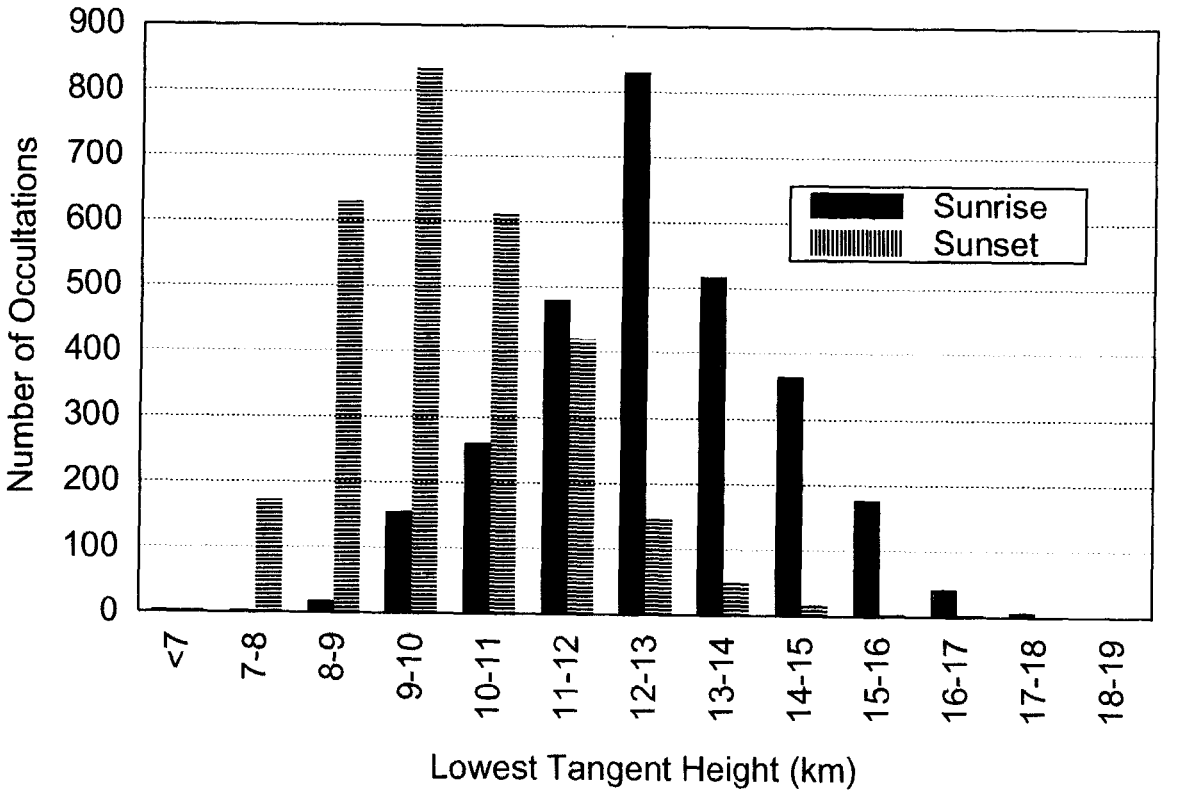


図 1.18　最低軌道高度の統計

このデータは、追尾開始時間が原因で、日没時の追尾高度が日昇時の追尾高度より低いことを示している。

図 1.19 はある日没掩蔽時の、太陽の上端・下端およびそれらの中間点の SES 素子番号を示している。すべての ILAS データを含むデータの最小単位である 1 メジャーフレームは、83.139 msec のサンプリングタイムに相当する (12.028 Hz サンプリング)。上端・下端は SES データの変曲点として決められる [Nakajima *et al.*, 2001]。上端・下端において、太陽追尾に小さな揺らぎを起こす素子はほとんど無かった。太陽追尾装置の最大の追尾揺らぎは、最大で約 25"で、接線高度 0.4 km に相当する。2450 メジャーフレーム周辺と掩蔽現象終了付近の鋭いスパイクは、不完全な太陽縁辺の決定で生じた間違ったデータで、データ導出時に除去される [Yokota *et al.*, (本技術資料　第 2 章)]。太陽が地球大気内に入ってきたとき、上端・下端の差で与えられる太陽の半径は、屈折の影響によって 2460 メジャーフレーム付近から減少しはじめる。それにもかかわらず、太陽中心点 (図 1.19 の middle point) は第 560 素子付近で一定値をとる。この事実は、太陽追尾が掩蔽イベントの間正常に機能し、エッジ検出のアルゴリズムも適切に動作していることを実証するものである。その詳細は [Nakajima *et al.*, 2001] に示されている。

追尾光学系の輻射中心と入射スリットの輻射中心の光学的なオフセットは、打上げ前に測定されている。それは鉛直方向に 6"、水平方向に 28"で、太陽の半径 (15'32.58") に比べて無視できる大きさである。

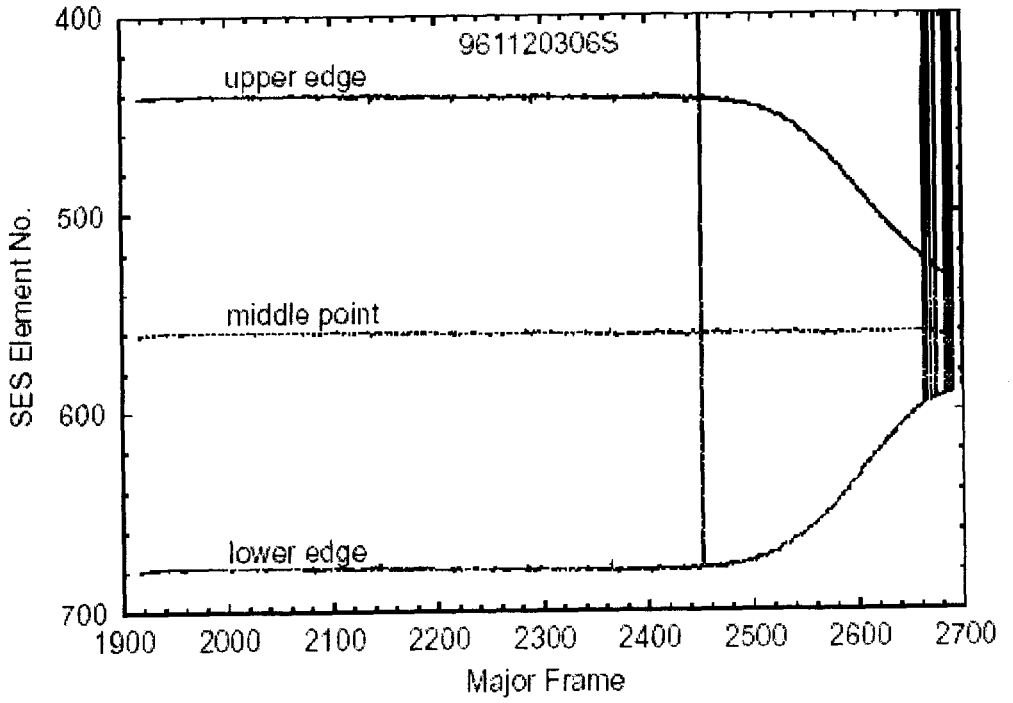


図 1.19　ある日没掩蔽イベント（961120306S）中の SES データから決定した太陽の上端・下端の時系列

1 メジャーフレームは 83.139 ミリ秒に相当する。中間点は上端と下端の平均。図中のスパイクは不完全なエッジの決定による誤ったデータである。

1.3.8　測器温度と出力信号の長期変化

打上げ後の ILAS の光学ベンチの温度（以下、ILAS 温度という）の長期変化を図 1.20 に示す。ADEOS の最初の点検確認期間終了後、すべてのセンサーの電源を投入し、結果として 1996 年 10 月 30 日の ILAS 温度は 7 ℃上昇した。その後、ILAS 温度は 1 月末にピークを持ち、振幅が約 4 ℃の緩やかな正弦的変化パターンを示した。この変化は、地球と太陽の距離の変化によるものと考えられる。

衛星センサーの絶対信号レベルは、宇宙の苛酷な環境のために徐々に劣化することが予測される。ILAS の場合、図 1.21 に示すように、太陽の 100%信号は打上後徐々に減少している。より短い波長を検出するセンサー（可視チャンネル、SES、FSPS）は、赤外チャンネルあるいは CSPS（示していない）よりも大きく低下している。この低下の原因は、部分的には汚染物質の付着によると考えられる。しかしながら、絶対信号レベルの変化は、この低下が各分光器の波長方向に十分滑らかである限りは、データ導出に影響を与えない。というのは、参照値として 100%信号が測定されており、言い換えれば、測定は各掩蔽時に自己校正されているからである。さらに、絶対カウント数の減少は SNR を最大にするために異なるアンプ利得を適用することによって調節できる。

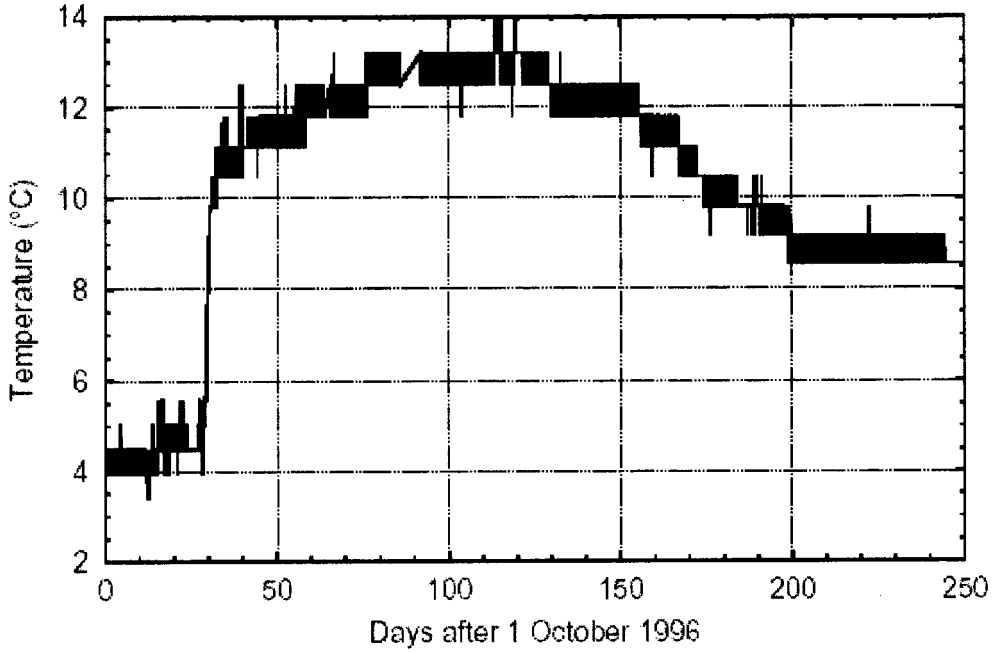


図 1.20　ILAS 光学系ベース部分（House Keeping TEMP8 データ）、望遠鏡近辺の気温の記録
気温の値は次の近似を用いて計算した： T(℃)=-ln(0.02*[HK count]/1.3363)/0.0316。1996 年 10 月 30 日、全ての ADEOS 機器の電源投入後すぐに、気温が約 7 ℃上昇した。気温は、太陽－地球間の距離が短くなる 1 月末にピークを示している。

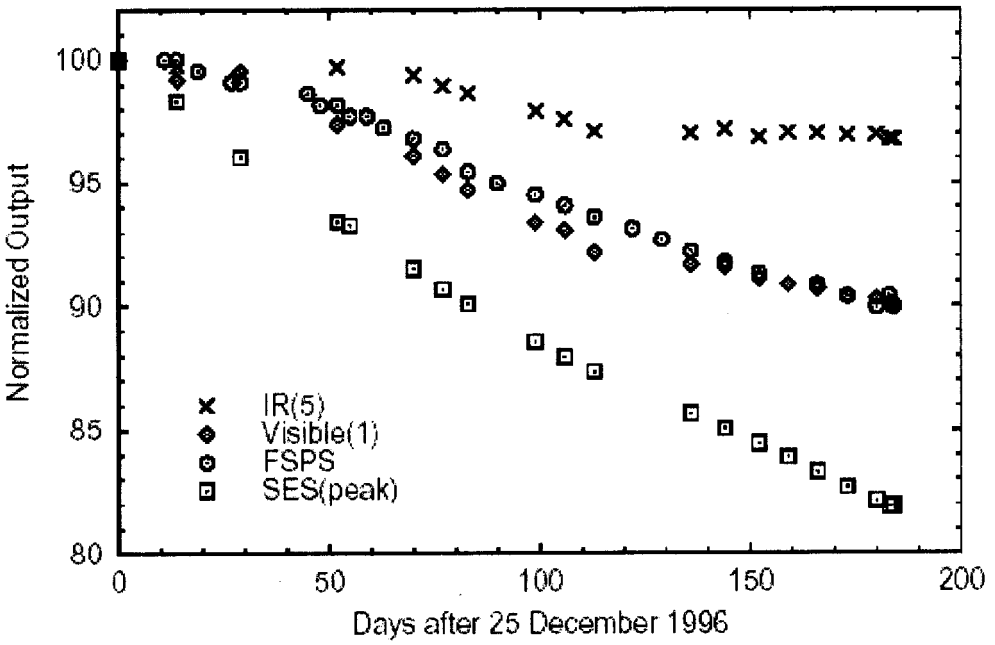


図 1.21　赤外・可視・SES・FSPS 出力信号の長期変動
赤外信号は可視・SES・FSPS よりゆっくり減少するが、自己キャリブレーション能力により信号の減衰はデータ導出に影響しない。

1.4 まとめ

ILAS は環境庁によって成層圏オゾン層環境の研究を行うために設計・開発された。そして、ILAS の PFM は 1994 年 9 月に製作された。ILAS は、太陽追尾装置、望遠鏡、リレー光学系、赤外・可視分光器、SES などから構成されている。ILAS は 1996 年 8 月 17 日に ADEOS 衛星に搭載されて打上げられた。イニシャル点検終了後、1996 年 10 月から 1997 年 6 月にかけて、北半球と南半球について、ILAS は約 6700 の太陽掩蔽観測を実施した。

ILAS の各コンポーネントの性能について、打上げ前テストデータと軌道上性能データを用いて特性を示した。打上げ前は、ガスセル測定、時間応答測定、太陽追尾試験、中空陰極ランプ測定などが行われた。軌道上での性能チェックでは、太陽追尾性能、赤外・可視分光器の生信号、赤外・可視分光器の SNR、各センサーの出力信号の長期変動が調査された。

赤外チャンネルの時間遅れ応答は、ステップ状の赤外入力を用いて特性が求められた。ILAS の赤外・可視分光器の装置関数は、理論光学計算と、打上げ前のガスセル実験・軌道上でのデータを組合せて決定された。ILAS の光学ベンチの温度は通常の運用期間中、約 4 ℃変化しているが、これは、地球と太陽の距離の変化に起因する。この温度変化によって、可視分光器の絶対波長はわずかしか変化しないことがわかった。この影響を補償するため、可視分光器の装置関数は、実際の 100%データに見られる太陽フラウンホーファー線を用い、日昇・日没観測の各々について毎週決定することにした。

100%直接太陽信号に対する赤外チャンネル各素子の SNR は 400～1200、可視チャンネルでは 1600～1800 であった。太陽追尾の揺らぎは最大 25"未満で、接線高度 0.4 km に相当する。日没掩蔽時のいくつかのケースでは、ILAS は接線高度 10 km 以下まで太陽を追尾することができた。

SES データから太陽のエッジを決める方法は正確に機能しており、適切な接線高度観測情報を与えていた。SES、可視チャンネル、FSPS、CSPS、赤外チャンネルの出力信号レベルは ILAS 運用期間中わずかに減少したが、これは汚染物質の付着によるものである。この絶対信号レベルの低下は、太陽掩蔽法の自己キャリブレーション原理によりデータの導出には影響を与えない。

全体として、ILAS は軌道上の運用期間中、設計通り正確に機能し、オゾン層の研究にとって有益なデータを収集した。

2. 改良型大気周縁赤外分光計(ILAS)のデータ解析アルゴリズム（Version 5.20）

要旨

成層圏のオゾン層観測を目的とした太陽掩蔽法による衛星センサである改良型大気周縁赤外分光計（ILAS）を搭載した地球観測プラットフォーム技術観測衛星（ADEOS）は、1996年8月に打上げが成功し、太陽同期準回帰軌道に投入された。ILASの運用観測は1996年11月から1997年6月にかけて、高緯度地域を対象に行われた。本技術資料は、ILASにより観測された赤外スペクトルデータから、オゾン、硝酸、二酸化窒素、亜酸化窒素、メタン、水蒸気などの気体微量成分の高度分布を導出するためのデータ処理アルゴリズム（Ver. 5.20）について記述したものである。導出手法としては、各大気層レベルにおける個々の気体微量成分の体積混合比を同時推定するために、オニオンピーリング法が気体微量成分の高度分布情報の導出に用いられ、非線形最小二乗法がスペクトルフィッティング法として用いられている。

本技術資料では、推定された気体微量成分に付随する誤差（内部誤差と外部誤差）の評価についても、データの繰り返し精度と比較することにより、詳細に議論している。スペクトルフィッティングの残差から計算された内部誤差は、一般に繰り返し精度の計算値より悪い値であった。このことは、理論透過率データをシミュレーションするためのForward Modelに何らかの未知要因が取り込まれていなかったか、またはモデル中の何らかのパラメータが不正確であったことを示唆している。なお、外部誤差は繰り返し精度と同程度の大きさであった。

ノンガス成分補正法（non-gaseous correction）の誤差による影響を調査するために、数値シミュレーションを実施した。バックグランド・レベル程度の濃度の硫酸エアロゾルの場合には導出鉛直プロファイルへの誤差の影響はほとんどないが、波長780 nmで10^{-3} km^{-1}オーダーの消散係数を有するPSCの場合には、いくつかの気体分子の高度分布に無視できない影響を与えることが分かった。

更なる改良により将来解決されるべき問題点は若干残されているものの、ILAS Ver. 5.20アルゴリズムは、科学的に意義深い気体の高度分布を導出していることが示された。

2.1 はじめに

クロロフルオロカーボン等の人工起源物質によるオゾン層の破壊について、その機構の解明と長期的なトレンド評価、さらには将来的な予測を行うことは依然として重要な課題である。人工衛星搭載センサは、そのための重要なデータの取得手段として、これまで数多く開発されてきた。たとえば、LIMS [Gille and Russel, 1984]、TOMS [Heath *et al.*, 1975]、SAGE、SAGE-II [Chu and McCormick, 1979 ; Mauldin *et al.*, 1985]、HALOE [Russell *et al.*,

1993] 、CLAES [Roche *et al.*, 1993] 、MLS [Barath *et al.*, 1993] 、ISAMS [Taylor *et al.*, 1993] 、POAMⅡ [Glaccum *et al.*, 1996] 、POAMⅢ [Lucke *et al.*, 1999] などがそうである。日本の環境庁においてもその重要性に鑑み、独自のセンサとして太陽掩蔽法を観測原理とする改良型大気周縁赤外分光計（ILAS）を開発し、それを宇宙開発事業団（NASDA）が打上げたADEOS衛星に搭載し、運用観測を行った [Sasano *et al.*, 1999] 。太陽掩蔽法は、SAGE、SAGE-Ⅱ、HALOE 等でも採用されている測定原理であり、大気圏外で測定した太陽光源により観測ごとに校正が行われることから、機器特性の劣化等の影響を受けにくく、またSN比が高いという特長を有している。太陽掩蔽法は、Limb放射観測法に比べて劣る点（1日に特定の緯度帯を低い観測頻度でしか観測できない点、夜間部の観測ができない点など）もあるが、成層圏微量気体成分の高度分布を導出するための観測手法として最も信頼性の高い観測手法とされている。

ADEOS衛星は、1996年8月17日に、種子島宇宙センターより成功裏に打上げられた。ADEOSは、高度約800 kmで軌道傾斜角98.6度の太陽同期準回帰軌道を取り、41日で同一軌道に戻る。極軌道衛星であることと、太陽掩蔽法を測定原理とすることからILASの観測する緯度帯は、北緯57-72度、南緯64-89度の高緯度地方に限られた [Sasano *et al.*, 1999a] 。また、ADEOSの降交点通過（赤道を北から南に横切る）時刻は地方時の10:41a.m.で、約101分で地球を一周する。すなわち、1日に地球を約14周する。したがって、ILASは、南北両半球でほぼ等間隔（約25度）の経度で、一日にそれぞれ約14地点の観測を行った。ADEOSの太陽電池パネルの故障により、運用開始から約8ヶ月後の1997年6月30日に運用を停止した。ILASが観測を行った約8ヶ月の運用期間中に、南北両半球で合わせて6,679地点のデータが正常に取得された。

ILASは、太陽掩蔽法を測定原理とするセンサで、望遠鏡、太陽追尾センサ、可視分光計部、赤外分光計部、太陽エッジセンサ部、電子回路部により構成されている [Suzuki *et al.*, 1995 ; Nakajima *et al.*, 本技術資料　第1章] 。可視チャンネルの測定する波長帯は753～784 nmである。この波長帯には、酸素分子の吸収スペクトル帯（O_2 *A*-band）が含まれ、その情報から気温・気圧と780 nmにおけるエアロゾル消散係数の高度分布を導出する。赤外チャンネルは波長6.21～11.77 μm（850～1,610 cm^{-1}）を44素子の焦電型検出器（分光分解能約0.13 μm）によって測定する。赤外チャンネルからは、O_3、HNO_3、NO_2、N_2O、CH_4、H_2O などの気体微量成分の体積混合比の高度分布を推定する。太陽エッジセンサでは、観測中の太陽光球の鉛直方向の輝度情報を捉え、その信号は観測光路の高度（接線高度）を求める際に利用される[Nakajima *et al.*, 本技術資料　第3章]。装置の瞬時視野（IFOV）の形状は、赤外チャンネル、可視チャンネルともに矩形である。視野の中心は、太陽光球の光の重心を追尾するように制御されている。

ILASデータの処理プロダクトとしては、1998年6月にVersion 3.10のオゾン、硝酸、可視波長（780 nm）におけるエアロゾル消散係数の3つのパラメータについて、インターネット上のWebを通してデータを一般に公開した。Version 3.10アルゴリズムについては、

[Sasano *et al.*, 1999] や [Yokota *et al.*, 1998] に簡単に記述されている。これらのデータに関する検証（Lee *et al.*, 1999 ; Burton *et al.*, 2000 ; Koike *et al.*, 2000 ; Sasano *et al.*, 2000）や、解析の結果（Hayashida *et al.*, 2000 ; Kondo *et al.*, 2000 ; Sasano *et al.*, 2000）が報告されている。技術資料では、その後の検討を踏まえた Version 5.20 アルゴリズムと、それに基づいて処理された ILAS プロダクトの測定精度について詳しく記述する。Version 3.10 から Version 5.20 への、アルゴリズムの主たる改訂項目は、観測光路の接線高度の決定手法改訂、レベル 0 データの平滑化手法改訂、可視及び赤外チャンネル装置関数の再調整、太陽周縁減光の考慮、導出対象気体（未知パラメータ）の変更、気体濃度導出手法における高度別未知パラメータの制限除去、気候値モデル大気の改訂である。

本技術資料では、第 2 節において簡単に ILAS の測定原理、機器構成、データ処理の流れについて触れる。続いて、3 節では ILAS の赤外信号の前処理に相当する事項について述べる。4 節では、Forward Model による理論透過率の算出方法について示す。5 節では、その理論透過率を用いて ILAS の観測信号から未知パラメータを導出する手法について述べる。6 節では、導出された結果に付与されている標準誤差情報（エラーバー）の算出方法を示し、導出結果における誤差について議論する。

なお、ILAS で利用している参照大気モデルデータについては Appendix A に示す。また、ILAS の可視チャンネルを用いたエアロゾル消散係数（780 nm）の導出方法については、[Hayashida *et al.*, 2000] に、Version 4.20 アルゴリズムの概要が報告されている。本論文では、その後に変更になった点を中心に、Appendix B に示す。

2.2 ILAS 測定の概要

2.2.1 測定原理

ILAS は、太陽掩蔽法に基づいて、大気を構成する気体成分混合比や、エアロゾル消散係数の高度分布を測定する。太陽掩蔽法では、大気中を通過する太陽光の減衰量を波数の関数として測定し、その減衰をもたらす原因物質である大気中の種々の気体成分やエアロゾル量を算出するものである。また、大気の異なる高度層を通過する太陽光の測定データを解析することにより、気体成分混合比やエアロゾルの高度方向の存在量を推定する（スペクトルフィッティングとインバージョン）。今、分光波数を ν、大気圏外の太陽光の分光放射強度を $I_0(\nu)$とし、大気圏の光路 s を透過後に ILAS に達する放射強度を $I(\nu)$とする。このとき、両者の関係は Beer-Bouguer-Lambert の法則に従い、

$$I(\nu) = I_0(\nu)\exp(-\int_s \kappa(\nu)\rho ds) \qquad (1)$$

と表される。ここで $\kappa(\nu)$ [cm^2/molec]は光路中の吸収気体の吸収係数、ρ [molec/cm^3]は吸収気体の密度である。

ILAS の観測出力は、各素子のカバーするスペクトル幅が十数 cm^{-1} から数十 cm^{-1} と広いために、数式(1)を各素子毎にスペクトル感度 $\Psi_k(\nu)$ で重みをつけて波数領域で積分した量となる。すなわち、素子 k (k=1,...,44)の出力する信号 f_k は波数範囲を ν_{kL} から ν_{kU} までとすると、

$$f_k = \int_{\Omega} \int_{\nu_{kL}}^{\nu_{kU}} \Psi_k(\nu, \omega) I(\nu, \omega) d\nu d\omega \qquad (2)$$

となる。ここでΩ及びωは瞬時視野(IFOV)の立体角であり、$\Psi_k(\nu, \omega)$は素子 k の「装置関数(instrument function)」と呼ばれる。$\Psi_k(\nu, \omega)$は、分光計に固有の特性であり、実際には設計値に基づく光学シミュレーションの理論計算結果と、打上げ前のガスセル実験結果とから高精度に求められる関数形である。ILAS では、f_k は数式(2)に、更に後述の素子間のクロストークが加わったものが素子出力値となる。詳しくは、4 節で示す。なお、f_k を ILAS の Level 0 (L0)データと定義する。太陽掩蔽法では、衛星の進行に伴って、異なる接線高度を通過する光路について、数式(2)で表される量が測定される。

素子 k に対応する、観測光路 s に沿った総合的な大気透過率 y_k は、大気圏外における太陽直達光の観測出力を f_k^0 として、

$$y_k = f_k / f_k^0 \qquad (3)$$

により計算される。y_k を、素子 k の疑似透過率と呼び、これを ILAS の Level 1 (L1)データと定義する。濃度等の導出に際しては、理論計算により大気の透過率を計算し、これと上式で求めた疑似透過率とが比較される。導出された気体の体積混合比の高度分布は Level 2 (L2)データと呼ばれる。

日昇、日没の ILAS の 1 回の観測（これを occultation event (OE)と呼ぶ）における連続データには、次のようなデータが含まれている。日昇の OE を例にすると、素子 k に受光される信号の変化は、測定シーケンスに従って、深宇宙$\left(f_{k,before}^{offset}\right)$の観測、太陽を捕捉してからの大気透過部$(f_k)$の観測、大気圏外の太陽直達光$\left(f_k^0\right)$ の観測、観測視野が太陽を外れた後の再度の深宇宙$\left(f_{k,after}^{offset}\right)$の観測と続く（図 2.1 参照)。深宇宙の 0%レベル信号は 2 回観測され、大気透過部における 0%レベルのトレンド的変動を、直線内挿で推定する。実際上は、ほとんど 0%レベルの変動は無視できる。一方、100%レベル信号は、外挿によって大気透過部における 100%レベル信号を推定する。なお、日没事象では、日昇の測定シーケンスのうち、f_k と f_k^0 の観測が逆になるのみで、トレンド補正は同様に行われる。

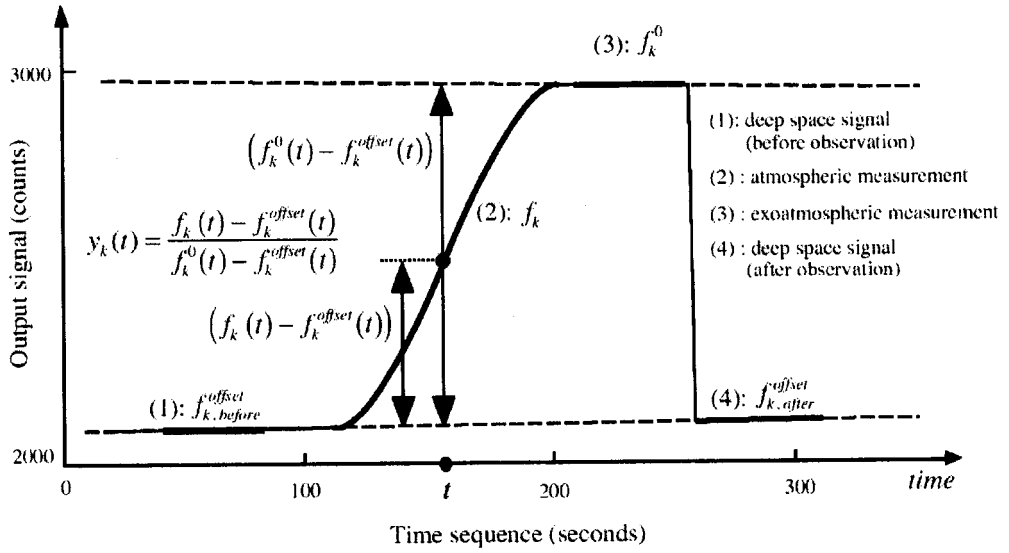


図 2.1　日昇イベントを例にした第 k 素子の ILAS 観測信号の時間変化と、擬似透過率算出時のオフセットレベルの内挿及び太陽信号の外挿の概念図

1OE の観測中に、信号は約 12 Hz でサンプリングされ、12 bit データに AD 変換されて記録される。そのデータの単位をメジャーフレームとよぶ。メジャーフレームには、赤外分光計データ（蓄積 0.9 msec）、可視分光計データ（蓄積 20.5 msec）、太陽エッジセンサデータ（蓄積 20.5 msec）の順に格納されている。メジャーフレーム内での時間的なずれは、メジャーフレーム間の内挿計算により、赤外分光計データと可視分光計データをそれぞれ 21 msec 後方にずらして、太陽エッジセンサデータの取得時刻に一致させた上でその後のデータ処理を行っている。

2.2.2　機器構成

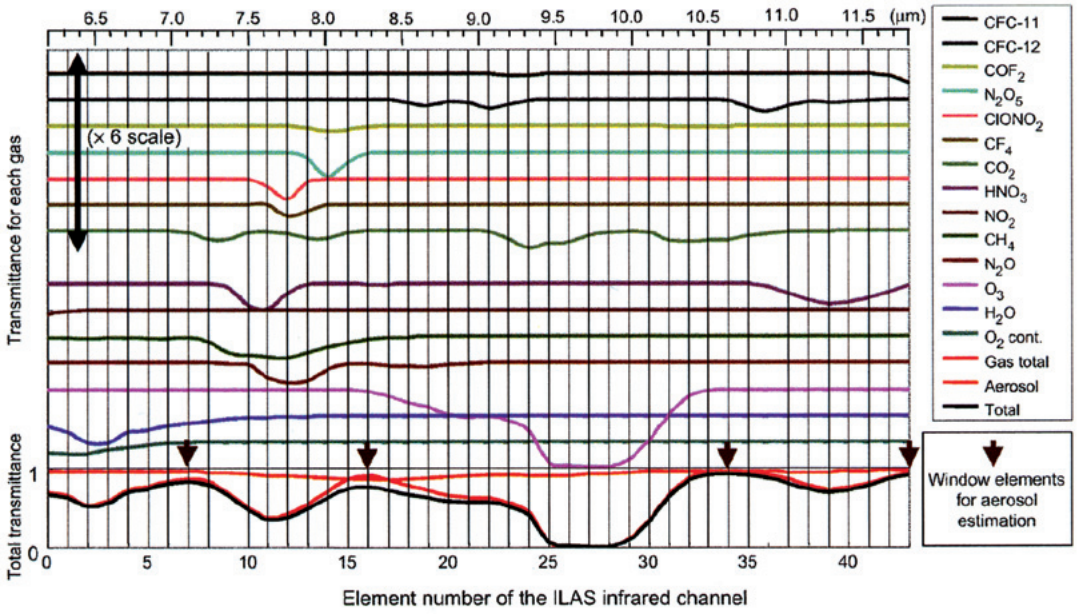
ここでは、ILAS のデータ処理アルゴリズムの説明に必要な ILAS の機器情報について概略を述べる。ILAS 装置の詳細については、 [Nakajima *et al.*, 本技術資料　第 1 章] を参照されたい。

赤外分光計

赤外分光計からの信号は、ILAS のガス濃度導出処理で利用される。O_3、HNO_3、NO_2、N_2O、CH_4、H_2O などの微量成分の体積混合比の高度分布を同時に推定するために、赤外チャンネルは、NO_2 の 6.2 μm 帯から HNO_3 の 11 μm 帯までカバーする。波長 6.21～11.77 μm（850～1,610 cm^{-1}）に配置された 44 素子の焦電検出器からの出力信号は、前置増幅器とロックインアンプを通して増幅される。

プレート 2.1 は接線高度 20 km での 44 素子に対する大気透過率を示している。この大気透過率は、南半球の 1 月の ILAS 気候値データ（Appendix A 参照）を用いた Forward Model

によって理論計算されたものである。この図は、気体成分ごとの波長の違いによる吸収スペクトルを示している。Version 5.20 アルゴリズムでは、赤外チャンネル信号から 9 つの気体成分を同時推定している。そのうち、O_3、HNO_3、NO_2、N_2O、CH_4、H_2O の 6 つは標準プロダクトで、他の 3 つの CFC-11, CFC-12, COF_2 は研究用プロダクトである。そのほか、導出はしないが吸収の影響を考慮している微量気体として、CO_2、N_2O_5、$ClONO_2$、CFC-14 (CF_4)がある。プレート 2.1 には、これらの気体全てについて個々の吸収スペクトルが示されている。



プレート 2.1　ILAS 赤外チャンネル 44 素子の高度 20 km における擬似透過率の例
ILAS の高額分解能での各吸収気体による寄与の位置と大きさについても示す。
#7, #16, #34, #43 素子の大気の窓素子については、矢印で示す。

赤外分光計では、Planck の放射則によって太陽輝度スペクトルが長波長側で減衰することを考慮して、44 の素子を 6 つのブロックに分割し、増幅器のゲインが切り替えている。このため、各素子の SN 比は、概して言えば小さい番号（短い波長）の素子ほど大きく（約 1200）、大きくなるにつれて SN 比は悪くなる（約 500）。

赤外装置関数

各素子のカバーするスペクトル範囲は波長に対してほぼ等間隔であり、各素子の分光分解能は約 0.13～0.14 μm である。各素子からの出力信号は、隣接する素子のクロストークの影響を受ける。その主要因は、焦電検出器アレイのカバーとして設置されている光学フィルタ面と焦電素子表面との間で生じる光の多重散乱、すなわち光学的クロストークであると考えられている。衛星打上げ前の焦電検出器アレイ単体についての室内実験と、打上げ後の軌道上での ILAS 装置特性の評価結果より、隣接する素子との間に 2.25%のクロス

トークがあることがわかった。

可視分光計

可視分光計は、1024 素子 MOS 型フォトダイオードアレイを用いて、波長 753～784 nm を測定する。この波長帯には、酸素分子の吸収スペクトル（O_2 *A*-band）が存在し、気温・気圧と 780 nm におけるエアロゾル消散係数の高度分布を導出する。各素子の分光分解能は、約 0.15 nm である。可視分光計から算出される気温、気圧の精度については、まだ確定的な評価がなされていないため、赤外チャンネルデータ処理に必要な気温と気圧の高度分布情報としては、ILAS の測定位置と時刻に補間した UKMO データ [Swinbank and O'Neill, 1994] を利用している。UKMO データの詳細は、Appendix A に示す。

太陽追尾系（太陽エッジセンサを含む）

太陽追尾系は、太陽捕捉のための粗センサ、追尾のための精センサと、２軸ジンバルによる追尾機構から構成される。オンボードプログラムによって、粗センサと精センサの情報から、視野が太陽光球の光の重心と一致するように追尾制御される [Nakajima *et al.*, 本技術資料　第 1 章] 。追尾の際に生じた約 960 msec 周期の揺らぎを除去するために、L2 データ処理の第一段階で、ローパスフィルタによる平滑化処理を施している。

太陽エッジセンサは、可視チャンネル部と同様の 1024 素子 MOS 型フォトダイオードアレイを用いて、観測中の太陽光球の鉛直方向の輝度分布情報を与える。そのデータから、太陽光球の上端位置を求め、分光計の IFOV の方向と太陽光球上端の角度差を測定する。これと、衛星・地球・太陽の位置関係から、観測光路の屈折と光路の観測高度（接線高度）を幾何学的な計算によって求める。接線高度の決定方法の詳細については、[Nakajima *et al.*, 本技術資料　第 3 章] を参照されたい。

瞬時視野（(IFOV）と高度分解能

装置の IFOV の大きさは、赤外チャンネルが鉛直 1'40"×水平 13'50"、可視チャンネルが鉛直 1'40"×水平 2'4"で、形状はいずれも矩形である。これらの瞬時視野の大きさは、赤外チャンネル、可視チャンネルともに、接線高度位置において鉛直方向に約 1.6 km に相当する。信号は 12 Hz でサンプリングされる。大気の屈折の影響で、サンプリングされる高度の間隔は、接線高度によって変化する。数値シミュレーションによれば、衛星の進行に伴う接線高度の変化量は大気の屈折を考慮に入れると、おおよそ、高度 15 km で 0.11 km、高度 25 km で 0.17 km、高度 35 km で 0.22 km、高度 45 km で 0.26 km、高度 55 km 以上では 0.27 km である。

2.2.3 データ処理の流れ

以下に、ILAS データ処理の流れの概要を示す。はじめに、測定された赤外チャンネルの

L0データに対し、有効部抽出、異常値欠測値処理、赤外デコンボリューション、トレンド補正が施され、疑似透過率L1データが作成される。これらの処理をL1データ処理と呼ぶ。L1データに対して、ノイズ除去のためのスムージングが施される。また、可視チャンネルのL0データとUKMOによる気温・気圧データを用いて、メジャーフレームごとに、観測位置（緯度・経度）計算、光路屈折と光路長計算、観測光路の接線高度計算が行われる。これらを第3節に記述する。

次に、上記観測条件（気温、気圧、観測光路情報）の下で、ILAS赤外チャンネルの素子別の理論透過率を計算する。その方法について第4節に記述する。測定された観測透過率データと理論透過率データとを用いて、対象とする気体のリトリーバルが行われ、L2データが得られる。それには、理論計算のための初期値や各種の補正情報が必要となる。これらの算出アルゴリズムについて、第5節に記述する。

最後に、リトリーバル誤差や事前情報に基づいた誤差情報、観測時刻・位置情報、データ品質情報がL2データに付与され、L2データプロダクトとなる。誤差情報の計算方法と、実際のL2データプロダクトにおける誤差の統計値などについては、第6節に示す。

2.3 赤外信号前処理

有効部抽出 (L0a)

はじめに、測定され受信されたIOEのL0データから、以降の一連の処理に必要な有効部の抽出を行う。有効部とは、図2.1の深宇宙観測部（$f_{k,before}^{offset}$と$f_{k,after}^{offset}$）、大気透過部(f_k)、太陽直達光観測部$\left(f_k^0\right)$におけるメジャーフレームデータである。これをL0aデータと定義する。

異常値処理(L0b)

L0aデータ中のスパイクノイズを検出するために、メディアンフィルターが用いられている。検出の対象としているメジャーフレームの前後9フレームのデータを用いて、その中央値と当該フレームデータとの値の差がある閾値を越えた場合に、当該フレームデータを中央値に置き換える。閾値は、大気透過部で20カウント、他の有効部で5カウントとしている。異常値処理後のデータをL0bデータと定義する。

赤外デコンボリューション

赤外分光計の各検出からの出力は、ロックインアンプの時定数の影響を受けている。この影響を除去して瞬時値としての信号に復元するためにデコンボリューション処理を行う。ILASの装置の特性を表すステップ応答関数は、近似的に3次遅れ系として

$$f(t)=\begin{cases}0, & (0\le t<t_0)\\ 1-\dfrac{T_1^{\,2}}{(T_1-T_2)(T_1-T_3)}\exp\left(\dfrac{-(t-t_0)}{T_1}\right)-\dfrac{T_2^{\,2}}{(T_2-T_3)(T_2-T_1)}\exp\left(\dfrac{-(t-t_0)}{T_2}\right) & \\ \quad -\dfrac{T_3^{\,2}}{(T_3-T_1)(T_3-T_2)}\exp\left(\dfrac{-(t-t_0)}{T_3}\right), & (t_0\le t)\end{cases} \quad (4)$$

によりモデル化される。時定数 t_0、T_1、T_2、T_3 はそれぞれ、素子別に求められている。インパルス応答関数は、数式(4)の時間微分により求められる。実際には、12 Hz の時間間隔での数式(4)の差分値によりその値を求める。各素子の 12 Hz の時間間隔でのインパルス応答係数行列を $\boldsymbol{K}$、瞬時値のデータベクトルを $\boldsymbol{x}$、ILAS の出力値を $\boldsymbol{y}$ とすると、

$$\boldsymbol{y}=\boldsymbol{K}\boldsymbol{x} \quad (5)$$

と表される。デコンボリューションは、α を平滑化係数として

$$\boldsymbol{x}=\left(\boldsymbol{K}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}+\alpha\boldsymbol{I}\right)^{-1}\boldsymbol{K}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} \quad (6)$$

と表される [Tikhonov *et al*,. (1995)] 。なお、α の値として、各素子の SN 比の逆数を使用している。これにより、デコンボリューション処理後の信号におけるノイズレベルが処理前とほぼ同等とすることができる。

トレンド補正と疑似透過率計算 (L1)

時刻 t における 100%値（太陽直達光）、0%値（深宇宙）をそれぞれ、$f_k^0(t)$、$f_k^{offset}(t)$ とすると、時刻 t における疑似透過率 $y_k(t)$は、数式(7)によって計算される。

$$y_k(t)=\left(f_k(t)-f_k^{offset}(t)\right)/\left(f_k^0(t)-f_k^{offset}(t)\right) \quad (7)$$

このトレンド補正処理は、装置特性の短時間内の変動の影響を補正する。なお、トレンド補正処理は、L0b データにデコンボリューション処理後のデータに対して行う。$y_k(t)$を L1 データプロダクトとして保存する。

スムージング処理

Version 5.20 では、高周波ノイズ成分を効果的に除去するディジタルフィルタ（0.5 Hz を遮断周波数とする 21 点（メジャーフレーム）を用いた FIR（Finite Impulse Response）ローパスフィルタを設計し、可視、赤外及び太陽エッジセンサの時系列データ（L1）に適用した。これは 20 次の逆チェビシェフ型 (inverse Chebyshev) ローパスフィルタで、阻止域 (stop

band）における第一リップルが 40 dB 減衰するような形状のものである。21 点のサンプリング点を使用する本ディジタルフィルタの半値全幅は、約 10.1 データ点である。すなわち視野は、スムージング処理によって、サンプリング間隔の 10.1 倍した値に拡大される。したがって、瞬時視野の大きさ（約 1.7 km）を考慮に入れた ILAS の高度方向の総合的な実効視野は、2.2 項の結果に本平滑化処理の効果が加わって、高度 15 km で 1.9 km、高度 25 km で 2.5 km、高度 35 km で 3.0 km、高度 45 km で 3.4 km、高度 55 km 以上では 3.5 km とみなすことができる。なお、Version 4.20 までの平滑方法は、可視・赤外チャンネルデータ、及び太陽エッジセンサデータともに 11 メジャーフレーム幅の単純移動平均を時系列方向に適用するものであった。

また、大気透過部信号の時系列自己相関解析により、ILAS の追尾には、周期が約 960 msec の揺らぎが生じていたことが判明している。これは、1.04 Hz の周波数に相当する。この追尾揺らぎに起因するノイズは、0.5 Hz をカットオフ周波数とする本フィルタにより除去されている。

UKMO の気温、気圧データと太陽エッジセンサデータを用いて、リトリーバルに必要な観測光路計算を行う（Nakajima *et al.*, 本技術資料 第 3 章）。光路 1 km ごとに球対称大気を仮定し、スネルの法則を用いて屈折効果を推定する。接線高度算出の方法は、幾何学的な光路計算と酸素分子の数密度のマッチングとの一種のハイブリッド手法といえる。その詳細については、 [Nakajima *et al.*, 本技術資料　第 3 章] に記述されている。

2.4 Forward Model（理論透過率の算出方法）

層切りと光学的暑さの計算

先ず、理論透過率の算出方法を示す。理論透過率は、ILAS の測定値から求められる疑似透過率と比較するためのものである。ここでは、大気の 3 次元的な構造は高度のみに依存し、球状の均質性を仮定する。数値計算では、大気をある厚さの層に分割する。

球状均質性は、太陽掩蔽法データのリトリーバルに適用される基本的な仮定である。ILAS データ処理の過程では、大気を高度 7 から 71 km にかけて、層厚 1 km ごとに分割する。数式(1)の放射伝達式の積分項、すなわち光学的厚さは、数値計算上は、上記の分層化（layering）によって離散化された均質（homogeneous）層を透過する光の光学的厚さ $D(\nu)$ とみなすことができ、

$$\int_s \kappa(\nu)\rho ds \approx \sum_{j=1}^{J} \kappa_j(\nu)\rho_j L_j \equiv D(\nu) \qquad (8)$$

と表すことができる。ここで、j $(j=1,\ldots,J)$は、観測光路が通過する大気層を表す。なお、ここで層番号 j は、大気の上層から下層の順に、最外層を 1、最下層を J(=64)として考える。各層の代表値を用いて離散計算を行う。$\kappa_j(\nu)$ と ρ_j は第 j 層の代表値である。L_j は第 j 層の光

路長である。

実際の大気中には、複数の吸収気体が存在するため、考えている波数νで吸収の寄与を及ぼす気体の数をg (g=1,.....,G)とし、その気体の密度$\rho_{(g),j}$を体積混合比$\chi_{(g),j}$、気温T_j、気圧p_j、ボルツマン定数k_Bで表すと、

$$\rho_{(g),j} = \chi_{(g),j} \frac{p_j}{k_B T_j} \tag{9}$$

となる。また、

$$k_{(g),j}(\nu) = \kappa_{(g),j}(\nu) / (k_B T_j) \tag{10}$$

を用いて、光学的厚さは

$$D(\nu) = \sum_{j=1}^{J} \sum_{g=1}^{G} k_{(g),j}(\nu) \chi_{(g),j} p_j L_j \tag{11}$$

と表せる。数式(8)～(11)より数式(1)は下記のように表せる。

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp\left[-\sum_{j=1}^{J} \sum_{g=1}^{G} k_{(g),j}(\nu) \chi_{(g),j} p_j L_j \right]. \tag{12}$$

太陽大気の代表温度における黒体放射$I_0(\nu)$の情報としては、MODTRANの太陽スペクトルのデータテーブル [Berk *et al.*,1989; Anderson *et al.*,1995] を利用している。そのデータテーブルは、波数分解能1 cm^{-1}の、太陽大気中のガスによる吸収を含んだ放射スペクトルデータである。

赤外チャンネルの装置関数

Version 5.20アルゴリズムによる理論透過率の計算では、ILAS装置の瞬時視野に対応する立体角積分は行っていない。視野の幾何中心を通る単一の代表光路の計算により、計算の高速化を図っている。数式(2)における装置関数$\Psi_k(\nu, \omega)$は、代表光路で波数方向に離散化して$\Psi_k(\nu_w)$として考えることができる。ここでν_w (w=1,.....,N^w)は離散化された波数、N^wは波数ν_{kL}とν_{kU}の領域の分割数とし、$\Delta\nu = (\nu_{kU} - \nu_{kL})/N^w$とすると、数式(2)のILASの出力は次式のように表せる。

$$f_k = \sum_{w=1}^{N^w} \Psi_k(\nu_w) I(\nu_w) \Delta\nu \tag{13}$$

赤外検出器アレイのクロストークモデル

赤外検出器の隣接する素子とのクロストークの割合をcとすると、クロストークを考慮した後の素子kの出力f_k'は、

$$f_k' = (1-2c)f_k + c(f_{k-1} + f_{k+1}). \tag{14}$$

と表される。ただし、両端の素子では、隣接素子のない側とのクロストークとして、光は流出するが流入しないというモデルを採用する。

擬似透過率計算

数式(3)の疑似透過率y_kは次式から求められる。

$$y_k(t) = f_k'(t) \Big/ f_k'^{0}(t), \tag{15}$$

ここで、$f_k'^{0}(t)$の算出には、5節に記述されている太陽周縁減光の影響が考慮されている。

クロスセクション計算

次に、吸収係数（クロスセクション）$k_{(g),j}(\nu)$の計算方法について述べる。以下、吸収線パラメータを利用した方法、疑似ラインデータを利用した方法、クロスセクションデータを利用した方法の順に示す。ライン・バイ・ライン計算（以下 LBL 計算）では、$k_{(g),j}(\nu)$は気体分子の吸収線パラメータと吸収線の拡がり関数を用いて、次式のように表される。

$$k_{(g),j}(\nu) = \sum_{n=1}^{N_{(g)}} S_{(g),n}(T_j) f_{(g),n}(\nu, p_j, T_j), \tag{16}$$

ここで、$N_{(g)}$は気体gの吸収線の本数、$S_{(g),n}(T_j)$は気体gの分子振動分配関数を含むn番目の吸収線強度、$f_{(g),n}(\nu, p_j, T_j)$は波数ν、気圧p_j、気温T_jをパラメータとする吸収線nの拡がりの形状を表したものである。$f_{(g),n}(\nu, p_j, T_j)$の項は Voigt 関数と呼ばれ、無限積分を含んでいる。$S_{(g),n}(T_j)$や$f_{(g),n}(\nu, p_j, T_j)$を計算するのに必要なパラメータの値は、気体分子の吸収線データベースとして用意されている。ILAS では、1996 年版の HITRAN (HIgh resolution TRAsmission) 分子分光データベース [Rothman *et al.*, 1998] を利用している。HITRAN96 の吸収線パラメータデータのうち、ILAS で利用しているのは、気体（同位体を含む）別の吸収線位置（波数）、296 K における線強度、296 K における圧力拡がりの半値幅、基底状態エネルギー、圧力拡がり半値幅の温度依存性係数の情報である。このラインパラメータを用いた LBL 法は、O_3、HNO_3、N_2O、CH_4、H_2O、NO_2、COF_2、CO_2の計算に使用してい

る。CFC-11, CFC-12, N_2O_5 の計算には、HITRAN データベースにはクロスセクションデータとして収録されている。これを擬似ラインパラメータ（G. C. Toon 私信 1995）として作成されたものがあり、それらの情報から任意の温度、圧力における $k_{(g),j}(\nu)$ を計算できる。ILAS データの運用処理では、CFC-11、CFC-12、N_2O_5 については、疑似ラインパラメータを利用して $k_{(g),j}(\nu)$ を求めている。

HITRAN96 データベースには、いくつかの温度条件で測定された赤外クロスセクションデータが収録されている。ILAS では、$ClONO_2$ と CF_4 について、これらクロスセクションデータを波数方向に補間して、$k_{(g),j}(\nu)$ としている。この計算では、各大気層温度に最も近い温度のクロスセクションデータを ILAS の理論透過率計算に用いている。

ガス成分の吸収係数の算出に際して、個々の吸収線型の積分計算を個々の吸収線に対して温度・圧力の条件が変わる度に行うのは効率的ではない。そこで、代表的な気温と気圧の値に対して事前に吸収係数値を計算しておき、補間計算によって任意の（P, T）に対する吸収係数を求めるための係数を、波数別、ガス種別に数表化した。これを P-T テーブルと呼んでいる。ルーチン処理では、この P-T テーブルを用いた２次元スプライン補間によって高速処理を実現している。これにより、計算機システム上の理論透過率計算処理の並列化が容易となり、計算精度を落とさずに高速計算が可能となっている。

クロスセクション値は概ね P-T 平面上では滑らかな変化をし、波数軸上では急激な変化をする。したがって、P-T 平面上で補間計算を行うこととし、波数軸方向には並列処理用に分割した。理論透過率計算では、0.002 cm^{-1} 間隔で 50 万点以上の波数点における値の計算が必要である。この計算を 12 ノードのワークステーションに分割した。並列用のプログラミング言語はデータパラレル型並列処理言語 HPF（High Performance Fortran）を採用した [Yokota *et al.*, 1999] 。

P-T テーブルの補間係数計算の際の LBL 計算には、 [Hui *et al.*, 1978] の 5 次多項式による Voigt 関数計算ルーチンを利用した。このとき、個々の吸収線の裾（wing）の範囲の設定に際しては、 [Yokota *et al.*, 1994] による wing の可変方法を採用し、吸収係数の数値計算の精度向上と計算効率の向上を図った。なお、前述の HITRAN96 データベースに収録されている赤外クロスセクションデータを利用する $ClONO_2$ と CF_4 については P-T テーブルを作成せず、放射伝達計算時に補間計算によって吸収係数 $k_{(g),j}(\nu)$ を求めている。

また、H_2O は他の導出対象気体とは異なり、連続吸収（continuum）の影響がある。そのため、P-T テーブルを用いた計算の他に、continuum 計算を行っている。その計算には [Clough *et al.*, 1989] や [Thériault *et al.*, 1994] による CKD2.1 という計算アルゴリズムを使用している。なお、水蒸気は continuum 計算値を利用するため、P-T テーブル作成時の LBL 計算では、個々の吸収線拡がりの wing を ±25 cm^{-1} に固定した。

ILAS の赤外波長帯には、6.4 μm 付近に酸素分子による連続吸収帯が存在する。その計算式については、 [Thibault *et al.*, 1997] に示されている。なお、O_2 の体積混合比は、高度によらず、一定の 0.209 を使用している。

2.5 リトリーバル

前節で記述したように、ILAS データのリトリーバルは Forward Model に依存する。Forward Model は ILAS で観測された疑似透過率（y）に、最も良い一致を示す未知の理論透過率（$\hat{y}$）の最小二乗推定を行うものである。推定するパラメータは気体微量成分の体積混合比の高度分布である。大気最上層から下に向かって、複数の気体微量成分の体積混合比を同時推定するのはスペクトルフィッティングであり、高度分布はオニオンピーリング法により求められる。以下、高度インバーション法とスペクトルフィッティング法などの詳細を述べる。

2.5.1 オニオンピーリングによる高度インバージョン

オニオンピーリング法では、大気の 3 次元構造つまり気体成分の分布は高度のみに依ることを仮定しており、この方法によって、測定対象としている大気層の未知パラメータのみを導出すればよい。なぜなら、測定対象より高々度の大気層中のパラメータは、直前までに導出された推定値によって換算できるからである。ILAS データの処理では、1 km 厚の層に大気を区切る。このとき対象とする最下層を通る光路の長さ（path length）は、約 220～230 km である。

2.5.2 スペクトルフィッティング

各大気層の気体微量成分の体積混合比を算出するため、スペクトルフィッティングによる逐次非線形最適化には、Levenberg-Marquardt 法 [Marquardt, 1963] が用いられている。以下では、離散化された大気層を添え字mで表す。また、R を赤外検出器の素子数（ここでは R=44）、G を各層の未知パラメータの数（ここでは G=9）とする。G×1 次元の未知パラメータのベクトル表記を $\hat{\boldsymbol{x}}_m$、R×1 次元の疑似透過率のベクトル表記を $\boldsymbol{y}_m$、大気層 m における理論透過率ベクトルを $\hat{\boldsymbol{y}}_m$ とすると、スペクトルフィッティングの残差 χ^2 は荷重 S_ε^{-1} を用いて次式のように表せる。

$$\chi^2 = \left(y_m - \hat{y}_m(\hat{x}_m)\right)^{\mathrm{T}} S_\varepsilon^{-1}\left(y_m - \hat{y}_m(\hat{x}_m)\right) \qquad (17)$$

なお、荷重 S_ε^{-1} は、ILAS 装置の計測誤差を表す、R×R 次元の分散共分散行列の逆行列で求められ、また、右肩添え字の T は行列（ベクトル）の転置を表す。

収束安定性の数値検討を行った結果、S_ε^{-1} は対角行列として使用した。その対角要素の値は、太陽直達光観測時の赤外分光計の各素子に対する SN 比の逆数から求めた。

繰り返し計算の収束判定条件としては、次の条件(a)かつ(b)が満たされたとき、繰り返しを終了する方法を採用した。

(a) χ^2 の値が減少するか、もしくは既定値よりも小さくなったとき

(b) χ^2 の減少量が既定値よりも小さくなるか、または χ^2 の減少率が既定値よりも小さくなったとき

通常の ILAS データ処理では、5〜6 回の繰り返しで計算は収束する。図 2.2 に高度 20 km での ILAS 観測透過率と理論透過率との残差プロットの例を示す。図 2.2 の下図は、ILAS の運用観測データから適当に抽出した 14 事象の高度 20 km での残差を重ね書きしたものである。下図の縦軸のスケールは上図の縦軸の百倍であることに注意が必要である。下図より、残差は小さいものの、赤外検出器の素子間には、ある種の系統的なバイアスが残っていることがわかる。

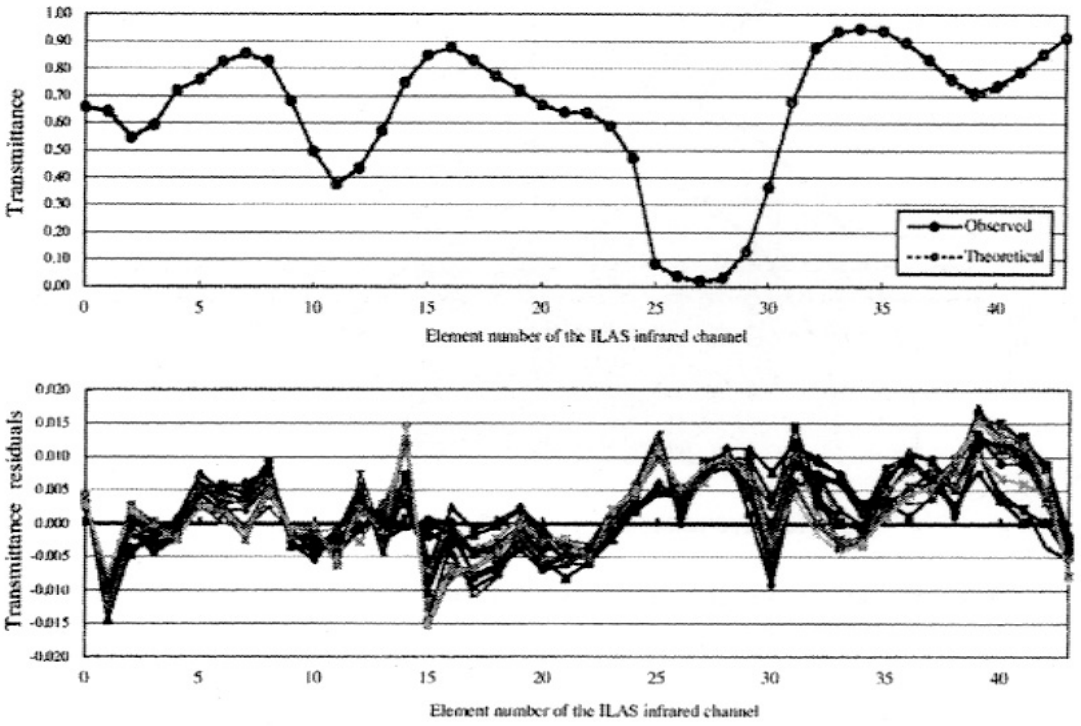


図 2.2　高度 20 km における赤外信号のスペクトルフィッティングと透過率残差の例
上図には観測信号（黒丸実線）とスペクトルフィッティング後の理論信号（白丸波線）を示す。下図は、任意に選定した 14 イベントの残差を重ね書きしたものである。

2.5.3 導出対象パラメータ、大気層代表値、初期値プロファイル

ILAS の赤外分光計データ処理により、O_3、HNO_3、NO_2、N_2O、CH_4、H_2O、CFC-11、CFC-12、COF_2 の 9 つの気体微量成分が同時に算出される。これら、9 つの未知数を 9 次元ベクトル $\hat{\boldsymbol{x}}_m$ で表す。理論透過率計算には、観測赤外域で吸収帯がある 4 つの気体微量成分、CO_2、N_2O_5、$ClONO_2$、CF_4 を考慮している。これら 4 つの成分の影響を無視することはできないが、その吸収は非常に小さいので、赤外分光計のみからこれら 4 成分の体積混合比の導出は困難である。なお、これら 4 つの成分の気体混合比は、ILAS 気候値モデル（Appendix A 参照）を用いて与えている。これらの成分の吸収の影響は小さいので、仮定した体積混合比と実際大気とによる吸収スペクトルの間には、大きな差はないと考えられる。

導出される未知数は、各高度レベルにおける気体微量成分の体積混合比である。すなわち、大気層 m の下側境界レベルにおける $\chi_{(g),m}$ である。なお、大気の最外層 m=1 の外側境界である m=0 の $\chi_{(g),0}$ については、$\chi_{(g),0}=\chi_{(g),1}$ として計算を行っている。一方、ILAS の観測光路は、必ずしも大気層の境界を通るわけではない。したがって、計算に使用する代表光路は、対象としている大気層の下側境界レベルと等しいか上で、かつ最も近いものを採用した（図 2.3 参照）。

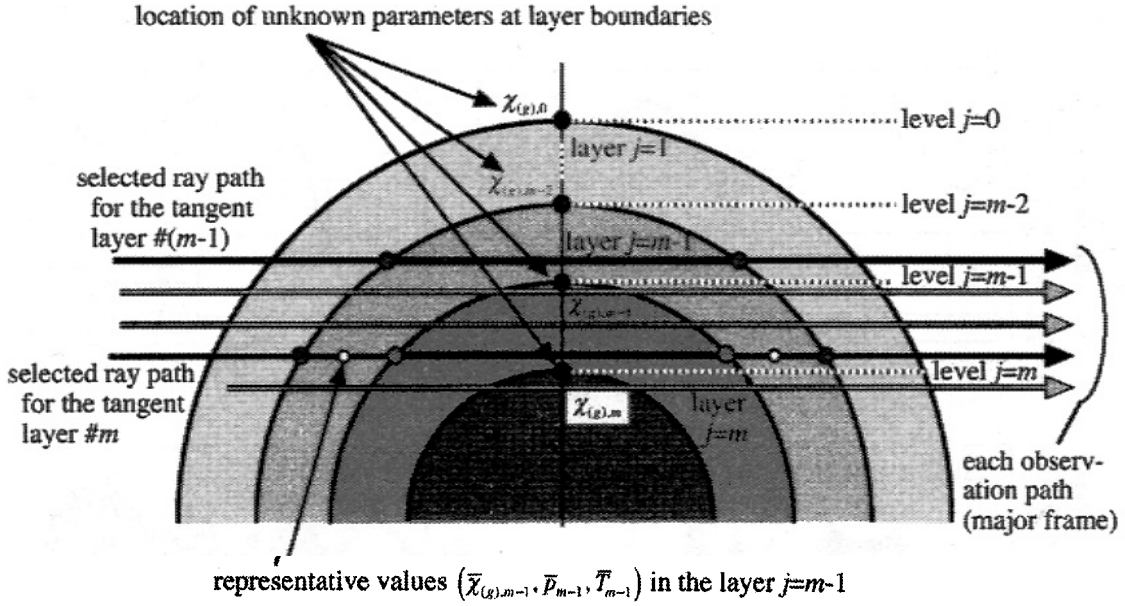


図 2.3　大気の均一層切りと、未知パラメータの配置及び ILAS 観測光路との幾何学的な関係
各層の光路上のパラメータ代表値の概念についても示す。

ここで、光路 m に対する大気層 j 中の代表的な気圧、気温、気体の体積混合比を、各々 $\bar{p}_j$、$\bar{T}_j$、$\bar{\chi}_{(g),j}$ とすると、これらは次式で計算している。

$$\begin{cases} \bar{\chi}_{(g),j} = c_j^U \chi_{(g),j-1} + c_j^L \chi_{(g),j} \\ \ln(\bar{p}_j) = c_j^U \ln(p_{j-1}) + c_j^L \ln(p_j), \qquad (j = 1, \ldots, m), \\ \bar{T}_j = c_j^U T_{j-1} + c_j^L T_j \end{cases} \tag{18}$$

ここで、体積混合比、温度、気圧の対数の、単一層内での高度方向への線形分布と、気体成分の球状均質性を仮定すると、重み係数 c_j^L、c_j^U $\left(c_j^U = 1 - c_j^L\right)$ は、層内の光路に対する微小高度ごとの寄与率を計算することで求められる。簡潔のために、単一層内の光路は直線を仮定している。測定対象層よりも上（外側）の大気層では、係数は $c_j^U = c_j^L = 0.5$ と仮定する。なぜなら、それらの層の寄与率は対象層の寄与率より、ずっと小さいからである。

層jに対してこのようにして求められたパラメータ$\bar{p}_j$、$\bar{T}_j$、$\bar{\chi}_{(g),j}$を用いて、層jにおける気体微量成分gによる、光路mの光学的厚さ$D_{(g),jm}(\nu)$は、次式で近似計算できる。

$$D_{(g),jm}(\nu) = k_{(g),j}\left(\nu, \bar{p}_j, \bar{T}_j\right) \cdot \bar{\chi}_{(g),j} \cdot \bar{p}_j \cdot L_{jm}, \tag{19}$$

ここで、L_{jm}は光路m、層jに対する光路長である。数式(19)と数式(12)～(15)より、光路mの透過率を計算できる。未知のパラメータは$\chi_{(g),m}$ (g=1,……,9)である。観測の最低高度はOEごとの観測条件で変化するので、代表的な光路は、最上層からOEごとの最下層(m=M)まで選定される。導出も層Mまで行われる。

また、導出対象の未知パラメータ値の大きさを、同じ程度のオーダーにするため、各高度の未知パラメータの値を、それぞれの代表値$\chi^0_{(g),m}$で$x_{(g),m} = \left(\chi_{(g),m}/\chi^0_{(g),m}\right) - 1$のように規格化して、変数変換を行う。Version 5.20アルゴリズムでは、$\chi^0_{(g),m}$としてUARSデータから算出した気体微量成分別、月別に計算された気候値統計量のメディアン（中央値）とUARSデータによる高度情報が代表値を与えている（Appendix A参照）。$\chi^0_{(g),m}$を繰り返し計算の初期値として用いるので、未知パラメータの変数変換値は0（ゼロ）からスタートする。数値シミュレーションによると、導出結果は初期値に依らないことが示されている。

2.5.4 太陽周縁減光の効果

太陽光球の輝度は、その中心から端に行くにつれて減少する（太陽周縁減光）。観測装置のIFOVのサイズは一定であるが、観測の接線高度が低くなるにつれて大気屈折により太陽の像がつぶれてしまうため、太陽表面に対するIFOVのサイズは相対的に大きくなる。したがって、特に接線高度が約25 km以下の低高度の場合に理論透過率を計算する場合には、太陽周縁減光の影響を考慮する必要がある。現在のデータ処理バージョンでは、9 μmを赤外域の代表波長として、Allen (1973)による経験式を用いて太陽周縁減光の効果を計算している。IFOVの伸長の程度は、光路計算と同様に大気屈折計算から推定されている。

2.5.5 エアロゾルと他のバイアス要因によるノンガス成分の補正

赤外波長域では、エアロゾルは気体の吸収スペクトルとオーバーラップする形で連続吸収のような散乱スペクトルを示す（図2.4参照）。ILASの赤外分光計は、10～40 cm^{-1}のオーダーの低波数分解能であるため、総合的な透過率データからエアロゾルの寄与のみを分離することは容易ではない。しかし、この寄与を推定することは、正確に気体微量成分を導出するためには、きわめて重要である。また、エアロゾルの情報は、オゾン減少や不均一反応の化学研究にも重要である。さらに、綿密な調査の結果、ILASの赤外信号にはエアロゾルの散乱だけではなく、他の要因による連続的な寄与（オフセット）もあることが分

かった。その要因が何であるかは、今のところはっきりとは特定されていない。以後の議論では、エアロゾルの寄与とオフセットをあわせて「ノンガス成分の寄与」と呼ぶことにする。

Version 3.10 処理と同様に、ノンガス成分の寄与の影響補正は、単純な方法によって行われている。観測スペクトルは低分解能ではあるが、素子#7、#16、#34、#43（#0 からカウントした場合、プレート 2.1 参照）のスペクトルは気体成分の吸収はほとんど受けていない。これら 4 つの素子を窓素子と呼ぶ。各素子の中心波長は各々、7.12、8.27、10.60、11.76 μm である。これらの窓素子において、信号の減衰は主にノンガス成分によるものとみなすことができ、ノンガス成分の寄与以外の吸収成分を、第 1 次近似として気体プロファイルの気候値データセットを用いて推定している。その結果、窓素子におけるノンガス成分の寄与による透過率と、その透過率に対応する消散係数値がILASデータから推定される。次に、4 つの窓素子で推定されたノンガス成分の消散係数は、その他の素子における寄与を推定するために線形内挿または外挿を施され、全波数にわたって推定される。以上のようにして推定された 44 個の素子のノンガス成分の寄与による透過率は、気体微量成分のプロファイルを推定する際に、ノンガス成分の寄与の補正に用いられている。なお、ノンガス成分の補正は高度 40 km 以下に対してのみ適用されている。

2.6 誤差解析

2.6.1 推定手法

気体微量成分の導出結果に付与されている誤差は、内部誤差と外部誤差に区別される。内部誤差は、スペクトルフィッティングの残差から統計的に、未知パラメータごと、高度ごとに計算される。スペクトルフィッティングの残差は様々な要因によるものと考えられる。可能性のある内部誤差の要因としては、観測装置の SN 比、装置関数の形状、素子クロストーク係数、他のフォワードモデル上の要因（数値計算上の問題、ノンガス成分補正における直線内挿、考慮されていない微量気体成分による吸収の寄与、分光パラメータ、太陽光源データ等）などが挙げられる。内部誤差には、系統的な誤差と偶然誤差の両方が含まれている可能性がある。

外部誤差は、個々の ILAS 観測データ自体からは、直接計算されない誤差として定義される。外部誤差要因としては、主に気体成分の導出の際に必要な温度の高度情報の不確定性と、ノンガス成分の補正で用いられる気体の高度分布情報（気候値データベース）と実際の大気との間の相違とが考えられる。導出処理ごとに温度や大気組成モデルのプロファイルが変化させて導出処理を繰り返すと、膨大な計算時間が必要になる。その代わりに、代表的な数例の観測事例からの計算結果の統計量と数値シミュレーションから、上記の外部誤差の影響を推定する。すなわち、外部誤差の大きさは、気体成分ごと、高度ごとに、事前に事象に共通な値として求められ、導出結果に付与される。

スペクトル残差は、ノンガス補正の際の線形内挿近似によって系統的な影響を受ける可能性があるため、この内挿近似は内部誤差と導出結果上のバイアスとの両方に影響すると考えられる。これらについては後述する。また、外部誤差要因のスペクトル残差への影響は、部分的に内部誤差にも表れている（すなわち重複している）可能性があることに注意を要する。誤差のその他の要因のうち、主要なものとして接線高度の決定（Nakajima *et al.*, 本技術資料　第3章）時における不確定性が考えられ、これは気温・気圧の誤差にも関係がある。Version 5.20 プロダクトには、接線高度の不確実性に基づく誤差は取り込まれていない。

内部誤差の計算

内部誤差は、非線形最小二乗推定を用いたスペクトルフィッティングの残差（数式(17)）から求められる。このスペクトルフィッティングの残差から、大気の第 m レベルにおける G 次元未知パラメータベクトル（$\hat{\boldsymbol{x}}_m$）に対する G×G 次元の分散共分散行列 $\hat{S}_m^{retrieval}$ を、次式により推定する。

$$\hat{S}_m^{retrieval} = \frac{\left(\boldsymbol{y}_m - \hat{\boldsymbol{y}}_m(\hat{\boldsymbol{x}}_m)\right)^T S_\varepsilon^{-1}\left(\boldsymbol{y}_m - \hat{\boldsymbol{y}}_m(\hat{\boldsymbol{x}}_m)\right)}{R-G}\left(K_{mm}{}^T S_\varepsilon^{-1} K_{mm}\right)^{-1} \qquad (20)$$

ここで、$K_{mm} = \dfrac{\partial \hat{\boldsymbol{y}}_m}{\partial \boldsymbol{x}_m}$ はヤコビ行列の対角要素である。数式(20)の行列の要素を $\hat{S}_m^{retrieval} = \left(\hat{s}_{ij,m}\right)$, $(i, j = 1, \ldots, G)$, とすると、m 番目の層における気体微量成分 g に対する標準偏差 $\sigma_{(g),m}^{internal}$ は $\hat{S}_m^{retrieval}$ の g 番目の対角要素として、

$$\sigma_{(g),m}^{internal} = \sqrt{\hat{s}_{gg,m}} \qquad (21)$$

で与えられる。なお、この標準誤差の値は、体積混合比の単位となる。

温度情報の不確定性による外部誤差

2.2.2 節で記述したように、気温と気圧の情報は UKMO のアシミレーションデータから得ている。UKMO データは 1 日に 1 回世界標準時の 12 時に提供され、空間分解能が粗い（軽度方向に 3.75 度、緯度方向に 2.5 度）ため、時空間及び空間的に内挿された UKMO データであっても、ILAS の測定ポイントの情報を充分には表していないかもしれない。さらに、UKMO データには何らかのバイアスがあるとの報告もある [例えば、Pullen and Jones, 1997] 。気体微量成分の導出結果におけるこの影響を調査するために、数値シミュレーシ

ョンを行った。当シミュレーションでは、温度の不確定性として、高度 70 km で±5 K、高度 20 km で±2 K とし、これらの高度間では不確定性のバイアス値を線形補間して計算を行った。極域の夏と冬モデルを上記シミュレーションの温度鉛直分布情報として用い、対応する気体の高度分布は 1 月と 6 月の南極側の ILAS 観測値に対応する ILAS 参照大気モデルを用いた（Appendix A 参照）。つまり、プラス側とマイナス側の温度バイアスによる 2 つの気温プロファイルモデルと夏季／冬季の気体高度分布条件の組み合わせにより、合計 4 つの条件に対する導出計算を数値シミュレーションにより実施した。気体微量成分の体積混合比の、真値を $\chi_{(g),m}$ と表し、導出された値（計算値）を $\hat{\chi}_{(g),m}$ と表すと、気体微量成分 g に対する標準誤差 $\sigma^{T}_{(g),m}$ は次式で求められる。

$$\sigma^{T}_{(g),m} = \sqrt{\frac{1}{4}\sum_{i=1}^{4}\left[\chi_{(g),m} - \left(\hat{\chi}_{(g),m}\right)_i\right]^2} \qquad (22)$$

なお、この標準誤差の値は、体積混合比の単位となる。

ノンガス成分の補正に用いられる気体プロファイルの誤差に基づく外部誤差

5 節に記述したように、ノンガス補正が気体のリトリーバル時に施される。その際、観測信号における気体の吸収寄与分を見積もるために、気候値の気体プロファイル（中央値）が用いられている。気候値データの不確定性による標準誤差を求めるために、気候値データと実際の大気との気体の鉛直プロファイルの差の影響量を、数値シミュレーションを用いて推定した。

まず、ILAS の 8 ヶ月間のデータセットから、各月・各半球ごとに 2OE のデータ、すなわち計 32 個のデータを選択した。選択されたデータに対する導出の際の入力値として、それぞれのデータに気候値データセットの 10%値(x_{10})、中央値(x_{50})、90%値(x_{90})を用いた。すなわち、計 96 個の結果が得られた。次に、気体別・高度別に、$\left[\max\left(\left|x_{90}-x_{50}\right|,\left|x_{10}-x_{50}\right|\right)\right]$ の中央値を計算した。この結果の高度方向の変動を押さえるために、中央値のデータ列に対して高度方向にスムージングをかけた。このようにして得られた中央値を、外部誤差を与える標準偏差の推定値と見なすことができる。これを、高度レベル m におけるノンガス補正による標準誤差として、$\sigma^{N}_{(g),m}$ と表す。

外部誤差

$\sigma^{T}_{(g),m}$ と $\sigma^{N}_{(g),m}$ の表記を用いると、外部誤差 $\sigma^{external}_{(g),m}$ は次式のように定義される。

$$\sigma^{external}_{(g),m} = \sqrt{\left(\sigma^{T}_{(g),m}\right)^2 + \left(\sigma^{N}_{(g),m}\right)^2}, \qquad (23)$$

これも体積混合比の単位を有する。

トータル誤差

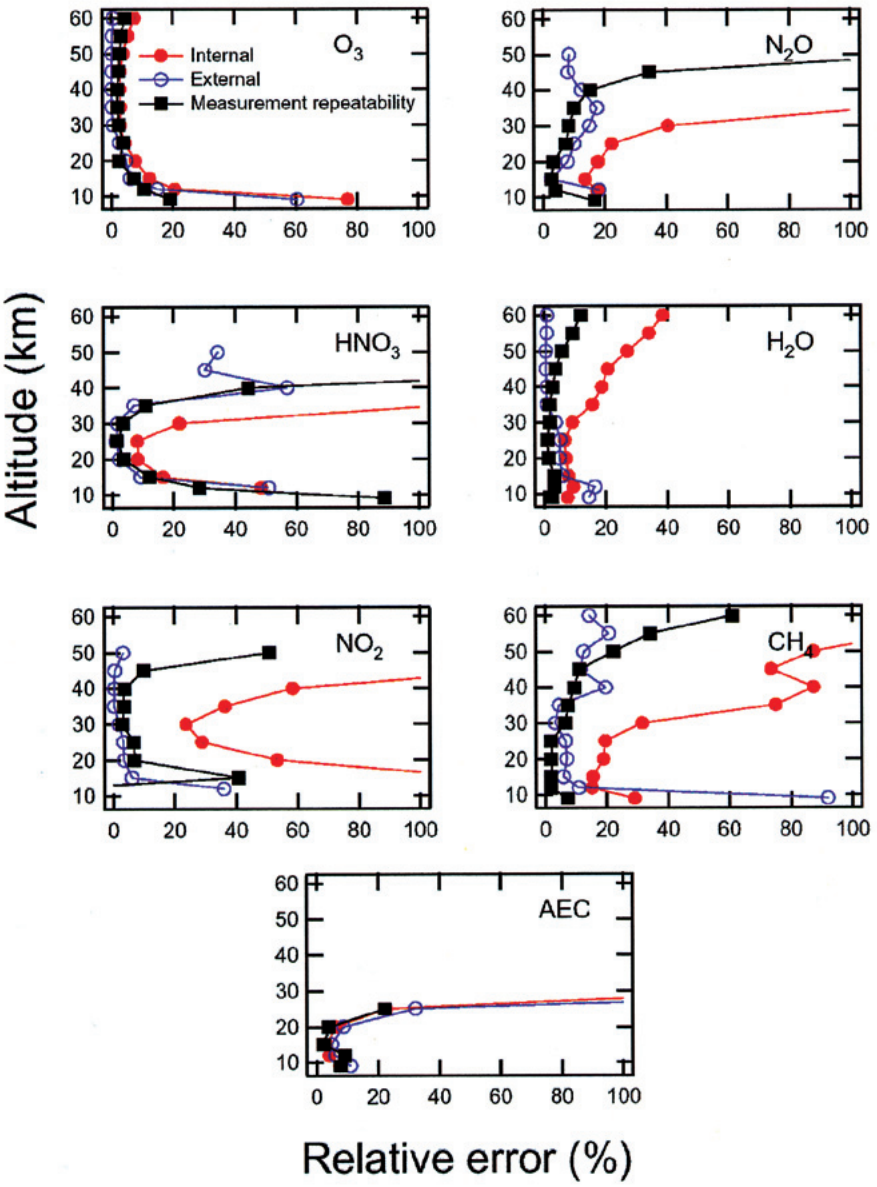
トータル誤差$\sigma_{(g),m}^{Total}$は、L2 データ中の一つの項として提供されるものであり、これは内部誤差と外部誤差の 2 乗和の平方根として、次式のように定義される。

$$\sigma_{(g),m}^{Total} = \sqrt{\left(\sigma_{(g),m}^{internal}\right)^2 + \left(\sigma_{(g),m}^{external}\right)^2}, \tag{24}$$

この値の単位も体積混合比である。

2.6.2 誤差解析から得られる統計値

プレート 2.2 は ILAS 観測結果の内部誤差を%の単位で相対誤差の平均値として示したものである。すなわち、気体別・高度別に、内部誤差の平均値を、1996 年 11 月から 1997 年 6 月までの全データによる気体微量成分の導出プロファイルの平均値で割ることにより算出した。プレート 2.2 は外部誤差の相対値の結果も示している。これは、気体別・高度別の外部誤差を導出プロファイルの平均値で割ることにより算出した。さらに、プレート 2.2 には 780 nm におけるエアロゾル消散係数についての誤差も示されている。Appendix B にも記述されているように、エアロゾル消散係数に対する外部誤差は OE ごとに評価されているので、外部誤差の相対値は、全ての OE に対する外部誤差の平均を用いて計算した。



プレート 2.2　相対誤差表示（%）による各 ILAS 標準気体プロダクトと 780 nm における
エアロゾル消散係数の、内部誤差、外部誤差、繰り返し性の高度分布

プレート 2.2 から分かるように、オゾンと 780 nm におけるエアロゾル消散係数を除いて、トータル誤差への寄与は、内部誤差が卓越している。スペクトルフィッティングにおける系統誤差は内部誤差に反映される。なぜなら、内部誤差というのはスペクトルフィッティングの残差から計算されているからである。したがって、ここで示された内部誤差は ILAS の測定精度を必ずしも正確に反映しているとは言えない。そのため、観測結果の繰り返し性（repeatability）を、実験により確かめる必要がある。

観測の繰り返し性（repeatability）

[BIMP *et al.*, 1993] によると、"観測結果の繰り返し性（repeatability of measurement result）"という用語は、「同一の観測条件下で行われた測定に基づくある計測対象量（measurand）の、連続的な観測結果の一致性の程度」として定義されている。したがって、ILAS 観測の繰り返し性は、以下のような方法により、実験的に（経験的に）近似値として推定された。

導出結果の繰り返し性を評価するために、大気成分が緯度方向に沿って水平均質に分布していると考えられる、平穏かつ安定した大気状態の日を 3〜5 日間程度の短期間選定した。利用した期間は、北半球の 6 月と南半球の 3 月後半である。その期間の導出結果に対して、平均値 $\overline{\chi}_{rep}$ とその標準偏差 σ_{rep} から、気体微量成分の鉛直分布の変動率を計算した。相対標準偏差を $\varepsilon_{rep}=\sigma_{rep}/\overline{\chi}_{rep}$ と定義して、各高度に対する相対標準偏差の最小値を選び、プレート 2.2 中に気体成分ごとにパーセント表示でプロットした。プレート 2.2 では、オゾンとエアロゾル消散係数を除いて、全高度における ε_{rep} の値は内部誤差の値より極めて小さくなった。ε_{rep} には、ある程度大気の自然変動による寄与が含まれているので、この値は観測の繰り返し性の上限値を与えるものと考えられる。内部誤差、外部誤差、繰り返し性の標準偏差について、相対パーセント値による高度 15, 20, 30 km での比較結果を表 2.1 に示す。表 2.1 には、各気体についての ILAS プロダクトと検証実験結果との差の相対値の平均値についても示されている。この差の相対値の平均値は、ILAS 導出の確度（accuracy；系統誤差）を反映しているといえる。

表 2.1　ILAS の標準気体プロダクトと 780 nm におけるエアロゾル消散係数に関する内部誤差、外部誤差、繰り返し性の誤差、及び確度（accuracy）

Species, altitude	Relative internal error[a] (%)	Relative external error (%)	Relative repeat-ability S.D.[b] (%)	Accuracy[b,c] (%)
O_3, 15 km	12.3	6.1	7.4 (19)	+10 (12)
20 km	7.7	4.7	2.5 (19)	+5 (10)
30 km	2.8	0.5	2.4 (62)	+6 (5)
HNO_3, 15 km	16.4	9.1	12.2 (19)	+7 (36)
20 km	8.2	2.2	3.7 (67)	0 (41)
30 km	21.8	1.7	3.5 (42)	+1 (24)
NO_2, 15 km	119.4	6.0	40.6 (19)	-[d]
20 km	53.3	3.5	6.8 (67)	+39 (17)
30 km	23.6	1.8	2.9 (60)	+10 (11)
N_2O, 15 km	13.5	2.5	2.6 (19)	-5 (8)
20 km	17.7	7.7	3.0 (19)	+2 (8)
30 km	40.5	14.9	8.3 (67)	+41 (2)
CH_4, 15 km	15.3	5.8	1.8 (42)	+12 (6)
20 km	18.9	6.9	1.8 (19)	+29 (5)
30 km	31.5	3.1	6.3 (53)	+13 (1)
H_2O, 15 km	7.8	5.9	3.0 (42)	-13 (5)
20 km	6.8	4.8	1.3 (19)	-5 (4)
30 km	9.0	3.5	1.7 (60)	-8 (2)
AEC[e,f], 15 km	3.2	4.8	2.3 (42)	-3 (63)
20 km	6.0	8.7	3.9 (19)	-10 (41)

[a] Relative internal error was calculated from all of the Version 5.20 products.
[b] Sample number used for calculation is shown in the parentheses.
[c] Accuracy was calculated as an average of [2 × (ILAS data - validation data) / (ILAS data + validation data) × 100 (%)], from some of the ILAS validation experiment events.
[d] The accuracy for NO_2 at 15 km is not available because of small samples of the validation data.
[e] AEC: aerosol extinction coefficient at 780 nm
[f] The values for AEC at 30 km are not listed because of insufficient reliability of the statistics.

2.6.3 ノンガス成分の補正により生じる誤差

ノンガス成分の補正で用いられる線形内挿は、エアロゾルまたは PSC の消散係数スペクトルの粗い近似であるため、これによって導出プロファイルに系統誤差が生じる可能性がある。例えば、硫酸エアロゾル（バックグラウンドエアロゾルとして用いられる）や PSC の線形内挿された消散係数スペクトルが、実際のスペクトルと大きく異なっている場合には、それはスペクトルフィッティングの際の系統的な残差に帰着すると思われる。スペクトルの大きな食い違いが、気体の吸収波数帯と重なったとき、導出された気体微量成分のプロファイルには大きな誤差が含まれている。この原因に基づく系統誤差の程度を評価するために、大気成分の気候値（Appendix A 参照）を用い、バックグラウンドエアロゾルとしての２種類の異なる硫酸エアロゾルや様々なタイプの PSC に対する理論計算に基づく消散係数スペクトルを用いて、理論計算によるシミュレーションを行った。

[Biermann *et al.*, 2000] は、H_2SO_4/H_2O について 2 成分を想定したときの、硫酸エアロゾルの複素屈折率を求めている。これを用いて、温度と硫酸の重量パーセント条件を 200 K で 50 %、230 K で 75 %の場合について計算した。過冷却 3 相成分（STS）エアロゾルの複素屈折率も [Biermann *et al.*, 2000] の結果を用いた。硫酸と硝酸の重量パーセントの組み合わせを 4 通り用意し、それぞれ、5 かつ 37wt%、33 かつ 15wt%、47 かつ 3wt%、60 かつ 0.5wt%とした。これらの組み合わせ条件は、10 ppbv の硝酸と 5 ppmv の水蒸気の存在下で、それぞれ、188 K、192 K、194 K、200 K の温度に対応する [Carslaw *et al.*, 1995] 。$HNO_3 \cdot 3H_2O$（NAT）と氷（water ice）の屈折率は、[Toon *et al.*, 1994] の値を用いた。本計算で仮定した粒径分布のパラメータを表 2.2 に示す。図 2.4 に様々なタイプのエアロゾルと PSC に対する消散係数スペクトルを示す。これらのスペクトルは、780 nm の波長における消散係数値で規格化されたものである。

表 2.2　ノンガス成分の補正シミュレーションで使用したエアロゾルと PSCs の粒径分布のパラメータ（r_g: 平均半径, s_g: 標準偏差）

Type	H_2SO_4/H_2O	STS	NAT	ICE
r_g	0.075	0.5	0.5	10
s_g	1.86	1.5	1.5	1.5

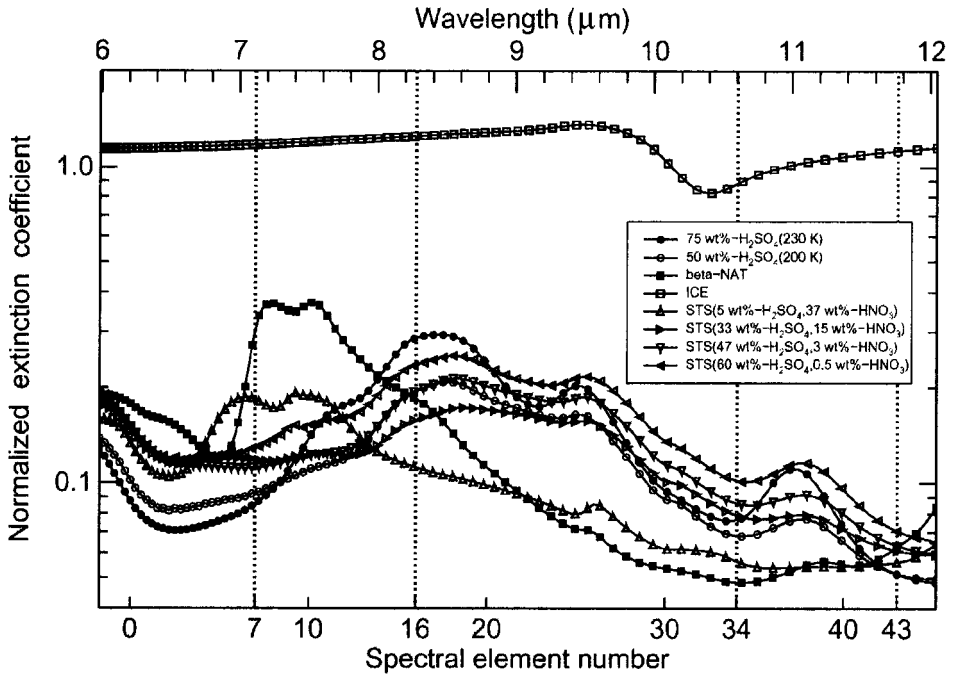
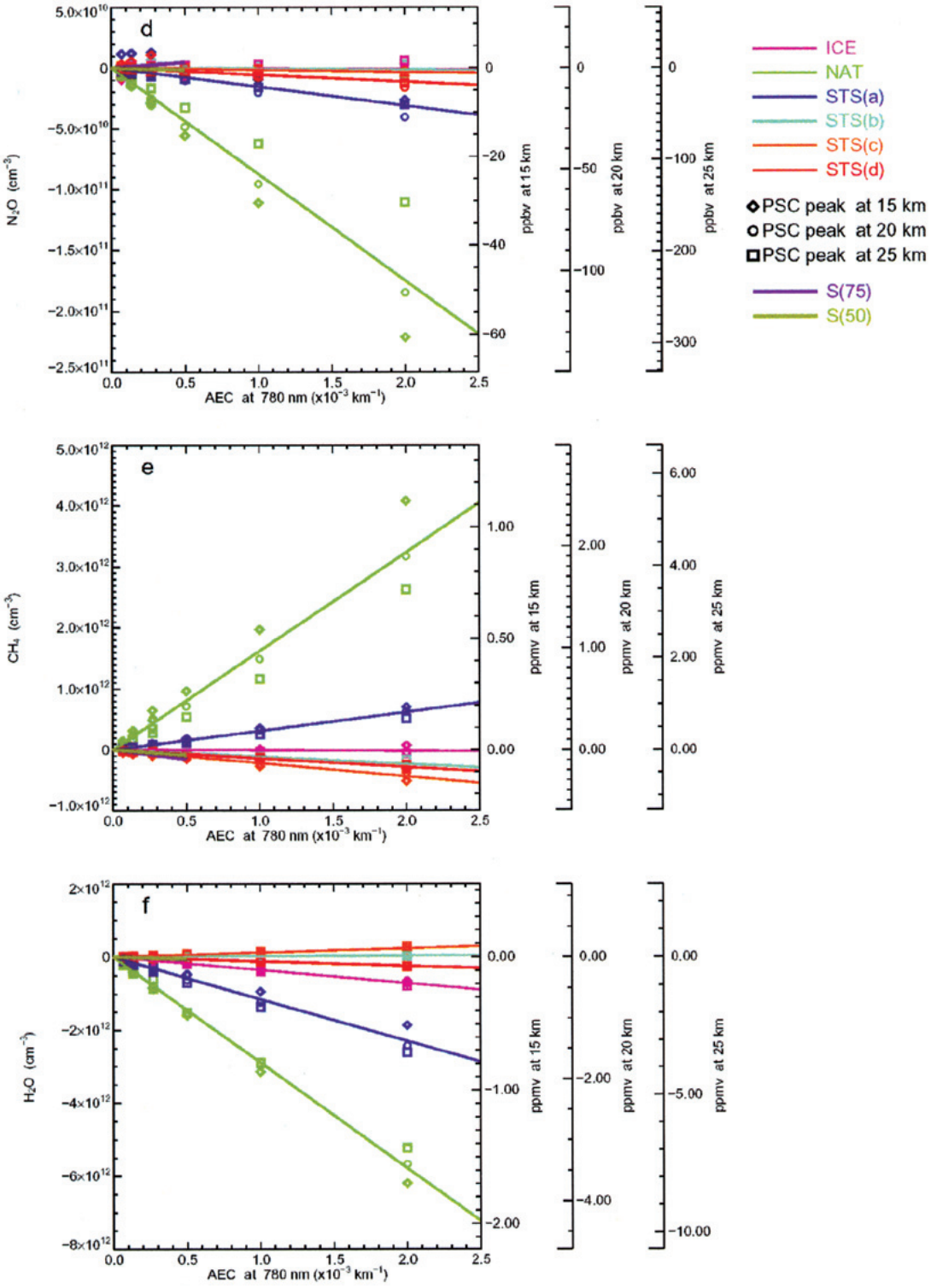


図 2.4　各エアロゾルと PSC の型による ILAS 赤外波長域での吸収スペクトル
縦軸は 780 nm での消散係数値で規格化されている。縦の波線は、ILAS の赤外窓素子のスペクトル位置を示す。

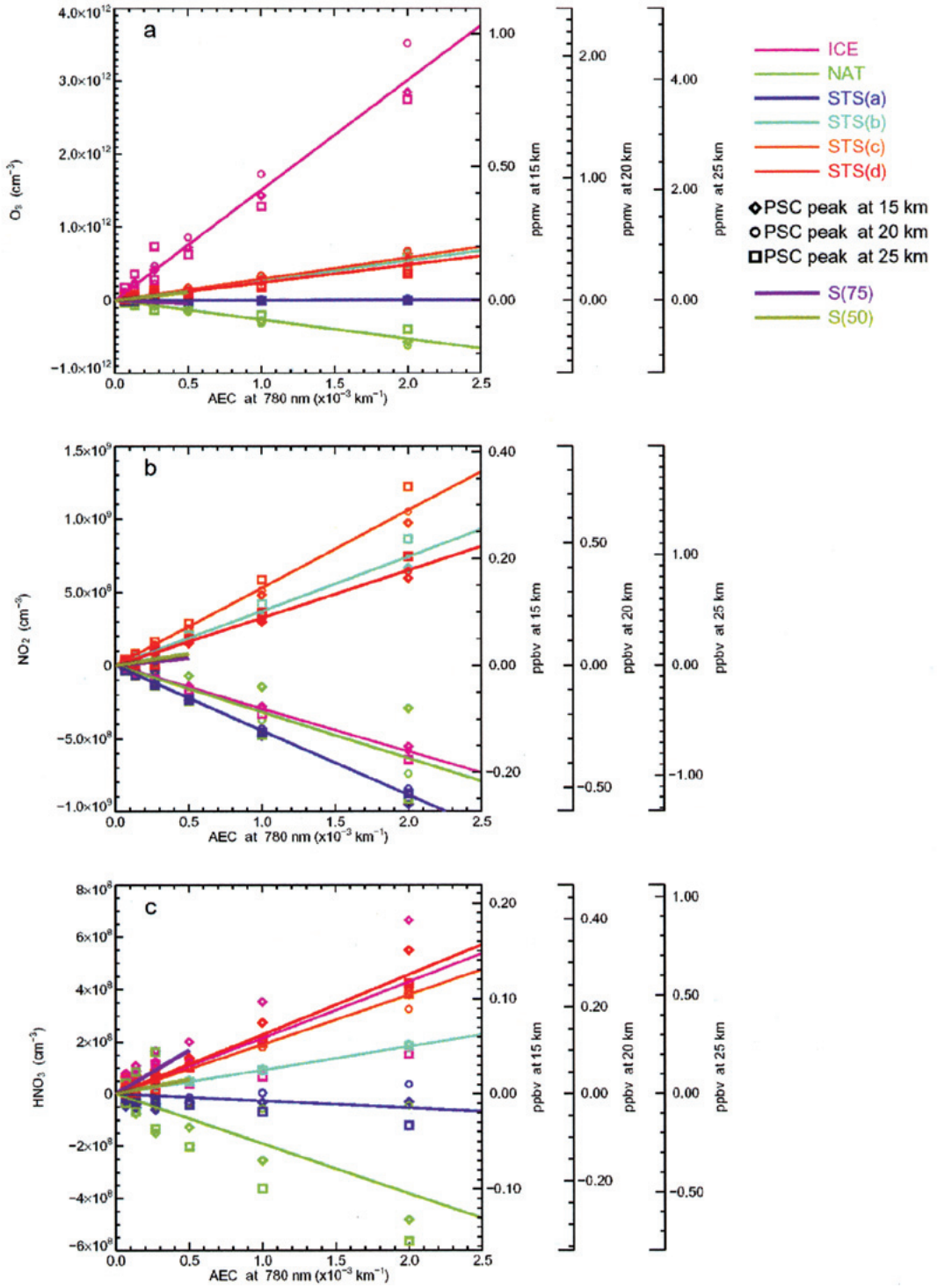
大気のバックグラウンド条件としては、硫酸エアロゾルの 780 nm における消散係数が、高度 30 km で 1×10^{-7} km^{-1}、高度 20 km で 1×10^{-4} km^{-1}、高度 10 km で 1×10^{-3} km^{-1} と仮定し、これらの高度間では対数線形内挿に従うものとした。さらに、この消散係数の高度分布は、異なる条件でシミュレーションするために、さらに 2〜6 倍されている。PSC の観測条件については、消散係数の高度分布はバックグラウンドエアロゾルと PSC の両者から成ると仮定した。そのバックグラウンドエアロゾルの消散係数は、高度 40 km で 1×10^{-7} km、高度 10 km で 1×10^{-4} km^{-1} とし、これらの値は高度方向に対数線形内挿した。このバックグラウンドエアロゾル層に、ピークが高度 15 km にあり、幅が 3 km のガウス分布状の PSC の大気層を加えた。ピーク（高度 15 km）における消散係数は 3 通りの異なる値を用意し、その全消散係数を 0.5, 1.0, 2.0×10^{-3} km^{-1} とした。さらに、高度 20 km と 25 km にピークを持つ PSC 層で、全消散係数が 0.5, 1.0, 2.0×10^{-3} km^{-1} の条件についてもシミュレーションを実施した。結局、北半球の 2 月から 6 月に対応する気体プロファイルを用いて、9 つのケースのエアロゾルに対して数値シミュレーションを実施した。なお、気温・気圧の鉛直分布については、北半球の 2 月と 6 月の UKMO データから任意に選択したものを利用した。

シミュレーションの手順は、はじめに、先に述べたデータセットから気体微量成分による光学的厚さを波数の関数として計算した。次に、気体成分とエアロゾル／PSC による全透過率スペクトルを、4 節で記述した Forward Model の方法に従って波数の関数として求め、44 素子の ILAS 出力に変換した。この信号に対してノンガス成分の補正が組み込まれている運用処理ルーチンを適用して、気体微量成分の鉛直分布を導出する。プレート 2.3 は、780 nm の消散係数の値をパラメータとして、本手法（ノンガス成分の補正を含む方法）で導出された気体微量成分の数密度（体積混合比ではない）と、本手法で仮定した気体微量成分の数密度（すなわち真値）との差（誤差）を示している。プレート 2.3 に示されている回帰直線の傾きの値を表 2.3 に示す。表 2.3 には、大気中の典型的な分子数密度を仮定した場合の、高度 20 km における導出気体の体積混合比の差（バイアス）も示した。



プレート 2.3(1)　　ノンガス成分の補正により生じる、エアロゾル／PSCs の型別の ILAS 標準気体プロダクトに対するバイアス誤差

図では、エアロゾル／PSCs 濃度は 780 nm での消散係数値の関数としてバイアス誤差は気体の数密度(cm^{-3})で示している。高度 15, 20, 25 km における各気体の体積混合比(ppmv)への換算スケールを各図の右に示す。STS(a)－STS(d)の組成比については、表 2.3 を参照のこと。



プレート 2.3(2)　　ノンガス成分の補正により生じる、エアロゾル／PSCs の型別の ILAS 標準気体プロダクトに対するバイアス誤差

図では、エアロゾル／PSCs 濃度は 780 nm での消散係数値の関数としてバイアス誤差は気体の数密度(cm^{-3})で示している。高度 15, 20, 25 km における各気体の体積混合比(ppmv)への換算スケールを各図の右に示す。STS(a)－STS(d)の組成比については、表 2.3 を参照のこと。

表 2.3　ILAS 標準気体プロダクトのノンガス成分の補正による系統誤差の推定値

	O_3 (at an altitude of 20 km)				NO_2 (at an altitude of 20 km)			
	a	±1σ s.d.	cm^{-3}	ppmv	a	±1σ s.d.	cm^{-3}	ppbv
S(75)	-8.95E+13	1.87E+11	-4.48E+10	-0.027	9.88E+10	1.40E+09	4.94E+07	0.030
S(50)	2.23E+14	1.47E+12	1.12E+11	0.067	1.53E+11	6.97E+08	7.65E+07	0.046
ICE	1.50E+15	4.37E+13	1.50E+12	0.900	-2.94E+11	7.62E+09	-2.94E+08	-0.176
NAT	-2.66E+14	1.04E+13	-2.66E+11	-0.159	-3.18E+11	2.98E+10	-3.18E+08	-0.190
STS(a)	2.54E+12	1.42E+12	2.54E+09	0.002	-4.44E+11	8.82E+09	-4.44E+08	-0.266
STS(b)	2.67E+14	1.13E+13	2.67E+11	0.160	3.70E+11	1.12E+10	3.70E+08	0.221
STS(c)	2.89E+14	1.19E+13	2.89E+11	0.173	5.29E+11	1.51E+10	5.29E+08	0.316
STS(d)	2.40E+14	8.77E+12	2.40E+11	0.144	3.25E+11	9.11E+09	3.25E+08	0.194

	HNO_3 (at an altitude of 20 km)				N_2O (at an altitude of 20 km)			
	a	±1σ s.d.	cm^{-3}	ppbv	a	±1σ s.d.	cm^{-3}	ppbv
S(75)	3.36E+11	1.65E+09	1.69E+08	0.101	8.91E+12	1.04E+12	4.45E+09	2.67
S(50)	1.12E+11	2.32E+09	5.61E+07	0.034	-3.67E+12	3.72E+11	-1.84E+09	-1.10
ICE	2.14E+11	2.35E+10	2.14E+08	0.128	-6.73E+11	1.07E+12	-6.73E+08	-0.403
NAT	-1.91E+11	2.71E+10	-1.91E+08	-0.114	-8.75E+13	4.38E+12	-8.75E+10	-52.4
STS(a)	-2.74E+10	9.01E+09	-2.74E+07	-0.016	-1.55E+13	1.49E+12	-1.55E+10	-9.29
STS(b)	9.07E+10	1.57E+09	9.07E+07	0.054	-8.23E+11	5.38E+11	-8.23E+08	-0.493
STS(c)	1.90E+11	7.24E+09	1.90E+08	0.114	-1.74E+12	6.43E+11	-1.74E+09	-1.04
STS(d)	2.28E+11	7.23E+09	2.28E+09	0.137	-5.69E+12	8.13E+11	-5.69E+09	-3.41

	CH_4 (at an altitude of 20 km)				H_2O (at an altitude of 20 km)			
	a	±1σ s.d.	cm^{-3}	ppmv	a	±1σ s.d.	cm^{-3}	ppmv
S(75)	-3.04E+14	5.00E+12	-1.52E+11	-0.091	-1.54E+14	1.74E+12	-7.71E+10	-0.046
S(50)	-1.88E+14	3.79E+12	-9.41E+10	-0.056	-1.25E+14	1.57E+12	-6.23E+10	-0.037
ICE	-1.10E+13	6.35E+12	-1.10E+10	-0.007	-3.56E+14	6.73E+12	-3.56E+11	-0.213
NAT	1.62E+15	6.26E+13	1.62E+12	0.967	-2.89E+15	3.96E+13	-2.89E+12	-1.73
STS(a)	3.10E+14	8.12E+12	3.10E+11	0.186	-1.15E+15	3.67E+13	-1.15E+12	-0.688
STS(b)	-1.20E+14	5.39E+12	-1.20E+11	-0.072	1.07E+13	9.02E+11	1.07E+10	0.006
STS(c)	-2.22E+14	9.05E+12	-2.22E+11	-0.133	1.13E+14	4.49E+12	1.13E+11	0.068
STS(d)	-1.44E+14	3.33E+12	-1.44E+11	-0.086	-1.22E+14	1.44E+12	-1.22E+11	-0.073

回帰係数'*a*'は、プレート 2.3 に示されている、780 nm のエアロゾル消散係数値から気体の数密度のバイアス誤差への換算比例係数を示す。接線高度 20 km でのエアロゾル消散係数の代表的な値（硫酸エアロゾルで 5.0×10^{-4} km^{-1}、PSCs で 1.0×10^{-3} km^{-1}）に対する、気体の濃度(cm^{-1})と体積混合比(ppmv)のバイアス誤差の値も示されている。PSCs の各組成比は、以下のような構成を仮定して計算を行った；

STS(a): 5 wt%-H_2SO_4 / 37 wt%-HNO_3/H_2O
STS(b): 33 wt%-H_2SO_4 / 15 wt%-HNO_3/H_2O
STS(c): 47 wt%-H_2SO_4 / 3 wt%-HNO_3/H_2O
STS(d): 60 wt%-H_2SO_4 / 0.5 wt%-HNO_3/H_2O

なお、S(50)と S(75)は硫酸エアロゾルで、その組成はそれぞれ 50 wt%-H_2SO_4/H_2O と 75 wt%-H_2SO_4/H_2O である。

数値シミュレーションに基づく誤差解析より、様々な重要な点が浮き彫りにされた。第一に、バックグラウンド硫酸エアロゾルの場合は、ノンガス成分の補正によってほとんどの気体微量成分について影響が小さい。一方、高度 20 km で 10^{-3} km^{-1} の消散係数値を示すような氷の PSC の場合には、その高度でのオゾンの導出結果には 0.9 ppmv ほど過大な誤差が生じる。10^{-3} km^{-1} のオーダーの消散係数値を有する NAT の PSC 層では、オゾンと硝酸以外の気体成分には、無視できないほどのバイアスが生じる。これは、PSC がそのタイプによって、導出された気体微量成分に、質的にも量的にも影響を及ぼすことを示している。また、ノンガス成分の補正に起因するエアロゾルまたは PSC の影響は、気体の数密度について、780 nm のエアロゾル消散係数値とほぼ線形的な関係を示すことがわかった。

ノンガス成分の補正処理によって気体微量成分の導出結果には系統誤差が生じる可能性があるため、気体の導出結果の科学的な解釈を行う際には細心の注意を要する。

2.7 要約と結論

本技術資料では、太陽掩蔽法による ILAS 観測データから、気体微量成分の体積混合比の鉛直分布を求めるための、データ処理アルゴリズム（Version 5.20）の詳細について記述した。本アルゴリズムは非線形最小二乗法に基づいている。鉛直プロファイルの導出には、オニオンピーリング法を適用している。吸収係数の計算（P-T table）に対して、並列計算処理と table look-up 法を用いることにより、高度かつ高精度の計算を実現している。

本技術資料では、計算結果の誤差推定の手続きについても詳細に記述した。一般に公開されるデータプロダクトには、誤差情報すなわち内部誤差と外部誤差によるトータル誤差が含まれている。内部誤差は 1OE ごとの ILAS データから求められ、それに対し、外部誤差は典型的な ILAS の観測イベントから別に求められ、OE に共通に使用される。内部誤差は、スペクトルフィッティングの残差からされる。その際の理論透過率スペクトルに系統誤差を生じる要因がある場合には、内部誤差は過大に推定されている可能性がある。実際、内部誤差を夏の大気静穏期の観測結果を用いた繰り返し性の誤差と比較したところ、繰り返し性の誤差は内部誤差よりもずっと小さかった。これは、フォワードモデル中で何らかの重要なファクターを見逃しているか、モデル中のパラメータ値に誤りがあることを示唆している。外部誤差の主な要因は、温度の不確定性と、気候値データと実際大気の間の相違に基づくノンガス要因の補正時の誤差である。

様々なタイプの PSC やエアロゾルが存在する場合、ノンガス成分の補正が導出気体プロファイルにバイアス誤差として及ぼす影響を、数値シミュレーションを用いて調査した。その結果、バックグラウンドの硫酸エアロゾルの場合の影響は小さいが、波長 780 nm で 10^{-3} km^{-1} のオーダーの消散係数値を有する PSC の場合は、いくつかの気体微量成分に大きな影響を及ぼすことが分かった。この PSC による影響は、気体微量成分や PSC のタイプに応じて、正のバイアスにも負バイアスにもなり得る。そのバイアス誤差の大きさは PSC

のタイプに依存し、780 nm における消散係数の大きさに比例する。よって、大きな消散係数値の PSC の場合には、導出プロダクトの解析に注意が必要である。

様々な ILAS 検証解析の結果については、本技術資料中の論文 [Irie *et al.*, Jucks *et al.*, Kanzawa *et al.*, Sugita *et al.*, and Toon *et al.*] 、および J.G.R に投稿中の論文 [Pan *et al.*, and Wood *et al.*] に報告されている。 [*Nakajima et al.*, 本技術資料 第 3 章] で議論されているような接線高度の決定精度、ノンガス成分の補正による誤差、内部誤差の過大評価などのいくつかの問題点については、さらなる研究が必要である。とはいうものの、Version5.20 アルゴリズムは科学的に有用な成果を作り出していることが示された。

Appendix A：ILAS 参照大気モデルデータ

ノンガス成分の補正のために、大気微量成分の気候値算出に用いられた参照大気モデルデータは、主に UARS 衛星に搭載されているセンサ MLS [Barath *et al.*, 1993] 、CLAES [Roche *et al.*, 1993] のデータを利用した。このデータセットは、気体微量成分の導出の際に初期条件としても用いられた。各気体微量成分ごとに、利用した気候値データを与えるセンサを表 A-1 に示す。MLS と CLAES のデータについては、1992 年 1 月から 12 月の観測データから統計量を求めた。各気体微量成分別、月別、に緯度幅 5° ごと、高度 7～71 km 間の 1 km ごとの気候値を算出した。ATOMS については、1994 年の ATLAS-3 ミッション期間中に観測された全データを利用した。この結果に基づいて、CF_4 の体積混合比を高度で一律の 60 ppbv とした。CO_2 は、体積混合比 350 ppmv とした。COF_2 の体積混合比は、ILAS 検証実験の一部として 1997 年 5 月 8 日に実施された MkIV の観測結果からの推定値を利用した。

表 A-1　ILAS 参照大気モデルの作成に利用したデータの諸元

Instrument	Gas species (Data version[a])
CLAES	HNO_3(8), NO_2(6), N_2O(6), CH_4(6), $CFCl_3$(6), CF_2Cl_2(6), $ClONO_2$(8), N_2O_5(8)
MLS	O_3(3), H_2O(3)[b]
ATMOS	CF_4(3)
Mark IV[c]	COF_2
-	CO_2 (350 ppmv fixed)

[a] Data source version of each gas is shown in the parentheses.

[b] For the altitude range below the lowest level of MLS (> 12 km), the ILAS Version 3.10 H_2O profiles were used above 12 km, and values were extrapolated using the average slope of SAGE-II H_2O profiles for the range from 12 km down to 5 km.

[c] COF_2 measurement data on May 8, 1997 was used.

気温と気圧は、もとは UKMO [Swinbank and O'Neill, 1994] から毎日世界標準 12 時の値として提供されるアシミレーションデータ（経度 3.75° ごと、経度 2.5° ごと、UARS 標準気圧レベルに相当する 1000 hPa から 0.3126 hPa 間の 22 層の等圧面レベルのデータ）である。このデータより気温・気圧プロファイルとしての時間及び空間内挿を、接線高度 20 km で代表される各 ILAS 計測ポイント（緯度、経度、高度）と時刻に対して行っている。UKMO データの上限高度（0.3126 hPa 等圧面）よりさらに上層については、CIRA 1986 [Rees *et al.*, 1990] の気温、気圧データ（月別、高度 5 km ごと、緯度 10° ごとのデータ）を用いて、データ接続付近の高度では UKMO データと滑らかに結ばれるようにして連結したデータを使用している。

Appendix B：780 nm のエアロゾル消散係数を計算するアルゴリズムの概要

可視分光計による 780 nm におけるエアロゾル消散係数 σ (780)の算出で用いられ Version 4.20 アルゴリズムについては、すでに [Hayashida *et al.*, 2000] に簡単に記述した。ここでは、Version 5.20 で用いられたアルゴリズムの改良点について簡潔に記述する。

σ (780)の値は、1024 個の素子アレイを有する可視分光計を用いて、接線高度 1 km ごとに計算される。図 B-1 は、可視分光計による接線高度 20 km における観測データを基にした疑似透過率を概略的に示している。この図に見られるように、透過率スペクトルは横軸中央付近の酸素分子による吸収スペクトルと、全波数に渡って波状に変化するベースライン成分から成る。ベースラインは、エアロゾル消散（ミー散乱）、空気分子による消散、オゾンによる吸収（Wulf band）から構成されている。σ (780)の値は、図中のグレイの縦棒線で書かれている 780 nm 付近の 12 個の透過率データ τ (780)から求められる。なお、太陽光源のフラウンホーファー線に影響される波数にあたる素子は、この平均化処理から除外されている。

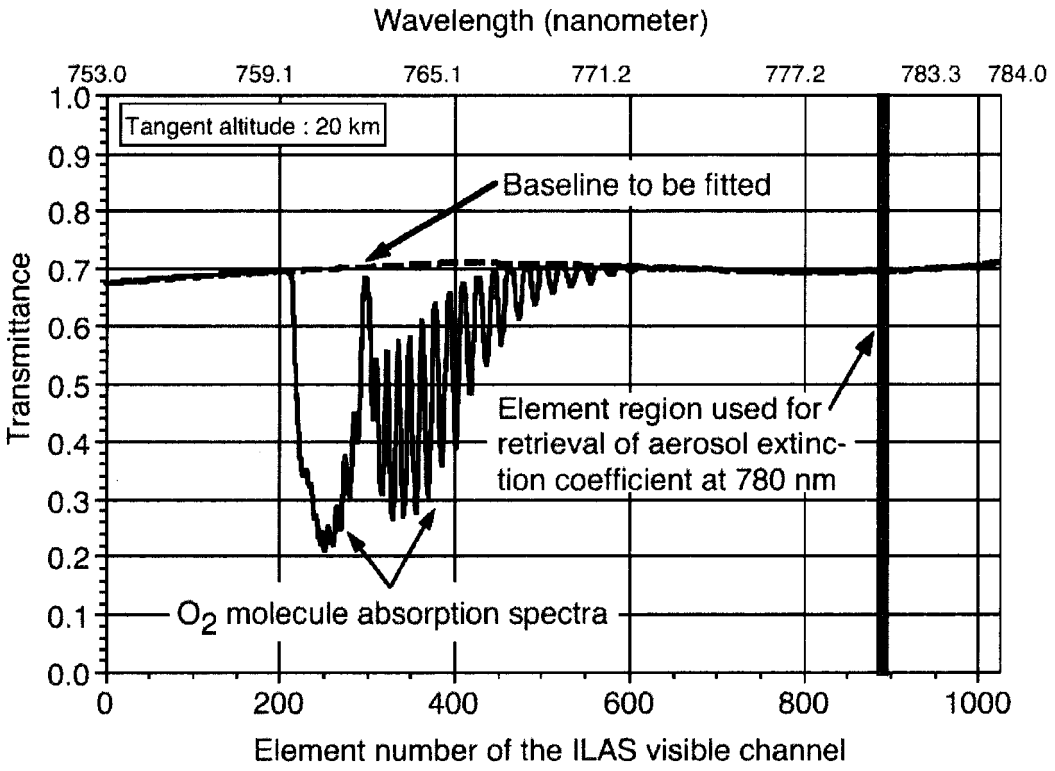


図 B-1　高度 20 km での ILAS 可視チャンネルの擬似透過率スペクトル
中央部の吸収スペクトルの構造は、酸素の回転 *A* バンドによる。ベースラインは、オゾン Wulf バンド吸収、気体分子のレーリー散乱、及びエアロゾルによるミー散乱から構成される[*Hayashida et al.*, 2000]。

透過率スペクトルのベースラインの形は、波長λを変数とする次式の線形フィッティングによって、酸素の吸収領域を除くスペクトル領域のデータから推定される。

$$- \ln(\tau(\lambda)) = a\lambda^{-4} + b\lambda + c + df(\lambda). \qquad \textbf{(B-1)}$$

上式の$f(\lambda)$はオゾンの吸収クロスセクションのスペクトルである。$f(\lambda)$に対して、Version 4.20 までは MODTRAN のサブルーチンを用いていたが、Version 5.20 では [Brion *et al.*, 1998] による実験データを用いている。$df(\lambda)$項はオゾンの Wulf バンドによる寄与に相当する。オゾンの寄与を除去することで、光路方向に沿ったエアロゾル消散と分子散乱だけによる透過率を算出できる。この透過率の逆数が単位光路長当たりの全（レイリー＋ミー）消散係数になる。各高度で太陽周縁減光の補正が行われ、最後に、全消散係数から単位長さ当たりのレイリー散乱成分を差し引くと、エアロゾル消散係数σ(780)が求められる。レイリー散乱はUKMOの気温、気圧データを用いて理論計算 [Fröhlich and Shaw, 1980] により求められる。

赤外信号に対してディジタルフィルタを適用しているのと同様に、可視分光器の信号にもそのフィルタを適用していることに注意を要する。このため、この平滑化に IFOV (1.6 km)のサイズと大気による屈折の影響を考慮すると、実際の観測データのトータルの鉛直分解能は、高度 15 km で 1.9 km、高度 25 km で 2.5 km、高度 35 km で 3.0 km、高度 45 km で 3.4 km、高度 55 km 以上で 3.5 km となる。

求めたエアロゾル消散係数に影響を及ぼしている主な誤差の原因には、以下の(1)～(6)がある。(1)計測機器の特性と性能による装置の誤差、(2)オゾンの吸収寄与の算出誤差、(3)UKMO データを用いたレイリー散乱成分の推定誤差、(4)接線高度決定の誤差、(5)光路長計算の不確定性、(6)太陽周縁減光の影響の見積誤差である。(1)の装置関連の誤差に関しては、ディジタルフィルタによるデータスムージングの効果と同様に、0 と 100%レベルの内挿・外挿の誤差要因が考慮されている。(2)についても、Version 5.20 で考慮対象となっている。内部誤差は(1)と(2)の値の二乗和の平方根により計算され、データプロダクトに付加されている。

レイリー散乱成分の推定誤差(3)は、ILAS の観測地点に対して、時間的・空間的に内挿された UKMO データの誤差に起因する。この誤差の推定には、数値シミュレーションを用いた。温度の不確定性を高度 10 km で±2 K、高度 70 km で±5 K と仮定して、レイリー散乱成分の変動量を各計測（1OE）ごとに計算した。これを外部誤差と定義した。データプロダクトに付加されているトータル誤差は、内部誤差と外部誤差の二乗和の平方根として定義される。Version 4.20 と同様に、その他の誤差の要因(4)～(6)については Version 5.20 では考慮されていない。

3．太陽掩蔽法を用いた衛星搭載センサーILASの接線高度決定：Version 5.20の新しい手法

要旨

改良型大気周縁赤外分光計（ILAS）は、成層圏のオゾン環境を監視・研究するために、日本の環境庁によって開発された太陽掩蔽法を用いた衛星搭載センサーである。この論文では、ILASによる大気微量成分とエアロゾル消散係数の鉛直分布算出のための、接線高度決定の方法を記述する。接線高度決定の方法は、大気の吸収スペクトルから正確な大気微量成分の体積混合比率をリトリーバルするために極めて重要である。接線高度決定のための3つの方法が開発され、ILASデータのリトリーバルに適用されてきた。第1の方法は、透過率スペクトル法（TS-M）である。接線高度を求めるために、この方法ではILAS可視チャンネルによる765 nm（O_2 A-Bnad）付近の酸素分子吸収スペクトルを用いて、観測で得た平均透過率と気候値データ（気圧、気温）から理論的に計算された平均透過率を比較する。TS-MはVersion 3.10 ILASデータプロダクトに用いられた。第2の方法は太陽エッジセンサー法（SES-M）である。これはILASが設計されたとき予定されていた本来の接線高度決定の方法である。SES-Mは、太陽のトップエッジと分光計のIFOVの角度差の情報と、太陽エッジセンサーで求められた太陽のトップエッジの位置の情報から、分光計の瞬時視野（IFOV）の方向を幾何学的に決定するものである。衛星の軌道位置と、地球中心に対する太陽位置の情報は接線高度決定に用いられる。SES-MはVersion 4.20 ILASデータプロダクトで用いられた。第3の方法はハイブリッド法（Hybrid-M）である。この方法は、TS-Mにより高度30 kmと決定された接線高度が正確であると仮定することによって、SES-Mから求めた接線高度に見られる季節変動を修正するために開発された。Hybrid-MはVersion 5.20 ILASデータプロダクトで用いられた。Hybrid-Mによる接線高度決定で起こりうるランダム誤差とシステム誤差が推定された。Hybrid-Mの全ランダム誤差の二乗和の平方根は30 mと推定されるのに対し、全システム誤差の値は接線高度で+300±360 mになると推定される。実際に、Version 5.20アルゴリズムの接線高度決定の誤差は、個々の検証データセットとの比較の結果から小さいと考えられる。以上より、Hybrid-MはILASのデータ処理アルゴリズム（Version 5.20）に対して、高精度の接線高度推定値を与えると結論づけられる。

3.1 はじめに

衛星搭載の大気センサーによる観測は、地球規模データセットを均質に得るという点で利点がある。これは地上観測では不可能なことである。これまで多くの衛星センサーが宇宙からの大気微量成分連続観測を行ってきた。これらにはSAGE [Russel and McCormick, (1984)]、SAGE II [Ruesell and McMormick, (1989)]、HALOE [Ruessel III *et al.*, (1993)]、POAM II [Bevilacqua, (1997)]、POAM III [Lucke *et al.*, (1999)]のような太陽掩蔽センサー

や、LIMS [Gille and RussellⅢ, (1984)] 、MLS [Barath *et al.*, (1993)] 、CLAES [Roche *et al.*, (1993)] 、ISAMS [Taylor *et al.*, (1993)] のような周縁放射センサーが含まれている。ADEOS に搭載された ILAS は太陽掩蔽法に基づいたセンサーである [Sasano *et al.*, (1999a)] 。ILAS は ADEOS に搭載されて打ち上げられ、これは宇宙開発事業団（NASDA）の H-Ⅱ型ロケットの 4 回目の打ち上げであった。結果として、ILAS は 1996 年 11 月から 1997 年 7 月にかけて 6700 回以上の観測を行い、この観測から、O_3、HNO_3、NO_2、N_2O、CH_4、H_2O、エアロゾル消散係数に関する鉛直分布のデータセットを得ることができた [Sasano *et al.*, (1999b)] 。大気による光の屈折の影響を考慮すると、有効な鉛直分解能は接線高度と IFOV のサイズに依存する。この分解能は高度 15 km で 1.9 km、高度 25 km で 2.5 km、高度 35 km で 3.0 km、高度 45 km で 3.4 km、高度 55 km 以上で 3.5 km である [Yokota *et al.*, (2001)] 。

太陽掩蔽法、周縁放射法のどちらを用いても、大気周縁観測の目的変数（パラメータ）の正確な鉛直分布を求める上で、接線高度決定は極めて重要である。接線高度は、観測光路と地球表面間の最小距離（垂線）として定義される。

これまで 3 つの方法が、ILAS のデータ処理アルゴリズムの接線高度決定に対してテストされ、採用されてきた。Version 3.10 アルゴリズムは可視分光計の 12 Hz データを利用した。このデータは波長 760 nm 付近の O_2 A-Band 吸収スペクトルを含んでいる [Nakajima *et al.*, (2001)] 。ILAS の可視分光計で得られた平均透過率と、UKMO 同化データの気温、気圧データを用いて理論計算して求めた透過率を比較することによって、ILAS がデータを取得したときの接線高度を計算した [Swinbank and O'Neill, (1994)] 。酸素分子の体積混合比が高度 80 km 以下では高度によらず一定であるということに、この理論計算は基づいている。しかし、この方法は高度 50-60 km 以上では適用不可という欠点がある。なぜなら、UKMO 同化データはこの高度域以上では存在しないためである。よって、統計的に算出された気候値データを適用しなければならなかった。

Version 4.20 のアルゴリズムでは、衛星位置、太陽方向、地球輪郭、IFOV と太陽のトップエッジの角度差の情報を用いて接線高度を計算して、地球中心に対する IFOV の方向を求めるために幾何学計算を実行した。角度差は太陽エッジセンサー（SES）データから求めた [Nakajima *et al.*, (2001)] 。ILAS の Version 4.20 アルゴリズムを用いて接線高度決定をして、リトリーブされた 71 個のエアロゾル消散係数は、SAGEⅡ（Version 5.931）の観測と比較され、その結果、1.0×10^{-5} km^{-1} 以上の消散係数を伴う高度範囲で 10-20%以内の一致が見られた [Hayashida *et al.*, (2000)] 。しかし、ILAS と検証実験の大気微量成分の算出結果を比較すると、季節依存した相違が Version 4.20 のプロダクト中に見られた。同時に、この方法で求められた接線高度と以前の方法（Version 3.10）による接線高度を比較すると、ある高度で、2 者間の相違は季節により変化する。これらの事実は、SES 検出アレイに対する IFOV 位置の変化で説明されると思われる。この変化は装置内の温度に依存していると思われる [Nakajima *et al.*, (2001)] 。

この問題を解決するため、Version 5.20 アルゴリズムを導入した。このアルゴリズムでは、

Version 4.20 を修正し、Version 3.10 を用いて推定した接線高度が 30 km においては正確であるという仮定をして、SES の IFOV 位置を各掩蔽観測イベント（Occultation Event; OE）ごとに求めている。

この論文は接線高度決定のこれら 3 つの方法（Version 3.10、4.20、5.20）について記述したものである。2 節では、ILAS の太陽追尾の概論、接線高度の定義、屈折計算の方法を述べる。3 節では、O_2 A-Band 吸収を利用した Version 3.10 アルゴリズムで使われた方法を記述し、誤差の要因を議論する。4 節では、SES データを用いた幾何学的方法を、詳細に記述する。5 節では、幾何学的方法の季節変動を修正するための Hybrid 法を示す。最後に、6 節では、接線高度決定の起こりうる誤差を推定し、いくつかの残された課題について議論する。

3.2 光路と接線高度

ILAS は軌道中で、太陽の輝度中心を自動追尾するように設計されている [Nakajima *et al.*, (2001)]。太陽追尾は 2×2 の 4 分割ディテクター（精太陽位置検出器, FSPS）によるディジタルフィードバックシステムによって、視野角約±0.5° の IFOV で行われた。FSPS は 4 つの望遠レンズを採用し、そのレンズは直径 25.0 mm、焦点距離 72.0 mm である。ILAS の追尾精度は、方位・仰角の視線方向において、±2 分角より良い精度が出るように設計された。回転する平面鏡を使ったソーラーシミュレーターによる実験室での試験運転では、その精度は両方向に対して 0.5 分角程度の値を示した。FSPS で太陽の輝度中心の追尾を開始する前に、粗太陽位置検出器（CSPS）が太陽の像を捉えるのに用いられる。CSPS は視野角約±5° の IFOV による 2 次元 PSD (Position Sensing Detector) を用いている。CSPS は直径 8.5 mm、焦点距離 21.7 mm の屈折望遠鏡を用いている。方位角、仰角の初期位置は理論計算され、前もって地上から伝達される。

ILAS の分光計の IFOV は、ILAS の太陽追尾システムで捉えられた太陽の輝度中心の方向に向くように設計・製造されている。大気の分子数密度変化が地球表面からの高度のみに依存すると仮定すると、太陽から ILAS への光路は、ILAS によって捉えられた太陽の輝度中心、地球の中心、ILAS 位置の 3 者によって結ばれる平面内を伝わる。大気による屈折のため、光路は直線からは逸脱する。つまり、図 3.1 に示されるように、ILAS から見た太陽の見かけ上の方向は、真の太陽位置とは異なる。

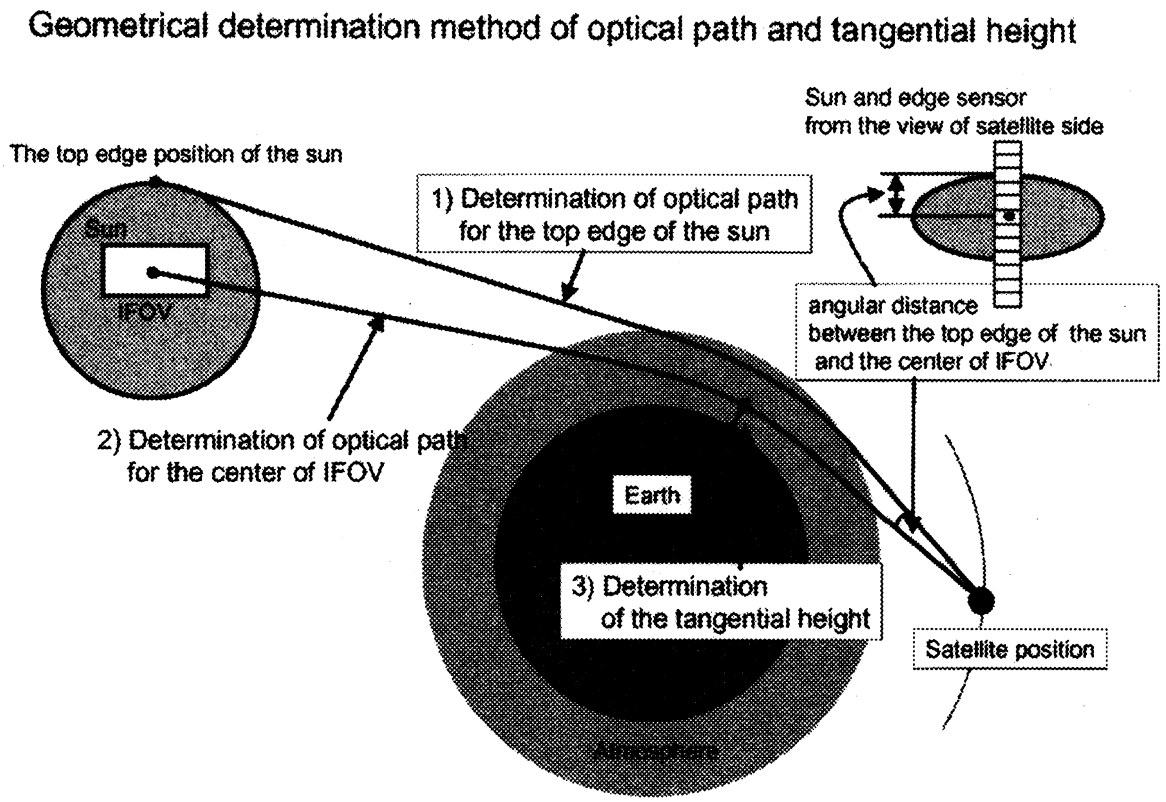


図 3.1　掩蔽ジオメトリーと接線高度決め定義の概略図

接線高度を光路と地球の理想表面との最短距離と定義する。地球は偏球なので、各地点ごとの地球半径は緯度の関数として与えられる。IOE に対して、日毎に前もって計算された 20 km の接線高度に相当する平均緯度が地球半径を求めるために用いられる。この近似は接線高度決定の際に、僅かではあるが、システム誤差の原因となる。なぜなら、この sub-tangent latitude（衛星直下接線緯度）は衛星の移動につれて 1 日以内でも変化するし、屈折の影響は地球表面からの高度に依存するからである。光路は地球球面に対するスネルの法則と、各地点ごとの地球半径による大気モデルを適用することによって、数値計算される。この方法の詳細を以下で述べる。

地球の形状を回転楕円体と仮定し、この場合の長軸を地球中心から赤道へ、短軸を地球中心から極へ向かうものとする。接線高度を計算するとき、ILAS の観測位置（緯度、経度）における楕円型地球の半径を求め、地球はその半径を持つ完全球体と仮定する。大気中での屈折光の光路トレースのために、スネルの法則は、ある屈折率を用いて、次式のように与えられる。

$$L = n(r) r \sin\theta \qquad (1)$$

この式は球対称物体で適用される。ここで、rは光路上のある点と地球中心の間の距離、nは屈折率、θはrでの光の入射角、Lは各光路ごとに求められる定数である。各光路に対して、入射角θと距離rは幾何学的関係で与えられる。定数Lは屈折率n=1の仮定のもとで求められる。次に、接線高度はθ=90°とすることで求められる。屈折光は、光路に沿って、Lの値が僅かな増分を伴う一定値を保つように定義される [Gallery *et al.*, (1983)]。

衛星の位置と速度データは150 mの精度（3σ）で毎分、ADEOS衛星側から提供された。時間補間が、僅かな補間誤差を伴うものの、衛星位置を与えるエルミート補間法を用いて行われた。太陽の位置は、春分点を西暦1997年5月として与えることによって、Newcomb [1895] のtableを用いて計算された。

空気密度の鉛直分布は気温と気圧の鉛直分布から計算され、この気温・気圧鉛直分布は1日1回、12時UTのUKMOにより提供された [Swinbank and O'Neill, (1994)]。時空間への補間がILASの位置・時刻情報に適用された。UKMOデータが無いような、より高高度の領域では、CIRA-86の温度・気圧鉛直分布 [Fleming *et al.*, (1990)] をUKMOデータとスムーズに繋がるように代用した。

屈折率nは波長と温度の関数であるが、ここでは各々、可視分光計に対して波長780 nmの屈折率、赤外分光計に対して波長9.0 μmの屈折率を用いる。Frohlich and Shaw [1980] に従って屈折率を計算した。

3.3 透過率スペクトル法（TS-M）

ILASの可視分光計は波長領域753 nm～784 nmをカバーしていて、酸素分子による吸収スペクトル（O_2 A-band）を計測するための素子数は1024個である。O_2 A-band観測の本来の目的は、大気中の酸素分子の体積混合比が高度に依らず一定であるという事実を用いて、気温と気圧の鉛直鉛直分布を求めることであった。反対に、気温と気圧の鉛直分布が与えられた場合、酸素分子による吸収スペクトルが理論計算され、ILASの観測光路方向に沿った透過率スペクトルを接線高度の関数として推定できる。理論計算によるスペクトルとILAS観測のスペクトルが、ILASデータストリームの最小単位の1メジャーフレームごとに、時間の関数として接線高度を与えるために比較される（Appendix A参照）。ここでは、接線高度決定をするこの手法を、透過率スペクトル法（TS-M）と呼ぶことにする。TS-Mにより Version 3.10のプロダクトを作成した。

$$A = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\tau(\lambda_i) \qquad (2)$$

平均透過率Aは理論値と観測値を比較するために計算され、それは次式で表せる。ここで、$\tau(\lambda_i)$は波長λ_iにおける透過率を表し、図3.2に示されているように、O_2 A-bnadのP枝にあたる波長763.2～766.6 nmと766.8～772.3 nmをカバーするn(=294)個のILASの可視

域素子（素子番号；329～441、449～629）に対して和算は実行される。442～448 番の素子については、フィッティング誤差が大きく、強いフラウンホーファー線が存在するため除外した。理論透過率 A は高度 1 km ごとに計算される。このアルゴリズムでは、O_2A-band ラインパラメータに対して、HITRAN（HIgh resolution TRANsmission）1996 の分子スペクトルデータベースを用いている。この計算では、衛星の移動によるドップラー効果も考慮されている。A の値を ILAS データから各メジャーフレームごとに計算した。可視分光計の透過率計算の詳細については [Yokota *et al.*, (2001)] を参照のこと。

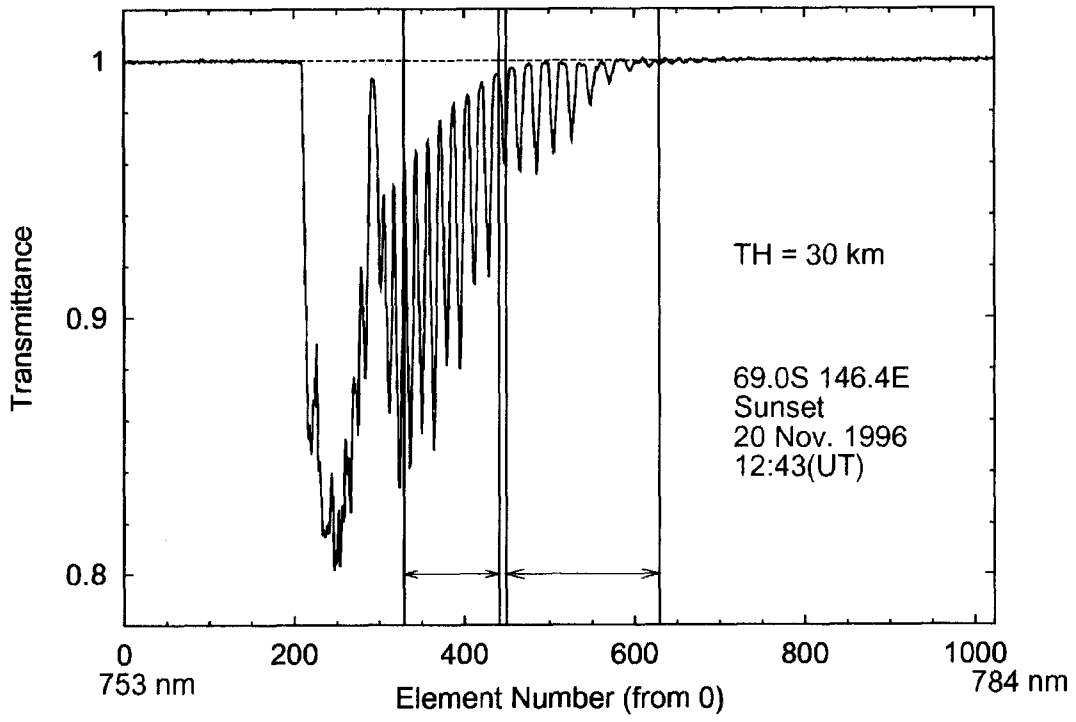


図 3.2　接線高度 30 km における ILAS 可視チャンネルの透過スペクトルの例
O2A バンドの R 枝、P 枝による理論透過率を示す。両矢印で示される範囲は TS-M 計算で用いられた領域を示す。

透過率を計算するために、ILAS 観測データの時刻・空間位置に合致し、かつ高度 1 km ごとに時空間（空間は水平方向）で補間した UKMO 同化データ [Swinbank and O'Neill, (1994)] を用いた。UKMO では 0.3162hPa の気圧面より高高度のデータが無いので、この高度領域については、CIRA-86 モデル [Fleming *et al.*, (1990)] を用いた。この作業の際に、UKMO の最上層（上限）データより 5 km 上空の領域では、この 2 つのプロファイルが滑らかに繋がるようにした。

図 3.3(a)は平均透過率(A)の計算値の鉛直分布を示している。一方、図 3.3(b)はメジャーフレーム番号を変数とする平均透過率(A)の観測値を示している。これら 2 つの結果を比較することで、図 3.3(c)に示されるように、接線高度がメジャーフレーム番号の関数として求められる。

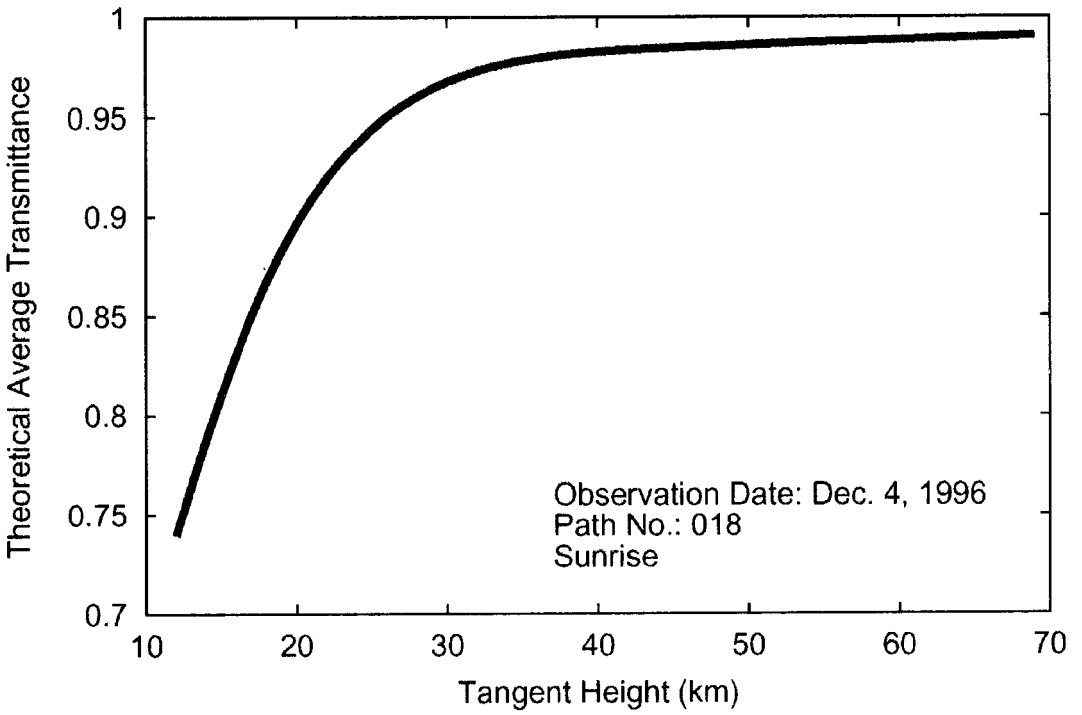


図 3.3 (a)　UKMO 同化データを用いて計算された理論平均透過率(T)の鉛直分布

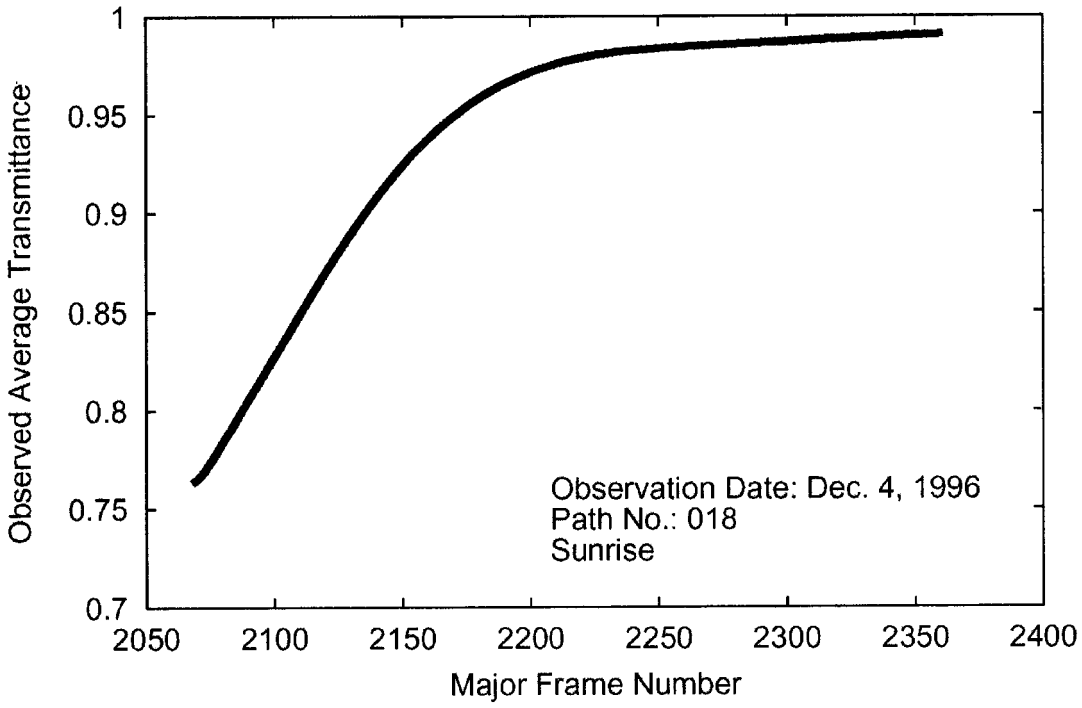


図 3 (b)　ILAS 計測から求めた、メジャーフレーム番号を関数とする T の分布

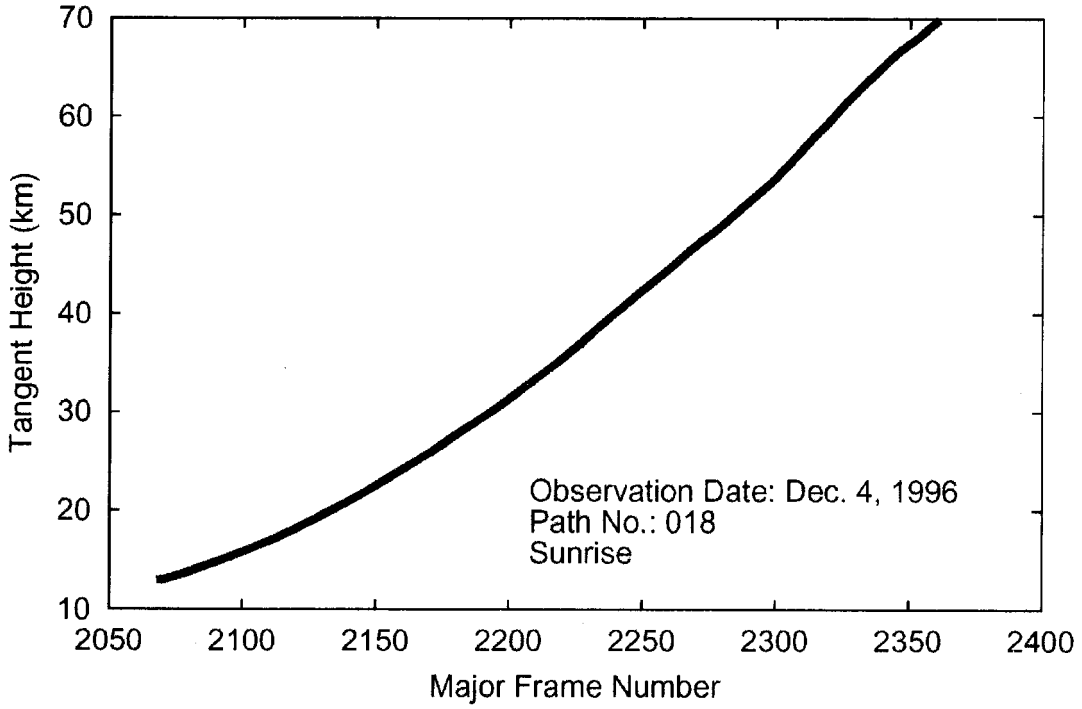


図 3(c)　メジャーフレーム番号に対する接線高度

TS-M で起こりうる誤差の原因は、気候値データそれ自体の不確定性や気候値データに対して高度割り当てをする際の不確定性にある。高度 10 km で±2 K、高度 70 km で±5 K を気温誤差（不確定性）の最大値とすると、これらの不確定性により高度 30 km 以下で約±50 m、高度 30 km 以上で約±250 m の高度誤差が発生することを数値シミュレーションは示している。原則として、(2)式の和算の範囲が変わったとしても、この方法で求めた接線高度は一定値を保たれなければならない。しかしながら、実際には、算出された接線高度は波長領域の選択に依存し、このことは O_2 A-band のラインパラメータ、ベースラインフィッティング、あるいは ILAS データ自体に問題があることを示している。解決すべき原因が残ってはいるが、和算の範囲を変えた場合の接線高度の変化は小さく、その差は最大で 200 m である。

3.4　太陽エッジセンサー(SES)法　(SES-M)

SES を用いて接線高度を幾何学的に求めるには以下(1)～(4)が必要になる。(1) NASDA/ADEOS によって天体位置データの一つとして提供される、地球を中心とした直交慣性座標系（ECI 座標系）における衛星の位置情報、(2) Newcomb [1895] の table を用いて

計算される、ECI 座標系における太陽位置（方向ベクトル）、(3) 分光計の IFOV と SES データによる太陽のトップエッジ間の角度差、(4) 大気中の屈折率を計算するための大気密度（気温・気圧）の鉛直分布。ここでは、この接線高度決定の方法を SES 法（SES-M）と呼ぶ。

SES は望遠鏡（焦点距離 f=630 mm）の 1024 素子 MOS（*Met al* Oxide Semiconductor）フォトダイオードアレイから構成される [Nakajima *et al.*, (2001)] 。各素子の分解能は鉛直方向に約 8 秒であり、これは接線高度で約 130 m に相当する。接線高度 20 km で太陽を見たとき、検出素子アレイが水平面に対して垂直になるように製造されている。接線高度が変化するにつれて、検出素子アレイの軸はわずかに回転する。接線高度 50 km では、回転角の範囲は、無視できる程度ではあるが、季節や各半球に応じて±0.38 から±0.56° である。つまり、太陽表面上への SES イメージの投影は、太陽中心、地球中心、衛星位置の 3 点で結ばれる平面内にあると仮定できる。接線高度決定の過程を図 3.4 に示し、以下で説明する。

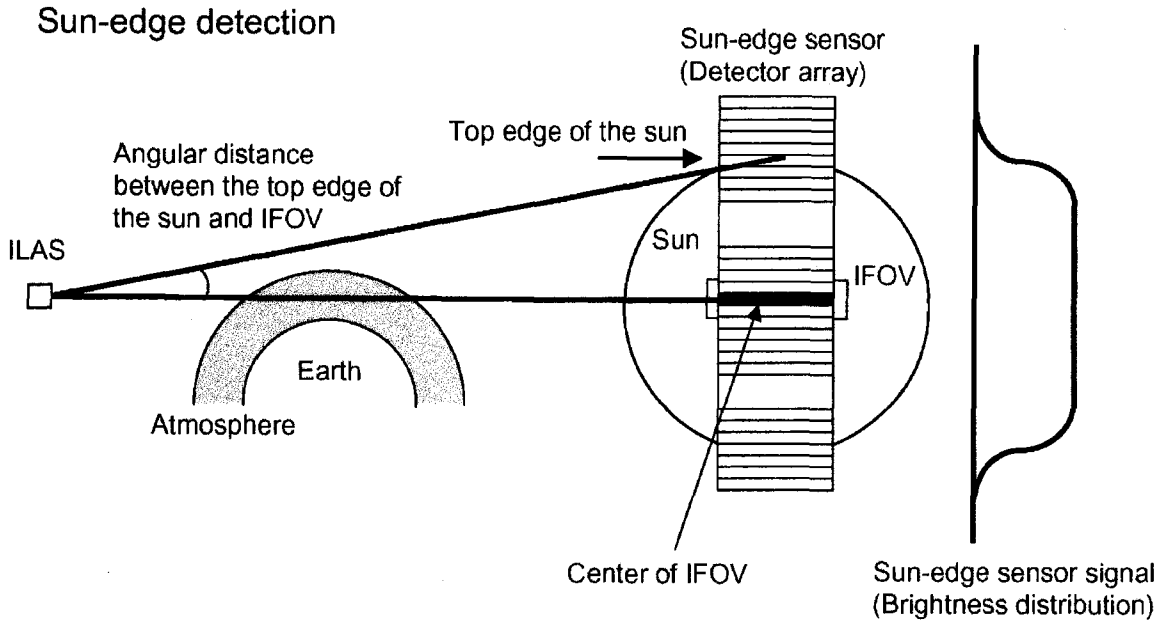


図 3.4　SES を用いた接線高度の位置合わせの概略図

まず、簡単のため大気による屈折が無い状態を考える。太陽の直径は正確に分かっているので、衛星から太陽のトップエッジへの方向は衛星と太陽の位置情報から計算できる。次に、分光計から IFOV への方向を与えると、角度差は太陽のトップエッジに相当する素子番号と分光計の IFOV に相当する素子番号の差として SES によって求められる。接線高度は衛星の位置情報と地球の形状を用いて計算される。大気による屈折の影響を考慮したとき、光路は太陽のトップエッジ、IFOV の方向にとって、見かけ上の方向に計算される。

SES を用いて IFOV の方向を計算するために、どの検出素子アレイが太陽のトップエッジに相当するのか、知る必要がある。SES アレイ上の太陽トップエッジの位置は、SES 上の 1 次元太陽イメージの変曲点から求められる。これは以下の理論考察に基づいている。単純化のために、太陽表面の放射分布は一定で、図 3.5(a)のような矩形の分配関数で表現できると仮定する。さらに、検出素子の装置関数（Spread function）は素子番号ごとに独立で、図 3.5(b)のように対象なパターンを示すと仮定する。

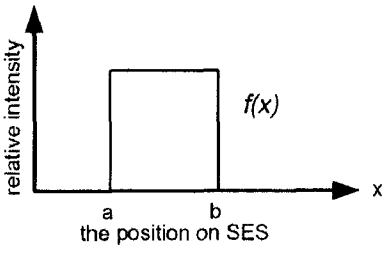


図 3.5(a)　太陽放射分布関数

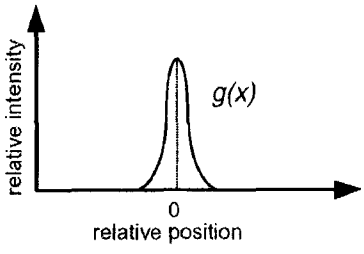


図 3.5(b)　装置関数

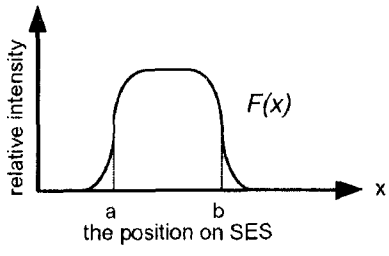


図 3.5(c)　SES による太陽放射イメージの出力

太陽放射分布（分配関数）を $f(x)$、装置関数を $g(x)$と標記する。次に、SES 検出アレイ上の太陽イメージ $F(x)$は $f(x)$と $g(x)$のコンボリューションになり、次式のように表せる。

$$F(x)=\int_{-\infty}^{+\infty} f(y)g(x-y)dy=\int_{-\infty}^{+\infty} f(x-y)g(y)dy \qquad (3)$$

$F(x)$の 1 階導関数は次のように表される。

$$\begin{aligned} F'(x) &= \int_{-\infty}^{+\infty} f'(x-y)g(y)dy \\ &= C\int_{-\infty}^{+\infty}\{\delta(x-a-y)-\delta(x-b-y)\}g(y)dy \qquad (4) \\ &= C\{g(x-a)-g(x-b)\} \end{aligned}$$

ここで、C は定数、$\delta(x)$はデルタ関数（クロネッカーデルタ）を表す。したがって、各素子の装置関数が $g(0)$でピークを示す場合、SES 検出アレイ上の太陽イメージ信号の 1 次導関数が極値を示す点は、太陽エッジに相当する位置を与える。言い換えると、図 3.6 の点 a, b で示されるように、これらの点は変曲点である。実際の太陽は、必ずしも理想的な矩形の放射分布をしているわけではなく、周縁減光の影響により、少し滑らかな形をしているけれども、周縁部の放射の変化がかなり急激であるため、上記の近似は有効である。SES 信号から変曲点を求めるために、2 次、3 次多項式をフィッティングすることによってスムージングした微分計算が信号に 2 回適用され（2 階微分）、次に、その 2 次導関数がゼロになる点を変曲点として選びだす。

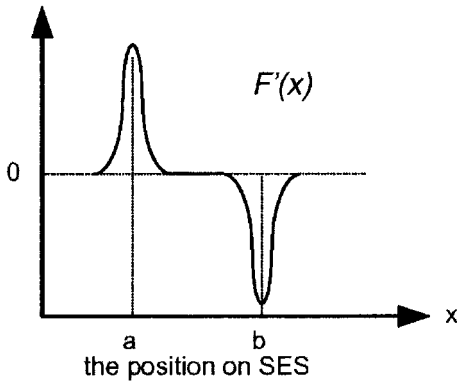


図 3.6. 太陽エッジ位置推定に用いられた SES 信号の 1 次導関数

エッジの決定の誤差には、様々な原因が考えられる。それらは次の(1)～(5)が挙げられる。(1)装置関数の不均一性、(2)装置関数のピーク位置のシフト、(3)検出素子の狭い鉛直幅（約 8.2 秒角）、(4)検出素子の広い水平幅（約 13.8 秒角）、(5)ノイズ減少と数値微分（numerical differentiation）。(1)、(2)については打ち上げ前の試験で調査され、その影響は無視できると分かっている。(3)、(4)、(5)の影響は数値計算され、その全影響は接線高度で約 230 m の負のバイアス誤差を示すと計算された。

次に重要なパラメータは、各分光計が検出アレイ上の太陽イメージのどの部分を見ているかである。つまり、SES 検出アレイ上の、どの素子が分光計の IFOV に相当するかである。打ち上げ前の試験で、558 番の素子が可視分光計の IFOV に相当することが判明している。

可視分光計の IFOV と赤外分光計の配置関係を図 3.7 に示す [Nakajima *et al.*, (2001)] 。

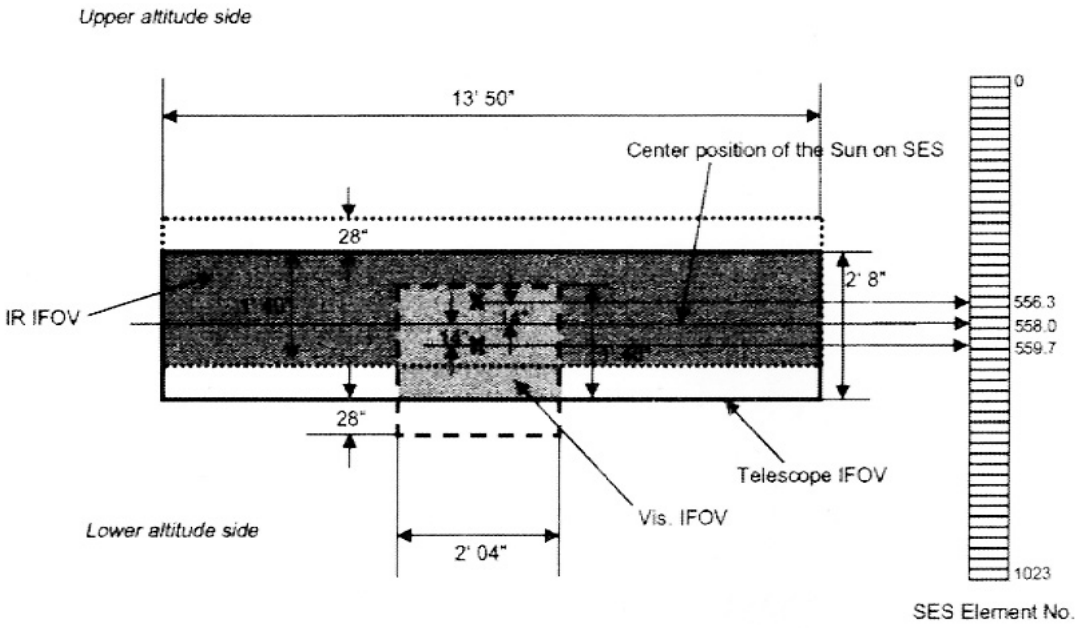


図 3.7　可視分光計、赤外分光計の IFOV の相対配置

可視分光計の IFOV は幅 2' 04"、高さ 2' 08"である。また、赤外分光計の IFOV は幅 13' 50"、高さ 2' 08"である。これら 2 つの IFOV の中心は鉛直方向に 28" だけシフトしている。SES の角分解能は 8.196 (±0.034) 秒角である。望遠鏡の IFOV、可視分光計の IFOV、赤外分光計の IFOV の中心は SES の素子の、それぞれ 558.0 番、556.3 番、559.7 番に相当する。

図 3.8(a)に 1996 年 10 月 1 日からの通算日数を変数とした、SES から計算された太陽の直径（太陽のトップエッジとボトムエッジに相当する素子番号の差）を示す。同じ図中に、地球と太陽の距離を考慮した、太陽の直径の理論値も示す。ここでは、角解像度 8.196 秒角が用いられている。地球と太陽の距離の季節変動を補正した後、図 3.8(a)と同様の日数を変数とする見かけ上の角解像度を図 3.8(b)に示す。図 3.8(a)に示されるように、期間の前半では、ILAS 観測による太陽の直径が理論値よりわずかに大きくなった。それに応じて、素子毎の角解像度が同じ期間で小さくなっている (図 3.8(b))。計測機器内の温度変化のような、光学的特性の変化が、この角解像度変化の原因の 1 つと考えられる。しかし、ILAS の運用が 1 年未満であったことにより、同じ現象の再現が現れていないことから、真の原因を断定することは困難である。ただ、変化の大きさは角素子ごとに約 0.02 秒角であり、これは率にすると 0.3%未満なので、無視できるものと思われる。まとめると、太陽のエッジは首尾良く求められたと考えられる。

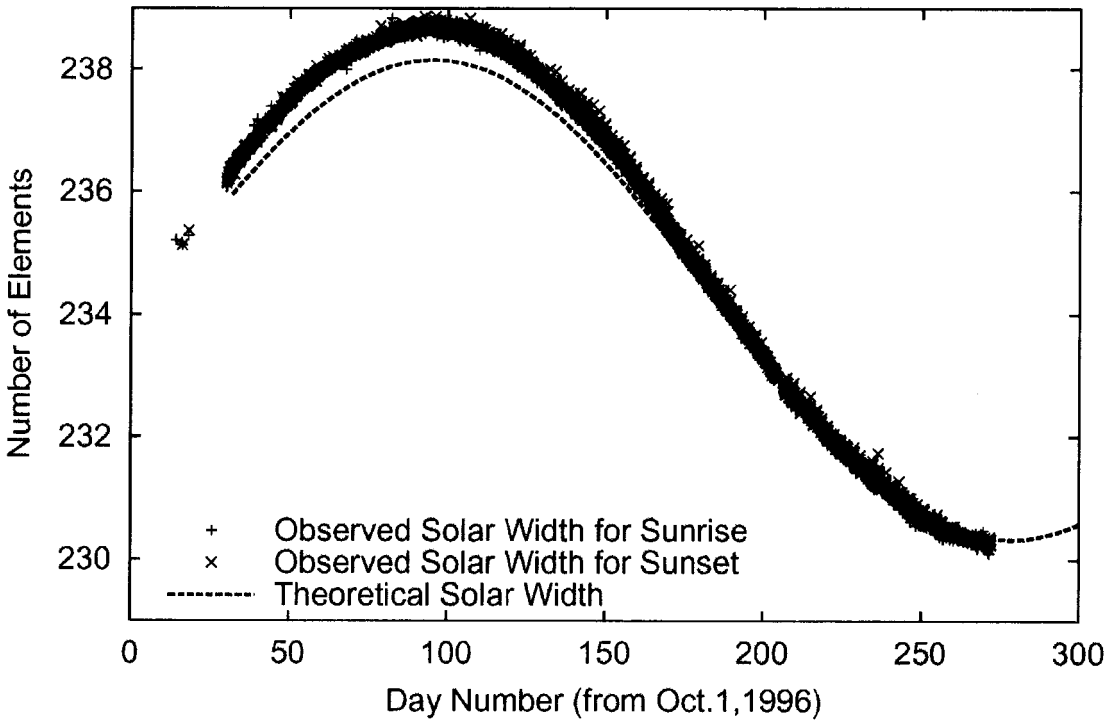


図 3.8(a)　太陽直径の季節変動

各点は ILAS 観測による値を表し、赤線は理論値である。

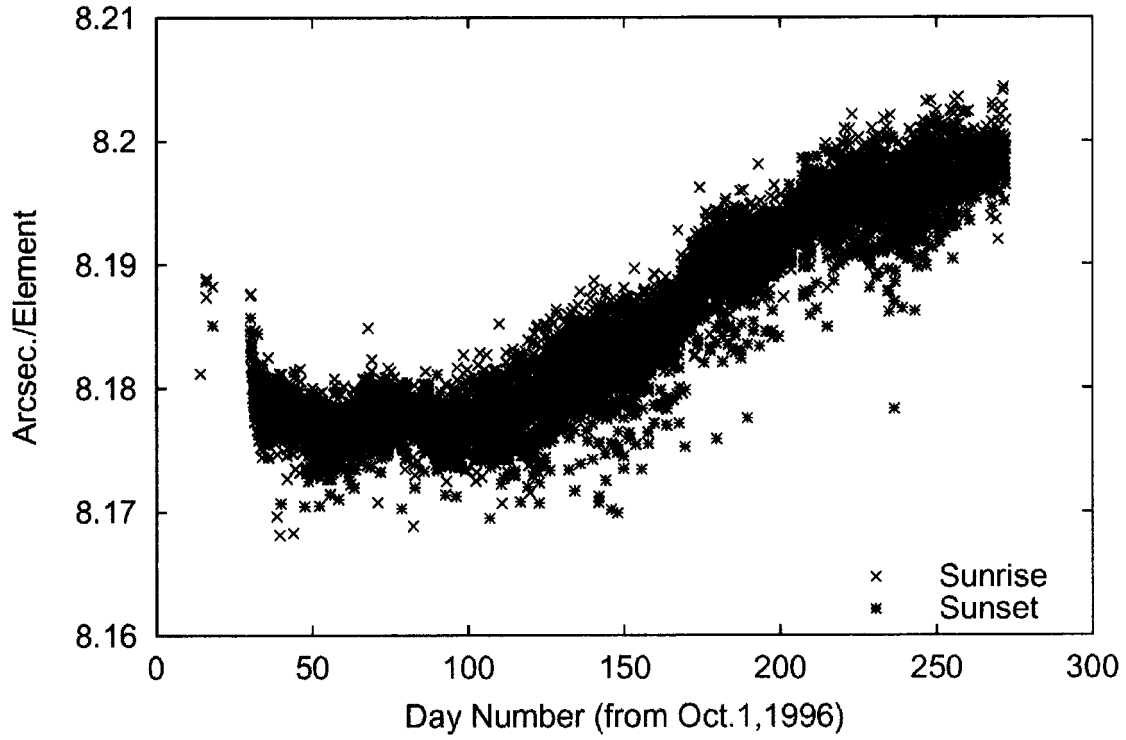


図 3.8(b)　SES 素子の角分解能

その他の重要な問題点は、SES、可視分光計、赤外分光計による計測と信号記録のタイミングを調整することである。これらの計測器はデータを取得するのにある一定の時間を必要とし、また、ADEOS 内のデータ記録部にデータを記録するのにも、ある一定の時間を必要とするので、各計測器ごとの正確な計測時間を再計算する必要がある。図 3.9 は、計測（input）からデータ記録（output）までの一連のデータフローを示したタイミングチャートである。

この図中で、VIS-1 は可視分光計データを表し、VIS-2 は SES データを表している。また、赤外検出器は約 65 msec の不感時間 t_0 の 3 次元遅系として近似される。遅延時定数は平均で約 400 msec である [Nakajima *et al.*, (2001)] 。各接線高度に対する正確な時刻を求め、そして分光計のデータストリームから適切なデータを得るために、これら全ての遅延時定数を考慮しなくてはならない。

SES の検出素子の中心部（素子番号 511 ; 図 3.9 の"Mean time for obtaining VIS-2 data"）が太陽を捉えたときの時刻に対して、可視分光計と赤外分光計の検出アレイの中心部は各々、20.52、21.00 msec 早く太陽光を受ける。可視と赤外の検出アレイの最後部検出素子が太陽光を捉える時間差は、各々20.48、0.88 msec である。

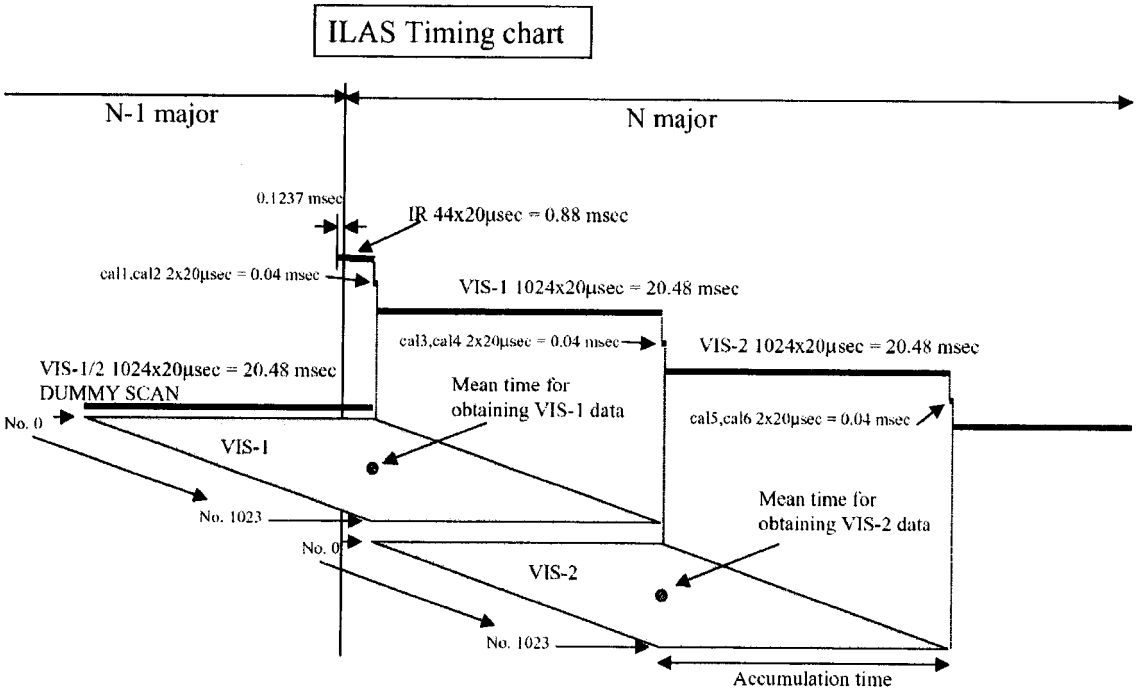


図 3.9　計測（入力）から記録部（出力）までのデータフロー系列を示したタイミングチャート

ILAS の観測信号は、1 メジャーフレーム内に太陽エッジセンサー、赤外分光計データ、可視分光計データ、衛星 bus からの入力データに関する個々のデータストリームをフォーマットした後、ADEOS に搭載されているデータ記録部に記録される。メジャーフレーム構造の詳細については、Appendix A 参照のこと。太陽のトップエッジの位置は 1OE 内の各メジャーフレームに対して SES データから求められる。接線高度を算出する上記の方法を適用する前に、太陽のトップエッジ位置のデータストリームが、カットオフ値約 0.5 Hz のローパスフィルター（Low Pass digital filter）を用いて平滑化される [Yokota et at., (2001)] 。IFOV の素子番号が可視、赤外で異なることや、赤外検出器の長遅延時定数のために、同じメジャーフレーム内でさえも、赤外分光計、可視分光計に対して、異なる接線高度が割り当てられる。

3.5　修正版 SES（ハイブリッド）法（Hybrid-M）

3 節の TS-M で求めた接線高度と 4 節の SES-M で求めた接線高度の差を比較することは興味深い。図 3.10 に TS-M で求めた接線高度を変数とした比較結果を示す。ここでは、同じメジャーフレームについて、SES-M と TS-M で求めた接線高度が比較されている。この図 3.10 には、1997 年 5 月の北半球で得られた全データをプロットした。その結果、両方法に、はっきりとした相違が見られた。この相違は以下(1)～(3)のように特徴づけられる。

(1)高度 20 から 35 km の間では約 400 m の正バイアス (SES-M による接線高度が TS-M のそれを上回っている)、(2)高度 20 km 以下では、高度が下がるにつれて、相違幅も小さくなっていく、(3)高度 40 km 以上では相違幅に大きな変動が見られる。

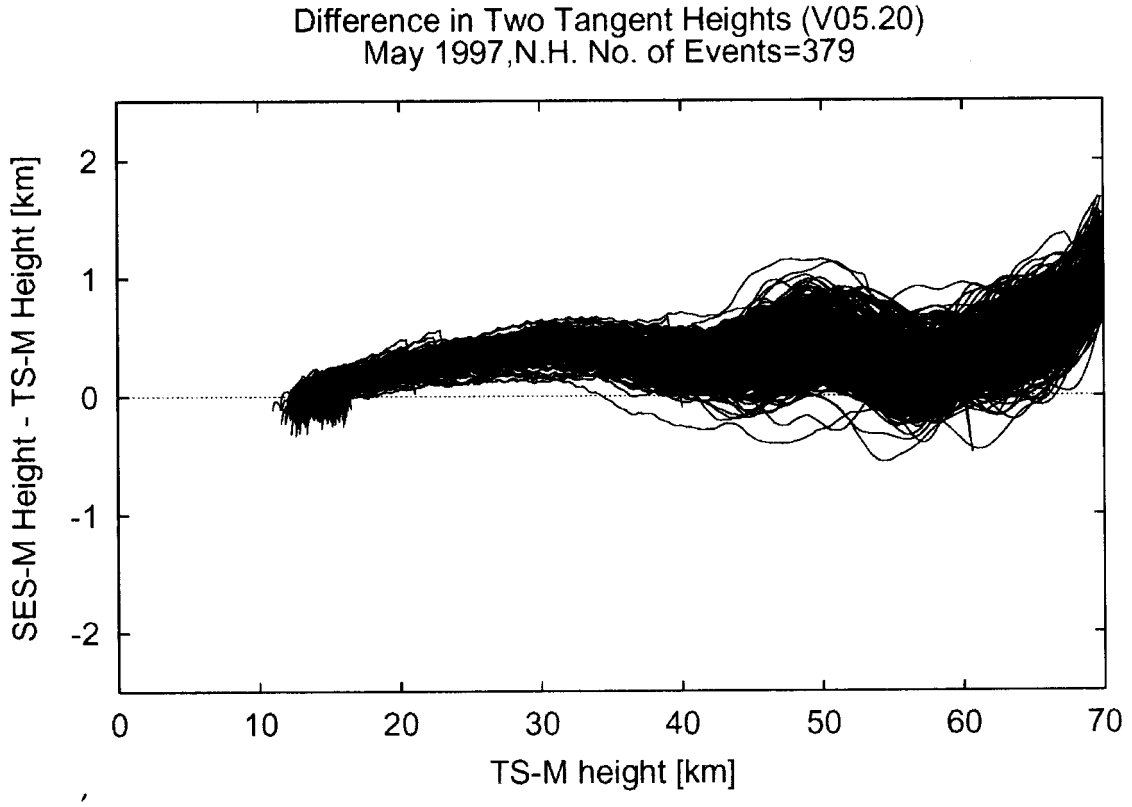


図 3.10. 1997 年 5 月 北半球の全掩蔽観測に対する接線高度のうち、SES-M と TS-M で決められた値の差

同じように、TS-M で接線高度 30 km となるメジャーフレームに対して、TS-M、SES-M の 2 つの方法で求めた接線高度の相違を求める。全観測期間における日数を変数として、北半球の結果を図 3.11(a)に示し、南半球の結果を図 3.11(b)を示す。これらの結果は季節依存性を示している。両半球間の季節依存のパターンにも相違が見られる。この原因の一つは、太陽エッジセンサーの光学的特性の季節依存性、特に分光計の IFOV 位置が装置内の温度に応じて変化するためと思われる（ [Nakajima *et al.*, (2001)]の図 3.20 参照)。あいにく、これを検査する手段が無い。代わりに、実用的な補正方法、ハイブリッド法（Hybrid-M）が用いられた。

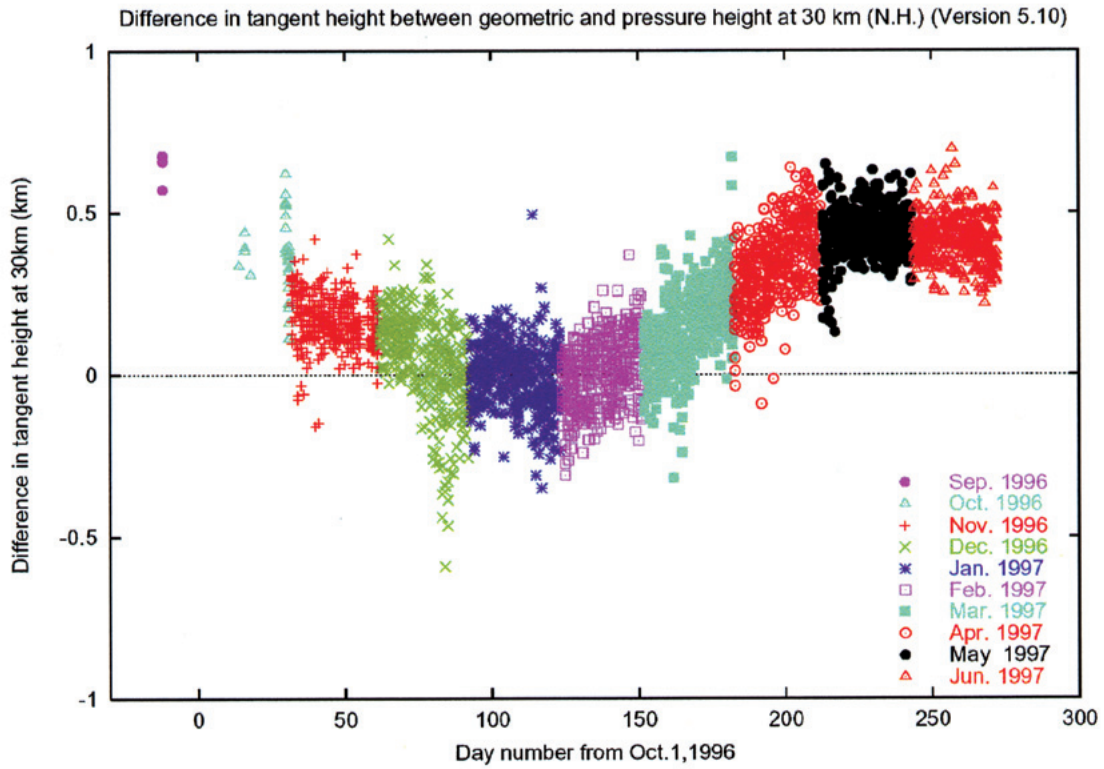


図 3.11(a)　北半球において、TS-M で接線高度 30 km を示すメジャーフレームを用いて SES-M から求めた接線高度との差

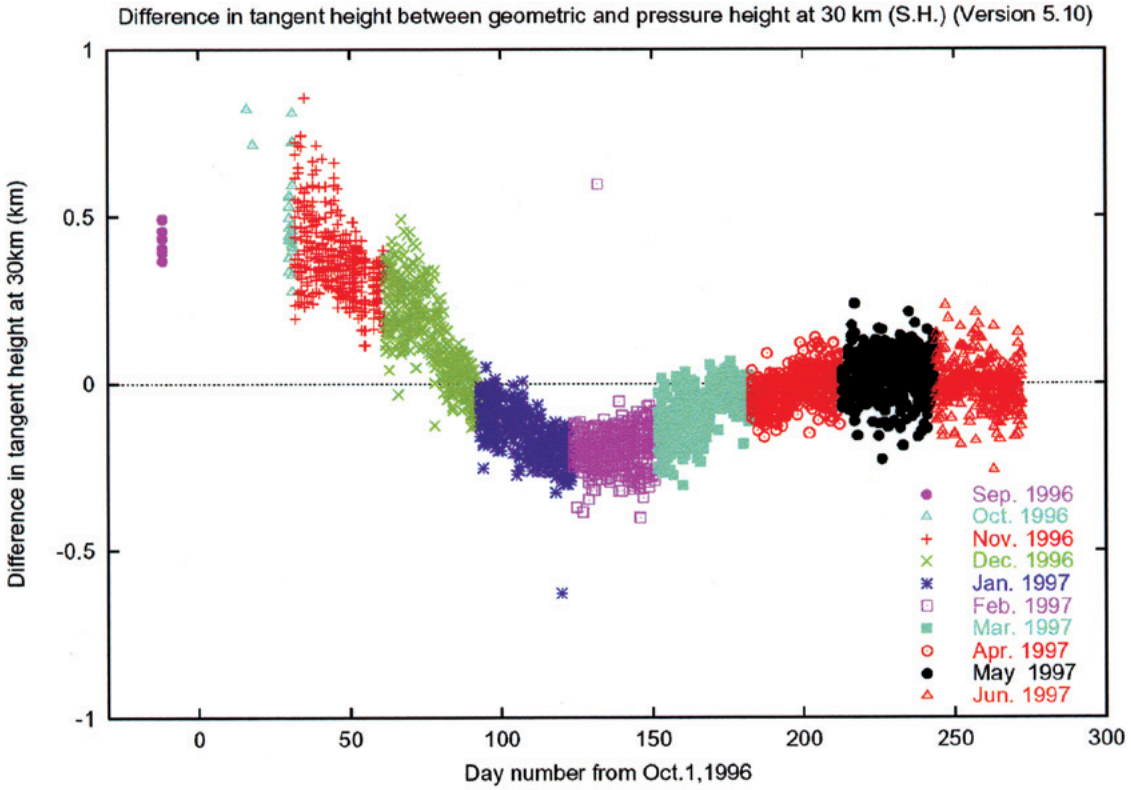


図 3.11(b)　南半球における同様の差

まず、TS-M で求めた接線高度 30 km が正確であると仮定する。TS-M で接線高度 30 km を与えるメジャーフレームについて、接線高度を SES-M で求めると、その接線高度は等しくなるはずである。この 2 者に相違がある場合、可視分光計の IFOV に相当する SES 素子は、打ち上げ前の試験で割り当てられた素子とは異なっているはずである。図 3.11(a)、(b)に示されるように、この相違の範囲は角度補正（angle correction）として推定される。この補正により、接線高度 30 km における相違は解消される。次の仮定は、同様の補正を他の全ての高度にも適用することである。TS-M による接線高度を変数として、Hybrid-M と TS-M により求めた接線高度の相違を図 3.12 に示す。高度 30 km のオフセットは無くなり、高度 15 km から 35 km 間のシステムオフセットも無くなるようである。高度 40 km 以上の変動は、実際の気温と CIRA の気温との相違によるものと考えられる。

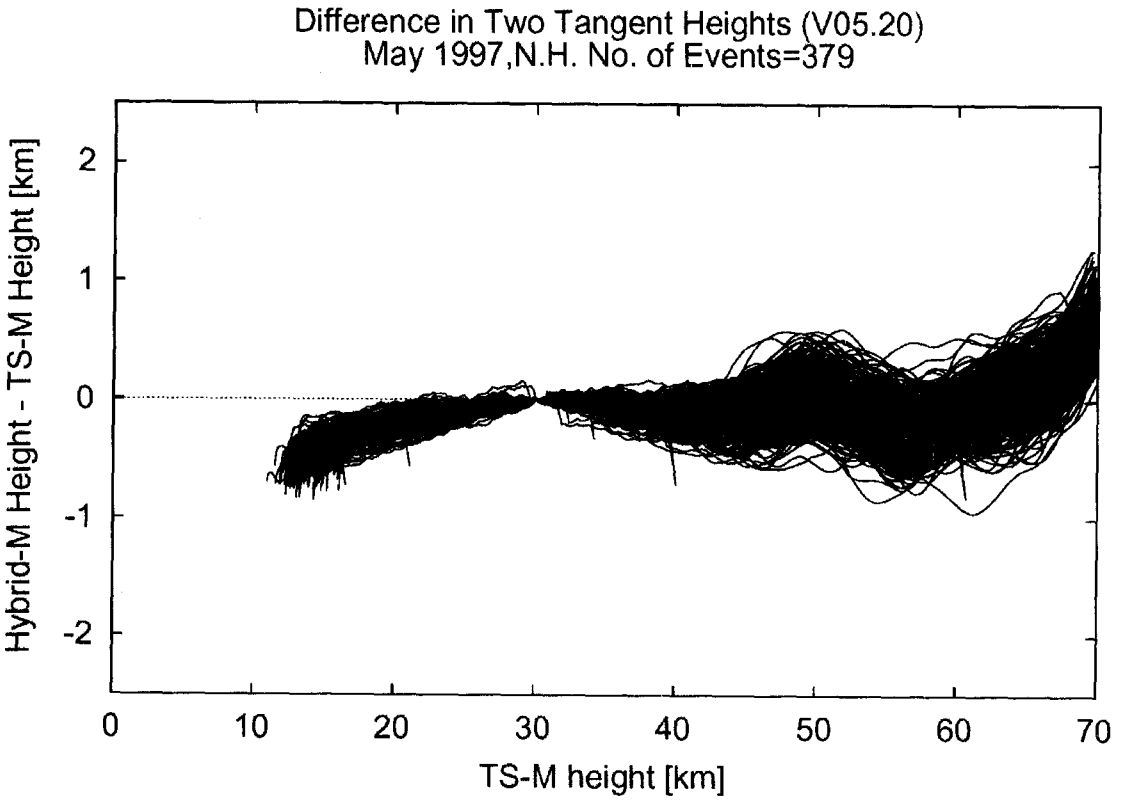


図 3.12　1997 年 5 月 北半球の全掩蔽観測に対して、Hybrid-M と TS-M から決定された接線高度の差

図 3.12 の高度 20 km 以下で、高度が下がるにつれて負の相違幅は大きくなっている現象は、大気を透過する太陽のトップエッジを SES によって捉えた際に起こる誤差が原因と思われる。検出素子の前面にセットされた光フィルターは半値全幅で波長 745-755 nm の範囲をカバーする透過率スペクトルを示すように設計されていて、しかも、実際のフィルターのスペクトルは 575-585 nm の波長領域の光も透過する。オゾンはこの波長領域に吸収帯を

持っているので、地球大気を通過した太陽光から得られる SES 信号は、オゾンの影響を受けていたり、適切な（proper）フィルターによる波形とは、かけ離れているかもしれない。さらに、エアロゾルと空気分子が SES 検出アレイ上の太陽イメージの形に影響していたかもしれない。つまり、鮮明なエッジが得られないことである。したがって、太陽のトップエッジを求める際、特に低層大気において、誤差の可能性を否定することはできない。

地球半径の緯度依存性を無視して、1 日内の全 OE に対して地球半径の固定値を用いたことも、この相違を引き起こした可能性がある。この解析では、接線高度 20 km に相当する地球半径を代表値として用いた。この場合の誤差は、相違の部分で説明したように、約 100 m であった。

3.6 議論

接線高度の誤差は、太陽掩蔽センサーより求めた大気微量成分の体積混合比の誤差を直に引き起こす。Version 4.20 で、SES-M を適用したとき、SES の検出アレイ上の IFOV 位置が装置内の温度の応じて季節変動した可能性があった。したがって、Version 4.20 による接線高度はときどき過大評価であったと思われ、これは Version 4.20 で求めた大気微量成分の体積混合比が、ILAS 観測と同時行われた検証実験から得られた大気微量成分の体積混合比より大きくなることを引き起こした。Hybrid-M を適用することで、Version 5.20 のデータプロダクトの質は飛躍的に向上した [Sugita *et al.*, (2001) ; Kanzawa *et al.*, (2001a) ; Kanzawa *et al.*, (2001b) ; Irie *et al.*, (2001)] 。

Hybrid-M によって求めた接線高度に影響を及ぼしたと思われる誤差の原因とその大きさ、さらに接線高度決定のランダム誤差とシステム誤差を表 3.1 に示す。太陽方位と衛星位置の誤差はこれらのパラメータ算出精度に起因し、時刻誤差は観測時刻が決定られる際の精度に起因する。しかし、これら 3 つの誤差は Hybrid-M の全誤差には影響しない。なぜなら、TS-M を高度 30 km に適用したとき、これらは自動的に補正されているからである。

表 3.1　ILAS による接線高度決めの誤差解析

誤差要因	誤差の大きさ	接線高度誤差	
		ランダム	システム
太陽方位	(±0.004 degree)	-	(±240 m)
衛星位置	(±50 m)	(±29 m)	-
時計精度	(±5.248 msec)	(±15 m)	-
TS-M による理論計算			
-気象パラメータ	Negligible	-	-
-O_2 *A* バンド分光パラメータ	HITRAN - Brown	-	+300 m
-ベースラインフィッティング	±0.1% (Aassumed)	-	±300 m
-積分範囲選択による透過率の依存性	P-, P+R, R-branch, (A part of P for V5.20)	-	±200 m
-装置関数 (中心と幅のシフト)	Shift: ±0.4 element; Width: ±15%	±30 m	-
太陽トップエッジの検出			
-有限な検出素子の影響	(1 element)	(±120 m)	-
-IFOV 回転の影響	(0.56 degrees at 50 km)	-	(Negligible)
-太陽エッジ検出の精度	(1.8 element)	-	(+230 m)
SES の検出アレイ上の IFOV の位置	(3-4 element)	(±500 m)	-
屈折計算(気象パラメータ)	±2 K at 10 km; ±5 K at 70 km	±10 m	-
地球半径	±100 m	-	±50 m
RSS 誤差		±30 m	+300±360 m

(括弧内の数値は Hybrid Method を適用することで実際の誤差としては現れないもの)

したがって、Hybrid-M の主な誤差の原因は、高度 30 km で参照接線高度を与える TS-M にある。TS-M で起こりうる様々な誤差の要因をシミュレーションによって理論的に推定した。その要因の１つは気象パラメータ（気温、気圧）であるが、その影響は無視できる程度のものであった。O_2 A-band 分光パラメータの不確定性による誤差を、HITRAN1996 [Rothman *et al.*, (1998)] とその他 [Brown and Plymate, (2000)] を比較することで推定した。これら 2 つのデータベースの相違は大きいシステム誤差（～300 m）を引き起こしているかもしれない。Sioria and Evans [2000]で指摘されているように、1996 HITRAN CD-ROM に含まれる O_2A-band の air-broadened half-width は [Gamache *et al.*, (1998)] に記述されているものとは異なっている。しかし、この ILAS データ処理では 1996 HITRAN CD-ROM のデータを用いた。このことが、大きなシステム誤差を引き起こしたかもしれない。ベースラインフィッティングによる誤差 [Yokota et., (2001)] が大きくなると求められた（～300 m）。さらに、システム誤差（～200 m）により、平均透過率を計算するための O_2A-band 波長領域の選択（3 節参照）が接線高度に影響する可能性があるということが分かった。可視チャンネル素子の装置関数の不確定性は小さいランダム誤差（～30 m）を引き起こす。

IFOV と太陽のトップエッジ間の相対位置を求める際の様々な誤差、たとえば検出素子の性能の影響、IFOV の回転の影響、太陽エッジ検出の精度、SES 検出アレイ上の IFOV 位置の精度などが起こりうるけれども、Hybrid-M を適用することで、これらは自動的に補正される。気象パラメータ（気圧、気温）の誤差は屈折率計算にいくらかの誤差を及ぼし得る。しかし、この誤差はわずかなランダム誤差（接線高度で 10 m 未満）に過ぎない。各光路に対する接線高度位置の緯度は接線高度に応じて変化する。接線高度 20 km に対する代表的な緯度が現アルゴリズム（Version 5.20）で用いられているので、その結果、他の接線高度に対する地球半径の同緯度内での偏差は約 100 m のシステム誤差を引き起こす。

これらの誤差がどのように相互影響するか、解明するのは難しい。しかし、ランダム誤差とシステム誤差、両方の二乗和の平方根（RSS）を計算した。接線高度のランダム誤差の RSS とシステム誤差の RSS は各々、±30 m と+300±360 m になることが推定された。この推定はシステム誤差が大きくなることを示しているが、Version 5.20 アルゴリズムの接線高度決定の実際の誤差はずっと小さくなると考えられる。なぜなら、ILAS Version 5.20 のオゾンプロダクトは、オゾンゾンデ観測や、ILAS 観測の全期間に渡って高度 10～40 km を観測した他の衛星観測のデータセットと非常に良い一致をしたからである [Sugita *et al.*, (2001)]。南半球 1 月に対する ILAS と他のデータセット間のいくらかの相違は依然として残ったままである。この相違とは、ILAS がオゾンの体積混合比で高い値を示すことであり、その原因は分かっていない。

高度 20 km 以下では、TS-M と SES-M で求めた接線高度の差が高度に依存する。この原因としては次の(1)～(3)が考えられる。(1)太陽のトップエッジ決定の誤差、(2)TS-M の透過率計算の誤差、(3)ILAS 観測による透過率データの誤差。これらの全ては高度に依存している。この件に関してはっきりとした原因は依然として特定されていないが、差の最大値は高度 20 km 以下で約 500 m になる。

結論として、接線高度決定は Version 5.20 で大幅に改良された。オゾンの観測結果はオゾンゾンデ観測や他の衛星観測から得られた個々の検証データと非常に良い一致を示した [Sugita *et al.*, (2001)]。H_2O [Kanzawa *et al.*, (2001a)]、N_2O, CH_4 [Kanzawa *et al.*, (2001b)]、NO_2, HNO_3 [Irie *et al.*, (2001)] といった他の分子に対しても、検証解析の結果、同様の結果を得た。

Appendix A

1OE ごとのデータセットは 84 msec (12 Hz) ごとに得られた全メジャーフレームから成る。各メジャーフレームのデータは 256 個のマイナーフレームから成り、表 A-1 に示されるように、マイナーフレームはフレーム始めのプレフィックス（prefix）と、最後のサフィックス（suffix）で識別される。メジャーフレーム内の、分光計データと天体位置データを含むデータ構造を表 A-2 に示す。

表 A-1. メジャーフレームの構造

1 メジャーフレーム = 256 マイナーフレーム + 19 bytes = 5907 bytes

1 マイナーフレーム, 23 bytes

Prefix data (16 bytes)					
Top Sync (2 bytes)	Mem. Address (2 bytes)	Obs. Data (2 bytes)	——	Obs. Data (2 bytes)	End Sync (1 byte)
Top Sync (2 bytes)	Mem. Address (2 bytes)	Obs. Data (2 bytes)	——	Obs. Data (2 bytes)	End Sync (1 byte)
Top Sync (2 bytes)	Mem. Address (2 bytes)	Obs. Data (2 bytes)	——	Obs. Data (2 bytes)	End Sync (1 byte)
Suffix data (3 bytes)					

表 A-2. データのアドレス（番地）

データ	アドレス（番地）	Bytes
赤外分光計	000(Hex) - 02B(Hex)	44
可視分光計	02E(Hex) - 42D(Hex)	1024
SES	430(Hex) - 82F(Hex)	1024
Dummy	858(Hex) - 8FF(Hex)	168
A/D キャリブレーション	02C(Hex), 02D(Hex), 42E(Hex) 42F(Hex), 830(Hex), 831(Hex)	6
PCD	832(Hex) - 857(Hex)	38

4．改良型大気周縁赤外分光計（ILAS）によるオゾン観測値の検証

要旨

高緯度域のオゾン濃度鉛直分布が、地球観測プラットフォーム技術衛星（ADEOS）に搭載された改良型大気周縁赤外分光計（ILAS）によって、1996年11月～1997年6月にかけて観測された。Ver. 5.20 の ILAS 導出アルゴリズムによって得られたオゾンデータは、HALOE Ver. 19、SAGEII Ver. 6 及び POAMII Ver. 6 の各導出アルゴリズムによって得られたデータと比較された。また ILAS データは、オゾンゾンデ、気球あるいは航空機搭載機器および地上設置機器によって得られたデータと比較された。ILAS データは、高度 11～64 km について中央値でみれば、いくつかの例外を除き、検証データとの相対的な差（絶対的な差をその平均値で割ったもの）は±10%以内で、概して一致している。総合した測定誤差を上回る相対誤差（18%）は、HALOE および SAGEIIデータとの比較で、1997年1月の南半球（SH）の高度 45～55 km 付近で見られた。さらに大きな誤差は（およそ 50%）は、1996年の11月の南半球における HALOE と POAMIIのデータとの比較で高度 15 km 以下に見られたが、これらの絶対値差は中央値で 0.10～0.16 ppmv であった。Ver. 5.20 で処理されたオゾンデータは、一般に公開されている Ver. 3.10 データに比べて改良されている。Ver. 5.20 オゾンデータは、これらの他の測器データとの比較におけるデータの正確さに基づくと、科学的な解析目的に使うことが可能である。

4.1 はじめに

オゾンの鉛直分布について最近のトレンドをモニターし理解することは、将来のトレンドを予想するためには欠かせない。対流圏上層および成層圏で存在するオゾン量は、光化学プロセスのみならず [*e.g.*, WMO, 1999] 、放射強制力においても重要な役割を果たしている [*e.g.*, Shine and Forster, 1999] 。1979～96年のトレンドは、長期にわたって管理されているオゾンゾンデデータ・地上観測データ・衛星データを用いて、国際的な科学共同プロジェクトによって最近評価されている [WMO, 1998] 。上部成層圏のトレンドは、人為的な塩素放出が増加した結果であると解釈することができ、光化学モデルの計算結果がそれをよく再現している [WMO, 1999] 。しかしながら、下部成層圏におけるオゾン量は主として輸送プロセスに支配されているため、そのトレンドを理解するのはより複雑である [*e.g.*, WMO, 1986] 。オゾン量は、また、直接の気相化学反応を通して、活性な水素基ラジカル、窒素酸化物およびハロゲンラジカルの量にも依存し [*e.g.*, Wennberg *et al.*, 1994] 、これらの量は成層圏の硫酸エアロゾル [*e.g.*, Hofmann and Solomon, 1989] 、および／または極成層圏雲（PSCs）[*e.g.*, Solomon *et al.*, 1986] の 表面／内部で起こる異相反応を通して制御されている。また、春季の極渦における成層圏の脱硝の度合いにも関連している可能性がある [*e.g.*, Tabazadeh *et al.*, 2000; Waibel *et al.*, 1999] 。

オゾン鉛直分布のトレンドをモニターするための重要なデータソースの1つは、SAGE IとIIによるデータである [*e.g.*, Randel *et al.*, 1999] 。SAGEは太陽掩蔽法を採用しており、この手法が高精度（accuracy, precision）の衛星センサーによる相対的に高い鉛直分解能の測定を可能にしている。しかしながら、SAGE IとIIは歳差軌道に投入されているため、高緯度で連続的にオゾン鉛直分布を測定することはできない。高緯度における成層圏オゾン分布の変化をモニターするために、同じく太陽掩蔽法を採用したILASは、地球観測プラットフォーム技術衛星（ADEOS）に搭載され、1996年8月、日本の種子島（30° N、131° E）から打上げられた。1997年6月30日にADEOSが太陽パドルアレイの故障により稼働を中止するまでに、およそ5800のオゾン濃度の鉛直プロファイルが順調に導出された [Sasano *et al.*, 1999b] 。ILASの測定期間は、POAM IIおよびIIIの測定期間（POAM IIは1993年10月～1996年11月、POAM IIIは1998年4月～現在）のギャップを補っている [Bevilacqua, 1997; Lucke *et al.*, 1999] 。POAMも太陽掩蔽法を採用している。

Ver. 3.10導出アルゴリズムによって処理されたILASオゾンデータは、Ver. 18 HALOEオゾンデータと比較した結果によると [Lee *et al.*, 1999]、ILASデータはHALOEデータに比べ、高度20～40 kmで、北半球では13%、南半球では20%小さい。5つの観測点におけるオゾンゾンデ観測結果との比較では、Ver. 3.10 ILASオゾンデータが高度20～35 kmにおいて、20%より良いaccuracyを持つことが示された [Sasano *et al.*, 1999a] 。Ver. 3.10データを用いたこれらの検証論文が公表されて以来、導出アルゴリズムは [Nakajima et al., 2001-b] が開発した高度決めの手法の導入により更新されている。

この報告では、対応する多くの測定値との比較によって、最新の導出アルゴリズムであるVer. 5.20によって処理されたILASオゾンデータのデータ質評価に焦点をあてる。ILAS測定期間である1996年11月～1997年6月は、太陽掩蔽法による3つの衛星センサー、すなわち、SAGE II（1984年～）[Mauldin *et al.*, 1985] 、HALOE（1991年～）[Russell *et al.*, 1993] 、そしてPOAM II（1993年～1996年11月）[Glaccum *et al.*, 1996] が稼働している。ILASデータを検証するにあたって、これらの3つのデータセットを使用した。さらに、北半球13地点、南半球3地点で観測されたオゾンゾンデデータ、またスウェーデンのキルナ（68° N、21° E）、およびアラスカのフェアバンクス（65° N、148° W）で行われたADEOS/ILAS検証キャンペーン [Kanzawa *et al.*, 1997] 中の、気球・航空機・地上からのリモートセンシングセンサーやin situセンサーによって得られたデータも使用した。

4.2 計測器とデータセット

4.2.1 ILAS

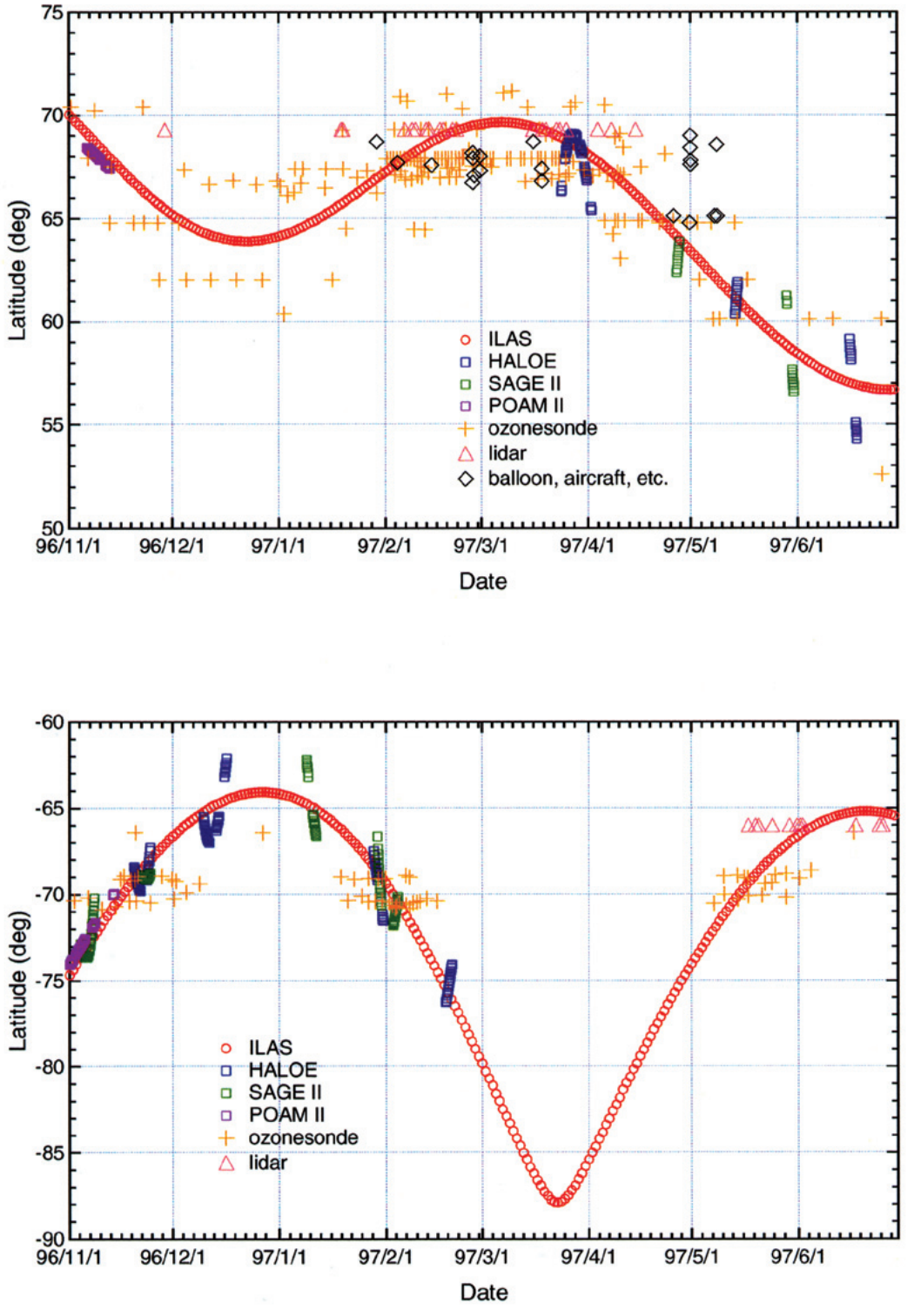
ILASは2つの回折格子分光計（1つは6.21～11.77 μmをカバーする44分光素子焦電アレイ検出器を持ち、もうひとつは0.753～0.784 μmをカバーする1024分光素子金属酸化膜半導体（MOS）フォトダイオードアレイ検出器を持つ）と太陽輪郭センサーからなる

[Nakajima *et al.*, 2001-a ; Sasano *et al.*, 1999a ; Sasano *et al.*, 1999b] 。ILAS の特性とここで使用した導出アルゴリズムのバージョンは、表 4.1 の下の行に簡単に記載されている。9.6 μm 付近に中心を持つ O3 吸収バンドが、オゾン分子を検知するために使用される。接線高度（TH）における瞬時視野（IFOV）は、赤外（IR）分光計で鉛直方向に 1.6 km、水平方向に 13 km の幅を持つ。接線高度 20 km の直上の厚さ 1 km の層内における視線方向に沿った部分的な傾斜光路は、230 km 未満である。12 Hz のサンプリングで、44 の赤外分光素子全体のスペクトルは 0.88 ミリ秒以内に得られる。すなわち、1 メジャーフレームは、大気の屈折に依存するが、接線高度 15 km で約 110 m、接線高度 55 km で 270 m に相当する。約 10 メジャーフレームに相当する時系列のスムージングを透過率データに施した結果、実際の鉛直分解能は接線高度 15 km で 1.9 km、接線高度 55 km で 3.5 km となった [Yokota *et al.*, 2001] 。参考までに、SAGE II、HALOE、POAM II の鉛直分解能は、表 4.1 に示されるように、それぞれ約 1 km、約 2 km および 1～1.5 km と見積もられている。ADEOS は太陽同期軌道に投入されている。ADEOS の軌道傾斜角は 98.6° で、また、降交点時刻は地方平均太陽時でおよそ 10:40 である。したがって、ILAS の掩蔽現象は、24 時間につきおよそ 14 ある軌道上のそれぞれで ADEOS から見た日の出および日没のときに起こる。プレート 4.1 に示すように、ILAS の観測域は、高緯度域（57～73° N および 64～88° S）である。

表 4.1　この解析に用いた各センサーの概要

	ILAS[a]	SAGE II[b]	HALOE[c]	POAM II[d]
計測器	回折格子分光計	サンフォトメータ	広域放射計	サンフォトメータ
O_3 検出波長	υ_3 band[e]	600 nm	υ_3 band[f]	601 nm
鉛直瞬時視野 (km)	1.6 km	0.5 km	1.6 km	0.8 km
鉛直分解能 (km)	2-3.5	~1	~2	1-1.5
サンプリングレート (Hz)	12	64	8	18
幾何学高度のデータ格子(km)	1	0.5	0.3	1
高度決めの誤差(m)	300±360[g]	250[h]	150[i]	200[j]
アルゴリズムバージョン	5.20	6	19	6

[a] Nakajima *et al.* [本技術資料]
[b] Mauldin *et al.* [1985]
[c] Russell *et al.* [1993]
[d] Glaccum *et al.* [1996]
[e] 16 の回折格子分光素子がカバーする O_3 バンドのレンジは 978-1189 cm^{-1}.
[f] 広域フィルターがカバーする O_3 バンドのレンジは 960-1080 cm^{-1}.
[g] Nakajima *et al.* [本技術資料]
[h] Cunnold *et al.* [2000]
[i] Brühl *et al.* [1996]
[j] Lumpe *et al.* [1997]



プレート4.1　ILASとSAGEⅡ、HALOE、POAMⅡ、オゾンゾンデ、気球、航空機、地上からの同期観測の経度範囲　上部パネルは北半球を示し、下部パネルは南半球を示す。

大気成分の鉛直プロファイルを求めるにあたっては、「オニオンピーリング法」を用いている [Yokota *et al.*, 2001] 。オゾンの導出高度は、8 km（最も低い場合）から 70 km の範囲である。Ver. 5.20 ILAS オゾンデータのエラー解析の要約を、表 4.2、表 4.3 に示す。Ver. 5.20 データの誤差の値は「内部誤差」と「外部誤差」に分けられる。「内部」誤差は、観測透過率と理論透過率について非線形最小二乗フィッティングが収束した後の最終残差から計算された誤差のことである。一方、「外部」誤差は、ノンガス補正および導出の際入力値として用いる気温鉛直分布の不確さを通して、透過率のシミュレーションに関連する誤差である。

表 4.2　Ver. 5.20 オゾンデータのエラー解析のまとめ（その 1）

高度 (km)	測定誤差 Rep.(%)	内部誤差[a] (ppmv)	外部誤差 (ppmv)	平均[b] (ppmv)	トータル RSS[c] (%)
9	19	0.15	0.12	0.20	98
12	11	0.09	0.07	0.46	25
15	7	0.13	0.07	1.09	14
20	3	0.22	0.14	2.91	9
25	4	0.18	0.10	4.16	5
30	2	0.14	0.03	5.06	3
35	2	0.17	<0.01	5.74	3
40	2	0.14	<0.01	5.10	3
45	2	0.10	<0.01	3.49	3
50	3	0.09	<0.01	2.35	4
55	3	0.08	<0.01	1.50	5
60	4	0.06	<0.01	0.84	7

[a] 全リトリーバルに関連する内部誤差の平均

[b] 全リトリーバルの平均

[c] 平均で割った内部誤差と外部誤差の RSS

表 4.3　Ver. 5.20 オゾンデータのエラー解析のまとめ（その 2）。

ノンガス成分の補正に起因する系統的なバイアスを 3 つの高度について一覧表にした。

780 nm における 2 つのエアロゾル消散係数（AEC）について誤差を示した。

高度	系統的バイアス (ppmv)							
(km)	AEC=0.0005 (km^{-1})				AEC=0.001 (km^{-1})			
	S(75)[a]	S(50)[a]	NAT	ICE	STS(5,37)[b]		STS(33,15)[b]	
	STS(47,3)[b]		STS(60,0.5)[b]					
15	-0.01	0.03	-0.07	0.41	<0.01	0.07	0.08	0.07
20	-0.03	0.07	-0.16	0.90	<0.01	0.16	0.17	0.14
25	-0.06	0.15	-0.35	1.99	<0.01	0.35	0.38	0.32

[a] S(75)と S(50)は、それぞれ 75、50wt%-の H_2SO_4 と H_2O からなる 2 元溶液

[b] STS(5,37), STS(33,15), STS(47,3), STS(60,0.5)は、それぞれ 5, 33, 47, 60wt%の H_2SO_4 と 37, 15, 3, 0.5 wt%の HNO_3 と H_2O からなる 3 成分系溶液。

ノンガス補正 [Sasano *et al.*, 1999b; Yokota *et al.*, 2001] は、エアロゾル粒子（硫酸エアロゾルおよび（または）PSCs（極成層圏雲））による消散を無視できない高度範囲で、ガス濃度の鉛直プロファイルを得るために必要である。シミュレートされた透過率の中のノンガス成分を決めるために、まず、ガス種による吸収が比較的小さい 4 つの分光素子（いわゆる「窓素子」）における、ガス成分による光学的厚さを評価する。それを行うために、ILAS 参照大気モデルより、オゾン、HNO3、NO2、N2O、H2O、CH4、CO2 および他の微量ガス（CFC-11 のような）の濃度プロファイルが用いられる [Yokota *et al.*, 2001] 。そして、他の 40 素子すべてにおける非エアロゾル（すなわちガス状物質のみ）の光学的厚さを、これら 4 つの窓素子間の線形内挿により計算する。この参照大気モデルのデータを使用することで、透過率のシミュレーション計算に多少の誤差を生じるだろう。これらの誤差の大きさは、参照データの 10 パーセンタイル値、中央値、90 パーセンタイル値を用いてシミュレーションから推定される。これらの誤差が外部誤差成分の 1 つになる。内挿はまた、ガス濃度の導出プロファイルに系統誤差を生じさせるであろうが、ここではこれを外部誤差に含めないことにし、あとでこの項において、対応する不確実性について評価する。外部誤差には透過率のシミュレーション計算に用いる気温データの不確実さによる影響も含まれる（高度 10 km で±2 K、高度 70 km で±5K の不確実さが仮定されている）。エラー解析の詳細な記述は、 [Yokota *et al.*, 2001] にある。根 2 乗和（root sum square ; RSS）で表したオゾン混合比のトータルの不確実さ（内部誤差+外部誤差）の推定は、平均オゾン濃度（Ver. 5.20 オゾン導出値のすべての平均として得られる）を用いて、パーセント誤差に変換した。表 4.2 に示されるように、平均誤差は高度 15、20、30、40、50 および 60 km についてそれぞれ、14、9、3、3、4 および 7%である。ここでは、Ver. 5.20 ILAS 各データファイルに提供されているこのトータルの不確実さを用いた。さらに、静穏期間（南半球は 1997 年 3 月末、北半球は 1997 年 6 月末の 3～5 日）の平均値からの偏差が 1 標準偏差（シグマ）に相当する値を平均値で割った値と

して、相対標準偏差（RSD）が計算された。この量は、地球物理的変動や測定値の再現性(repeatability)の尺度でもある。RSD は、上で定義した RSS トータル誤差より小さいことがわかった [see also Yokota *et al.*, 2001]。

導出プロファイルの不確実さについては、次の 2 点に注意しなければならない。1 つめは、接線高度の曖昧さが混合比プロファイルの導出における不確実さに直接影響するため、接線高度が正確に決定されるかどうかが非常に重要だということである。Ver. 3.10 アルゴリズムでは、[Sasano *et al.*, 1999b] に示されているように、接線高度を決めるのに一時的な方法が使われた。Ver. 5.20 アルゴリズムでは、接線高度が [Nakajima *et al.*, 1999b] で議論された方法で決められた。接線高度における高度決めについて見積もられた不確実さは 300±360 m である。参考までに、高度決めにおける不確実さは表4.1にリストアップされているように、SAGE Ⅱ、HALOE および POAM Ⅱ で、それぞれ 250、150 および 200 m と推測される。

２つめは、ノンガス補正に関連する系統誤差である。窓素子間の単純な線形内挿に起因する系統誤差を評価するために、ノンガス成分として硫酸エアロゾル（50、75 重量% H2SO4 / H2O の二成分系溶液）および PSCs（硝酸三水和物 nitric acid trihydrate (NAT)）, 4 つの組成の過冷却三成分系溶液 supercooled ternary solutions(STS)、そして氷）、ガス成分として上述の参照プロファイル（a priori なプロファイル）について、いくつかのタイプの赤外吸収スペクトルを使用して、透過率をシミュレートした [Yokota *et al.*, 2001] 。シミュレートした透過率を用いて、ここで議論している Ver. 5.20 導出アルゴリズムにおいてノンガス成分の寄与に線形内挿法を適用してから、ガス濃度の鉛直プロファイルの導出を行った。数密度で表わされた a priori なプロファイルと導出されたオゾンの鉛直プロファイルの差異は、780 nm のエアロゾル消滅係数（AEC）とよく相関している。したがって、780 nm の AEC の関数としてオゾン数密度の系統誤差を評価することができる。15、20 および 25 km の高度における典型的な空気分子密度を仮定して、表 4.3 に示すように、体積混合比の誤差は、AEC の値が 5×10^{-4} km^{-1} の 2 種類の硫酸エアロゾルについて-0.06～0.15 ppmv の範囲である。PSCs のいくつかのタイプに見られるこれらの系統的なバイアスは、表 4.3 に示されている。このエラー解析については [Yokota *et al.*] によって詳細に記述されている。

4.2.2 SAGE Ⅱ, HALOE, POAM Ⅱ

表 4.1 には、SAGE Ⅱ、HALOE、POAM Ⅱ の特性の概略も示してある。この解析では、SAGE Ⅱ、HALOE、POAM Ⅱ について、それぞれ Ver. 6、Ver. 19、Ver. 6 の導出アルゴリズムによって処理されたデータを使用した。データはすべて、それぞれの www サーバーを通して取得でき、科学的な目的で利用可能である。Ver. 6 SAGE Ⅱ データについては、オゾンデータの誤差が著しく縮小され、accuracy は 2.5%に達した [Manney *et al.*, 2001] 。SAGE Ⅱ オゾンデータの誤差の値については、このレベルの accuracy と各 SAGE Ⅱ データ・ファイルに記載されているランダム誤差を組み合わせた RSS を用いた。Ver. 17 HALOE オゾンデータの RSS トータル誤差を見積もったところでは、[Bruhl *et al.*, 1996] の表 4.1 に示されているように、

1、10、100 hPa でそれぞれ 8、12、30%である。Ver. 19 HALOE オゾンデータの誤差の値については、HALOE の各データファイルに記載されているエアロゾルの影響に関連した誤差の RSS、およびエアロゾルの影響（James M. Russell Ⅲ, 私信による, *2000*）に関連した誤差を除いた、Bruhl *et al.*,（1996）の表 4.1 の誤差を使用した。Ver. 5 POAM Ⅱ導出値のランダム誤差および系統誤差は高度 10～50 km でどちらも 5%程度である [Lumpe *et al.*, 1997] 。Ver. 6 POAM Ⅱオゾンデータの誤差の値については、各 POAM Ⅱデータファイルに記載されているランダム誤差の RSS、および 5%の系統誤差を用いた。Manney *et.al.*, [2001] は、Ver. 6 SAGE Ⅱ、Ver. 19 HALOE および Ver. 6 POAM Ⅱデータなど、7 つの衛星搭載センサーによって測定されたオゾンプロファイルの比較解析を行った。その結果、オゾンデータは下部成層圏、上部成層圏でそれぞれ、概して～0.25 ppmv 以内および 0.5 ppmv 以内で互いに一致することが示唆された。

4.2.3 オゾンゾンデ

ここでは 2 つのデータベースに登録されたオゾンゾンデデータを使用する；1 つは国立環境研究所（NIES）の ILAS Correlative Measurement Data Base (CMDB)、もう 1 つは Norwegian Institute for Air Research (NILU) の the Ozone Soundings as a tool for Detecting Ozone Change (OSDOC) データベースである。前者は、スウェーデンのキルナ（68° N、21° E）および アラスカのフェアバンクス（65° N、148° W）で行われた ADEOS / ILAS 検証キャンペーンで得られたデータが主である [Kanzawa *et al.*, 1997] 。後者は「マッチ」手法 [*e.g.*, Schulz *et al.*, 2000] を用いたラグランジュ的オゾン減少率計算のような研究に対して提供されデータベースである。キルナとヤクーツクのデータはどちらのデータベースにも登録されている。これら 2 つのデータベースの他、Earth Science Division Project Office / NASA Ames Research Center の POLARIS (Photochemistry of Ozone Loss in the Arctic Region In Summer) キャンペーンデータベースに登録されているフェアバンクスのオゾンゾンデデータも使用した。この解析で用いたオゾンゾンデ観測地点の概要を表 4.4 に示した。炭素・プラチナ電極を備えた RS II-KC79D（KC）オゾンゾンデを使用している[Syowa (WMO, 1998)] 以外、すべての地点で電気化学式（ECC）オゾンゾンデ [Komhyr, 1969] がオゾンセンサーとして使用されている。[Komhyr *et al.*, 1995] によれば、ECC オゾンゾンデの測定値について見積もられた accuracy と precision は、10 hPa までの成層圏でそれぞれ、±3%および±5%である。高度 12～28 km については、プロファイルを地上オゾン全量観測値に対して標準化すると、タイプの異なるゾンデ（ECC と KC を含む）間に 5%以内の系統的差異、および 5%未満のランダム変動があると報告されている [WMO, 1998] 。ここでは KC ゾンデについてのみ、同じ位置で観測したドブソン観測値に対して標準化したオゾンデータを用いた。平均値＋1 σ 補正ファクターは、0.96 ± 0.06 である。

表 4.4　オゾンゾンデと DIAL による測定の概要

観測点	緯度 (deg)	経度 (deg)	No. of pairs	Principal Investigator	Type
	ILAS CMDB (124 sondes, 11 lidar)				
Andoya	69.3	16.1	1	T. Deshler	sonde
Fairbanks	64.9	-147.9	9	K. Shibasaki	sonde
Kiruna	67.9	21.1	3	T. Deshler	sonde
Kiruna	67.9	21.1	37	H. Kanzawa	sonde
Kiruna	67.9	21.1	2	Y. Kondo	sonde
Yakutsk	62.0	129.6	9	V. Yushkov	sonde
Neumayer	-70.4	-8.2	34	H. Gernandt	sonde
Syowa	-69.0	39.6	26	H. Kanzawa	sonde
Dumont d'Urville	-66.4	140.0	3	F. Goutail & S. Godin	sonde
Dumont d'Urville	-66.4	140.0	11	S. Godin	DIAL
	OSDOC database (97 sondes)				
Andoya	69.3	16.1	13	B. Bojkov	sonde
Gardermoen	60.1	11.0	3	B. Bojkov	sonde
Jokioinen	60.8	23.5	1	E. Kyro	sonde
Keflavik	64.0	-22.6	4	M. Gil	sonde
Legionowo	52.4	21.0	1	Z. Litynska	sonde
Lerwick	60.1	-1.2	4	M. Molyneux	sonde
Orland	63.4	9.2	1	B. Bojkov	sonde
Scoresbysund	70.5	-22.0	13	I.S. Mikkelsen	sonde
Sodankyla	67.2	26.4	52	E. Kyro	sonde
Sondrestrom	67.0	-50.6	5	I.S. Mikkelsen	sonde
	POLARIS database (10 sondes)				
Fairbanks	64.9	-147.9	10	B. Johnson, H. Vömel, and S. Oltmans sonde	
	NDSC database (2i lidar)				
Andoya	69.3	16.0	21	G. Hansen	DIAL

4.2.4 気球搭載型、航空機搭載型、地上設置型センサー

気球、航空機搭載型および地上設置センサーのデータも検証に用いた。これらのデータもILAS-CMDB、あるいはNDSC（成層圏変化検出ネットワーク）データベースに登録されている。表4.5に各センサーについて、観測日時、放球（あるいは観測）サイト、位置（緯度・経度）、鉛直分解能、および接線高度20 kmにおけるaccuracy（そのような情報が利用可能な場合）および各センサーのPI（principal investigator）を示した。以下に、各センサーによる測定について概説する。

表4.5　気球搭載、航空機搭載、地上設置型センサーによる検証実験の概要。

接線高度20 kmにおける測定位置、時刻、accuracy、鉛直分解能

年月日	時刻 (UT)	観測地点	緯度 (deg)	経度 (deg)	距離 (km)	δUT[a] (hr)	PI	センサー	Accuracy (%)	鉛直分解能 (km)	Reference
970129	12:41	Andoya	68.7	18.6	206	1.0	J.-P. Pommereau	SAOZ	3-12	1	*Pommereau/Piquard* [1994]
970228	14:41	Kiruna	68.0	23.0	180	0.5	and F. Goutail				
970228	15:36		67.3	20.4	295	0.4					
970316	4:35	Andoya	68.7	27.7	493	11.8					
970318	15:41	Kiruna	67.4	21.1	373	1.5					
970318	16:53		66.8	17.4	319	0.3					
970204	14:42	Kiruna	67.7	10.6	227	0.4	H. Schlager	UV-photometer	5	-	*Schlager et al.* [1997]
970214	13:29	Kiruna	67.6	22.1	801	0.4	K. Pfeilsticker	DOAS	1	0.3	*Ferlemann et al.* [2000]
970226	13:50	Kiruna	67.9	22.4	490	0.6	C. Camy-Peyret	LPMA	7	2.5	*Camy-Peyret et al.* [1993]
970226a	10:42	Kiruna	68.2	15.0	295	5.4	H. Kuellmann	ASUR	12	5-10	
970226b	10:56		66.7	13.5	368	5.2					
970226	21:58	Kiruna	67.1	21.3	583 577[b]	5.9 7.5[b]	J.-B. Renard	AMON	5	1	*Renard et al.* [1996]
970425	23:25	Fairbanks	65.1	-147.5	279	6.8	H. Fukunishi	TDLHS[c]	15	5	*Fukunishi et al.* [1990]
970507	20:47		65.1	-147.5	428	9.0					
970508	16:44		65.1	-147.5	428	10.9					
970430 [1983]	15:18	Fairbanks	64.8	-147.6	155	9.2	J.J. Margitan	UV-photometer	5	5m[d]	*Proffitt and McLaughlin*
970430a	19:40	Fairbanks	69.0	-149.0	698	10.0	B. Stachnik	SLS	14-21	2-3	
970430b	21:50		67.8	-162.0	543	9.5					
970430a	19:13	Fairbanks	68.4	-148.9	640	10.4	W.A. Traub	FIRS-2	5	4	*Johnson et al.* [1995]
970430b	21:46		67.6	-156.2	684	9.5					
970508	12:11	Fairbanks	68.6	-146.3	740	6.4	G.C. Toon	MkIV	6	2	*Toon* [1991]

[a] ILASと他センサーの時間差の絶対値
[b] AMON 測定値との比較ペアは2例のみ
[c] 地上設置型センサー
[d] 1秒データについての鉛直分解能

気球搭載センサー

Limb Profile Monitor of the Atmosphere (LPMA) は、太陽掩蔽法を用いるフーリエ変換型赤外分光計（FTIR）である [Camy-Peyret *et al.*, 1993] 。オゾン導出に用いるマイクロウインドウは 3040.034 ～ 3040.848 cm^{-1} である。このセンサーが搭載されたゴンドラは、スウェーデンのキルナ（68° N、21° E）に近い、Esrange（スウェーデン宇宙公団の気象観測ロケット発射場）から放たれた。測定は、気球上昇中および浮遊中に行われた（地方日没時における掩蔽）。

Système d'Analyse par Observation Zénitale (SAOZ)-BAL は気球搭載型 UV 可視分光計で [Pommereau and Piquard, 1994] 、気球で太陽掩蔽法を用いるものである。測定は、気球上昇中および浮遊中に行われた（地方日没時における掩蔽）。

in situ UV 吸収フォトメータ [Proffitt and McLaughlin, 1983] は、SLS および FIRS-2（下記参照）とともに測定を行った。データは気球上昇時に得た。報告されているオゾンデータの accuracy は、時間分解能を 1 秒とすると 5%で、鉛直分解能 5 m に相当する。

Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS) は UV 可視分光計である [Ferlemann *et al.*, 2000] 。測定は、気球上昇中および浮遊中に行われた（地方日没時における掩蔽）。

Absorption par Minoritaires Ozone et NO_x (AMON) は恒星掩蔽法 UV 可視分光計 [Renard *et al.*, 1996] である。測定は気球の浮遊時に行われた。

Submillimeter-wave Limb Sounder (SLS) は、大気周縁のオゾンの熱放射スペクトル（637 GHz）を測定する高分解能ヘテロダイン放射分光計で [Stachnik *et al.*, 1992] 、気球が浮遊高度に達すると 10 回の周縁鉛直測定を行う。はじめの 3 つの測定はゴンドラの船首がほぼ真北から約 3 度で行われ、後の 7 つの測定は約－67 度で行われた。したがって、各測定の接線高度の位置は互いに異なっている。接線高度 20 km の位置は、最初の 3 回の測定および後の 7 回の測定で、それぞれ、69° N149° W および 68° N162° W であった。オゾンの推定誤差は、高度 25～40 km で 4～10%、高度 45 km で 20%程度であった。

MkIV は太陽掩蔽法 FTIR 分光計で [Toon, 1991] 、0.01 cm^{-1} の分解能で 650～5650 cm^{-1} のスペクトル領域全体を同時に測定する。ここで用いたオゾンプロファイルは、日昇時、高度 38 km を浮遊時に測定されたもので、[Toon *et al.*, 1999] の図 4.4 に示されている。報告されたオゾンは、ILAS が使用しているυ_3バンドを含む、766～4038 cm^{-1} の 40 の異なるスペクトル間隔の平均である。

Far-Infrared Spectrometer (FIRS)-2 は 75～1300 cm^{-1} の波数領域で大気の熱放射を測定する FTIR 分光計である [Johnson *et al.*, 1995] 。オゾンは、2 つのスペクトル領域、すなわち 80～130 cm^{-1}、および 760～820 cm^{-1} から導出されたものの平均から求められる。この論文中で使用されるオゾンプロファイルは、[Jucks *et al.*, 1998] の図 4.1a に示されている。気球が浮遊高度にいるときに、2 回の周縁観測が行われた。1 回目および 2 回目の測定における接線高度 30 km の位置は、それぞれ 68.4° N148.9° W および 67.6° N156.2° W であった。

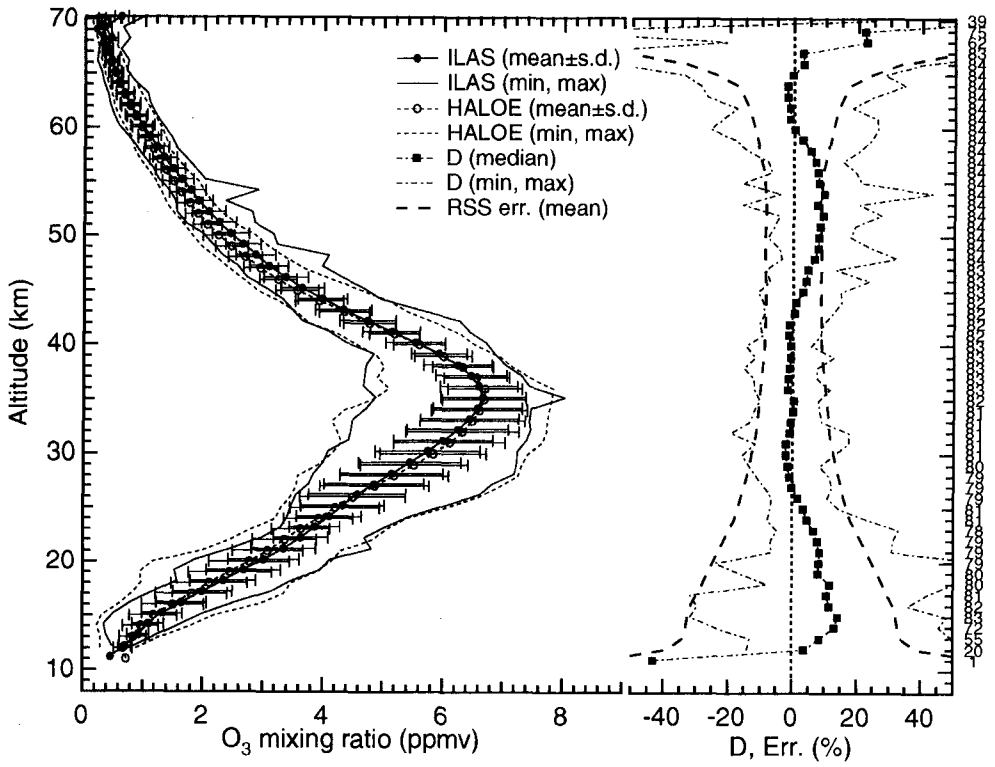


図 4.1a　ILAS と HALOE により北半球で観測されたオゾン混合比の平均プロファイル（左パネル）

見やすくするため、ILAS データは 0.2 km ずらしてプロットした。各高度における比較対象データの数は図の右側に示した。エラーバーは各高度の 1 シグマ（標準偏差）を示す。データの最大値と最小値はそれぞれ実線（ILAS）と点線（HALOE）で示されている。右パネルは、ILAS と HALOE のオゾン混合比の差をパーセントで示したもの（D；本文の定義参照）の中央値のプロファイルである。データの最大値と最小値は一点鎖線で示してある。ゼロラインに対して対称な破線は ILAS と HALOE 観測におけるトータル誤差の平方和のルート（Rss err；本文参照）を示している。

航空機搭載センサー

Airborne Submillimeter SIS Radiometer (ASUR) は 624～654 GHz のスペクトル領域で成層圏の微量ガスの熱輝線を測定する受動サブミリ波ヘテロダイン受信器である [*de* Valk *et al.*, 1997] 。機器はドイツの研究用航空機 “Falcon” に搭載され、キルナ空港を拠点に観測を行った。導出されたオゾンプロファイルの鉛直分解能は下部成層圏で 5～10 km、上部成層圏で 10～20 km である。報告されているオゾンデータの誤差は、高度 20、30 および 40 km で、それぞれ 12、14 および 12%である。

in situ UV absorption photometer [Schlager *et al.*, 1997] も航空機 “Falcon” に搭載されて観測を行った。報告されたデータは 60 秒間積算されたもので、オゾンデータの accuracy は約 5% のオーダーである。

地上設置型センサー

Tunable Diode Laser Heterodyne Spectrometer（TDLHS、レーザーヘテロダイン分光計）は、高いスペクトル分解能をもつ赤外分光計である [Fukunishi *et al.*, 1990] 。フェアバンクスに近い Poker Flat において、分解能 0.0013 cm^{-1} で 1133 cm^{-1} 付近の太陽吸収スペクトルを観測した。この論文で用いた accuracy（公表されている値）は、鉛直分解能 5 km で 15%であった。

Differential Absorption Lidar (DIAL) は南極の Dumont d'Urville (67°S, 140°E) で 308 nm（吸収波長）および 353 nm（参照波長）の 2 つの波長を用いて観測を行った [Godin *et al.*, 2001] 。鉛直分解能は、高度 20 km で 1.4 km、高度 30 km で 3.0 km である。この論文で用いた公表誤差は、高度 20 km および 30 km それぞれ 3%および 10%でであった。ここで使用したデータの数を表 4.4 に示した。これらの同時期観測は 1997 年 5 月～6 月のものである。

ノルウェーの Andoya の Arctic Lidar Observatory for Middle Atmosphere Research (ALOMAR) station (69° N、16° E) での DIAL のデータ [Hansen and Chipperfield, 1999] も、この検証に用いた。これらのデータは NDSC データベースに保管されている。この論文で用いる公表誤差は、高度 20、30 および 40 km でそれぞれ 4、2 および 5%である。ここで使用するデータの数を表 4.4 に示した。これらの同時期観測は 1996 年 11 月～1997 年 4 月のものである。

4.3. 比較のための基準

4.3.1 データの選択

同期観測データを探すため、最近では「ラグランジュ的アプローチ」が用いられている [Lu *et al.*, 2000 ; Morris *et al.*, 2000] 。[Morris et al., 2000] は、この方法を用いて得られた結果は、「伝統的アプローチ」を用いて得られた結果と同等か、それを上回るものであると示唆した。この方法は比較結果の品質低下なしに、比較の組み合わせを増やすには非常に強力であるが、今回の研究においてはこの方法を用いない。それは、伝統的アプローチにより、十分な数の比較ケースを見つけることができたためと、ラグランジュ的アプローチに必要な風のデータが無い高度 70 km までの比較を行ったためである。検証作業を行うに当たっては、緯度・経度の差に関するしきい値を用いているが、一般に経度についてはより緩やかなものになっている。しかし、ここでは以下のような理由により、緩やかな経度のしきい値は用いなかった。高緯度での比較においては、冬から春の期間はデータが極渦の内部、境界、外部で観測されるからである。そのため、オゾン分布には大きな非一様性が存在する。夏季の成層圏の力学的な乱れは少ないものの、高緯度のオゾンデータは、夏季においてさえある程度の非一様性を示す [Bruhl *et al.*, 1998 ; Hoppel *et al.*, 1999 ; Park, Russel Ⅲ, 1994] 。ここで、ILAS と SAGE Ⅱ, HALOE、POAM Ⅱ といった他の衛星のセンサーと観測が一致するデータを抽出するため、世界標準時（UTC）で±12 時間、空間的な差が 300 km というしきい値を用いた。一致する観測データを探すために、接線高度が 20 km のときの位置と時刻を各観

測を代表する位置と時刻として用いた。

ILAS と POAMⅡはどちらも極軌道衛星上で運用されており、ほぼ同じ軌道要素を有していたため、プレート4.1に示すとおり、それぞれの掩蔽イベントは高緯度で連続的に起こり、位置や時刻も一致していた。不運なことに POAMⅡの観測は 1996 年 11 月 14 日に停止したため、それ以後有効な検証データはない。SAGEⅡ, HALOE は傾斜軌道衛星に搭載されているため、掩蔽現象は全球的に起こる。そのため、ILAS と一致する SAGEⅡ, HALOE の観測データは、プレート 4.1 に示すとおり、時間・空間的に限られる。上で定義されたしきい値により、149 の SAGEⅡと ILAS の一致ペア（以降 SAGEⅡ: ILAS と呼ぶ）、202 の HALOE : ILAS、120 の POAM : ILAS ペアが第 1 段階で選択された。衛星センサーによる一致観測のまとめを期間毎に分けて表 4.6 に示す。最大の時間差は SAGEⅡ: ILAS ペアに見られる 8.3 時間である。

表 4.6　1996 年 11 月～1997 年 6 月の各期間についての衛星観測比較事例の概要

期間	No.[a]	距離 (km)[b]	時間差(hr)[c]	半球[d]	Occultation Mode[e]	
					ILAS	検証観測
HALOE:ILAS (Total No.: 202)						
Nov. 19 - 24	40	172 (28)	1.8 (3.5, 0.0)	SH	SS	SR
Dec. 10 - 16	39	204 (130)	1.6 (3.5, 0.0)	SH	SS	SS
Jan. 28 - 31	17	178 (19)	4.5 (5.3, 3.8)	SH	SS	SR
Feb. 18 - 20	22	165 (64)	0.5 (1.0, 0.1)	SH	SS	SS
Mar. 24 - Apr. 2	59	166 (23)	0.2 (0.5, 0.0)	NH	SR	SS
May 13 - 14	12	147 (9)	6.9 (7.4, 6.5)	NH	SR	SR
Jun. 16 - 18	13	248 (197)	0.2 (0.4, 0.0)	NH	SR	SS
SAGE II:ILAS (Total No.: 149)						
Nov. 4 - 24	74	149 (45)	1.4 (3.2, 0.0)	SH	SS	SR, SS
Jan. 8 - 30	34	213 (136)	4.0 (4.8, 3.1)	SH	SS	SR, SS
Feb. 3 - 4	20	194 (125)	0.5 (1.2, 0.0)	SH	SS	SS
Apr. 26 - 29	10	188 (125)	7.9 (8.3, 7.4)	NH	SR	SR
May 28 - 30	11	220 (157)	0.2 (0.4, 0.0)	NH	SR	SS
POAM:ILAS (Total No.: 120)						
Nov. 1 - 13	67	155 (77)	0.6 (1.0, 0.0)	SH	SS	SS
Nov. 6 - 13	53	170 (86)	0.2 (0.5, 0.0)	NH	SR	SR

a　各期間についての比較プロファイルの数。

b　300 km をしきい値としたときの個々の測定位置間距離の平均。最小距離をかっこ内に示した。

c　しきい値を±12 時間としたときの個々の測定時刻差の平均。測定時刻差の最大値と最小値はかっこ内。

d　SH と NH はそれぞれ、南半球と北半球での太陽掩蔽現象。

e　SS と SR はそれぞれ、衛星から見た日没時および日昇時に起こる太陽掩蔽現象。

ILAS と対応するオゾンゾンデの検証データについて、抽出するデータの時間・空間しきい値としてそれぞれ±12 時間、500 km を用いた。空間のしきい値を 500 km に拡大したのは一致観測データの数を増やすためである。オゾンゾンデ観測の代表的な位置と時間として、高度 20 km における有効な観測値があれば、その位置と時間を用いた（それがない場合は、各放球点の位置を用いた）。第一段階においてトータルで 206 のオゾンゾンデ : ILAS の一致ペアが北半球の 13 地点、南半球の 3 地点から選ばれた。オゾンゾンデの一致観測をまとめたものを表 4.4 に示す。

気球・航空機搭載センサー、地上設置センサーによる観測については、時間で±12 時間、空間で 500 km というしきい値を用いた。しかしながら表 4.5 に示すとおり、DOAS, AMON, SLS, MkIV, FIRS-2 により得られた観測データの抽出については、500 km というしきい値を満たすものがないため、空間のしきい値を 1000 km に緩和した。これらの観測の代表的な位置と時間として、高度 20 km あるいは接線高度 20 km における有効な観測値があれば、その位置と時間を用いた（それがない場合は、各放球点の位置を用いた）。

4.3.2 比較高度の一貫性

ILAS と検証データのプロファイルを比較するために、鉛直グリッド（すなわち分解能）を互いに一致させるべきである。表 4.1 に示すとおり、衛星センサーからの接線高度は、異なる間隔の幾何高度として登録されている。HALOE データについては、はじめにオゾン分圧と大気圧を 0.1 km 高度グリッドに線形内挿した。その後、各 i km（ i は整数）のグリッドに中心を持つ高さ 1 km の箱に含まれるデータを平均してオゾン混合比を求めた。SAGE Ⅱデータについては、オゾン混合比は i km を中心とした 3 ポイント毎に平均した。オゾンゾンデの高度はおよそ 100 m 間隔でジオポテンシャル高度とともに登録し、その後幾何高度に変換した。さらに、オゾン分圧と大気圧を各 i km グリッドを中心とする各 1 km の箱に含まれる値を積分し、オゾン混合比を求めた。気球・航空機搭載型、地上設置型センサーについて、高度グリッドおよび／または鉛直分解能を合わせる手法は 4.4.3 節で説明する。今回の比較研究においては、有効データの範囲内で、他衛星、気球・航空機搭載型、地上設置型センサーとの比較については 9 km～70 km で得られたデータを用い、オゾンゾンデとの比較については、9 km～30 km で得られたデータを用いた。

4.3.3 データのフィルタリング

北半球では 1996 年 12 月に極渦が形成され、下層成層圏においては 1997 年 5 月はじめまでの異例の長さで継続した。これは *Northern Hemisphere Winter Summary 1999-2000* [NOAA, 2000a] の図 4.8 に示されている。1996 年春の南半球では下層成層圏において 1996 年 12 月はじめまで極渦が存在した。これは *Southern Hemisphere Winter Summary 2000* [NOAA, 2000b] の図 4.12 に例が示されている。 [Lu *et al.*, 2000] が提言しているように、比較研究で、冬季の気象条件においてよりよい一致ペアを見つけるためには渦位（PV）の解析を取り入れる

べきである。

このことを念頭において、上述のしきい値により選択された一致ペアを次の手法でさらに選別した。まず、ILASデータと比較対象データそれぞれについての接線高度および時刻におけるPV値を、英国気象局（UKMO）の同化データ [Swinbank and O'Neill, 1994] を用いて計算した。これは12UTCに提供される24時間データである。データの水平分解能は、緯度方向2.5度、経度方向3.75度である。データの鉛直分解能はUARS標準気圧グリッド(P_i (hPa) = $1000.0 \times 10^{(-i/6)}$, $i = 0,1,...20$）に対応する。PV値と温位は各グリッドポイントについて計算された。その後、これらのデータを、各観測値（ILASデータと比較対象データの両方）に対して時間的・空間的に1 km間隔の幾何高度グリッドで内挿した。1 km間隔の各高度グリッドについて、ILASと検証データの相対差を以下のように定義して計算した。

$$2*\{PV(ILAS) - PV(val)\}/\{PV(ILAS) + PV(val)\}$$

ここで、PV (ILAS) と PV (val) はILASおよび検証データが観測された時刻と位置におけるPV値である。もしこの差が3 km以上にわたり連続して±15%を超過した場合には、これらの高度のデータは検証解析から除外した。ILASと5 kmあるいは11 kmのカラム量（4.4.3節参照）が得られるいくつかのセンサーとの比較については、15%を越えるPVの差は見られなかった。また、オゾンの値が観測誤差（第4.2節に記述されている）よりも小さい場合は、このオゾンデータも除外した。このデータのフィルタリングは、大きな相対誤差を伴うオゾンの低濃度域（数百ppbvレベル）での比較を抑える効果がある。最後にオゾンゾンデのプロファイルに関してだけは、ある高度においてオゾン観測値に以下のような異常値が見られた場合、その高度のデータは棄却した。すなわち、特定できない摂動によると思われるオゾン濃度および／または気圧の突然のディップ、またはゾンデのポンプ性能の低下や反応溶液の蒸発に起因すると思われる高々度におけるオゾンの異常な濃度低下が見られた場合である。

4.4.比較

4.4.1 衛星センサー

HALOE

図4.1a, 図4.1bにILASとHALOEにより観測された、北半球及び南半球の9～70 kmの平均オゾンプロファイルを示す。また、それぞれ最小値、最大値、1シグマ（標準偏差）の値もともに示した（左パネル）。右パネルにはILASとHALOE間の個々のパーセント偏差を表すD値の中央値をその最小値、最大値とともに示した。ここで、Dは相対的な差で、以下のように定義される。

$$D(\%) = 100 \times 2 \times \{O_3(ILAS) - O_3(val)\}/\{O_3(ILAS) + O_3(val)\} \qquad (1)$$

ここで、O_3 (ILAS) および O_3 (val)はそれぞれ、各幾何高度グリッドにおけるILASと検証デ

ータ（HALOE, SAGE II, POAM II, オゾンゾンデもしくは気球・航空機搭載センサー、地上設置型センサーといった検証データソースから得られたもの）のオゾン混合比である。各高度における一致データ数（比較ペアの数）を図の右側に示す。ゼロラインに対称な2本の破線は、以下のように定義された、各高度におけるILASとHALOEの誤差のRSSの平均値を示している。

$$\text{RSS error (mean)} = \sum_{i}^{N} \sqrt{Err_i(ILAS)^2 + Err_i(val)^2} / N \quad (i = 1 \text{ to } N) \quad (2)$$

ここで、Err (ILAS) およびErr (val) はそれぞれILASと検証データのトータル測定誤差（第2章で述べた）を表している。北半球での比較（図4.1a）において、D値は24～47 kmで±5%であり、良く一致していることを示している。12～23 kmにおいてはD値は5%を越えたものの、もっとも悪くて15%であり、RSS誤差の半分未満であった。48～58 kmにおいては、D値は再び5%を越えたが、おおむね10%以内であり、この高度範囲におけるRSS誤差と同程度であった。59～67 kmにおいてもD値の絶対値は5%よりも小さかった。しかしながら、65 km以上ではRSS誤差が相当大きくなる（高度70 kmでは90%に達する）。そのためこの高度範囲については考慮しない。全体として、HALOEの観測値との比較からは、北半球でのILASオゾン観測値において、RSS誤差を超える統計的に有意なバイアスは認められなかった。

南半球での比較（図4.1b）に関しては、30 km以上51 km付近まで、高度が高くなるにつれてD値が増加していることがわかる。48～55 kmではD値がRSS誤差を上回っており、HALOEデータと比較した場合に、これらの高度ではILASデータに幾分大きなバイアスが存在することを示唆している。56 kmより上層では、全体として、D値はこれらの高度におけるRSS誤差よりも小さいが、導出されたILASデータの振動に起因する振動がいくらか見られる。15～47 kmではD値は5%以内であり、これらの高度におけるRSS誤差と比較しても小さかった。9～14 kmでは、高度が下がるにつれてD値は増加し、最下層では50%以上に達した。しかしながら、このように大きなD値は、絶対差が0.09～0.11 ppmvの範囲に対応していることに注意すべきである。さらに、このような絶対差のレベルは、この高度範囲における バージョン5.20のILASオゾンのトータル誤差のレベルに匹敵することにも注意すべきである。南半球においては48～55 kmの高度範囲を除いて、全体としてILASのオゾンデータに統計的に有意なバイアスは認められなかった。この高度範囲における相違については、観測時間差の見地から第4,5章で議論することにする。

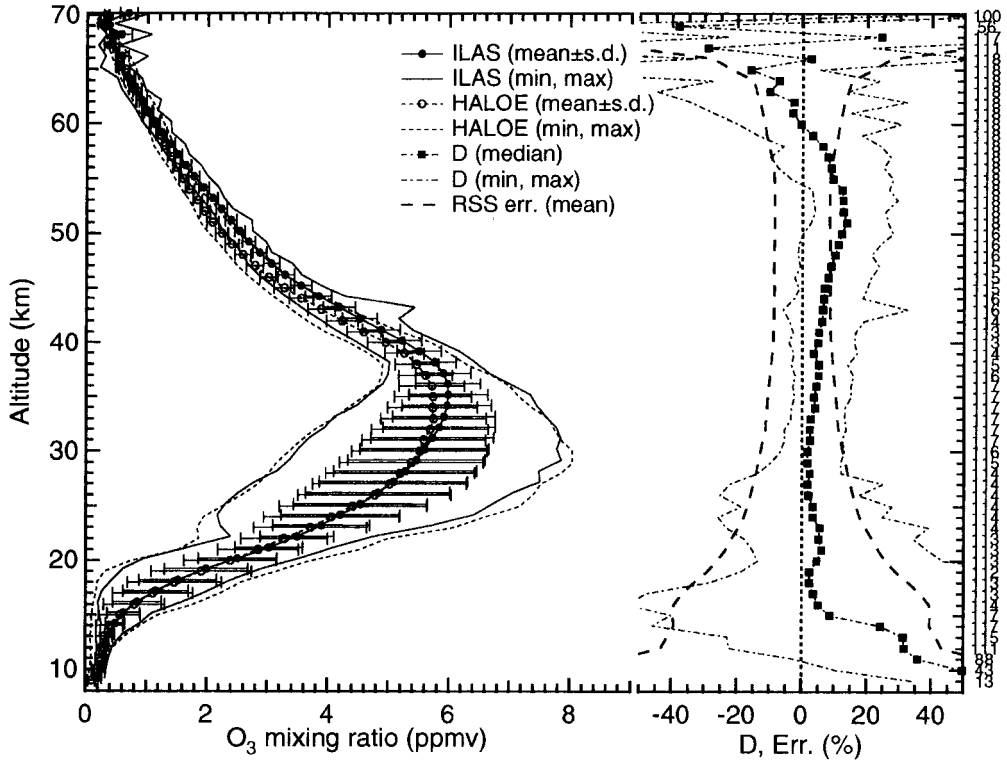


図 4.1b　図 4.1a と同様。ただし、南半球のもの

SAGE II および POAM II

図 4.1 に類似した図 4.2a, 図 4.2b はそれぞれ北半球、南半球における、9～70 km の ILAS および SAGE II により観測されたオゾンの平均プロファイル（左パネル）と D 値のプロファイル（右パネル）である。ILAS:HALOE の比較からも示されたとおり、似たような特徴が明らかになった。(1) 北半球の比較においては 16 km 以下および 64 km 以上の高度を除いた全ての高度で、D 値はほぼ±10%以内であった。(2) 南半球の比較においては 30 km 以上 50 km 付近まで、高度が増すとともに D 値が増加する。南半球の高度 35 km 以上では D 値は RSS 誤差をこえた。しかしながら、これらの D は、60 km 以下では最も悪くても 12%であった。高高度領域を除いて、SAGE II 観測値との比較では、ILAS のオゾン観測値には両半球ともに統計的に有意なバイアスは認められなかった。

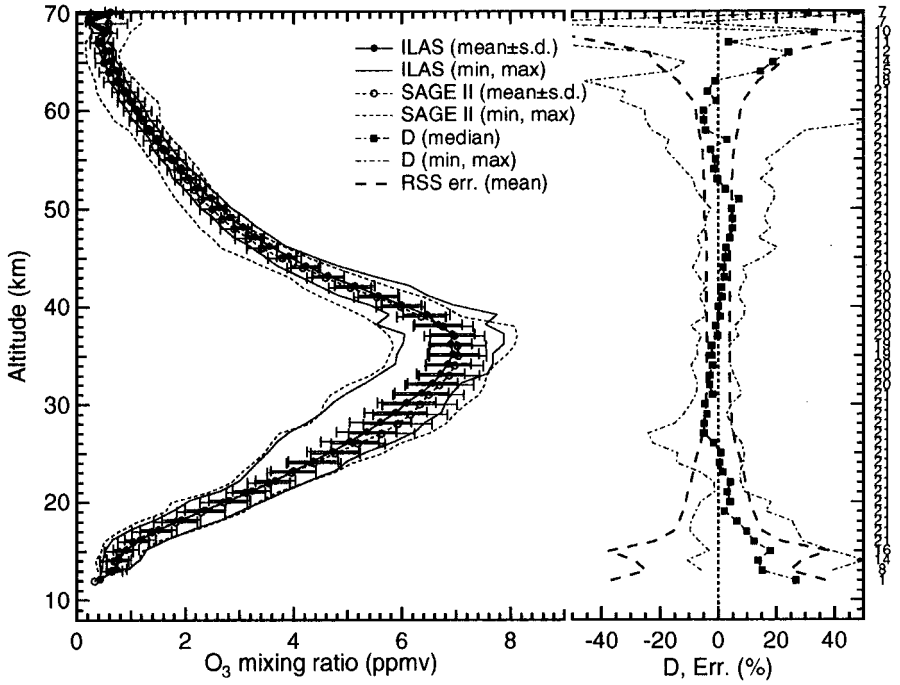


図 4.2a　図 4.1a と同様。ただし、北半球における ILAS と SAGE II の比較

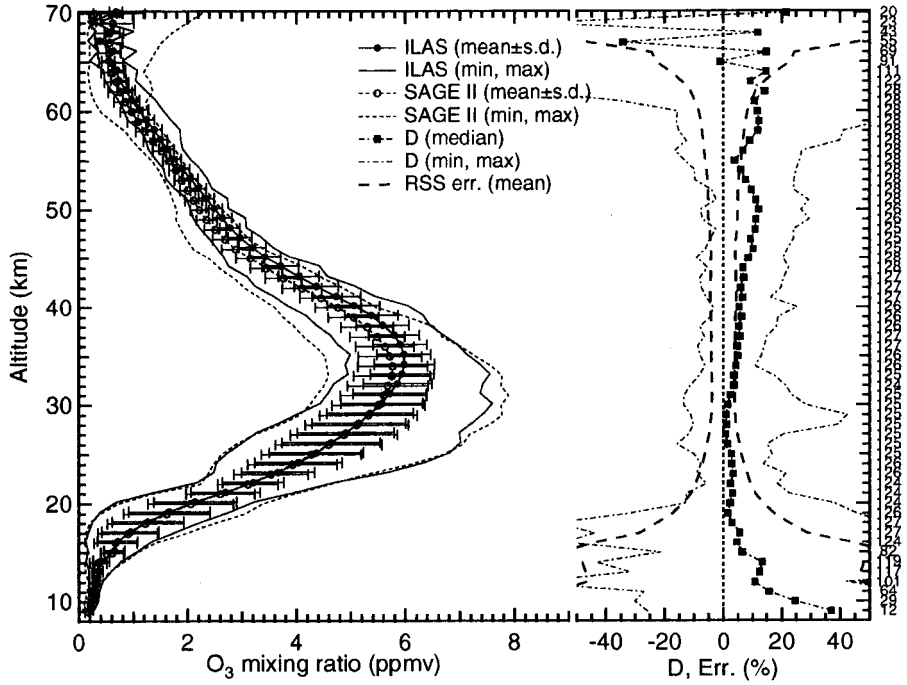


図 4.2b　図 4.1a と同様。ただし、南半球における ILAS と SAGE II の比較

図 4.3a, 図 4.3b は、それぞれ北半球、南半球の 15～50 km の ILAS および POAM II により観測されたオゾンの平均プロファイルと D 値のプロファイルである。両半球ともに、23～50 km における D 値は 10%以内で RSS 誤差よりも小さく、この高度範囲における ILAS

オゾン観測には統計的に有意なバイアスがないことを示唆している。北半球の比較では 22 km 以下で、D 値は高度が下がるとともに増加し、15 km で 30%に達する。これは絶対差 0.31 ppmv に対応している。また、南半球の比較で 23 km 以下では、D 値は 15 km で 56%に達する。しかしながらこれは、絶対差 0.16 ppmv に対応するものである。

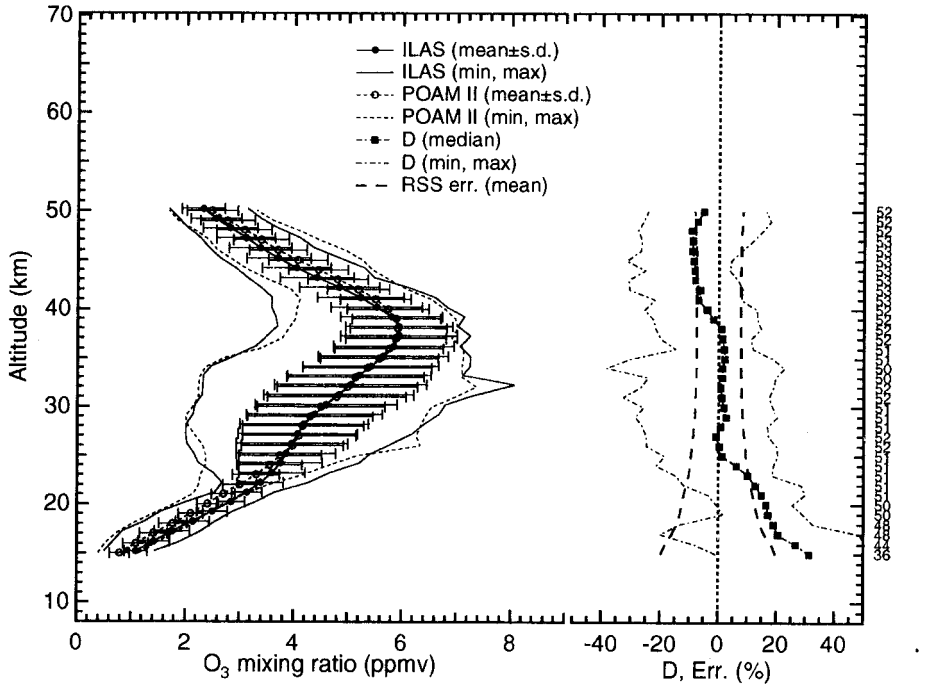


図 4.3a　図 4.1a と同様。ただし、北半球における ILAS と POAM II の比較

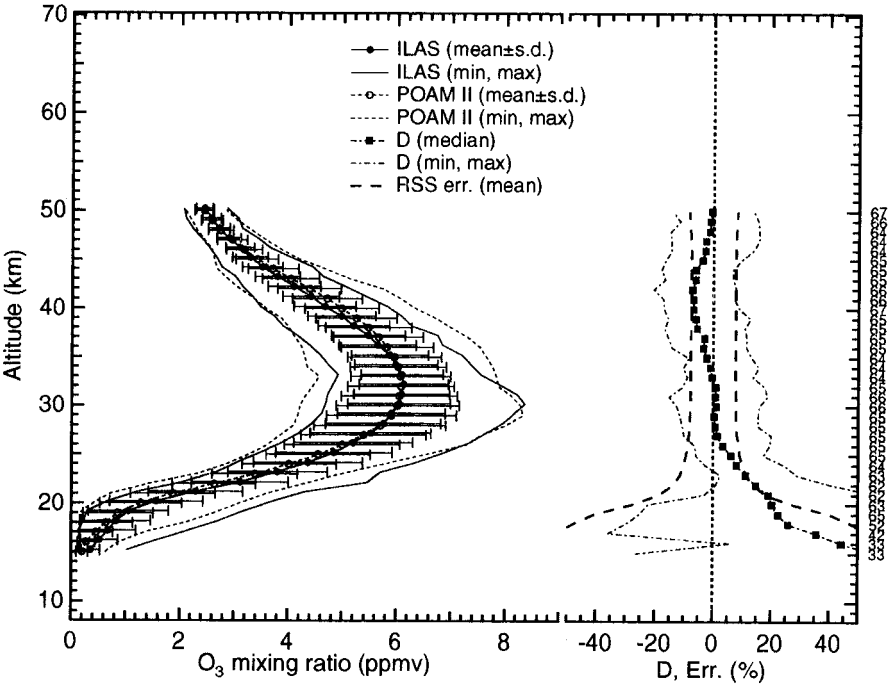


図 4.3b　図 4.1a と同様。ただし、南半球における ILAS と POAM II の比較

4.4.2 オゾンゾンデ

下部成層圏については、オゾンゾンデデータは非常に信頼できると考えられる。それは、センサーは5%の精度を有しており、高度は気温と気圧の直接測定により決定されるためである。しかし、これらのセンサーはいくらかの時定数をもっており[Komhyer *et al.*, 1995]、そのため、オゾン濃度の系統的なシフトが鉛直分布において起こりうる。ではあるが、このタイプのデータは[Sasano *et al.*, 1999a] によって、バージョン3.10のILASオゾンデータのaccuracyを決めるための検証データとして、他衛星観測値と同様に [*e.g.*, Bhatt *et al.*, 1999; Cunnold *et al.*, 1989; Deniel *et al.*, 1997; Lu *et al.*, 1997] 用いられた。しかしながら、すべての衛星観測について言えることであるが、オゾンゾンデが測定する空気量は、ILASが測定する空気量とかなり異なることに注意が必要である。図4.4a と図4.4bはそれぞれ北半球、南半球の9〜30 kmのILASとオゾンゾンデにより観測されたオゾンの平均プロファイルとD値のプロファイルを示している。両半球とも13〜30 kmで、ILASとオゾンゾンデのデータは非常に良く一致している（±10%以内）。

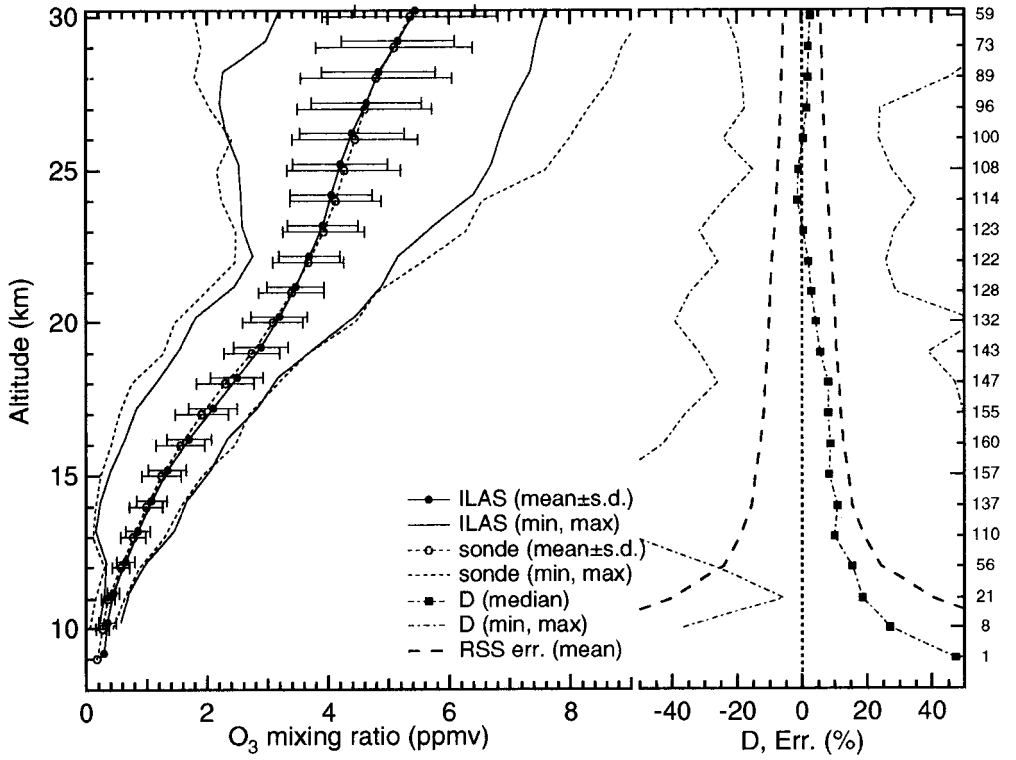


図4.4a　図4.1aと同様。ただし、北半球におけるILAS とオゾンゾンデの比較

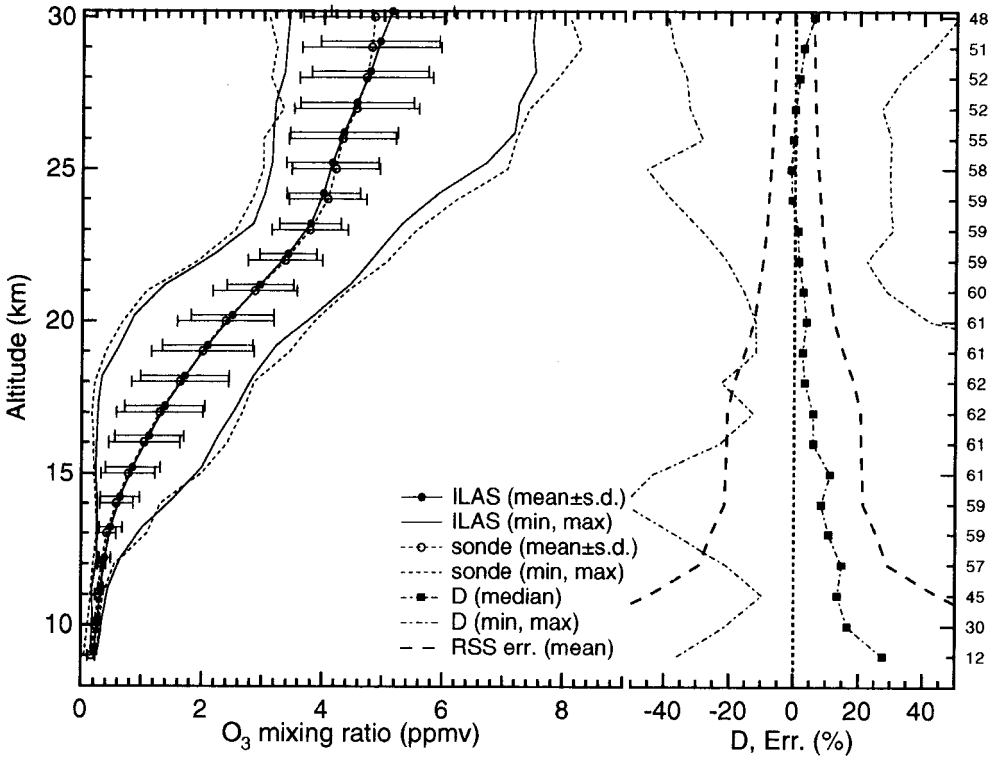


図 4.4b　図 4.1a と同様。ただし、南半球における ILAS とオゾンゾンデの比較

より低い高度については、高度の低下とともに D 値は増加する。この特徴は上述した ILAS と他衛星の比較から得られた結果と類似している。D 値は両半球とも 9～10 km において約 27%に達したが、こういったかなり低い高度ではこの値は RSS 誤差より遙かに小さい。しかしながら、混合比の差は 0.05～0.11 ppmv であった。

4.4.3　気球・航空搭載型センサー、地上設置センサー

高度の登録は、気球搭載型センサーによって正確に決定される。これはセンサーが全球測位システム（GPS）に関連しているためである。航空機による観測および地上設置センサーによる観測もまた、衛星観測に比べればより正確な高度登録ができる。そのため、これらの検証データソースは、衛星センサーデータを検証するのにも適している。地上設置センサー TDLHS と気球または航空機に搭載されたセンサーでは、鉛直分解能がかなり異なる。そのため、ここではそれらを鉛直分解能によって二つのカテゴリーに分類した。DIAL データについては、この章の最後で比較することにする。ILAS と同等かそれ以上の鉛直分解能を有する機器については、1 km の幾何高度グリッドで比較した。LPMA, SAOZ, AMON, DOAS, MkIV, および JPL UV-photometer はこのカテゴリーに属する。JPL UV-photometer のデータは、オゾンゾンデデータで行ったのと同じ方法で 1 km 幾何高度グリッドに処理された（3.2 節参照）。全部で 12 の一致ペアが選択された（表 4.5 も参照）。平均プロファイルを前出の図と同じ様式で図 4.5 に示す。ILAS データは、これらの検証観測データと良く一致し、13

～38 km では概ね±10%以内の差であった。これらの差はこの高度範囲における RSS 誤差と同じ大きさである。

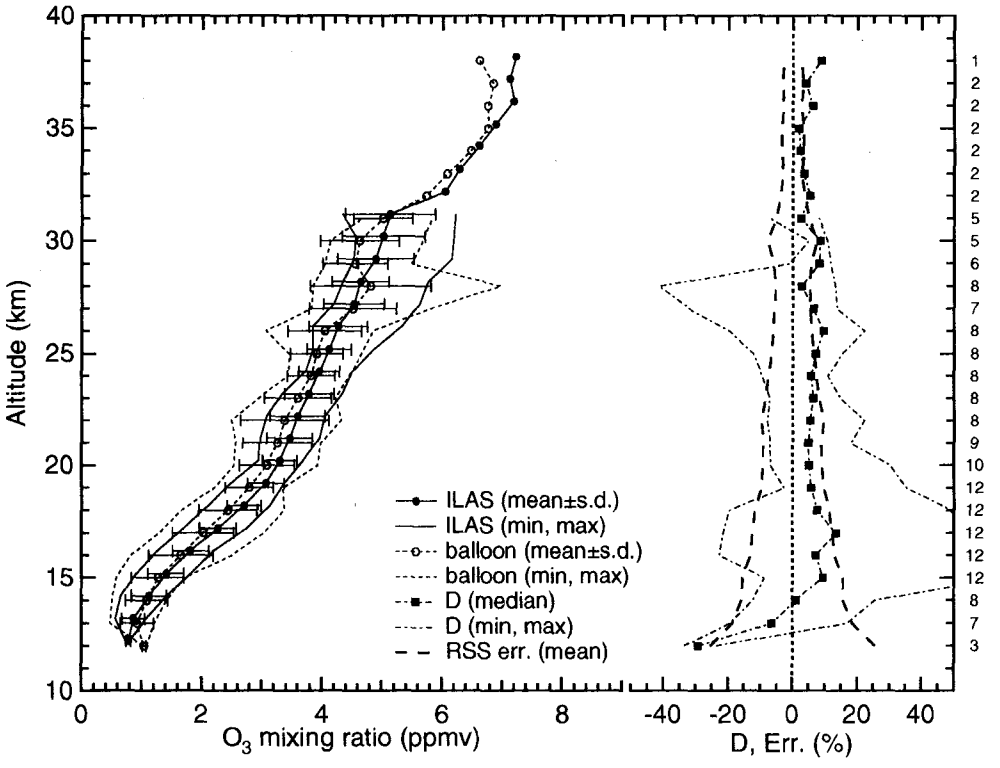


図 4.5　図 4.1a と同様。ただし、ILAS とスウェーデンのキルナ周辺で 1997 年 1～3 月およびアラスカのフェアバンクス周辺で 1997 年 4～5 月に行われたいくつかのリモートセンシングと in situ 機器によるデータとの比較

ここでは、FIRS-2, TDLHS, ASUR といった ILAS より高度分解能の低いセンサーで得られたデータも利用した。これは、それらのセンサーでもオゾンの部分カラム量については ILAS と検証データとの一致の度合いを評価できるためである。気球搭載センサーである FIRS-2 は ILAS よりもいくぶん鉛直分解能が劣る (4 km)。SLS は 2～3 km の鉛直分解能を持つが、ここではこれを FIRS-2 とともに比較する。というのは、これら 2 つの機器が同じゴンドラに搭載され、同じ空気塊を観測したからである。ILAS の鉛直分解能のレベルを落とすため、オゾン混合比のデータは、はじめに UKMO のデータを用いて分圧に変換された。その後、このデータを $i \times 5$ km ($i = 3$ to 8)を中心とした高さ 5 km の箱に含まれるものについて平均し、5 km 毎の体積混合比を求めた。これらのプロファイルを、検証データである FIRS-2 、SLS のプロファイルとともに図 4.6 に示す。高度 45 km における SLS データの鉛直分解能は 8 km 以上であったため、ILAS データをこの分解能に変換した。地上観測センサーTDLHS と 2 つの航空機搭載センサーASUR, DLR, UV-photometer のデータを対応する ILAS データとともに図 4.7, 図 4.8 にそれぞれ示す。4 月 25 日、5 月 7 日、5 月 8 日にそれぞれ 6,12 および 6 プロファイルが TDLHS により、得られた。平均値と 1 シグマ（標準偏差）は日別に示され

ている。これらのエラーバーは、5 月 7 日、8 日における測定誤差である 15%よりも大きい。これは、これらの日に得られたスペクトルが機器によるノイズの影響を受けたためである。TDLHS, ASUR と ILAS データを比較するために、SLS および FIRS-2 データの場合と同様の方法で、ILAS データを 5 km または 11 km の高度分解能に変換した。DLR UV-photometer との比較については、気圧が 200～180 hPa（所要時間およそ 1.6 時間）の間に得られた DLR データを平均し、同じ気圧レベルにおける対応する ILAS 観測データと比較した。図 4.9 に、図 4.6、 図 4.7 および図 4.8 から得られた対応する D 値を示す。全体的に、ILAS データはこれらの鉛直分解能の低いリモートもしくは in situ センサーと±20%以内で一致した。

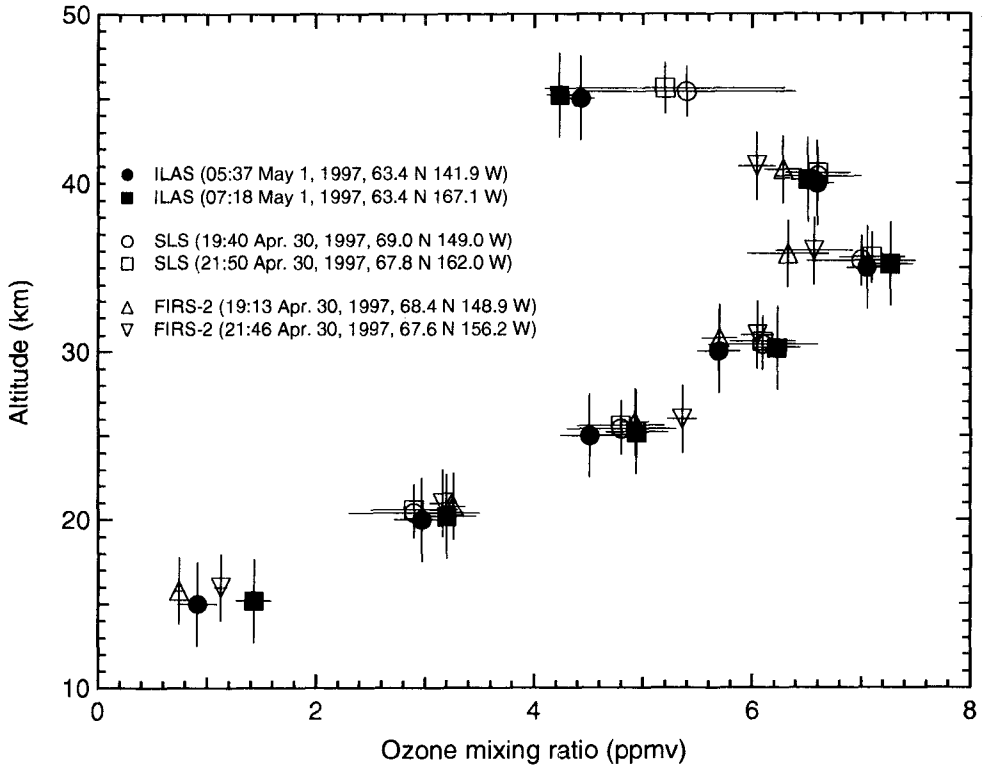


図 4.6　SLS , FIRS-2 データと比較できる ILAS データのプロファイル

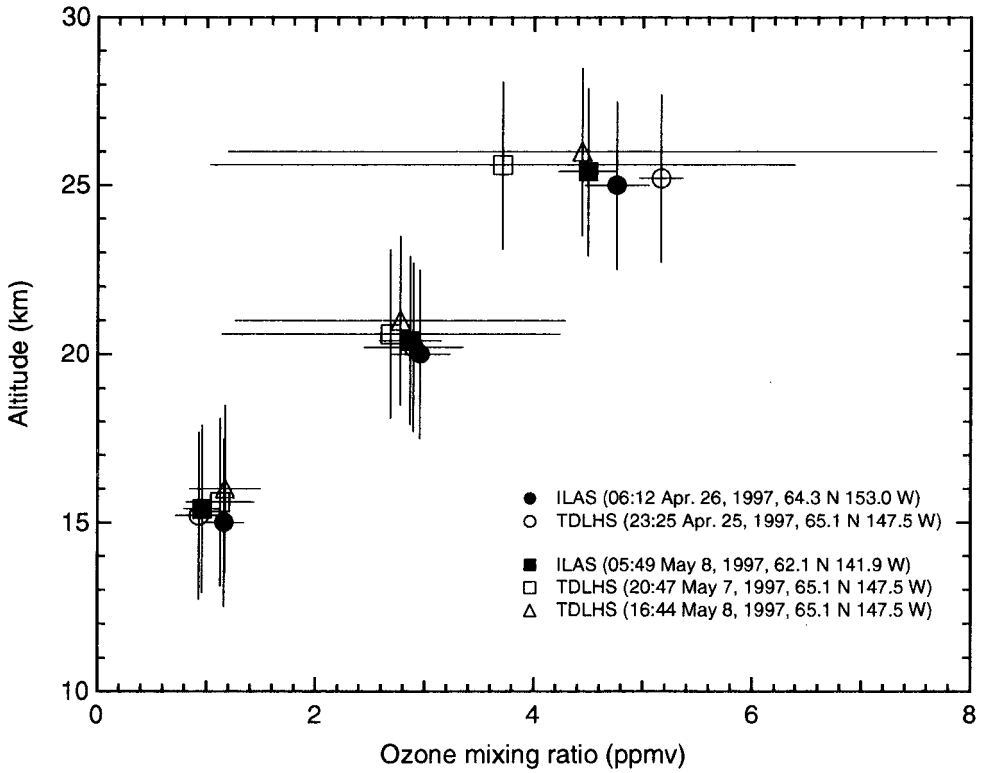


図 4.7　TDLHS データと比較できる ILAS データのプロファイル
見やすくするため、0.2 km づつずらしてプロットした。

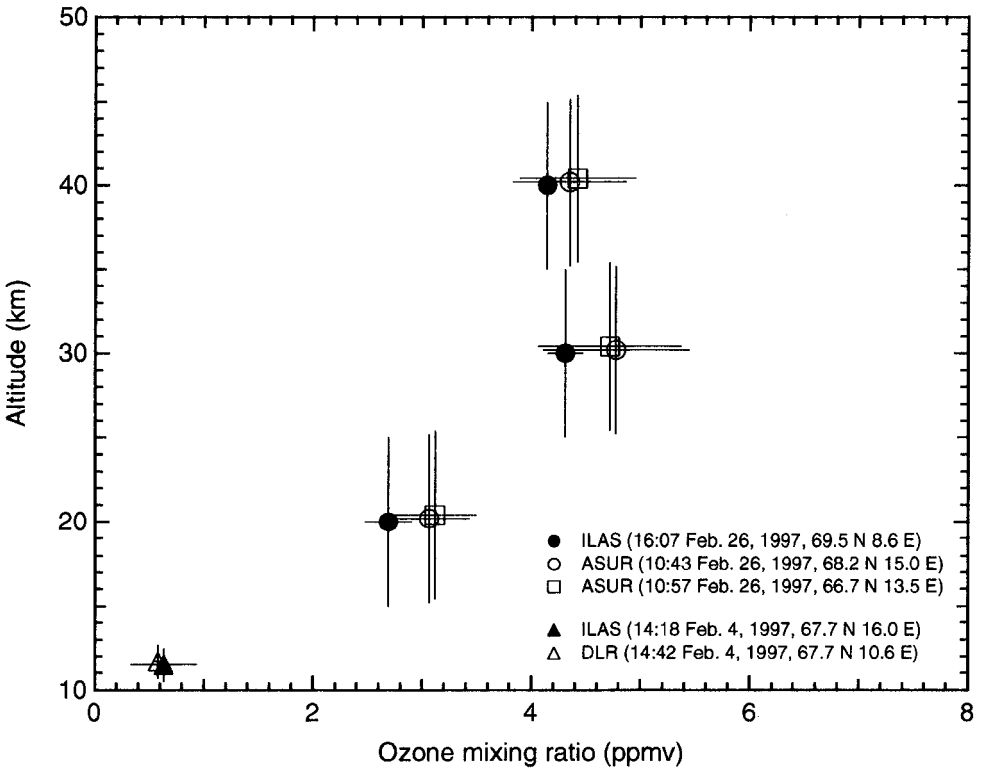


図 4.8　ASUR、DLR、UV-photometer データと比較できる ILAS データのプロファイル
見やすくするためデータは 0.2 km ずらしてプロットした。

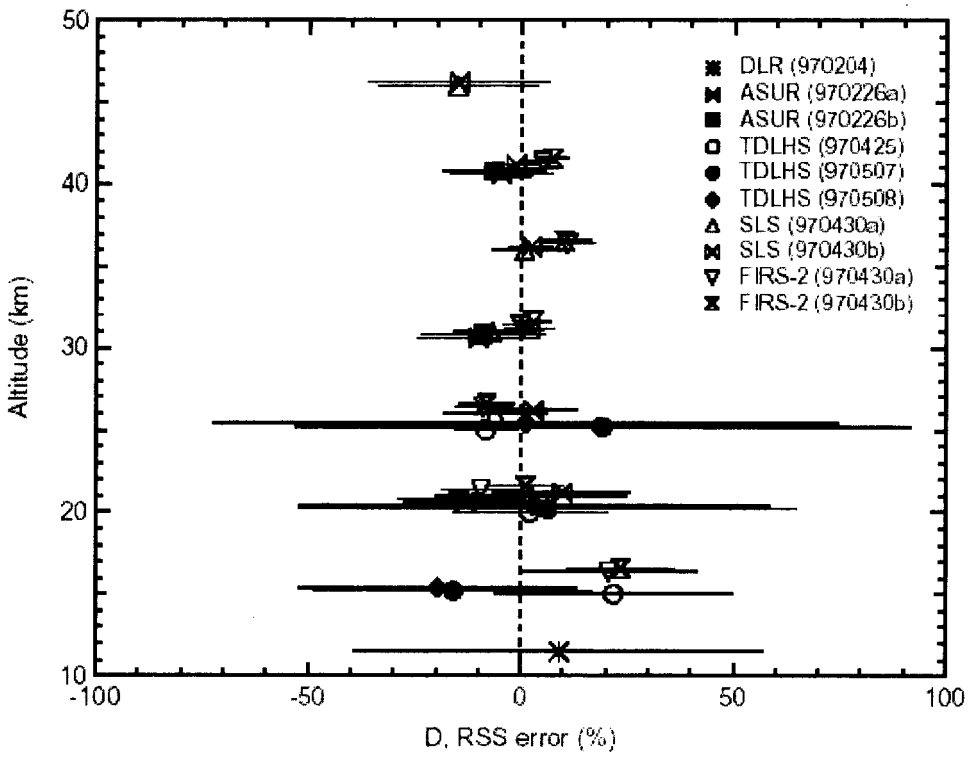


図 4.9　SLS、FIRS-2、ASUR、DLR、UV-photometer　についての D 値のプロファイル
見やすくするためデータは 0.2 km ずらしてプロットした。

図 4.10a は、ILAS およびノルウェーのアンドーヤにおける ALOMAR-DIAL により観測されたオゾンの平均プロファイルを前出の図と同じ様式で示したものである。同様に ILAS と Dumont d'Urville における CNRS-DIAL の比較を図 4.10b に示す。DIAL データの鉛直サンプリングは 1 km 以下であるため、データもオゾンゾンデデータと同じ方法で 1 km 幾何高度グリッドに処理した。図 4.10a より、ILAS データは ALOMAR-DIAL データと良く一致し、ここで考慮した全ての高度で RSS 誤差範囲内であることが確認された。図 4.10b より、16～26 km で＋10%程度の D 値がみられるが、このレベルの D 値は RSS 誤差に匹敵する。27 km 以上および 15 km 以下の所々で複合誤差を越えるような D 値が生じた。1997 年 5～6 月の期間に得られた CNRS-DIAL データは機器に問題があったため、この期間の 30 km 以上の高度における DIAL データは信頼性がない。

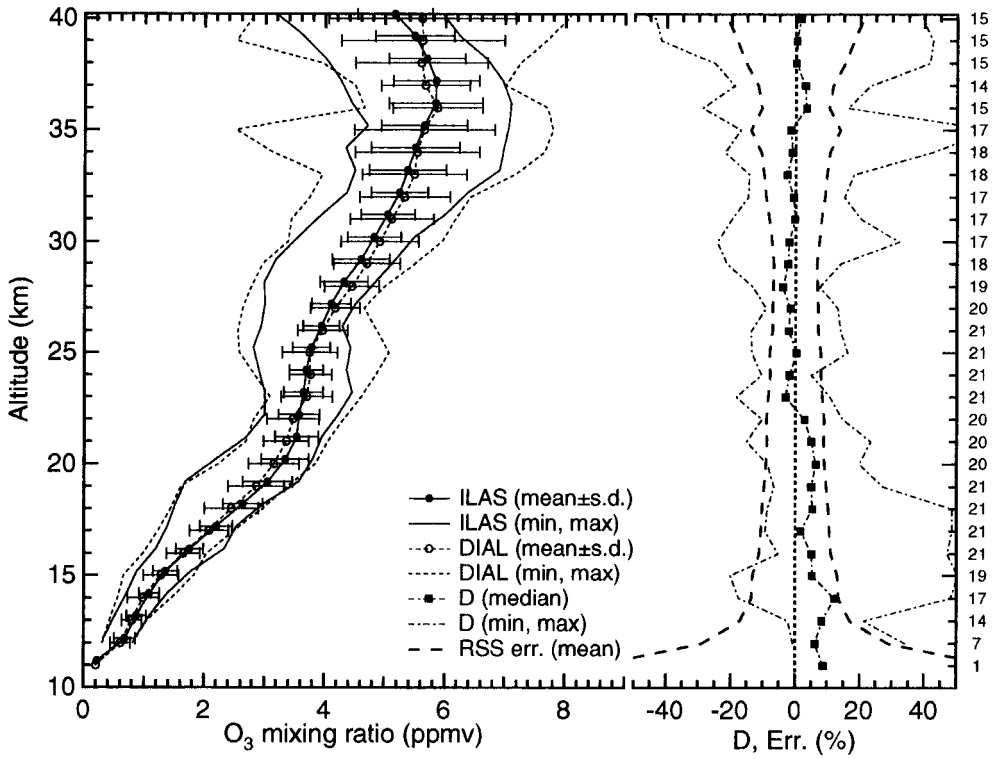


図 4.10a　図 4.1a と同様。ただし、ノルウェーのアンドーヤ ALOMAR での 1996 年 11 月から 1997 年 4 月における ILAS と DIAL の比較

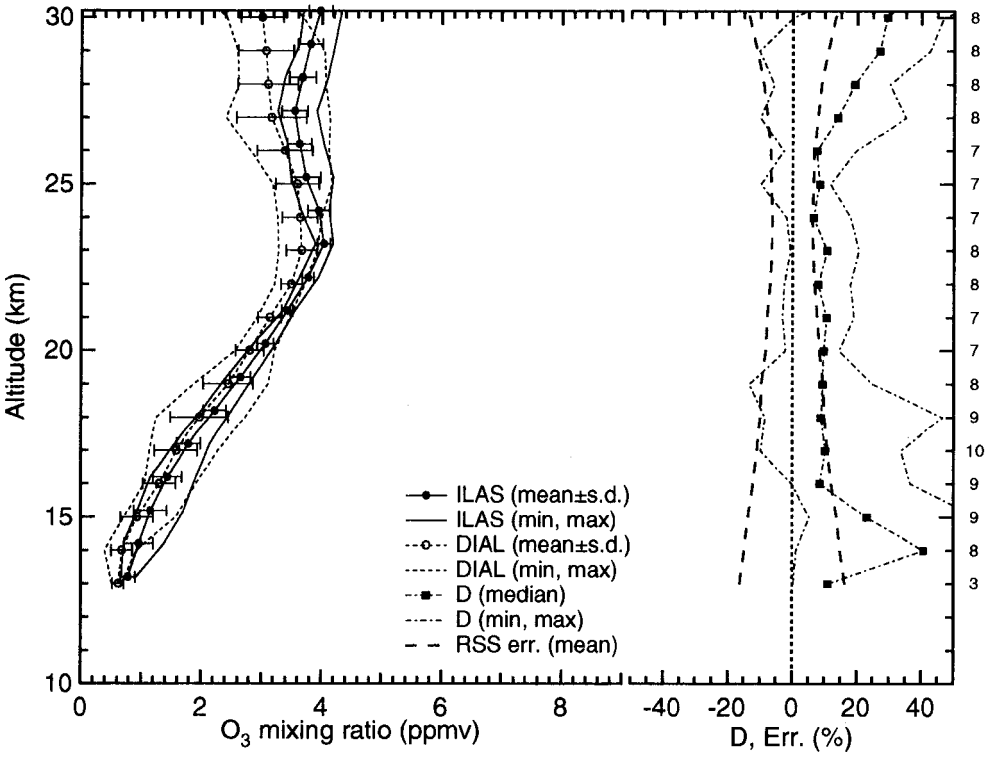


図 4.10b　図 4.1a と同様。ただし、南極の Dumont d'Urille での 1997 年 5～6 月における ILAS と DIAL の比較

4.4.4 月単位の比較

この項では、異なった月のILASデータと他衛星データおよびオゾンゾンデデータとの比較によって得られたD値の高度変化または季節変化について調べた。鉛直方向に沿ってNが5ポイントもしくは7ポイントの場合について、D値の重みつき平均値を算出した（すなわち50 km以下は5 kmにわたって平均、また51 km以上は7 kmにわたる平均)。これは式(3)のように定義される。

$$\mathrm{D\,(weighted\ mean)} = \sum_{j}^{J}(D_j \times N_j) / \sum_{j}^{J} N_j \quad (j = 1 \text{ to } J;\ J = 5 \text{ or } 7) \qquad (3)$$

ILASと他衛星の比較については、表4.6で示された期間の各層のD値の結果を棒グラフとしてPlate2に示す。各層におけるRSS誤差の重みつき平均値についても、D値と同じ方法で式(4)で定義されるように計算し、誤差棒として正方向のみ示した。これはより見やすくするためである。

$$\mathrm{RSS\ error\,(weighted\ mean)} = \sum_{j}^{J}(\mathrm{RSSerr}_j \times N_j) / \sum_{j}^{J} N_j \quad (j = 1 \text{ to } J;\ J = 5 \text{ or } 7) \quad (4)$$

ここで、RSS errは式(2)で定義したものと同じである。高度65 km以上については、誤差がかなり大きいので考慮に入れない。表4.6に示された比較観測プロファイルの数はそれぞれPlate 2のサブパネルに示す。

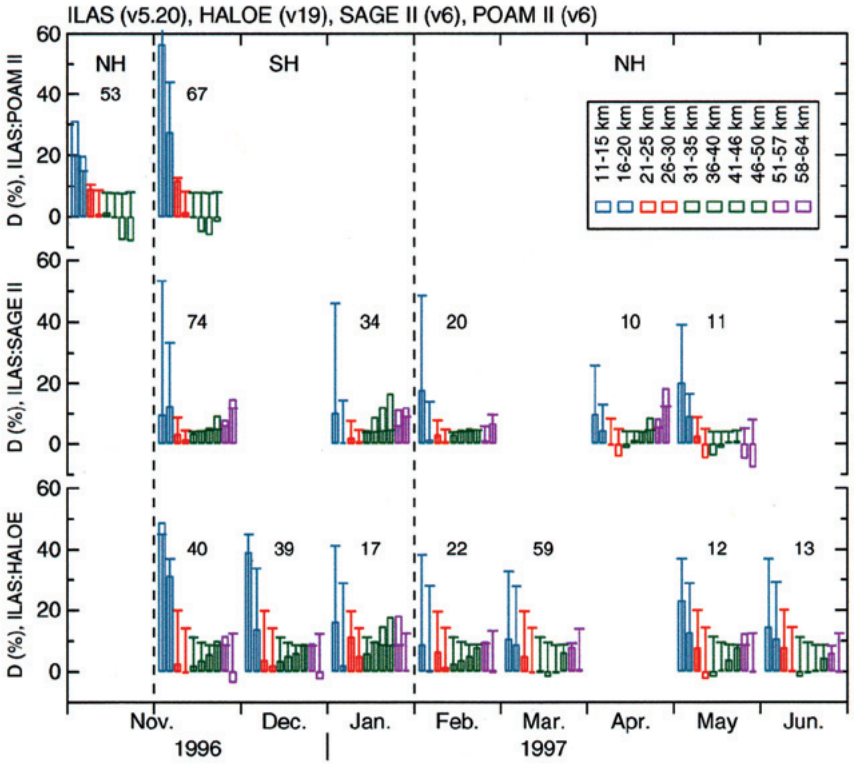
ここで、高度範囲毎にこれらの結果をまとめる。20 km以下（水色のグラフ）では、特に11～15 kmの高度範囲でおよそ50%に達するような大きなD値がみられる。しかしながら、これらの高度に関してはRSS誤差のトータルの不確かさはD値と同等であるため、ILASオゾンデータに系統的なバイアスが存在するかどうかは結論できない。検証データの種類に関わらず、ILASオゾンデータは21～30 kmの範囲（赤いグラフ）においては、それらと良く一致し、相対的な差は-5%～12%の範囲であった。31～50 km（緑のグラフ）では、南半球における1月のHALOEおよびSAGE IIデータとの比較から、全体として、ILASデータに統計的に有意な大きなバイアスが見られた。このバイアスは、高度が高くなるにつれて増加し、高度46～50 kmにおいて18%に達した。しかしながら31～50 kmでは、D値は1月を除いて-8～10%にとどまった。51～64 km（紫のグラフ）では、いくつかのケースではRSS誤差より大きなD値があり、これらの状況下では、いくつかのD値は18%に達した。それ以外についてはD値は-8～15%の範囲であった。

ILASとオゾンゾンデの比較においては、5 kmの層毎に、式(3)および(4)により、D値の平均値とRSS誤差の平均値を計算したものを月毎、半球毎にPlate 3にプロットした。このPlateからわかるとおり、北半球ではD値の高度依存性または季節依存性は見られないが、およそ30%に達するような大きなD値が、11月の16～20 kmと6月の11～15 kmでみられ、どちらも南半球であった。やはり、これらの大きなD値は、絶対差約0.2 ppmvと対応している。

まとめると、北半球では全ての高度領域において、D 値の顕著な季節依存性はない。しかし南半球については、D 値にいくらかの季節依存性がみられるかもしれない。: 1996 年 11 月の 11～20 km で D 値が大きく (30～55%)、また 1997 年 1 月の 41～57 km では D 値が RSS 誤差を超えた。

4.5 考察とまとめ

ILAS と検証データのプロファイルの不一致は、比較されたデータの誤差によるかもしれないし、測定された空気塊の実際の大気状態の違いによるのかもしれない。しかし、類似した不一致が、2 つ以上の独立したデータソースとの比較で見られる場合、ILAS データの問題に関連している可能性が高くなるだろう。こういった現象は、南半球 1 月の HALOE および SAGE II データとの比較で D 値（ILAS と他センサーとの相対的な差）が統合測定誤差を上回る高度 45～55 km や、南半球 11 月の HALOE および POAM II データとの比較で D 値が 40%を超える高度 15 km 以下で見られる（プレート 4.2 参照)。ILAS データに見られるこれらの高いバイアスにはいくつかの原因が考えられる。すなわち、高度決めの不確実性、機器の未知の問題、ライン・パラメータ中の不確実性、および観測された透過率に及ぼすエアロゾル消散の影響に関するノンガス補正法における曖昧性である。



プレート 4.2　厚さ 5 km または 7 km の各層における ILAS と他衛星センサーの比較対象データの平均相対差

高度 45～55 km における ILAS データの高いバイアスの原因を調べるために、大きな D 値が見られた高度 52 km を代表例として、ILAS : HALOE および ILAS : SAGE II について、D 値を時間差に対してプロットしたものを図 4.11 に示す。D 値の大きさが地方時（LT）の差と関係があることは明白である。類似した特徴は、下方 40 km（ここでは示さない）まで見られる。一方、図中には示していないが、空間的に離れている度合いは D 値には影響しない。したがって、45～55 km 付近での ILAS データ中の高いバイアスの原因は、地方時の差と関連する ILAS データ中の何かによっていると考えられ、この問題に関する一層の研究が必須である。

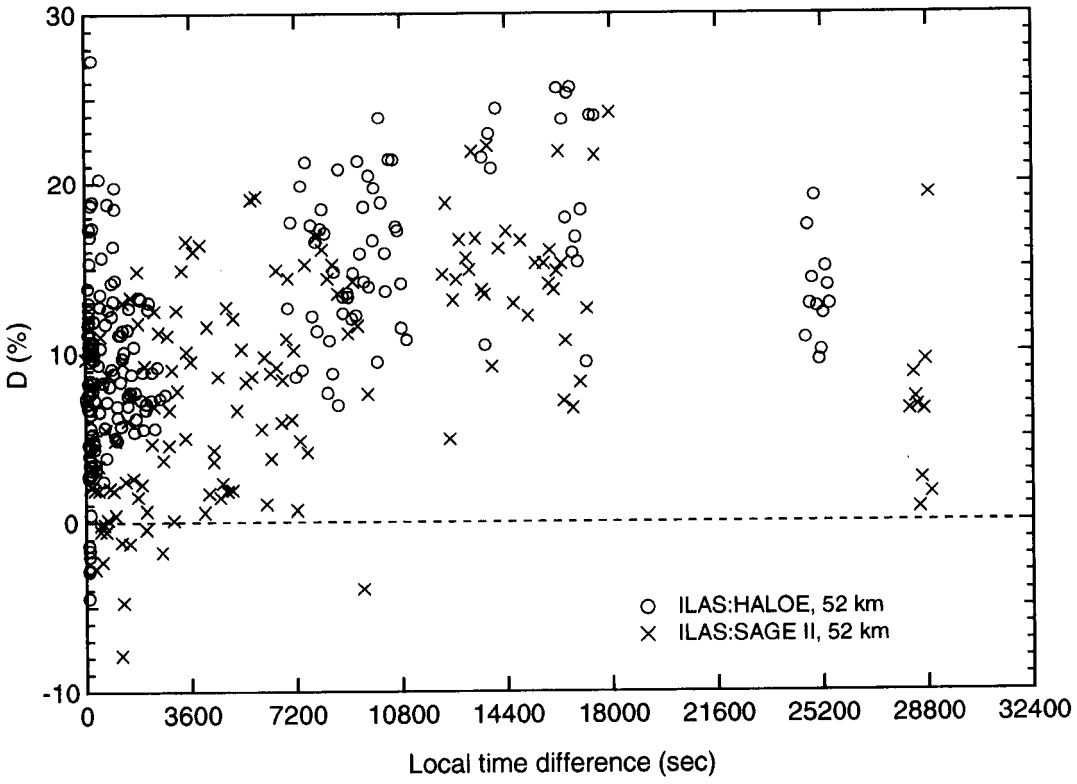
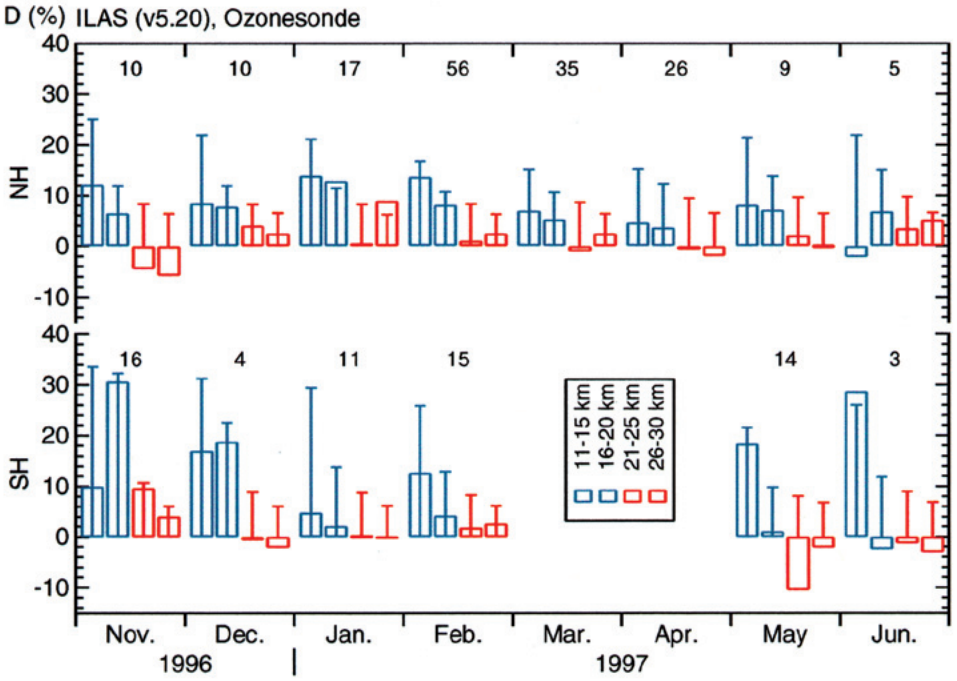


図 4.11　ILAS:HALOE 、ILAS:SAGE II の高度 52 km における D 値と現地時間差の関係

高度 20 km より下層については、D 値と地方時の差の間に明白な関係が見られない。オゾンゾンデ、気球・航空機搭載センサーおよび地上設置センサーとの比較から、これらの高度では、20%を超えるような著しい D 値はほとんどない。第 4 節で述べたたように、15 km より下の ILAS と検証データの間の絶対差は 0.2 ppmv と小さい。15 km 以下の ILAS データに見られる高いバイアスは、衛星データを処理する様々な導出アルゴリズム中の高度決めの手法および（または）エアロゾル消散を補正する方法と関連している可能性がある。この種の問題の例として、POAM II と SAGE II の高度決めにおいてあり得る差異についての詳細な議論が [Randall *et.al.*, 2000] によって示されている。他の ILAS 導出ガス種についての検証

解析 [*e.g.*, Kanzawa *et al.*, 2001] を考慮して、総合的な方法でこれら問題について議論することが必要であるが、そのような議論はこの論文の範囲を超えている。しかしながら、これは近い将来取り組むべき重要な問題であるが、衛星からこういった低い高度での低いオゾン混合比を導出することは挑戦でもある。太陽掩蔽法を用いる機器については、衛星から見られる太陽は大気の屈折により著しく曲げられるので、接線高度を正確に決めることが一般に困難である。

要約すると、パーセンテージで示した相対差（D 値）は、南半球の 1 月の高度 41～50 km を除き、21～50 km における ILAS : POAM II、ILAS : HALOE、ILAS : SAGE II の各比較で、それぞれ-2～11%、-5～9%、および-8～12%であった。51～64 km では、いくつかの例外はあったが、D 値は ILAS : HALOE および ILAS : SAGE II の比較において、-8～10%であった。21～30 km での ILAS : オゾンゾンデの比較では、D 値は-11～10%であった。D 値は高度が低くなるにつれて増加する傾向があるが、13～20 km で 10%以内、10～12 km で 20%以内である。いくつかの例外があるものの、ILAS オゾンデータはさらに、9～50 km で気球・航空機搭載型センサーおよび地上設置型センサーから得られたデータと±10%以内で一致した。Ver. 3.10 ILAS オゾンデータは、既に HALOE データの 13～20%以内 [Lee *et al.*, 1999] 、オゾンゾンデデータの 20%以内 [Sasano *et al.*, 1999a] にあることが示されているが、この検証研究は Ver. 5.20 ILAS オゾンデータが Ver. 3.10 ILAS オゾンデータを改善していることを実証した。ILAS とここで用いた検証データが全体として良い一致を見せたことは、Ver. 5.20 ILAS オゾンデータが、使用するにあたって信頼に足るものであり、高緯度地域における成層圏の化学および力学に関する研究に有用な情報を提供できることを示している [Terao *et al.*, 2001] 。ILAS のルーチン稼働期間は 8 か月（1996 年 11 月から 1997 年 6 月まで）であったが、このデータは POAM II（1993 年～1996 年 11 月）、POAM III（1998 年～）、また ILAS II（2002 年～）[Sasano *et al.*, 2001] の各センサーと組み合わせることにより、高緯度成層圏におけるオゾントレンドを引き出すために使うことができる。



プレート 4.3　5 km の各層における ILAS とオゾンゾンデの比較対象データの平均相対差
比較対象観測プロファイルの数はそれぞれサブパネルに示す。

5．改良型大気周縁赤外分光計（ILAS）version 5.20 の NO_2 と HNO_3 データの検証

要旨

人工衛星 ADEOS に搭載された改良型大気周縁赤外分光計（ILAS）は、太陽掩蔽法を用いて 1996 年 11 月から 1997 年 6 月まで両半球高緯度の NO_2 と HNO_3 を測定した。気球による NO_2 観測との比較から、高度 25-30 km の ILAS NO_2 には 0.3-0.4ppbv（6-11%）の正のバイアスがあることが分かった。高度 25-30 km の NO_2 のランダムな差は 0.2-0.3ppbv（3-9%）であった。20 km 以下と 45 km 以上の高度の ILAS NO_2 のランダム誤差は 100%以上であった。それらの高度の NO_2 濃度は 1.0ppbv 以下であった。780 nm のエアロゾル消散係数が 0.001 km^{-1} 以上になる光学的に厚いエアロゾルによって ILAS の NO_2 の値は低くなる。視線方向に生じる NO_2 の日変化の未補正は 25 km 以下の高度の ILAS NO_2 に正のバイアスを与えている。高度 25-35 km の POAM II と ILAS の NO_2 は 10-30%で一致した。HALOE とは、25-40 km において±10%以内で一致した。ILAS HNO_3 は高度 25-30 km で気球によって観測された HNO_3 と 0.1 ppbv（0-1%）以内で一致し、ランダムな差は 10%以内であった。

5.1 はじめに

NO_x (= NO + NO_2)が次の触媒サイクルを通じて成層圏オゾンを破壊することは広く知られている [Crutzen, 1970] 。

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2 \quad (R1)$$
$$NO_2 + O \rightarrow NO + O_2 \quad (R2)$$
$$Net: O + O_3 \rightarrow 2O_2 \quad (R3)$$

NO_x の触媒サイクルによるオゾンの損失は、中部成層圏および極域の夏季の下部成層圏で支配的である [Jucks *et al.*, 1996 ; Osterman *et al.*, 1997 ; Fahey *et al.*, 2000] 。加えて、ラジカル（ClO, BrO, OH, NO_3）を長寿命成分（$ClONO_2$, $BrONO_2$, HNO_3, N_2O_5）に変換する反応を通じて、NO_2 は成層圏オゾンの収支を変える。したがって、成層圏の NO_2 の観測はオゾン破壊の研究において大変重要である。

地球観測プラットホーム技術衛星（ADEOS）に搭載された改良型大気周縁赤外分光計（ILAS）は太陽掩蔽法を用いたセンサーである。ILAS は 1996 年 11 月から 1997 年 6 月にかけて、両半球の高緯度の成層圏の化学成分の濃度を測定した。測定された成分に NO_2 は含まれている。ILAS データの検証を目的とした気球観測キャンペーンが、スウェーデンのキルナ（68°N、21°E）で 1997 年 2 月と 3 月に、アラスカのフェアバンクス（65°N、148°W）で 1997 年 4 月と 5 月に行われた [Kanzawa *et al.*, 1997] 。このキャンペーンで幾つかの NO_2 の鉛直分布が得られた。

本論文では、ILAS によって得られた NO_2 の鉛直分布を気球観測や衛星観測の NO_2 の鉛直分布と比較し、version 5.20 のアルゴリズムで導出された ILAS NO_2 データの質を評価する。

NO_2濃度は日変化をするので、瞬時の太陽光条件が同じデータの比較を行う。観測場所の違いの影響を最小にするために、冬季と春先のNO_2は渦位（PV）が近い条件下で比較される。ILASの反応性窒素酸化物の観測を一貫して評価するために、Version 5.20のILAS HNO_3データの質の評価を付録に簡潔にまとめている。Version 3.10のILAS HNO_3データの質の評価は [Koike *et al.*, 2001] によって既に報告されている。

5.2 ILAS

ILASを搭載したADEOS衛星は98.6°の傾斜角を持った太陽同期極軌道に打ち上げられた。日毎に各半球で14回のILAS観測が実施された。日没時のILAS観測は、北半球で1996年11月から1997年6月まで、南半球で1996年11月から1997年3月までの期間に実施された。日の出時の観測は、南半球の1997年4月から1997年6月までに実施された [Sasano *et al.*, 1999a] 。観測時の太陽天頂角（SZA）は高度20-50 kmで90.2±0.2°であった。ILASが観測した緯度は57-70°Nと64-88°Sであり、季節によって変化した。ILASが観測したサンプルの水平幅は、視野から計算すると、13 kmである。空気の密度で重みをかけた太陽放射の吸収は200-300 kmの有効光路長で生じる。高度15, 35, 55 kmのILAS観測の鉛直分解能は、それぞれ1.9, 3.0, 3.5 kmである [Yokota *et al.*, 2001] 。NO_2の混合比はオニオン・ピーリング法を用いて1 km毎に50 kmまで導出された [Yokota *et al.*, 2001] 。波長が6.2-6.3 μm間のNO_2の吸収をILASは測定した。

Version 5.20アルゴリズムで導出する際のNO_2混合比の誤差はYokota *et al.* [2001] によって詳細に議論されている。このパーセンテージ誤差は高度30 kmで20%であり、それよりも高高度と低高度で次第に大きくなる。高度15-30 kmと30-50 kmの誤差の絶対値は、それぞれ0.5-1.5と1.5-2.5 ppbvである。

5.3 気球観測との比較

5.3.1 アプローチ

本論文で用いる気球観測は表5.1にまとめられている。ILASのNO_2データは4つの気球観測（5プロファイル）と比較される。

表5.1 気球観測一覧

Experiment	Date	Location at 20 km	SZA	Distance (km) §	Time diff. (hours) §
LPMA	Feb.26	66.9° N, 20.5° E	~90°	570	0.6
SAOZ	Feb.24	67.4° N, 19.2° E	~90°	1010	1.8
SAOZ	Mar.20	66.9° N, 17.6° E	~90°	620	0.9
MIPAS-B2	Mar.24	69.6° N, 30.1° E	105°	200	3.6
MkIV	May 8	68.6° N, 146.3° W	~90° *	760	6.4

* ILAS観測が夕方に行われたのに対し、MkIV観測は朝に行われた。
§ ILASと気球観測の観測位置の差

1) 2月26日：大気周縁プロファイルモニター観測（LPMA）
2) 2月24日、3月20日：Systeme d'Analyse d'Observations Zenithales（SAOZ）
3) 3月24日：気球搭載受動型大気観測のマイケルソン干渉計（Ver.2）（MIPAS-B2）
4) 5月8日：MkIV観測

検証キャンペーン中に行われたこれらの観測は、ILAS観測と同じUT日にILAS観測点からおよそ1000 km以内の地点でNO_2の鉛直分布を得た。各高度のPV値が、ILASの空気塊のPV値と10%以内で一致したデータを比較に用いる。日没と日の出を区別してILAS観測と同じSZAの条件で比較するために、MIPAS-B2とMkIVの鉛直分布をモデル計算によって補正する。

極成層圏雲(PSC)の表面上での不均一反応はNO_2をHNO_3に変換し、NO_2濃度を下げる。ILASと気球観測でサンプルされたいくつかの空気塊では、気温が硝酸三水和物の生成温度（T_{NAT}）以下であった。不均一反応の影響はこれらの空気塊がT_{NAT}以下に冷却された時間で評価した。ヨーロッパ中期予報センター(ECMWF)の風と温度場を用いて、ILASと気球観測によって測定された空気塊について10日間の等温位面の後方流跡線を計算した。T_{NAT}はHanson and Mauersberger [1988]の方法で計算された。

2月24日のSAOZを除く全ての比較において、気球とILASが観測した空気塊がT_{NAT}以下に冷却された時間は0-1日と短かった。2月24日に高度16-24 kmでILASが観測した空気塊と高度15-23 kmでSAOZが観測した空気塊は共に過去10日間の内に43時間T_{NAT}以下の低温を経験した。PSC上の不均一反応によるNO_2濃度の低下はILASとSAOZが観測した空気塊で同程度であると考えられる。したがって、PSC上の不均一反応の補正を行わずにILASと気球のNO_2の比較を全て行う。

比較に用いられるILASのNO_2の値は気球観測が行われた高度と一致する温位面に線形内挿された。この計算には英国気象局(UKMO)の気圧と気温を用いた。

5.3.2 気球によるNO_2鉛直分布観測

LPMA

Laboratoire de Physique Moleculaire et Applicationsで開発されたLPMA測定器は、太陽掩蔽法で得られたスペクトルから様々な気体の鉛直分布の測定が可能なフーリエ変換型赤外分光計（FTIR）である [Camy-Peyret, 1995] 。LPMAによるNO_2の鉛直分布の観測は1997年2月26日の日没時（SZAが約90°）にスウェーデンのキルナ付近で実施された。飛行中に記録された170個のスペクトルは十分なNO_2分子の吸収を示し、2914.6 cm^{-1}付近のマイクロウィンドウで正確な導出を行うことが可能である。Levenberg-Marquardtタイプの最小化アルゴリズムを伴ったグローバルフィット・アルゴリズムによって、掩蔽スペクトルからNO_2の鉛直分布を導出できる [Payan *et al.*, 1998] 。鉛直分解能は測定器の瞬時視野（4 mrad）によって決定され、20-25 kmの接線高度では1.5 kmであった。高度20-30 kmのNO_2観測の精度は約10%であった。

SAOZ

SAOZ ゾンデは、オゾンと NO_2 の全カラムをモニタリングするために設計された地上観測用の SAOZ から改良された UV-可視のダイオードアレイ分光計である [Pommereau and Goutail, 1988] 。SAOZ による NO_2 の鉛直分布の観測は日没時（SZA が約 90°）にスウェーデンのキルナで 1997 年 2 月 24 日と 3 月 20 日に実施された。NO_2 は、 Vandaele *et al.* [1998] によって求められた 220 K の吸収断面積を用いて、410-530 nm の広いスペクトル領域を分光して測定された。信頼できる観測は直接光が散乱光より支配的な高度に限られる。一般には、気球の上昇時には雲の上端より上であり、掩蔽観測時には約 10 km 以上である。濃度の鉛直分布は Linear Tangent Ray Inversion Technique（オニオン・ピーリング）によって導出された。平均で、NO_2 の不確かさ（最小自乗スペクトルフィッティングや温度依存性を含んだ吸収断面積の確かさから生じるランダム誤差）は高度 25-30 km で 5%であった。その誤差は高度 15 km で 10%、最も低い高度（10-12 km）で 20%に増加する。鉛直分解能の平均は 1.2 km である。気圧、気温、高度、位置はそれぞれ 1 hPa、0.5 K、100 m、100 m の精度で測定された。

MIPAS-B2

MIPAS-B2 測定器は大気周縁部からの熱放射を測定する cryogenic FTIR である。MIPAS-B2 による NO_2 の鉛直分布の観測は 1997 年 3 月 24 日の夜間（高度 20 km で SZA が約 105°）に実施された。NO_2 は 1585-1615 cm^{-1} の ν_3 バンドを用いて測定された。NO_2 混合比の鉛直分布はオニオン・ピーリング法と多変数非線型最小二乗フィッティング法によって導出された。鉛直分解能は 3 km よりも高い [Wetzel *et al.*, 1997] 。ランダム及び系統誤差は測定の相互相関とヤコビアン行列を用いて評価された [von Clarmann *et al.*, 1997] 。高度 20-30 km の NO_2 観測の誤差はおよそ 10-30%であった。

中層大気 Karlsruhe シミュレーションモデル（KASIMA） [Ruhnke *et al.*, 1999] を用いて、夜間の NO_2 値を日没時の値に変換した。このモデルの化学モジュールは 58 種の化学物質から構成されている。化学反応モジュールには 101 個の気相反応、39 個の光解離反応、10 個の不均一反応が含まれている。

MkIV

太陽掩蔽 FTIR である MkIV は、広範囲の波長域（650-5650 cm^{-1}）における高い SN 比のスペクトルを用いて、様々な化学成分の濃度を同時に測定する [Toon, 1991; Sen *et al.*, 1998] 。MkIV による NO_2 の鉛直分布の観測はアラスカのフェアバンクスで 1997 年 5 月 8 日の日の出時（SZA が約 90°）に実施された。この日の北半球の ILAS 観測は日没時に行われた。異なった接線高度で観測された一連のスペクトルから化学成分の鉛直分布が導出された。鉛直方向のスペクトルのサンプリングは 1 km 毎であるが、観測の鉛直分解能は約 2 km であった。これは 4 mrad の視野と大気の曲率による。分光パラメータの不確定性から生じる系

統誤差は10%以下である。

日の出時のNO_2値を日没時の値に変換するために、光化学ボックスモデル [Osterman *et al.*, 1999] を用いた。MkIV 観測の緯度と気温で、日変化を考慮し、24 時間の各成分の生成と損失の速度の平衡を仮定して、ラジカル(例えば NO, NO_2 等)とリザーバー(例えば HNO_3, N_2O_5 等) の気体の量を計算した。反応速度と吸収断面積は HNO_3 + OH の反応を除いて JPL 97-4 compendium [DeMore *et al.*, 1997]の値が採用された。HNO_3 + OH の反応速度は [Brown *et al.*, 1999] を用いた。

5.3.3 NO_2 の差

ILAS と気球観測の NO_2 鉛直分布を図 5.1～図 5.5 に示す。各々の図において、右側のパネルは ILAS によって NO_2 と同時に測定された波長 780 nm のエアロゾル消散係数の鉛直分布を示す。左のパネルでは NO_2 の鉛直分布が比較されている。MIPAS-B2 や MkIV との比較では、モデルで SZA に関する NO_2 の補正を行った鉛直分布を “sunset”、行わなかったものを “original” と記している。

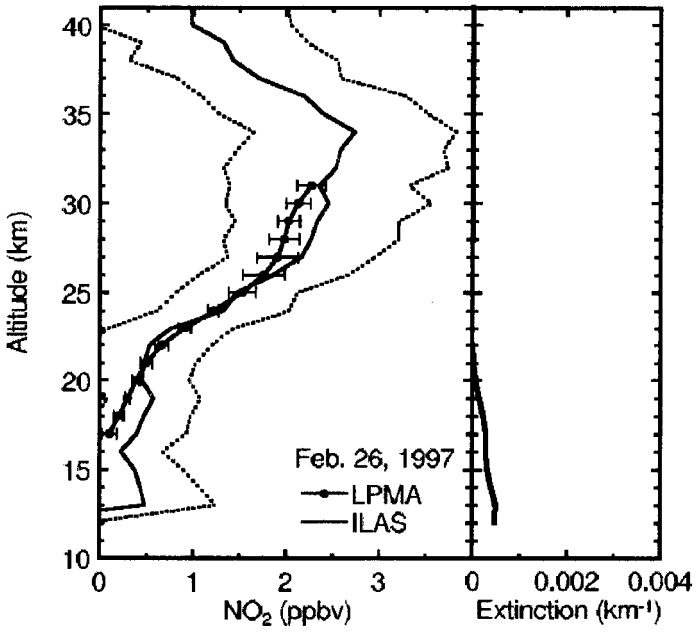


図 5.1　ILAS と LPMA による NO_2 観測の比較（1997 年 2 月 26 日）
(左側パネル)
実線：ILAS の NO_2 の鉛直分布
破線：ILAS による NO_2 観測の誤差
点付き実線：気球観測による日没時の NO_2 の鉛直分布
点付き実線のエラーバー：気球観測による NO_2 の誤差
(右側パネル)
ILAS の波長 780 nm のエアロゾル消散係数の鉛直分布

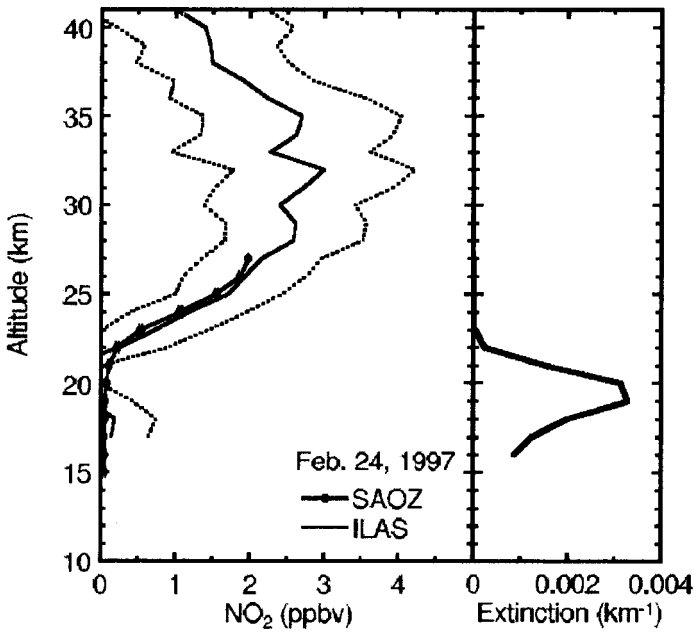


図 5.2　ILAS と SAOZ による NO_2 観測の比較（1997 年 2 月 24 日）
図の説明については図 5.1 と同様

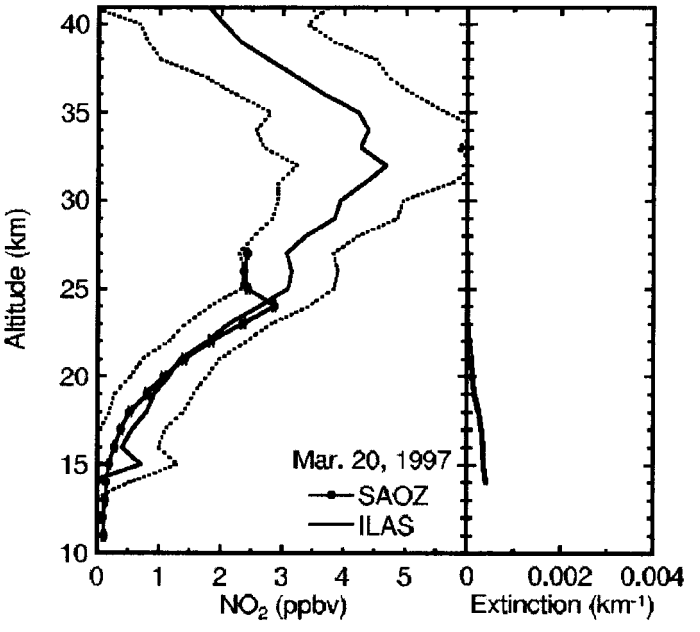


図 5.3　ILAS と SAOZ による NO_2 観測の比較（1997 年 3 月 20 日）
図の説明については図 5.1 と同様

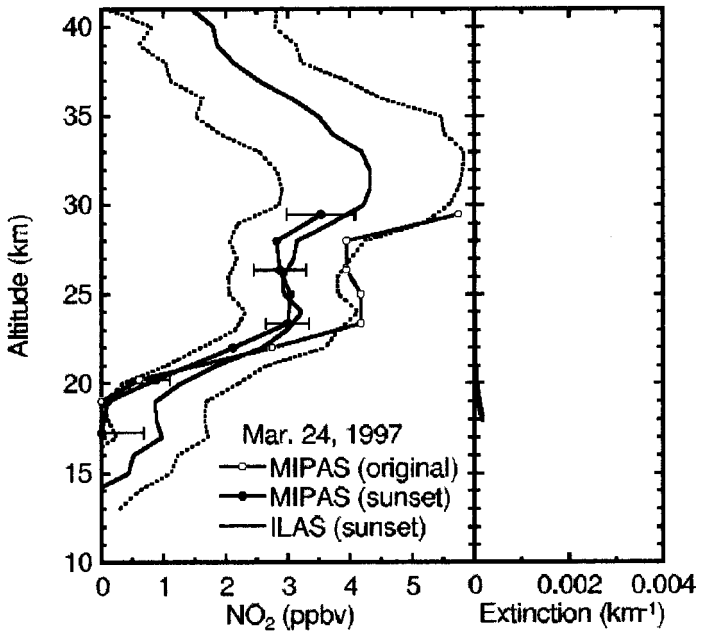


図 5.4　ILAS と MIPAS-B2 による NO_2 観測の比較（1997 年 3 月 24 日）

図の説明については図 5.1 と同様

参考として、気球観測によるオリジナルの鉛直分布（SZA が約 105°）が示されている。

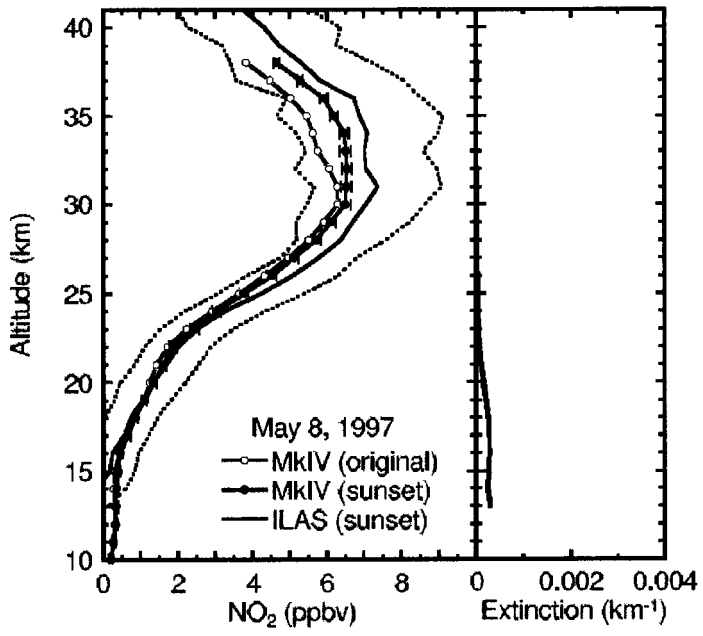


図 5.5　ILAS と MkIV による NO_2 観測の比較（1997 年 5 月 8 日）

図の説明については図 5.1 と同様

参考として、気球観測によるオリジナルの鉛直分布（日の出時で SZA が約 90°）が示されている。

前述したように、比較はPV値の基準を満たした高度についてのみ行われた。比較に用いた高度は表5.2にまとめられている。表5.2にはILASと気球のNO_2の差が0.5 ppbv以上であった高度も示されている。0.5 ppbvは冬季のILASのNO_2濃度を導出する際に生じ得る誤差に相当する。

表5.2　比較に使われた高度とNO_2の差が0.5ppbv以上の高度

Experiment	Date	Altitudes for comparison	NO_2 difference > 0.5ppbv
LPMA	Feb.26	17-19 km (boundary) 24-31 km (inside)	—
SAOZ	Feb.24	16-27 km (inside)	19-21 km (ILAS low)
SAOZ	Mar.20	14-26 km (boundary)	25-26 km (ILAS high)
MIPA-B2	Mar.24	18-29 km (inside)	18-20 km (ILAS high)
MkIV	May 8	16-38 km (outside)	25-37 km (ILAS high)

比較には PV 差が 10%以内の高度を用いた。極渦の境界域、内側、外側の観測はそれぞれ、"boundary"、"inside"、"outside" と記されている。

高度18-37 kmでILASが測定したNO_2混合比は、気球観測のNO_2よりも0.5-0.8 ppbv大きかった（表5.2）。しかしながら、2月24日の高度19-21 kmにおけるILAS NO_2の値は負であり（図5.2）、SAOZの値よりも小さかった（表5.2）。

ILASのエアロゾル消散係数は光学的に厚い雲（おそらくPSC粒子）が高度19-20 kmを中心として16-25 kmに存在していたことを示した。実際、光学的に厚い雲はILASのNO_2の値を明らかに減少させそうである。この件は技術資料第2章でYokota *et al.*によって述べられている。NO_2の減少は高度19-21 kmで顕著であり（表5.2）、その高度のエアロゾル消散係数は0.001 km^{-1}よりも大きかった。

5.4　衛星観測との比較

5.4.1　アプローチ

ILAS NO_2観測は太陽掩蔽法を用いた2つの人工衛星観測と比較される：

1) POAM II　南北両半球の11月1-13日
2) HALOE　南半球の11月24日、12月15-16日、2月18-19日、北半球の3月25-31日、6月16-17日

各々の期間にPOAM IIとHALOEは、ILAS観測点から水平距離で1000 km以内、緯度で1°以内の場所で観測を行った。

冬季と春先の各高度のNO_2データは極渦の内側・極渦の境界域・極渦の外側に分類される。この分類はUKMOデータが利用可能である40 km以下の高度のデータについて行われた。期間毎に同じ渦の条件で観測されたILAS、POAM II、HALOEのNO_2混合比の中央値の鉛直分布を比較する。

5.4.2 人工衛星による NO_2 鉛直分布観測

POAM II

POAM II は 1993 年 9 月 26 日にフランスの人工衛星 SPOT-3 に搭載され、98.7° の傾斜角を持った軌道に打ち上げられた。POAM II は太陽掩蔽法を用いて、353-1060 nm の間にある 9 つのチャンネルで 1996 年 11 月中旬まで観測を行った。NO_2 は 442 と 448 nm の信号の差から導出される。導出高度は~20 km から 40 km である。ILAS の NO_2 の鉛直分布は南北両半球で 11 月 1-13 日に POAM II (Version 6) によって得られた鉛直分布と比較される (表 5.3)。

表 5.3　ILAS と POAM II の比較で用いられた期間、緯度、データ数(N)

Time Period	Latitude (ILAS)	Latitude (POAM II)	N (ILAS)	N (POAM II)
Nov.1-13	70.2° – 67.9° N	69.2° – 67.3° N	154	122
Nov.1-13 (outside)	74.8° – 70.0° S	74.1° – 70.0° S	16-87*	11-60*
Nov.1-13 (boundary)	74.8° – 70.0° S	74.1° – 70.0° S	11-37*	8-27*
Nov.1-13 (inside)	74.8° – 70.0° S	74.1° – 70.0° S	34-111*	15-60*

極渦の境界域、内側、外側の観測はそれぞれ、"boundary"、"inside"、"outside" と記されている。
*各高度の極渦の条件によってデータ数は高度に依存する。

HALOE

HALOE は 1991 年 9 月 12 日に人工衛星 UARS に搭載されて打ち上げられた。HALOE の定常観測は 1991 年 10 月 11 日に開始した。太陽掩蔽法を用いて NO_2 や他の化学成分の鉛直分布が測定された。各半球で日毎に 15 個の鉛直分布が得られた。ILAS NO_2 の鉛直分布は次の 5 つの期間に HALOE (Version 19) によって測定された鉛直分布と比較される (表 5.4)：

1) 11 月 24 日 (南半球)
2) 12 月 15-16 日 (南半球)
3) 2 月 18-19 日 (南半球)
4) 3 月 25-31 日 (北半球)
5) 6 月 16-17 日 (北半球)

表 5.4　ILAS と HALOE の比較で用いられた期間、緯度、データ数(N)

Time Period	Latitude (ILAS)	Latitude (HALOE)	N (ILAS)	N (HALOE)
Nov.24	67.9° – 68.0° S	68.4° – 68.9° S	7	11
Dec.15-16	64.4° – 64.6° S	63.9° – 65.5° S	16	18
Feb.18-19	75.0° – 75.8° S	74.6° – 76.1° S	24	18
Mar.25-31 (40-50 km)	68.1° – 68.8° N	67.2° – 69.1° N	92	90
Mar.25-31 (outside)	68.1° – 68.8° N	67.2° – 69.1° N	14-27*	14-29*
Mar.25-31 (boundary)	68.1° – 68.8° N	67.2° – 69.1° N	7-32*	6-33*
Mar.25-31 (inside)	68.1° – 68.8° N	67.2° – 69.1° N	19-73*	28-89*
June 16-17	56.9° – 57.0° N	56.1° – 57.7° N	23	11

極渦の境界域、内側、外側の観測はそれぞれ、"boundary"、"inside"、"outside" と記されている。
*各高度の極渦の条件によってデータ数は高度に依存する。

5.4.3 NO_2の差

図5.6と図5.7はILASとPOAMⅡ（11月1-13日の北半球）、HALOE（6月16-17日の北半球）のNO_2の中央値の代表的な比較を示す。表5.5はILASとPOAMⅡのNO_2の差が0.5ppbv以上の高度を示す。高度32 km以下のILASのNO_2混合比はPOAMⅡのNO_2より0.5ppbv以上大きかった。一方、高度36 km以上のILASのNO_2混合比はPOAMⅡのNO_2より0.5ppbv以上小さかった。

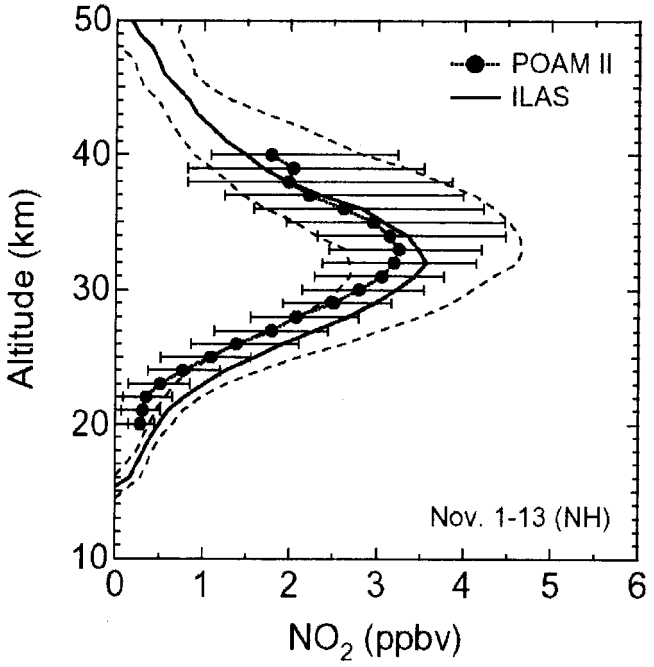


図5.6　ILASとPOAMⅡによるNO_2観測の比較（11月1日～11月13日　北半球）
実線：ILASのNO_2データの中央値
破線：ILASのNO_2データの67%中央値
点線（黒丸点付き）：POAMⅡのNO_2データの中央値
エラーバー：POAMⅡのNO_2データの67%中央値

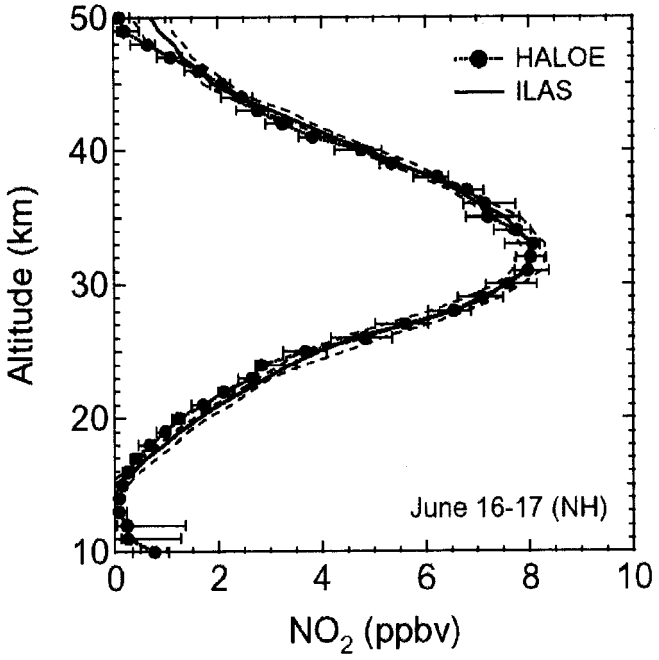


図 5.7　ILAS と HALOE の NO_2 観測データの比較（6 月 16 日～6 月 17 日　北半球）
図の説明については図 5.6 と同様

表 5.5　POAM II 観測から系統的な差（>0.5 ppbv）が見られた高度

Period	ILAS > POAM II	ILAS < POAM II
Nov.1-13 (NH)	23, 25-26, and 28 km	—
No.1-13 (SH, outside)	20-29 and 31 km	—
Nov.1-13 (SH, boundary)	20, 23-26, 28-29, and 31-32 km	38 km
Nov.1-13 (SH, inside)	21-22 km	36-37 km

表 5.6 は ILAS と HALOE の NO_2 の差が 0.5 ppbv 以上の高度を示す。高度 37 km 以上の ILAS の NO_2 混合比は HALOE の NO_2 よりも 0.5 ppbv 以上大きかった。一方、13 km 以下と 29-31 km の高度の ILAS NO_2 の混合比は HALOE NO_2 より 0.5 ppbv 以上小さかった。高度 14-26 km では、ILAS の NO_2 データが HALOE のデータよりも 0.5 ppbv 以上大きい、或いは小さい場合があった。

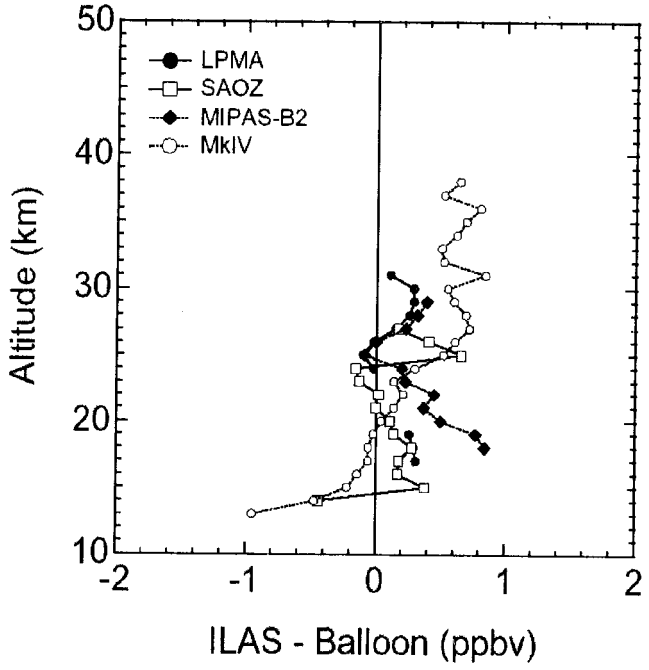
表 5.6　HALOE 観測から系統的な差（>0.5 ppbv）が見られた高度

Period	ILAS > HALOE	ILAS < HALOE
Nov.24 (SH)	39-41 km	10-14, 19, 24-25, and 29-30 km
Dec.15-16 (SH)	16-17, 37-38, 41-43, and 48-50 km	10-12 and 30-31 km
Feb.18-19 (SH)	14-19, 21, 23-26, 40-43, and 47-50 km	10-11 km
Mar.25-31 (NH, 40-50 km)	—	—
Mar.25-31 (NH, outside)	20 and 24 km	31 km
Mar.25-31 (NH, boundary)	—	—
Mar.25-31 (NH, inside)	—	12 km
June 16-17 (NH)	24 and 48-50 km	11-14 km

5.5 議論

気球や衛星観測との比較から計算されたNO_2の差の高度分布を図5.8と図5.9にそれぞれ示す。表5.7には5 km層毎にILASと各観測が測定したNO_2混合比のパーセンテージ差を示す。ILASとSAOZ、POAMⅡ、HALOEとの各高度でのNO_2の差はセンサーごとの平均値である。SAOZが2月24日に高度16-24 kmで得たデータとの比較は、既に述べたとおり、光学的に厚い雲の影響があるために除外された。高度40 km以下では、極渦に関して分類された値、すなわち極渦の外側、極渦の境界域、極渦の内側の鉛直分布との差が用いられた。

図5.8a ILASと気球観測によるNO_2混合比の差の鉛直分布（絶対誤差）
黒丸付き実線：ILASとLPMAの差
四角付き実線：ILASとSAOZの差



菱形付き点線：ILASとMIPAS-B2の差
白丸付き実線：ILASとMkIVの差

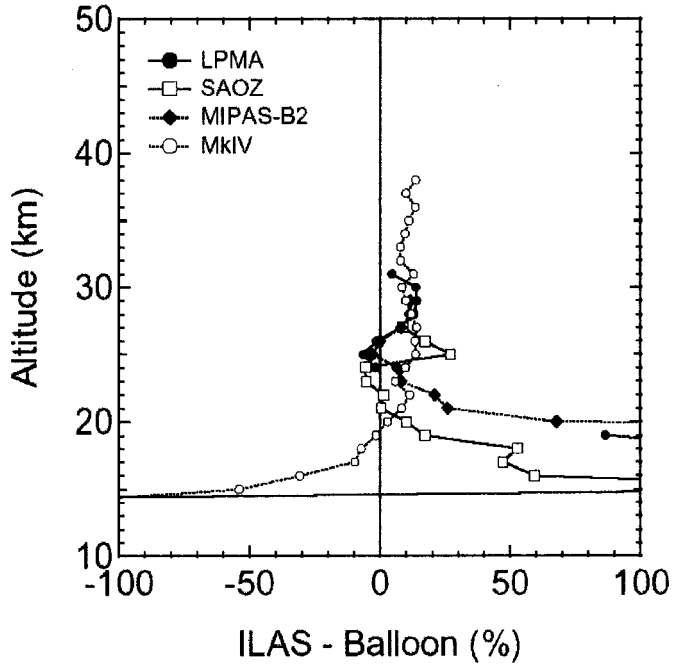


図 5.8b　ILAS と気球観測による NO_2 混合比の差の鉛直分布（相対誤差）
図の説明については図 5.8a と同様

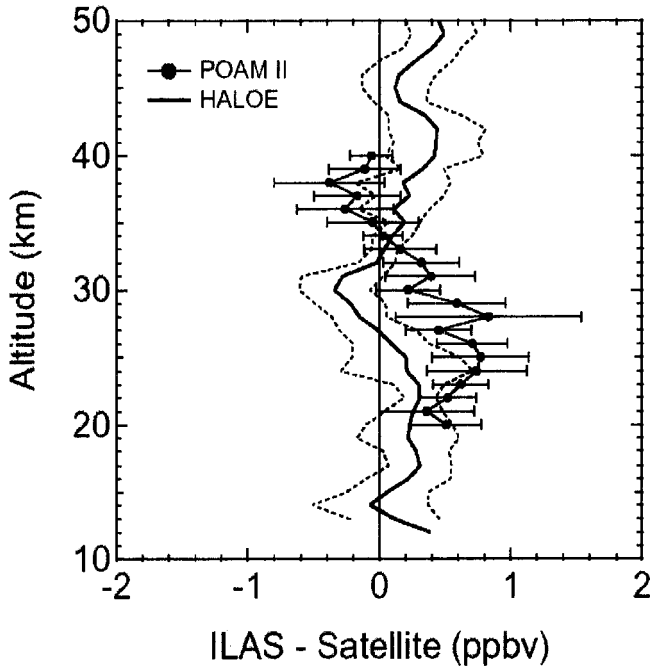


図 5.9a　ILAS と POAMⅡ、HALOE による NO_2 混合比の差の鉛直分布（絶対誤差）
バー：ILAS と POAMⅡデータの差の標準偏差（1σ）
破線：ILAS と HALOE データの差の標準偏差（1σ）

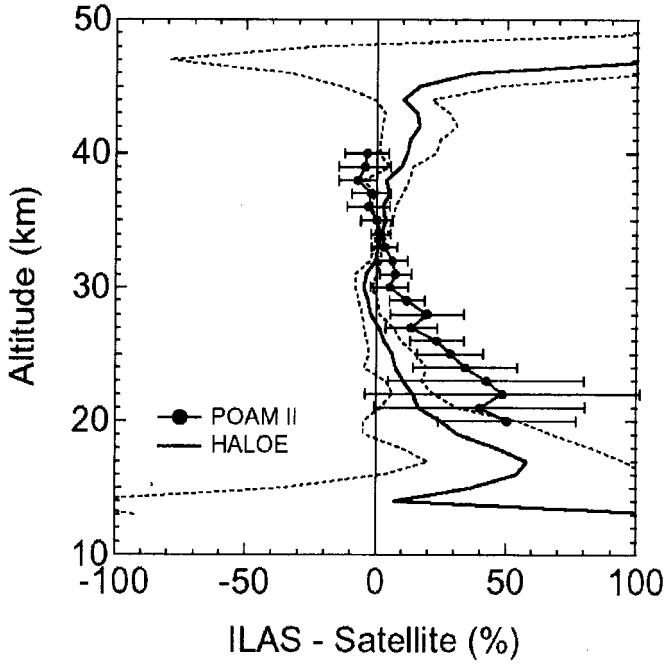


図 5.9b　ILAS と POAM II、HALOE による NO_2 混合比の差の鉛直分布（相対誤差）
図の説明については図 5.9a と同様

表 5.7　ILAS と検証観測の NO_2 混合比のパーセント差（平均値±標準偏差）

Experiment	15 km	20 km	25 km	30 km	35 km	40 km	45 km
LPMA	・・・	155±40	0±6	11±5	・・・	・・・	・・・
SAOZ	1±214	16±21	8±14	・・・	・・・	・・・	・・・
MIPAS-B2	・・・	520±742	4±5	12±0	・・・	・・・	・・・
MkIV	-99±107	3±7	11±4	10±2	10±2	・・・	・・・
POAM II	・・・	・・・	28±21	10±9	0±6	・・・	・・・
HALOE	45±290	27±28	6±9	-3±3	3±4	10±10	39±94

表 5.8 は ILAS と気球観測の系統的な差とランダムな差を示す。これらの系統的な差とランダムな差は、2 月 24 日の SAOZ の 16～24 km データとの比較を除く全ての気球観測の NO_2 との比較から計算された平均と標準偏差である。

表 5.8　ILAS と気球観測の NO_2 の系統的な差とランダムな差

	20 km	25 km	30 km
Systematic difference			
Percent	172	6	11
Ppbv	0.26	0.25	0.44
Random difference			
Parcent	439	9	3
ppbv	0.26	0.32	0.22

NO_2のランダムな差は高度 25 km で 0.32 ppbv（9%）、高度 30 km で 0.22 ppbv（3%）であると見積もられた（表 5.8、図 5.8）。NO_2の系統的な差（ILAS－気球）は高度 25 km で 0.25ppbv（6%）、高度 30 km で 0.44 ppbv（11%）であると見積もられた。

NO_2濃度は SZA の変化によって掩蔽観測の視線方向に沿って変化する。 Sen *et al.* [1998] は中緯度の日没時に行われた MkIV の NO_2 データを用いて、日変化の補正を行った場合と行わなかった場合の NO_2 の鉛直分布を比較した。補正を行わなかった NO_2 混合比は、高度 20 km において、補正を行った混合比より約 10%大きくなり、高度が高くなるにつれてその差が小さくなった。視線方向に沿った日変化の補正は ILAS の NO_2 では行われていない。一方、HALOE の NO_2 は日変化の補正が行われている。高度 20-25 km の ILAS の NO_2 は HALOE より 6-27%大きく、高度が高くなるにつれてその差は小さくなっていた（表 5.7、図 5.9b）。この結果は、NO_2 の日変化の未補正が高度 25 km 以下の ILAS NO_2 の正のバイアスを生じさせる原因の一部になっていることを示している。

高度 25 km と 30 km の ILAS と気球観測とのランダムな差は小さく、3-9%であった（表 5.8）。さらに、高度 25-40 km の ILAS の NO_2 は HALOE のデータと 10%以内で一致した（表 5.7）。日変化の未補正は高度 25 km 以上の ILAS NO_2 観測に顕著な影響を与えないと考えられる。

高度 20 km における ILAS と気球観測のランダムな差の絶対値は 0.3 ppbv と小さいが（表 5.8、図 5.8a）、パーセンテージ差は 400%と大きい（表 5.8、図 5.8a）。高度 20 km で SAOZ と MkIV が測定した NO_2 混合比と ILAS の NO_2 混合比の一致は、LPMA や MIPAS-B2 のそれよりも良い（表 5.7）。SAOZ と MkIV によって測定された NO_2 は 1 ppbv より大きく（図 5.3、図 5.5）、それに対して LPMA と MIPAS-B2 の値は 1 ppbv より小さい（図 5.1、図 5.4）。一方、NO_2 濃度がしばしば 1-2ppbv より低くなる高度 45 km で HALOE との一致は高度 25-40 km よりも悪い。高度 45 km において、ILAS と HALOE の差の標準偏差は 100%と大きい（表 5.7）。したがって、高度 20 km 以下と 45 km 以上の ILAS の NO_2 は低濃度の NO_2 (<1.0 ppvb) によってデータの質が低下したと考えられる。

高度 30-35 km の POAM II との一致は 10%以内であり、高度が低くなるにつれて差が大きくなる（表 5.7、図 5.9）。高度 25 km の ILAS の NO_2 は POAM II より系統的に 30%大きい。

5.6 まとめ

ILAS の NO_2 混合比は気球観測（LPMA、SAOZ、MIPAS-B2、MkIV）と衛星観測（POAM II、HALOE）の NO_2 と比較された。比較の結果は表 5.7、表 5.8 にまとめられている。ILAS の NO_2 と、気球観測、POAM II、HALOE のデータとの最も良い一致は高度 25-35 km で得られた。この高度で、気球観測や HALOE のデータは ILAS データと約 10%以内で一致した。POAM II データとの一致は高度 25 km で約 30%だった。

高度 20-25 km の ILAS の NO_2 混合比は HALOE データより 6-27%大きく、NO_2 濃度が低

い低高度では差が大きくなる傾向が見られた。高度 20 km で、ILAS と気球観測の NO_2 との系統的な差は大きく、170%であった。ILAS と HALOE の観測値の差は高度 45 km で 40%に達し、その高度の NO_2 混合比は高度 25-35 km よりも低かった。

ILAS の NO_2 データを用いた成層圏化学の研究では以下の影響に注意する必要がある。

(1) 780 nm のエアロゾル消散係数が 0.001 km^{-1} より大きい光学的に厚い PSC の干渉によって ILAS の NO_2 データに負のバイアスが生じる。

(2) 日変化の未補正は高度 25 km 以下の ILAS の NO_2 に正のバイアスをもたらす。

ILAS の Version 5.20 HNO_3 は高度 20-35 km で気球による HNO_3 観測と非常に良く一致した（系統的な差 $<\pm 0.1$ ppbv）。これは、Version 5.20 のアルゴリズムで導出された ILAS データのこの高度領域の高度決定は僅かな誤差しか持たないということを示す。

Appendix.　ILAS Version 5.20 HNO_3 データの検証

ILAS の Version 5.20 の HNO_3 データの質を、 Koike *et al.* [2000] による Version 3.10 ILAS データで行われた同じ方法を用いてここで評価する。ILAS との比較で用いられる気球による HNO_3 観測は、化学蛍光検出器、冷大気放射スペクトル放射計、LPMA、MIPAS-B2、遠赤外線分光計、MkIVである。高度 12 km では、Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt Falcon 航空機によって観測された HNO_3 データも使用する。使用する ILAS HNO_3 データは、気球による観測地点から最も近い場所で得られた。HNO_3 の系統的な差（ILAS－気球）は、version 3.10 の ILAS データについて、高度 15-25 km で±15%、高度 30 km で-10%、高度 35 km で-19%であった。ランダムな差は高度 15 km で 35%、高度 20-25 km で 10%、高度 30-35 km で 14-34%であった。HNO_3 の系統的な差の高度分布（図 5.10）は、Version 3.10 の ILAS データのアルゴリズムで生じた高度決定のエラーによって引き起こされた [Koike *et al.*, 2000] 。ILAS の Version 3.10 の O_3 データの解析も同じ傾向を示した。 [Sasano *et al.*, 1996b] 。

図 5.10 は Version 5.20 の HNO_3 データと気球観測による HNO_3 データとの比較の結果を示している。ILAS Version 5.20 HNO_3 データは高度 20-35 km の範囲で気球観測による HNO_3 と非常に良く一致した（系統差<±0.1 ppbv）（図 5.10）。高度 15 km の ILAS の HNO_3 には約 0.5 ppbv の正のバイアスがある。系統的な差は高度 15 km で 13%、高度 20-25 km で 0-1%、高度 30 km で 4%、高度 35 km で 25%であった。ランダムな差については Version 3.10 から 5.20 を通じて変わらなかった。系統的な差の高度変化の大部分は消えた（図 5.10）。これは、高度決定のエラーが、特に高度 20-25 km において小さくなったことを示している。

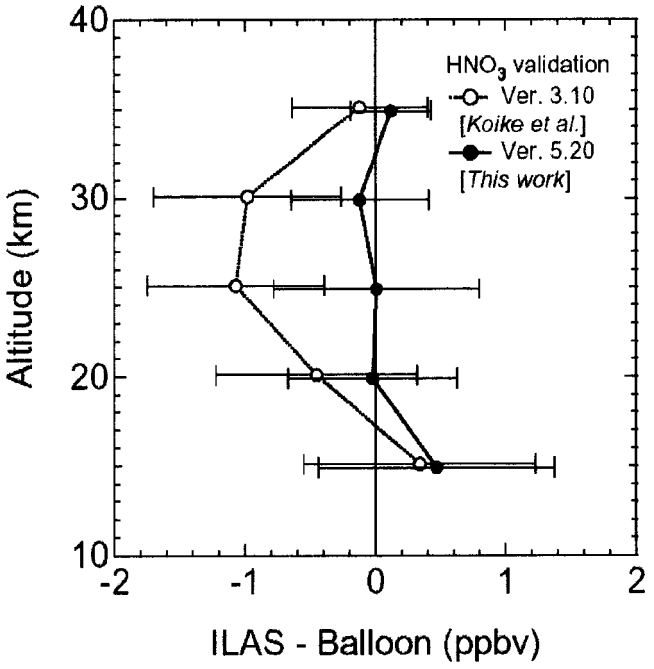


図 5.10　ILAS（Version 3.10, Version 5.20）と気球搭載センサーによる HNO_3 混合比の系統的な差

バー：ILAS と気球観測による HNO_3 混合比のランダムな差

6．改良型大気周縁赤外分光計（ILAS）Version 5.20による亜酸化窒素とメタンプロファイルの検証とデータ特性

要旨

衛星ADEOS（Advanced Earth Observing Satellite）に搭載した太陽掩蔽法センサーILAS（改良型大気周縁赤外分光計）によって高緯度域（北緯57～72度、南緯64～89度）の亜鉛化窒素（N_2O）、メタン（CH_4）の鉛直分布を1996年11月～1997年6月にかけて連続測定し、また、1996年9月～10月にも付加的測定した。本論文にはVersion 5.20 ILASリトリーバル・アルゴリズムを用いて処理したN_2O、CH_4データの検証結果を示した。比較検証は、

（ｉ）北極域のスウェーデンのKirunaおよびアラスカのFairbanksで実施したILAS検証気球キャンペーンで得られたN_2O、CH_4

（ii）北極域で実施されたPOLARIS (Photochemistry of Ozone Loss in the Arctic Region in Summer)航空機観測キャンペーンで得られたN_2O、CH_4

（iii）北極域での地上分光観測および航空機によるリモートセンシングで得られたN_2O

（iv）衛星センサーHALOE（Halogen Occultation Experiment）で測定された北極域および南極域における Version 19のCH_4

を用いて行った。また、ILASのN_2O、CH_4とUARS（Upper Atmosphere Research Satelite）参照大気データとの比較も行った。これらの比較結果およびILASの内的整合性を解析した結果は以下の通りである：

（ｉ）ILASのN_2Oの不確かさは、高度10～30 kmでは10%未満、高度30～40 kmでは50%より大きい。これはILAS測定において予想された全誤差 (total error) に匹敵する値である。

（ii）ILASのCH_4の不確かさは、正のバイアスが20%を越える冬季の高度15～30 kmを除けば、高度10～50 kmで10%未満である。これはILAS測定において予想された全誤差より小さいか、あるいは匹敵する値である。

要約すれば、高度10～40 kmにおけるILAS Version 5.20のN_2Oと、冬季の高度15～30 kmを除く高度10～50 kmのCH_4のデータ質は、極域成層圏の現象に関する研究のような多くの科学的研究目的にかなうものである。

6.1 はじめに

亜酸化窒素（一酸化二窒素）（N_2O）とメタン（CH_4）はともに対流圏起源の長寿命トレーサー物質である。これらの微量ガスは地上に発生源を持ち、自然起源のものと人工起源のものがある（たとえばIPCC, 2001）。これらは対流圏内で空間的によく混合され、主に赤道付近の対流圏界面を通って成層圏に入り込み、上方および極方向に輸送される。成層圏では、酸化および／または光解離により破壊されるため、これらの鉛直プロファイルを見ると混合比は高度とともに減少する。さらに、これらのガスの光化学的寿命は、下部成層圏においては力学的時間スケールよりかなり長い。このように長寿命で鉛直方向に成層しているガスは、それゆえ、力学過程の優れたトレーサーの役割を果たす。たとえば、N_2Oは Mahlman *et al.* [1986] 以来、大循環モデルにおけるトレーサー輸送のモデル診断に

有効に用いられ、衛星センサーによるCH_4データは Schoeberl *et al.* [1996] によって南極の極渦中での下降速度を定量化するのに用いられた。「放射」の面では、N_2O、CH_4は温室効果ガスであり[たとえばIPCC, 2001]、「化学」の面では、N_2O はNO_xの源として、CH_4はH_2O および結果的にはHO_xの源として、オゾンに関連する化学反応に密接に関連している（例：WMO, 1999）。したがって、成層圏におけるN_2O、CH_4の分布は、放射、化学、力学の相互作用によって決まっている。N_2O、CH_4の力学的、および化学的な見方は、Andrews *et al.* [1987] やBrasseur *et al.* [1999] にそれぞれ詳しく記述されている。

N_2OやCH_4の衛星観測は、それらの成層圏における分布を評価するための有用なデータセットを提供してくれる。成層圏におけるN_2O、CH_4の全球分布を最初にもたらしたのは、Nimbus 7 に搭載されたSAMS（Stratospheric and Mesospheric Sounder）（例：Jones and Pyle, 1984; Jones *et al., 1986*）で、その結果は Andrews *et al.* [1987] に簡潔にレビューされている。UARS（Upper Atmosphere Research Sattelite）に搭載のCLAES（Cryogenic Limb Array Etalon Spectrometer）も他のガスとともにN_2O、CH_4のデータセットを提供した（例：Roche *et al.*, 1996）。同じくUARS 搭載のHALOE（Halogen Occultation Experiment）もCH_4の測定値を提供し続けている（例：Park *et al.*, 1996）。同じくUARS搭載のISAMS（Improved Stratosphere and Mesosphere Sounder）も他のガス種と同様にN_2O、CH_4を測定しているが、観測期間が短く、高度範囲も7 hPa以上に限られている（例：Remedios *et al.*, 1996）ため、本論文での比較には、CLAESとHALOEのデータを用いる。

太陽掩蔽法を利用したセンサーであるILAS（Improved Limb Atmospheric Spectrometer）は日本の環境庁（EA）（環境省（MOE）として再編された）により開発され、宇宙開発事業団（NASDA）の地球観測プラットフォーム技術衛星（ADEOS）に搭載、運用された（例：Sasano *et al.*, 1999）。ILASは、オゾン（O_3）、硝酸（HNO_3）、二酸化窒素（NO_2）、水蒸気（H_2O）およびエアロゾルの測定とともに亜酸化窒素（N_2O）およびメタン（CH_4）の測定を行った。ILASは1996年11月～1997年6月の間運用され、1996年9月、10月のデータも付加的に利用できる。

本論文ではILAS Version 5.20によるN_2O、CH_4のプロファイルを検証し、気球、航空機、地上、衛星をプラットフォームとする観測値との比較に基づいてILASデータの特徴を記述することを目的とする。N_2O、CH_4についてのこの論文のコンセプトと構造は、水蒸気の検証についての姉妹論文[Kanzawa *et al.*, 本技術資料 第7章]と同様で、そちらに詳述したいくつかの内容については、ここでは簡単な記述にとどめた。本冊子のその他の姉妹論文として、Sugita *et al.*がオゾン（O_3）の検証、Irie *et al.*が二酸化窒素（NO_2）と硝酸（HNO_3）の検証、Saitoh *et al* [2002] がエアロゾル消散係数の検証について論じている。

第2節ではILAS測定およびそのデータ処理アルゴリズム（Version 5.20）の概要を示す。これらは Yokota *et al.* [本技術資料] Nakajima *et al.*に詳しい。第3節では、ILAS N_2O、CH_4の総合的な特徴を記述し、第4節ではILASによるN_2O、CH_4データの検証に用いた方法について述べる。第5節では、北極地方で行った気球による測定値を用いた検証解析結果を示し、ILASに基づくN_2O vs CH_4の相関プロットを気球測定値や他のデータソースによるものと比較することにより、ILASの内的整合性をチェックする。第6節では、N_2O、CH_4の航空機によるその場 (in situ) 観測値による検証、地上設置センサーおよび航空機リモートセンシングによるN_2Oの検証を示す。これらのデータはすべて北極域で得られたものである。第7節

では、北極域と南極域におけるILAS測定と対応するHALOE（ILASと同じく太陽掩蔽法を採用しているセンサー）とのCH4プロファイルの比較を行った。第8節では、ILASのN2O、CH4から求めた月平均値の空間的変化をUARS参照大気から求めたそれと比較する。第9節では比較結果をまとめ、結論を導き出す。

6.2 ILAS測定、データ処理アルゴリズム、誤差収支の概要

6.2.1 測定

この論文の目的であるN2O、CH4の検証のために、ILAS測定の特徴について簡単にレビューする。ILASは太陽掩蔽法センサーで、2つの回折格子分光計とサンエッジセンサーからなる。赤外分光計は6.21～11.77 μmをカバーし、44素子焦電型アレイ検出器を採用し、可視分光計は0.753～0.783 μmをカバーし、1024素子金属酸化膜半導体（MOS）フォトダイオードアレイ検出器を採用している。N2O分子の検出には7.8 μm付近の吸収、CH4分子の検出には7.4 μm付近の吸収を用いており、導出に必要な吸収ラインパラメータはHITRAN 96 [Rothman *et al.*, 1998]のものを利用している。ILASのN2O、CH4測定は互いの影響、およびH2Oによるわずかな影響はあるものの、その他のガスからの強い影響は受けていないと考えられる。

接線ポイントにおいて、赤外分光計の瞬時視野（IFOV）は鉛直1.6 km、水平13 kmである。接線高度20 kmの直上厚さ1 kmの層の視線に沿う部分傾斜パスはおよそ230 kmである。12 Hzのサンプリングで、44の赤外分光素子上のフルスペクトルが83ミリ秒毎に得られる。接線高度間隔は、大気の屈折効果を考慮すれば、接線高度15 kmで約110 m、接線高度55 kmで270 mである。透過率データに約10サンプリングに相当する時系列のスムージングを施すと、実際の鉛直分解能は、接線高度15 kmで1.9 km、25 kmで2.5 km、35 kmで3.0 km、45 kmで3.4 km、高度55 km以上では3.5 kmとなる [Yokota *et al.*, 本技術資料] 。参考までに、HALOEの鉛直分解能は～2 kmと見積もられている。ADEOSは傾斜角98.6度の太陽同期極軌道に投入され、赤道通過降交点は平均太陽地方時で10:40頃であった。したがって、ILASの掩蔽現象は１日地球を約14周するADEOSから見た日昇時と日没時にそれぞれ（1日約14回づつ）起こる。ILASの測定領域はプレート6-1と6-2に示すように、1996年9月～1997年6月の期間、高緯度地域（57～72N、64～89S）であった。

6.2.2 鉛直プロファイリング

大気微量成分の鉛直分布算出はオニオンピーリング法を用いて行われる [Yokota *et al.*, 本技術資料] 。レベル0データ（原測定値）からレベル1データ（検出素子用疑似透過率）への処理にあたっては、ノイズを抑えるためローパスフィルターを使っているが、レベル2プロダクト（N2O、CH4のような地球物理パラメータ）を導出するまで、人為的なスムージングはいっさい施されない。導出高度範囲は、プレート6-1と6-2に示すように、最低高度は8 km、最高高度はN2Oは～50 km、CH4は～60 kmであり、導出高度の格子間隔は幾何高度で1 kmである。

6.2.3 誤差バジェット

ILAS Version 5.20 N_2O、CH_4のエラー解析の結果を表6.1に要約した。Version 5.20データに関連する誤差は2つのカテゴリー、すなわち内部誤差 (internal error) と外部誤差 (external error) に分けられる。内部誤差は、観測された透過率とシミュレートされた透過率の非線形最小二乗スペクトルフィッティングで収束した最終残差より算出される。スペクトルフィッティングの残差を通して内部誤差に寄与する可能性があるファクターは、装置シグナル（S/N比）の不確実さ、装置関数の形、フォワードモデルにおける他のファクター（数値的スキーム、ノンガス補正における線形内挿、考慮していない他の微量成分ガス、分光パラメータ、太陽スペクトルデータ）である。外部誤差は、導出時に入力値として用いられるノンガス補正と温度プロファイルの不確実さを通して、透過率のシミュレーションに関連して出てくる誤差である。各高度の外部誤差の大きさは、各測定について評価されたものではなく、N_2O、CH_4それぞれに対して観測期間を通して共通のものを用いており、これを求めた方法は水蒸気に関する姉妹論文 [Kanzawa *et al.*, (本技術資料)] 、および詳細はYokota *et al.* [本技術資料] に記載されている。内部誤差は、外部誤差がそうであるように、precision（ランダム誤差）とaccuracy（システマティック誤差＋ランダム誤差）の両方に影響する項を含むことに注意が必要である。全誤差は内部誤差と外部誤差のroot-sum-square (RSS)（2乗和の平方根）として定義され、ILAS Version 5.20の各データファイルには全誤差と内部誤差が提供されている。

また、相対標準偏差（RSD）が算出されている。これは、静穏な時期（南半球の1997年3月末、北半球の1997年6月の3～5日間）のデータを使い、1σ標準偏差（平均値のまわりの）を平均値で割った値である。RSDは地球物理的な変動や測定の再現性の指標でもあるが、静穏期は地球物理的な変動はほとんどないので、RSDは再現性にほとんど近い。再現性はprecisionの良い指標となるので、RSDは経験的に決められるprecisionと見なすこともできる。

Version 5.20のN_2O、CH_4データファイルすべてを用いて、N_2O、CH_4混合比の平均全誤差を見積もり、平均%誤差に変換した。詳細は表6.1のキャプションに示してある。表6.1に示すように、N_2Oの平均%誤差は高度15 km、20 km、30 kmでそれぞれ、14%、19%、43%、Precisionの指標である相対標準偏差（relative standard deviation ; RSD）は、N_2Oについて、高度15 km、20 km、30 km、40 kmでそれぞれ、3%、3%、8%、15%である。ILAS N_2Oデータのprecisionは優れており、高度35 kmより下層では10%未満である。

CH_4の平均%誤差は高度15 km、20 km、30 km、40 km、50 kmでそれぞれ、16%、20%、32%、90%、88%、Precisionの指標であるRSDは、高度15 km、20 km、30 km、40 km、50 km、60 kmでそれぞれ、2%、2%、6%、9%、22%、61%である。ILAS CH_4データのprecisionは高度40 kmより下層では10%未満と優れている。

表 6.1　ILAS の亜酸化窒素およびメタンデータ（Version 5.20）のエラー解析のまとめ：全誤差と再現性

亜酸化窒素（N_2O）

Altitude (km)	Average[1] vmr (ppbv)	Internal[2] error (ppbv)	External[3] error (ppbv)	Total[4] error (ppbv)	(%)	RSD[5] (%)	(ppbv)
50	5	17	0.4	17	355	134	6
45	4	12	0.3	13	298	35	1
40	8	16	1	16	199	15	1
35	24	27	4	27	114	10	2
30	55	22	8	23	43	8	4
25	99	22	10	24	24	7	7
20	156	28	12	30	19	3	5
15	241	33	6	34	14	3	7
12	284	50	51	71	25	4	11

メタン（CH_4）

Altitude (km)	Average[1] vmr (ppmv)	Internal[2] error (ppmv)	External[3] error (ppmv)	Total[4] error (ppmv)	(%)	RSD[5] (%)	(ppmv)
60	0.16	0.23	0.02	0.24	151	61	0.10
55	0.13	0.16	0.03	0.16	123	34	0.04
50	0.14	0.12	0.02	0.12	88	22	0.03
45	0.18	0.13	0.02	0.13	74	11	0.02
40	0.26	0.23	0.05	0.23	90	9	0.02
35	0.43	0.32	0.02	0.32	75	7	0.03
30	0.78	0.24	0.02	0.25	32	6	0.05
25	1.14	0.22	0.07	0.23	20	2	0.02
20	1.34	0.25	0.09	0.27	20	2	0.03
15	1.56	0.24	0.09	0.25	16	2	0.03
12	1.73	0.26	0.19	0.31	18	2	0.03

1) 全導出値の体積混合比の平均（volume mixing ratios (vmr)）
2) 全導出値の内部誤差の平均
3) 外部誤差。全データに共通に与えられている。
4) 全誤差：内部誤差と外部誤差（ppmv）の RSS (root-sum-square)とその相対値（%）。後者は RSS を平均混合比で割ったもので、2 列目に示してある。
5) 相対標準偏差 Relative standard deviation（RSD (%)）。測定の再現性の尺度、すなわち経験的に決められた precision（本文参照）。参考までに RSD に相当する混合比（ppbv または ppmv）を平均体積混合比に RSD(%)をかけて求めて 2 列目に示した。

導出されたプロファイルの不確実さについて注意すべき点が２つ（接線高度決めとエアロゾル消散係数）ある。

接線高度：接線高度（TH）を正確に決定することが非常に重要である。というのは、接線高度のあいまいさが空気密度を通して体積混合比プロファイルの導出における不確実さに伝播するからである。接線高度を決めるにあたって、Version 5.20ではサンエッジセンサーデータとILAS可視チャンネルのO_2 Aバンド（Pブランチ）の透過率データ（詳細は Nakajima *et al.*, 本技術資料 第３章を参照）の両方を用いている。Version 5.20の接線ポイ

ントの高度決めにおけるシステマティック誤差の計算値は+300 ±360 mである：実際の接線高度に対する-60 m、+300 m、+660 mの誤差は、N_2O、CH_4を含む導出ガスの混合比でそれぞれ約+1%、－4%、－9%の誤差に相当する（ランダム誤差の計算値は30 m）。参考までに、HALOEの高度決めの不確実さは150 mと見積もられている。

エアロゾル消散係数：外部誤差に含まれるノンガス成分補正に関連するシステマティック誤差である。窓領域分光素子間の単純な線形内挿によってエアゾル消散係数を推定した。その際のシステマティック誤差を評価するために、ノンガス成分の４つの組成、すなわち、50重量%、75重量%のH_2SO_4/H_2O ２元溶液硫酸エアロゾル、硝酸３水和物（nitric acid trihydrate ; NAT）、氷（ice ; ICE）、過冷却３元溶液（supercooled ternary solutions ; STS）からなるPSCsについての数種のIR吸収スペクトルを用い、また、ガス状成分としては参照プロファイル（アプリオリプロファイル）を用いて透過率をシミュレートした [Yokota *et al.*, 本技術資料 第２章]。Version 5.20リトリーバルアルゴリズムにおけるノンガス成分の寄与に線形内挿を施した後、シミュレートされたこれらの透過率を用いてガス状物質濃度の鉛直プロファイル導出を行った。数密度で表したN_2O、CH_4のアプリオリなプロファイルと導出したプロファイルの差は、780 nmのエアロゾル消散係数（AEC）との相関が良かった。したがって、N_2O、CH_4の数密度のシステマティック誤差は780 nmのAECの関数として評価することができる。高度15、20、25 kmにおける典型的空気密度を仮定し、AECが5×10^{-4} km^{-1}の2種類の硫酸エアロゾルについてN_2Oの体積混合比の誤差（-2.44～＋5.91 ppbv）と、のCH_4の誤差（-0.20～-0.03 ppmv）を表6.2に示した。また、AECが1×10^{-3} km^{-1}の何種類かのPSCsについてのシステマティックバイアスも表6.2にまとめた。

表 6.2　ILAS の亜酸化窒素およびメタンデータ（Version 5.20）のエラー解析のまとめ：ノンガス成分の補正に起因するシステマティックバイアス（亜酸化窒素 ppbv、メタン ppmv）

亜酸化窒素 (N_2O)

Altitude (km)	Sulfate Aerosols AEC# = 0.0005 (km^{-1})		Polar Stratospheric Clouds (PSCs) AEC# = 0.001 (km^{-1})					
	S(75)[a]	S(50)[a]	NAT	ICE	STS(5,37)[b]	STS(33,15)[b]	STS(47,3)[b]	STS(60,0.5)[b]
25	5.91	-2.44	-116.0	-0.89	-20.59	-1.09	-2.31	-7.55
20	2.67	-1.10	-52.4	-0.40	-9.29	-0.49	-1.04	-3.41
15	1.22	-0.50	-24.0	-0.18	-4.26	-0.23	-0.48	-1.56

メタン (CH_4)

Altitude (km)	Sulfate Aerosols AEC# = 0.0005 (km^{-1})		Polar Stratospheric Clouds (PSCs) AEC# = 0.001 (km^{-1})					
	S(75)[a]	S(50)[a]	NAT	ICE	STS(5,37)[b]	STS(33,15)[b]	STS(47,3)[b]	STS(60,0.5)[b]
25	-0.20	-0.12	2.14	-0.01	0.41	-0.16	-0.29	-0.19
20	-0.09	-0.06	0.97	-0.01	0.19	-0.07	-0.13	-0.09
15	-0.04	-0.03	0.44	0.00	0.09	-0.03	-0.06	-0.04

詳細は本文参照

AEC： 780 nm におけるエアロゾル消散係数

[a] S(75) および S(50) はそれぞれ、硫酸エアロゾルが75 および 50重量%のH_2SO_4/H_2O 2元溶液を表す。

[b] STS(5,37), STS(33,15), STS(47,3)、および STS(60,0.5)は、それぞれ、H_2SO_4が5, 33, 47, および 60 重量%、HNO_3/H_2O が37, 15, 3,および 0.5重量%の極成層圏雲(PSCs)の過冷却3元溶液を表す。

6.3 ILAS Version 5.20 N_2O, CH_4 データの一般的特徴

この節では、ILAS Version 5.20 N_2O、CH_4データの内的整合性と一般的特徴を議論する。一般的に言って、N_2O、CH_4のような対流圏起源の長寿命のガス種は、高度が増すとともに濃度が減少することが予想され、地上における値（N_2Oで～315 ppbv、CH_4で～1.75 ppbv [例：IPCC, 2001]）を超えるような体積混合比を示すべきではない。これらの上限がILASのN_2O、CH_4データ質評価の第1基準になる。

6.3.1 時間－高度断面

プレート6-1およびプレート6-2に、全ての有効データを用いたN_2O、CH_4の時間－高度断面を示す。上段の図にはILAS日昇（SR）掩蔽で観測された北半球の断面図を観測緯度の時間変化とともに示し、下段の図には同様にILAS日没（SS） 掩蔽で観測された南半球の断面図を示した。1996年10月30日～1997年6月29日の連続測定データとともに1996年9月17、18日、10月14、16、17、18日の試験測定データをプロットした。1996年11月25～26日にかけてプレート6-1上で白く示してあるデータの欠落は、このとき太陽黒点数が多かったために大気微量成分のリトリーバルが出来なかったことによっている。最低高度については、南半球での日没掩蔽測定の方が、北半球の日昇掩蔽測定よりも数 km低いところまで測定できる。これは、ILASによる太陽追尾が低高度では日没モードの方が容易なためである。プレート6-1、6-2は、ILAS Version 5.20 N_2O、CH_4データが、次のような観点から良質であることを示している。

（ｉ）高高度で低混合比という一般的特徴は予想された通りである。

（ii）異常値がほとんど無く、データが時間軸高度軸ともに連続的に見える。

（iii）南極成層圏の冬季での大気の沈降のような典型的特徴が見られる。

一方でプレート6-1、6-2は、いくらか質の低いデータもあることを示している。

（ｉ）約12 km以下の最下層データがほとんど時間変化を示さない。

（ii）予想される最大混合比（約1.75 ppmv）を上回るCH_4値が特に北半球冬の高度20 km以下で頻繁に見られる。

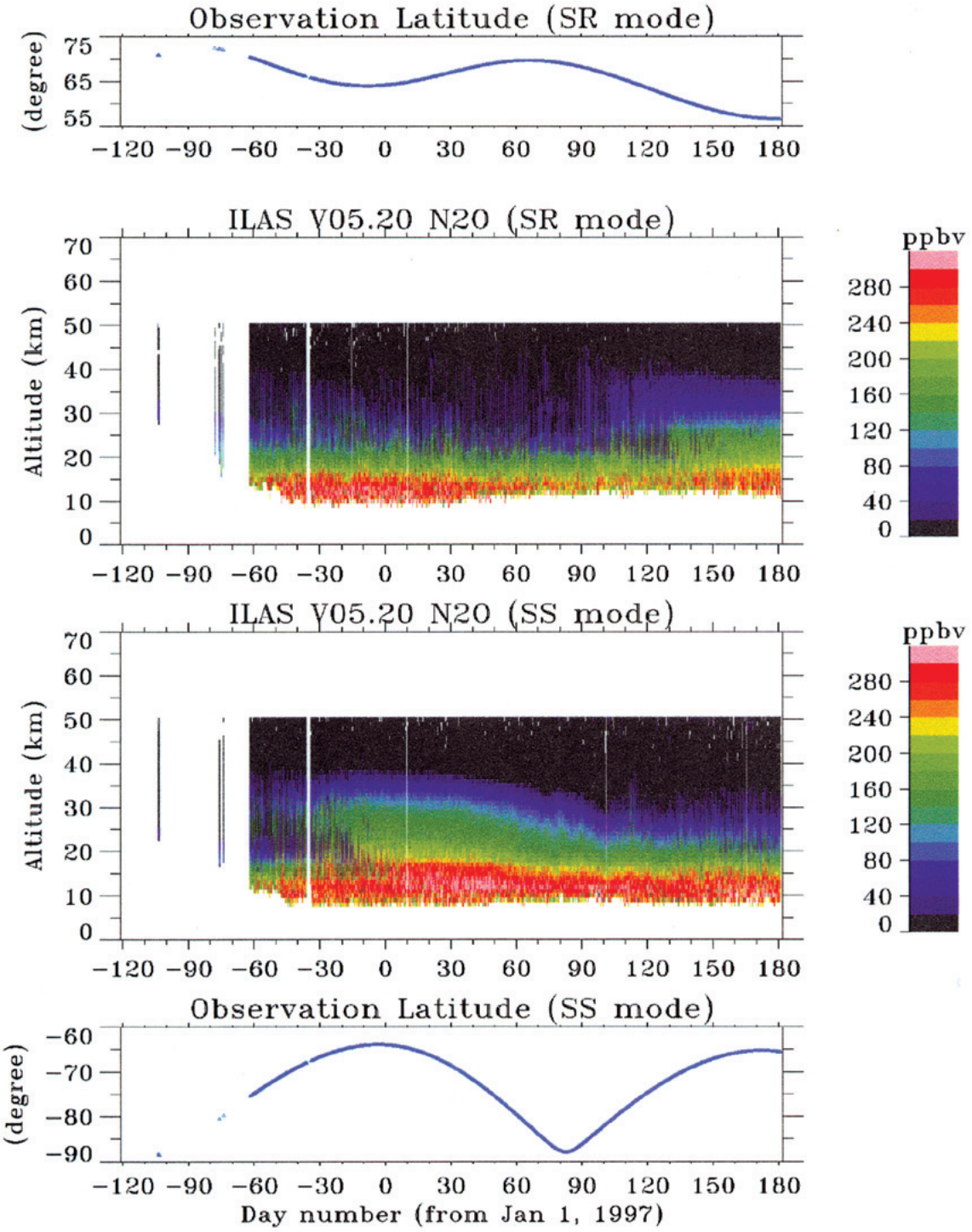
6.3.2 鉛直プロファイル

プレート6-3、6-4にN_2O、CH_4の全有効データの鉛直分布をそれぞれ示す。(a)は北半球、(b)は南半球のものである。データは、Ertelの渦位（potential vorticity ; PV）に基づく相当緯度（equivalent latitude）の関数としてのPV傾度をもとに、極渦の内側（緑）、境界域（赤）、外側（濃い青）に分類されている [Nash *et al.*, 1996] 。PVは United Kingdom Meteorological Office（UKMO） の同化データ [Swinbank and O'Neill, 1994] を用いて算出した。このデータは24時間毎の12UTCの値で、緯度2.5° 経度3.75° の分解能、鉛直方向は1000～0.316 hPa（約55 km）の範囲で約2.5 kmの高度分解能に相当するUARS標準22気圧面の値という仕様で提供されている。極渦の境界がはっきりしない場合の期間や高度領域については、データは「外側」と分類した。プレート6-3、6-4では、外側データを最初に、次いで境界データを、最後に内側データをプロットした。そのため、プレート上で内側のデータが最も目立っている。

北半球では（プレート 6-3a、6-4a）、極渦の外側に比べ、極渦の内側で N_2O、CH_4 の混合比がより低くなっている。このような特色は、「より低い N_2O、CH_4 混合比を持つ空気が極渦の内側で下方に輸送されている」という我々の予想と一致している。南半球では（プレート 6-3b、6-4b）、N_2O についてはおよそ 25 km 以上で、CH_4 についてはおよそ 35 km 以上で似たような傾向が見られる。しかし、この傾向はこれら以下の高度では見られない：極渦の外側と同定された多くのデータは、それゆえ同じ高度において極渦の内側と同定されたデータよりも低い混合比を示す。これは、ILAS の観測期間（1996 年 11 月～1997 年 6 月と 1996 年 9～10 月の付加的期間）に起因している。すなわち、南極の極渦が 1996 年 11 月には衰弱の過程にあったので、外側と同定されたデータは、依然として内側のデータ特性を持っていたのである。また、南極の極渦は 1997 年 6 月の高度 20 km 以下では発達の過程にあったので、下部成層圏では極渦をうまく定義できず、さらに、南極域の 6 月は、N_2O、CH_4 混合比に及ぼす極渦内の下降流の影響が下部成層圏には達していなかったのである。

高度15-20 km付近のいくらかのN_2Oデータは315 ppmvをこえる過度に高い混合比を示す（プレート6-3）。北半球の高度20 km以下、および南半球の高度15 km以下では、多くのCH_4データが1.75 ppmvを上回る不当に高い混合比となっており（プレート6-4）、これはILASリトリーバルの未解決の問題点のためである。高度の増加に伴う理屈に合わない値の増加は、N_2Oについては高度～40-45 km以上（プレート6-3）、CH_4については高度～50-55 km以上（プレート6-4）で見られる。

各月の同様なプロット（本論文には示していないが）は次のような特徴を示している。一般に、N_2O、CH_4のどちらについても、北極の夏（1997年6月）は南極の夏（1997年1月）に類似しており、北極の冬（1997年1月）は南極の冬（1997年6月）に類似している。すなわち、季節に関して両極域のプロファイルは対称である。高度20 km付近の夏季の混合比は、N_2O、CH_4のそれぞれについて約20 ppbvおよび0.2 ppmvだけ、北極の方が南極より低くなるという非対称な特徴を含んでいる。315 ppmvを超える過度に高いN_2O混合比が1996年11月から1997年1月に高度20 km以下の北極域で見られ、南極域ではILAS連続測定期間中（1996年11月～1997年6月）を通して見られた。また、1.75 ppmvを超える過度に高いCH_4混合比は両半球の高度20 km以下でILASの観測期間中を通して見られた。高度20～30 kmにおける異常に高いCH_4混合比は、1.75 ppmvをわずかに下回るが、北極域の1996年12月～1997年2月と南極域の6月、すなわちいずれも冬季に出現している。

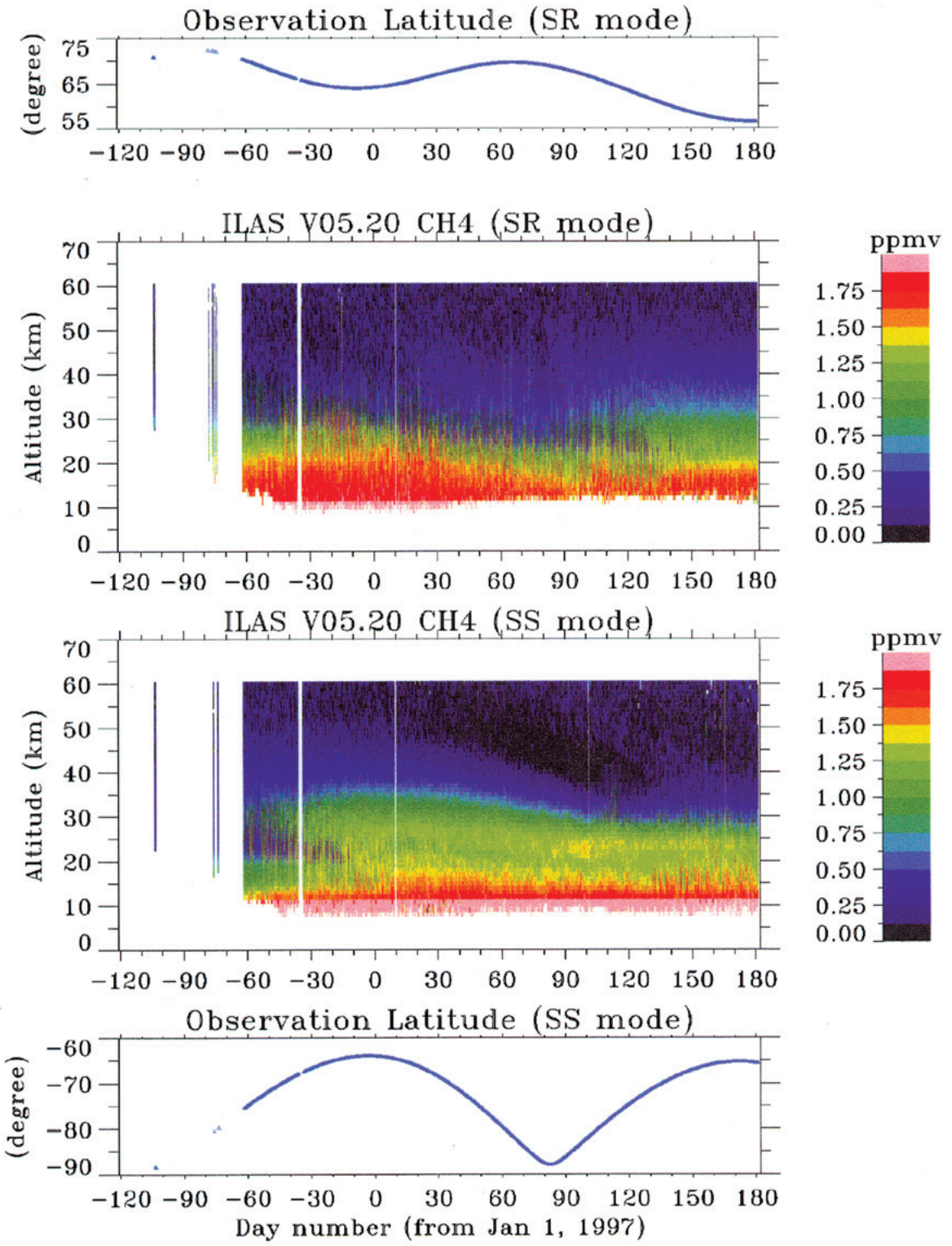


White represents for no data

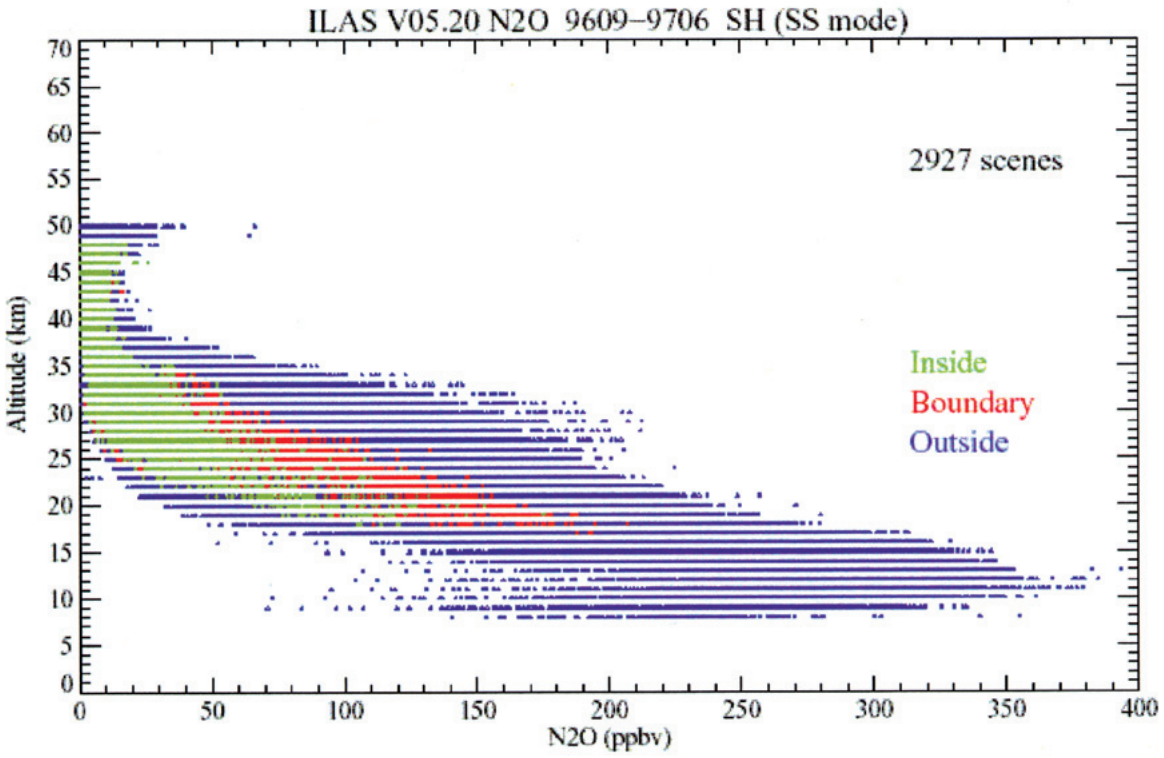
Copyright(c) 2001 National Institute of Enviromental Studies

プレート 6-1　1996 年 9 月～1997 年 6 月のすべての有効データを測定時刻順に並べた ILAS Ver. 5.20 N_2O データの時間－高度断面

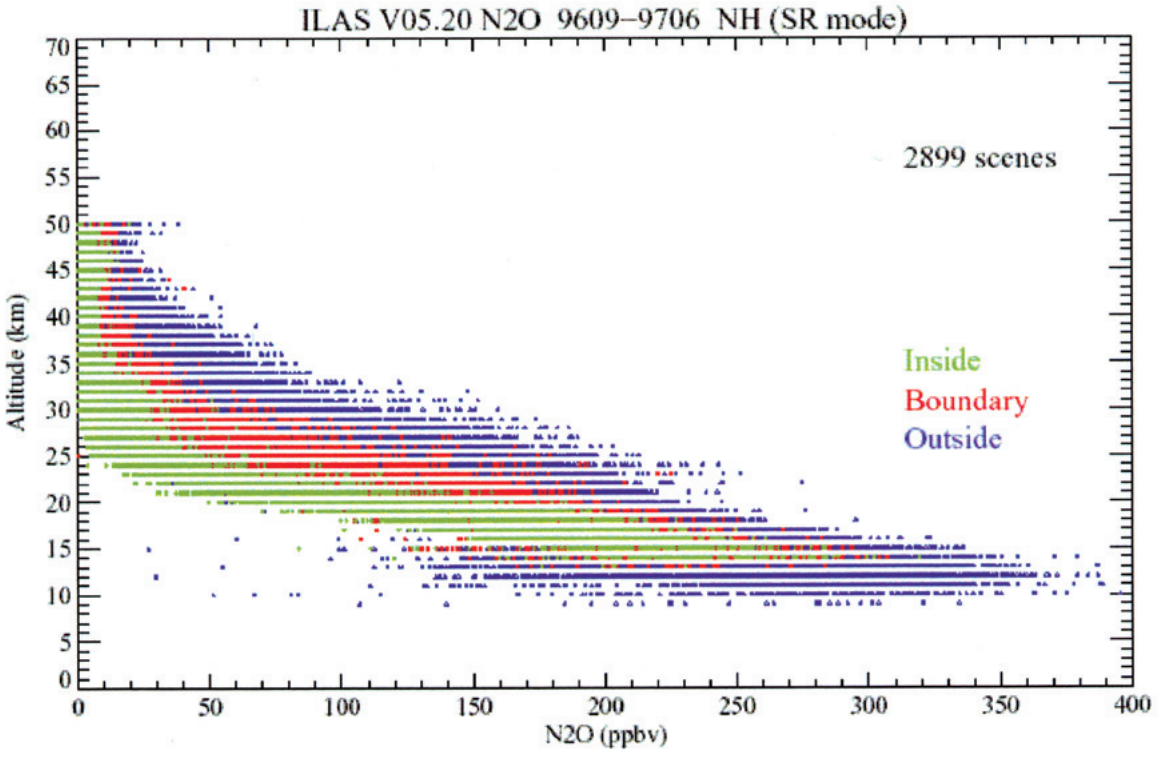
北半球は ILAS から見た日昇（SR：Sun Rise）掩蔽測定（上段の図）、南半球は ILAS から見た日没（SS：Sun Set）掩蔽測定（下段の図）。ILAS 測定位置の緯度範囲の時間変化も各図に示してある。



プレート6-2　プレート6-1と同じ、ただし、ILAS Ver. 5.20 CH_4データ



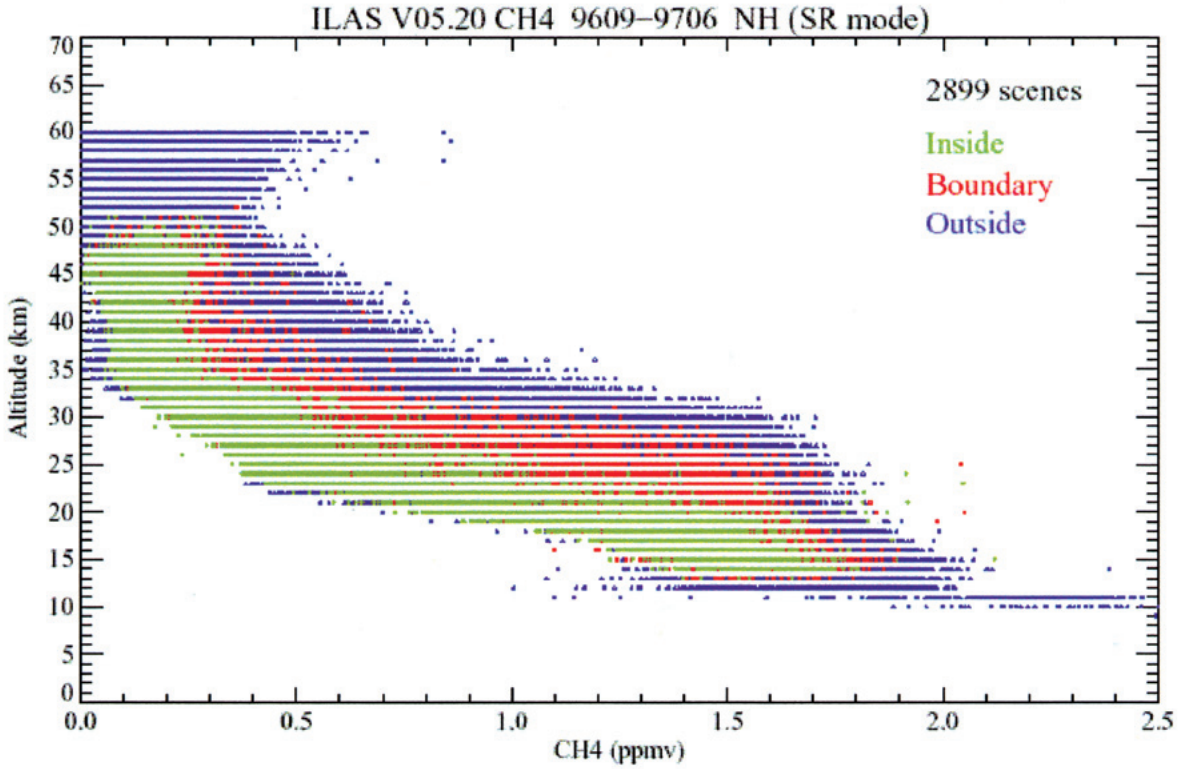
(a)



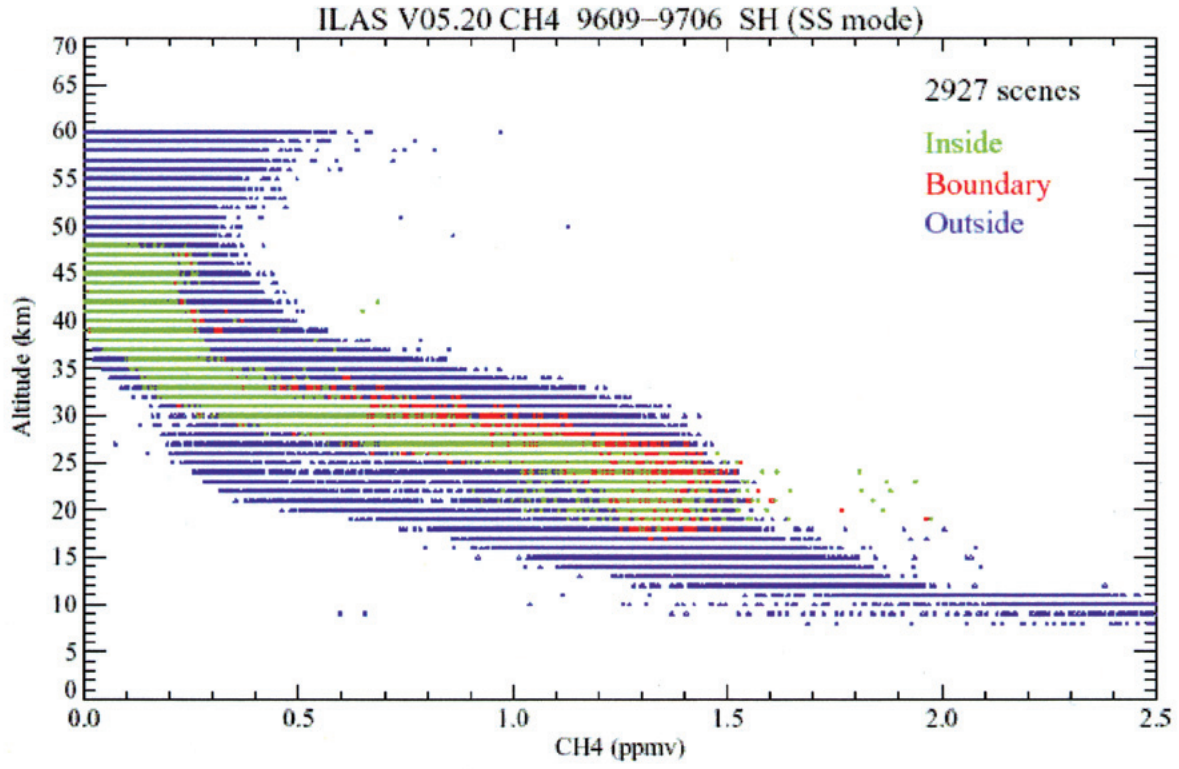
(b)

プレート 6-3　全 ILAS Ver. 5.20 N_2O データの鉛直プロファイル

北半球(a)、南半球(b)。データは極渦の内側（緑）、境界域（赤）、外側（濃い青）に分類。



(a)



(b)

プレート 6-4　プレート 6-3 と同じ、ただし、ILAS Ver. 5.20 CH_4 データ

6.4 検証実験および解析方法

この節では、同時に実施した他の観測値を用いたILAS N_2O、CH_4測定の検証のために採用した方法を述べる。この手法は、ILAS H_2Oデータの検証を行った姉妹論文で採用した方法と同じである [Kanzawa *et al.*, 本技術資料 第７章]。ILASプロジェクトでは多くの検証実験を計画したが [Kanzawa *et al.*, 1995 ; Kanzawa, 1997] 、その中で1997年の2～3月にスウェーデンのKiruna近郊のEsrangeで実施した気球キャンペーンが主たる野外実験であった [Kanzawa *et al.*, 1997] 。このキャンペーン中に、他の大気微量成分と同様に、多くのN_2O、CH_4の鉛直プロファイルが測定された。また、1997年4～5月にはアラスカ州Fairbanks近郊のFort Wainrightでもう一つの気球キャンペーンが実施され [e.g., Toon *et al.*, 2002.; Jucks *et al.*, 2002] 、信頼できるN_2O、CH_4鉛直プロファイルが得られた。気球キャンペーンで得られた鉛直プロファイルは、ILAS N_2O、CH_4を検証する上で最も信頼性の高いデータである。1997年4～5月にはPOLARIS（Polar Ozone Loss in the Arctic Region in Summer）ミッションのER－2航空機によるその場 (in situ) 測定で、信頼できるN_2O、CH_4データが得られた。また、1997年3～5月にFairbanks近郊のPoker Flatにおいて地上設置型分光計によって測定されたN_2Oプロファイルや、1997年2月にKiruna付近で実施されたFalcon 航空機からのリモートセンシングによるN_2Oプロファイルがある。ILASの測定期間中に、衛星センサーHALOEもCH_4を測定している。

最近、同期測定ペアを捜すのにトラジェクトリ計算を用いる「ラグラジアンアプローチ (Lagrangian approach) 」が使わるようになってきた。たとえば Morris *et al.* [2000] は、この手法で得られた結果は、同期データを直接比較する「伝統的アプローチ (Traditional approach) 」と同等、もしくは優れていることを示唆した。「ラグラジアンアプローチ」は、比較結果の質をほとんど低下させずに比較ペア数を増すことができるが、次のような理由で、この研究の目的には「伝統的アプローチ」で十分である。

(ｉ) ILAS検証気球実験のほとんどは、対応するILAS測定に対して時間的・空間的に十分に近い条件で実施された。

(ii) ラグラジアンアプローチはやや間接的な比較方法で、気象データの質やトラジェクトリの計算方法への依存を通じた誤差を免れない。

(iii) CH_4についての他衛星との比較に関しては、伝統的アプローチを用いるに十分に多数のイベントがある。また、高度60 kmまで比較を行ったが、およそ50 kmより上空ではトラジェクトリ計算に使える信頼性の高い気象データが存在しない。

このような事情から、この解析では同期データを直接比較する「伝統的アプローチ」を採用した。「ラグラジアンアプローチ」は、Danilin *et al.* [2001]によって行われたように、他の研究においてILAS検証に採用されるだろう。ここで、衛星データとその場観測データは異なる空間スケールに応答するため、このことがILASとその場観測データの観測値の差異に寄与している可能性があることに注意しておく必要がある。

検証解析を行うにあたって、他の研究グループでは、緯度範囲に比べてより緩やかな（広範囲な）経度範囲を同期基準としてしばしば採用している。しかし、高緯度域における比較においては、冬季～春季の極渦は極に対して形が歪んでいる場合が多く、これが微量ガスの分布を経度方向に不均一にすることから、我々はより緩やかな経度範囲を同期基準として採用しないことにした。なお、力学的条件でみた空間での比較ペアの近接さの度

合いを評価するためにPV解析も行っている。

次の6.5節～6.7節では、以下のように定義される相対%差「D」を用いる。

$$D = [\chi(\mathrm{ILAS}) - \chi(\mathrm{Validation})]/[\{\chi(\mathrm{ILAS}) + \chi(\mathrm{Validation})\}/2]\times 100 \quad (1)$$

D値は1 km毎の各高度グリッドにつきパーセント(%)で表され、「χ(ILAS)」と「χ(Validation)」はそれぞれ、「ILAS測定」と「検証測定」による混合比の値χ(N_2OまたはCH_4) を示す。ILASから導出される主要なプロダクトは幾何学高度の関数としての混合比鉛直プロファイルである。幾何高度からジオポテンシャル高度への変換は、ILASと比較測定データとの比較を助けるために、必要な場合行われる。

6.5 気球検証キャンペーンデータとの比較

6.5.1 データと手法

1996年11月～1997年6月の8ヶ月間にわたるILASの連続測定期間中に、気球検証実験が高緯度域の2つの観測点（Kiruna, スウェーデン(68°N, 21°E)およびFairbanks, アラスカ(65°N, 148°W)で実施された。ILASによるN_2Oデータ検証のために、1997年2月～5月に、7つの異なる手法による気球搭載センサーを使用したフライトが10回実施された。一方、ILASによるCH_4データ検証のために、5つの異なる手法による気球搭載センサーを使用したフライトが7回実施された。これらの比較を表6.3に示した。1997年2～3月に行われたKirunaにおける測定は、極渦の内側もしくはエッジに近いところで実施され、1997年4月～5月にFirbanksで行われた測定は極渦の外側で実施された。

表6.3に示された気球センサーを簡単に紹介する。ASTRID、BONBON、SAKURAは大気を直接採取する測定器である。ASTRID [Bauer *et al.*, 1994] は ILAS N_2Oを検証するためのグラブサンプラー、BONBON [Schmidt *et al.*, 1991; Levin *et al.*, 1999; Engel *et al.*, 2001] とSAKURA [Honda *et al.*, 1996] はクライオジェニックサンプラーで、ILASのN_2O、CH_4を検証する。その他はILASのN_2O、CH_4を検証するのに用いられたリモートセンシング分光計である。LPMA（Limb Profile Monitor of the Atmosphere）とMkIVは太陽掩蔽法FTIR（フーリエ変換型赤外）分光計である。LPMAの詳細は Camy- Peyret [1995] 、Camy- Peyret *et al.* [1995] MkIVの詳細は Toon [1991] に記述されている。LMPAの測定には上昇モードと掩蔽モードがあるが、本論文では上昇モードデータを使用した。MIPAS（Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding）およびFIRS-2（Far-Infrared Spectrometer - 2）は周縁放射サウンディング分光計である。MIPASの測定器とデータ質評価の詳細はFischer and Oelhaf [1996]、Friedl-Vallon *et al.*, [1999], Stowasser *et al.* [1999] Wetzel *et al.* [2002] に、N_2O についてのみのデータを与えるFIRS-2の詳細はJohnson *et al.* [1995] および Jucks *et al.* [1998] に記述されている。これらのセンサーは特性が良く、折り紙付きの測定装置である。

表 6.3　1997 年に実施された ILAS 測定および検証実験気球観測で得られた
亜酸化窒素 (N_2O)およびメタン (CH_4) データの対応表

比較する測定データのペアは、ILASの測定時刻が検証実験観測の前後24時間以内で最も時間差の小さいものを選択した。検証実験の測定時刻と位置については注釈欄に記載してある。ILASの測定時刻と位置は接線高度20 kmにおける値である。ASTRID, BONBON, LPMA, SAKURA, MIPAS はスウェーデンのキルナ (68°N, 21°E)、FIRS-2 と MkIV はアラスカのフェアバンクス (65°N, 148°W)から放球された。測定の日付と時刻は 1997年"MM/DD" および "hh:mm" の形式で UTC で示し、測定位置は北緯と東経（ " - " は西経）で示してある。ILASの測定と検証実験の測定時刻と位置の差 (Validation - ILAS) は、それぞれ "hh:mm"および距離（km）で示した。

Balloon	Validation				ILAS				Difference		Note
Instrument	Date	Time	Lat.	Lon.	Date	Time	Lat.	Lon.	Time	Distance	
ASTRID*	02/10	11:18	67.96	27.39	02/10	13:16	68.31	35.75	-01:58	348km	*1
BONBON	02/11	11:45	68.01	26.48	02/11	14:30	68.41	18.26	-02:45	341km	*1
LPMA	02/14	14:40	65.80	22.80	02/14	13:08	68.69	41.31	01:32	853km	*2
SAKURA	02/22	11:53	68.08	27.25	02/22	14:33	69.29	27.80	-02:41	136km	*1
ASTRID*	02/25	11:13	68.45	25.96	02/25	14:53	69.44	25.98	-03:39	110km	*1
LPMA	02/26	15:30	66.90	20.50	02/26	14:26	69.49	33.76	01:04	616km	*2
SAKURA	03/18	10:45	65.56	28.55	03/18	17:08	69.30	13.58	-06:23	758km	*1
MIPAS	03/24	19:42	69.60	30.14	03/24	16:06	68.87	34.78	03:36	200km	*3
FIRS-2*	04/30	19:12	69.30	-148.91	04/30	06:04	63.57	-149.12	13:08	636km	*4
MkIV	05/08	12:11	68.56	-146.29	05/08	05:49	62.14	-141.94	06:22	740km	*5

*: ASTRID と FIRS-2 は N_2O データのみ提供する
*1: 高度 20 km に最も近い測定時刻および位置
*2: LPMA の測定の代表的な時刻および位置
*3: MIPAS の平均測定時刻および位置
*4: FIRS-2 の平均測定時刻および位置
*5: 高度 20 km における MkIV の測定時刻および位置

図6.1に、ILASと気球検証実験によるN_2O体積混合比の鉛直プロファイル（左側の図）、ILASと検証実験値の差（相対差を%で表示）（中央の図）を示す。相対差の正の値はILASの測定値が検証実験値より大きいことを表す。右側の図は、ILASおよび検証実験データ取得位置でのPVプロファイルを相対差（%）で示したものである。図6.2はCH_4についての同様の図である。表6.3に、比較ペアの測定位置と時刻を、それらを決めた方法とともに示した。

図6.1、図6.2のILASエラーバーは、第2節で定義された全誤差である。検証値のエラーバーについては、測定をリモートサウンディング測定と直接採取測定の2つに分類した。1 σ precisionエラーバーを、リモートサウンディング測定であるLPMA, MIPAS, FIRS-2, MkIVについてプロットしてある。ここで、N_2O、CH_4の相対差（%）は各気球検証実験データを「検証データ」として、第6.4節の式(1)のDとして定義される。直接採取測定のASTRID, BONBON, SAKURAについては、キャプションにprecision （ランダムエラー）とaccuracy

（システマティックエラー＋ランダムエラー）についての情報を与えるにとどめた。LPMA, FIRS-2, MkIVデータは、1 km高度グリッドで与えられている。MIPAS, ASTRID, BONBON, SAKURAのデータについては1 km高度グリッドに落とすために、線形内挿を行った。相対PV差「DPV」は次のように定義され、

$$DPV = [PV(X) - PV(Y)] / PV(Y) \times 100 \qquad (2)$$

1-kmの高度グリッド毎に%で与えられる。ここで「PV（X）」と「PV（Y）」はXとYの時刻と位置におけるPV値である。測定された空気塊の違いを示すインデックスを定義するために、まず式(2)においては、Xを「ILAS」、Yを「検証」とする。ここでは、表6.3に示した「ILAS」および「検証」の水平位置と時間を用いており、水平方向については双一次内挿、時間については線形内挿を行っている。また、極渦のエッジに対する相対的な位置を示すインデックスも定義する。ここで、Xを「ILAS」Yを「エッジ (Edge)」、Xを「検証」Yを「エッジ (Edge)」とし、「PV（エッジ）」は Nash *et al.* [1996] が定義した極渦エッジにおけるPV値である。「ILAS」および「検証」の時間は、表6.3に示したものを用い、エッジのPV値は時間について線形内挿した。

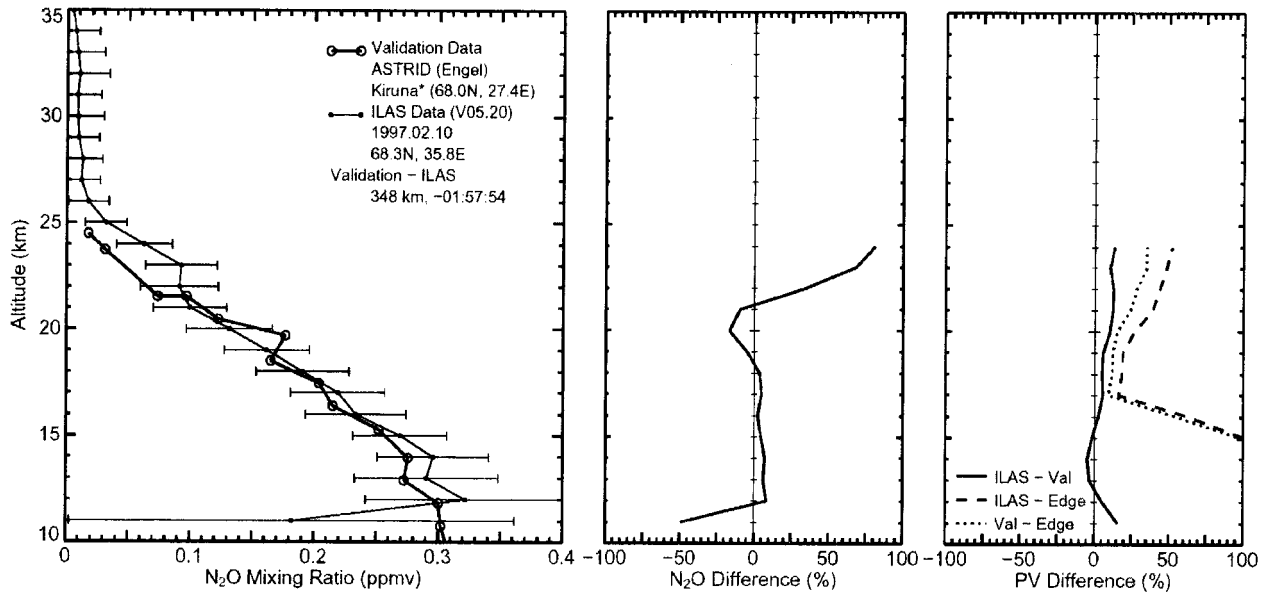
6.5.2 N_2O

N_2Oについての気球検証実験の最初の8セットは、1997年2月・3月にスウェーデンのKirunaで実施され（図6.1a-h）、そのほとんどは極渦の内側であった。1997年2月10日の、グラブサンプラーASTRIDの測定データは、高度17～21 kmでILAS測定値との差が体積混合比で10%以内という良く一致したものだった（図6.1a）。高度16 kmでは、差が-50%であったが、この高度でILASは約180 ppbvという異常に低い混合比を示している。高度23 kmより上層では、差は+50%を超え、ILASはASTRIDより高い値をとる。PV値の差は2つの測定位置間では非常に小さく、ほとんどの高度範囲で10%以内である（右側の図）。

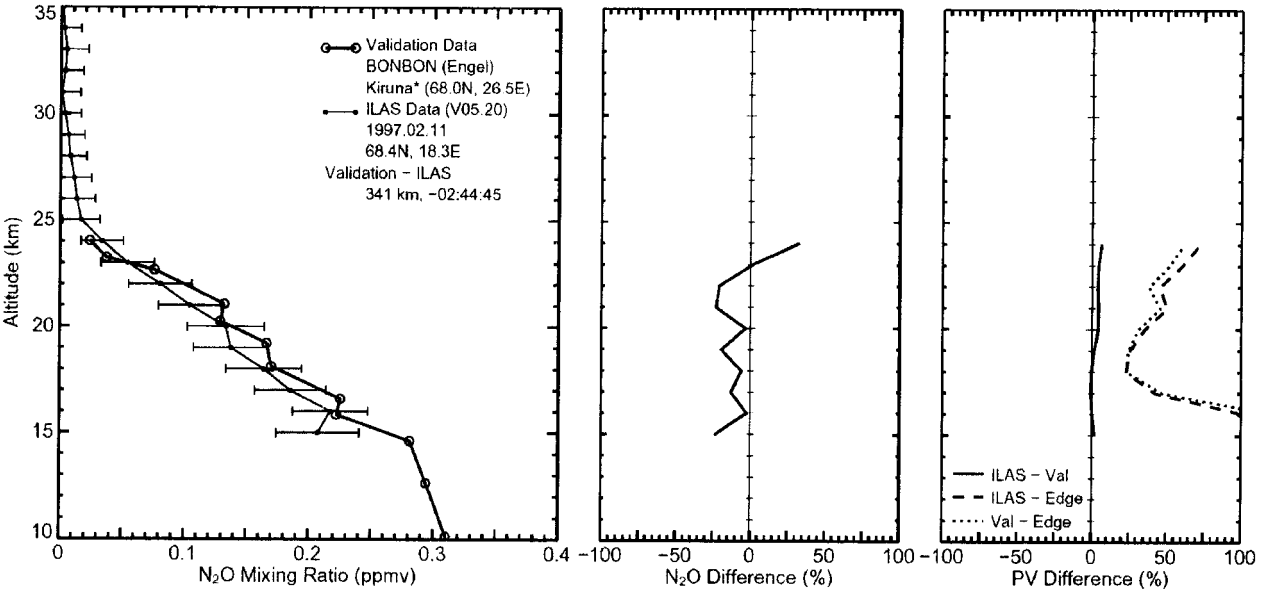
翌日の2月11日に観測が行われたクライオジェニックサンプラーBONBONの測定値もILAS測定値と良く合っており、PV値の差が20%以下の高度16～23 kmで混合比の差は20%未満であった（図6.1b）。この高度範囲でILASはBONBONより低い値を示す。BONBONの最高観測高度である24 kmでは、ILASの値はBONBONより約30%大きい（中央の図）が、混合比の絶対差は小さく（左側の図）、ILASのエラーバーの範囲内におさまっている。混合比の絶対値が、一般に高高度では小さいことに注意されたい。このようなところでは、絶対値の小さな差が大きな相対差をもたらすこともある。

数日後の2月14日の気球搭載型太陽掩蔽測定センサーLPMA（図6.1c）は、ILAS とLPMAのN_2Oに大きな相対差があることを示した（ILASがLPMAより小さい）。これはPV値に大きな差があったことに対応している：ILASの測定位置は極渦の内側、一方、LPMAの測定位置は極渦エッジ付近であった。LPMAに対するILASの相対差の鉛直プロファイルの高度約20 km以上の構造が、PV値の差の構造とよく類似していることは注目に値する：低いN_2O混合比が高いPV値、すなわち極渦のかなり内側、に対応している。

その8日後の2月22日の観測で、クライオジェニックサンプラーSAKURAはILASとの理想的な比較測定値を取得した（図6.1d）。というのは、どちらの測定も極渦内で行われ、PV



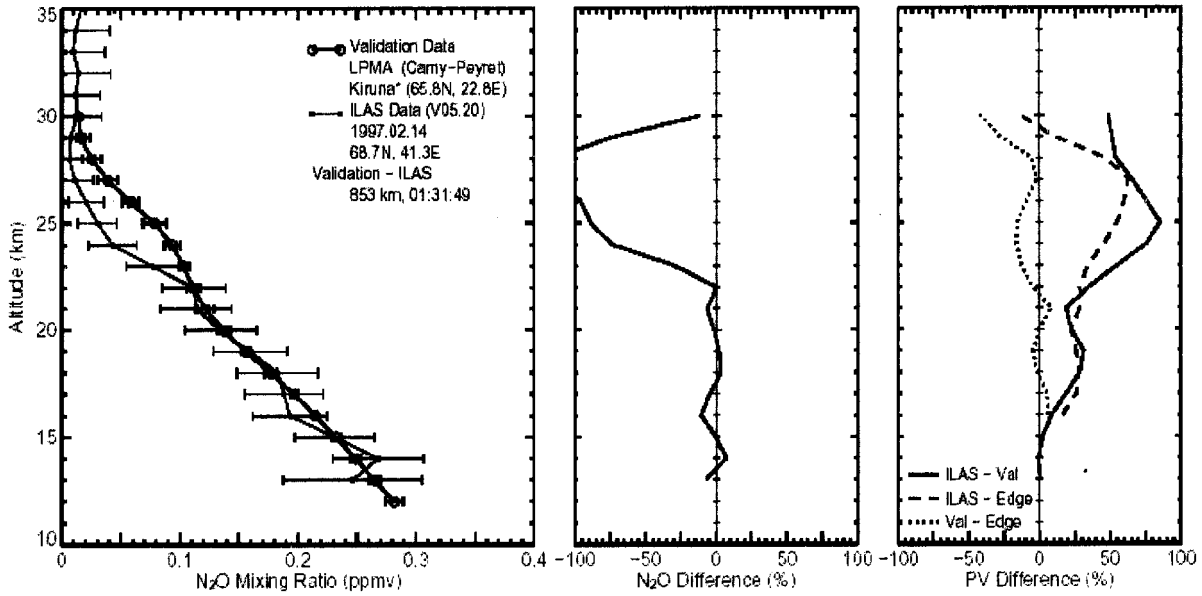
(a) ILAS vs ASTRID



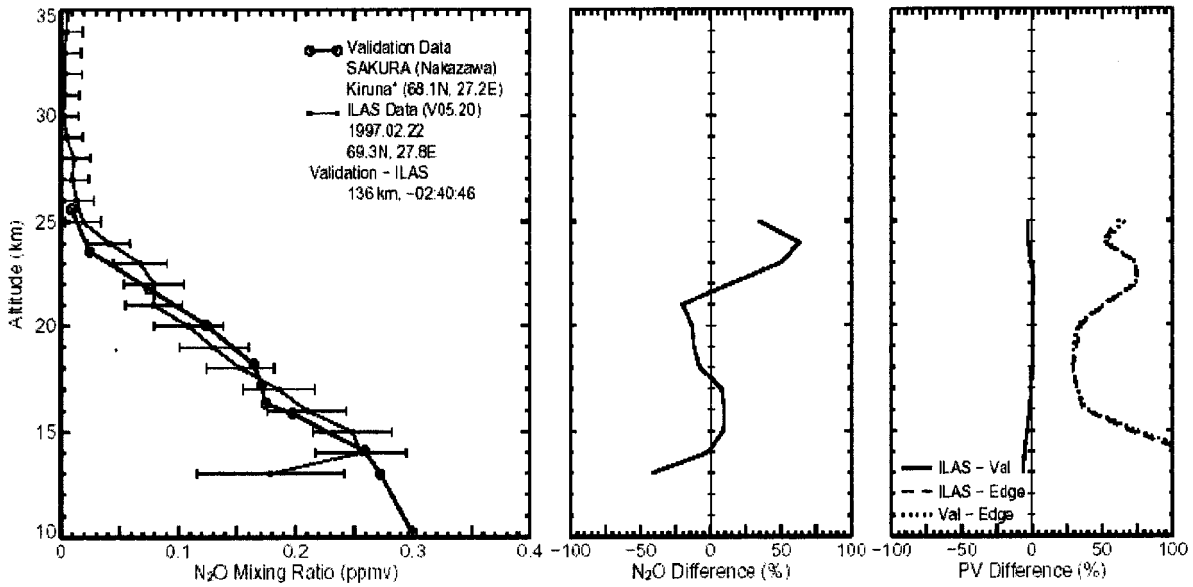
(b) ILAS vs BONBON

図 6.1(1)　ILAS Ver. 5.20 による N_2O の体積混合比の鉛直プロファイルと気球による検証実験データの比較と相対差 D（%）（定義は本文参照）

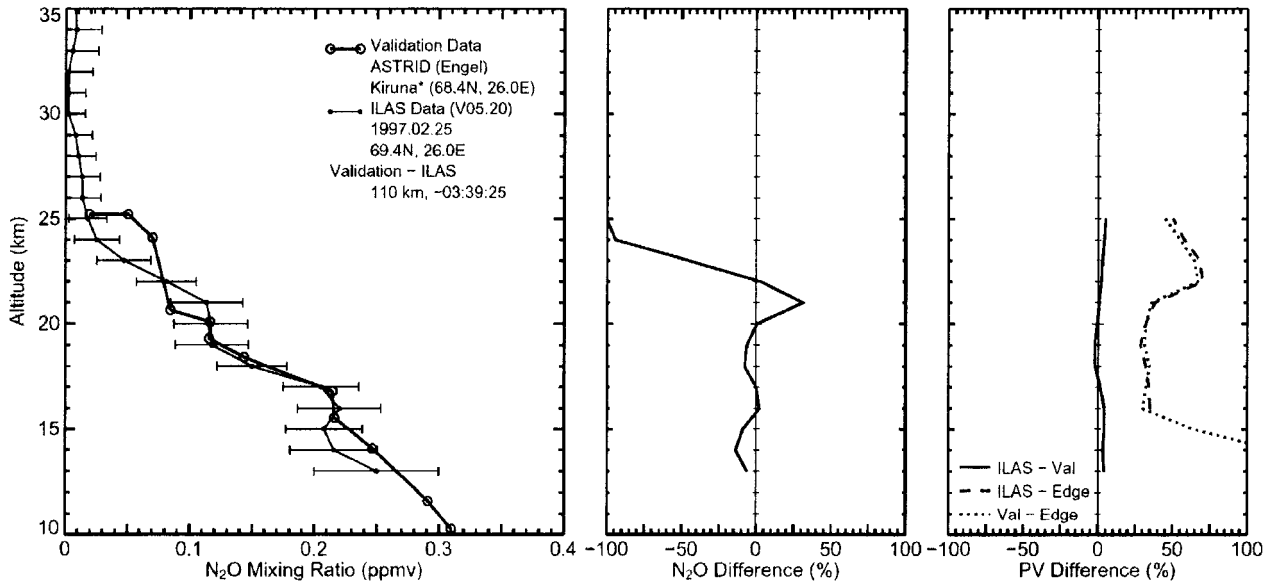
ここに示した 10 の検証フライトの詳細は表 6.3 に示す。ILAS のエラーバーは全誤差を示し、本文中で定義している。検証実験データのエラーバーの内容は以下のとおりである。
(a)(e) ASTRID, (b) BONBON　エラーバーを示さず；5.0 ppbv または 2.0% precision；2.0% accuracy
(c)(f) LPMA, (h) MIPAS, (i) FIRS-2, (j) MkIV　　1 σ precision
(d)(g) SAKURA　　エラーバーを示さず；0.4% precision & accuracy
(a)～(h)の高度範囲は 10～30 km、(i)～(j)の高度範囲は 10～40 km。ILAS と検証実験の測定位置における Ertel の渦位（PV）の比較（差）をパーセントで示し、各図の右側に示した（定義は本文参照）。 “ILAS-Edge”と “Val-Edge”は、(i)と(j)のケースのように、極渦の境界（Edge）が定義することができない高度領域では描かれていない。



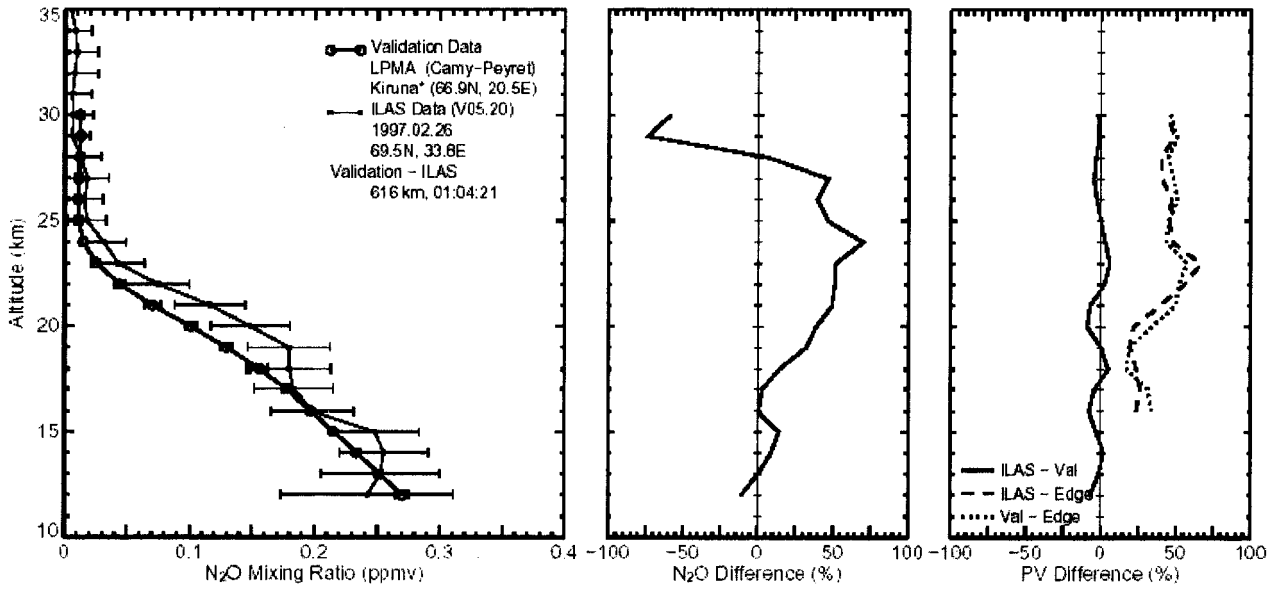
(c) ILAS vs LPMA



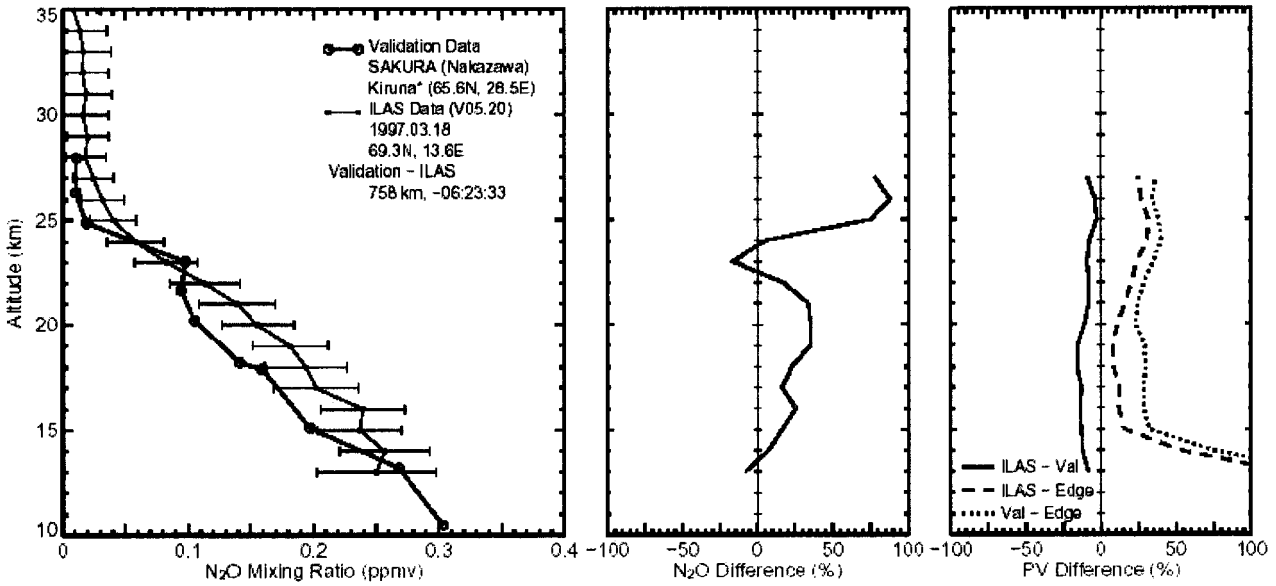
(d) ILAS vs SAKURA



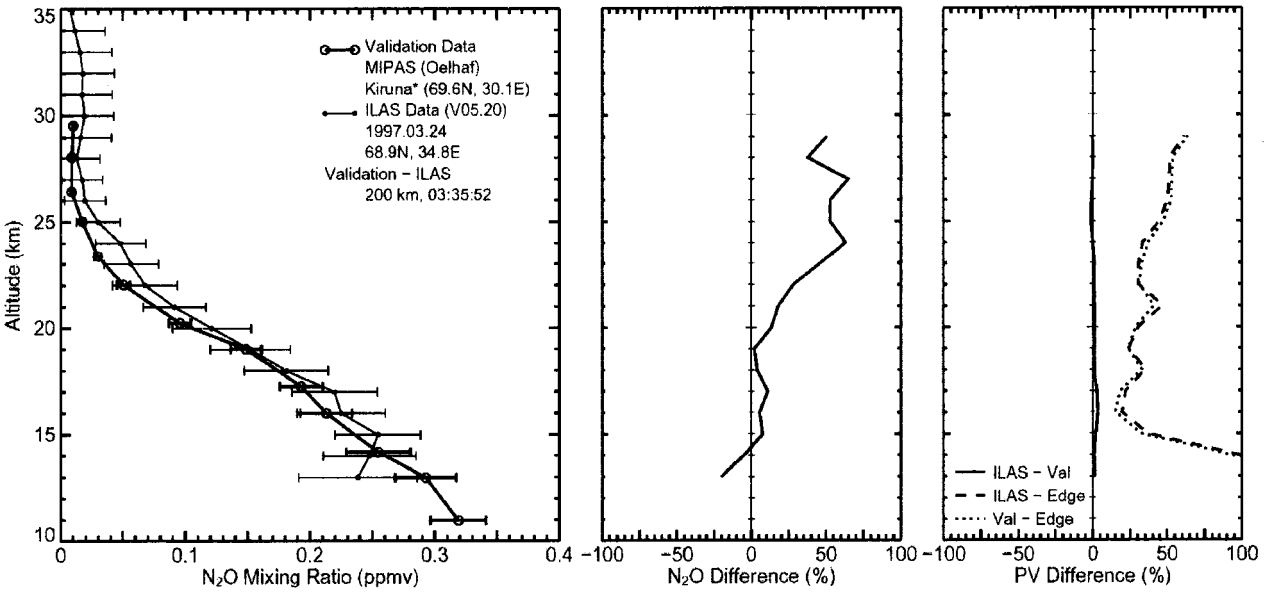
(e) ILAS vs ASTRID



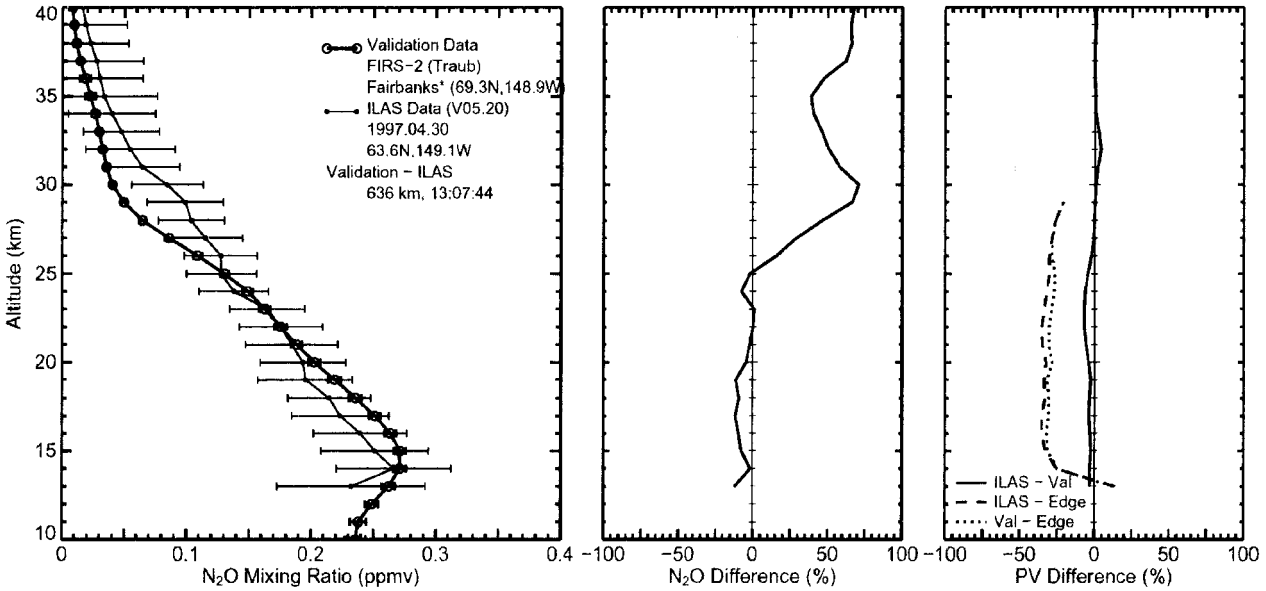
(f) ILAS vs LPMA



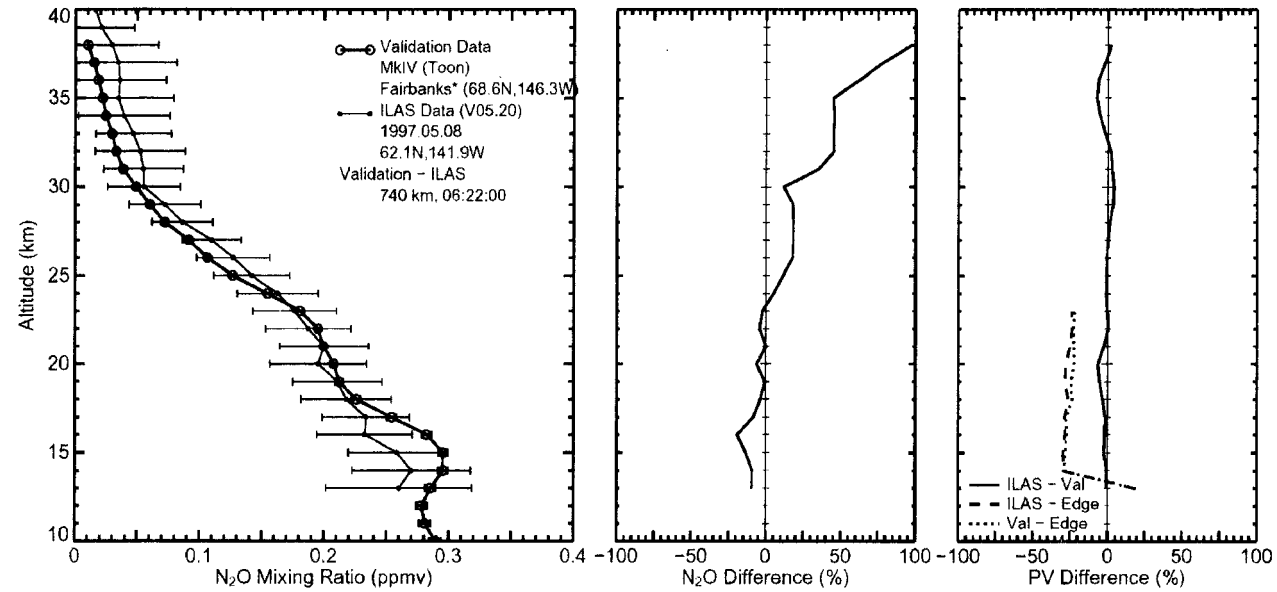
(g) ILAS vs SAKURA



(h) ILAS vs MIPAS



(i) ILAS vs FIRS-2



(j) ILAS vs MkIV

値の差が非常に小さかったからである。両者のN_2Oは、高度14～22 kmで相対差が10%未満と良い一致を示した。ILASの最低観測高度である高度13 kmでは、差は-40%である。この高度では、約180 ppbvという異常に低い混合比の値がILASに出ている。高度23 kmより上層ではILASはSAKURAより大きな値（50%以上）を示している（中央の図）が、図6.1bでも見られたように絶対値の差は小さい（左側の図）。

数日後の2月25日に行われたグラブサンプラーASTRIDによる２回目の観測は、PV値の差から見て理想的な比較測定値を提供してくれた（図6.1e）。混合比の差は、高度13～20 kmで10%未満である。高度21 kmより上層では、ILASはASTRID測定値に見られる鉛直方向の振動をトレースしていない。

2月26日のILASとLPMAの２度目の比較では（図6.1f）、PV値の差が小さいにもかかわらず、ILASがほとんどの高度でLPMAより大きな値を示した。

20日後の3月18日、クライオジェニックサンプラーSAKURAの２度目の測定が行われた（図6.1g）。ほとんどの高度でILASの値はSAKURAより大きく、相対差は10%以上である。この差のいくらかは極渦エッジに対する位置の差によると考えられる。すなわち、ILASが示すより高いN_2O混合比は、ILASの測定位置のPV値がより低い、すなわち極渦エッジにより近い、ことに対応している。高度23 kmでSAKURAの値が高いことを除けば、高度15～28 kmで両者の混合比鉛直プロファイルはよく合っている。

3月24日のILASとMIPASリモートセンシング放射測定を比較すると（図6.1h）、高度14～20 kmで両者は良く合っており、相対差は10%未満である。高度21 km以上における混合比の鉛直プロファイルの形はよく類似しているが（左側の図）、ILASはMIPASに対し高度25 m付近で約60%に達する高いバイアスを示す（中央の図）。PVの差が全高度で非常に小さいことに注意されたい。これは、どちらの測定も力学的に同じ空気塊をサンプリングしていたことを意味する。ILASの最低観測高度である高度13 kmでは、ILASは約240 ppbvという異常に低い値を示している。

一般に、これらの高緯度地域での冬季の測定は、大気状態の変化に影響される。極渦エッジ近傍のN_2O量の変化が、各測定間の観測高度に依存した差に対する説明になりうるだろう。しかしながら、各図の右側の図に示唆されていたように、N_2O量の差は、極渦エッジに対する測定位置の差が小さければ小さいだろう。

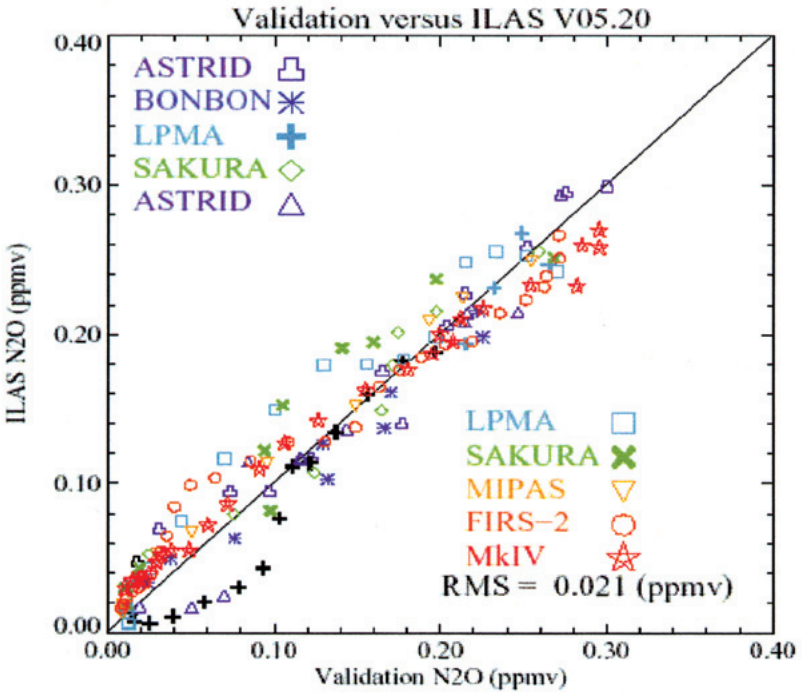
気球検証実験の２番目の２セットが、極渦外側の1997年の4月,5月、アラスカのFairbanksにおいて実施された（図6.1i-j）。4月30日にFIRS-2放射型分光計が高度40 kmまで飛揚された（図6.1i）。FIRS-2に対するILASの相対差は、高度14～25 kmでは-10%～0%であったが、高度26 km以上では大きくプラスに転じ、高度30 kmでは70%に達する。5月8日に検証飛揚したMkIV太陽掩蔽分光計では、高度13～23 kmでは差が-20～+0%、高度24～30 kmでは+20%未満であった（図6.1j）。MkIV、FIRS-2両方が、高度24 km以下ではILASの測定値よりも小さいが、それより上層ではILASより大きい。

Fairbanksでの２つの検証実験は、これに対応するILAS測定と同様、極渦の影響を受けていない気団の中で実施された。その極渦は1997年の5月初めまで北欧、ロシア上空で継続した [Toon *et al.*, 1999] 。このことは、図6.1iおよび図6.1jのPV差（%）が小さいという事実からも示唆される。

総括のために、プレート6.5 に有効な比較ペアすべてを用いたILAS N_2O値と気球による

N_2O値の相関散布図を示す。この図から、上述のように、ILAS測定値と気球測定値が良く一致していることが確認される。LMPAとの差が大きいのは、主に極渦エッジに対する相対的な測定位置がILASと異なっていることによるものである（PV差が15%以上の黒色の印を参照）。高度15～30 kmにおけるILASN_2O測定値は、さまざまな手法の気球測定値との比較により、2乗平均値の平方根（RMS）誤差で約21 ppbv以内に収まる（プレート6-5参照）。Yokota *et al.* [本技術資料 第２章] の表6.1にもILAS観測値のaccuracyの目安として示されているが、参考のため、選択された高度におけるN_2Oの相対差D値の平均を以下に示す。かっこ内は選択された比較対象である。

高度15 kmで-5%（8例：ASTRID,LPMA, SAKURA, ASTRID, SAKURA, MIPAS, FIRS-2, MkIV）
高度20 kmで2%（8例：ASTRID, BONBON, SAKURA, ASTRID, SAKURA, MIPAS, FIRS-2, MkIV）
高度25 kmで3%（5例：ASTRID, SAKURA, SAKURA, FIRS-2, MIPAS）
高度30 kmで41%（2例：FIRS-2, MkIV）



プレート6-5　ILAS Ver. 5.20 N_2Oデータに対する比較可能なすべてのN_2O気球観測データの相関。黒色のマークはPV相対差が15%以上のデータを示す。気球データに対するILASデータの黒色データを除いた2乗平均値の平方根（RMS）は0.021 ppmv。

極渦エッジ付近のN_2O濃度の空間的急勾配を考慮に入れると、高度15～25 kmにおけるILAS N_2O測定値は、検証実験測定値の約10%以内におさまると結論できる。最低高度に限って言えば、測定値は正しくないかもしれない。というのは、この高度では太陽追尾の初め／終わりの判断を誤る可能性があるからである。図6.1の非常識に低い混合比に示されているように、このようなことはN_2Oデータにより頻繁に現れる。

6.5.3 CH_4

CH_4についての最初の6セットの気球検証実験は、大部分が極渦の内側にあった1997年2月と3月のスウェーデン、Kirunaで実施された（図6.2a-f）。2月11日、ILASのCH_4混合比はクライオジェニックサンプラーBONBONに比べて高く、PVの差が5%未満である高度15～30 km（高度20 kmを除く）において、～30%の相対差があった（図6.2a）。高度24 kmの最上部では、ILASの値はBONBONより約50%大きい（中央の図）。

数日後の2月14日、気球太陽掩蔽測定のLPMA（図6.2b）はILASのCH_4データに対し大きな相対差を示し、ILASデータは高度23 kmより下層では大きく、高度23 kmより上層では小さかった。LPMAデータに対するILASの相対差のプロファイルとPVの差のプロファイルの高度約22 km以上においては、N_2Oで見られたような妥当な関が、CH_4についても見られる。

その8日後の2月22日、クライオジェニックサンプラーSAKURAとILASは、どちらも極渦の内側でPVの差が非常に小さい状況で測定を行ったため、理想的な比較データが得られた（図6.2c）。CH_4混合比の鉛直プロファイルは、ILASとSAKURAで形が類似しているが、バイアスがあってILASの方が高い。相対差は（中央の図）高度と共に増し、高度14 kmで10%、高度23～25 kmで50%である。最も低い観測高度である13 kmでの差は約-15%で、ここではILASは約1.35 ppmvという異常に低い混合比を示した（図6.1dN_2Oの似た特徴をみよ）。

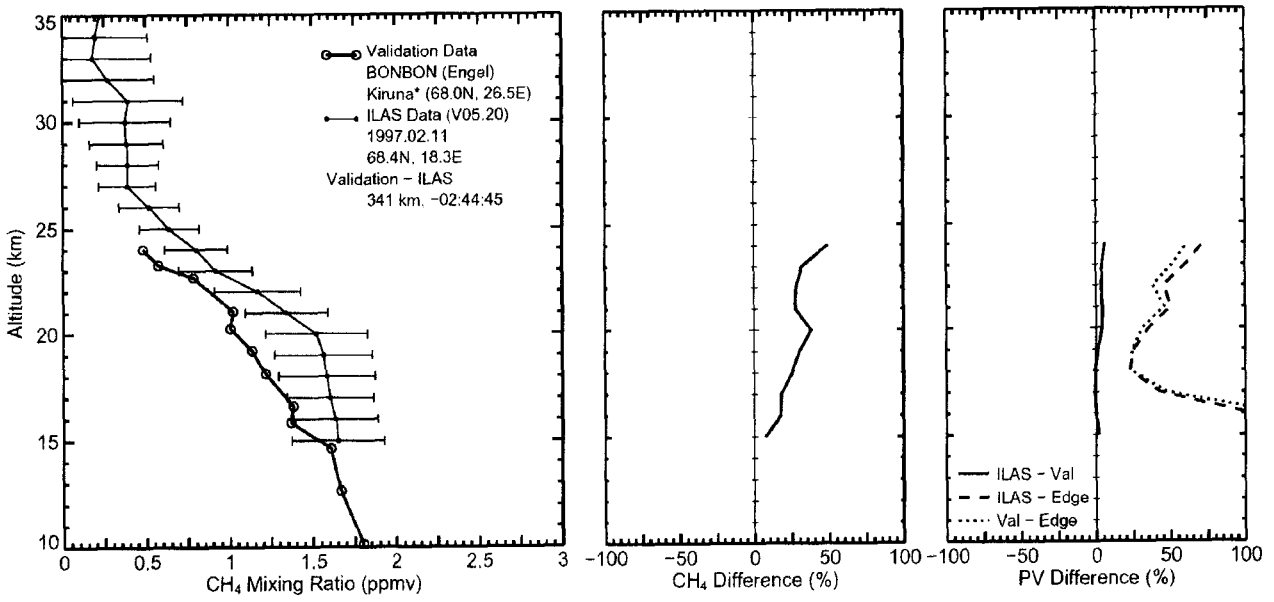
2月26日についてのILASとLPMAの比較では、ILASがほとんどの高度で大きい値を示している。

さらに20日後の3月18日、SAKURAによる２度目のクライオジェニックサンプリングが行われた（図6.2e）。相対差はほとんどの高度で25%以上で、ILASがSAKURAより大きい。この差のある部分は、極渦のエッジに対する位置の違いによっていると考えられる。すなわち、ILASのCH_4混合比がより高いのはILASの測定位置のPV値がより小さい、すなわち極渦のエッジにより近いことに対応する。両者の鉛直プロファイルは、高度23 km付近でSAKURAがより高い値を示すことを除けば、高度15～28 kmで形が類似している。この比較結果は、同じフライトのN_2Oの比較結果（図6.1g）に非常によく似ている。

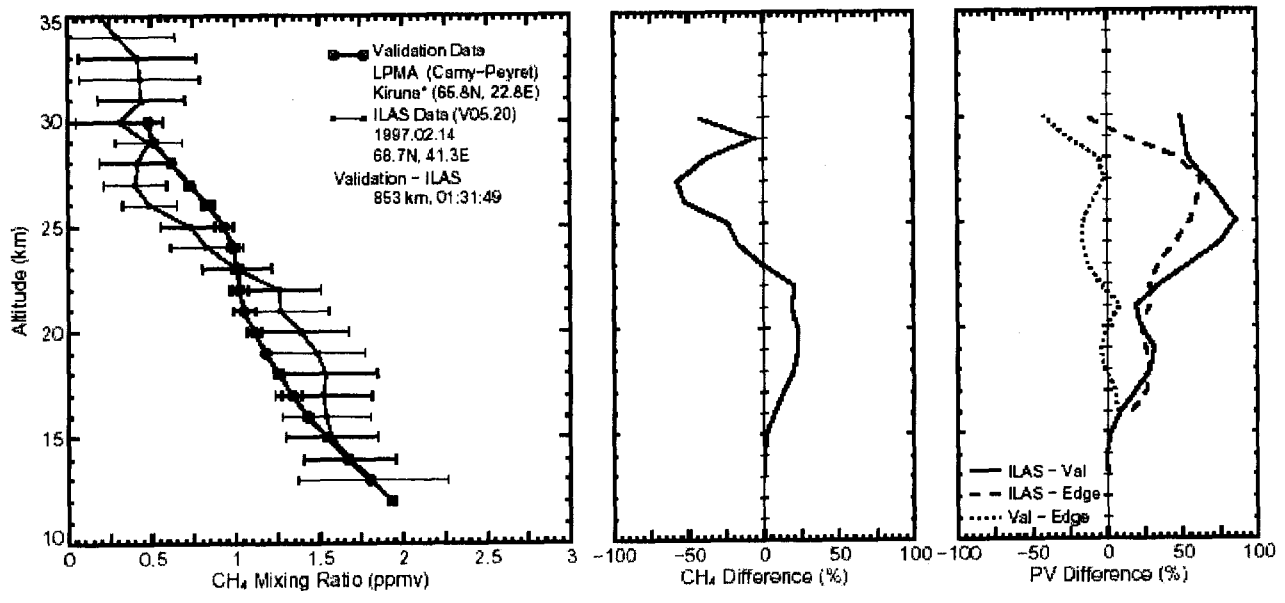
3月24日のILASとMIPASリモートセンシング放射測定を比較すると（図6.2f）、高度13～20 kmで両者は良く合っており、差は15%未満である。高度21 km以上における混合比の絶対差は、高度13～20 kmと同様であるが（左側の図）、相対差（%）は高度25 m付近で約40%に達する（中央の図）。全高度でPVの差が非常に小さいことに注意されたい。この比較結果は、同じフライトのN_2Oの比較結果（図6.1g）に非常によく似ている。

概して、これらの高緯度地域での冬季の測定は、CH_4かN_2Oのいかんを問わず、大気の変動に影響されていると考えられる。極渦エッジ付近のCH_4量の変動は、6.5.2節で見たN_2Oについてもそうであったように、高度に依存する測定値間の差に対する理にかなった説明になる。ILASのCH_4の正のバイアスは、N_2Oの差がそうであったように極渦エッジに対する測定位置の違いのみによっているのではなく、この後6.9節で議論するように、ILAS CH_4データの未解決の問題にも起因している。

MkIV検証フライトは、極渦の外側にあった1997年5月8日、アラスカのFairbanksで実施された（図6.2g）。MkIVは、ILASとかなり良く合っていた。相対差（%）は、高度13～37 kmで+25%～0%でほとんどの高度でILASの混合比の方が大きかった。Fairbanksにおける



(a) ILAS vs BONBON



(b) ILAS vs LPMA

図 6.2(1)　図 6.1 と同じ、ただし、CH_4

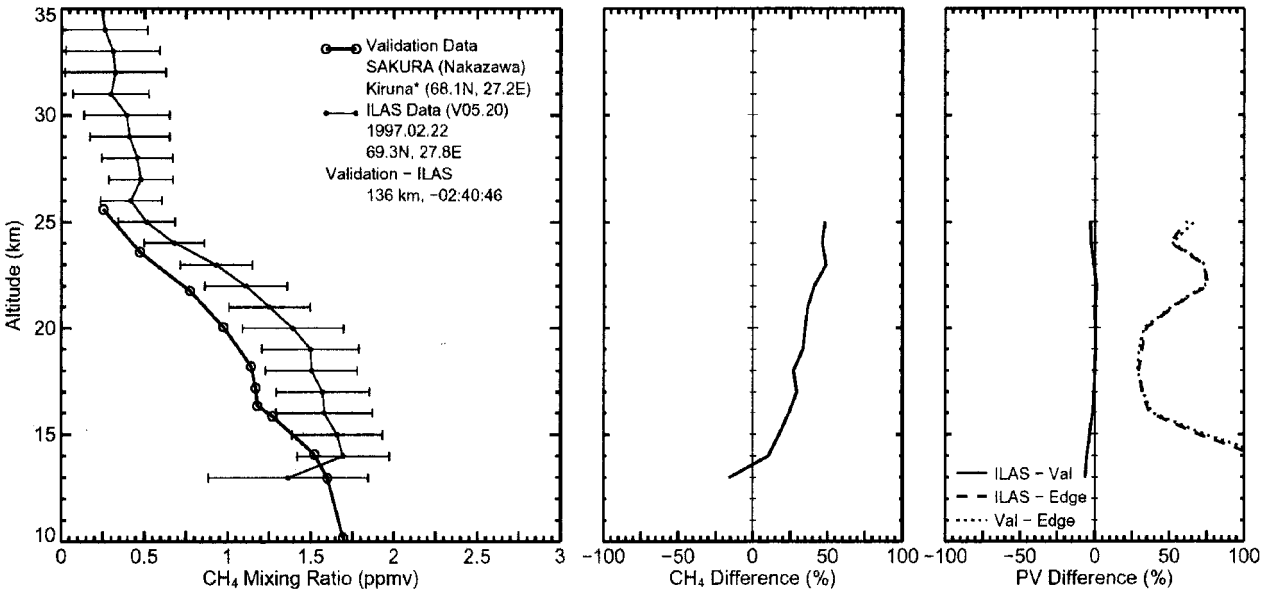
検証実験データのエラーバーの内容は以下の通りである。

(a) BONBON　　エラーバーを示さず；3 ppbv または 0.2-0.6% precision；1% accuracy

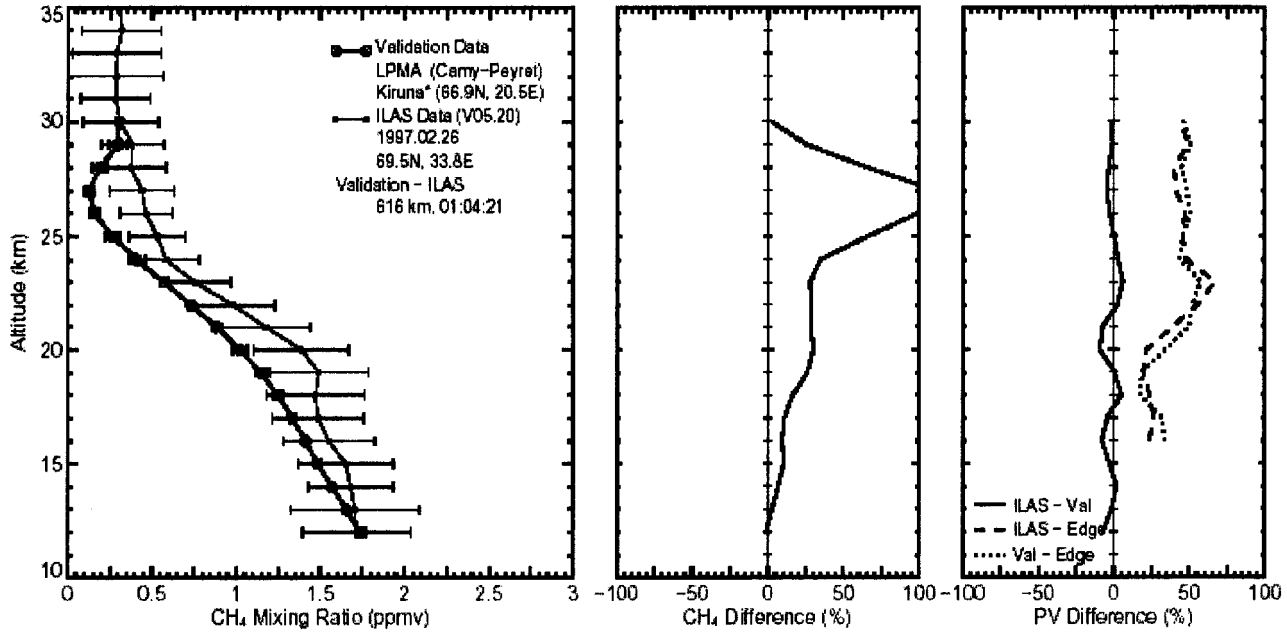
(b)(d) LPMA, (f) MIPAS, (g) FIRS-2, (h) MkIV　　1 σ precision

(c)(e) SAKURA　エラーバーを示さず；0.2% precision & accuracy

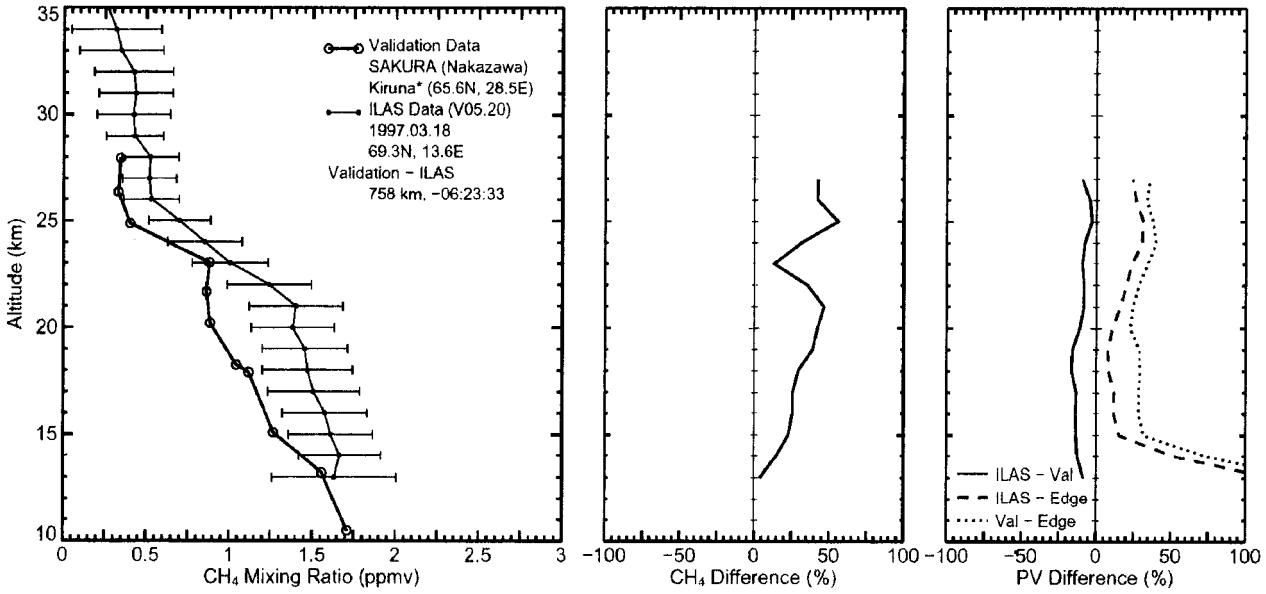
(a)～(f) の高度範囲は 10～30 km、(g)の高度範囲は 10～40 km。



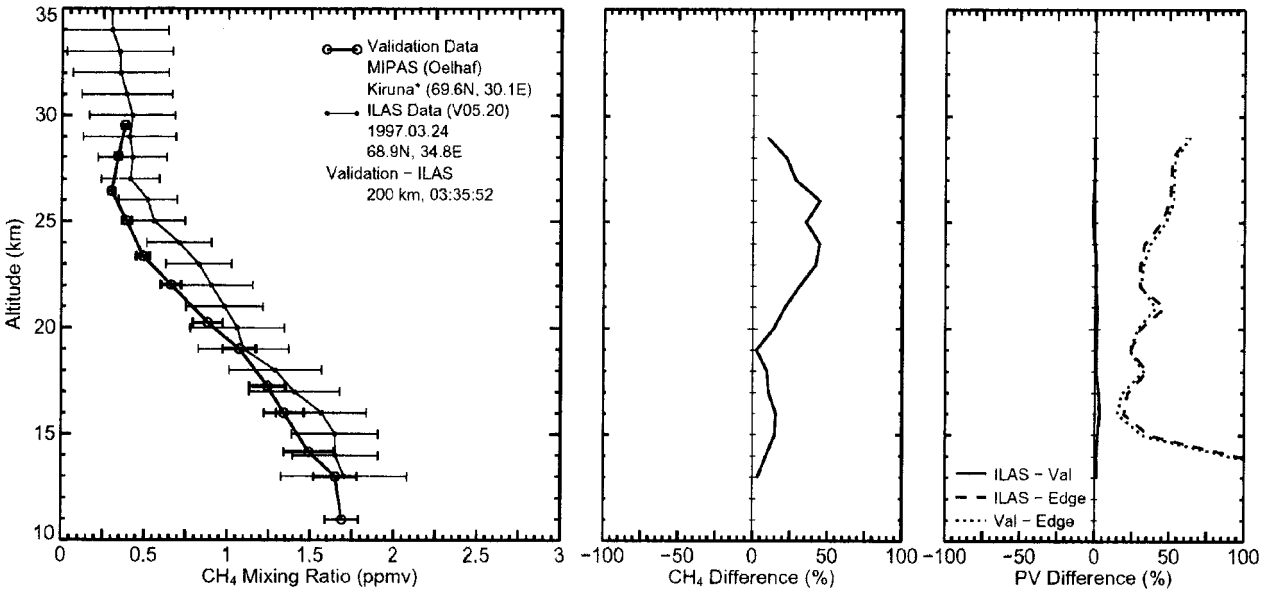
(c) ILAS vs SAKURA



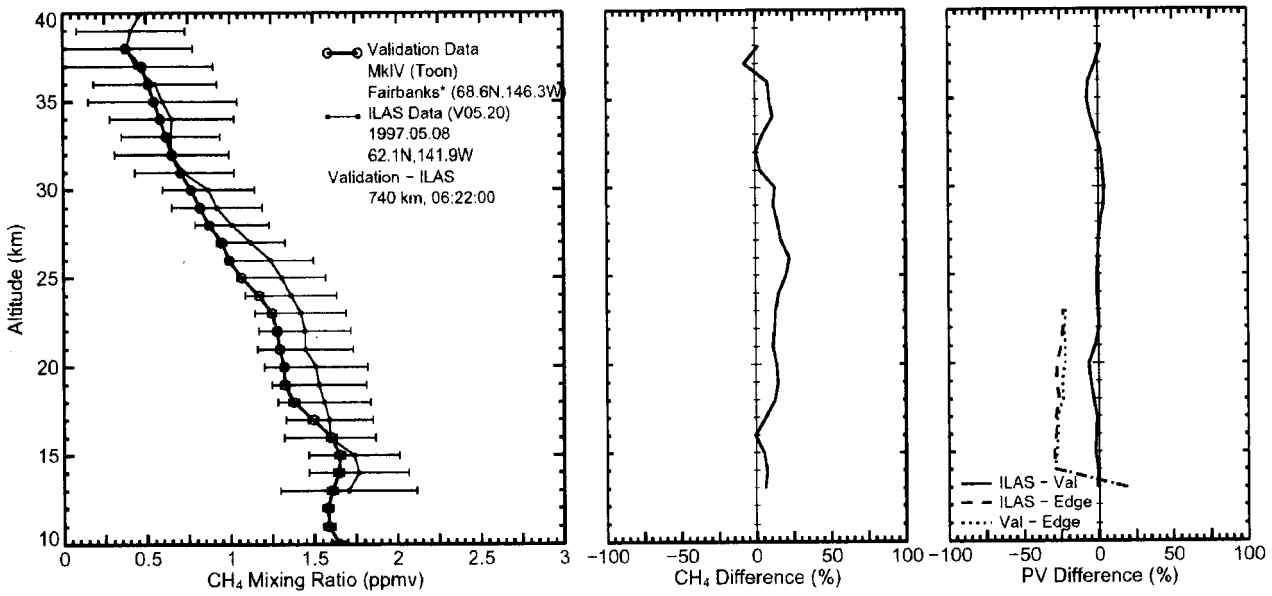
(d) ILAS vs LPMA



(e) ILAS vs SAKURA



(f) ILAS vs MIPAS

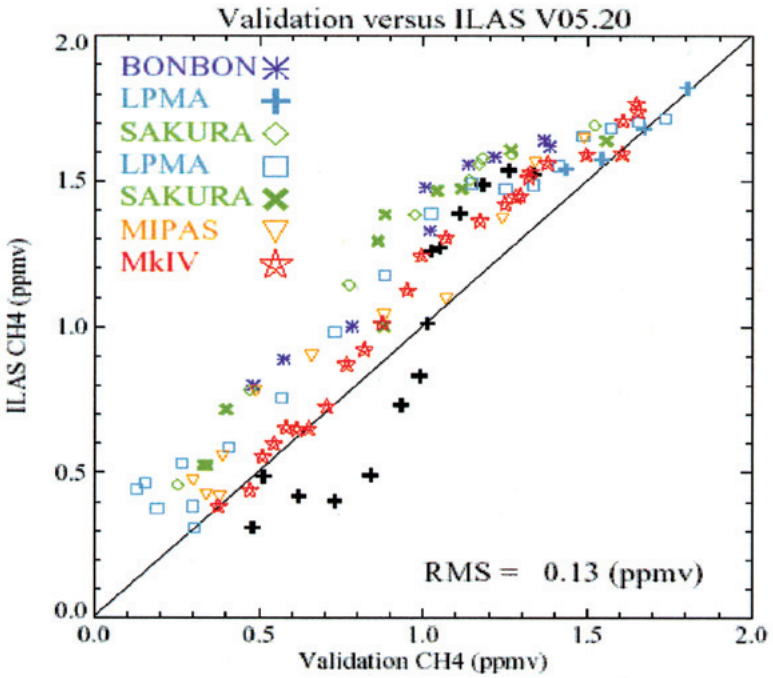


(g) ILAS vs MkIV

MkIV気球測定は、これに対応するILAS測定と同様、極渦に影響されていない気団中で実施された。BONBON、SAKURA、LPMA、MIPASによる検証値より、MkIVによる検証値の方がCH_4データにおける差がより小さい。これは、6.5.4節でも議論するが、リトリーバルの質の季節変化によると考えられる。

CH_4データ検証の要約の意味で、有効なすべての比較ペアを用いて、ILASに対する気球観測値の散布図をプレート6-6に示す。この散布図により、CH_4についてはバイアスがあり、ILASが気球に対してより高い値を示すことが確認された。ILASのLPMAに対する負のバイアス（図6.2bの23 km以上のデータに対応する）は、極渦の境界に対する位置の違いに主に依っている（PVの相対差が15%を示す黒色の印をを参照）。高度15～40 kmにおけるILAS CH_4観測値は、種々の気球搭載型測定センサー観測値の2乗平均値の平方根（RMS）誤差で約0.13 ppmv以内におさまる。Yokota *et al.* [本技術資料 第２章] の表2.1にもILAS観測値のaccuracyの目安として示されているが、参考のため、選択された高度におけるCH_4の相対差D値の平均を以下に示す。かっこ内は選択された比較対象である。

高度15 kmで12%（6例：BONBON, LPMA, SAKURA, SAKURA, MIPAS, MkIV）
高度20 kmで29%（5例：BONBON, SAKURA, SAKURA, MIPAS, MkIV）
高度25 kmで37%（3例：SAKURA, MIPAS, MkIV）
高度30 kmで13%（1例： MkIV）



プレート 6-6　プレート 6-5 と同じ、ただし、ILAS Ver. 5.20 CH_4 データと気球による CH_4 データ

気球データに対する ILAS データの黒色データを除いた 2 乗平均値の平方根（RM は 0.13 ppmv）。

高度20～30 kmにおけるILASのCH_4観測値は検証実験観測値に比べ混合比が30～40%高い。

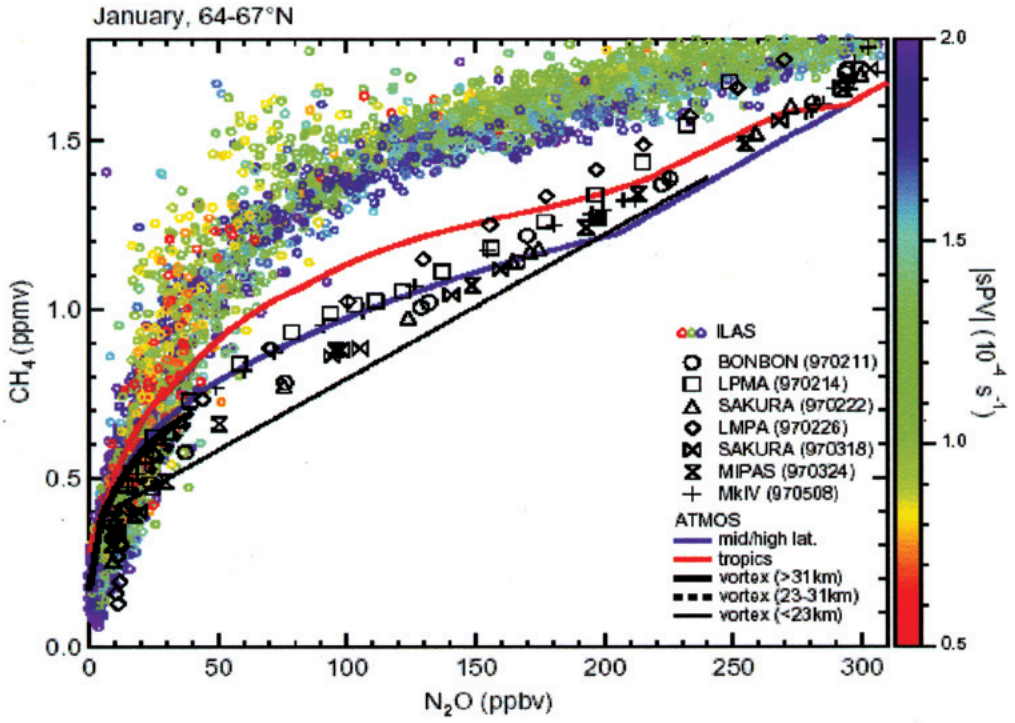
6.5.4　N_2OとCH_4の相関プロット

このサブセクションではILASデータ質の季節変化を調べるために、ILASと気球観測のN_2O－CH_4相関を比較する。N_2OとCH_4観測値を検証するために、このようなアプローチはよく行われる [e.g., Roche *et al.*, 1996 ; Chang *et al.*, 1996] 。というのは、相関がコンパクト（密集度が高い）からである[たとえばPlumb and Ko, 1992]。ILASデータはまず月毎半球ごとに選り分けられ、温位380 K（～高度16 km）から1500 K（～高度42 km）の間の温位面（12面）上に内挿される。このデータは「規格化された渦位」（sPV）と呼ばれ、静的安定度の標準値でPVを割った概念的な渦度の単位で表現されるPV [Dunkerton and Delisi, 1986]で、ラベル付けされる。この渦位(sPV)はUKMO同化データから計算される。プレート6-7には両半球の冬季、夏季の代表として、1997年の1月と6月についてのみが示されている。このプレートには表6.3のリストに上がっているILAS検証のための７つの気球観測の結果も示されている。また、ATMOS（Atmospheric Trace Molecule Spectrometer; スペースシャトル搭載の高分解能FTIR分光計）によって得られた中高緯度、熱帯、極渦内部における相関がこれらのプレートに5つの曲線（中／高緯度、熱帯、3つの極渦曲線）で示されている。これらの曲線は3次多項式で表される [Michelsen *et al.*, 1998]。熱帯と中高緯度の ATMOS N_2O-CH_4の相関の差異はこれらの領域間にバリアが存在するためである[e.g., Plumb,

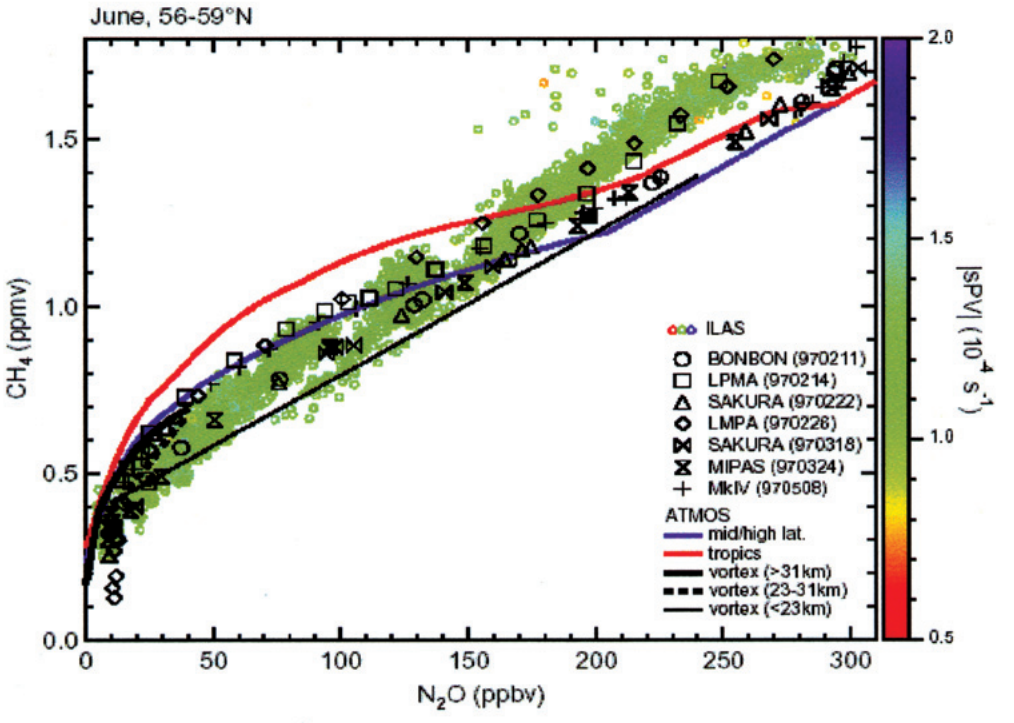
1996; Herman *et al.*, 1998; およびその中に含まれる参考文献] 。また、極渦と中緯度の間に見られる差異は、よく知られているように、また、すでに本論文中で議論されているように、極渦のエッジにあるバリアの存在によっている。Michelsen *et al.* [1998] で指摘されるように、ATMOS N_2O-CH_4の相関は、熱帯や中高緯度において、年（1992、1993、1994）や季節（3月／4月、11月）や半球（北半球、南半球）にほとんど依存しないことが分かっている。極渦内部の高度23 km以下で測定されたATMOS N_2O-CH_4の直線的な相関は、上部成層圏からの下降と下部成層圏の極渦外の空気の準水平混合によると考えられる [たとえば、Herman *et al.*, 1998 ; Michelsen *et al.*, 1998] 。Herman *et al.* [1998] によると、1997年3月8日のMkIV観測は極渦外部で行われた。このとき北極の極渦は完全に崩壊しておらず、MkIV観測結果とATMOS 中緯度の曲線は良い一致を示している（プレート6-7のMkIVの印を参照）。その他の６つの気球観測は極渦内部で行われ、データは中緯度と極渦の曲線の間にほぼおさまっていて、このことは Kondo *et al.* [1999] で議論されるているように、1997年の北極渦の典型的な"mixing line"を示唆している。ATMOSの熱帯の曲線はこの相関の一種の上限を与えるものである。プレート6-7の約200 ppbvより大きいN_2Oに対するATMOS熱帯曲線を越えるいくつかの気球データは測定に問題があると考えられる。

北半球１月の冬の相関（プレート 6-7a）では、北極の極渦内で得られた ILAS データ（紫色の高い sPV 値で表される）は、キルナで得られた気球データと一致し、ATMOS 極渦曲線の範囲内に落ちるはずである。南半球６月の冬の相関（プレート 6-7b）では、南極の極渦内で得られた ILAS データは"mixing line"付近に分布するだろう。しかし、それは渦内部の下降流の範囲や、渦の境界を通過する輸送に対するバリアの強さに大きく依存し、年々変化するものであろう[Michelsen *et al.*, 1998] 。北半球の１月の冬（プレート 6-7a）や南半球の 6 月の冬（プレート 6-7d）に見られるように、冬季には、N_2O が 20-30 ppbv より大きくなる（高度約 25～35 km 以下にあたる）領域における ILAS CH_4 混合比は、ATMOS と気球の N_2O 混合比との相関から期待される値よりかなり大きくなる（最大で 0.5 ppmv
以上）。プレート6-7a、7dに見られるILAS CH_4の高いバイアスは秋季と冬季（北半球：1996年11月～1997年2月、南半球：1997年3月～6月）で顕著である（図は示さない）：ILASの連続観測期間が1996年11月～1997年6月に限られていることに注意されたい。

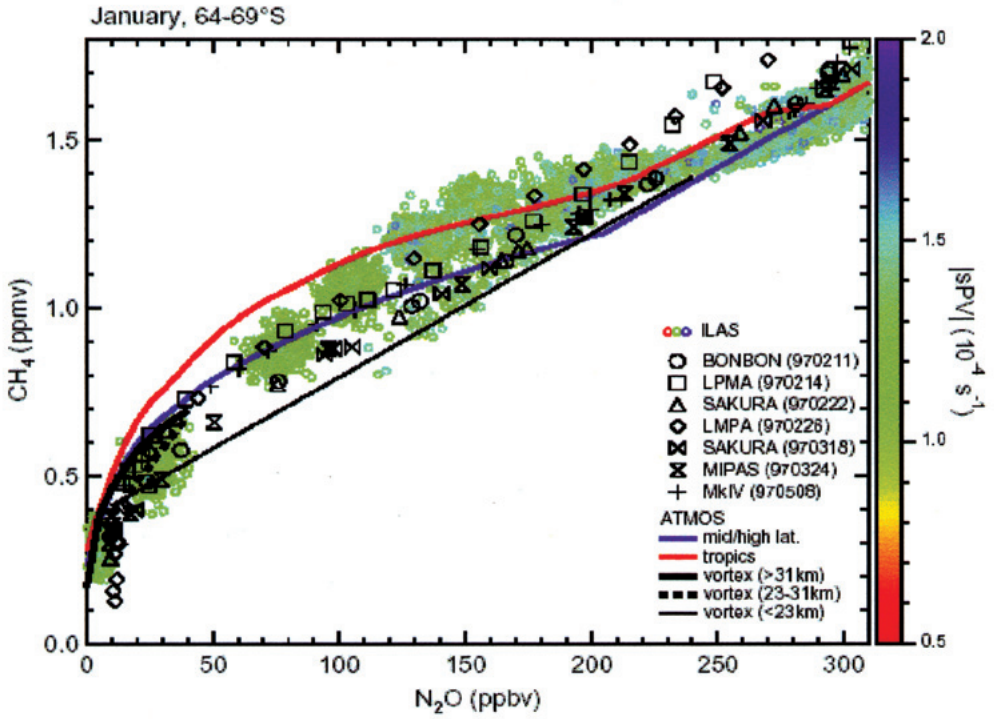
北半球６月（プレート 6-7b）と南半球１月（プレート 6-7c）に見られる ILAS の夏季の相関は、いくらかの例外を除いて、N_2O 混合比の大半の領域で妥当である。例外としては、ILAS の N_2O データに対する CH_4 データについて、高いバイアス、すなわち ATMOS の熱帯の相関上限を超えるような大きい値が、N_2O の値が約 150 ppbv より大きくなる（相当する高度は約～18-24 km 以下）データ内にのみ見られることである。プレート 6-7b、6-7c に似た特徴が北半球の春季と夏季（1997 年 4 月～6 月）や南半球の夏季（1996 年 11 月～1997 年 2 月）にも顕著である（図は示さない）。北半球と南半球の夏の相関の相異（プレート 7b, c）の原因は不明である。


January, 64-67°N
CH4 (ppmv)
N2O (ppbv)
|sPV| (10-4 s-1)
ILAS
BONBON (970211)
LPMA (970214)
SAKURA (970222)
LMPA (970226)
SAKURA (970318)
MIPAS (970324)
MkIV (970508)
ATMOS
mid/high lat.
tropics
vortex (>31km)
vortex (23-31km)
vortex (<23km)

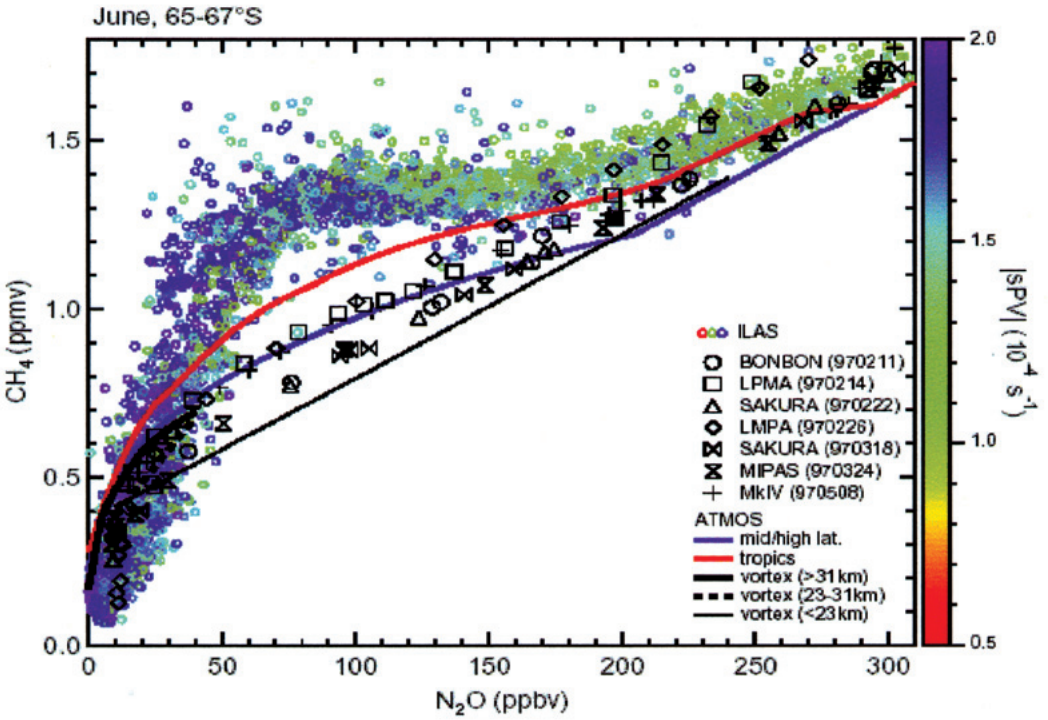
(a)


June, 56-59°N
CH4 (ppmv)
N2O (ppbv)
|sPV| (10-4 s-1)
ILAS
BONBON (970211)
LPMA (970214)
SAKURA (970222)
LMPA (970226)
SAKURA (970318)
MIPAS (970324)
MkIV (970508)
ATMOS
mid/high lat.
tropics
vortex (>31km)
vortex (23-31km)
vortex (<23km)

(b)


January, 64-69°S
CH4 (ppmv)
N2O (ppbv)
|sPV| (10-4 s-1)
ILAS
BONBON (970211)
LPMA (970214)
SAKURA (970222)
LMPA (970226)
SAKURA (970318)
MIPAS (970324)
MkIV (970508)
ATMOS
mid/high lat.
tropics
vortex (>31km)
vortex (23-31km)
vortex (<23km)

(c)


June, 65-67°S
CH4 (ppmv)
N2O (ppbv)
|sPV| (10-4 s-1)
ILAS
BONBON (970211)
LPMA (970214)
SAKURA (970222)
LMPA (970226)
SAKURA (970318)
MIPAS (970324)
MkIV (970508)
ATMOS
mid/high lat.
tropics
vortex (>31km)
vortex (23-31km)
vortex (<23km)

(d)

プレート 6-7(1)　N_2O の混合比に対してプロットした CH_4 の混合比。カラーの丸印は ILAS 測定値から求めた相関

(a)1997 年 1 月の 64N～67N ; (b)1997 年 6 月の 56N～59N。ILAS データは 380～1500 K の間の 12 の等温位レベルで内挿して得られたものである。ILAS データはスケーリングされた渦位（sPV）の絶対値でカラースケールのよるラベル付けをされている。0.5 x $10^{-4}s^{-1}$ 以下もしくは 2.0 x $10^{-4}s^{-1}$ 以上の sPV 値を持つ ILAS データは、それぞれこれらの値の色と同じ色である。ILAS データの検証のための気球観測で得られた 7 つの相関も示した。異なる場所で測定された ATMOS データの相関も 5 つの曲線で表した（Michelsen *et al.*, 1998）。

プレート 6-7(2)　(c) 1997 年 1 月の 64S～69S ; (d) 1997 年 6 月の 65S～67S。

このように、ILAS CH_4の高いバイアスの度合いは季節に依存するようである。すなわち、冬の方が高いバイアスになる。この季節依存性の原因は現在研究中である。相関図中に見られたこの特徴は前節（6.5.3）で言及した事項に一致している。つまり、冬季にILAS N_2O は検証データと良く一致し、ILAS CH_4データは下部成層圏の検証データより大きくなる（CH_4の高いバイアス）。

6.6 航空機および地上同時観測データとの比較

6.6.1 POLARIS ミッションにおける ER-2 航空機同時観測データとの N_2O, CH_4 の比較

夏季の極成層圏においてオゾンの減少を引き起こす光化学および輸送過程の研究のため、POLARIS（Photochemistry of Ozone Loss in the Arctic Region in Summer ）ミッションが 1997 年 4～9 月に行われた [Newman *et al.*, 1999] 。２種類の N_2O、CH_4 観測の装置が NASA の ER-2 航空機に搭載され、POLARIS ミッションの期間中活用された。ひとつは、NASA の JPL（Jet Propulsion Laboratory ジェット推進研究所）で開発された ALIAS（Aircraft Laser Infrared Absorption Spectrometer）である [Webster *et al.*, 1994] 。ALIAS は N_2O、CH_4 を各々1%と 5%の精度で測定する。また正確さは 5%と見積もられる [Herman *et al.*, 1998] 。もうひとつは、NOAA/CMDL （Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory）で開発された ACATS-IV （Airborne Chromatograph for Atmospheric Trace Species-IV）である [Elkins *et al.*, 1996] 。これら 2 つに加え、NASA/ARC (Ames Research Center)が開発した ATLAS（Airborne Tunable diode Laser Absorption Spectrometer）と呼ばれる N_2O 測定器[Podolske and Lowenstein, 1993]や NCAR (National Center for Atmospheric Research)で開発されたガスクロマトグラフィと質量分光計による実験室での分析に資するための空気採取器で WAS（Whole Air canister Sampler ）と呼ばれる CH_4 のみを測定する測定器もある[Schauffler *et al.*, 1998]。

ALIAS の N_2O 測定値は ATLAS と ACATS-IV と比較された[Fahey and Newman, 1997]。３者の相関は 0.95 以上と非常に高かった。ALIAS と ATLAS の N_2O の測定間の標準偏差は～6 ppbv（～2%）、系統差は 4%以下である。ACATS-IV測定は ALIAS と ATLAS と相関がよく、標準偏差は～10 ppbv（～3%）、系統差は 3%以下である。ALIAS と ACATS-

IV の CH_4 測定は 0.98 以上の非常に高い相関であり、標準偏差は～2%、系統偏差も～2%であった。ALIAS、ACATS-IV、ATLAS 測定間の詳細な比較は、Hurst *et al.* [2000]が行っている。WAS 測定のサンプリング頻度は高くないが、CH_4 測定の確度は ALIAS または ACATS-IV と同程度、またはより高い。

POLARIS ER-2 ミッションの最初の観測期間である 1997 年 4 月下旬～5 月中旬において、ILAS と POLARIS の観測が同期した事例について表 6.4 にまとめる。このミッションはアラスカの Fairbanks を基地として行われた。全部で 9 プロファイルが ILAS の掩蔽観測による接点位置との最小距離が 500 km 未満、時間差が±12 時間以内であった。POLARIS ER-2 とそれに対応する ILAS の観測は、極渦の影響を受けない領域のデータを使用した。この極渦については、5 節でも述べたように、1997 年 5 月初めにヨーロッパ北部とロシア上空で長く継続したものである。

図 6.3 に ILAS N_2O と POLARIS の航空機による測定との比較(左)とその差を百分率で表したもの(右)を示す。ここでの百分率 (D) は (1) 式中の"Validation"の部分を"POLARIS"に置き換えることで定義される。図 6.3 の左には、ILAS と POLARIS（ALIAS、ACATS-IV、ATLAS の平均）の平均鉛直プロファイルと標準偏差、最大、最小値の高度分布を示す。これによると、高度 20 km 以下の全ての高度で、ILAS は POLARIS に比べ混合比の値が小さくなっている。高度 16 km 以下では両者の差が標準偏差より大きくなっていることから、この差は有意であると思われる。図 6.3 の右の百分率による差をみると、高度 14～20 km で約-6%～-12%となっている。最低高度 13 kmでの ILAS の非常識に低い混合比は、6.5.2 節で述べたように、太陽追尾の初めの誤判断によると思われる。このように、POLARIS の航空機観測データは高度 20 km 以下で ILAS N_2O より混合比が小さくなる特徴を示し、これらは 1997 年 4 月 30 日の FIRS-2 と 1997 年 5 月 8 日の MkIVによる 2 回の気球観測と ILAS の比較結果にも見られた。

図 6.4 に ILAS による CH_4 と POLARIS の航空機による検証実験との比較(左)とその差を百分率で表したもの(右)を示す。図 6.4 の左には、ILAS と POLARIS（ALIAS、 ACATS-IV、 WAS の平均）の平均値と標準偏差、最大、最小値の高度分布を示す。これによると、高度 20 km 以下の全ての高度で、ILAS は POLARIS に比べ混合比の値が大きくなっている。両者の差が標準偏差より大きくなっていることから、この差は有意であると思われる。図 6.4 の右の百分率による差をみると、高度 13～20 km で約+7%～+15%となっている。このように POLARIS データは高度 20 km 以下で ILAS CH_4 より混合比が大きくなる特徴を示し、これらは 1997 年 4 月から 5 月のフェアバンクスでの 2 回の気球観測データにも見られた。また、同様の特徴が 1997 年 2 月から 3 月のキルナでの 6 回の気球観測データにも見られることに注目すべきである。

表 6.4　1997 年に行われた 4 つの POLARIS 観測器による検証データと ILAS で測定された亜酸化窒素（N_2O）およびメタン（CH_4）データの対応表

比較事例の選択条件は、POLARIS ER-2 によるプロファイルと ILAS の掩蔽接点との最小距離が 500 km 未満、測定時刻の差が±12 時間以内とした。なお、比較が行われた高度域と最小距離を示しておいた。

Date MM/DD	Altitude Range	Nitrous Oxide (N_2O) Instrument	Minimum Distance	Methane (CH_4) Instrument	Minimum Distance
04/26	13-19 km	ALIAS,ACATS-IV,ATLAS	268.1 km	ALIAS, ACATS-IV	267.7 km
04/30	13-19 km	ALIAS,ACATS-IV,ATLAS	137.7 km	ALIAS, ACATS-IV, WAS	137.7 km
04/30	13-19 km	ALIAS,ACATS-IV,ATLAS	159.0 km	ALIAS, ACATS-IV	159.0 km
05/02	13-20 km	ALIAS,ACATS-IV,ATLAS	393.0 km	ALIAS, ACATS-IV	393.2 km
05/06	14-20 km	ALIAS,ATLAS	293.8 km	ALIAS, ACATS-IV	293.8 km
05/09	13-19 km	ALIAS,ACATS-IV,ATLAS	362.2 km	ALIAS, ACATS-IV	358.9 km
05/09	13-19 km	ALIAS,ACATS-IV,ATLAS	431.6 km	ALIAS, ACATS-IV, WAS	407.0 km
05/11	13-19 km	ALIAS,ACATS-IV	425.8 km	ALIAS, ACATS-IV	425.8 km
05/11	13-19 km	ALIAS,ACATS-IV,ATLAS	392.5 km	ALIAS, ACATS-IV, WAS	392.5 km

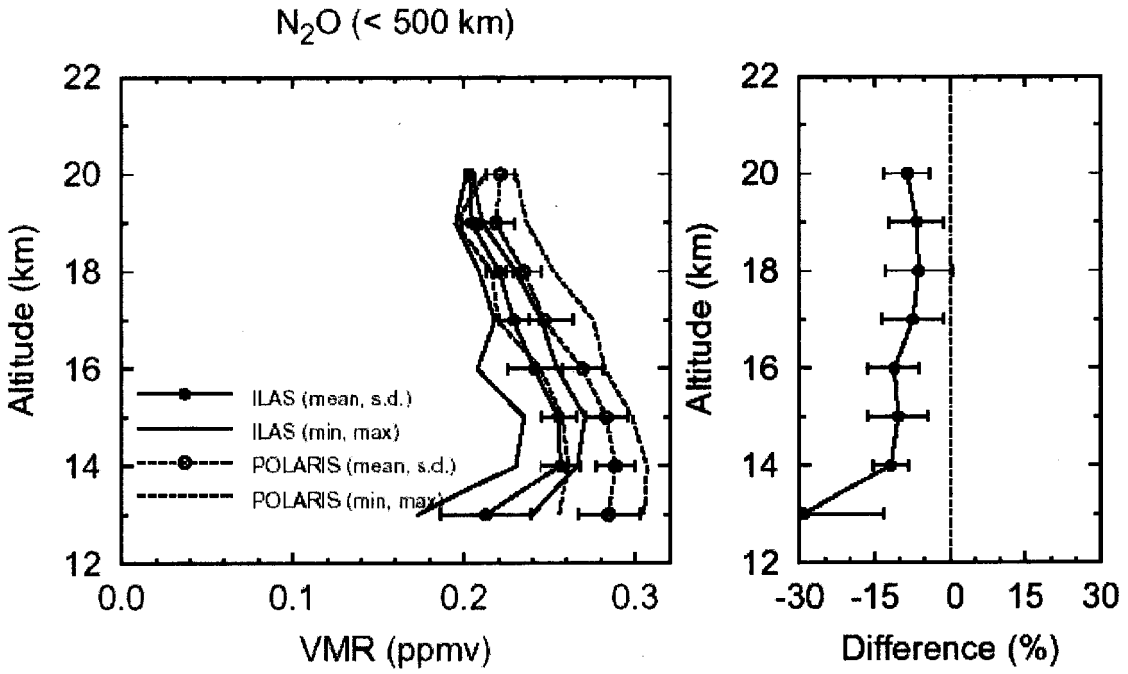


図 6.3　ILAS Ver. 5.20 による N_2O の体積混合比の鉛直プロファイルと POLARIS による検証実験データとの比較

ここで用いたすべての比較ペアは表 6.4 に示してある。左側の図には、平均プロファイル、各高度での 1σ の分散、最大値・最小値を ILAS、POLARIS（ALIAS, ACATS-IV, ATLAS センサーの平均）の両方について示した。右側の図には、相対差（定義は本文参照）とその 1σ 標準偏差を示した。

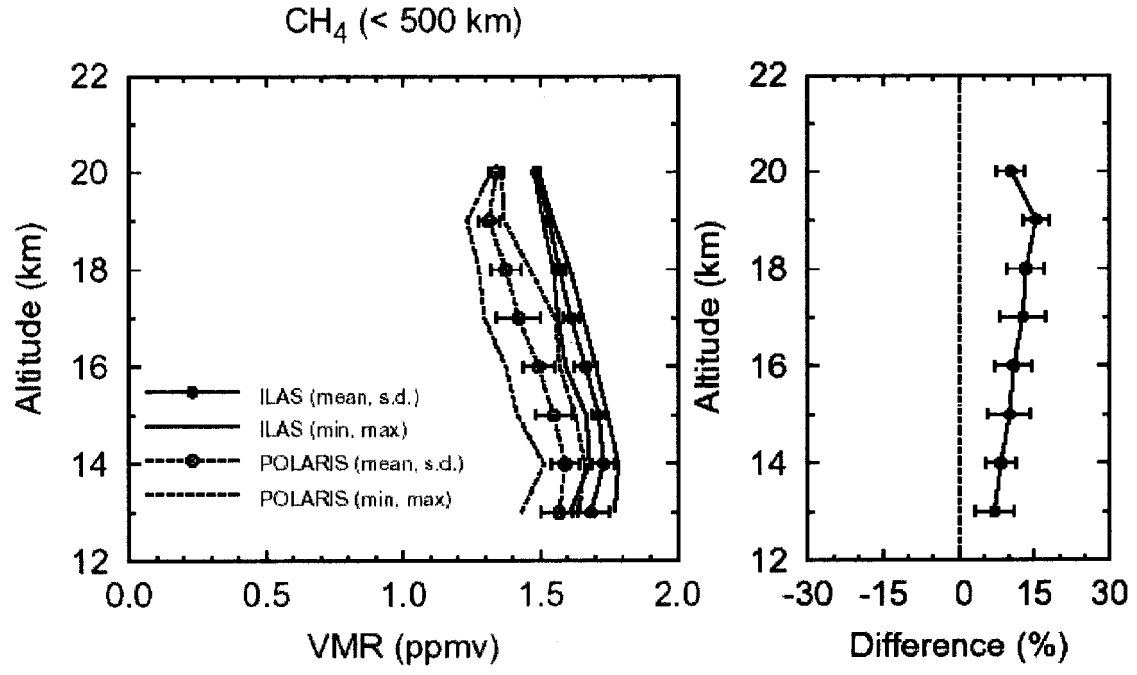


図 6.4　図 6.3 と同じ、ただし、CH_4

POLARIS の測定については、すべてのデータ（ALIAS, ACATS-IV, WAS センサーを含む）が平均されている。

6.6.2 地上観測器 TDLHS との N_2O の比較

ILAS N_2O プロファイル検証のため、TDLHS（Tunable Diode Laser Heterodyne Spectrometer）と呼ばれる地上観測がファエアバンクス近くのポーカーフラットで行われ[Murata *et al.*, 1999]、分解能 0.0013 cm^{-1} で 1143 cm^{-1}、1180 cm^{-1}、1195 cm^{-1} 付近の太陽光吸収スペクトルを計測した。測定の確度は 5 km の高度分解能で 15%である。表 6.5 は 1997 年 3 月から 5 月の同期観測のまとめである。全部で 6 つの TDLHS プロファイルが、ILAS の掩蔽観測による接点位置との最小距離が 1000 km 未満、時間差が±12 時間以内基準でみつかった。TDLHS とそれに対応する ILAS の観測は、極渦の影響を受けない領域のデータを使用した。この極渦については、6.5 節でも述べた。

表 6.5　1997 年にアラスカのフェアバンクスに近い Poker Flat で TDLHS によって測定された N_2O 検証データと ILAS 測定値の対応表

比較事例の選択条件は、TDLHS によるプロファイルと ILAS の掩蔽接点との最小距離が 1000 km 未満、測定時刻の差が±12 時間以内とした。TDLHS の測定位置は、Poker Flat Research Range（65.12N, 147.47W）の所在地と考え、測定時刻は測定開始～終了の中間の時刻である。ILAS の測定位置における時刻は接線高度 20 km のときの値である。測定時の日付と時刻は、1997 年"MM/DD" および "hh:mm" の形式で UTC で示され、測定位置は北緯・西経で示されている。検証データと ILAS の測定時刻および測定位置の差（TDLHS - ILAS）は、"hh:mm" および距離 (km) で示した。

TDLHS		ILAS				Difference	
Date	Time	Date	Time	Lat	Lon	Time	Distance
03/05	00:03	03/05	02:51	69.65	145.85	-02:48	507 km
04/18	21:09	04/19	04:19	65.49	128.84	-07:11	862 km
04/21	22:30	04/22	06:20	64.97	157.10	-07:50	451 km
04/26	03:01	04/26	06:12	64.27	153.01	-03:11	279 km
05/06	22:55	05/07	06:16	62.32	149.10	-07:21	321 km
05/08	21:08	05/09	07:02	61.95	160.00	-09:54	711 km

図 6.5 に ILAS による N_2O と TDLHS による検証実験との比較(左)とその差を百分率で表したもの(右)を示す。図 6.5 の左には、ILAS と TDLHS の平均値と標準偏差、最大、最小値の高度分布を示す。図 6-5 の右の百分率による差をみると、高度 14～21 km で 10%以内である。高度 22 km 以上の全ての高度で、ILAS は TDLHS に比べ混合比の値が大きくなっているが、相対差は 15%以内で測定誤差内である。このように、TDLHS データは先述の POLARIS ER-2 や 2 つの気球測定（FIRS-2 および MKIV）との比較結果に見られる特徴を必ずしも示さない。

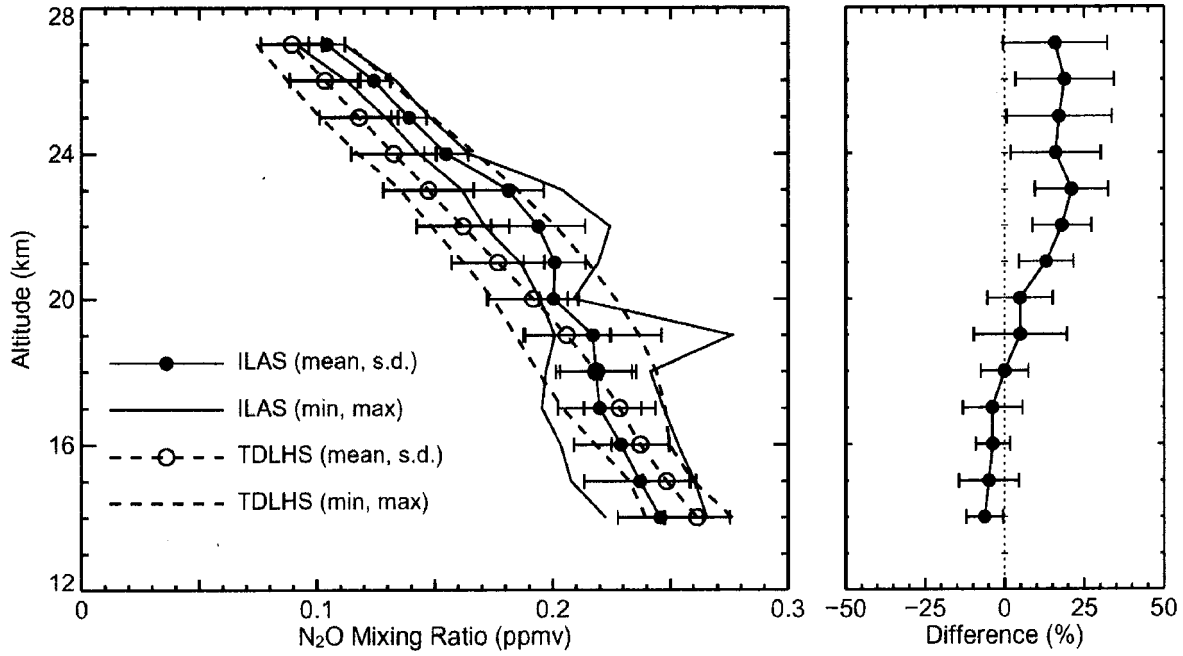


図 6.5　図 6.3 と同じ、ただし、ILAS と TDLHS の N_2O の測定の比較

ここで用いたすべての比較ペアは表 6.5 に示してある。

6.6.3 航空機測器 ASUR との N_2O の比較

ASUR（Airborne Submillimeter SIS Radiometer）は受動的なサブミリ波ヘテロダイン受信機で、624－654 GHz のスペクトル領域の成層圏トレーサーガスの大気放射を測定する[de Valk *et al.*, 1997]。測定器はドイツの Falcon 航空機に搭載された。下部成層圏での高度分解能は 8～10 km である。報告されている N_2O の誤差は高度 20 km で約±30%、24 km 以上で 100%を超える。誤差は、N_2O スペクトルに影響する酸素の強い吸収線に起因する不確実さを含んでいる。しかし、新しく使えるようになった周波数での最近の測定では、N_2O の accuracy がかなり改善されたことが示されている[Bremer *et al.*, 2001]。極渦の内側領域で行われた 2 つの同期観測を表 6.6 に示す。

表 6.6　スカンジナビア上空で 1997 年 ASUR により測定された N_2O 検証データと ILAS データの対応表

比較事例の選択条件は、ASUR によるプロファイルと ILAS の掩蔽接点との最小距離が 500 km 未満、測定時刻の差が±12 時間以内とした。ILAS の測定位置における時刻は接線高度 20 km のときの値である。測定時の日付と時刻は、1997 年"MM/DD" および "hh:mm" の形式で UTC で示され、測定位置は北緯・東経で示されている。検証データと ILAS の測定時刻および測定位置の差（ASUR - ILAS）は、"hh:mm" および距離 (km) で示した。

ASUR				ILAS				Difference	
Date	Time	Lat	Lon	Date	Time	Lat	Lon	Time	Distance
02/26	10:45	67.90	14.69	02/26	16:06	69.49	8.59	-05:21	302.53 km
02/26	11:05	65.88	12.74	02/26	16:06	69.49	8.59	-05:01	436.99 km

ASUR の測定に合わせるため、ILAS の高度分解能をなますために、UKMO データを利用して混合比データを分圧に変換した。高度 20, 24, 30 km に中心を持つ 11 km の高度ビンに含まれるデータを平均して、混合比を求めた。このプロファイルと同期した ASUR のプロファイルは図 6.6 の左に、相対差は右に示される。一般的な傾向は一致している。高度 20 km で-5 から 12%の一致である。

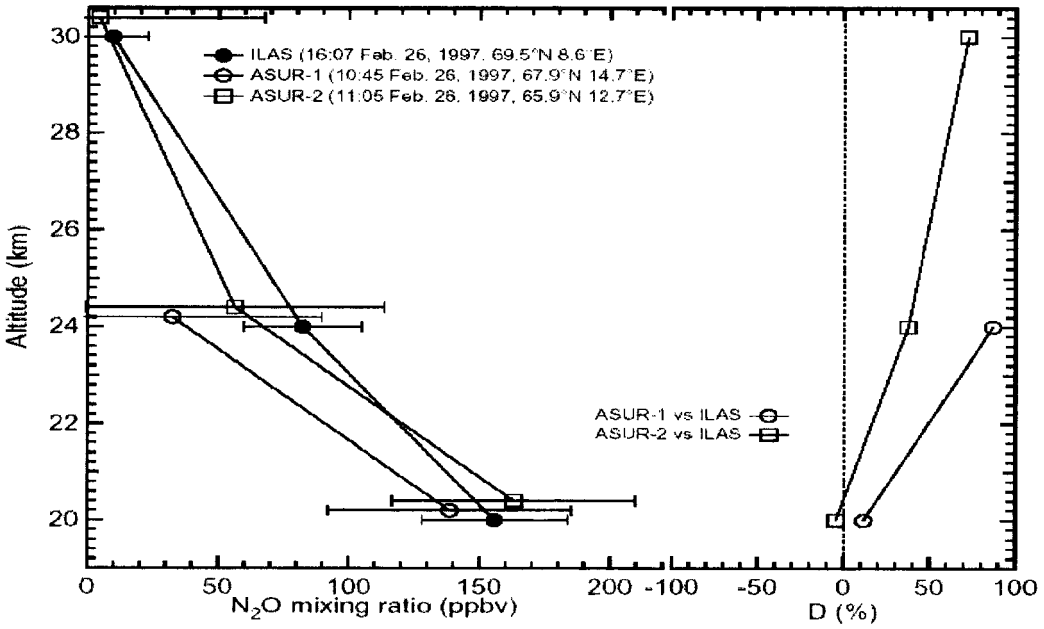


図 6.6　ILAS Ver. 5.20 による N_2O 体積混合比の鉛直プロファイルと ASUR による検証実験データの比較。

ここで用いたすべての比較ペアは表 6.6 に示した。エラーバーは、高度 20 km, 24 km, 30 km。ILAS データは、見やすくするために 0.2 km 上方にずらしてプロットしてある。左側の図は、ASUR（2 例）と ILAS（1 例）のプロファイル。右側の図は相対差。

6.7　HALOE による衛星の同時観測との CH_4 の比較

6.7.1　方法

この節では、1996 年 11 月～1997 年 6 月の ILAS の全連続観測期間について、ILAS Version 5.20 による CH_4 量と HALOE Version 19 による CH_4 量との比較を行う。HALOE の全データは、研究目的の使用について WWW サーバーから入手可能である。ILAS と HALOE の間で同期したデータを抽出するため、時間と空間距離の同期基準をそれぞれ±12 時間、距離 300 km とした。同期した観測データを探す際に、接線高度 20 km を基準とする測定位置・時間を各観測の代表値として用いた。HALOE は傾斜軌道で運用されているため、地球全域で太陽掩蔽が観測される。そのため、ILAS と同時に観測できる緯度は、季節に依存するものの、北半球では 57～72° 、南半球では 64～89° の ILAS がカバーする高緯度に限られる。上記の基準により、まず第 1 段階として HALOE と ILAS のペアが

202 組抽出された。同時観測の概要を期間毎に表 6.7 に示す。時間差の最大は 7.4 時間、距離差の最大は 248 kmであった。南半球(SH)における観測の同期は 1996 年 11 月から 1997 年 2 月に起こっており、北半球(NH)では 1997 年 3 月から 6 月に起こっている。ILAS については、北半球での観測はすべて日昇観測であり、南半球での観測はすべて日没観測であった。

表 6.7　ILAS と HALOE により測定されたメタン(CH_4)データの比較事例のまとめ
比較事例の選択条件は、両者の測定位置の距離が最大 300 km、測定時刻の差が最大 12 時間とした。比較事例数は全体で 202、南半球 118、北半球 84 である。

Period	No [1)]	Distance (km) [2)]	Time (h) [3)]	Hemisphere [4)]	Occultation Mode [5)]	
					ILAS	HALOE
1996						
Nov 19 - 24	40	172 (28)	1.8 (3.5, 0.0)	SH	SS	SR
Dec 10 - 16	39	204 (130)	1.6 (3.5, 0.0)	SH	SS	SS
1997						
Jan 28 - 31	17	178 (19)	4.5 (5.3, 3.8)	SH	SS	SR
Feb 18 - 20	22	165 (64)	0.5 (1.0, 0.1)	SH	SS	SS
Mar 24 - Apr 2	59	166 (23)	0.2 (0.5, 0.0)	NH	SR	SS
May 13 - 14	12	147 (9)	6.9 (7.4, 6.5)	NH	SR	SR
Jun 16 - 18	13	248 (197)	0.2 (0.4, 0.0)	NH	SR	SS

1) 一致事例数
2) 各事例の測定位置間距離の平均。最小距離をかっこ内に示した。
3) 各事例の測定時刻差の平均。最大の時間差と最小の時間差をそれぞれかっこ内に示した。
4) NH と SH はそれぞれ、北半球と南半球で起こっ太陽掩蔽現象を意味する 。
5) SR と SS はそれぞれ、太陽掩蔽時に ILAS と HALOE からみた日昇と日没を意味する。

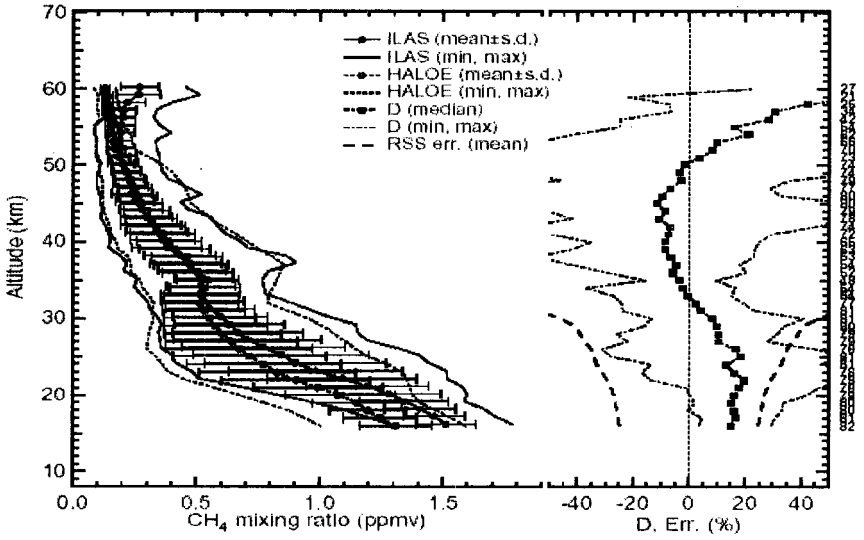
極渦に関して、２つの衛星の相対的な位置関係を考慮して、上記の基準で選ばれたデータのペアを以下の手順でさらに選別した。まず、ILAS とそれに対応する同期観測データにについて、接線高度による代表測定位置と時間での PV を計算し、PV と温位を各グリッドごとに計算する。そして、これらのデータを双方の観測データ（ILAS とそれに同期した HALOE データ）について、高度 1 km の幾何学的なグリッドで時間、空間的に内挿する。ここで、相対的な差(%)を高度 1 km のグリッドごとに

$$[PV(ILAS)-PV(HALOE)]/\{[PV(ILAS)+PV(HALOE)]/2\}\times 100$$

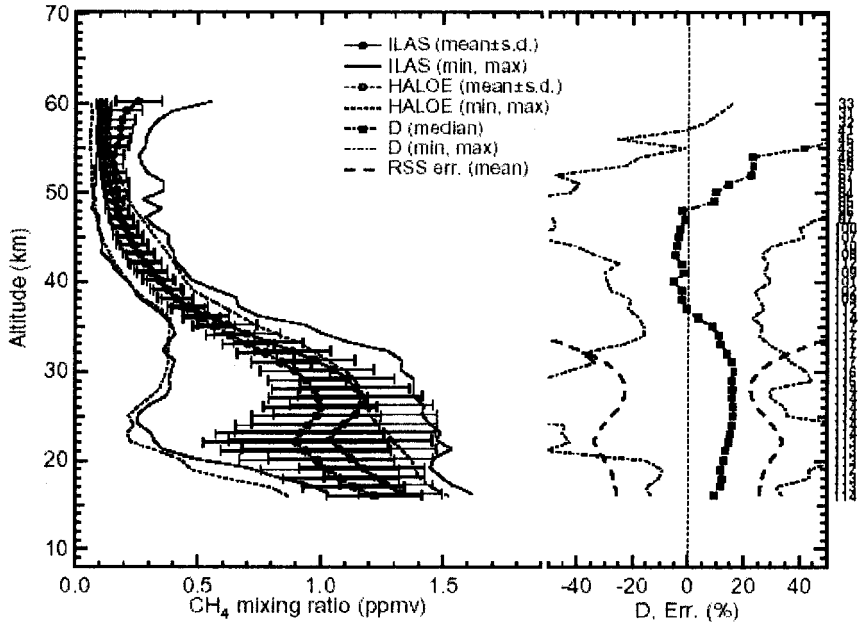
と定義する。PV(ILAS)と PV(HALOE)はその時間、位置における ILAS とそれに同期した検証データの PV の値を表す。もし、相対的な差が連続する 3 km 以上の高度グリッドで±15%を越える場合、これらの高度のデータを検証解析データから除外する。

6.7.2 比較

図 6.7a は 1997 年 3～6 月の北極域における、ILAS と HALOE による CH_4 体積混合比に関する 84 個の高度分布の比較結果、図 6.7b は 1996 年 11 月～1997 年 2 月の南極域における 118 個の同比較結果である。図 6.7 の右側は、ILAS と HALOE 間の百分率による差(D)の中央値で、その最大、最小値も併せて示す。ここに、D は相対的な%差で、式（1）において、“Validation”を“HALOE”として置き換えたものである。0(%)の線をはさんで対称な２つの破線は、各高度における ILAS データと HALOE データの誤差の RSS（root-sum-square）の平均で、RSS は ILAS と HALOE の観測誤差の合計の平方根で定義される。北極の春から夏における比較（図 6.7a）と南極の晩春から夏における比較（図 6.7b）をみると、全体的に 55 km以下のほとんどの高度で差が 20%未満で良く一致している。北極での比較（図 6.7a）では、成層圏で類似した鉛直構造を示している。すなわち、高度 35 km でおおよそ一定となっていること以外に高度とともに混合比は小さくなる。高度 16～25 km では、ILAS が HALOE より約 0.1～0.2 ppmv 大きい値となっている。高度 30-55 km では、ILAS の値は HALOE とほぼ等しい。南極での比較（図 6.7b）においても成層圏では ILAS、HALOE ともに類似した鉛直分布となっている。すなわち、高度 16～22 km では高度とともに混合比は小さくなり、高度 22～27 km では高度とともに混合比は大きくなり、高度 27～55 km では高度とともに混合比は小さくなる。高度 55 km 以上では、南北両半球の北半球で ILAS の混合比が高度とともに大きくなるのに対し、HALOE では高度に対してほぼ一定を示す。



(a)



(b)

図 6.7　ILAS と HALOE の CH_4 の比較　(a)：上段（北半球）　(b)：下段（南半球）

ここで用いたすべての比較ペアは、北半球 (a) については表 6.7、南半球 (b) については表 6.7 に示した。左側の図は、ILAS Ver. 5.20 と HALOE Ver. 19 により導出された CH_4 混合比の各平均プロファイル。比較したケースをすべて用いた。ILAS データは、見やすくするために 0.2 km 上方にずらしてプロットしてある。各高度で比較可能な測定値のペアの数を図の右側に示した。バーは各高度での 1 σ 標準偏差である。最大値と最小値は、ILAS については実線、HALOE については破線で示されている。右側の図で、ILAS と HALOE の CH_4 混合比の間にあり、D（定義は本文参照）というラベルが付されているプロファイルは、個々の相対差の中央値である。データの最大値・最小値は一点鎖線、ゼロラインに対して対象な破線は、ILAS と HALOE の測定値の個々の 2 乗和全誤差の平均の平方根で RSS err.というラベルが付されている（定義は本文参照）。

表 6.7 に示した観測が同時に行われた期間の中で、両半球それぞれで最もデータ数が多かった期間における比較結果（3 月 24 日～4 月 2 日、北半球、59 プロファイルと 1996 年 11 月 19～24 日、南半球、40 プロファイル）は、基本的に図 6.7a, b と同様である(図は示さない)。

まとめると、ILAS Version 5.20 は HALOE Version 19 よりも下部・中部成層圏でより高い混合比を与えるが、測定誤差を考慮すると比較結果は良好であったと言える。

最近、Danilin *et al.* [2001]も、トラジェクトリーハンティングよる方法（"Lagrangian approach"）と同時観測の結果を直に比較する方法（"traditional approach"）を用いて、1996 年 11 月（南半球）の ILAS Version 5.20 と HALOE Version 19 による CH_4 の比較を行った。比較の結果、誤差は下部成層圏で ILAS に 10-15%の正のオフセットがあるものの、高度 30-50 km の範囲で 10%未満という良い一致を示した。この結果は、本稿の結果と一致している。

6.8 ILAS データの平均値の変動と UARS 参照大気との比較

6.8.1 データと方法

気球搭載、航空機搭載、地上設置のセンサーによる検証実験データや ILAS と同時に観測された他の衛星データとの比較に加えて、ILAS で得られた N_2O と CH_4 の月別帯状平均値の変動と UARS 参照大気との比較を検証解析の一部として行った。この種の比較は本質的にあまり定量的とはいえないが、データ全体を定性的に評価するには非常に有用である。とりわけ N_2O については、ILAS と同時に観測された利用可能な衛星データがないため有益である。これによって、他の衛星データによって作られた N_2O と CH_4 の月平均値および既知の大気循環特性に照らして ILAS 測定値の整合性が評価される。

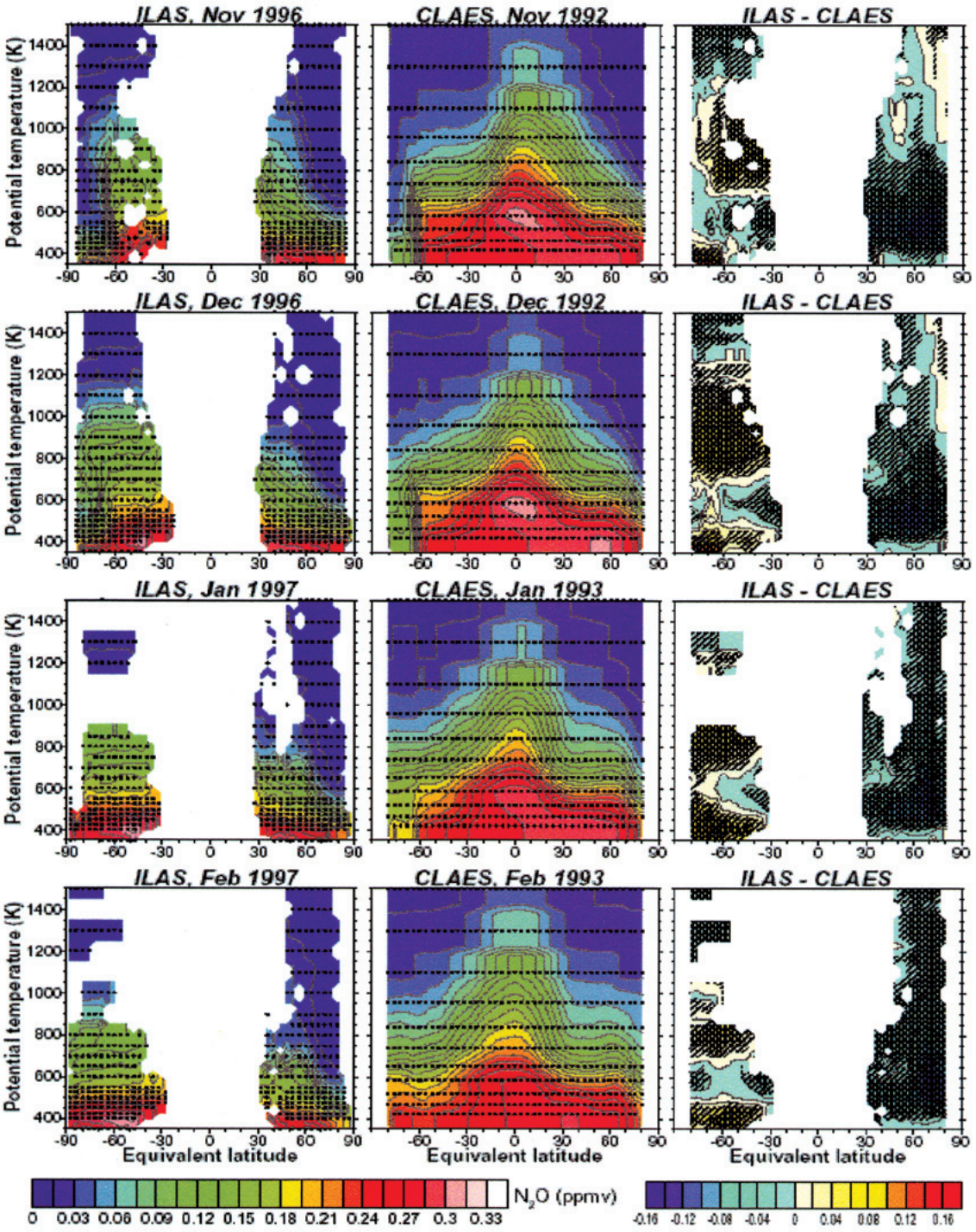
ILAS の測定は地理的に狭い緯度帯（北緯 57～72 度、南緯 64～89 度）で行われたが、輸送の経度方向の非対称性により、力学的にみれば広い範囲の大気をカバーしていた。測定値を温位面上の PV から求めた相当緯度（equivalent latitude (EL)）によって選り分けると、ILAS データは両半球において、およそ緯度 30 度から極までをカバーすることになる。

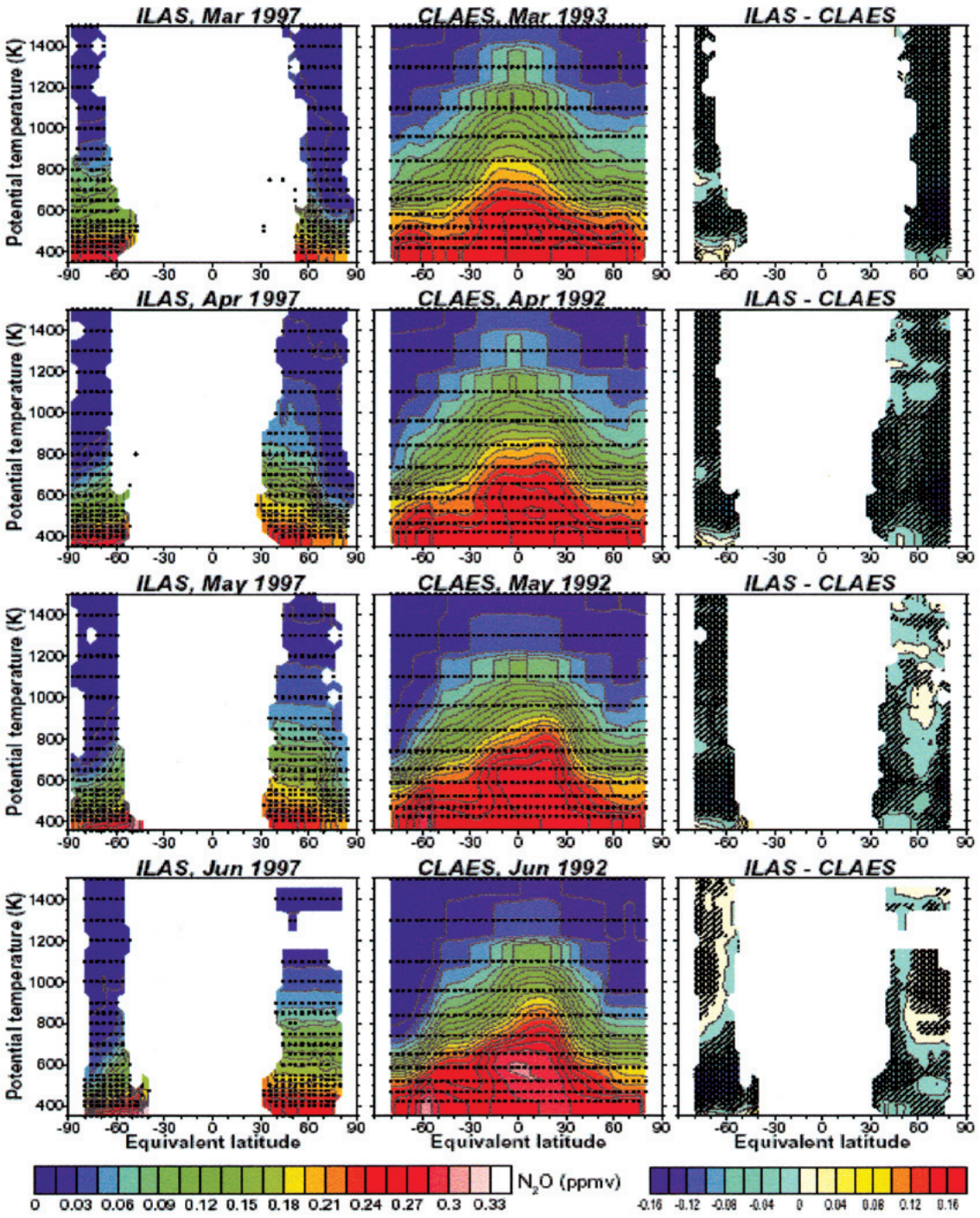
ILAS の N_2O と CH_4 の月平均値を、温位と相当緯度の関数として計算した。ILAS の各測定プロファイルおよび各データレベル（1 km 毎）について、温位をその位置と高度における UKMO の気温・気圧値から求め、渦位(PV)を UKMO の気圧、気温、風の値から水平方向は双線形補間、鉛直方向は対数補間、時間は線形補間で求めた。データレベルが 23 の等温位面（250, 300, 350, 400, 425, 450, 475, 500, 525, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500 K）のうち、ある等温位面から 10 K 以内にあるならば、その等温位面における N_2O と CH_4 の濃度は鉛直方向の線形補間から求められ、対応する相当緯度は、その日の温位面の PV vs EL シグナル（Nash *et al.* [1996] に記載されていた手法で計算]をその等温位面の PV 値に線形補間することによって求められる。温位と相当緯度が与えられれば、N_2O と CH_4 の濃度は、月・温位・相当緯度により binned（赤道に平行に並べられた矩形領域）データにできる（bin のサイズは 4 degree）。各月・等温位面・相当緯度 bin の平均値と標準偏差を計算し（各 bin で最低 5 個のデータが必要とした）、UARS 参照大気プロジェクト（URAP）により計算された同様の値と比較

した。URAP データは相当緯度で 80S～80N の範囲で 4 度毎に提供されており ILAS の気候値のそれにマッチしているが、等温位面（420, 465, 525, 585, 655, 740, 840, 960, 1100, 1300, 1500 K）は ILAS データとマッチしない。2 つのデータを定量的に比較するために、クリッギング（Kriging：最適線型無バイアス推定法）補間（Cressie, 1990）により、相当緯度分解能 4 度で 88S～88N、鉛直分解能 25 K（高度 20 kmで約 1 kmに相当）で 350 K（～11 km）～1500 K（～42 km）の共通グリッド上にデータを内挿した。

6.8.2 N_2O

プレート 6-8 は月平均の ILAS データと URAP の N_2O を相互比較したものである。ここで用いた URAP N_2O データは、プレート 6-8 に示すように、ある特定の年月に CLAES から得られたものである（4～6/1992; 11～12/1992; 1～3/1993）。N_2O は大気中での寿命が長いため、子午面分布は 6.1 節で示したように、主として大気の力学によって決まってしまう。力学（たとえば極渦の強さ、非断熱的な沈降速度など）の年による差異は、それゆえ気候値の相互比較に著しく影響することが考えられる。成層圏循環と N_2O、CH_4 のようなトレーサー分布の変動性の大きな要因になる準二年周期振動（QBO）に関して、N_2O 比較のための CLAES 観測は、ILAS 観測時の QBO の状況に類似した段階で行われた。11 月と 12 月の URAP（すなわち CLAES）の N_2O 濃度には、極渦縁辺（相当緯度 60 度付近）を横断するかなり大きな南北傾度があり、南極の極渦内部で強い封じ込めがあることを示している。この大きな南北傾度は ILAS の月平均値にも見られる。CLAES データが提供されている最も低い等温位面は 420K（～16 km）なので、この高度より下層における ILAS と CLAES の差異は無視するべきである。北半球が冬になると、北半球下部成層圏の N_2O は CLAES データより ILAS データの方が小さい値を示す（プレート 6-8 の 1997 年 1～2 月のおよそ 800K（～30 km）より下のレベルを参照のこと）。この状況は、冬が進行するにしたがって強まりながらより低い高度へ拡がっていく（プレート 6-8 の 1997 年 3～5 月のおよそ 600K（～24 km）より下の強い水平傾度を参照のこと）。このことは、1996/1997 の北極の冬が、1992/1993 の北極の冬に比べてより強い極渦が春まで持続したことに関連し、極渦内の空気がより強く隔離されていたことを示唆する。同じような特徴は、南半球の冬の始まりである 4 月にも見られる。その他の点では、ILAS と URAP の N_2O 濃度の月平均値の一致は良いようである。要約すれば、N_2O の分布に見られる傾度については、ILAS と URAP の相当緯度帯状平均値はかなりよく類似している。1996 年／1997 年の ILAS と URAP の月平均・帯状平均値（実際には、CLAES 1992/1993 の月平均値）の間に見られる定性的な違いは年々変動を反映したものである。


ILAS, Nov 1996
CLAES, Nov 1992
ILAS - CLAES
ILAS, Dec 1996
CLAES, Dec 1992
ILAS - CLAES
ILAS, Jan 1997
CLAES, Jan 1993
ILAS - CLAES
ILAS, Feb 1997
CLAES, Feb 1993
ILAS - CLAES
Potential temperature (K)
Equivalent latitude
N2O (ppmv)
0 0.03 0.06 0.09 0.12 0.15 0.18 0.21 0.24 0.27 0.3 0.33
-0.16 -0.12 -0.08 -0.04 0 0.04 0.08 0.12 0.16



プレート 6-8　ILAS と Ver. 1.0 URAP N_2O 平均値の比較

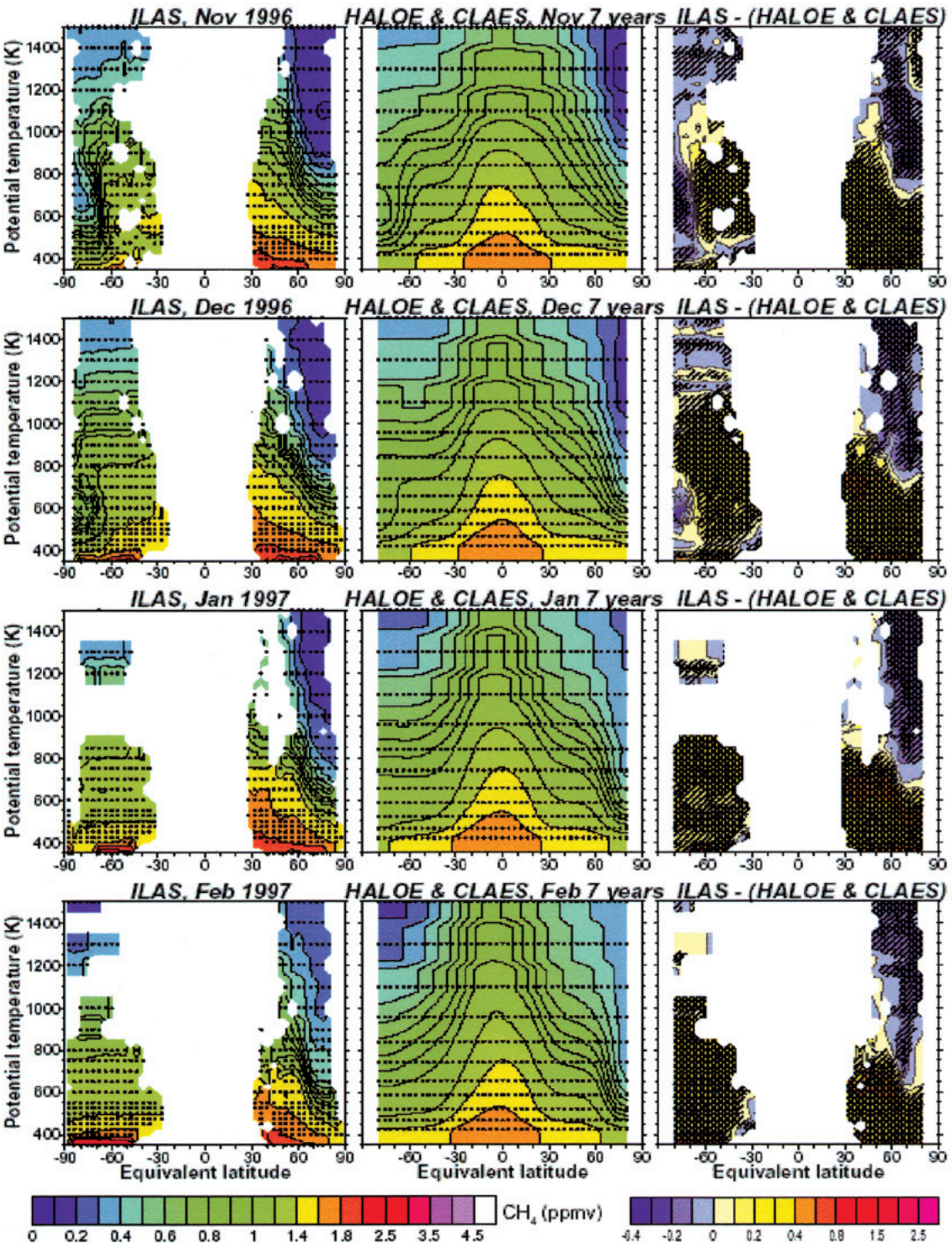
左コラムの図は、温位と相当緯度の関数として表した ILAS の帯状 1 月平均値。1996 年 11 月～1997 年 6 月中央のコラムの図は、プロットに示された期間の CLAES データから計算した URAP 帯状／月平均値である。各図の小さな黒点は計算された平均値の位置を示している。ILAS と URAP 気候値のカラースケールはどちらも図の左下にある。右側のコラムの図は 2 つの気候値の絶対差で、図の右下のカラースケールを用いている。網掛けは、差が（σ-ilas + σ-urap）／2 より大きい部分、二重の網掛けは、差が（σ-ilas + σ-urap）より大きい部分で、σ-ilas と σ-urap は各位置における標準偏差である。

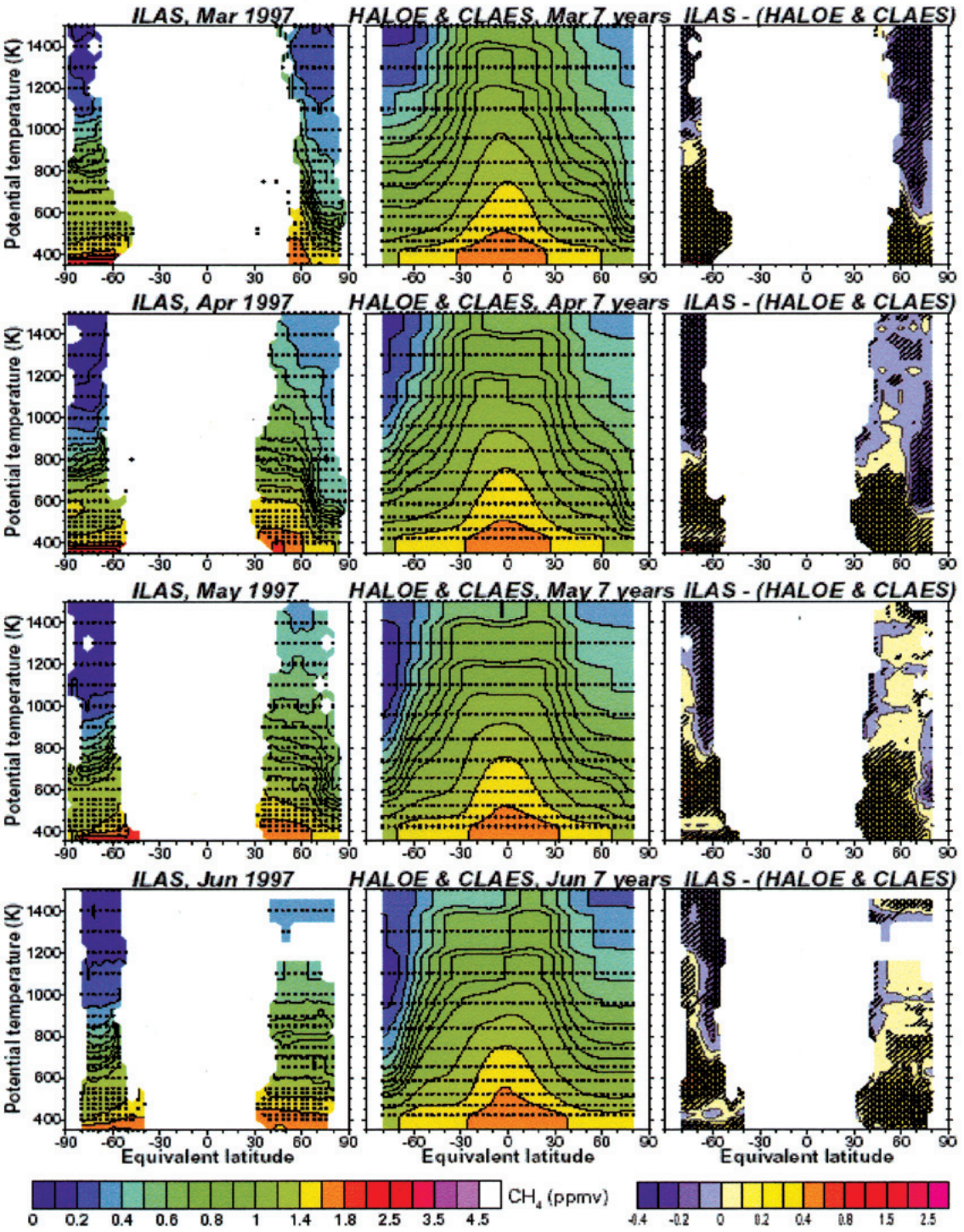
6.8.3 CH_4

プレート 6-9 は ILAS の月平均 CH_4 値と URAP CH_4 気候値を相互比較したものである。URAP の CH_4 気候値は 7 年分の HALOE データから作成したもので、8 ヶ月分の CLAES データで補足されている。N_2O と同じく、CH_4 は大気中での寿命が長いので ILAS の観測期間と URAP の期間（7 年）の力学の違いが 2 つのデータの差異の原因になりうる。全体として、CH_4 の濃度は 2 つのデータで同様であり、同じような南北分布を示す。ILAS CH_4 と URAP CH_4 の気候値の比較結果は、水平傾度に関して、プレート 6-8 における N_2O と同様の 1996/1997 年の北極冬季極渦の季節進行特性を支持するものである。しかし、この比較で最もきわだっていた差異は、約 800 K の等温位面（～高度 30 km）より下層で、主として北半球（NH）の秋と冬（1996 年 11 月～1997 年 2 月）に、URAP より ILAS の CH_4 混合比が高かったことである。北半球冬季に URAP より ILAS の混合比が 0.4 ppmv 以上高い領域のパターン（プレート 6-9 の右側の図）は、ILAS 混合比の分布パターン（左側の図）に類似している。このことは、60EL 度以北の 600 K（～24 km）より下層、一方、北緯 30～60EL 度の 800 K（～30 km）より下層で、ILAS の混合比は URAP よりかなり高いことを意味している。南半球では、ILAS CH_4 と URAP CH_4 の差が 0.4 ppmv を超えるような領域は、1997 年 5 月～6 月の、600 K 付近（～24 km）のより狭い高度領域に限定されている。CH_4 の体積混合比の絶対値を考える限り、ILAS の混合比が高いのは年々変動を反映しているのではない。直接的には、ILAS と HALOE の比較（図 6.7）でも ILAS の値は高かったし、間接的には N_2O の低い領域が同じ温位－相当緯度空間に見られるのだから、要約すれば、CH_4 分布の傾度は ILAS と URAP の相当緯度帯状平均に非常によく類似している。しかし、下部成層圏における ILAS 混合比は、特に冬には、本来あるべき濃度よりかなり高い。

6.8.4 URAP との比較のまとめ

N_2O と CH_4 についての ILAS の月別、相当緯度帯状平均は、URAP のデータと整合していて、ILAS データが成層圏の大循環の特徴を捉えていることを示している。ILAS の測定の観測値の分布図は、極渦のエッジを明瞭に示している。極渦域における N_2O と CH_4 の低混合比は、上空で酸化かつ／または光解離により破壊されるために濃度が低い空気が下降してくることを示している。ILAS 1996/1997 と URAP の月別帯状平均値の間に見られる定性的な差異は、年々変動や、特に冬季の下部成層圏における CH_4 の高バイアスを反映している。プレート 6-8 とプレート 6-9 に示したような平均値間の全体的な整合性は、Kanzawa *et al.* [本技術資料] で示した ILAS の H_2O に関するものと同様に、ILAS N_2O と CH_4 データについて全体としての重要な検証になる。


ILAS, Nov 1996
HALOE & CLAES, Nov 7 years
ILAS - (HALOE & CLAES)
ILAS, Dec 1996
HALOE & CLAES, Dec 7 years
ILAS - (HALOE & CLAES)
ILAS, Jan 1997
HALOE & CLAES, Jan 7 years
ILAS - (HALOE & CLAES)
ILAS, Feb 1997
HALOE & CLAES, Feb 7 years
ILAS - (HALOE & CLAES)
Potential temperature (K)
Equivalent latitude
CH4 (ppmv)
0 0.2 0.4 0.6 0.8 1 1.4 1.8 2.5 3.5 4.5
-0.4 -0.2 0 0.2 0.4 0.8 1.5 2.5



プレート 6-9　プレート 6-8 と同じ、ただし、CH_4 についての比較

中央のコラムの図は、7 年間の HALOE データに CLAES データを補足して作成した URAP 帯状／月平均値である。URAP から得た σ-urap 標準偏差は、1992 年 4 月～1993 年 3 月の 1 年間の HALOE／CLAES データから計算した。

6.9 比較結果のまとめと結論

表 6.8 と表 6.9 に、6.5～6.7 節で述べた ILAS と各種同時検証実験データとの比較結果を、N_2O、CH_4 についてそれぞれまとめた。表 6.8 は N_2O についてのもので、比較データは北半球（NH）では 1997 年 2 月～5 月の高度 10～40 km のものが利用可能であったが、南半球（SH）のものは有効なものがなかった。表 6.9 は CH_4 についてのもので、比較データは両半球の高度 10～60 km のものが利用可能であった。ただし、ILAS のリトリーバル可能な高度は 8 km（最低高度）から N_2O で 50 km、CH_4 で 60 km までであることに注意が必要である。表 6.8 と表 6.9 のまとめを一見してわかることは、両者の測定の uncertainty を考慮すれば、ILAS データと利用可能なすべての検証実験データは非常に良く合っているということであり、これは特に N_2O で顕著である。6.8 節では、温位と PV に基づいた相当緯度の座標上での ILAS と URAP の月別帯状平均値の比較より、ILAS の N_2O と CH_4 データは、大気循環の既知の特性を考慮すると、全体として整合がとれていることが示された。

ILAS データユーザーは、ILAS Ver. 5.20 の N_2O および CH_4 データが下記の特徴を有することに注意されたい。

(i) 表 6.8 に示すように、北半球の高度 10～30 km における ILAS の N_2O の値は、ここで比較した信頼のおける他のすべての検証実験データに対し、本文中に詳細を示したいくつかのケースを除いて通常その 10%以内におさまる一方、北半球の高度 30～40 km では 50%を超える。誤差の大きさは、表 6.1 に示した ILAS N_2O 測定の予想される全誤差 (total error) と同程度である。南半球、および北半球でも 1996 年 11 月～1997 年 1 月と 1997 年 6 月については、N_2O の信頼できる同時検証データはないが、プレート 6-8 の ILAS と URAP データの比較から推測されるように、高度 10～40 km の ILAS N_2O 測定値のほとんどに上記に示した誤差の値が適用できると考えられる。南北両半球の高度 40 km 以上では、表 6.1 に示したように ILAS 測定値の全誤差が約 200-360%にも達することや、プレート 3 に示したように高度が高くなるにつれての増加という理に適っていない様相をしているので、ILAS N_2O 値は多くの目的にとって利用不可であると思われる。

(ii) ILAS N_2O 測定の誤差はわずかな季節依存性がある。たとえば、北極の高度 20～25 km で ILAS N_2O は 1997 年 2 月・3 月にかなりの正のバイアスがあったが、1997 年 4 月・5 月にはほんの小さなバイアスもしくは負のバイアスになった。

表 6.8　ILAS と同時に実施されたいくつかの検証データに対する ILAS N_2O データの相対パーセンテージ差のまとめ

この表では、高度範囲、検証実験、月によって情報を整理してある。利用可能な N_2O の検証データは、1997 年 2 月～5 月の北半球のもののみである。また、比較可能な衛星データはない。気球観測は ASTRID (AS), BONBON (BO), LPMA (LP), SAKURA (SA), MIPAS (MI), FIRS-2 (FS), MkIV (Mk)、航空機による観測は POLARIS (PO) と ASUR (AR)によるものである。地上からの観測は TDLHS (TD)による。パーセントで表された数値は 5 %毎に見積もられたものである。-50-10LP はその高度領域における値の変化を示しており、LP との比較が下部で-50%、上部で-10%であることを意味する。

Altitude	1997			
Experiment	Feb	Mar	Apr	May
35-40 km				
BALLOON			+60FS	+70Mk
30-35 km				
BALLOON			+50FS	+40Mk
25-30 km				
BALLOON	-50-10LP +-50LP	+50MI	+30FS	+20Mk
AIRCRAFT	+50AR			
20-25 km				
BALLOON	-10+50AS -+20BO -5-40LP -10+40SA +-25AS +50LP	+25SA +30MI	-5FS	-+5Mk
AIRCRAFT	+30AR			
GROUND		+20TD	+-10TD	+20TD
15-20 km				
BALLOON	+-5AS -10BO -+5LP +-10SA +-5AS +20LP	+25SA +5MI	-10FS	-5Mk
AIRCRAFT				-10PO
GROUND		+10TD	+-10TD	+-5TD
10-15 km				
BALLOON	+5AS -+5LP -10AS -+10LP	+5SA	-5FS	-10Mk
AIRCRAFT				-10PO

表 6.9　ILAS 測定と同時に実施されたさまざまな検証データに対する ILAS の CH_4 データの相対パーセンテージ差のまとめ

この表では、高度範囲、検証実験、月、半球によって情報を整理してある。NH は北半球、SH は南半球を示す。HALOE は衛星による測定、気球観測は BONBON (BO), LPMA (LP), SAKURA (SA), MIPAS (MI), MkIV (Mk)、航空機による観測は　POLARIS (PO) によるものである。パーセントで表された数値は 5 %毎に見積もられたものである。"+-" はその高度領域における値の変化を示しており、LP との比較で下部で+20%、上部で-20%20LP であることを意味する。"-0" は値としては 0 であるがわずかに 0 を下回ることを意味する。

Altitude	1996				1997											
Experiment	Nov		Dec		Jan		Feb		Mar		Apr		May		Jun	
	NH	SH	NH	SH	NH	SH	NH	SH	NH	SH	NH	SH	NH	SH	NH	SH
50-60 km																
HALOE		+30		+30		+30		>+100	+20				+20		+20	
45-50 km																
HALOE		+-0		+-5		-5		+20	-5				-10		-5	
40-45 km																
HALOE		-5		-5		-5		+5	-10				-15		-5	
35-40 km																
HALOE		-5		+-5		+5		+5	-10				-10		-5	
BALLOON													+5Mk			
30-35 km																
HALOE		+10		+10		+10		+15	-5				+5		+5	
BALLOON													+5Mk			
25-30 km																
HALOE		+15		+10		+15		+20	0				+5		+10	
BALLOON							-40LP		+30MI				+15Mk			
							+30LP									
20-25 km																
HALOE		+15		+10		+15		+15	+20				+5		+10	
BALLOON							+30BO		+40SA				+15Mk			
							-+20LP		+30MI							
							+40SA									
							+50LP									
15-20 km																
HALOE		+10		+10		+10		+15	+15				+10		+10	
BALLOON							+20BO		+30SA				+10Mk			
							+20LP		+10MI							
							+25SA									
							+40LP									
AIRCRAFT													+10PO			
10-15 km																
BALLOON							+10SA		+10SA				+5Mk			
									+10MI							
AIRCRAFT													+10PO			

(iii) 高度 10～50 km における ILAS CH_4 の値は、ここで比較した信頼のおける他のすべての検証実験データに対し、正のバイアスが 20%以上になる北半球冬季の高度 15～30 km の領域を除いて、通常その 10%以内におさまる。一方、表 6.9 に示したように、高度 50～60 km の領域における正のバイアスは 20%以上になっている。誤差の大きさは表 6.1 に示した ILAS CH_4 測定の予想される全誤差 (total error) 未満であり、例外として北半球冬季の高度 15～30 km の領域の誤差の大きさは予想される全誤差と同程度である。北半球の 1996 年 11 月～1997 年 1 月と 1997 年 4 月、6 月および南半球の 1997 年 3 月～6 月については、CH_4 の信頼できる同時検証データはないが、プレート 6-9 の ILAS と URAP データの比較から推測されるように、ILAS CH_4 測定値のほとんどに上記に示した誤差の値が適用できると考えられる。つまり、プレート 6-7 の CH_4 と N_2O の相関から推測されるように、高度 15～30 km の冬季における正のバイアスは北半球だけではなく南半球にもありうる。南北両半球の高度 50 km 以上では、表 6.1 に示されるように ILAS 測定値の全誤差が約 90-150%になることや、プレート 6-4 に示されるように測定値が高度につれての増加という理に適っていない様相をしているので、ILAS CH_4 は多くの目的にとって利用不可であると思われる。

(iv) ILAS CH_4 値の誤差は季節依存をする。たとえば、北極の高度 15～30 km で ILAS CH_4 は 1997 年 2 月・3 月に約 20%の大きな正のバイアスがあったが、1997 年 5 月～6 月には正のバイアスは小さくなった。これは (iii) の記述の一部の言い換えである。

(v) ILAS の測定可能な最低高度において太陽捕捉の開始／終了の判定にミスの可能性があるため、その高度のみのデータが不正確ということもありえる。この問題は N_2O データによく発生する。全ての ILAS のガス成分とエアロゾルの Version 5.20 によるリトリーバルの結果に関したこの問題は次のデータ処理アルゴリズム version で解消されるだろう。

本論文における比較結果を総合してまとめると、ここで示された点に注意を払った上であれば、高度 10～40 km の ILAS Ver. 5.20 N_2O のデータ質と、冬季の高度 15～30 km を除いた高度 10～50 km の ILAS Ver. 5.20 CH_4 のデータ質は、極域成層圏の現象に関する研究のような、ほとんどの科学的な目的に対してかなり良好であることが示された。冬季下部成層圏における ILAS CH_4 の高バイアスの原因は不明であるが、ILAS 機器の分光特性や、もしくはキャラクタリゼーションに十分な情報が無いためかもしれない。高緯度における高い高度分解能の高頻度な観測である ILAS による観測の特徴や HALOE や CLAES のような他衛星センサーと比肩する十分な ILAS の N_2O、CH_4 データの理に適った性質は、成層圏科学のさまざまなニーズに貢献するであろう

7．改良型大気周縁赤外分光計（ILAS）Version 5.20による水蒸気プロファイルの検証とデータ特性

要旨

衛星ADEOS（Advanced Earth Observing Satellite）に搭載した太陽掩蔽法センサーILAS（改良型大気周縁赤外分光光度計）によって高緯度域（57 - 72 °N、64 - 89 °S）の水蒸気濃度の鉛直分布を1996年11月～1997年6月にかけて連続測定し、また、1996年9月～10月にも付加的測定した。本論文にはVersion 5.20 ILASリトリーバル・アルゴリズムを用いて処理した水蒸気データの検証結果を示した。まず、ILAS水蒸気測定の不確定性と一般的特徴を簡潔にまとめた。

比較検証は

(ⅰ) スウェーデンのKirunaおよびアラスカのFairbanksで実施したILAS検証の気球キャンペーン

(ⅱ) POLARIS (Photochemistry of Ozone Loss in the Arctic Region in Summer) キャンペーンで実施された航空機観測キャンペーン

(ⅲ) 利用可能な衛星観測であるHALOE (Halogen Occultation Experiment) Version 19 およびSAGE (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment) Version 6

等により得られたデータを用いて実施された。ILASによる水蒸気測定値と他の独立的な信頼のおける全検証測定値との対応は、高度15～60 kmでほとんどのケースが10%以内で一致し、本論文で詳述したいくつかの特殊な例外はあるが、全ての比較において20%以内で一致した。ILASのデータとUARS (Upper Atmosphere Research Satellite) 気候値およびHALOEのデータを気候学的に比較すると、既知の大気循環の特徴を考慮した場合、ILASの水蒸気データは総合的には矛盾のないデータであることが判る。鉛直方向に高い解像度を持ち、極に近い高緯度地方を高サンプリング頻度で、しかも高品質で観測可能というILASの特徴は、様々な極成層圏研究への適用にとって、ILASの水蒸気データセットを価値あるものにしている。

7.1 はじめに

成層圏の水蒸気には、以下の2つの主要な供給源がある。すなわち、

(ⅰ) 主に赤道付近の対流圏界面を通って対流圏から成層圏に入り込み、上方および極方向に輸送される水蒸気

(ⅱ) 成層圏上層や中間圏におけるメタンの酸化の際に生成される水蒸気、

である。成層圏の水蒸気は2つの側面、つまり「放射」および「化学」の面で、直接的に重要である。「放射」の面では、水蒸気は最も重要な温室効果ガスであり[例：Harries, 1996]、一方「化学」の面では、HOx化学やPSC（極成層圏雲）の源としての役割を通じて、水蒸気はオゾン化学と密接に関連している[例：Solomon, 1999]。また、水蒸気は、成層圏の力学的運動を駆動する物質として間接的に重要である。力学的運動は、基本的には、オ

ゾン、二酸化炭素と同様に水蒸気の分布による放射加熱、放射冷却により引き起こされる[例：Andrews *et al.*, 1987]。このように成層圏における水蒸気の分布は、放射、化学および力学の相互作用により決められる。また、成層圏水蒸気の相は、それがエアロゾルまたは様々なタイプのPSC（極成層圏雲）に取り込まれているかどうかによって、液相にもなり固相にもなる。水蒸気は冬季に形成される成層圏極渦内で下方に輸送される。

水蒸気は寿命の長いトレーサーと考えられるため、その分布を解析することで成層圏の力学や輸送に関する識見が得られる。たとえば、大気の「テープレコーダー」として用いられ、水蒸気が赤道域下部成層圏における鉛直速度を評価するトレーサーとして利用された例がある[例：Mote *et al.*, 1996]。いくつかのデータは、成層圏で1980年代から現在にかけて水蒸気が増加していることを示している[例：Oltmans and Hofmann, 1995; Oltmans *et al.*, 2000]。対流圏上層および成層圏での水蒸気の重要性に注目し、WCRP - SPARC (Stratospheric Processes and their Role in Climate)プロジェクトが水蒸気アセスメント（WAVAS ; Water Vapour Assessment）を実施している[Kley *et al.*, 2000]。

水蒸気の衛星観測は、成層圏における水蒸気の振舞を調査研究する上で、非常に有効である。成層圏における水蒸気の全球分布を初めてもたらした測器は、Nimbus 7に搭載されたLIMS (Limb Infrared Monitor of the Stratosphere)であった[例：Gille and Russell, 1984; Jones *et al.*, 1986]。その後、SAGE (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment)Ⅱが、LIMSを継承し、水蒸気測定を行っている[例：Rind *et al.*, 1993 ; McCormick *et al.*, 1993 ; Chiou *et al.*, 1997]。衛星UARS (Upper Atmosphere Research Satellite) の搭載センサーであるHALOE (Halogen Occultation Experiment) およびMLS (Microwave Limb Sounder) は、他のガス種と同様に水蒸気のデータセットも提供している[例：Harries *et al.*, 1996 ; Lahoz *et al.*, 1996]。本論文では、ILASとの比較データとして、SAGEⅡ、HALOE、MLSデータを用いる。なお、POAM (Polar Ozone and Aerosol Measurement)Ⅲは水蒸気を測定する最新のセンサーである[例：Lucke *et al.*, 1999]。これらの衛星データはすべてWAVAS（水蒸気アセスメント）レポートで使われている[Kley *et al.*, 2000]

ILAS (Improved Limb Atmospheric Spectrometer) 太陽掩蔽法センサーは日本の環境庁（Environment Agency ; EA）（最近、組織改編で環境省（Ministry of the Environment ; MOE）となった）により開発され、日本の宇宙開発事業団（NASDA）の地球観測プラットフォーム技術衛星（ADEOS）に搭載、運用された[例 Sasano *et al.*, 1999]。ILASは、オゾン（O_3）、硝酸（HNO_3）、二酸化窒素（NO_2）、一酸化二亜鉛化窒素（N_2O）、メタン（CH_4）およびエアロゾルと同様に水蒸気（H_2O）の測定を、1996年11月～1997年6月の間連続で、また、1996年9月、10月に付加的に実施した。ILAS Version 4.20による H_2Oデータは、WAVASレポート[Kley *et al.*, 2000]に利用されている。

ILASのオゾン、硝酸および波長780 nmのエアロゾル消散係数の検証解析では、Version 3.10データ処理アルゴリズムについて良好な結果が得られた[Sasano *et al.*, 1999; Lee *et al.*, 1999; Koike *et al.*, 2000; Burton *et al.*, 1999; Hayashida *et al.*, 2000]。ILAS Version 3.10による水

蒸気データは、ILAS検証気球キャンペーンの気球データと良く一致した[Sassano *et al.*, 1999c]が、高度約30　km以上で不合理な変動を示すなど測定に幾つかの欠点も見受けられた。さらに、Version 3.10アルゴリズムを使用すると、下部成層圏の N_2O および CH_4 の測定結果は予期していた値より大きかった。H_2O, N_2OおよびCH_4間の赤外スペクトルにはオーバーラップしてしまう部分があるので、最終的な導出結果は互いに干渉し合っている可能性がある。

本論文の目的は、ILAS Version 5.20による水蒸気（H_2O）の観測結果を検証すること、および気球、航空機、衛星搭載センサー等による様々な検証実験結果を踏まえて、ILASデータの特徴を記述することである。ILAS Version 5.20の水蒸気データを用いて、Pan *et al.* [2002]は極域成層圏における水蒸気の変動について議論し、Ertel ポテンシャル渦度 (PV) に基づく相当緯度と温位の関数として、ILAS観測値とUARS (Upper Atmosphere Research Satellite) 参照大気気候値の気候学的な比較を行った。その他のILAS Version 5.20のプロダクトに関しては、姉妹論文[Kanzawa *et al.*, 本技術資料]で、長寿命トレーサーである亜鉛化窒素（N_2O）およびメタン（CH_4）の検証について述べた。また、[本技術資料]中の論文でSugita *et al.* [2002]がオゾン（O_3）の検証、Irie *et al.* [2002]が二酸化窒素（NO_2）と硝酸（HNO_3）の検証の解析結果を議論している。さらに、Saitoh *et al.* [2002]がエアロゾル消散係数の検証解析結果を述べている。

7.2 節ではILASによる測定、Version 5.20データ処理アルゴリズムの概要、誤差収支の結果を述べた。これらについての詳細はYokota *et al.* [本技術資料]およびNakajima *et al.* [本技術資料]に記載されている。7.3節ではILAS水蒸気データの全体的な特徴を述べる。7.4節ではILAS水蒸気データの検証に用いた手法を記述し、7.5節では北極域での気球による測定データを用いた検証解析を示す。7.6節では北極域でのPOLARISキャンペーン航空機データを用いて検証解析を行っている。7.7節では北極域と南極域におけるILAS水蒸気プロファイルと、HALOE および SAGE IIによる同時測定データとの比較を行った。なお、これらのセンサーは、どちらもILAS同様「太陽掩蔽法」を採用している。7.8節ではILAS月平均値とUARS参照大気気候値およびHALOEの月平均値の変動を比較する。7.9節では比較結果をまとめ、結論を導き出す。

7.2　ILAS測定、データ処理アルゴリズム、誤差収支の概要

ILASの測定についての概要は、例えばSasano *et al.* [1999]に記載されている。ILAS測定器についてはSuzuki *et al.* [1995]に簡潔に説明してあり、その詳細な特徴と性能はNakajima *et al.*[本技術資料]で説明されている。ILAS赤外分光計測定値から水蒸気およびその他の成分の濃度を算出するアルゴリズムの概要はYokota *et al.* [1998]に示されている。本論文では、Version 5.20アルゴリズムで処理された最新データを使用した。Version 5.20データ処理アルゴリズムはYokota *et al.*[本技術資料]に詳細に記述されており、接線高度決定法についてはNakajima *et al.*[本技術資料]に記述されている。データ処理運用は国立環境研究所内のILAS

DHF（データ処理施設）で実施されている[例：Kanzawa, 1996]。Version 4.20（1999年7月公開）の水蒸気データについてもSPARC/WAVASレポートに使われたので言及する。また、Version 3.10の水蒸気データ（1997年11月公開）についても、初期のリトリーバルであるVersion 3.10と検証実験との簡単な比較がSasano *et al.* [1999] でなされているため、言及しておく。この節では、この論文の目的であるH_2Oの検証のために、ILAS測定の特徴について簡単にレビューする。

ILASは太陽掩蔽法センサーで、2つの回折格子分光計とサンエッジセンサーからなる。44素子焦電型アレイ検出器をもつ赤外分光計は6.21～11.77 μmをカバーし、可視分光計は1024素子金属酸化膜半導体（MOS）フォトダイオードアレイ検出器を採用しており、0.753～0.783 μmをカバーする。水蒸気分子の検出には6.5 μm付近の吸収が用いられ、導出に必要な吸収ラインパラメータはHITRAN 96 [Rothman *et al.*, 1998]を利用している。ILASの水蒸気測定は、他のガスからの強い干渉は受けていないと考えられるが、メタンと亜酸化窒素によるわずかな影響はある。また、Yokota *et al.* [本技術資料]で議論されているように、酸素分子の衝突によりもたらされる6.4 μm付近の吸収も影響している。

接線ポイントにおいて、赤外分光計の瞬時視野（IFOV）は鉛直方向が1.6 km、水平方向が13 kmである。接線高度20 kmの直上にある厚さ1 kmの層の視線に沿う部分傾斜パスは約230 kmである。12 Hzのサンプリングで、44の赤外分光素子のフルスペクトルが83ミリ秒毎に得られる。接線高度間隔は、大気の屈折効果を考慮すれば、接線高度15 kmで約110 m、接線高度55 kmで270 mである。透過率データに約10サンプリングに相当する時系列スムージングを施すと、実際の鉛直分解能は、接線高度15 kmで1.9 km、25 kmで2.5 km、35 kmで3.0 km、45 kmで3.4 km、高度55 km以上では3.5 kmとなる[Yokota *et al.*, 本技術資料]。参考までに、SAGE IIとHALOEの鉛直分解能は、それぞれ～1 kmと～2 kmと見積もられている。ADEOSは傾斜角98.6度の太陽同期極軌道に投入され、赤道通過降交点は平均太陽地方時で10:40頃であった。したがって、ILASの掩蔽現象は１日地球を約14周するADEOSから見た日昇時と日没時にそれぞれ1日約14回づつ起こる。ILASの測定領域はプレートn1に示すように、高緯度地域（57～72N、64～89S）である。

大気微量成分の鉛直分布算出はオニオンピーリングリトリーバル法を用いて行われる[Yokota *et al.*, 本技術資料]。水蒸気の導出高度範囲は、プレート7-1と7-2に示すように、8 km（最低）～70 kmで、導出高度の格子間隔は幾何高度で1 kmである。レベル0データ（原測定値）からレベル1データ（検出素子用疑似透過率）への処理にあたって、ノイズを抑えるためローパスフィルターを使うことにより、Version 5.20では、水蒸気鉛直プロファイルの物理的でない鉛直方向の振動を改善した。しかし、レベル2プロダクト（水蒸気のような地球物理パラメータ）に対する、人為的なスムージングはいっさい施していない。

ILAS Version 5.20 水蒸気のエラー解析結果を表7.1に要約した（詳細についてはYokota *et al.*, 本技術資料、も参照）。Version 5.20データに関連する誤差は2つのカテゴリー、すなわち内部誤差と外部誤差に分けられる。内部誤差（internal error）は、観測された透過率とシ

ミュレートされた透過率の非線形最小二乗スペクトルフィッティングで収束した最終残差より算出される。外部誤差（external error）は、導出時に入力値として用いられるノンガス補正と温度プロファイルの不確実さを通して、透過率のシミュレーションに関連して出てくる誤差である。内部誤差は、外部誤差がそうであるように、precision（ランダム誤差）とaccuracy（システマティック誤差＋ランダム誤差）の両方に影響する項を含むことに注意が必要である。全誤差 (total error) は内部誤差と外部誤差のroot-sum-square (RSS)（2乗和の平方根）として定義され、ILAS Version 5.20の各データファイルには全誤差（total error）と内部誤差が提供されている。

外部誤差を求める方法について以下に記す。エアロゾル粒子、硫酸エアロゾルおよび／または極成層圏雲（PSCs）による消散が無視できないような高度領域においてガス濃度の鉛直プロファイルを得るためには、ノンガス成分補正[Sasano *et al.*, 1999; Yokota *et al.*, 本技術資料]が必要である。シミュレートされた透過率におけるノンガス成分の寄与を求めるために、我々はまず、ガス種による吸収が比較的小さい4つの分光素子（いわゆる「窓素子」）におけるガス成分による消散係数プロファイルを評価した。ガス成分の寄与を評価するのには、ILAS参照大気モデルから、オゾン、硝酸、二酸化窒素、亜酸化窒素、メタン、水蒸気、二酸化炭素、およびCFC-11など他の微量ガス成分のプロファイルを用いた[Yokota *et al.*, 本技術資料]。次に、ノンガス成分の寄与を、各窓素子で測定されるトータルの消散係数からガス成分の寄与を除くことによって計算し、波数で線形内挿・外挿して窓素子以外の40素子全てについてのノンガス透過率を得る。このようにして見積もった44素子の透過率データは、ガスプロファイルを求めるときにノンガス成分の寄与を補正するために用いられる。参照大気モデルのデータを使うと、シミュレート透過率の計算で何らかの誤差が生じると考えられる。それらの誤差の大きさは、これら参照データの10パーセンタイル値、メディアン値、90パーセンタイル値のプロファイルを導入することにより、適切に選んだ32のサンプル測定値についてのシミュレーションから見積もられる。これらの誤差は、外部誤差の１要素である。内挿もまた、ガス濃度の導出プロファイルにシステマティック誤差をもたらすが、外部誤差には含めない。これに対応する不確実さについてはこの節で別途評価する。

気温はシミュレート透過率計算に用いるが、その不確実さに起因する影響も外部誤差に含まれる。それらの影響は、高度10 kmで±2 K、高度70 kmで±5 Kの不確実さ、および気温とガスプロファイルのモデル上でのこれらの高度間の線形内挿に不確実さを課すことにより評価される。外部誤差の大きさは、ノンガス成分補正と気温プロファイルによる２つの誤差のroot-sum-square (RSS) として定義され、ルーチンデータ処理を行う前にあらかじめ評価された。各高度の外部誤差の大きさは、各測定について評価されたのではなく、全ての水蒸気データについて共通に用いられた。外部誤差解析については、Yokota *et al.*[本技術資料]に詳細な記述がある。

また、相対標準偏差（RSD: relative standard deviation）が算出されている。これは、静穏

な時期（南半球の1997年3月末、北半球の1997年6月の3～5日間）のデータを使い、1σ標準偏差（平均値のまわりの）を平均値で割った値である。RSDは地球物理的変動や測定再現性の指標であるが、静穏期は地球物理的な変動がほとんどないので、RSDは再現性にほとんど近い。再現性はprecisionの良い指標となるので、RSDを経験的に決められるprecisionと見なすこともできる。

表7.1に誤差の概要をまとめた。Version 5.20の水蒸気データファイルすべてを用いて、水蒸気混合比の平均全誤差（ppmv）を見積もり、それらを平均%誤差に変換した。詳細は表7.1のキャプションに示してある。表7.1に示すように、平均%誤差は高度15 km、20 km、30 km、40 km、50 km、60 kmでそれぞれ、10%、8%、10%、19%、27%、39%、Precisionの指標である相対標準偏差（relative standard deviation; RSD）は、高度15 km、20 km、30 km、40 km、50 kmでそれぞれ、3%、1%、2%、3%、6%、12%である。ILAS水蒸気データのprecisionは優れており、高度45 kmより下層では5%未満である。

表7. 1　ILAS Version 5.20 水蒸気データのエラー解析のまとめ：全誤差と再現性

Altitude (km)	Average[1] vmr (ppmv)	Internal[2] error (ppmv)	External[3] error (ppmv)	Total[4] error (ppmv)	(%)	RSD[5] (%)	(ppmv)
60	6.4	2.5	0.05	2.5	39	12	0.77
55	7.3	2.5	0.05	2.5	34	9	0.66
50	7.2	1.9	0.03	1.9	27	6	0.43
45	6.9	1.4	0.03	1.5	21	4	0.28
40	7.0	1.3	0.05	1.3	19	3	0.21
35	6.9	1.1	0.05	1.1	16	2	0.14
30	5.9	0.5	0.2	0.59	10	2	0.12
25	5.4	0.3	0.3	0.43	8	1	0.05
20	4.7	0.3	0.2	0.38	8	1	0.05
15	3.5	0.3	0.2	0.35	10	3	0.11
12	3.4	0.3	0.6	0.65	19	3	0.10
9	26.2	2.0	3.8	4.2	16	2	0.79

1) 全水蒸気導出値の体積混合比（vmr）の平均

2) 全水蒸気導出値についての内部誤差の平均

3) 全水蒸気データに共通に与えられている外部誤差

4) 全誤差：内部誤差と外部誤差のRSS (root-sum-suquare) (ppmv)とその相対値（%）。
相対値はRSSを平均混合比（２列目に示しある）で割って求めた。

5) 相対標準偏差（RSD；%）：測定再現性の尺度、すなわち経験的に決められたprecision（本文参照）。
参考までに、RSDに対応する混合比（ppmv）を平均混合比（2列目に示してある）にRSD（%）をかけて求めた。

導出されたプロファイルの不確実さについて注意すべき点が２つある。１つめは、接線高度（TH）を正確に決定することが非常に重要だと言うことである。というのは、接線高度のあいまいさが空気密度を通して体積混合比プロファイルの導出における不確実さに伝

播するからである。接線高度の決め方についてのVersion 3.10、 およびVersion 4.20、とVersion 5.20の大きな差異は、どのようにILASサンエッジセンサー測定値を使って接線高度を求めているかによっている：Version 3.10ではサンエッジセンサー測定値を使わず、ILAS可視チャンネルのO_2 Aバンド（Pブランチ）の透過率データとUKMO（United Kingdom Meteoro-logical Office）の気温・気圧同化データ[Swinbank and O'Neill, 1994]に基づくシミュレーションを比較することによってTHを決めている。Version 4.20では、サンエッジセンサーのみを用いている。Version 5.20は、サンエッジセンサーデータとILAS可視チャンネルのO_2 Aバンド（Pブランチ）の透過率データの両方を用いている（詳細はNakajima *et al.*, 本技術資料を参照）。Version 5.20の接線ポイントの高度決めにおけるシステマティック誤差の見積もり値は、+300±360 mである：実際の接線高度に対する-60 m、+300 m、+660 mの誤差は、水蒸気を含む導出ガスの混合比に換算すると、それぞれ約+1%、-4%、-9%の誤差に相当する（ランダム誤差の計算値は30 m）。なお、高度決めのエラー解析についてはNakajima *et al.*[本技術資料] に詳しい。参考までに、SAGE IIとHALOEの高度決めの不確実さは、それぞれ250 m、150 mと見積もられている。

２つめは外部誤差に含まれるノンガス成分補正に関連するシステマティック誤差である。窓素子間の単純な線形内挿に起因するシステマティック誤差を評価するのに、ノンガス成分として、50重量%、75重量%のH_2SO_4/H_2O ２元溶液硫酸エアロゾル、硝酸３水和物（nitric acid trihydrate; NAT）、氷（ice; ICE）、4組の過冷却３元溶液（supercooled ternary solutions; STS）からなるPSCsと、数種のIR吸収スペクトルを用いて、ガス状成分としての上記の参照プロファイル（アプリオリプロファイル）を用いて透過率をシミュレートした[Yokota *et al.*, 本技術資料]。ここで議論したVersion 5.20リトリーバルアルゴリズムにおけるノンガス成分の寄与評価のために線形内挿を施した後、シミュレートされたこれらの透過率を用いて、ガス状物質濃度の鉛直プロファイル導出を行った。数密度で表した水蒸気のアプリオリなプロファイルと導出したプロファイルの差は、780 nmのエアロゾル消散係数（AEC）との相関が良かった。したがって、水蒸気の数密度のシステマティック誤差は780 nmのAECの関数として評価することができる。高度15、20、25 kmにおける典型的空気密度を仮定すると、表7.2に示すように、AECが5×10^{-4} km^{-1}の2種類の硫酸エアロゾルについての水蒸気体積混合比の誤差は、-0.02～-0.10 ppmv の範囲である。また、AECが1×10^{-3} km^{-1}の何種類かのPSCsについてのシステマティックバイアスも表7.2にまとめてある。このエラー解析についての詳細な記述はYokota *et al.*[本技術資料]で行われている。

表 7.2　水蒸気データ（Version 5.20）のエラー解析のまとめ：
ノンガス成分補正に起因するシステマティックバイアス（ppmv）

Altitude (km)	Sulfate Aerosols AEC# = 0.0005 (km^{-1})		Polar Stratospheric Clouds (PSCs) AEC# = 0.001 (km^{-1})					
	S(75)[a]	S(50)[a]	NAT	ICE	STS(5,37)[b]	STS(33,15)[b]	STS(47,3)[b]	STS(60,0.5)[b]
25	-0.10	-0.08	-3.84	-0.47	-1.52	0.01	0.15	-0.16
20	-0.05	-0.04	-1.73	-0.21	-0.69	0.01	0.07	-0.07
15	-0.02	-0.02	-0.79	-0.10	-0.31	0.00	0.03	-0.03

詳細は本文参照

AEC：780 nmにおけるエアロゾル消散係数

[a] S(75) および S(50) はそれぞれ、硫酸エアロゾルが75 および 50重量%のH_2SO_4/H_2O 2元溶液を表す。

[b] STS(5,37), STS(33,15), STS(47,3)、および STS(60,0.5)はそれぞれ、H_2SO_4が5, 33, 47, および 60 重量%、HNO_3/H_2O が37, 15, 3,および 0.5重量%の極成層圏雲(PSCs)の過冷却3元溶液を表す。

7.3　ILAS Version 5.20 水蒸気測定の概括的特徴

この節では、ILAS Version 5.20 水蒸気データの内的整合性と一般的特徴を述べる。

プレート7-1に、測定時間順に並べた全ての有効水蒸気データの時間－高度断面図を示す。上段にはILAS日昇(SR)掩蔽で観測された北半球の断面図を、観測時の緯度の図とともに示した。一方、下段には同様にILAS日没 (SS) 掩蔽で観測された南半球の断面図を示した。1996年10月30日～1997年6月29日の連続測定データとともに1996年9月17、18日、10月14、16、17、18日の試験測定データをプロットした。プレート7-1で白く示してある1996年11月25～26日にかけてのデータの欠落は、太陽黒点数が多いために大気微量成分のリトリーバルが出来なかったためである。最低高度域での観測については、南半球での日没掩蔽測定の方が、北半球の日昇掩蔽測定よりも数km低いところまで測定できるが、これは、ILASによる太陽追尾が、低高度では日没モードの方が容易であることによっている。プレート7-1は、ILAS Version 5.20 の水蒸気が、一般に次のような点で、良質のデータであることを示している。

(ｉ) 体積混合比の値が3～8 ppmvと、7.2節の表7.1、表7.2に示した不確実さの範囲内で理にかなっている。（約7 ppmvが最大値であるべき）

(ii) 高度が高くなるほど混合比も高くなる傾向が概ね見られ、水蒸気が上部成層圏やその上層（中間圏）でメタンから生成されることと整合的である。

(iii) 異常値がほとんど無く、全データが時間・高度方向ともに連続的に見える。

(iv) 極地方における冬季の大気塊の沈降、および南極地方の下部成層圏が乾燥しているなどの典型的特徴が顕著に見られる。

一方で、プレート7-1は、次のような点で、質の低いデータがいくらかあることを示している。

(ｉ) 高度約55～60 km以上のデータは高度方向に不合理な振動を示している。その原因は恐らく、この高度領域のS/N比が小さいにもかかわらず、さらにスムージングをかけ

てしまったことにある。

(ii) 高度約12 km以下の最下層のデータが時間変化しない。

(iii) 予想される混合比の最大値 (7 ppmv) を大きく上回る値が、特に南半球でしばしば見られる。品質が劣るデータ、特に高度55 km以上のデータは研究用の解析に使うべきではない。

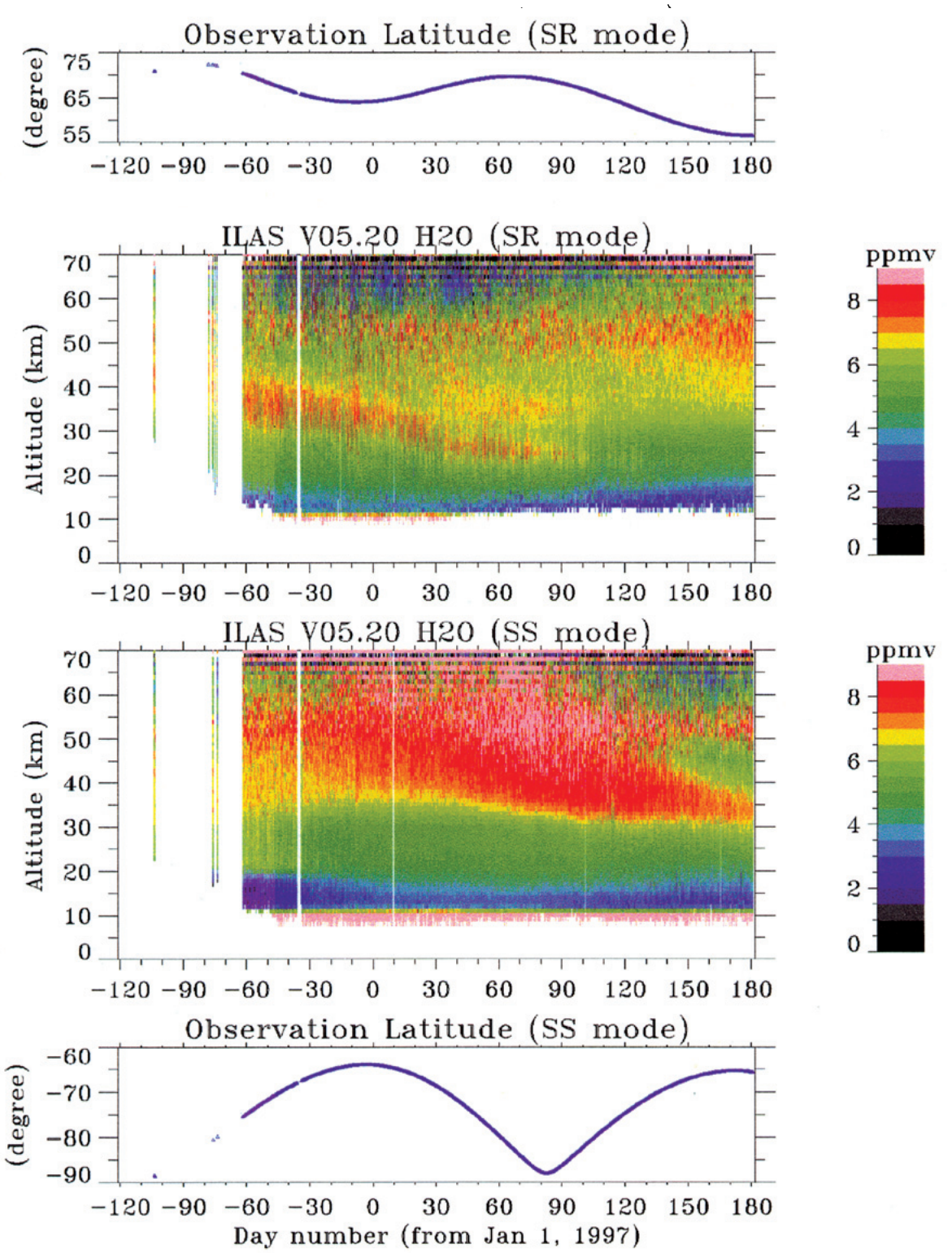
プレート7-2aには水蒸気の全有効データの北半球の鉛直分布を、プレート7-2bには南半球の鉛直分布を示した。データは極渦の内側（緑）、境界域（赤）、外側（濃い青）に分類されている。分類はErtel's potential vorticity （渦位；PV）に基づく相当緯度の関数としてのPV勾配を基にしている（Nash *et al.*, 1996）。PVは United Kingdom Meteorological Office (UKMO) の同化データ（Swinbank and O'Neill, 1994）を用いて算出した。データは、24時間毎で12UTCに、緯度分解能2.5°、経度分解能3.75°、1000～0.316 hPa（約55 km）までの22の気圧断面毎（対応する高度間隔は約2.5 km）という仕様で提供されている。極渦の境界を定義できない期間や高度範囲については、そのデータは「外側」と分類した。プレート7-2では、外側データを最初に、次いで境界データを、最後に内側データをプロットした。そのためプレート上では内側データが、最も目立つことになる。

北半球では（プレート7-2a）、極渦の外側に比べて、極渦の内側で水蒸気の混合比がより高くなっている。このような特色は、「水蒸気は上部成層圏および中間圏におけるメタンの酸化で生成され、極渦の内側に下降してくる」という我々の予想と一致している。南半球では（プレート7-2b）、10月～12月に下部成層圏の約27 km以下でおこる脱水シグナルが、北半球のような力学的特徴を覆い隠してしまっている。プレート7-2a、7-2bは体積混合比に関して、北極域、南極域の両方で、成層圏最下層の高度約10 kmでは大きな値を、高度13～15 km付近では最小値を示し、高度約40 kmまでは次第に増加することを示している。高度40 km以上の場合、プレート7-2aは、北極域では高度が高くなるにつれて、水蒸気混合比が全体的に減少することを示し、一方プレート7-2bは、南極域はそれと反対であることを示している。さらに、南極域の高度40 km以上では、水蒸気が10 ppmv以上という過度に高い値が多く見られる。プレート7-1に見られた高度約55～60 km以上での混合比の異常な振動はプレート7-2の結果にも反映されている。各月の同様なプロット（本論文には示していないが）は次のような特徴を示している：一般に、

・北極の夏（1997年6月）は南極の夏（1996年12月）に類似している。

・北極の冬（1996年12月）は南極の冬（1997年6月）に類似している。

言い換えれば、季節に関しては、両極域は対称的である（ただし、南極域での脱水シグナルは当てはまらない）。高度15 km付近で水蒸気混合比が夏季に最小となる特徴は、南極域の方が北極域より顕著である。南極域の高度約50 km（40 km）以上において、10 ppmv (8 ppmv)を超える理不尽に高い水蒸気混合比が、1997年の2月から4月に顕著に見られた。一方、北極域のデータのほとんどは、高度約55 km以上の鉛直方向の振動に起因する高濃度を例外とすれば、8 ppmv以下である。

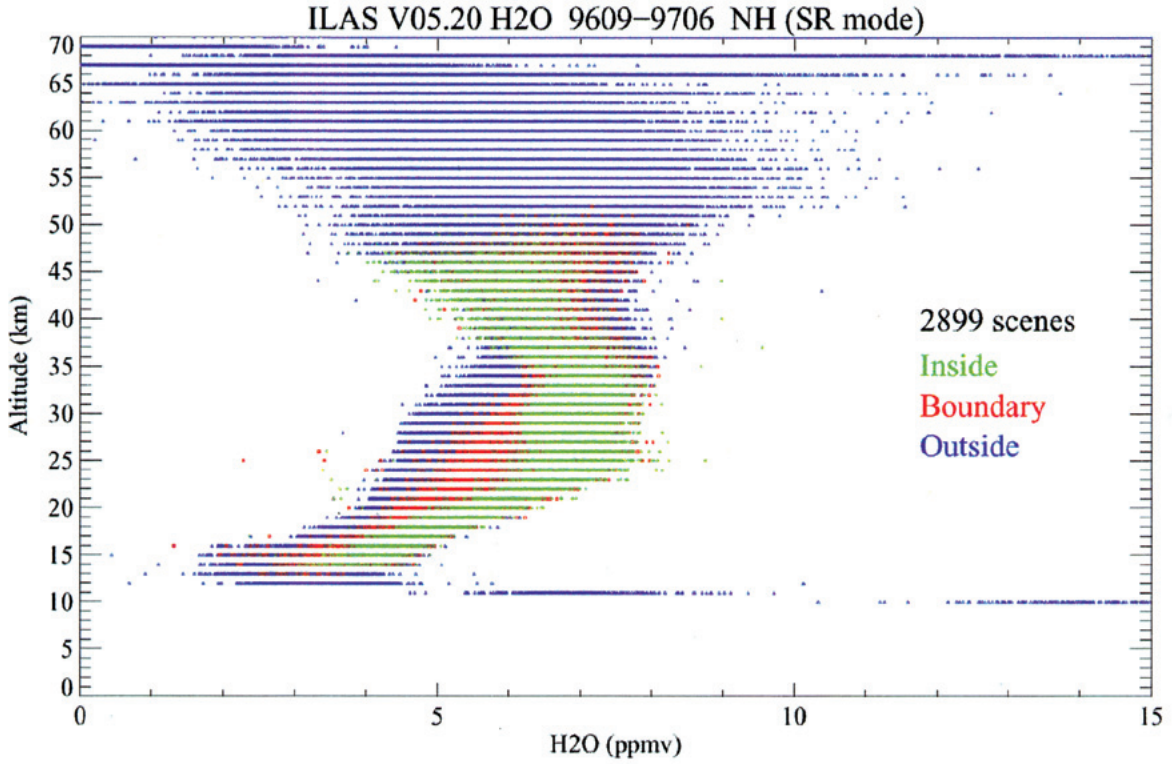


White represents for no data

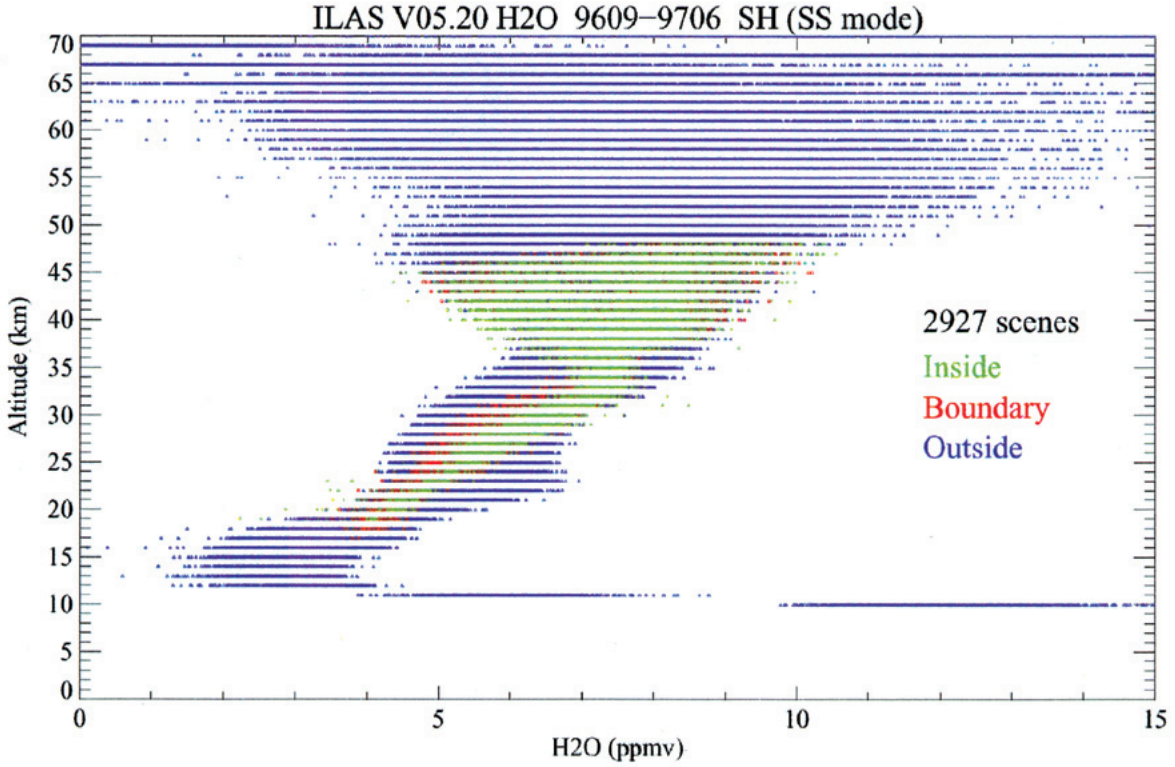
Copyright(c) 2001 National Institute of Enviromental Studies

プレート7-1　1996年9月～1997年6月までの、全ての有効なILAS Version 5.20水蒸気データを測定実施時刻の順に整理した時間高度断面図。

北半球：ILAS日昇(SR)掩蔽測定モード（上段の図）、南半球：ILAS日没(SS)掩蔽測定モード（下段の図）。それぞれにILAS位置の緯度範囲の時間的変化を示した。



(a)



(b)

プレート7-2　全ての有効なILAS Version 5.20水蒸気データ鉛直プロファイル。

北半球(a)、南半球(b)。

データは極渦の内側（緑色）、境界域（赤）外側（濃い青）に分類されている。

7.4 検証実験および解析方法

この節では、ILASと同期する他のデータソースの水蒸気データを用いたILAS水蒸気測定値の検証方法を述べる。ILASプロジェクトでは多くの検証実験が実施され [Kanzawa *et al.*, 1995; Kanzawa, 1997]、そのうち1997年の2月から3月にかけてスウェーデンのKiruna近郊のEsrangeで行われた気球キャンペーンは、主たる野外実験であった[Kanzawa *et al.*, 1997]。このキャンペーン中に、他の大気微量成分と同様に、多くの水蒸気の鉛直分布が得られた。1997年4～5月にアラスカ州Fairbanks近郊のFort Wainright でもう一つの気球キャンペーンが実施され [e.g., Toon *et al.*, 2002.; Jucks *et al.*, 2002] 、信頼できる2つの水蒸気鉛直分布が得られた。1997年4～5月にはPOLARIS (Polar Ozone Loss in the Arctic Region in Summer)ミッションのER－2航空機観測で信頼できる水蒸気データが得られた。ILASの測定期間中に、HALOE および SAGE IIの衛星センサーもまた水蒸気を測定している。

最近、トラジェクトリ計算により同期測定ペアを捜す「ラグラジアンアプローチ(Lagrangian approach)」が使われている。たとえばMorris *et al.* [2000]は、この手法により得られた結果は、同期した測定値を直接比較する「伝統的アプローチ(Traditional approach)」と同等、もしくは優れていることを示唆した。「ラグラジアンアプローチ」は、比較結果の質が低下することなしに、比較ペア数を増やすことができるが、次のような理由により本研究の成果を改善する事は期待できない。

(ⅰ) 「ラグラジアンアプローチ」はやや間接的な比較であり、気象データの質やトラジェクトリの計算法に依存するため、誤差を生じやすい。

(ⅱ) 他衛星との比較に関しては、「伝統的アプローチ」を使うに十分なイベント数がある。また、高度50 km以上ではトラジェクトリ計算に利用できる信頼性の高い気象データが存在しないにもかかわらず、高度70 kmまでの比較が行なわれた。

(ⅲ) ILAS検証気球実験のほとんどは、対応するILAS測定に対し、時間的・空間的に充分近傍で実施された。

このような事情から、この解析では同期データを直接比較する「伝統的アプローチ」を採用した。ここで、衛星データと「その場（in situ）」データは異なる空間スケールに応答するため、このことがILASと「その場」データの観測値の差異に寄与している可能性があることに注意しておく必要がある。

検証実験を実施するにあたって、他の研究グループでは、緯度範囲に比べてより緩やかな（広範囲な）経度範囲を同期基準としてしばしば採用している。しかし、我々は以下の理由により緩やかな経度同期基準を採用しなかった。それは、高緯度域における比較の場合、冬季～春季の極渦は極に対して形が歪んでいる場合が多く、それにより微量成分の分布が経度方向に不均一になるためである。北半球では、極渦が1996年12月に発生し、例外的に遅い1997年5月初めまで下部成層圏で存続した。例えばNorthern Hemisphere Winter Summary 1999-2000（NOAA, 2000）図8および，Coy *et al.* [1997]参照。南半球の1996年春には、1996年12月初旬まで、極渦が下部成層圏で存続した。例えばSouthern Hemisphere

Winter Summary 2000（NOAA, 2000）参照。比較ペアの空間的近さの度合いを評価するために、力学的条件の見地からPV解析が組み込まれた。

以下の7.5節～7.7節では、以下のように定義される相対%差「D」を用いる。

$$D = [H_2O(ILAS) - H_2O(Validation)]/[\{H_2O(ILAS) + H_2O(Validation)\}/2] \times 100 \quad (1)$$

D値は1 km毎の各高度グリッドにつきパーセント(%)で表され、「H_2O (ILAS)」と「H_2O (Validation)」はそれぞれ、「ILAS測定」と「検証測定」による水蒸気混合比の値を示す。ILASから導出される主要なプロダクトは幾何高度の関数としての混合比鉛直プロファイルである。幾何高度からジオポテンシャル高度への変換は、ILASと比較測定データとの比較するために必要な場合行われる。

7.5 検証気球キャンペーンデータとの比較

1996年11月～1997年6月の8ヶ月間にわたるILASの連続測定期間中に、気球検証実験が高緯度地方にある2つの観測点（Kiruna, スウェーデン (68°N, 21°E)およびFairbanks, アラスカ (65°N, 148°W)）で実施された。ILASによる水蒸気データを検証するために、1997年2月～3月に、6つの異なる手法による気球搭載センサーを使用した観測が7回実施された。これらの比較を表7.2に示した。1997年2～3月にKirunaで行われた5回の測定は、極渦の内側もしくは境界付近で実施された。一方、1997年4月～5月にFairbanksで行われた2回の測定は極渦の外側で実施された。

FISH（Fast In-situ Stratospheric Hygrometer）とELHYSA（Etude de l'Hygrometrie Stratospherique et des Aerosols）は大気のその場(in situ)測定装置である。FISHはライマン・アルファ(Lyman－α)蛍光湿度計[Zoger *et al*, 1999]、ELHYSAは霜点湿度計[Ovarlez, 1991; Ovarlez and Ovarlez, 1994]である。その他の装置はリモートセンシング分光器である。LPMA（Limb Profile Monitor of the Atmosphere）とMkIVは太陽掩蔽法FTIR（Fourier transform infrared ; フーリエ変換型赤外）分光計である。LPMAの詳細はCamy-Paynet [1995], Camy-Peyret *et al.* [1995]、MkIVの詳細は Toon [1991] に記述されている。LMPAには測定に掩蔽モードと上昇モードがあるが、本論文では掩蔽モードデータを使用した。MIPAS（Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding）およびFIRS-2（Far-Infrared Spectrometer-2）は周縁放射を測定してプロファイルを得る分光計である。MIPAS装置とデータ質評価の詳細はFischer and Oelhaf [1996], Friedl-Vallon *et al.* [1999] に、特に水蒸気のリトリーバルについてはStowasser *et al.* [1999] に記述されており、FIRS-2の詳細はJohnson *et al.* [1995] およびJucks [1998] に記述されている。これらの装置は性能が特徴づけられ、実績を認知されたセンサーであり、LMPAを除いて、SPARC水蒸気アセスメント[Kley *et al.*, 2000]で詳細に比較検討されたものである。

図7.1に、ILASと気球検証実験による水蒸気体積混合比の鉛直分布（左側の図）と、ILASと検証実験の差（相対差を%で表示）（中央の図）を示す。ここで、相対差の正の値はILASの測定値が検証実験値より大きいことを意味する。右側の図は、ILASおよび検証実験のデータ取得位置でのPV値の差の鉛直分布（相対差を%で表示）である。比較ペアの測定時刻と測定位置については、それらの決定手法とともに表7.3に示した。ILASのエラーバーは7.2節で定義された全誤差を示す。検証データのエラーバーについては、データをリモートサウンディングデータとその場(in situ)測定データの2タイプに分類した。1 σ precisionエラーバーは、LPMA、MIPAS、FIRS-2、MkIVのリモートサウンディングデータについてプロットし、FISH、ELHYSAといったその場(in situ)測定データにはエラーバーを付さず、キャプションにprecision（ランダム誤差）、accuracy（システマティック誤差＋ランダム誤差）の値を示すにとどめた。水蒸気の相対差（%）は、「Validation」を各気球検証データとしたときの式(1)における「D」として定義している。LPMA、FIRS-2、MkIVデータは1-km高度グリッドに与えられているが、MIPASデータは線形内挿して1-km高度グリッド上に乗せ、FISHとELHYSAのデータは高度分解能が良いので平均して1 kmデータとした。また、DPVすなわちPVの相対差（%）は、以下のように定義され、

$$DPV = [PV(X) - PV(Y)] / PV(Y) \times 100 \qquad (2)$$

1-kmの高度グリッド毎に%で与えられる。ここで「PV（X）」と「PV（Y）」はXとYの時刻と位置におけるPV値である。測定された空気塊の違いを示すインデックスを定義するために、まず式(2)においては、Xを「ILAS」、Yを「検証」とする。ここでは、表7.3に示した「ILAS」および「検証」の水平位置と時間を用いており、水平方向については双一次内挿、時間については線形内挿を行っている。また、極渦のエッジに対する相対的な位置を示すインデックスも定義するために、Xを「ILAS」、Yを「Edge」とし、Xを「検証」Yを「Edge」とした。「PV（Edge）」はNash *et al.,* [1996] が定義した極渦エッジ (Edge) におけるPV値である。「ILAS」および「検証」の時間は、表7.3に示したものを用い、エッジのPV値は時間について線形内挿した。

気球検証実験の最初の5セットは1997年2月～3月にスウェーデンのKirunaで実施され（図7.1a-e）、そのほとんどは極渦の内側での測定となった。1997年2月11日の、ライマン・アルファ湿度計FISHの測定データは、ILASデータとの差が体積混合比で20%未満と、良く一致したものだった（図7.1a）。高度16～23 kmでは、差は-2～+16%で高度とともに増加した。２つの測定位置のPV値の差は非常に小さく、高度18 km以上ではILAS測定位置でのPV値がFISH測定位置での測定値よりわずかに大きい程度である。また、ILAS－EdgeおよびVal－Edge の値がともに正（図7.1の右側の図）であるから、どちらの測定も極渦の内側で実施されたことになる。

表7.3　1997年に行われた水蒸気検証気球実験とILAS測定の対応表

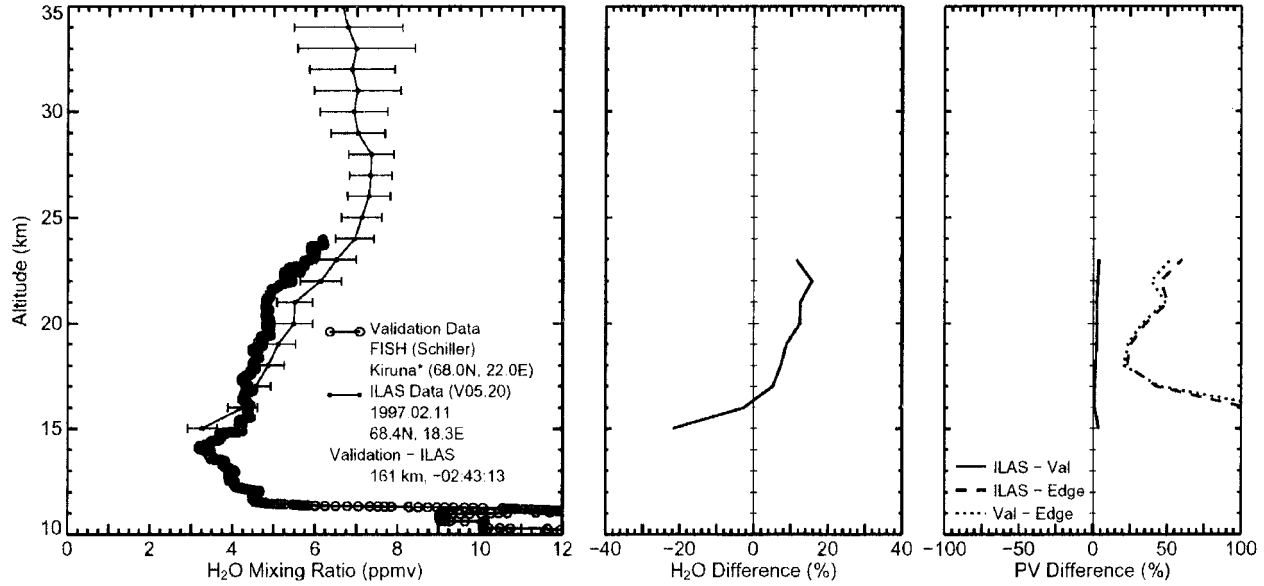
ILASの測定時刻の前後24時間以内に行われた検証実験のうち、ILAS測定位置に最も近いものという条件で選んだ比較ペア。検証実験の時刻と位置はNoteに記載してある。ILAS測定の時刻と位置は接線高度20 kmにおける値である。FISH、LPMA、ELHYSA、MIPASはスウェーデンのKiruna（68N, 21E）、FIRS-2、MkIV はアラスカのFairbanks（65N, 148W）から飛揚された。測定の日付と時刻は、1997年UTCでそれぞれ "MM/DD"、"hh:mm" の書式で示し、測定位置は緯度（北緯）と経度（東経、"−"は西経）で示した。検証実験とILAS測定の時刻と位置の差は、"hh:mm" および距離（km）で示した。

Balloon	Validation				ILAS				Difference		Note
Instrument	Date	Time	Lat	Lon	Date	Time	Lat	Lon	Time	Distance	
FISH	02/11	11:46	68.0	22.0	02/11	14:30	68.41	18.26	-02:44	161 km	*1
LPMA	02/14	14:40	65.80	22.80	02/14	13:08	68.69	41.31	01:32	853 km	*2
ELHYSA	02/14	21:44	67.81	23.92	02/14	13:08	68.69	41.31	08:36	719 km	*3
LPMA	02/26	15:30	66.90	20.50	02/26	14:26	69.49	33.76	01:04	616 km	*2
MIPAS	03/24	19:42	69.60	30.14	03/24	16:06	68.87	34.78	03:36	200 km	*4
FIRS-2	04/30	19:12	69.30	-148.91	04/30	06:04	63.57	-149.12	13:08	636 km	*5
MkIV	05/08	12:11	68.56	-146.29	05/08	05:49	62.14	-141.94	06:22	740 km	*6

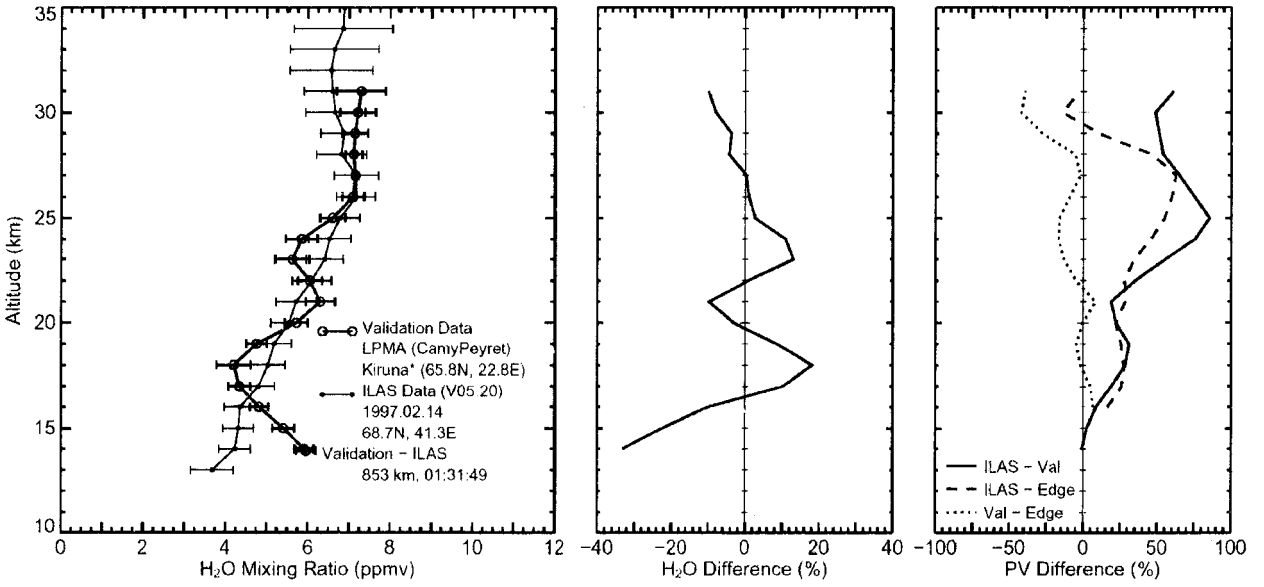
*1：高度20 kmに最も近い高度でのFISHのの測定時刻と位置
*2：LPMA測定の典型的な時刻と位置
*3：ELHYSA測定の最低高度と平均位置における時刻
*4：MIPAS測定で平均した時刻と位置
*5：FIRS-2測定で平均した時刻と位置
*6：高度20 kmにおけるMkIV測定の時刻と位置

数日後の2月14日、LMPAによる太陽掩蔽気球測定データは、ILAS水蒸気データとの間に大きな差（%）を示し（図7.1b）、これはPV値の差が大きかったことに対応している：LPMA測定位置が極渦エッジ近傍であったのに対し、ILAS測定位置は極渦の内側であったためである。LMPAに対するILASの混合比の差（%）の鉛直分布が、理にかなった形でPV値の差の鉛直分布に形状が類似していることに注目すべきである。つまり、より高い水蒸気混合比は、より高いPV値すなわち、より極渦の内側に対応している。

同じ2月14日に、高度21.5〜28 kmでELHYSAによる霜点測定が行われた（図7.1c）。差は、最高高度（28 km）では約10%であるが、高度が低くなるにつれてILASのデータがELHYSAのデータより最大で約29%大きくなっている。ILASとELHYSAの%差の鉛直分布もまたPV値の差（最大で約45%）の鉛直分布と良く類似している。極渦エッジに注目してPV値の差（%）を見てみると、ILAS測定の位置がELHYSAの位置よりはるかに極渦の内側にあったことを示しており、ILASで測定した水蒸気混合比がELHYSAより大きいことが部分的に説明できる。高度27〜28 km付近では、ELHYSAの位置は十分に極渦の内側に入っており、水蒸気の値の差が小さくなっていることも矛盾なく説明できる。



(a)



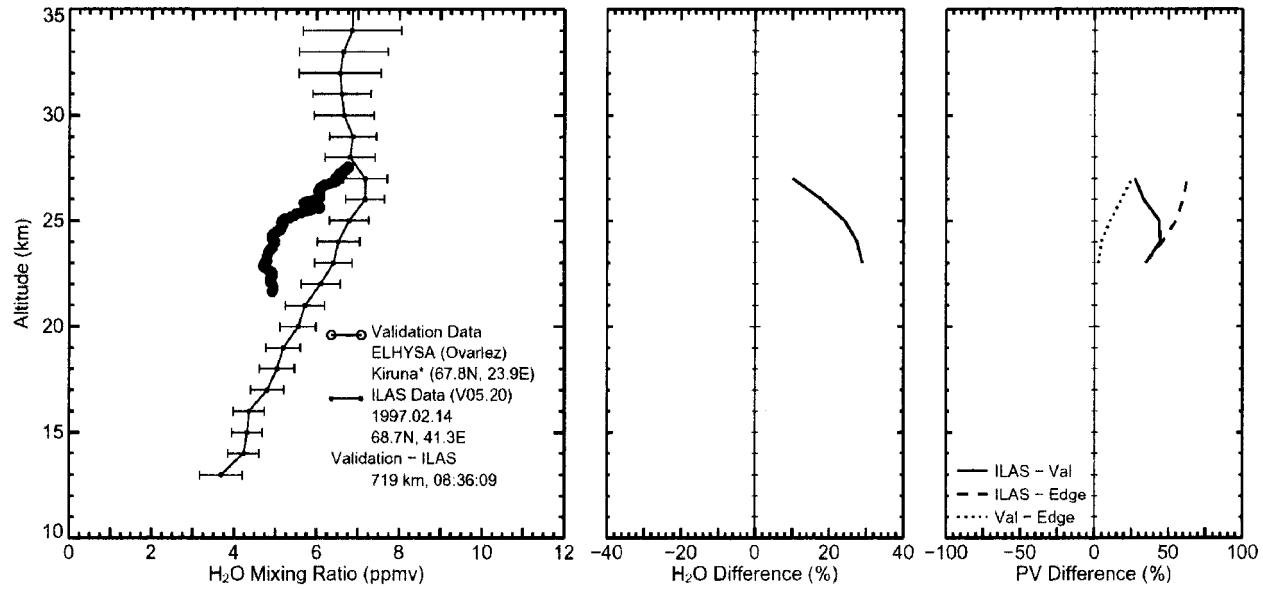
(b)

図7.1(1) 表7.3に示した７回のILAS検証フライトを対象とするILAS Version 5.20測定値および気球検証実験値による水蒸気混合比の鉛直分布の比較と相対差D (%) (定義については本文参照) 。ILASおよび検証実験の測定位置でのErtelの渦位（PV）の相対差（%）の比較を右側の図にそれぞれ示した。“ILAS-Edge”と “Val-Edge”は、(f)と(g)のケースのように、極渦の境界（Edge）が定義することができない高度領域では描かれていない。 ILASのエラーバーは全誤差を表し、本文中で定義されている（1σ）。検証実験のエラーバーの内容は次の通りである。

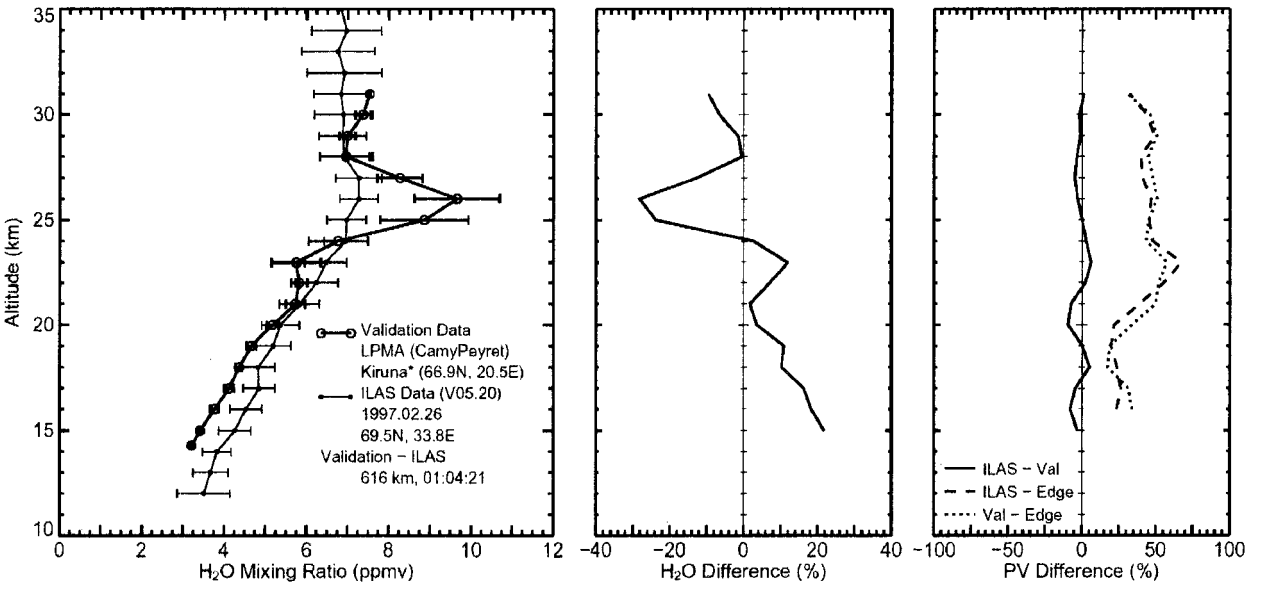
(a) FISH : エラーバーを示さず ; 0.15 ppmv precision ; 0.35 ppmvまたは6% accuracy

(b)(d) LPMA, (e) MIPAS,(f) FIRS-2, (g)MkIV : 1σ precision

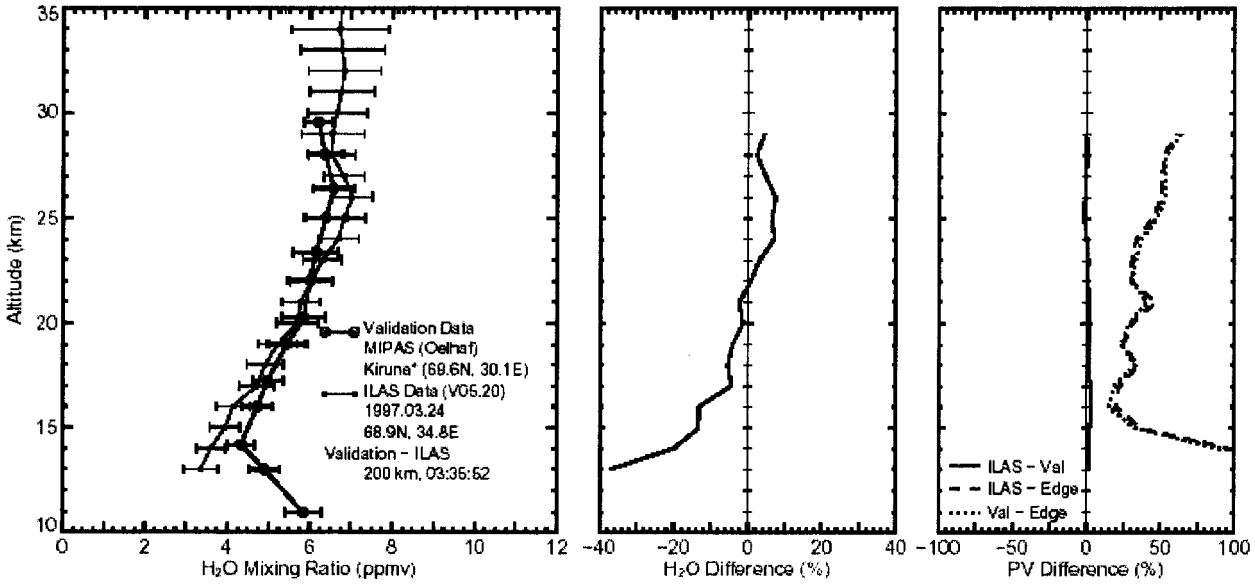
(c)ELHHYA : エラーバーは示さず ; 3% precision : 6% accuracy


Altitude (km)
H₂O Mixing Ratio (ppmv)
H₂O Difference (%)
PV Difference (%)
Validation Data
ELHYSA (Ovarlez)
Kiruna* (67.8N, 23.9E)
ILAS Data (V05.20)
1997.02.14
68.7N, 41.3E
Validation − ILAS
719 km, 08:36:09
ILAS − Val
ILAS − Edge
Val − Edge

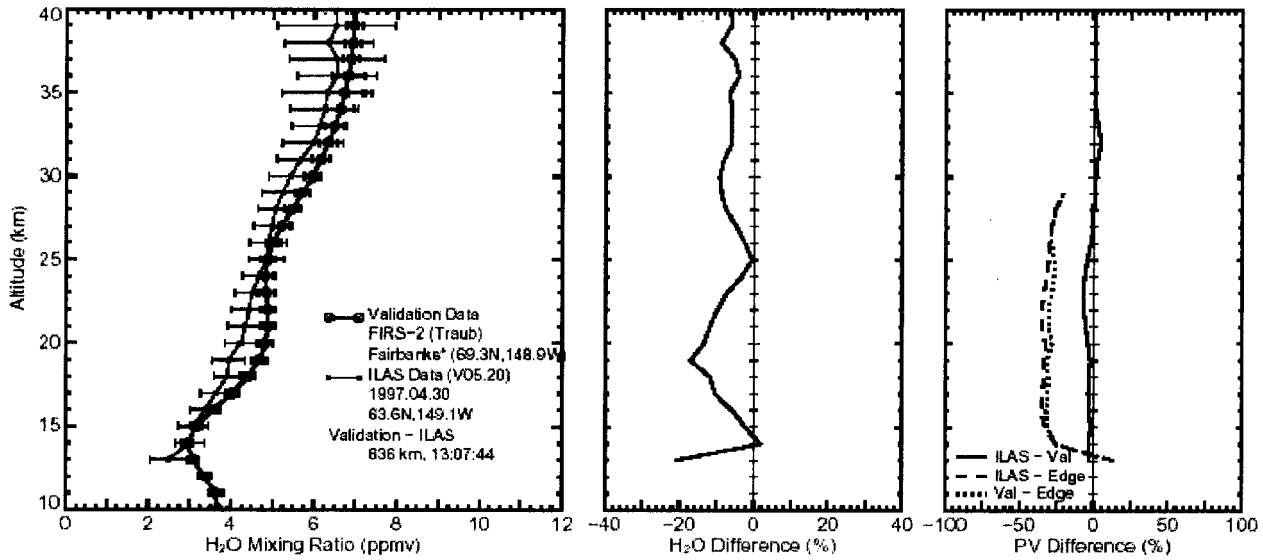
(c)


Altitude (km)
H₂O Mixing Ratio (ppmv)
H₂O Difference (%)
PV Difference (%)
Validation Data
LPMA (CamyPeyret)
Kiruna* (66.9N, 20.5E)
ILAS Data (V05.20)
1997.02.26
69.5N, 33.8E
Validation − ILAS
616 km, 01:04:21
ILAS − Val
ILAS − Edge
Val − Edge

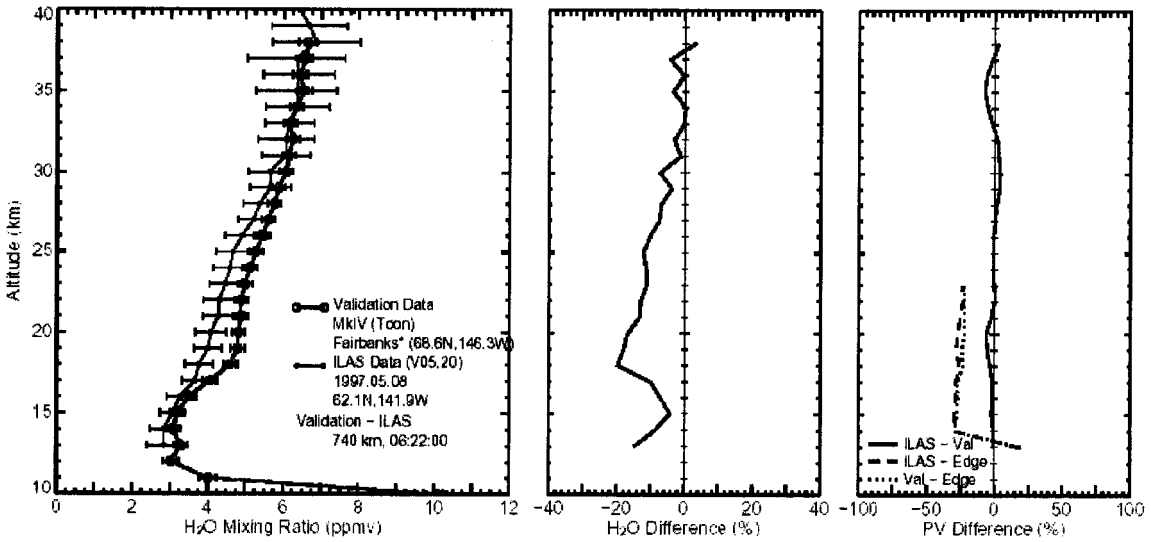
(d)


Altitude (km)
H₂O Mixing Ratio (ppmv)
Validation Data
MIPAS (Oelhaf)
Kiruna* (69.6N, 30.1E)
ILAS Data (V05.20)
1997.03.24
68.9N, 34.8E
Validation - ILAS
200 km, 03:35:52
H₂O Difference (%)
ILAS - Val
ILAS - Edge
Val - Edge
PV Difference (%)

(e)


Altitude (km)
H₂O Mixing Ratio (ppmv)
Validation Data
FIRS-2 (Traub)
Fairbanks* (69.3N,148.9W)
ILAS Data (V05.20)
1997.04.30
63.6N,149.1W
Validation - ILAS
636 km, 13:07:44
H₂O Difference (%)
ILAS - Val
ILAS - Edge
Val - Edge
PV Difference (%)

(f)



(g)

ILASとLPMAの別の事例（2月26日）の比較（図7.1d）では、高度約25～27 kmおよび高度15 kmを除いて良い一致を示した。高度約25～27 kmでは、LMPAは8 ppmv以上のきわめて大きな値を示し、高度15 km以下ではILASの値がLMPAより21%大きくなっていた。図7.1dに示した高度約25～27 km付近のLMPAのエラーバーが大きいことを考えると、この高度でのLMPAの測定になんらかの問題があったことが示唆される。PV値から見ると両方の測定位置は良く一致していた。

3月24日のILASとMIPASリモートセンシング放射測定の水蒸気の値を比較すると（図7.1e）、高度19 km以上ではILASとMIPASは良く一致し、高度24～26 kmでILASがわずか7%ほど大きくなっている。高度19 km以下では、ILASはMIPASより小さい値を示している。最も低い観測高度である13 kmでは、PV値の差が非常に小さいにもかかわらず、ILASはMIPASに比べて38%小さい値を示している。差の高度分布はILAS-FISHの比較結果に極めて類似している。低高度での差が大きいのは、ILASのリトリーバル精度があまり良くないためかもしれない。

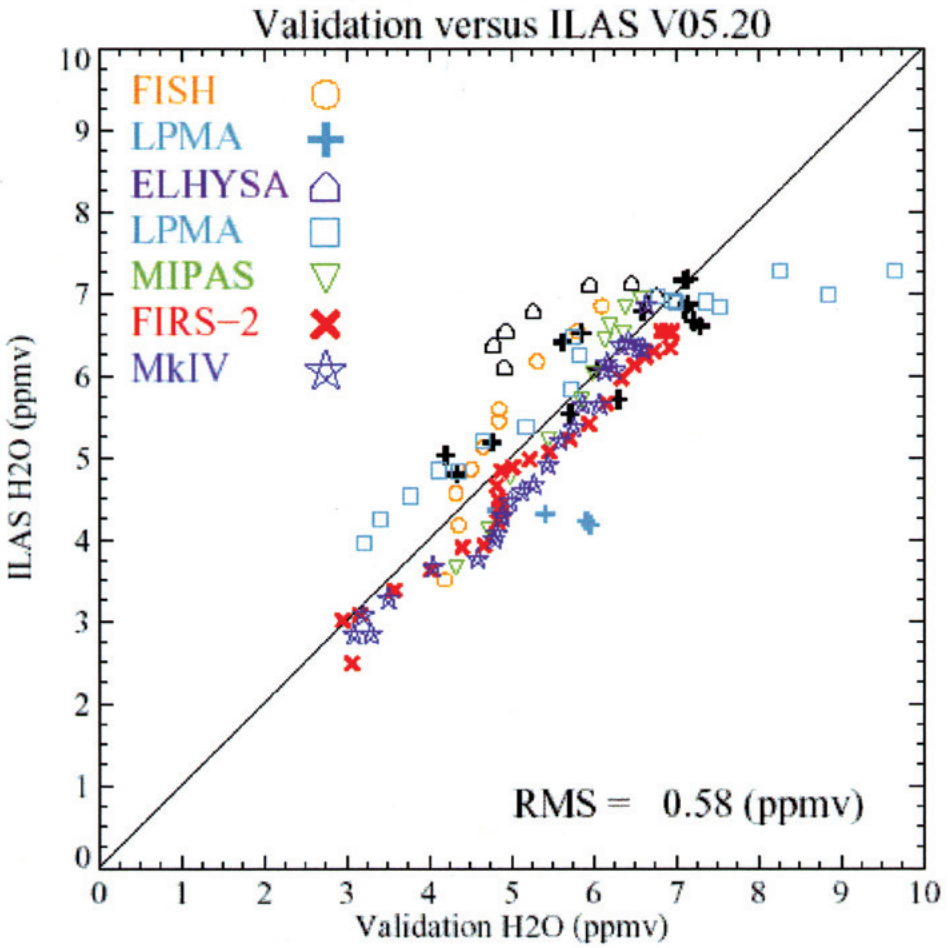
一般に、これら高緯度地域での冬季の測定は、大気状態の変化に影響される。極渦エッジ近傍の水蒸気量の変化は、観測高度に依存した各測定間の差に対して筋の通った説明を与えることができる。しかしながら、概して、水蒸気測定値の差は、各図の右側の図に示唆されている極渦から見た測定位置の差に部分的によるものである。

2番目のキャンペーンとして、アラスカのFairbanksにおいて、2つの気球検証実験が、極渦外側の1997年4月～5月に実施された（図7.1 f-g）。4月30日にはFIRS-2放射分光計が高度40 kmまで飛揚された（図7.1f）。ILASとFIRS-2の水蒸気データの相対%差は高度22～40 kmおよび高度14～18 kmでは-10%～0%であったが、高度19～21 kmでは-17～-10%であった。最低観測高度の13 kmでは、差が-20%を示した。5月8日に検証飛揚したMkIV太陽掩蔽

分光計では、差は高度14～17 kmおよび高度23～38 kmでは-10～+0%の範囲、高度18～22 kmでの差は-20～-10%、高度13 kmでの差は-14%であった（図7.1g）。MkIV、FIRS-2による測定値はともにILASの測定値より大きいが、顕著な高度依存性は見られない。

Fairbanksでの2つの検証実験は、同時に実施したILAS測定と同様に、極渦の影響を大きく受けていない気団内で実施された。その極渦は1997年の5月初めまで北欧、ロシア上空に残存していた[Toon *et al.*, 1999]。このことは、図7.1fおよび図7.1gのPV差（%）が小さいという事実からも示唆される。また、2つのリモートセンシング測定器の幾何学的観測条件もILASの条件と似ていた。したがって、Fairbanksでの条件の方がKirunaでのそれより、比較にはより好ましいものであったと言える。このことが、MkIVおよびFIRS-2による検証実験データとILASデータとの差の方がFISH, ELHYSA, LPMAおよびMIPASによる差よりも小さくなった理由と考えられる。

総括のために、プレート7-3にILAS Version 5.20による水蒸気値と気球による水蒸気値（ILASとの同時観測）の相関散布図を示す。前述したように、散布図からILAS測定値と気球測定値が良く一致していることが確認される。ILASとLMPAとの差が大きい理由は、1つには極渦エッジに対する相対的な測定位置がILASと異なっていたからであり、また1つにはLPMAの分光インターバルが水蒸気に適しておらず、データ質がLPMAの他の測定成分ほど良くないことによる。ILASとELHYSAの比較結果では、ILASの方が大きい値を示すバイアスが見られる。上述したように、これは主に極渦エッジに対する測定位置の相違によるものである。参考までに、以下に示した高度でのかっこ中の比較対称についての相対差D（%）の平均値は、次の通りである。高度15 kmで-13%（5サンプル：FISH, LPMA, MIPAS, FIRS-2, MkIV）、高度20 kmで-5%（4サンプル：FISH, MIPAS, FIRS-2, MkIV）、高度25 kmで-6%（2サンプル：FIRS-2, MkIV）、高度30 kmで-8%（2サンプル：FIRS-2, MkIV）となっている。なお、Yokota *et al.* [本技術資料]の表2.1にもILASのaccuracyの指標として同様のものが示されている。極渦エッジ近傍でのH_2O濃度の急激な勾配の状態を考慮すると、高度15～40 kmにおけるILASの水蒸気測定精度は、検証測定値の約10%以内、種々の気球搭載センサーとのRMS誤差で約0.58 ppmv以内（プレート7-3）に収まると結論づけられる。



プレート7-3　全有効同期データについての、ILAS Version 5.20による水蒸気と気球観測による水蒸気の相関。

黒色のマークはPV相対差が15%以上のデータを示す。ILASデータと気球データの差についての黒色データを除いた2乗平均値の平方根（RMS）は0.58 ppmvである。

7.6　POLARISミッションにおけるER-2航空機同時観測データとの比較

夏季の極成層圏においてオゾンの減少を引き起こす光化学反応過程および輸送過程の研究のため、POLARIS (Photochemistry of Ozone Loss in the Arctic Region in Summer)ミッションが 1997 年 4〜9 月に行われた[Newman *et al.*, 1999]。2 種類の水蒸気観測センサーが POLARIS ミッション中に配備された ER-2 航空機（NASA 所属）に搭載された。ひとつは、ハーバード大学で開発されたライマン・アルファ湿度計[例：Weinstock *et al.*, 1994]、もうひとつは、NASA JP（Jet Propulsion Laboratory (Lyman-4)；ジェット推進研究所）で開発されたオープンパス (an open path) マルチパス Herriot セル可変赤外レーザソース (1.37 μm) の吸収湿度計である[例：May, 1998]。測定精度は、積算時間 2 秒で成層圏内では 0.05

ppmv と見積もられている。JPL のレーザー湿度計と Harvard のライマン・アルファ湿度計とを比較すると、6／7 月の観測期間中、温位 490K(～19 km)を越える高度で１％以下の精度で一致することがわかった。しかし、湿度圏界面 (hygropause) 付近では JPL の湿度計で測定された水蒸気値はハーバードの湿度計よりも約 5～10%大きかった。

アラスカの Fairbanks を基地として行われた POLARIS ER-2 ミッションの最初の観測期間である 1997 年 4 月下旬～5 月中旬において、ILAS と POLARIS の観測が同期した事例をまとめたものを表 7.4 に示す。表 7.4 の 3 列目にある HW はハーバードのライマン・アルファ湿度計、JW は JPL のレーザー湿度計を表す。ILAS の掩蔽接点位置との最小距離が 500 km 未満、時間差は±12 時間以内の条件に合う POLARIS ER-2 による水蒸気プロファイルの数は合計で 10 であった。POLARIS ER-2 とそれに対応する ILAS の観測は、極渦の影響を受けていなかった。この極渦は、7.5 節でも述べたように 1997 年 5 月初めまでヨーロッパ北部とロシア上空に長く残存したものである。また、比較高度範囲を表 7.4 に示す。

表 7.4　1997 年における 2 つの POLARIS センサーによる検証実験と ILAS 測定の対応表

ILAS 掩蔽測定の接点からの最小距離が 500 km 未満、ILAS との測定の時刻差が前後 12 時間以内を条件として、比較対象となる PORALIS ER-2 のプロファイルを選んだ。HW：Harvard Lyman-α 湿度計、JW：JPL レーザー湿度計。両者の最小距離と比較高度範囲も示した。

Profile No.	Month/Day	Instrument	Altitude Range	Minimum Distance
1	04/26	HW, JW	13 – 19 km	268.4 km
2	04/30	HW, JW	13 – 19 km	137.7 km
3	04/30	HW, JW	13 – 20 km	392.8 km
5	05/06	HW, JW	14 – 20 km	293.8 km
6	05/09	HW	13 – 19 km	367.1 km
7	05/09	HW, JW	13 – 19 km	431.9 km
8	05/11	HW, JW	13 – 19 km	425.7 km
9	05/11	HW, JW	13 – 19 km	392.7 km
10	05/13	JW	12 – 19 km	495.5 km

図 7.2 に ILAS Version 5.20 による水蒸気測定値と POLARIS の航空機による検証実験測定値との比較（左図）とそれらの相対差を百分率で表したもの（右図）を示す。ここでは、相対差（%）を、式(1)において「Validation」を「POLARIS」とした際の D 値として定義する。図 7.2 の左の図には、ILAS と POLARIS (HW と JW の平均)の平均値と標準偏差、最大、最小値の高度分布を示す。これによると、高度方向の勾配は両者ともほぼ同じだが、高度 20 km 以下の全ての高度で、POLARIS の方が ILAS に比べ混合比の値が大きくなっている。両者の差が標準偏差より大きくなっていることから、この差は有意であると思われる。図 7.2 の右図にプロットされた相対差（%）をみると、高度 14～20 km で約-27%～-16%となっている。Kley *et al.* [2000] の WAVAS レポート第 2 章によると、100～60 hPa

（高度約 16～19 km）において、HW は HALOE より約 20%大きく、JW は HW より約 1%大きく、ILAS は HALOE より約 3%大きい。これは、ILAS が HW や JW より約 17～18%小さいことを意味する。このバイアスは、図 7.2 に示すように POLARIS における HW・JW と ILAS との比較結果と矛盾しない。しかしながら、16～27%という差（%）の大きさは、17～18%のバイアスより大きい。以上のように、POLARIS ER-2 機データは、POLARIS ミッションの一部としてアラスカの Fairbanks で行われた 1997 年 4 月 30 日の FIRS-2、5 月 8 日の MkIV による 2 回の気球観測と ILAS との比較でみられた特徴を定性的に支持する結果となった。

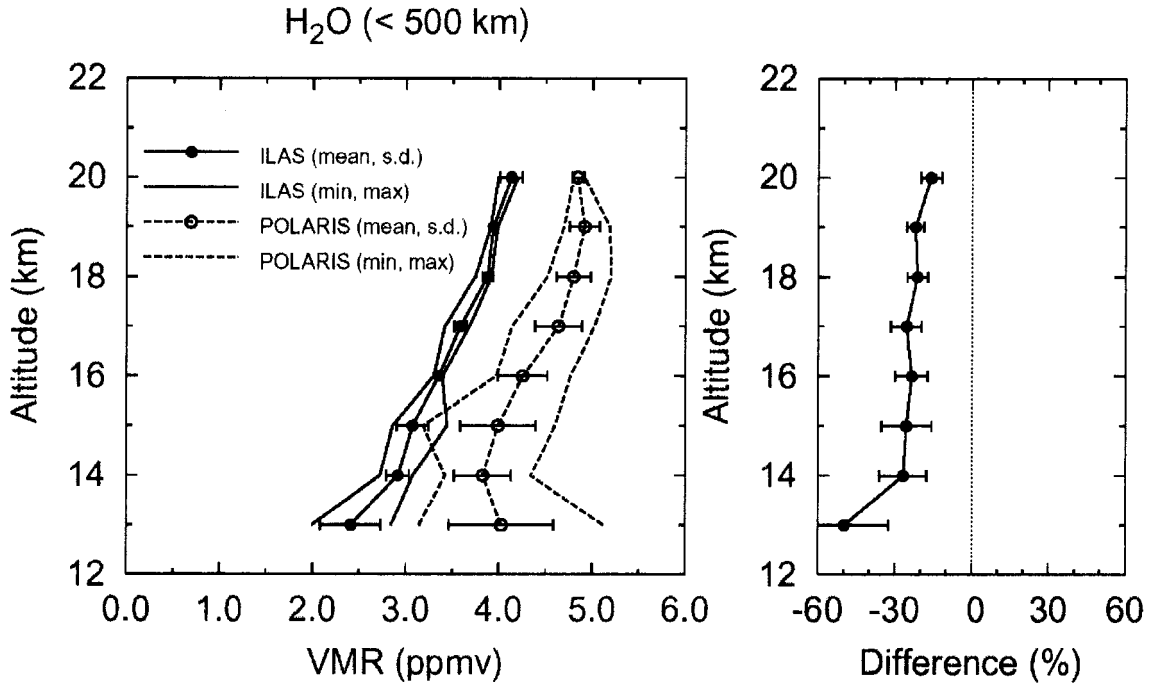


図 7.2　ILAS Version 5.20 および POLALIS 航空機検証実験の体積混合比鉛直分布の比較。
比較には表7.4に示すすべての同期ペアを用いた。左側の図面は、平均値の鉛直分布，各高度での1σの分散および最大値と最小値をILAS, POLARISの両方について図示した。右側の図面には、相対差（%）（定義については本文参照）で定義される差を%で、また標準偏差1σの分散を示した。

7.7　HALOE と SAGEⅡによる衛星の同時観測との比較

この節では、1996 年 11 月～1997 年 6 月の ILAS の連続観測期間について、ILAS Version 5.20 による水蒸気量と HALOE Version 19、SAGEⅡVersion 6 による水蒸気量との比較を行う。HALOE と SAGEⅡの全データは、WWW サーバーから入手でき、研究目的の使用が可能である。ILAS と HALOE、もしくは ILAS と SAGEⅡの間で同期したデータを抽出す

るため、時間と空間距離の同期基準をそれぞれ±12 時間、距離 300 km とした。同期した観測データを探す際に、接線高度 20 km を基準とする測定位置・時間を各観測の代表値として用いた。HALOE と SAGEⅡは傾斜軌道衛星で運用されているため、地球全域で太陽掩蔽が観測できる。そのため、ILAS と同時に観測できる緯度は、季節に依存するが ILAS がカバーする範囲によって決まり、北半球では 57～72° 、南半球では 64～89° の高緯度域となる。上記の基準により、まず第1段階として HALOE と ILAS のペアが 202 組、SAGEⅡと ILAS のペアが 149 組抽出された。各衛星との同時観測の概要を期間毎に表 7.5 に示す。時間差の最大は 8.3 時間で、それは SAGEⅡと ILAS との組み合わせであった。南半球 (SH) における観測の同期は 1996 年 11 月から 1997 年 2 月に起こっており、北半球 (NH) では 1997 年 3 月から 6 月に起こっている。ILAS の北半球での観測はすべて日昇観測であり、南半球での観測はすべて日没観測であった。

表 7.5 水蒸気についての ILAS vs HALOE, ILAS vs SAGE II の比較ペア。

比較ペアは両者の測定位置間の距離が 300 km 以内、測定時刻の差が 12 時間以内という条件で選んだ。

Period	No.	Distance (km)[2]	Time (h)[3]	Hemisphere[4]	Occultation Mode[5]	
					ILAS	Validation
HALOE versus ILAS (Total No.: 202; 118 in the SH and 84 in the NH)[1]						
1996						
Nov 19 - 24	40	172 (28)	1.8 (3.5, 0.0)	SH	SS	SR
Dec 10 - 16	39	204 (130)	1.6 (3.5, 0.0)	SH	SS	SS
1997						
Jan 28 - 31	17	178 (19)	4.5 (5.3, 3.8)	SH	SS	SR
Feb 18 - 20	22	165 (64)	0.5 (1.0, 0.1)	SH	SS	SS
Mar 24 - Apr 2	59	166 (23)	0.2 (0.5, 0.0)	NH	SR	SS
May 13 - 14	12	147 (9)	6.9 (7.4, 6.5)	NH	SR	SR
Jun 16 - 18	13	248 (197)	0.2 (0.4, 0.0)	NH	SR	SS
SAGE II versus ILAS (Total No.: 149; 128 in the SH and 21 in the NH)[1]						
1996						
Nov 4 - 24	74	149 (45)	1.4 (3.2, 0.0)	SH	SS	SR, SS
1997						
Jan 8 - 30	34	213 (136)	4.0 (4.8, 3.1)	SH	SS	SR, SS
Feb 3 - 4	20	194 (125)	0.5 (1.2, 0.0)	SH	SS	SS
Apr 26 - 29	10	188 (125)	7.9 (8.3, 7.4)	NH	SR	SR
May 28 - 30	11	220 (157)	0.2 (0.4, 0.0)	NH	SR	SS

1) 各データセットの比較ペア数

2) 個々の測定位置間距離の平均。最小距離をかっこ内に示す。

3) 個々の測定時刻差の平均。時刻差の最大値と最小値を、それぞれかっこ内に示した。

4) NH・SH はそれぞれ、北半球 (NH) ・南半球(SH)で太陽掩蔽現象が起こっていることを表す。

5) SR・SS はそれぞれ、各センサーの太陽掩蔽時に、日昇(sunrise)・日没(sunset)であったことを表す。

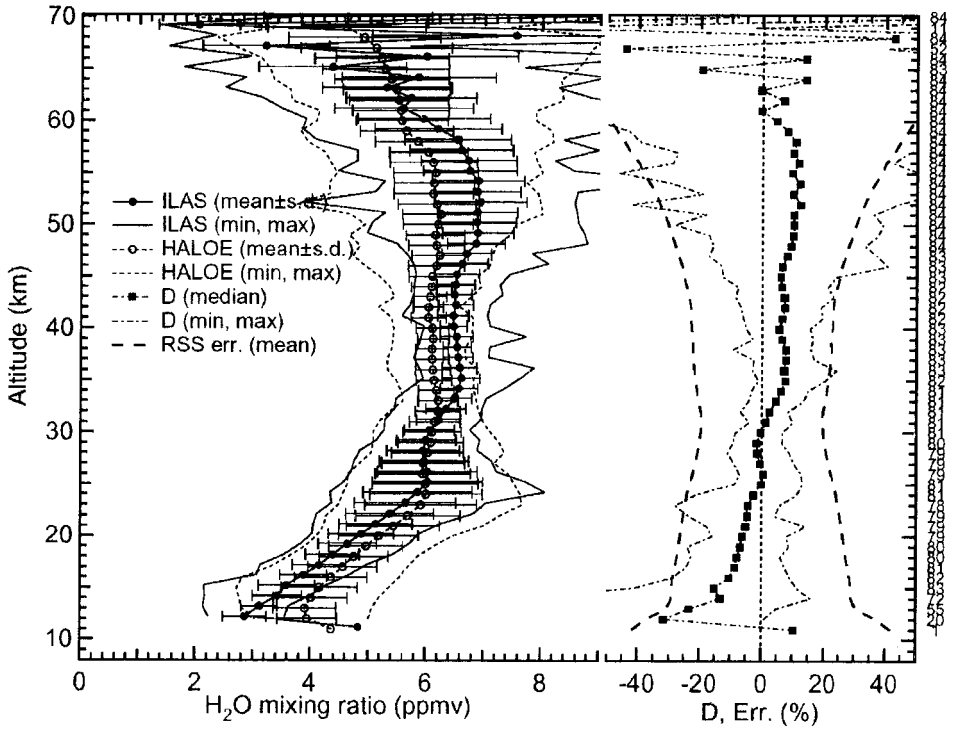
極渦に対する 2 つの衛星観測の相対的な位置関係を考慮して、上記の基準で選ばれたデータのペアを以下の手順でさらに選別した。まず、ILAS とそれに対応する同期観測データについて、接線高度でみた代表測定位置と時間の PV を計算し、PV と温位を各グリッドご

とに計算する。そして、これらのデータを双方の観測データ（ILAS とそれに同期した検証用衛星データ）について、高度 1 km の幾何学的なグリッドで時間、空間の内挿を行う。ここで、相対差（%）を高度 1 km のグリッドごとに

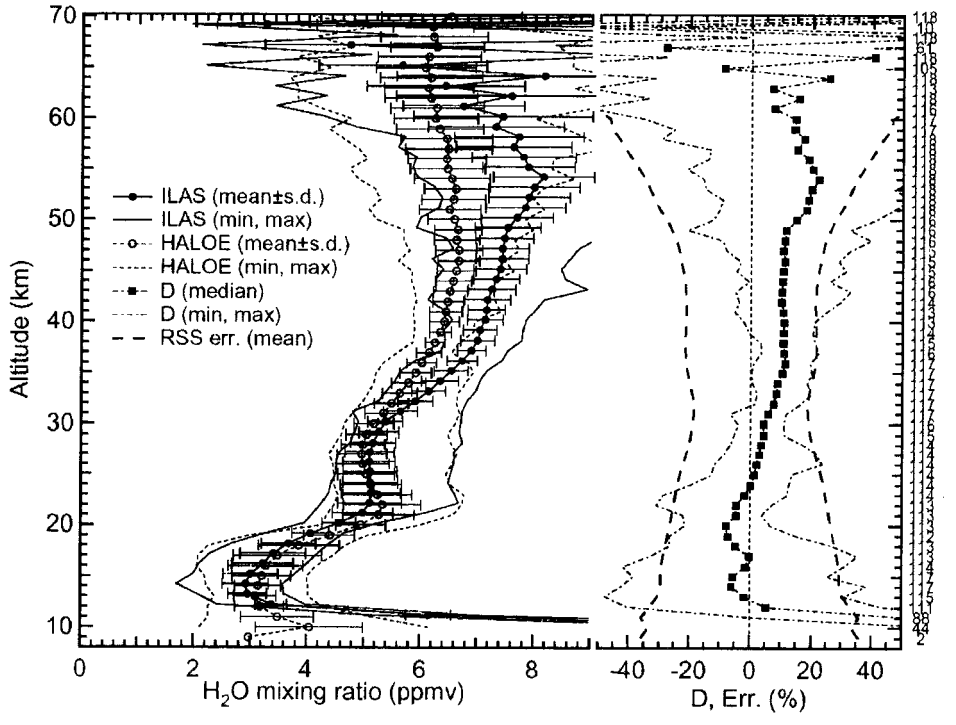
[PV (ILAS) – PV (Validation)]/{[PV (ILAS) + PV (Validation)]/2} x 100

と定義する。PV (ILAS)と PV (Validation) はその時間、位置における ILAS とそれに同期した検証データの PV の値を表す。もし、相対差（%）が連続する 3 km 以上の高度グリッドで±15%を越える場合、これらの高度のデータを検証解析データから除外する。

図 7.3a は 1997 年 3～6 月の北極域における、ILAS と HALOE による水蒸気体積混合比に関する 84 個のプロファイル比較結果、図 7.3b は 1996 年 11 月～1997 年 2 月の南極域における 118 個のプロファイル比較結果である。図の右側は、ILAS と HALOE 間の百分率で表した差（D）の中央値で、最大値と最小値も併せて示した。ここに、D は式(1)で「Validation」を「HALOE」とした場合で定義される相対差（%）である。0 (%)の線をはさんで対称な 2 つの破線は、各高度における ILAS データと HALOE データの誤差の RSS (root-sum-square) の平均で、RSS は ILAS と HALOE の全観測誤差の合計の平方根で定義される。北極の春から夏における比較 (図 7.3a) と南極の晩春から夏における比較（図 7.3b）をみると、全体的にほとんどの高度で差が 10%未満と、非常に良く一致している。北極での比較（図 7.3a）では、下部成層圏で類似した鉛直構造を示している。すなわち、高度 12～25 km で高度とともに混合比が大きくなり（ILAS が HALOE より約 0.5 ppmv 小さい）、高度 25～32 km でおおよそ一定（ILAS と HALOE の値はほぼ同じ）となっている。高度 32～60 km では、分布はほぼ同様であるが、ILAS が HALOE より約 0.5～0.8 ppmv 大きい値となっている。高度 60 km 以上では、ILAS の値が高度とともに理不尽な振動をしている。南極での比較（図 7.3b）においても下部成層圏では ILAS、HALOE ともに類似した鉛直分布となっている。すなわち、高度 12～15 km で混合比が高度とともに減少し（ILAS が HALOE より最大で約 0.2 ppmv 小さい）、高度 15～22 km で増加し (ILAS が HALOE より約 0.3 ppmv 小さい)、高度 22～30 km でほぼ一定（ILAS と HALOE の値がほぼ同じ）となっている。高度 30～55 km では、ILAS の増加の割合が HALOE より大きく（ILAS の方が HALOE に比べて最大 1.6 mppv 大きい）、高度 55 km 付近では ILAS の混合比の平均値が約 8 ppmv となっている。高度 60 km 以上では、同様に ILAS の値が高度とともに理不尽な振動を示している。



(a)



(b)

図7.3 表7.5に示した北半球(a)、南半球(b)におけるすべての同期データを用いたILASとHALOE 水蒸気データの比較。

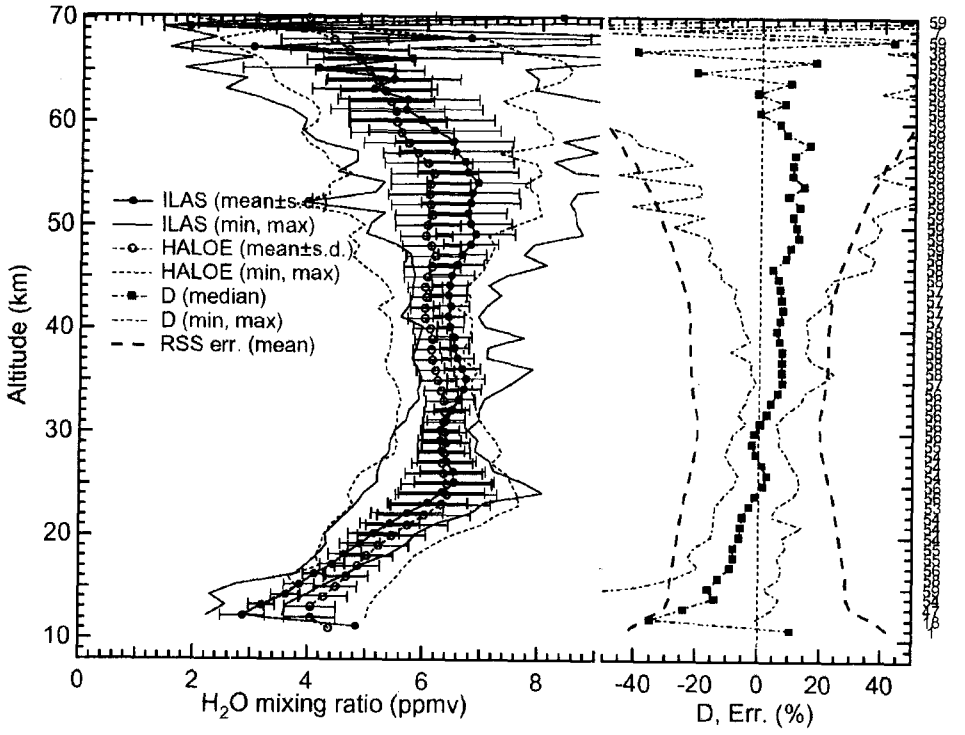
Version 5.20 ILASとVersion 19 HALOEにより導出された全同時観測データの水蒸気混合比の平均鉛直分布（左図）と各高度における同時観測データの相対差（%）（右図）。エラーバーは各高度におけるデータの標準偏差1σ。データの最大値及び最小値は実線 (ILAS)と点線 (HALOE)でそれぞれ示す。ILASとHALOEについて、水蒸気混合比の個々のデータから算出した相対差 (D(%)で表す。本文の定義参照) の中央値の鉛直分布を右図に示す。一点鎖線は、D値の最大値と最小値。ゼロラインに対して対称な鎖線はILASとHALOE観測における全誤差の平方和の平方根(RSS err.で表したもの。定義は本文参照)を示す。

表 7.5 に示した観測が同時に行われた期間の中で、両半球それぞれで最もデータ数が多かった期間における比較結果を図 7.4a（1997 年 3 月 24 日～4 月 2 日、北半球、59 プロファイル）と図 7.4b（1996 年 11 月 19～24 日、南半球、40 プロファイル）に示す。北極における早春の期間では（図 7.4a）、ILAS と HALOE の鉛直構造がよく一致しており、高度約 25 km まで水蒸気混合比は高度とともに増加し、高度約 55 km までほぼ一定となっている。相対差の平均は、高度 15 km 以下を除く成層圏の全高度で 10%以下である。高度 25～30 km より下で ILAS の混合比が HALOE より小さく、それより上層で大きい傾向は、南極の 11 月（図 7.4b）と 1996 年 12 月の比較結果でも同様に見られた。北極の 1997 年 5 月では（図省略）、HALOE のデータには高度 23 km 付近に特徴的な極大が見られたという点で、ILAS の鉛直分布と異なっていた。

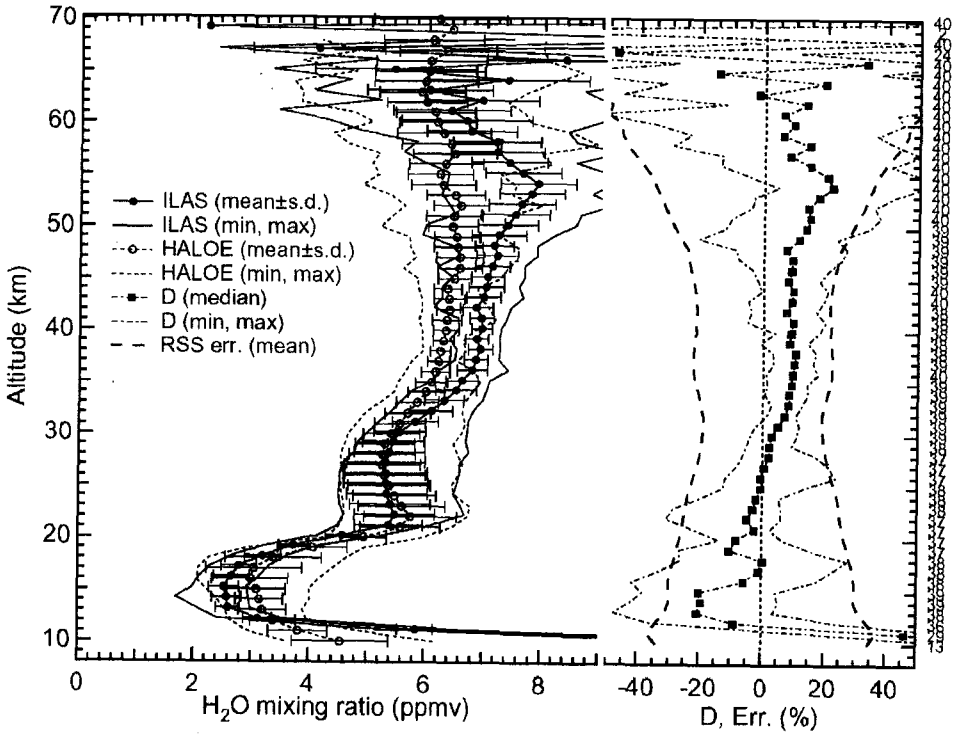
南極晩春における ILAS と HALOE の平均値の鉛直分布（図 7.4b）をみると、どちらも同様な鉛直構造を示し、高度約 15 km に極小、約 22 km に極大、約 27 km に第 2 の極小がみられる。これは 1996 年 12 月 10～16 日の期間（図省略）にもみられた。高度 25 km 以下で ILAS の混合比が HALOE より小さく、その一方高度 25 km 以上では HALOE よりも大きくなっている。図 7.4b の右図をみると、高度 13～15 km で ILAS が HALOE より約 10%小さく、高度 55 km 付近で 20%大きくなっている。高度方向の混合比の大きな振動は高度約 65 km 以上でみられる。これらの高度を除けば、差は 10%以下で、図中の RSS（平均）で示される測定誤差の範囲内である。

まとめると、測定誤差を考慮すれば、ILAS Version 5.20 と HALOE Version 19 との比較結果は良好であったと言える。

ILAS と SAGE II との全比較結果として、北極の 1997 年 4～5 月における 21 プロファイルを図 7.5a に、南極の 1996 年 11 月～1997 年 2 月における 128 プロファイルを図 7.5b に示す。北極の春では（図 7.5a）、ILAS と SAGE II の平均値の鉛直分布はともに高度 14～50 km でほぼ単調増加しており、その勾配は SAGE II の方が大きくなっている。高度 15 km 以下では、SAGE II が ILAS より約 40%小さい。高度 25～43 km では、差が 10%未満となっている。南極の晩春から夏では（図 7.5b）、ILAS、SAGE II とも平均値の鉛直分布は同様な構造を示しており、高度約 17 km で極小、約 23 km で極大となっている。ILAS と SAGE II の差（%）の鉛直分布は、北極の春におけるそれと同様である。

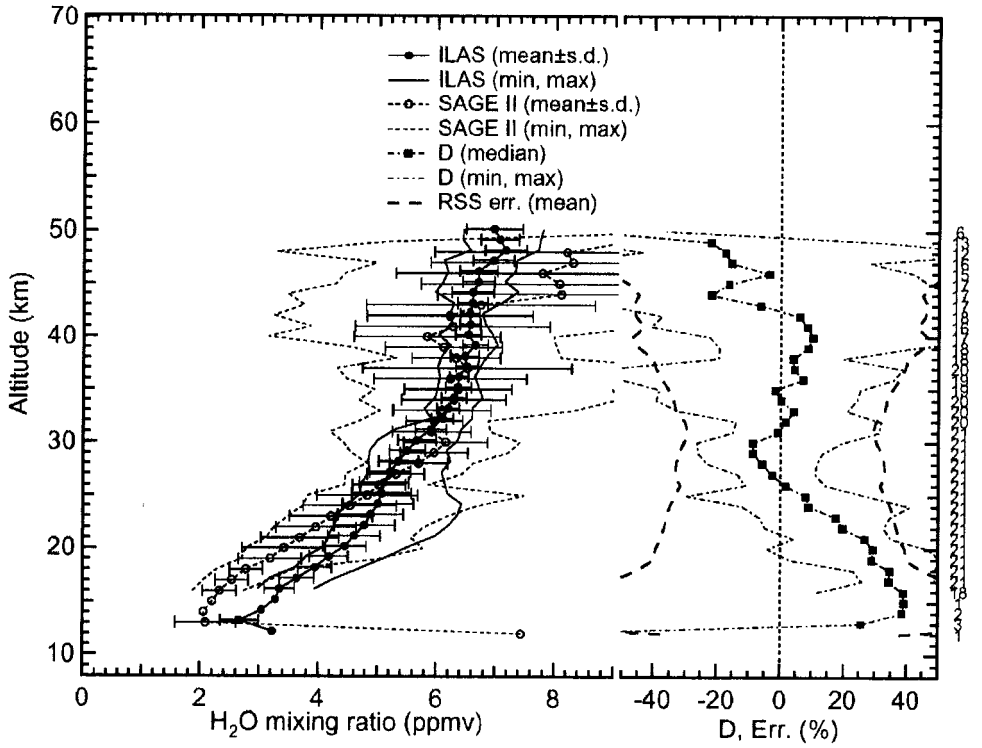


(a)

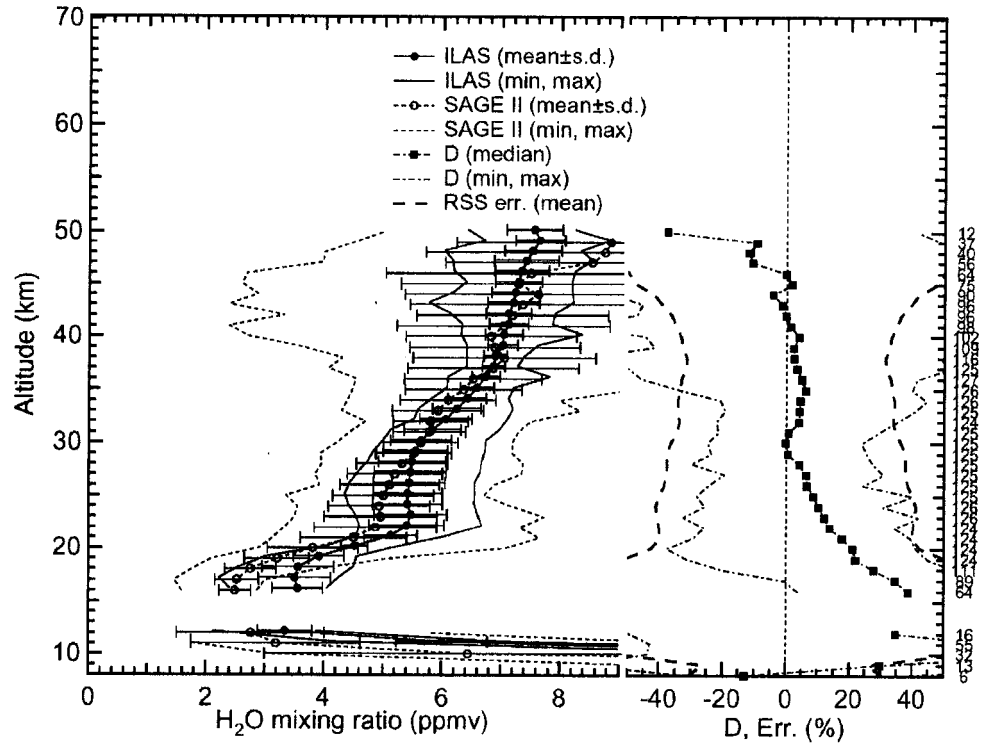


(b)

図7.4 図7.3と同様。ただし1997年3月24日から4月2日の54個の北半球における観測 (a) と1996年11月19～24日の41個の南半球における観測 (b) を比較したもの。



(a)



(b)

図7.5 図7.3と同様。ただし、表7.5に示した北半球 (a)、南半球 (b)におけるILASとSAGE IIの全同期データを用いた比較。

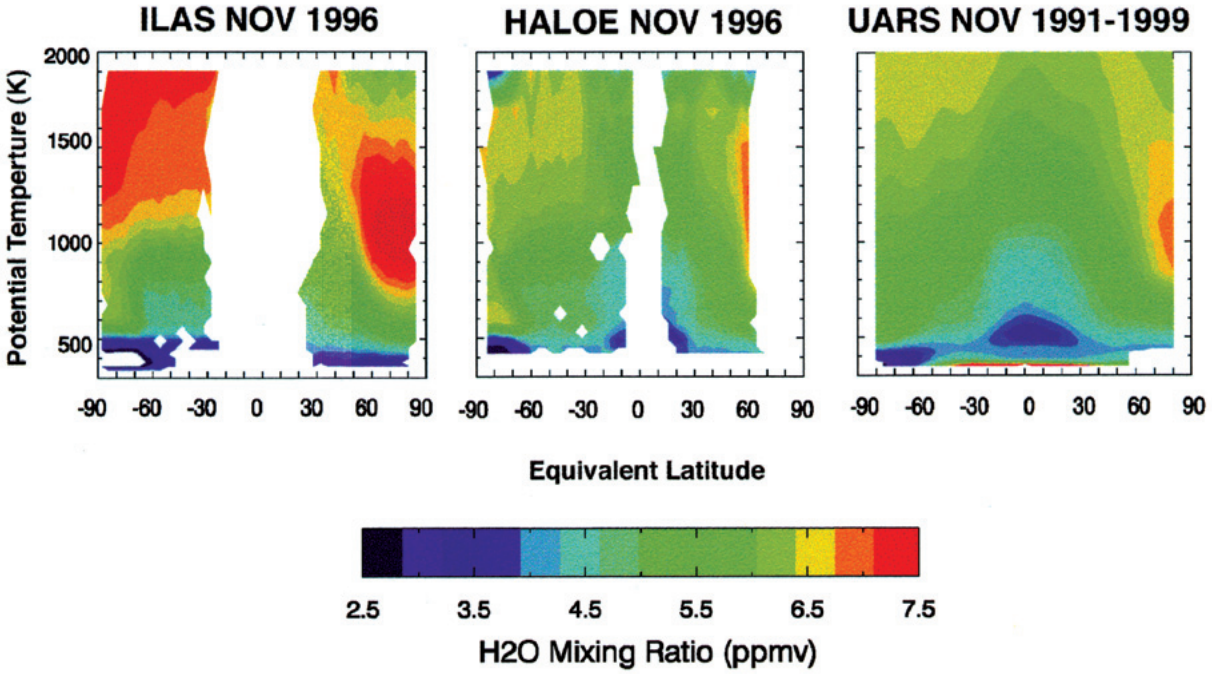
7.8 ILASデータの平均値の変動とHALOE, UARS参照大気との比較

気球、航空機による検証実験や衛星による同時観測データとの比較に加えて、ILASと他衛星との月平均、帯状平均による水蒸気量の変化の比較を検証解析の一環として行った。この種の本質的に定量的ではない比較方法は、データを全体として定性的に評価する際に非常に有用である。これにより、他衛星データにより確立された水蒸気の気候特性や、大気循環に関する既知の特徴とILASによる観測値との一貫性が評価できる。この節では、ILASデータとHALOEデータおよびUARS気候値の帯状平均値を比較した代表的なケースについて示す。

ILASの観測は地理的に狭い緯度範囲（北緯57～72°、南緯64～89°）で行われているが、極渦周辺付近の急なPVの勾配やゆがんだ極渦の形状により、力学的には広い領域をカバーしている。力学的な変数、等温位面上のPVで観測値を選りと分けると（この場合PVを基にした相当緯度（equivalent latitude: EL）として表現される）、ILASデータはELでおおよそ両半球の約30°から極までをカバーする。

1996年11月の観測データによるILASとHALOEのELに基づく帯状平均と、9年分（1991～1999）のHALOE Version 19データおよび20ヶ月分（1991年9月～1993年4月）の入手可能なMLSプロトタイプ Version 5（非線型リトリーバル）の成層圏水蒸気量データから算出されたUARS気候値データとをプレート7-4に示す。ILASとHALOEのEL帯状平均値は、南緯88°から北緯88°の緯度4°ごと、UARS標準温位（θ）の高度レベルごとに区切られて平均されている。PVとθのデータはUKMO解析による。UARS気候値はUARS参照大気の一部で、年間および半年間の季節変化を表現する調和関数へのフィッティングを用いて、同緯度帯での矩形領域平均の季節サイクルから算出される[Randel *et al.*, 1998]。

UARS気候値と同様に、ILASのEL帯状平均は、ILASデータが成層圏内の大規模循環の特徴を捉えていることをはっきりと示している。ILASは地理的緯度での熱帯地方をカバーしないが、その分布は熱帯における低温の対流圏界面や極渦周辺の気塊の上昇を示している。極域の高い値は、メタンの酸化により生成されたより多くの水蒸気を含む気塊が下降していることを示している。11月の南極域成層圏最下部の極渦（プレート7-4の500 K以下（高度約20 km））内の脱水シグナルは、UARS気候値にみられるが、ILASデータにも現れている。水蒸気分布の勾配について、ILASとHALOEのEL帯状平均値は極めてよく似ている。ILAS/HALOEの1996年の帯状平均値とUARSによる9年間の気候値との間にみられる量的な違い、たとえば南半球500～1000 Kでの勾配の差異は、年変動を反映したものである。北半球におけるILASとHALOEのEL帯状平均の大きな見た目の違いは、主にサンプリング範囲の違いによる。すなわち、地理的緯度でILASが北緯70°周辺をサンプリングしているのに対し、HALOEは極に向かって北緯60°までに限定されているためである。定量的には、1000 K以上の高度領域（～35 km）と極渦内部でのILASの混合比の値がHALOEより大きい。



プレート7-4　PVに基づく相当緯度と温位の座標で表した11月の水蒸気の月平均値。

1996年のILAS観測により求められたもの(左)、1996年のHALOE観測によるもの(中央)、URAS (1991～1999年の9年間) によるもの(右)。この月のHALOEの測定領域は地理的緯度で極方向へ北緯60度までに制限されていることに注意。

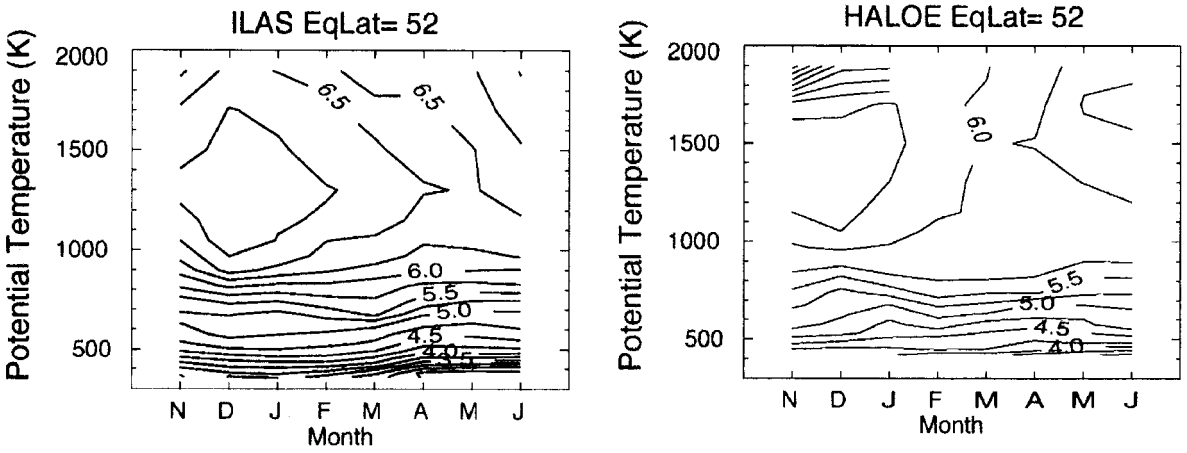


図7.6　ILAS (左)とHALOE (右)の観測から求めた、1996年11月から1997年6月のPVを基にした相当緯度で表される北緯52度における、時間-高度断面の水蒸気等値線。等値線間隔は0.25 ppmv。

大規模循環を裏付ける ILAS データの妥当性は、時間高度断面図でも示されている。図 7.6 に北緯 52° EL における ILAS（上）と HALOE（下）の観測による 1996 年 11 月～1997 年 6 月の水蒸気の EL 帯状平均値を示す。ILAS と HALOE ともに、中部成層圏（800 K（高度約 30 km）以上）で北半球の冬季に極大を持つ季節変動がみられる。中緯度（EL）帯の季節変動は、極域における下降流の結果である。ILAS と HALOE の違いは主に両観測機器のサンプリングの差による。ILAS は主に高緯度/極域の空気を測定しているのに対し、HALOE の帯状平均値は低緯度の空気からの寄与を含んでいる。下部成層圏における水蒸気量は、どちらのデータも明らかに時間的に一定となっているが、ILAS データは鉛直勾配がより大きく、図 7.3、図 7.4 における比較結果と一致している。

プレート 7-4 や図 7.6 に示された帯状平均気候値の全体的な一致は、全体としての ILAS データにとって重要な検証である。ILAS 水蒸気量の帯状月平均値の変動やその UARS 気候値との比較に関するより詳細な議論については、Pan *et al.* [2002]で行われおり、ILAS 水蒸気データと 1996～1997 年の北極極渦内の気象条件が矛盾しないことについて、より詳しく示されている。

7.9 比較結果のまとめ

7.5、7.6、7.7 節の ILAS と各種の同時検証実験データとの比較結果を表 7.6 にまとめる。表は高度範囲、検証実験、月、南/北半球ごとに並んでいる。高度 60-70 km に対しては、リトリーバルに関する問題により、ILAS の観測結果が高度とともに大きく振動しているため、比較を行わなかった。SAGE Ⅱの衛星観測データは、南極の夏季にあたる 1997 年 1,2 月と北極の晩春にあたる 1997 年 4、5 月において、高度 15～20 km で 30%以上、高度 20～25 km で 20%以上 ILAS より小さかった。Kley *et al.* [2000] にあるように、特にこの高度範囲における SAGE Ⅱの値は他の観測値よりもかなり小さく、この範囲での SAGE Ⅱのデータ質は十分ではないといえる。表 7.6 のまとめにおいて一見してわかるのは、ILAS とその検証実験データの不確定要素を考慮すると、ILAS と入手可能な全ての検証実験データとの比較が非常に良好なことである。7.8 節における PV に基づく相当緯度・温位の座標による ILAS と UARS 気候値および HALOE データとの気候学的な比較では、大気循環に関する知見を考慮すると、ILAS の水蒸気量データは総体的に妥当である。

表 7.6　様々な検証実験同期測定値に対する ILAS 水蒸気測定値の相対差（%）のまとめ。

この表は高度範囲、検証実験、月、半球についてまとめてある。NH と SH はそれぞれ、北半球と南半球を示す。HALOE と SAGE II は衛星による測定、PORALIS は航空機による測定。気球による測定の内訳は、FISH (FI), LPMA (LP), ELHYSA (EL), MIPAS (MI), FIRS-2 (FS), MkVI (Mk)である。%で示された数字は 5%単位で見積もったもの。アステリスク（*）は、その月、その半球に検証観測値がなかったことを示す。シャープ（#）は、ILAS の評価に適さないもの（本文参照）。"+-" はその高度領域における値の変化を示しており、下部でプラス、上部でマイナスであることを意味する。逆も同様で、"-+"は下部でマイナス、上部でプラスである。 "-0" は値としては 0 であるがわずかに 0 を下回ることを意味し、逆も同様である。

Altitude	1996				1997											
Experiment	Nov		Dec		Jan		Feb		May		Apr		May		Jun	
	NH	SH	NH	SH	NH	SH	NH	SH	NH	SH	NH	SH	NH	SH	NH	SH
50-60 km																
HALOE	*	+10	*	+15	*	+15	*	+25	+10	*	*	*	+10	*	+5	*
45-50 km																
HALOE	*	+10	*	+10	*	+10	*	+15	+10	*	*	*	+5	*	+10	*
SAGE II	*	-10		*	*	*	-10	*	-10	*	*	-25	*	-10	*	*
40-45 km																
HALOE	*	+10	*	+10	*	+10	*	+15	+5	*	*	*	+5	*	+5	*
SAGE II	*	-5	*	*	*	-0	*	+0	*	*	+10	*	-10	*	*	*
35-40 km																
HALOE	*	+10	*	+10	*	+10	*	+15	+5	*	*	*	+10	*	+5	*
SAGE II	*	-0	*	*	*	+5	*	+10	*	*	+10	*	+5	*	*	*
BALLOON											-5FS		-0Mk			
30-35 km																
HALOE	*	+5	*	+5	*	+10	*	+10	+5	*	*	*	+5	*	+5	*
SAGE II	*	+0	*	*	*	+5	*	+5	*	*	0	*	-0	*	*	*
BALLOON											-5FS		-0Mk			
25-30 km																
HALOE	*	+0	*	+0	*	+5	*	+5	0	*	*	*	-5	*	0	*
SAGE II	*	+0	*	*	*	+10	*	+10	*	*	0	*	-5	*	*	*
BALLOON							-5LP		+5MI		-5FS		-5Mk			
							+10EL									
							-10LP									
20-25 km																
HALOE	*	-0	*	-5	*	-0	*	+0	-5	*	*	*	-5	*	-5	*
SAGE II	*	+5#	*	*	*	+20#	*	+20#	*	*	+20#	*	+15#	*	*	*
BALLOON							+15FI		+5MI		-5FS		-10Mk			
							-+10LP									
							+25EL									
							+-10LP									
15-20 km																
HALOE	*	-5	*	-5	*	-5	*	-0	-10	*	*	*	-10	*	-5	*
SAGE II	*	+15#	*	*	*	+35#	*	+30#	*	*	+35#	*	+35#	*	*	*
POLARIS													-25			
BALLOON							-+10FI		-5MI		-5FS		-10Mk			
							-+20LP									
							+10LP									
10-15 km																
HALOE	*	-20	*	-5	*	+10	*	+5	-20	*	*	*	-10	*	-5	*
POLARIS													-30			
BALLOON									-20MI	-10FS			-10Mk			

ILASデータの使用にあたっては、ILAS Version 5.20の水蒸気量には次のような特徴があることに留意されたい。

(ⅰ) 表7.6にまとめたとおり、高度15～60 kmの高度範囲におけるILASの水蒸気量は、本論文中で詳述したいくつかの事例を除き、今回比較した他の信頼できる検証実験データとの差は通常20%以内にあり、高度範囲、季節、南/北半球によってほとんどの事例では10%より良い。

(ⅱ) 相対的変動に着目する限り、ILASは良いデータ質をもたらしている。しかし、この相対的変動に関するデータの信頼度は、考える時間・空間スケールに依存する。

(ⅲ) ILASのデータ質は、時期に依存する。例えば、北極域の高度15～25 kmにおいて、2月ではILASが大きい正のバイアスを持っているが、5月では負のバイアスになっている。南極の高度10～25 kmにおいて、11、12月ではILASが大きい負のバイアスとなっているが、2月では負のバイアスがあまり顕著ではない。

(ⅳ) ILASのデータ質は、高度に依存する。例えば、北極の1997年5月では、ILASは高度30 km以下で負のバイアスを持っているが、高度30 km以上では正のバイアスとなっている。南極の1996年11、12月では、高度25 km以下でILASが負のバイアスとなっているが、高度25 km以上では正のバイアスとなっている。南半球の1～4月における高度約40～50 kmでは、8～10 ppmvを越える理不尽に大きな水蒸気混合比となっている。

本論文における比較結果を総合してまとめると、本論文に示された点について注意を払えば、ILAS Version 5.20の水蒸気データは、極成層圏内の現象の研究のような、ほとんどの研究目的に対して十分に利用可能である。ILASによる観測の特徴（高緯度における高い高度分解能の高頻度な観測）やHALOEのような他の衛星観測機器と比肩する十分な水蒸気量データの理に適ったデータ質は、成層圏科学研究に有用であることが判明するであろう。

8. 参考文献

Allen, C. W. (Ed.) (1973) : Astrophysical quantities, *3rd ed.,* Athlone Press, London, 310 pp.

Anderson, G. P., *et al.* (1995) : FASCODE/MODTRAN/LOWTRAN: Past/Present/Future, *Proc. 18th Annual Review Conf. Atmos. Transmission Models*, 6-8 June 1995, Geophysics Directorate, Phillips Laboratory, 101-119.

Andrews, D. G, J. R. Holton, and C. B. Leovy (1987) : Middle Atmosphere Dynamics, *Academic Press*, 489pp.

Araki, N., N. Kimura, Y. Mogi, S. Takahashi, A. Senfuku, T. Tanabe, A. Mori, S. Kido, T. Ishigaki, M. Suzuki, and Y. Sasano (1993) : Satellite-Borne Ozone Layer Sensor, *Matsushita Technical Report*, **39** , No.4 (in Japanese).

Barath, F. T., *et al.* (1993) : The Upper Atmospheric Research Satellite Microwave Limb Sounder Instrument, *J. Geophys. Res.*, **98**, 10,751-10,762.

Bauer, R., A. Engel, H. Franken, E. Klein, G Kulessa, C. Schiller, U. Schmidt, R. Borchers, and J. Lee, Monitoring the vertical structure of the arctic polar vortex over northern Scandinavia during EASOE: Regular N2O profile observations (1994) : *Geophys.Res. Lett.,* **21**, 1211-1214.

Berk, A., L. S. Bernstein, and D.C. Robertson (1989) : MODTRAN: A Moderate Resolution Model for LOWTRAN 7, Air Force Geophysics Laboratory Technical Report GL-TR-89-0122, Hanscom AFB, MA.

Bevilacqua, R. M. (1997) : Introduction to special section: Polar Ozone and Aerosol Measurement (POAM II), *J. Geophys. Res.*, **102**, 23,591-23,592.

Bhatt, P. P., *et al.* (1999) : An evaluation of the quality of Halogen Occultation Experiment ozone profiles in the lower stratosphere, *J. Geophys. Res.*, **104**, 9261-9276.

Biermann, U. M., B. P. Luo, and T. Peter (2000) : Absorption spectra and optical constants of binary and ternary solutions of H_2SO_4, HNO_3, and H_2O in the mid infrared at atmospheric temperature, *J. Phys. Chem.*, **104**, 783-793.

BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML (1993) : *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, ISO.

Brasseur, G. P., J. J. Orlando, G. S. Tyndall (1999) : Atmospheric Chemistry and Global Change, Oxford University Press, 654pp.

Brion, J., *et al.* (1998) : Absorption spectra measurements for the ozone molecule in the 350-830 nm region, *J. Atmos. Chem.*, **30** (2), 291-299.

Brown, L. R., and C. Plymate (2000) : Experimental line parameters of the oxygen *A* band at 760 nm, *J. Mol. Spectrosc.*, **199**, 166-179.

Brown, S. S., R. K. Talukdar, and A. R. Ravishankara (1999) : Reconsideration of the rate constant

for the reaction of hydroxyl radicals with nitric acid, *J. Phys. Chem. A,* **103**,3031-3037.

Brühl, C., P. J. Crutzen, and J. -U. Grooß (1998) : High-latitude, summertime NO_x activation and seasonal ozone decline in the lower stratosphere: Model calculations based on observations by HALOE on UARS, *J. Geophys. Res.*, **103**, 3587-3597.

Brühl, C., *et al.*, Halogen Occultation Experiment ozone channel validation (1996) : *J. Geophys. Res.*, **101**, 10,217-10,240.

Burton, S. P., L. W. Thomason, Y. Sasano, and S. Hayashida (1999) : Comparison of aerosol extinction measurements by ILAS and SAGE II, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 1719-1722.

Camy-Peyret, C., *et al.* (1993) : Stratospheric N2O5, CH4, and N2O profiles from IR solar occultation spectra, *J. Atmos. Chem.*, **16**, 31-40.

Camy-Peyret C., P. Jeseck, T. Hawat, G. Durry, S. Payan, G. Berube, L. Rochette and D. Huguenin (1995) : The LPMA balloon-borne FTIR spectrometer for remote sensing of atmospheric constituents, *ESA publications SP-370*, 323-328.

Camy-Peyret, C. (1995) : Balloon-borne Fourier transform spectroscopy for measurements of atmospheric trace gases, *Spectrochim. Acta*, **51A**, 1143-1152.

Carslaw, K. S., S. L. Clegg, and P. Brimblecombe (1995) : A thermodynamic model of the system HCl-HNO_3-H_2SO_4-H_2O including solubilities of HBr, from <200K to 328K, *J. Phys. Chem.*, **99**, 11,557-11,574.

Chang, A. Y., R. J. Salawitch, H. A. Michelsen, M. R. Gunson, M. C. Abrams, R. Zander, C. P. Rinsland, M. Loewenstein, J. R. Podolske, M. H. Proffitt, J. J. Margitan, D. W. Fahey, R.-S. Gao, K. K. Kelly, J. W. Elkins, C. R. Webster, R. D. May, K. R. Chan, M. M. Abas, A. Goldman, F. W. Irion, G. L. Manney, M. J. Newchurch, and G. P. Stiller (1996) : A comparison of measurements from ATMOS and instruments aboard the ER-2 aircraft: Tracers of atmospheric transport, *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 2389-2392.

Chiou, E. W., M. P. McCormick, and W. P. Chu (1997) : Global water vapor distribution in the stratosphere and upper troposphere derived from 5.5 years of SAGE II observations (1986-1991), *J. Geophys. Res.*, **102**, 19,105-19,118.

Chu, W. P., and M. P. McCormick (1979) : Inversion of stratospheric aerosol and gaseous constituents from spacecraft solar extinction data in the 0.38 - 1.0 micrometer wavelength region, *Appl. Opt.*, **18**, 1404-1413.

Clough, S. A., F. X. Kneizys and R. W. Davis (1989) : Line shape and the water vapor continuum, *Atmos. Res.*, **23**, 229-241.

Coy, L., E. R. Nash and P. A. Newman, Meteorology of the polar vortex: Spring 1997 (1997) : *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 2693-2696.

Crutzen, P. J., The influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content (1970) : *Q. J. R.. Meteorol. Soc.*,**96**, 320-325.

Cunnold, D. M., *et al.* (1989) : Validation of SAGE II ozone measurements, *J. Geophys. Res.*, **94**, 8447-8460.

Cunnold, D. M., *et al.* (2000) : SAGE (version 5.96) ozone trends in the lower stratosphere, *J. Geophys. Res.*, **105**, 4445-4458.

DeMore, W. B., S. P. Sander, D. M. Golden, R. F. Hampton, M. J. Kurylo, C. J. Howard, A. R. Ravishankara, C. E. Kolb, and M. J. Molina (1997) : Chemical kinetics and photochemical data for use in stratospheric modeling, *JPL Publ.*, 97-4.

Deniel, C., *et al.* (1997) : A comparative study of POAM II and electrochemical concentration cell ozonesonde measurements obtained over northern Europe, *J. Geophys. Res.*, **102**, 23,629-23,642.

de Valk, J. P. J. M. M., A. Goede, A. de Jonge, J. Mees, B. Franke, S. Crewell, H. Kuellmann, J. Urban, J. Wohlgemuth, M. Chipperfield, and A. Lee (1997) : Airborne heterodyne measurements of stratospheric ClO, HCl, O3, and N2O during SESAME 1 over northern Europe, *J. Geophys. Res.*, **102**, 1391-1398.

Dunkerton, T. J., and D. P. Delisi (1986) : Evolution of potential vorticity in the winter stratosphere of January-February 1979, *J. Geophys. Res.*, **91**, 1199-1208.

Elkins, J. W., D. W. Fahey, J. M. Gilligan, G. S. Dutton, T. J. Baring, C. M. Volk, R. E. Dunn, R. C. Myers, S. A. Montzka, P. R. Wamsley, A. H. Hayden, J. H. Butler, T. M. Thompson, T. H. Swanson, E. J. Dlugokencky, P. C. Novelli, D. F. Hurst, J. M. Lobert, S. J. Ciciora, R. J. McLaughlin, T. L. Thompson, R. H. Winkler, P. J. Fraser, L P. Steele, and M. P. Lucarelli (1996) : Airborne gas chromatograph for in situ measurements of long-lived species in the upper troposphere and lower stratosphere, *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 347-350.

Fahey, D. W. and P. A. Newman (1997) : Photochemistry of ozone loss in the arctic region in summer (POLARIS) ; End of mission statement, POLARIS Project Scientists, December 1997, 67 pp.

Fahey, D. W., *et al.* (2000) : Ozone destruction and production rates between spring and autumn in the Arctic stratosphere, *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 2605-2608.

Ferlemann, F., *et al.* (2000) : Differential optical absorption spectroscopy instrument for stratospheric balloonborne trace-gas studies, *Appl. Opt.*, **39**, 2377-2386.

Fischer, H., and H. Oelhaf (1996) : Remote sensing of vertical profiles of atmospheric trace constituents with MIPAS limb-emission spectrometers, *Appl. Opt.*, **35**, 2787-2796.

Fleming E. L., S. Chandra, and J. J. Barnett (1990) : Zonal mean temperature, pressure, zonal wind, and geopotential height as functions of latitude, *Adv. Space Res.*, **10**, 11-59.

Friedl-Vallon, F., G. Maucher, H. Oelhaf, M. Seefeldner, O. Trieschmann, G. Wetzel, and H. Fischer (1999) : The balloon-borne Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding (MIPAS-B2) - instrument and results, *SPIE* **3756**, 9-16.

Fröhlich, C. and G. E. Shaw (1980) : New determination of Rayleigh scattering in the terrestrial atmosphere, *Appl. Opt.*, **19**, 1,773-1,775.

Fukunishi, H., S. Okano, M. Taguchi, and T. Ohnuma (1990) : Laser heterodyne spectrometer using a liquid nitrogen cooled tunable diode laser for remote measurements of atmospheric O3 and N2O, *Appl. Opt.*, **29**, 2722-2728.

Gallery, W. O., F. X. Kneizys, and S. A. Clough (1983) : Air mass computer program for atmospheric transmittance/radiance calculation: FASCATM, AFGL-TR-83-0065, No.828, 145 pp.

Gamache, R. R., A. Goldman, and L. S. Rothman (1998) : Improved spectral parameters for the three most abundant isotopomers of the oxygen molecule, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, **59**, 495-509.

Gille, J. C. and J. M. Russell III (1984) : The Limb Infrared Monitor of the Stratosphere: Experiment description, performance and results, *J. Geophys. Res.*, **89**, 5125-5140.

Glaccum, W., *et al.* (1996) : The Polar Ozone and Aerosol Measurement instrument, *J. Geophys. Res.*, **101**, 14,479-14,488.

Godin, S., *et al.* (2001) : Study of the interannual ozone loss and the permeability of the Antarctic polar vortex from aerosol and ozone lidar measurements in Dumont d'Urville (66.4S, 140°E), *J. Geophys. Res.*, **106**, 1311-1330.

Hamming, R. W. (1997) : *Digital filters*, Prentice-Hall, 226p.

Hansen, G., and M.P. Chipperfield (1999) : Ozone depletion at the edge of the Arctic polar vortex 1996/1997, *J. Geophys. Res.*, **104**, 1837-1846.

Hanson, D., and K. Mauersberger (1988) : Laboratory studies of the nitric acid trihydrate : Implications for the south polar stratosphere, *Geophys. Res. Lett.*, **15**, 855-858.

Harries, J. E. (1996) : The greenhouse Earth: A view from space, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **122**, 799-818.

Harries, J. E., J. M. Russell III , A. F. Tuck, L. L. Gordley, P. Purcell, K. Stone, R. M. Bevilacqua, M. Gunson, G. Nedoluha, W. A. Traub (1996) : Validation of measurements of water vapor from the Halogen Occultation Experiment (HALOE), *J. Geophys. Res.*, **101**, 10,205-10,216.

Hayashida, S., N. Saitoh, A. Kagawa, T. Yokota, M. Suzuki, H. Nakajima, and Y. Sasano (2000) : Arctic polar stratospheric clouds observed with the Improved Limb Atmospheric Spectrometer during the winter of 1996/1997, *J. Geophys. Res.*, **105**, 24,715-24,730.

Heath, D. F., *et al.* (1975) : The Solar Backscatter Ultraviolet and Total Ozone Mapping Spectrometer (SBUV/TOMS) for Nimbus G, *Opt. Eng.*, **14**, 323-331.

Herman, R. L., D. C. Scott, C. R. Webster, R. D. May, E. J. Moyer, R. J. Salawitch, Y. L. Yung, G. C. Toon, B. Sen, J. J. Margitan, K. H. Rosenlof, H. A. Michelsen, and J. W. Elkins (1998) : Tropical entrainment timescales inferred from stratospheric N2O and CH4 observations, *Geophys. Res.*

Lett., **25**, 2781-2784.

Hintsa, E. J., E. M. Weinstock, J. G. Anderson, R. D. May and D. F. Hurst (1999) : On the accuracy of *in situ* water vapor measurements in the troposphere and lower stratosphere with the Harvard Lyman-α hygrometer, *J. Geophys. Res.*, **104**, 8183-8189.

Hofmann, D. J., and S. Solomon (1989) : Ozone destruction through heterogeneous chemistry following the eruption of El Chichon, *J. Geophys. Res.*, **94**, 5029-5041.

Honda, H., S. Aoki, T. Nakazawa, S. Morimoto and N. Yajima (1996) : Cryogenic air sampling system for measurements of the concentrations of stratospheric trace gases and their isotopic ratios over Antarctica, *J. Geomag. Geoelectr.*, **48**, 1145-1155.

Hoppel, K. W., K. P. Bowman, and R. M. Bevilacqua (1999) : Northern Hemisphere summer ozone variability observed by POAM II, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 827-830.

Houghton, J. T. *et al.* (Eds.) (2001) : IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), Climate Change 2001: The Scientific Basis., Cambridge University Press., 881pp.

Irie, H. *et al.*, Validation of Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) NO2 measurements, *J. Geophys. Res.*, (accepted).

Irie, H., Y. Kondo, M. Koike, M. Y. Danilin, C. Camy-Peyret, S. Payan, J. P. Pommereau, F. Goutail, J. -B. Renard, H. Oelhaf, G. Wetzel, G. C. Toon, B. Sen, J. -F. Blavier, R. Salawitch, R. M. Bevilacqua, J. M. Russell III, H. Kanzawa, H. Nakajima, T. Yokota, T. Sugita, and Y. Sasano, Validation of NO2 and HNO3 measurements from the Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) with the version 5.20 retrieval algorithm, *J. Geophys. Res.*,(accepted).

Ishigaki, T. (1997) : Application of pyroelectric detector for space-borne sensors, *Ohyo Buturi*, **66**, 481-485, (in Japanese).

Johnson, D. G., K. W. Jucks, W. A. Traub, and K. V. Chance (1995) : Smithsonian stratospheric far-infrared spectrometer and data reduction system, *J. Geophys. Res.*, **100**, 3091-3106.

Jones, R. L., J. A. Pyle, J. E. Harries, A. M. Zavody, J. M. Russell III, and J. C. Gille (1986) : The water vapor budget of the stratosphere studied using LIMS and SAMS satellite data, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **112**, 1127-1143.

Jones, R. L., and Pyle, J. A. (1984): Observations of CH4 and N2O by the Nimbus 7 SAMS: a comparison with in sun data and two-dimensional numerical model calculations. *J. Geophys. Res.* **89**, 5263-5279.

Jucks, K. W., D. G. Johnson, K. V. Chance, W. A. Traub, R. J. Salawitch, and R. A.Stachnik (1996) : Ozone production and loss rate measurements in the middle stratosphere, *J.Geophys. Res.*, **101**, 28,785-28,792.

Jucks, K. W., D. G. Johnson, K. V. Chance, W. A. Traub, J. J. Margitan, G. B. Osterman, R. J. Salawitch, and Y. Sasano (1998) : Observations of OH, HO_2, H_2O, and O_3 in the upper stratosphere: Implications for HO_x photochemistry, *Geophys. Res. Lett.* **25**, 3935-3938.

Jucks, K. W., D. G. Johnson, K. V. Chance, W. A.Traub, J. M. Margitan, R. Stachnik, Y. Sasano, T. Yokota, H. Kanzawa, K. Shibasaki, M. Suzuki, and T. Ogawa, Validation of ILAS v5.2 data with FIRS-2 balloon observations, , *J. Geophys. Res.*,(accepted).

Kanzawa, H., Y. Kondo, C. Camy-Peyret, and Y. Sasano (1995) : Balloon campaigns at Kiruna -Esrange planned in ILAS Correlative Measurements Program. Proc. 12th ESA Symp. European Rocket and Balloon Programmes and Related Research (Lillehammer, Norway, 29 May - 1 June 1995), *ESA SP-370*, 345-349.

Kanzawa, H., ILAS & RIS Data Handling Facility USAGE GUIDE (Version 1) (1996) : National Institute for Environmental Studies, *F-104-'97/NIES*, 70pp.

Kanzawa, H. (1997) : ILAS Correlative Measurements Plan. National Institute for Environmental Studies, *F-105-'97-NIES*, 178pp.

Kanzawa, H., C. Camy-Peyret, Y. Kondo, and N. Papineau (1997) : Implementation and first scientific results of the ILAS Validation Balloon Campaign at Kiruna-Esrange in February - March 1997. Proc. 13th ESA Symp. European Rocket and Balloon Programmes and Related Research (Oland, Sweden, 26-29 May 1997), *ESA SP-397*, 211-215.

Kanzawa, H., T. Sugita, H. Nakajima, G. E. Bodeker, H. Oelhaf, M. Stowasser, G. Wetzel, A. Engel, U. Schmidt, I. Levin, G. C. Toon, B. Sen, J. -F. Blavier, S. Aoki, T. Nakazawa, K. W. Jucks, D. G. Johnson, W. A. Traub, C. Camy-Peyret, S. Payan, P. Jeseck, I. Murata, H. Fukunishi, M. von Koenig, H. Bremer, H. Kuellmann, J. H. Park, L. L. Pan, T. Yokota, M. Suzuki, M. Shiotani, and Y. Sasano, Validation and data characteristics of nitrous oxide and methane profiles observed by the Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) and processed with Version 5.20 algorithm, *J. Geophys. Res.*, (submitted).

Kanzawa, H., C. Schiller, J. Ovarlez, C. Camy-Peyret, S. Payan, P. Jeseck, H. Oelhaf, M. Stowasser, W. A. Traub, K. Jucks, D. G. Johnson, G. C. Toon, J. H. Park, G. Bodeker, L. Pan, T. Sugita, H. Nakajima, T. Yokota, M. Suzuki, M. Shiotani, and Y. Sasano, Validation and data characteristics of water vapor profiles observed by the Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) and processed with Version 5.20 algorithm, *J. Geophys. Res.* .(accepted).

Kley, D., J. M. Russell III, and C. Phillips (eds.) (2000) : SPARC Assessment of Upper Tropospheric and Stratospheric Water Vapour, *WCRP-113, WMO/TD No. 1043, SPARC Report No.2.* (online available from http://www.aero.jussieu.fr/~sparc)

Koike, M., Y. Kondo, H. Irie, F. J. Murcray, J. Williams, P. Fogal, R. Blatherwick, C. Camy-Peyret, S. Payan, H. Oelhaf, G. Wetzel, W. Traub, D. Johnson, K. Jucks, G. C. Toon, B. Sen, J.-F. Blavier, H. Schlager, H. Ziereis, N. Toriyama, M. Y. Danilin, J. M. Rodriguez, H. Kanzawa, and Y. Sasano (2000) : A comparison of Arctic HNO3 profiles measured by the Improved Limb Atmospheric Spectrometer and balloon-borne sensors, *J. Geophys. Res.*, **105**, 6761 - 6771.

Komhyr, W. D. (1969) : Electrochemical concentration cells for gas analysis, *Ann. Geophys.*, **25**,

203-210.

Komhyr, W. D., *et al.* (1995) : Electrochemical concentration cell ozonesonde performance evaluation during STOIC 1989, *J. Geophys. Res.*, **100**, 9231-9244.

Kondo, Y., M. Koike, A. Engel, U. Schmidt, M. Mueller, T. Sugita, H. Kanzawa, T. Nakazawa, S. Aoki, H. Irie, N. Toriyama, T. Suzuki, and Y. Sasano (1999) : NOy-N2O correlation observed inside the Arctic vortex in February 1997: Dynamical and chemical effects. *J. Geophys. Res.*, **104**, 8215-8224.

Kondo, Y., *et al.* (2000) : Denitrification and nitrification in the Arctic stratosphere during the winter of 1996-1997, *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 337-340.

Lahoz, W. A., M. R. Suttie, L. Froidevaux, R. S. Harwood, C. L. Lau, T. A. Lungu, G. E. Peckham, H. C. Pumphrey, W. G. Read, Z. Shippony, R. A. Suttie, J. W. Waters, G. E. Nedoluha, S. J. Oltmans, J. M. Russell III, and W. A. Traub (1996) : Validation of UARS Microwave Limb Sounder 183 GHz H_2O measurements, *J. Geophys. Res.*, **101**, 10,129-10,149.

Lee, K. -M., J. M. McInerney, Y. Sasano, J. H. Park, W. Choi, and J. M. Russell III (1999) : Intercomparison of ILAS and HALOE ozone at high latitudes, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 835-838.

Lu, C. -H., *et al.* (2000) : Lagrangian approach for Stratospheric Aerosol and Gas Experiment (SAGE) II profile intercomparisons, *J. Geophys. Res.*, **105**, 4563-4572.

Lu, J., *et al.* (1997) : Intercomparison of stratospheric ozone profiles obtained by Stratospheric Aerosol and Gas Experiment II, Halogen Occultation Experiment, and ozonesondes in 1994-1995, *J. Geophys. Res.*, **102**, 16,137-16,144.

Lucke, R. L., D. R. Korwan, R. M. Bevilacqua, J. S. Hornstein, E. P. Shettle, D. T. Chen, M.. Daehler, J. D. Lumpe, M. D. Fromm, D. Debrestian, B. Neff, M. Squire, G. König-Langlo, and J. Davis (1999) : The Polar Ozone and Aerosol Measurement (POAM) III instrument and early validation results, *J. Geophys. Res.*, **104**, 18,785-18,799.

Lumpe, J. D., *et al.* (1997) : POAM II retrieval algorithm and error analysis, *J. Geophys. Res.*, **102**, 23,593-23,614.

Mahlman, J. D., H. Levy, II, and W.J. Moxim (1986) : Three-dimensional simulations of stratospheric N2O: predictions for other trace constituents, *J. Geophys. Res.* 91, 2687-2707. (also corrigendum 91, 9921).

Manney, G. L., *et al.* (2001) : Comparison of satellite ozone observations in coincident air masses in early November 1994, *J. Geophys. Res.*, in press.

Marquardt, D. W. (1963) : An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters, *J. Soc. Ind. Appl. Math.*, **11**, 431-441.

Matsuzaki, A., Y. Nakamura, and T. Itoh (1984) : Rocket observation of the rotational profile of the *A* band absorption spectrum of atmospheric oxygen molecule, *Annal. Geophys.*, **5**, 475-480.

Matsuzaki, A., T. Itoh and N. Nakamura (1985) : On observation of middle atmosphere with LAS

(Limb Atmospheric infrared Spectrometer) onboard of satellite "Ohzora" (EXOS-C), *J. Meteorol. Soc. Japan*, **63**, 328-333.

Mauldin, L. E., III, *et al.* (1985) : Stratospheric Aerosol and Gas Experiment II instrument: A functional description, *Opt. Eng.*, **24**, 307-312.

May, R. D. (1998) : Open-path, near-infrared tunable diode laser spectrometer for atmospheric measurements of H_2O, *J. Geophys. Res.*, **103**, 19,161-19,172.

McCormick M. P., E. W. Chiou, L. R. McMaster, W. P. Chu, J. C. Larsen, D. Rind, and S. Oltmans (1993) : Annual variations of water vapor in the stratosphere and upper troposphere observed by the stratospheric aerosol and gas experiment II, *J. Geophys. Res.*, **98**, 4867-4874.

Michelsen, H. A., G. L. Manney, M. R. Gunson, C. P. Rinsland, and R. Zander (1998) : Correlations of stratospheric abundances of CH4 and N2O derived from ATMOS measurements, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 2777-2780.

Morris, G. A., J. F. Gleason, J. Ziemke, and M. R. Schoeberl (2000) : Trajectory mapping: A tool for validation of trace gas observation, *J. Geophys. Res.*, **105**, 17,875-17,894.

Mote, P. W., K. H. Rosenlof, M. E. McIntyre, E. S. Carr, J. C. Gille, J. R. Holton, J. S. Kinnersley, H. C. Pumphrey, J. M. Russell III, and J. W. Waters (1996) : An atmospheric tape recorder: The imprint of tropical tropopause temperatures on stratospheric water vapor. *J. Geophys. Res.*, **101**, 3989-4006.

Murata, I., Fukuma, N., Ohtaki, Y., Fukunishi, H., Kanzawa, H., Nakane, H., and Shibasaki, K. (1999) : Measurements of O3 and N2O in Alaska with a tunable diode laser heterodyne spectrometer. *Adv. Space Res.*, **24**, 1623-1626.

NOAA (2000) : Northern Hemisphere Winter Summary 1999-2000, National Weather Service/ National Centers for Environmental Prediction/Climate Prediction Center.

NOAA (2000) : Southern Hemisphere Winter Summary 2000, National Weather Service/National Centers for Environmental Prediction/Climate Prediction Center.

Nakajima, H., M. Suzuki, A. Matsuzaki, T. Ishigaki, K. Waragai, Y. Mogi, N. Kimura, N. Araki, T. Yokota, H. Kanzawa, T. Sugita, and Y. Sasano, Characteristics and performance of the Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) in orbit, *J. Geophys. Res.*, accepted.

Nakajima, H., M. Suzuki, T. Yokota, T. Sugita, Y. Ito, M. Kaji, N. Araki, K. Waragai, H. Yamashita, H. Kanzawa, and Y. Sasano, Tangent height registration for the solar occultation satellite sensor ILAS: A new technique for Version 5.20 products, *J. Geophys. Res.*, accepted.

Nash, E. R., P. A. Newman, J. E. Rosenfield, and M. R. Schoeberl (1996) : An objective determination of the polar vortex using Ertelís potential vorticity, *J. Geophys. Res.*, **101**, 9471 - 9478.

Newcomb, S. (1895) : Tables of the motion of the earth on its axis around the sun, *Astron. Papers Amer. Eph.*, **6**, Part I.

Newman, P. A., D. W. Fahey, W. H. Brune, and M. J. Kurylo (1999) : Preface to special section: Photochemistry of Ozone Loss in the Arctic Region in Summer (POLARIS), *J. Geophys. Res.*, **104**, 21, 26,481-26,495.

Oelhaf, H., *et al.* (1996) : Remote sensing of the Arctic stratosphere with the new balloon-borne MIPAS-B2 instrument, *Proceedings of the 3rd European Workshop 18 to 22 September 1995,* 270-275.

Oelhalf, H. *et al.*, Comparison between ILAS and MIPAS-B measurements, *J. Geophys. Res.*, accepted.

Oltmans, S. J., H. Vömel, D. J. Hofmann, K. H. Rosenlof, and D. Kley (2000) : The increase in stratospheric water vapor from balloonborne, frostpoint hygrometer measurements at Washington, D.C., and Boulder, Colorado, *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 3453-3456.

Oshchepkov, S., Y. Sasano, and T. Yokota, A new method for simultaneous gas and aerosol retrievals from space limb-scanning spectral observation of the atmosphere, *Geophys. Res. Lett.*, (accepted in February, 2001).

Osterman, G. B., B. Sen, G. C. Toon, R. J. Salawitch, J. J. Margitan, J. -F. Blavier, D. W. Fahey, and R. S. Gao (1999) : Partitioning of NOy species in the summer Arctic stratosphere, *Geophys. Res. Lett,* **26**, 1157-1160.

Oltmans, S. J., and D. J. Hofmann (1995) : Increase in lower-stratospheric water vapor at a mid-latitude Northern Hemisphere site from 1981 to 1994, *Nature*, **374**, 146-149.

Osterman, G. B., R. J. Salawitch, B. Sen, G. C. Toon, R. A. Stachnik, H. M. Pickett, J.J. Margitan, J.-F. Blavier, and D. B. Peterson (1997) : Balloon-borne measurements of stratospheric radicals and their precursors: Implications for the production and loss of ozone, *Geophys. Res. Lett,* **24**, 1107-1110.

Ovarlez, J. (1991) : Stratospheric water vapor measurement in the tropical zone by means of a frost-point hygrometer on board long-duration balloons, *J. Geophys. Res.*, **96**, 15,541-15,545.

Ovarlez J., and H. Ovarlez (1994) : Stratospheric water vapor content evolution during EASOE, *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 13,1235-13,1238.

Palmer, K. F., and D. Williams (1975) : Optical constants of sulfuric acid; Application to the clouds of Venus, *Appl. Opt.*, **14**, 208-219.

Pan, L. L., W. Randel, H. Kanzawa, Y. Sasano, S. Massie, H. Nakajima, T. Yokota, and T. Sugita, Variability of polar stratospheric water vapor observed by ILAS, *J. Geophys. Res.*,accepted.

Park, J. H., and J. M. Russell III (1994) : Summer polar chemistry observations in the stratosphere made by HALOE, *J. Atmos. Sci.*, **51**, 2903-2913.

Park, J. H., Russell, J. M., III, Gordley, L. L., Drayson, S. R., Benner, D. C., McInerney, J. M., Gunson, M. R., Toon, G. C., Sen, B., Blavier, J.-F., Webster, C. R., Zipf, E. C., Erdman, P., Schmidt, U., and Schiller, C. (1996) : Validation of Halogen Occultation Experiment CH4

measurements from the UARS, J. Geophys. Res., **101**, 10,183-10,203.

Payan, S., C. Camy-Peyret, P. Jeseck, T, Hawat, G. Durry, and F. Lefèvre (1998) : First direct simultaneous HCl and ClONO2 profile measurements in the Arctic vortex, *Geophys.Res. Lett,* **25**, 2663-2666.

Plumb, R. A. (1996) : A "tropical pipe" model of stratospheric transport. *J. Geophys. Res.*, **101**, 3957-3972.

Plumb, R. A., and M. K.W., Ko (1992) : Interrelationships between mixing ratios of long-lived stratospheric constituents. *J. Geophys. Res.*, **97**, 10,145-10,156.

Podolske, J. and M. Loewenstein (1993) : Airborne tunable diode laser spectrometer for trace-gas measurement in the lower stratosphere, *Appl. Opt.*, **32**, 5324-5333.

Pommereau, J. -P., and F. Goutail (1988) : O3 and NO2 ground-based measurements by visible spectrometry during Arctic winter and spring 1988, *Geophys. Res. Lett.*, **15**, 891-894.

Pommereau, J. -P., and J. Piquard (1994) : Ozone and nitrogen dioxide vertical distributions by uv-visible solar occultation from balloons, *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 1227-1230.

Proffitt, M. H., and R. J. McLaughlin (1983) : Fast-response dual-beam UV absorption ozone photometer suitable for use on stratospheric balloons, *Rev. Sci. Instrum.*, **54**, 1719-1728.

Pullen S. and R. L. Jones (1997) : Accuracy of temperatures from UKMO analyses of 1994/95 in the arctic winter stratosphere, *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 845-848, 1997.

Randall, C. E., *et al.* (2000) : Comparison of Polar Ozone and Aerosol Measurement (POAM) II and Stratospheric Aerosol and Gas Experiment (SAGE) II aerosol measurements from 1994 to 1996, *J. Geophys. Res.*, **105**, 3929-3942.

Randel, W. J., F. Wu, J. M. Russell III, A. Roche, and J. W. Waters (1998) : Seasonal cycles and QBO variations in stratospheric CH_4 and H_2O observed in UARS HALOE data, *J. Atmos. Sci.*, **55**, 163-185.

Randel, W. J., *et al.* (1999) : Trends in the vertical distribution of ozone, *Science*, **285**, 1689-1692.

Rees, D. *et al.* (Ed.) (1990) : COSPAR International Reference Atmosphere: 1986 Part II: Middle Atmosphere Model, *Adv. Space Res., 10.*

Remedios, J. J., Ruth, S. L., Rodgers, C. D., Taylor, F. W., Roche, A. E., Gille, J. C., Gunson, M. R., Russell, J. M., III, Park, J., Zipf, E. C., and Erdman, P. W. (1996) : Measurements of methane and nitrous oxide distributions by the improved stratospheric and mesospheric sounder: Retrieval and validation, *J. Geophys. Res.*, **101**, 9843-9871.

Renard, J. -B., *et al.* (1996) : Nocturnal vertical distribution of stratospheric O3, NO2 and NO3 from balloon measurements, *J. Geophys. Res.*, **101**, 28,793-28,804.

Rind, D., E. W. Chiou, W. Chu, S. Oltmans, J. Lerner, J. Larsen, M. P. McCormick, and L. McMaster (1993) : Overview of the stratospheric aerosol and gas experiment II water vapor observations : Method, validation, and data characteristics, *J. Geophys. Res.*, **98**, 4835-4856.

Roche, A. E., J. B. Kumer, J. L. Mergenthaler, G. A. Ely, W. G. Uplinger, J. F. Potter, T. C. James, and L. W. Sterritt (1993) : The Cryogenic Limb Array Etalon Spectrometer (CLAES) on UARS: Experiment description and performance, *J. Geophys. Res.*, **98**, 10,763-10,775.

Roche, A. E., Kumer, J. B., Nightingale, R. W., Mergenthaler, J. L., Ely, G. A., Bailey, P. L., Massie, S. T., Gille, J. C., Edwards, D. P., Gunson, M. R., Abrams, M. C., Toon, G. C., Webster, C. R., Traub, W. A., Jucks, K. W., Johnson, D. G., Murcray, D. G., Murcray, F. H., Goldman, A., and Zipf, E. C. (1996) : Validation of CH4 and N2O measurements by the cryogenic limb array etalon spectrometer instrument on the Upper Atmosphere Research Satellite, *J. Geophys. Res.*, **101**, 9679-9710.

Rothman, L. S., *et al.* (1998) : The HITRAN molecular spectroscopic database and HAWKS (HITRAN Atmospheric Workstation): 1996 edition, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **60**, 665-710.

Ruhnke, R., W. Kouker, and T. Reddmann (1999) : The influence of the OH + NO2 + M reaction on the NOy partitioning in the late Arctic winter 1992/1993 as studied with KASIMA, *J. Geophys. Res.*, **104**, 3755-3772.

Russell, P. B. and M. P. McCormick (1984) : Satellite Stratospheric Aerosol Measurement validation, *Adv. Space Res.*, **4**, 5-12.

Russell, P. B. and M. P. McCormick (1989) : SAGE II aerosol data validation and initial data use: an introduction and overview, *J. Geophys. Res.*, **94**, 8335-8338.

Russell III, J. M., L. L. Gordley, J. H. Park, S. R. Drayson, W. D. Hesketh, R. J. Cicerone, A. F. Tuck, J. E. Frederick, J. E. Harries, and P. J. Crutzen (1993) : The Halogen Occultation Experiment, *J. Geophys. Res.*, **98**, 10777-10797.

Saitoh, N., *et al.*: Characteristics of Arctic Polar Stratospheric Clouds in the winter of 1996/1997 inferred from ILAS measurements, *J. Geophys. Res.*, accepted.

Sasano, Y., M. Suzuki, T. Yokota, and H. Kanzawa (1997) : Early results from Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) measurements, *Geocarto International*, **12**, 61-68.

Sasano, Y., M. Suzuki, T. Yokota, and H. Kanzawa (1999) : Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) for stratospheric ozone layer measurements by solar occultation technique, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 197-200.

Sasano, Y., H. Nakajima, H. Kanzawa, M. Suzuki, T. Yokota, H. Nakane, H. Gernandt, A. Schmidt, A. Herber, V. Yushkov, V. Dorokhov, and T. Deshler (1999) : Validation of ILAS Version 3.10 ozone with ozonesonde measurements, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 831-834.

Sasano, Y., M. Suzuki, T. Yokota, and H. Kanzawa (1999) : ILAS for stratospheric ozone layer monitoring: Outline of data processing (Version 3.00 and 3.10) and validation experiments, *IEEE Transactions Geoscience Remote Sensing*, **37**, 1508-1516.

Sasano, Y., M. Suzuki, T. Yokota, H. Kanzawa, H. Nakajima, H. Nakane, M. Shiotani, Y. Kondo, and

S. Hayashida (1999) : Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS): Validation and preliminary scientific results, *SPIE*, **3501**, 61-71.

Sasano, Y., *et al.* (2000) : ILAS observations of chemical ozone loss in the Arctic vortex during early spring 1997, *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 213-216.

Sasano, Y., *et al.* (2001) : ILAS-II instrument and data processing system for stratospheric ozone layer monitoring, in *Optical Remote Sensing of the Atmosphere and Clouds II, Sasano*, Y., J. Wang, and T. Hayasaka (Eds.), Proc. of SPIE Vol. 4150, 106-114.

Schauffler, S. M., E. L. Atlas, F. Flocke, R. A. Lueb, V. Stroud, and W. Travnicek (1998) : Measurements of bromine-containing organic compounds at the tropical tropopause, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 317-320.

Schlager, H., *et al.* (1997) : In situ observations of air traffic emission signatures in the North Atlantic flight corridor, *J. Geophys. Res.*, **102**, 10,739-10,750.

Schmidt, U., R. Bauer, A. Khedim, E. Klein, G. Kulessa, and C. Schiller (1991) : Profile observations of long-lived trace gases in the Arctic vortex, *Geophys. Res. Lett.*, **4**, 767-770.

Schoeberl, M. R, M. Luo, and J. E. Rosenfield, An analysis of the Antarctic Halogen Occultation Experiment trace gas observations (1995) : *J. Geophys. Res.*, **100**, 5159-5172.

Schulz, A., *et al.* (2000) : Match observations in the Arctic winter 1996/97: High stratospheric ozone loss rates correlate with low temperatures deep inside the polar vortex, *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 205-208.

Sen, B., G. C. Toon, G. B. Osterman, J. -F. Blavier, J. J. Margitan, R. J. Salawitch, and G. K. Yue (1998) : Measurements of reactive nitrogen in the stratosphere, *J. Geophys. Res.*, **103**, 3571-3585.

Shimoda, H. (1999) : ADEOS Overview, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **37**, 1465-1471.

Shine, K. P., and P. M.d. F. Forster (1999) : The effect of human activity on radiative forcing of climate change: a review of recent developments, *Global and Planetary Change*, **20**, 205-225.

Sioris, C. E. and W. F. Evans (2000) : Impact of rotational Raman scattering in the O_2 *A* band, *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 4085-4088.

Solomon, S., R. R. Garcia, F. S. Rowland, and D. J. Wuebbles (1986) : On the depletion of Antarctic ozone, *Nature*, **321**, 755-758.

Solomon, S. (1999) : Stratospheric ozone depletion: a review of concept and history, *Rev. Geophys.*, **37**, 275-316.

Stachnik, R. A., *et al.* (1992) : Submillimeterwave heterodyne measurements of stratospheric ClO, HCl, O_3, and HO_2: First results, *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 1931-1934.

Stowasser, M., H. Oelhaf, G. Wetzel, F. Friedl-Vallon, G. Maucher, M. Seefeldner, O Trieschmann, T.v. Clarmann, and H. Fisher (1999) : Simultaneous measurements of HDO, H_2O and CH_4 with

MIPAS-B: Hydrogen budget and indication of dehydration inside the polar vortex, *J. Geophys. Res.*, **104**, 19213-19225,.

Sugita, T., H. Nakajima, T. Yokota, Y. Sasano, H. Kanzawa, J. H. Park, and L. W. Thomason (2000) : ILAS version 4.20 ozone comparison with HALOE, SAGE-II, and ozonesonde measurements, *Stratospheric Ozone 1999, Proc. of the 5th European Symposium, Saint Jean de Luz, France*, 738-741.

Sugita, T., T. Yokota, M. Suzuki, T. Nakajima, A. Matsuzaki, H. Nakajima, Y. Sasano, Y. Itou, H. Saeki, and K. Waragai (2001) : Temperature and pressure retrievals from O_2 *A*-Band absorption measurements made by ILAS: Retrieval algorithm and error analyses, *Opt. Remote Sens. Atmos. and Clouds II, Proc. SPIE* , **4150**, 94-105.

Sugita, T., T. Yokota, H. Nakajima, H. Kanzawa, H. Nakane, H. Gernandt, V. Yushkov, K. Shibasaki, T. Deshler, Y. Kondo, S. Godin, F. Goutail, J.-P. Pommereau, C. Camy-Peyret, S. Payan, P. Jeseck, J.-B. Renard, H. Bösch, R. Fitzenberger, K. Pfeilsticker, M. von König, H. Bremer, H. Küllmann, H. Schlager, J. J. Margitan, B. Stachnik, G. C. Toon, K. Jucks, W. A. Traub, D. G. Johnson, I. Murata, H. Fukunishi, and Y. Sasano, Validation of ozone measurements from the Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS), *J. Geophys. Res.*, accepted.

Suzuki, M., A. Matsuzaki, T. Ishigaki, N. Kimura, N. Araki, T. Yokota, and Y. Sasano (1995) : ILAS, the Improved Limb Atmospheric Spectrometer on the Advanced Earth Observing Satellite, *IEICE Transactions on Communications*, **E78-B**, 1560-1570.

Suzuki, M. (1996) : Calibration of the ILAS instrument onboard the ADEOS spacecraft, *J. SICE*, **35**, 669-674 (in Japanese).

Swinbank, R., and A. O'Neill (1994) : A stratosphere-troposphere data assimilation system, *Mon. Weather Rev.*, **122**, 686-702.

Tabazadeh, A., *et al.* (2000) : Quantifying denitrification and its effect on ozone recovery, *Science*, **288**, 1407-1411.

Taylor, F. W., C. D. Rodgers, J. G. Whitney, S. T. Werrett, J. J. Barnett, G. D. Peskett, P. Venters, J. Ballard, C. W. P. Palmer, R. J. Knight, P. Morris, T. Nightingale, and A. Dudhia (1993) : Remote sensing of atmospheric structure and composition by pressure modulator radiometry from space: The ISAMS experiment on UARS, *J. Geophys. Res.*, **98**, 10,799-10,814.

Terao, Y., *et al.*, Stratospheric ozone loss in the 1996/1997 Arctic winter: Evaluation based on multiple trajectory analysis for double-sounded air parcels by ILAS, *J. Geophys. Res.*, accepted.

Thériault J. -M., *et al.* (1994) : Analysis of the FASCODE model and its H_2O continuum based on long-path atmospheric transmission measurements in the 4.5-11.5-□m region, *Appl. Opt.*, **33**, 323-333.

Thibault, F., *et al.* (1997) : Infrared collision-induced absorption by O_2 near 6.4 μ m for atmospheric applications: measurements and empirical modeling, *Appl. Opt.*, **36**, 563-567,.

Tikhonov, A. N. *et al.* (1995) : Numerical methods for the solution of ill-posed problems, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 253 pp.

Toon, G. C. (1991) : The JPL MkIV interferometer, *Opt. Photonics News,* **2**, 19-21.

Toon, O. B., *et al.* (1994) : Infrared optical constants of H_2O ice, amorphous nitric acid solutions, and nitric acid hydrates, *J. Geophys. Res.*, **99**, 25,631-25,654.

Toon, G., B. Sen, J.-F. Blavier, Y. Sasano, T. Yokota, H. Kanzawa, T. Ogawa, M. Suzuki, and K. Shibasaki, Comparison of ILAS and MkIV profiles of atmospheric trace gases measured above Alaska in May 1997, *J. Geophys. Res.,* accepted.

Toon, G. C., J.-F. Blavier, B. Sen, J. J. Margitan, C. R. Webster, R. D. May, D. Fahey, R. Gao, L. Del Negro, M. Proffitt, J. Elkins, P. A. Romashkin, D. F. Hurst, S. Oltmans, E. Atlas, S. Schauffler, F. Flocke, T. P. Bui, R. M. Stimpfle, G. P. Bonne, P. B. Voss, and R. C. Cohen (1999) : Comparison of MkIV balloon and ER-2 aircraft measurements of atmospheric trace gases, *J. Geophys. Res.,* **104**, 26,779-26,790.

Vandaele, A. C., C. Hermans, P. C. Simon, M. Carleer, R. Colin, S. Fally, M. F. Merienne, A. Jenouvrier, and B. Coquart (1998) : Measurements of the NO2 absorption cross-section from 42 000 cm-1 to 10 000 cm-1 (238-1000 nm) at 220 K and 294 K, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer,* **59**, 171-184.

von Clarmann, T., G. Wetzel, H. Oelhaf, F. Friedl-Vallon, A. Linden, G. Maucher, M. Seefeldner, O. Trieschmann, and F. Lefèvre (1997) : ClONO2 vertical profile and estimated mixing ratios of ClO and HOCl in winter Arctic stratosphere from Michelson interferometer for passive atmospheric sounding limb emission spectra, *J. Geophys. Res.,* **102**, 16,157-16,168.

Waibel, A. E., *et al.* (1999) : Arctic ozone loss due to denitrification, *Science*, **283**, 2064-2069.

Wallance, L., K. Hinkel, and W. Livingston (1993) : An atlas of the solar photospheric spectrum in the region from 8900 to 13600 cm^{-1} (7350 to 11230 A) with decomposition into solar and atmospheric components and identifications of the main solar features, *National Solar Observatory Technical Report*, No. 93-001.

Webster, C. R., R. D. May, C. A. Trimble, R. G. Chave, and J. Kendall (1994) : Aircraft (ER-2) Laser Infrared Absorption Spectrometer (ALIAS) for in situ stratospheric measurements of HCl, N2O, CH4, NO2, and HNO3, *Appl. Opt.*, **33**, 454-472.

Weinstock, E. M., E. J. Hintsa, A. E. Dessler, J. F. Oliver, N. L. Hazen, J. N. Demusz, N. T. Allen, L. B. Lapson and J. G. Anderson (1994) : New fast response photofragment fluorescence hygrometer for use on the NASA ER-2 and the Perseus remotely piloted aircraft, *Rev. Sci. Instrum.*, **65**, 3544-3554.

Wennberg, P. O., *et al.* (1994) : Removal of stratospheric O_3 by radicals: in situ measurements of OH, HO2, NO, NO2, ClO, and BrO, *Science*, **266**, 398-404.

Wetzel, G., H. Oelhaf, T. von Clarmann, H. Fischer, F. Friedl-Vallon, G. Maucher, M. Seefeldner, O.

Trieschmann, and F. Lefèvre (1997) : Vertical profiles of N2O5, HO2NO2, and NO2 inside the Arctic vortex, retrieved from nocturnal MIPAS-B2 infrared limb emission measurements in February 1995, *J. Geophys. Res.*, **102**, 19,177-19,186.

WMO (1986) : Atmospheric Ozone: 1985, *Rep. 16*, Global Ozone Research and Monitoring Project, Geneva.

WMO (1998) : Assessment of trends in the vertical distribution of ozone, *Stratospheric Processes and their Role in Climate (SPARC) Rep. 1*, Global Ozone Research and Monitoring Project, Geneva.

WMO (1999) : Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998, *Rep. 44*, Global Ozone Research and Monitoring Project, Geneva.

Wood, S. W., *et al.*, Validation of version 5.20 ILAS HNO3, CH4, N2O, O3 and NO2 using ground-based measurements at Arrival Heights and Kiruna, *J. Geophys. Res.*, accepted.

Yokota, T., Y. Matsumoto, and H. Tsubaki (1994) : Wing range determination of spectral lines of atmospheric molecular absorption for calculation of cross-sections, *Proc. 20th Remote Sens. Symp.*, SICE, 47-50 (*in Japanese*).

Yokota, T., M. Suzuki, O.V. Duvobik, and Y. Sasano (1998) : ILAS (Improved Limb Atmospheric Spectrometer)/ADEOS data retrieval algorithms, *Adv. Space Res.*, 393-396.

Yokota, T., M. Suzuki, and Y. Sasano (1999) : Parallel computing of the satellite sensor ILAS data for measurement of the minor gas concentrations in the polar ozone layer, *Proc. the 1999 Intn'l. Tech. Conf. Circuits/Systems, Computers and Commun. (ITC-CSCC'99)*, IEEE, *I*, 667-668.

Yokota, T., M. Suzuki, H. Tsubaki, H. Nakajima, T. Sugita, H. Kanzawa, Y. Itou, M. Kaji, J. H. Park, and Y. Sasano, Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) data retrieval algorithm for Version 5.20 gas profile products, *J. Geophys. Res.*, accepted.

Zöger, M., *et al.* (1999) : Fast in situ stratospheric hygrometers: A new family of balloon-borne and airborne Lyman α photofragment fluorescence hygrometers, *J. Geophys. Res.*, **104**, 1807-1816.

Zöger, M., A. Engel, D. S. McKenna, C. Schiller, U. Schmidt, and T. Woyke (1999) : Balloon-borne in situ measurements of stratospheric H_2O, CH_4 and H_2 at midlatitudes, *J. Geophys. Res.*, **104**, 1817-1825.

REPORT RESEARCH FROM
THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES, JAPAN
No.169
国立環境研究所研究報告　第169号
(R-169-2002)

問い合せ先

【平成13年12月21日編集委員会受付】
【平成14年１月10日編集委員会受理】

平成14年１月31日発行

発　行　独立行政法人　国立環境研究所
〒305-8506　茨城県つくば市小野川16番２
電話　0298-50-2343（ダイヤルイン）

印　刷　株式会社　イ　セ　ブ
〒305-0005 茨城県つくば市天久保2-11-20
電話　0298-51-2515

Published by the National Institute for Environmental Studies
16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506 Japan
January 2002

本書の全体または，一部の無断転載を禁じます。
（この報告書は，再生紙100%，白色度70%を使用しております。）