

AG-5-'95

国立環境研究所 地球環境研究年報

平成 6 年 度



環境庁 国立環境研究所

## 平成6年度国立環境研究所地球環境研究年報 の発刊に当たって

当研究所が地球環境研究総合推進費による研究に取り組んで、5年が経過しました。一部終了した研究課題もありますが、継続研究課題としては、地球温暖化現象の解明及び対策、オゾン層破壊問題、酸性雨、熱帯林と野生生物保護の問題等があります。地球環境研究の特徴は、将来予測を目的として、長期的展望の基に継続した観測を行うと共にそのデータに基づいてモデルを組み直し予測の精度を上げ、対策につなげる所がありますが、それだけでなく既に発生している現象問題の解決と対策及び技術開発研究も含んでいます。世界的にも地球環境研究の重要性の認識は益々高まり、地球環境研究に従事している研究者の責任も重くなってきておりますが、それぞれの研究課題で、ある程度の成果が出始めてきたと考えられます。本報告書にその一端をお読み取り下されれば幸いです。

地球環境研究のかなりの部分がまさに地球レベルでの研究であり、本報告書に見られますように国外における野外研究の比重が高まっています。国内における研究にしましても既に国際的なネットワークの一部として位置づけられ、その上でより信頼性の高い研究を期待されています。当研究所が地球環境研究において国際的にリードするには、より一層の研鑽が必要となると思われれます。

本研究年報は、地球環境研究グループが中心となって推進した研究成果をまとめたものですが、研究所内の他の組織及び研究所外の機関もかなりの部分に関与しており、その研究成果も一部納められています。これからの地球研究のためにできる限り多くの方々のご意見、ご批判、及びご助力をお願いする次第です。

平成7年8月

国立環境研究所

所長 鈴木 継 美

# 目 次

1. 概 況 .....	1
2. 地球環境研究総合推進費による研究	
2.1 オゾン層の破壊に関する研究 .....	7
2.2 地球の温暖化現象解明に関する研究 .....	15
2.3 地球の温暖化影響・対策に関する研究 .....	27
2.4 酸性雨に関する研究 .....	49
2.5 海洋汚染に関する研究 .....	61
2.6 熱帯林の減少に関する研究 .....	69
2.7 野生生物種の減少に関する研究 .....	79
2.8 砂漠化と人間活動の相互影響評価に関する研究 .....	89
2.9 総合化研究 .....	99
2.10 課題検討調査研究 .....	113
3. その他の研究	
3.1 衛星観測プロジェクト .....	115
3.2 地球環境モニタリング .....	127

# 1. 概 況

当研究所における地球環境研究は、主として環境庁・「地球環境研究総合推進費」と地球環境センター経費によって実施されている。

地球環境研究総合推進費による課題は

- (1) 課題研究
- (2) 総合化研究
- (3) 課題検討調査研究

の3つのカテゴリーに区分されているが、課題研究は8研究分野、合わせて約43課題にわたっており、地球環境研究グループだけでなく、地域環境研究グループおよび基盤研究部の多くの研究者がかかわって研究を推進している。総合化研究は、地球環境研究センターが中心となって研究を推進している。

オゾン層研究では、レーザーレーダー、ミリ波分光計等による地上からのオゾン層総合的観測手法の開発、成層圏エアロゾルがオゾン層に及ぼす影響に関する観測的研究及びラジカル反応等の実験的研究、オゾン層観測データの解析や数値モデルを用いたオゾン層変動の解析に関する研究を主体とし、紫外線の増加の人の健康及び自然生態系への影響の研究として、機能への影響、発がん性の素過程としてのインビトロ研究、白内障発症の増加の可能性、植物における紫外線障害の修復機構の研究などが行われた。ハロン代替物質について毒性や大気環境に対する影響などの研究、さらにフロン等対策技術の評価としてハロン代替物質の熱分解過程の生成物の研究などが行われた。

地球の温暖化現象解明研究では、二酸化炭素やメタン対流圏オゾンなど温室効果気体の地球規模での増加に関する研究と、気候変動モデルの開発研究を中心的な研究課題としている。シベリアにおいて7～8月に中型航空機により二酸化炭素やメタンの高度分布、水平分布の観測を行った。その結果、夜間に発生したメタンや二酸化炭素の100kmスケールでの蓄積量を推定(120mg/day/m<sup>2</sup>)することができた。また、天然ガスの採掘・輸送に伴う漏れも観測した。西シベリアで航空機による月1回の大気のサンプリング分析を通年でを行い、夏期の自然湿地からのメタン発生、冬季のガス漏れ、二酸化炭素の大きな

吸収などに関連する変動が観測された。これらの結果からシベリアの自然、人為活動が地球規模の二酸化炭素、メタンの濃度に大きな影響を与えていると推測される。また、シベリア凍土地帯における湿原、湖沼、凍土からのメタンの発生量に関する研究や、環境が森林形成に及ぼす影響などの研究を行った。また、温室効果気体である対流圏オゾンにかかわる研究、土壌からの二酸化炭素の発生プロセスなどの研究を行った。他方、気候変動モデルの分野では、海洋大循環のモデル化、二酸化炭素倍増シナリオの下での気候変動の予測計算などを行った。

地球の温暖化影響・対策研究では、アジア太平洋地域からの温室効果ガス排出量を予測するために、日本等の国別エネルギー需要モデルを完成させ、また、世界モデルを改良して気候変化の感度分析を行うとともに、温暖化がアジア太平洋地域に及ぼす影響を分析するために水資源変化モデルを改良し、また、植生モデルを構築した。また、温室効果ガス削減に有効な技術について、意識調査や産業関連表を用いて技術導入に伴う削減効果を定量的に分析する(全国消費実態調査)とともに、電気自動車、断熱材、廃棄物リサイクル、資源サイクル等による温室効果ガス削減効果とその普及策について検討した。一方、温暖化影響の研究については、温暖化に伴う植物への影響を数値解析、野外実験及び施設実験により検討した。また、健康への影響については、熱ストレスによる影響研究を続けるとともに、中国雲南省や沖縄の現地調査などにより、気候変化に伴うマラリア分布の変化の可能性を分析した。

酸性雨研究では、IGAC/APARE計画に基づく国際協同研究の一環として航空機による酸性・酸化性物質の観測を本年度は屋久島の西方を中心に行った。地上観測は沖縄、隠岐島、八方尾根、八甲田の4地点で継続観測を行っている。その他7地点を加え、酸性物質の沈着量マップ作成に供した。越境汚染の定量化のため鉛および硫黄の大気汚染物質の移流の特性を明らかにした。さらに東アジア地域における大気汚染物質の飛来シミュレーションモデルを開発した。また、酸性雨関連化学種の生態系影響を評価するため、屋久島生態系に注目し、樹木、土壌、河川、水などのサンプリングならびに化学分析を行っ

た。また、自然酸性環境の森林ならびに湖沼・河川生態系に分布する動植物に関する調査を行っている。

海洋研究では、瀬戸内フェリーに加え、新たに沖縄フェリーをモニタリングのプラットフォームとして、海水溶存CO<sub>2</sub>分圧、DIC、DOC等の計測を行い、衛星可視域データと比較して、広域の海洋変動の解析を行った。一方、珊瑚礁の研究の一端として水中画像による時間的変動の解析を開始した。また、CO<sub>2</sub>シミュレーターにより、円石藻その他の植物プランクトンを中心とした炭素循環の研究をまた、海域メゾコズム(隔離生態系)により植物・動物プランクトンを中心とした物質循環を調べるとともに海洋から発生する硫化ジメチル発生機構の解明にあたった。

熱帯降雨林では複雑な階層構造を有している。多様な生物種からなる熱帯林生態系の構造をしているが、パソ保護林の中心部50ヘクタール内に合計814種の樹木が記録され、超喬木種38種、樹冠形成種162種、下生え種159種などであった。これらの種の成熟木と稚樹の分布関係を基に稚樹の生存の条件を調べ種の多様性の機構解明を行った。パソ森林保護区内に高さ30mの林冠歩道を設置し微気象、光合成特性などの測定を行った。付設のタワーを52mの高さに延ばし高木層の上での炭酸ガス収支の測定を可能にした。調査区を設け、胸高直径、樹高、リター量、種子の分布などの各種測定を行ってきた。さらに、熱帯林の環境形成作用の研究として、土壌動物による落葉・落枝の分解過程の測定を継続した。熱帯林の修復の可能として、風倒木の後にできるギャップにおける植生の調査を行った。熱帯林の減少を定量化する手法を開発することを目的として、人工衛星NOAAに掲載された可視近赤外域センサ AVHRR からの画像を用いて、東南アジア地域の植生分布の現況及びその変化を調査し続行した。

野生生物研究ではマレーシア半島部の熱帯林パソ、ゴンバックにおいて、森林規模、植生構造の違いが動物群集に与える影響を調査している。小型のほ乳類の生態と種子分数の役割が明らかにされつつある。また、野生動物の遺伝的多様性が適応度に及ぼす影響解明のために、メダカ、オオヨシキリ、トンボ、ユスリカ等を用いてフィールド調査および室内実験を行っている。これらの動物から抽出したDNAの特定部位をPCR法で増幅し、ごく微量のDNAから個体間の差異を検出する方法を開発した。上記の動物について体の部位の左右非対称

性のゆらぎ(完全な対称性からの狂い)を測定し、左右非対称な個体は発育速度、生存率、交尾成功率などが劣ることが分かった。さらに左右対称性のゆらぎと個体群サイズの関連についての検討も開始した。

砂漠化研究では、人間活動による砂漠化進行機構を解明するため、インド中央乾燥地研究所(Central Arid Zone Research Institute)と共同で、本年度はタール砂漠に降雨量の異なる試験地において、昨年に引き続き植生、砂丘の土壌、社会調査等を行った。家畜の放牧容量の研究のため保護区を設定し草食動物の羊の密度との関係を明らかにした。また、水収支、微気象、社会経済等のデータの収集を行い砂漠化進行における人間活動の関連を明らかにするための基礎データとした。本年度も広域的に乾燥地の環境状況を把握するため、人工衛星データ(ランドサット)を用いてタール砂漠の土地利用図と植生図の作成を行ったが、雨期と乾期の差がきわめて明確に、しかもモザイク状の地域差を見ることができた。

衛星観測研究では、地上衛星間のレーザー長光路吸収測定法による大気微量成分の計測手法の開発、衛星搭載レーザーレーダーによる大気環境評価手法に関する研究、次世代の衛星搭載大気センサーの基礎的研究のほか、地球観測プラットフォーム技術衛星(ADEOS)に搭載される大気センサー(ILAS、RIS)のデータ処理アルゴリズムの研究、データ処理・運用システムの開発にかかわる研究が続けられた。

平成6年度地球環境研究総合推進費により国立環境研究所において行われた研究課題は以下のとおりである。

(これらの内☆印を付した課題は平成6年度からの新規課題、他は平成3年度から発足した継続課題の研究である・印は主課題、無印は副課題。)

また、平成6年度に行われた地球環境研究発表会は、表1のとおりである。

#### (1) 課題別研究

##### オゾン層の破壊

・オゾン層変動の総合的観測及び解析に関する研究

地上からの総合的観測手法の開発とその評価に関する研究

(レーザーレーダーによる下部成層圏オゾン測定手法の高度化に関する研究)

(ミリ波分光法によるClO及びオゾン測定手法の開

表1 平成6年度地球環境研究発表会

開催日	題目
平成7年1月9日～10日	熱帯林生態系の解明 <sup>2,3</sup>
1月11日	野生生物の種の減少 <sup>1</sup>
1月30日～31日	シベリア地域地球温暖化研究 <sup>4</sup>
1月30日～2月2日	The 3rd International Workshop to clarify the behaviour of acid Deposition in East Asia <sup>4</sup>
2月1日～3日	Tsukuba Global Carbon Cycle Workshop <sup>4</sup>
2月7日	地球温暖化による人類の生存環境と環境リスクに関する研究 <sup>1</sup>
2月23日～24日	酸性物質の生態系影響 <sup>1</sup>

注) <sup>1</sup>講演要旨集, <sup>2</sup>英文報告集, <sup>3</sup>邦文報告集, <sup>4</sup>英文報告集(印刷予定)  
上記刊行物をご希望の方は地球環境研究グループにご連絡下さい。

発と評価に関する研究)

(赤外ヘテロダイナミクス分光法による微量分子測定手法の開発に関する研究)

(可視分光法による窒素酸化物測定手法の開発に関する研究)

成層圏エアロゾルがオゾン層に及ぼす影響に関する研究

(エアロゾル及びオゾンの動態に関する観測研究)

(エアロゾルがオゾン破壊反応に及ぼす影響に関するモデル及び実験による研究)

オゾン層変動の解析に関する研究

・オゾン層保護対策技術の開発と評価に関する研究

ハロン代替物質の環境影響(毒性)評価に関する研究

ハロン及びフロン等代替物質の環境影響(寿命)評価に関する研究

(ハロン及びフロン代替物質の大気中での挙動に関する研究)

フロン等の回収・分析のためのトータルシステムの開発と評価手法に関する研究

☆・オゾン層破壊関連大気微量物質の衛星利用遠隔計測に関する研究

☆太陽掩蔽法オゾンセンサーによるエアロゾル計測に関する研究

☆地上衛星間レーザー長光路吸収法による大気微量分子の観測に関する研究

☆ (衛星搭載リフレクタを用いた大気微量分子の観測

に関する研究)

・紫外線の増加がヒトの健康に及ぼす影響に関する研究  
紫外線が皮膚ガン発症の素過程に及ぼす影響に関する研究

紫外線の増加がヒトの白内障発症に及ぼす影響に関する研究

(紫外線による白内障発症に関する疫学的研究)

(紫外線照射による白内障発症機序の解明に関する実験的研究)

☆紫外線による酸化的ストレスの生体影響評価に関する研究

・紫外線の増加が植物等に及ぼす影響に関する研究

植物の紫外線に対する防御機構に関する研究

(植物における紫外線障害の修復機構に関する研究)

(紫外線増加に対する海藻類の馴化に関する研究)

地球の温暖化(現象解明)

・地球温暖化に係る二酸化炭素・炭素循環に関する研究  
海洋沈降粒子による炭素の沈降フラックスと環境因子に関する研究

土壌生態系における微生物群集をめぐる炭素循環の定量的解析

(温帯域における土壌圏微生物群集をめぐる炭素循環の定量的解析)

同位体比による二酸化炭素の大気・海洋・生物圏間の交換に関する研究

- ・地球温暖化に係わる対流圏大気化学の研究  
大気中微量成分の消滅・生成に係わるフリーラジカル反応の速度・機構の解明  
対流圏におけるオゾン増加原因の解明に関する研究
  - ・シベリア凍土地帯における温暖化フィードバックの評価に関する研究  
シベリアの湿地における温室効果ガス発生量へのフィードバック  
(シベリアの自然湿地からのメタン発生総量推定に関する研究)  
(凍土からのメタン発生に対する温暖化影響)  
シベリアの森林における温室効果ガス発生量へのフィードバック  
(環境要因が森林動態に及ぼす影響の解明)  
シベリアにおける温暖化検出手法に関する研究  
(シベリアにおける気候変動と物質輸送モデルに関する研究)  
(リモートセンシング情報の複合利用による地表面観測の高度化に関する研究)
  - ☆ (降雨中酸素同位体測定によるシベリア水循環の研究)  
航空機による温室効果ガスの測定法の高度化に関する研究
  - ・気候モデルによる気候変動評価に関する研究  
気候変動予測モデルの開発・改良に関する研究  
気候変化に係わるフィードバックプロセスの詳細なモデル化に関する研究  
(大気・陸面過程におけるフィードバック機構の評価)  
(大気水循環と雲過程におけるフィードバック機構の評価)  
気候モデルを用いた気候システムの変動特性の定量的評価
- 地球の温暖化(影響・対策)
- ・地球の温暖化による海面上昇等の影響予測に関する研究
  - ・地球温暖化による水収支への影響評価に関する研究
  - ・地球の温暖化が植物に及ぼす影響の解明に関する研究  
植物生態系への影響予測に関する研究  
植物に及ぼす複合影響に関する実験的研究
  - ・地球温暖化による人類の生存環境と環境リスクに関する研究
- る研究  
暑熱による生体防御系と代謝解毒系の変動と疾病発生に関する研究  
東アジア地域におけるマラリア及び媒介蚊の地理的分布と、その規定要因の解明に関する研究
  - ・地球温暖化防止対策技術の総合評価に関する研究  
技術評価のためのライフサイクル温室効果ガス排出量の分析に関する研究  
(技術評価のためのライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量の分析に関する研究)  
民生分野における重点対策の普及に当たっての技術的評価  
(エコハウスの構築に関する技術的評価)  
(エネルギー多消費型民生関連製品に関する技術評価)  
交通分野における重点対策の普及に当たっての技術的評価  
(コンピュータ交通分野の車輛の社会的受容性に関する研究)  
対策の総合評価手法の開発に関する研究
  - ・アジア太平洋地域における温暖化対策分析モデル(AIM)の開発に関する途上国等共同研究  
温室効果ガス排出モデル(AIM/emission)の開発に関する共同研究  
(基本モデルの開発に関する共同研究)
  - ☆ (韓国モデルの開発に関する国際交流研究)  
温暖化影響モデル(AIM/impact)の開発に関する共同研究  
(基本モデルの開発に関する共同研究)
  - ☆ (農業影響モデルの開発に関する共同研究)
  - ☆・地球温暖化抑制のためのCH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oの対策技術開発と評価に関する研究
  - ☆CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O抑制のための生活排水系のバイオ・エコエンジニアリングシステムによる対策技術
  - ☆東北アジア地域におけるCH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O抑制のための汚水・汚泥の適正処理技術開発
  - ☆ (中国におけるCH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O抑制のための汚水・汚泥の適正処理技術開発)
  - ☆ (韓国におけるCH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O抑制のための汚水・汚泥の適正処理技術開発)

## 酸性雨

- ・東アジアにおける酸性・酸化性物質の動態解明に関する研究
- 地上観測による酸性・酸化性物質の動態解明に関する研究  
(同位体比測定による大気汚染物質の大陸からの寄与の推定と酸性物質沈着量マップ作成に関する研究)
- 航空機、船舶等を用いる酸性、酸化性物質の動態解明のための国際共同観測  
(IGAC計画に基づく航空機等を使用した国際共同観測)
- 大陸からの大気汚染物質の移流解明のための酸性、酸化性物質の発生、移流、変質、沈着モデルの作成  
(東アジアにおける酸性、酸化性物質の発生、移流、変質、沈着モデルの作成)  
(大気中における酸性・酸化性物質の生成過程に関する研究)
- ・酸性物質の生態系に与える影響に関する研究
- 酸性物質の植物環境系に与える影響に関する研究
- ・酸性物質の臨界負荷量に関する研究
- 土壌における臨界負荷量に関する研究  
(土壌-植物系における臨界負荷量の評価に関する実験的研究)
- ・東アジアの酸性雨原因物質等の総合化モデルの開発と制御手法の実用化に関する研究
- 酸性雨原因物質、関連物質の発生量分布の現状と将来予測モデルの開発に関する研究

## 海洋汚染

- ・大陸棚海域循環過程における沿岸-外洋の物質フラックスに関する研究
- 海洋生態系の遷移に伴う物質循環フラックスの変動機構に関する研究
- 海産藻類による物質循環機能のモデル化に関する研究
- 海底堆積物を用いた長期海洋物質循環変動の推定手法に関する研究  
(海底堆積物の化学組成を用いた長期物質の循環変動の推定手法に関する研究)
- ☆・東アジア海域における有害化学物質の動態解明に関する研究
- ☆有機ハロゲン化合物を中心とする有害化学物質の時空

## 間変動機構に関する研究

- ・衛星可視域データのグローバルマッピングによる広域環境変動に関する研究
- 定期航路連続観測と衛星データによる海洋環境指標の時空間変動に関する研究
- ・サンゴ礁生態系の維持機構の解明とその保全に関する研究
- サンゴ礁変質のモニタリング手法の開発に関する研究  
(水中画像アーカイビングによるサンゴ礁変質のモニタリング手法の開発)

## 熱帯林の減少

- ・熱帯林生態系の環境及び構造解析に関する研究
- 熱帯林構成種の成長様式に関する研究
- 動物群集の動態に関する研究
- ・熱帯林生態系における野生生物種の多様性に関する研究
- 樹冠形成過程の生理生態学的多様性に関する研究
- 動植物の相互作用の多様性に関する研究
- ・熱帯林の環境形成作用の解明に関する研究
- 熱帯林の微気候形成作用の解明に関する研究
- 土壌環境形成における動物の役割に関する研究
- ・熱帯林生態系の修復に関する研究
- 自然更新機能の解析に関する研究
- ・人工衛星データを用いた東南アジア地域の地表面被覆分布図の作製に関する研究

## 生物多様性の減少

- ・森林破壊が野生生物種の減少に及ぼす影響の機構に関する研究
- ☆・アジア太平洋地域における湿地等の環境監視保全手法の開発に関する研究
- ☆ 人工衛星データを用いたアジア湿地分布図の作成に関する研究
- ・希少野生動物の遺伝的多様性とその保存に関する研究
- 希少野生動物の遺伝的多様性に関する研究  
(遺伝的多様性減少の影響の解明)
- 希少野生動物の生息域外保全及び増殖技術に関する研究
- (希少野生動物の遺伝情報管理のシステム化)
- ☆ (鳥類始原生殖細胞の体外培養、凍結保存及び移植に関する研究)



### 砂漠化

☆・砂漠化防止対策適用効果の評価手法の開発に関する研究

### 人間・社会的側面（分野）

・地球環境負荷低減のための都市とライフスタイルのあり方に関する研究

☆・開発途上国における人口増加と地球環境問題の相互関連に関する基礎的研究

☆・地球環境保全に関する土地利用・被覆変化研究（LU/GEC）

☆アジア・太平洋地域の土地利用・被覆変化の長期予測

☆地理情報システムを用いたアジア・太平洋地域の土地利用・被覆データのスケーリング手法の開発

☆（中国における土地利用・被覆データセットの開発）

☆（インドネシアにおける土地利用・被覆データセットの開発）

### その他の地球環境問題

・アマゾン流域における水銀汚染に関する研究

### （2）総合化研究

☆・持続的発展のための環境と経済の統合評価手法に関する研究

☆環境経済統合目標の設定のための経済モデルの開発に関する研究

☆政策目標の設定と評価のための環境資源勘定と環境指標の統合手法に関する研究

☆・地球環境予測のための情報のあり方に関する研究

### （3）課題検討調査研究（F/S）

☆・海水中二酸化炭素分圧測定の高高度化に関する予備的研究

☆・渤海・東シナ海における海洋汚染が海洋生態系/海洋生物種多様性に与える影響に関する予備的研究

・気候変動に関する適応/閾値の評価に関する予備的研究

☆・地球環境負荷低減のための民生品開発のあり方に関する予備的研究

## 2. 地球環境研究総合推進費による研究

### 2.1 オゾン層の破壊に関する研究

#### 〔研究組織〕

地球環境研究グループ	
統括研究官	安野正之
オゾン層研究チーム	○中根英昭・秋吉英治
温暖化現象解明研究チーム	井上 元
衛星観測研究チーム	笹野泰弘・鈴木 睦・横田達也
化学環境部	
計測管理研究室	安原昭夫
化学毒性研究室	彼谷邦光・白石不二雄
環境健康部	
部長	遠山千春
生体機能研究室	藤巻秀和
病態機構研究室	青木康展
環境疫学研究室	小野雅司・本田 靖
大気圏環境部	
部 長	鷺田申明
大気物理研究室	花崎秀史
大気反応研究室	今村隆史・猪俣 敏・奥貫幸夫・古林 仁
高層大気研究室	杉本伸夫・松井一郎・湊 淳
生物圏環境部	
環境植物研究室	大政謙次・清水英幸
地域環境研究グループ	
上席研究官	中杉修身
新生物評価研究チーム	近藤矩朗・佐治 光・中嶋信美
環境統計手法研究官	松本幸雄
地球環境研究センター	神沢 博
客員研究員 26名	

#### 〔研究概要〕

フロンガス（クロロフルオロカーボン；CFC）は非常に安定な化合物であり、無臭、不燃などの数々の特長を持っているため、スプレー製品、冷媒、洗浄剤、発泡剤などに幅広く使用されている。安定であるために、対流圏（地上約15kmまでの大気）中では分解せずに成層圏（地上約15～50kmの大気）に達し、紫外線によって分解されて塩素原子を放出し、この塩素原子が連鎖反動的に成層圏オゾンを破壊する。フロン等によるオゾン層破壊がど

の程度まで進行し、人の健康や生態系にどの程度の被害を与えるのかについての評価は不十分である。また、特定フロン等の全廃を実現するための代替フロンの開発が急務であるが、そのためには代替フロンの環境影響評価手法の確立が必要である。

このような状況においてオゾン層破壊の研究にまず求められるものは、オゾン層変動を総合的に観測する手法の評価、総合的観測に基づくデータ解析に関する研究である。また、オゾン層の破壊によってもたらされる紫外

線 (UV-B) の増大が、人の健康や生物および生態系に及ぼす影響を定量的に把握することによって初めて、フロン等オゾン層破壊物質の規制の有効性を評価することが可能になる。さらに、オゾン層保護対策の推進とその環境影響評価に関する研究により有効なオゾン層保護対策の実行が可能となる。

本研究では、上に述べた研究に対する要請を踏まえ、国際的な協力と地球環境研究総合推進費による省際的な共同研究の一端を担い、オゾン層の総合的観測及び解析、新型レーザーレーダー計測技術の開発、オゾン層破壊の健康影響評価、植物影響評価、代替フロンの環境影響評価、フロン等対策技術の環境影響評価に関する研究を行う。

#### 課題1 オゾン層の総合的観測及び解析に関する研究

##### (1) 地上からの総合的観測手法の開発とその評価に関する研究

レーザーレーダー、ミリ波分光計等によって、オゾン及びオゾン層破壊関連物質を地上から総合的に測定する手法の開発と評価を行う。

##### (2) 成層圏エアロゾルがオゾンに及ぼす影響に関する研究

成層圏エアロゾルとオゾンの動態の把握、エアロゾルがオゾン層破壊に及ぼす影響に関する実験及びモデルを用いた研究を行う。

##### (3) オゾン変動の解析に関する研究

本課題及びその他の観測によって得られたデータを総合的に解析する手法、及び解析に必要な数値モデルによる研究手法に関する研究を行う。

#### 課題2 オゾン層保護対策技術の開発と評価に関する研究

##### (1) ハロン代替物質の環境影響 (毒性) 評価に関する研究

ハロン代替物質 (アミン系パーフロロ化合物) が実際に使用された場合を想定し、ハロン代替物質そのものの生体に対する毒性、及び火災現場におけるハロン代替物質の熱分解二次生成物の組成と毒性の評価を行う。

##### (2) ハロン及びフロン等代替物質の環境影響 (寿命) 評価に関する研究

ハロン及びフロン代替物質の寿命の評価に必要な、OH ラジカルとの反応速度の測定、大気中での分布と輸送・消滅等に関する評価を行う。

#### 課題3 新型レーザーレーダー計測技術の開発に関する研究

##### (1) 衛星利用レーザー長光路吸収計測技術の開発に関する研究

分光計測法の開発：オゾン層破壊の実態把握のためには、オゾンおよびオゾン層破壊に関連する種々の分子を高感度・高精度で測定する必要があるが、衛星利用レーザー長光路吸収法はそのための重要な技術の一つである。衛星利用レーザー長光路吸収計測技術の確立のためには、測定対象分子ごとの最適な分光測定手法の選択、有望なレーザー光源についての特性の評価と最適なレーザー光源の選定、測定データから大気微量分子の高度分布と気柱全量を求めるためのアルゴリズムの開発が必要である。このために、既存の赤外レーザーを用いた分光測定実験とレーザー波長特性調査を行うとともに、測定に必要な高精度のレーザー波長掃引機構の開発、信号検出・処理装置の検討、データ解析手法の開発を行い、衛星利用長光路吸収測定の基礎技術を確立する。

##### (2) 衛星搭載レーザーレーダーによる地球大気環境の評価に関する研究

成層圏オゾン層破壊、地球温暖化等に関係する地球規模大気環境の評価のための衛星搭載レーザーレーダーの開発に係る基礎的研究として、衛星搭載レーザーレーダーによる地球大気環境評価の具体的目標 (目的、目標性能) の設定に係る検討、開発すべき機器使用の検討のためのシミュレーション、地球大気環境評価のためのデータ利用方法に関する調査を行う。特に、成層圏オゾン層の破壊に関係する極成層圏雲、並びに地球温暖化現象と密接に関係する雲の広域分布計測に関する調査に重点を置く。

#### 課題4 紫外線の増加がヒトの健康に及ぼす影響に関する研究

##### ・紫外線による免疫機能等生体防御機能の低下に関する研究

発がんリスクの促進影響：紫外線、特に UV-B の増加による免疫系などの生体防御機能の低下機構を、実験動

物や培養細胞に紫外線を照射し、紫外線量と発がんの量－反応関係、免疫担当細胞への影響、がん関連遺伝子と生体防御タンパク質の発現への影響等を検討することにより明らかにし、紫外線による発がんリスクの促進影響を評価する。さらには、紫外線による発がんに対する発がんプロモーターの影響について検討し、紫外線による発がんリスクの促進影響について評価を行う。

#### 課題5 紫外線の増加が植物等に及ぼす影響に関する研究

##### ・紫外線の植物への影響の作用機構に関する研究

オゾン層破壊により増加する紫外線UV-Bによる、植物の成長、増殖の阻害作用機構を明らかにするために、290～320nmの紫外線について、高等植物の成長阻害の作用スペクトルを明らかにするとともに、紫外線受容物質の推定、UV-Bの活性酸素防御系酵素に与える影響、可視光による回復、種々の植物種、環境条件における紫外線の影響の比較、可視障害の画像診断法の検討を行い、紫外線の植物への影響の作用機構を解明する。また、微細藻類の増殖・光合成に及ぼす紫外線の影響の藻類種間差について検討する。さらに、環境条件と紫外線吸収物質含有量および紫外線感受性との関係を比較し、植物の紫外線防御機構を推定する。

#### 課題6 フロン等代替物質の開発と環境影響評価に関する研究

##### ・フロン代替物質の開発および環境影響評価に関する研究

フロン代替物質の対流圏分解物質の環境影響評価に関する研究：物理化学的手法を用いて、フロン代替物質の大気バックグラウンドでの光分解・光化学反応速度を調べ、二次生成物の生成濃度を推定する。また、成層圏における光分解速度を測定し、分解生成物の定量的関係を明らかにする。さらに、代替フロンおよび二次生成物の環境濃度の推定を行い、その生体影響を評価する。

#### 【研究成果】

それぞれの課題において研究計画に沿った研究成果が得られているが、ここではその一部について紹介する。なお、他の成果については、「平成6年度地球環境研究総合推進費研究成果報告集」を参照されたい。

#### (1) 東シベリアヤクーツクにおけるオゾン層気球観測

1994年から1995年にかけて欧州諸国を中心として、日本、ロシア、米国、ニュージーランド等の研究機関の参加の下に、Second European Stratospheric Arctic and Mid-latitude Experiment (SESAME) が実施された。本研究所では、成層圏オゾン層研究に関する日-EU研究協力の一環として、日本におけるオゾンレーザーレーダー観測の強化のほか、ロシアCAO、名古屋大学太陽地球環境研究所と共同で、東シベリアヤクーツク(60°N, 130°E)においてエアロゾル及び水蒸気濃度、及びエアロゾル粒径分布の気球観測を実施した。また、この期間には、EUとロシアCAOによりオゾンゾンデ観測が実施された。

1995年の冬には、極渦が欧州からシベリアの方向に偏り、その極渦の内部あるいは極渦の南側の境界に極成層圏雲(PSC)が広範囲に発生するケースが見られた。ヤクーツクでは、1月20日過ぎから極渦の内部に入り、約20日間、標準偏差の2倍を越える明瞭なオゾン減少が見られた。その後も2月20日過ぎから1週間程度の顕著なオゾン減少が見られ、さらに、3月中旬にも同様のオゾン減少が見られた。極成層圏雲は1月に最も発達したが、2月、3月にも観測されており、不均一反応による効率の高いオゾン層破壊が繰り返して起こっていたと考えられる。

エアロゾル高度分布の気球観測は1月14日、2月21日、3月1日、3月16日に行われた。3月1日には、気球に搭載した粒子計数器によるエアロゾル粒径分布の観測を実施した。図1に、散乱比(エアロゾルと空気による散乱=全散乱と空気による散乱の比)の高度分布を示す。1月14日と3月1日の場合には、高度15km以上で散乱比が高度とともに緩やかに減少するのに対して、2月21日の場合には高度18kmから20kmにかけて、3月16日の場合には高度15kmから18kmにかけて、散乱比が急激に減少する。1月14日と3月1日の場合には極渦の外側、2月21日と3月16日の場合は極渦の内側にヤクーツクが位置していることから、エアロゾルの高度分布が異なっていると考えられる。

エアロゾル観測と同時期に行われた、オゾンゾンデ観測データを図2に示す。極渦の外側の場合(1月13日、3月1日)には高度13kmから23kmでオゾン濃度、気温とも高く、内側の場合(2月21日、3月17日)には両者とも低く、明瞭な違いが見られる。

エアロゾルゾンデ (ヤクーツク, 1995)

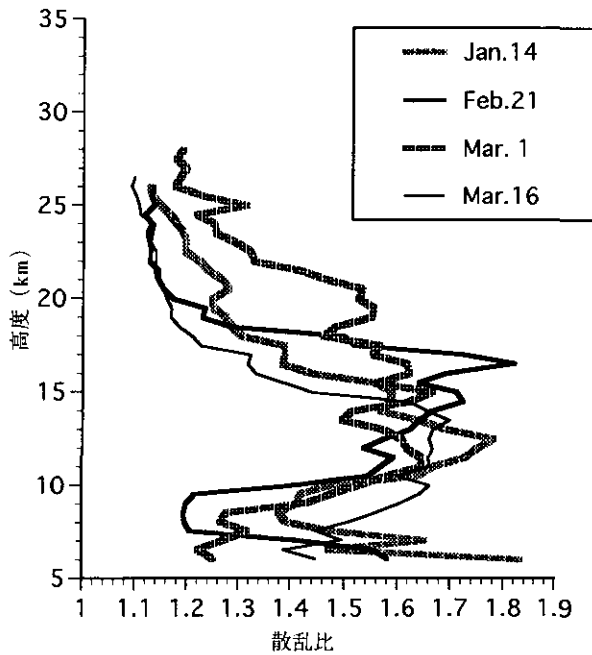


図1 エアロゾル後方散乱ゾンデを用いた気球観測による散乱比の高度分布 (散乱比-1) がエアロゾル濃度に相当する。

エアロゾル粒径分布及び水蒸気の高高度分布のデータは現在解析中である。エアロゾル高高度分布の違いの原因、不均一反応によるオゾン層破壊との関連等について詳細な解析を行う予定である。

(2) ハロン代替物質の熱分解に関する実験的研究

平成5年度に製作した熱分解装置を使用して、米国で販売・使用されているハロン代替物質のひとつである1,1,1,2,3,3,3-ヘptaフルオロプロパン (略称FM200; 以下FM200と呼ぶ) と工業技術院名古屋工業技術研究所で独自に開発されたハロン代替物質であるパーフルオロトリエチルアミン (以下PFTEAと呼ぶ) を熱分解して、加熱温度と熱分解の挙動の関係を解明し、合わせて熱分解生成物の構造を明らかにした。

実験方法は対象物質が5%体積濃度となるような空気試料を調製し、一定温度に加熱した石英管に50ml/分の速度で通気した。石英管から排出されたガス中の有機成分はガスクロマトグラフで、反応性のフッ素系無機物は水酸化ナトリウムで捕集後、イオンクロマトグラフで分析した。熱分解生成物はガスクロマトグラフ質量分析計で測定し、マススペクトルの解析を行って構造を推定した。

オゾンゾンデ (ヤクーツク, 1995)

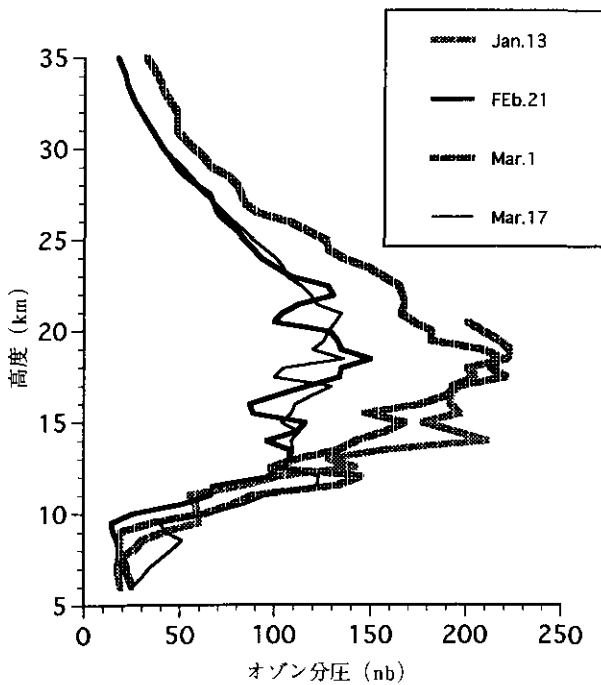


図2(a) オゾンゾンデ (気球) 観測によって得られたオゾンの高度分布

気温高高度分布 (ヤクーツク, 1995)

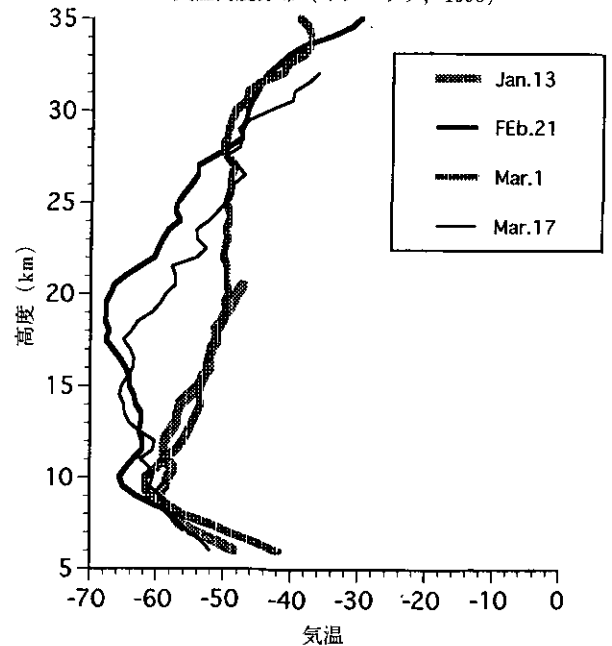


図2(b) オゾンゾンデ (気球) 観測によって得られた気温の高高度分布

FM200の場合の熱分解挙動を図3に示した。分解は500℃付近から始まり、600℃から急激になり、700℃で分解が完了した。ガスクロマトグラフによる測定では生成物は1種類で、700℃で最大の生成量を示した。この物質のマススペクトル(図4参照)を解析した結果、パーフロイソブタンと推定された。これは熱分解で生成したトリフロロメチルラジカルがFM200の水素を引き抜き、生じたラジカルがさらにトリフロロメチルラジカルと反応して生じたと考えられる。この反応機構はFM200の化学的消火能がトリフロロメチルラジカルによるものとされていることとよく合致している。

PFTEAの熱分解挙動を図5に示した。FM200とほとんど類似の挙動が観測されたが、完全に分解する温度は約800℃付近であった。ガスクロマトグラフによる測定では生成物は1種類で、700℃で最大の生成量を示した。この物質のマススペクトル(図6参照)を解析した結果、パーフロロN-エチルピロリジンと推定された。

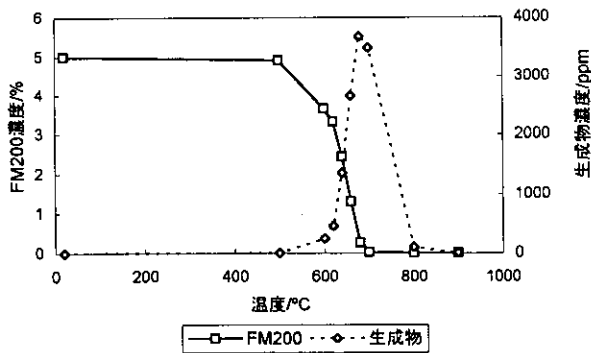


図3 ヘプタフロプロパン (FM200) の熱分解挙動

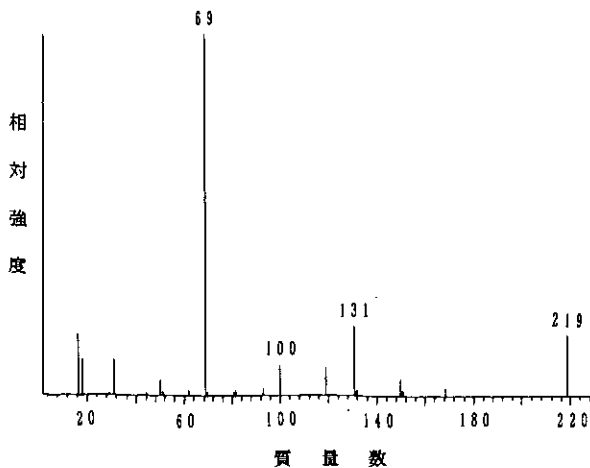


図4 ヘプタフロプロパン (FM200) の熱分解生成物のマススペクトル

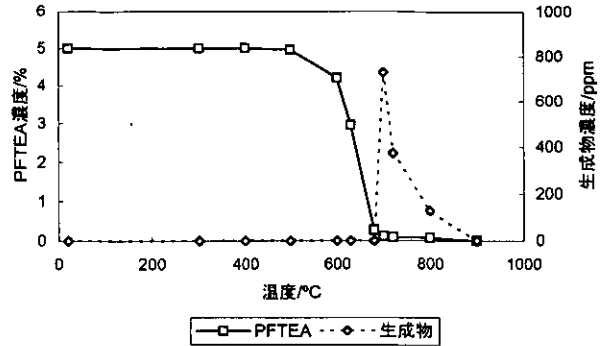


図5 パーフロロトリエチルアミン (PFTEA) の熱分解挙動

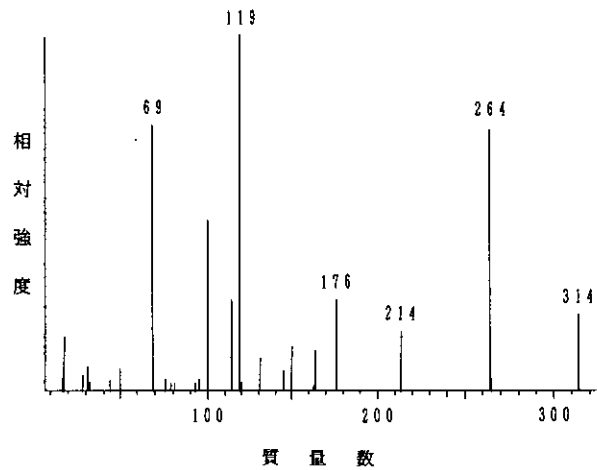


図6 パーフロロトリエチルアミン (PFTEA) の熱分解生成物のマススペクトル

フッ素陰イオンの測定結果では元の物質に含まれているフッ素原子の一部しか排ガス中には含まれていないことから、分解で生成したフッ素系物質は石英管の中に取り込まれているか、フッ素系の高分子物質となっている可能性が高い。熱分解で使用した石英管の出口付近で白色の固体がかなりの量で得られており、有機溶媒にはまったく溶けないことから、無機物あるいは高分子物質と考えられる。今後、さらに解析を進めて行く予定である。

### (3) 衛星利用レーザー長光路吸収計測技術の開発に関する研究

衛星利用レーザー長光路吸収法は、オゾンや関連大気微量分子の高度分布または気柱全量を昼夜を問わず高い精度で測定できる点に特徴がある。本研究では、この計

測技術を確立することを目標とした。衛星利用レーザー長光路吸収計測技術は、大気微量分子を分光計測するための技術と人工衛星を光学的に追尾するための技術から構成される。このうち、後者は郵政省通信総合研究所が担当し、本研究では分光計測手法を中心とする研究を行った。

本研究では、まず、衛星利用レーザー長光路吸収計測技術の基礎技術である、レーザー分光計測手法、レーザー技術、データ解析手法などの開発を行い、これらを用いた分光計測システムの開発を行った。さらに、分光計測システムと衛星追尾システムを合わせて、実際の計測システムを構築するための技術について研究を行い、衛星利用レーザー長光路吸収計測システムを開発した。追尾システムは通信総合研究所の宇宙光通信センターの望遠鏡口径1.5mのものを用いた。

開発した衛星利用レーザー長光路吸収計測システムは、狭帯域のパルス炭酸ガスレーザー（波長 $10\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 、 $3\mu\text{m}$ ）を光源とし、衛星光学追尾システムを用いてこのレーザー光を衛星に搭載したリフレクターに送信する。リフレクターで反射されたパルスを受信し、往復の光路の大気中の微量分子の吸収スペクトルを測定する。吸収スペクトル測定では衛星の運動に伴うドップラーシフトによる反射光の波長変化を利用する。衛星を高精度で追尾するために、追尾用のレーザー光（波長 $532\text{nm}$ ）を衛星に同時に送信し、反射光のイメージをとらえて能動的に追尾する。

計測システムでは、まず、レーザー光の送受信を適当なビーム拡がり角または視野角で行うための追尾システムと分光システムの光学的なインターフェイスが重要である。分光観測用の赤外レーザー光と能動追尾用の可視のレーザー光は追尾望遠鏡から同時に送信されるが、追尾用のレーザーは分光用レーザーよりも広いビーム拡がり角で送信する必要がある。そこで、分光用の炭酸ガスレーザーの赤外光は追尾システムのクーデ式光学系を平行ビームとして通し、追尾用の可視レーザーはクーデ光学系の中でビームを拡げながら通す方法を採用し、光学系を設計製作した。

一方、分光観測では反射パルスがリフレクターから戻るタイミングで信号検出用の時間ゲートを開けてパルス信号を記録することが必要である。そこで、このためのタイミングシステムを新たに開発した。このシステムでは衛星の軌道要素に基づいて、衛星までの距離を計算し、

時間遅れの信号を発生する。また、追尾用レーザーの反射パルスを用いて時間遅れを実測し、軌道要素の誤差による時間遅れの誤差を自動的に補正する。さらに、このシステムでは、光行差による衛星位置のずれを補正して能動追尾を行うためのカーソルの位置を計算して追尾用のモニターに表示する機能も付加した。

これらの技術により分光計測システムと衛星追尾システムを総合し、衛星利用レーザー長光路吸収計測システム技術を確立した。

#### (4) 紫外線の増加による皮膚がん発症のリスクの評価

紫外線の増加による皮膚がん発症のリスクを評価するために、マーカー遺伝子を導入した細胞に種々の波長の紫外線を照射し、紫外線により引き起こされる遺伝子変異のアクションスペクトルの決定を進めている。

forward 選択マーカーとして neo (G418耐性) 遺伝子、backward 選択マーカーとしてヘルペスウイルス・チミジンキナーゼ (HSV-TK) 遺伝子の両方を組み込んだレトロウイルス・ベクター (LTK-15) を用い、薬剤耐性を指標として、微小突然変異及び遺伝子欠失を検出した。すなわち、細胞にこのレトロウイルスを感染させ、G418により選択した後、紫外線照射し、アシクロビル (ACV ; 抗ヘルペス剤) 耐性コロニー及び ACV.G418の二重耐性コロニーを計数することにより、それぞれ微小変異と遺伝子欠失を検出した。本年度は、染色体構成が比較的安定なラット線維芽細胞 CREF 株を用いて実験を行った。

第一に、殺菌灯によって HSV-TK 遺伝子中に引き起こされた変異の解析を行った。LTK15/CREF 細胞を殺菌灯（主として $254\text{nm}$ ）で照射すると dose-dependent に、ACV-耐性 G418-耐性コロニーの出現頻度が上昇した。 $0.8\text{mJ}/\text{cm}^2$  の UV-C を照射した細胞より生じたコロニーを 8 クローン単離し、ゲノム DNA より PCR-SSCP 法及び direct sequencing 法を用いて、HSV-TK 遺伝子 coding region 内の変異の種類を解析した。その結果を表 1 に要約する。

8 例中 6 例に SSCP レベルでの変異が見つかり、その内 2 例は dipyrimidine 部分における C→T transition であり、古典的なチミンダイマー・モデルで説明できるものであった。また、CT→TC tandem double mutation というまれな変異が 1 例見いだされた。UV による変異の特徴的な例として CC→TT 変異が知られているが、これと同

表1 殺菌灯照射によって誘発されたHSV-TK 遺伝子の変異

変異の種類	部位	塩基配列	クローン数
Transition	490	gatggGgaaaa → A	1
	836	cgcgcGgtacc → A	1
Tandem double transition	587-	gggggCTtcga → TC	1
Small deletion	7 bases	cccAACGGCGAcc → cccAcc	1
	28 bases	1237- gccTG(N <sub>24</sub> )CCTcc → gccTcc	2 <sup>+</sup>

\* Sense-strand の塩基配列, 大文字は変異を起こした塩基

+ 同じシャーレより単離

様のメカニズムで生ずるのかどうか興味を持たれる。他の3例は、比較的小さなDNA欠失であった。なお、このうちの2例は同一の変異であったが、独立なクローンである保証はない。

一方、モノクロメーター (Biotronic 照射装置) による、300nm 及び 320nm の紫外線は、殺菌灯と同程度の細胞障害及び変異頻度を得るためには、それぞれ一桁から二桁高いエネルギー量の照射を要し、また、これら比較的長波長のUVは、低エネルギー領域で生存コロニー数の増加を促すという結果が既に得られている。本年度は、これらの結果の再現性を調べ、また塩基配列レベルでの変異の違いを調べる目的で実験を行った。

300nm での実験は、これまでと同様の結果を与えた。すなわち、ID<sub>50</sub>は10mj/cm<sup>2</sup>付近であり、20mj/cm<sup>2</sup>において1.6×10<sup>-4</sup>程度のACV-耐性コロニーが得られた(図7)。また、2mj/cm<sup>2</sup>において生存コロニー数のわずかな増加が見られた。

320nm においては、これまで用いた最高照射量が300mj/cm<sup>2</sup>で、この時の生存率が65%と不十分であった。本年度、600mj/cm<sup>2</sup>まで線量を上げた結果、生存率7%、変異頻度2.1×10<sup>-4</sup>とさらに高い値が得られた(図8)。しかし、この線量で照射時間が約1時間かかり、現行の照射条件下ではこれが限界である。

このように、300nm 及び 320nm のUVは本実験系において、再現性良くdose-dependentな変異誘発活性を示した。現在、これらの実験において得られたACV-耐性クローン中のHSV-TK 遺伝子における変異の性状を比較検討すべく、DNAを調製中である。

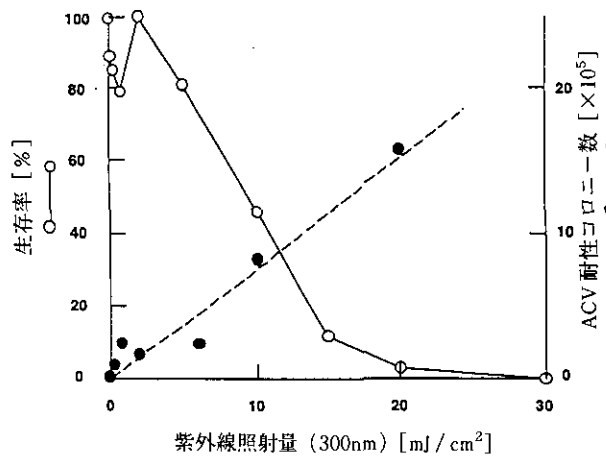


図7 紫外線 (300nm) 照射量と ACV 耐性コロニー出現頻度の量-作用関係

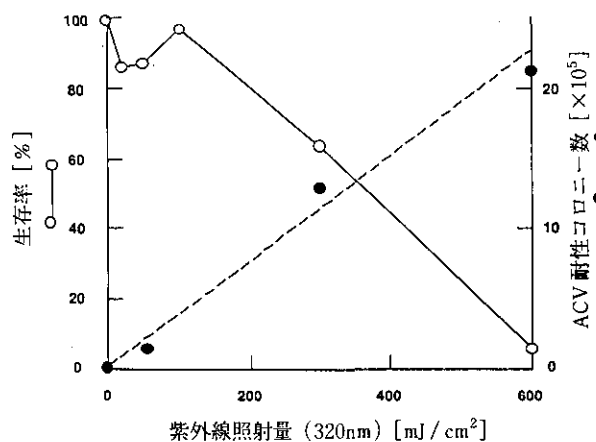


図8 紫外線 (320nm) 照射量と ACV 耐性コロニー出現頻度の量-作用関係

### (5) 紫外線の増加が植物等に及ぼす影響に関する研究

(UV-B 照射により生成する植物の遺伝子損傷の検出)

紫外線増加により植物の生長が阻害され、農作物の減収や生態系の攪乱などの影響を受けるのではないかと懸念されている。私たちは、UV-B 照射によりキュウリの第一葉の生長が阻害されることを観察してきた。さらに、生長阻害の作用スペクトルを検討し、290nm 以下の波長の紫外線が顕著な生長阻害効果を有することを明らかにした。

紫外線は生物の遺伝子に損傷を与えることが知られており、その結果、様々な悪影響をもたらすと考えられる。そこで、紫外線による遺伝子損傷が生長阻害の原因になっているかどうかを明らかにするための検討を始めた。紫外線により生物体内に生じる遺伝子損傷産物とし



てシクロブタン型ピリミジン二量体 (CPDM), (6-4) 光産物, Dewar 型異性体などが知られている。UV-Bによるキュウリの遺伝子損傷を調べるために, CPDM に対する単クローン性抗体 (TDM-2) を用いた酵素標識免疫法 (ELISA) について検討し, UV-Bによるキュウリ第一葉の成長阻害と遺伝子損傷産物の蓄積量との関係について調べた。市販の  $\lambda$  DNA に殺菌灯で UV-C を照射したものを標準試料として CPDM を測定し, キュウリ第一葉から抽出した DNA の CPDM 測定値を UV-C 相当量に換算して表した。

基礎生物学研究所の大型スペクトログラフを用いて 290, 300 あるいは 310nm の単色光を照射したキュウリ第一葉中に生成・蓄積した CPDM 量を表 2 に示す。290 および 300nm では CPDM の蓄積が見られたが, 310nm ではほとんど CPDM の蓄積は認められなかった。特に, 290nm 照射により極めて多量の CPDM が蓄積した。すでに観察しているように, キュウリ第一葉の成長は 290nm で顕著に阻害され, 310nm ではほとんど成長阻害が見られなかった。また, 300nm では影響は小さいながらも生長阻害が見られた。したがって, UV-B 領域の紫外線に

よる成長阻害と遺伝子損傷産物の蓄積量との間に極めて高い相関が認められた。しかし, 成長阻害が, 遺伝子損傷によってもたらされたかどうかはさらに詳細な検討が必要である。

次に, UV-B 照射時間と CPDM の蓄積量との関係を調べた。キュウリ芽生えを人工光室で栽培しながら, フィルターにより 290nm 以下の波長をカットした健康線用蛍光灯ランプを用いて, 明期 (12時間) に UV-B (ca. 0.1W/m<sup>2</sup>) を照射した。照射時間は 1.5時間, 4 時間あるいは 12時間とし, 照射後直ちに第一葉を凍結し, 凍結乾燥後 DNA を抽出して CPDM を測定した。表 3 に示すように, 1.5 あるいは 4 時間の UV-B 照射により葉内に CPDM の蓄積が見られた。しかし, 12時間照射では UV-B を照射しない対照と同じレベルにとどまった。また, 4 時間 UV-B 照射した後白色光下に置いたものも対照と同じレベルまで低下していた。この結果は, 生成した CPDM は速やかに修復されること, UV-B 照射により修復活性が促進されることを示唆しているように思われる。遺伝子損傷産物の蓄積について議論するためには, 修復活性についても検討しなければならないことを示している。

表 2 単色光紫外線によるキュウリ第一葉の遺伝子損傷

波長 (nm)	光量 ( $\mu\text{mol}/\text{m} \cdot \text{sec}$ )	ピリミジン二重体 <sup>2)</sup> (UV-C 相当, J/m)
290	7.8	36
	1.0	2.4
300	10.6	5.2
	1.3	0.4
310	14.6	0.0
	1.6	0.2
対象 <sup>1)</sup>		0.2

1 日当たり 4 時間の単色光を 3 日間照射し, 4 日目に試料を採取して, シクロブタン型ピリミジン二量体を測定した。

<sup>1)</sup> 単色光照射中, 植物試料は暗所に保存された。

<sup>2)</sup> それぞれの試料は 3 回測定された。その平均値を示す。

表 3 UV-B の照射時間と遺伝子損傷産物の蓄積量との関係

照射時間 (h)	ピリミジン二量体 (UV-C 相当, J/m <sup>2</sup> )
1.5	3.9
4	4.6
4→4 (white light) <sup>1)</sup>	1.3
12	1.0
対照 (white light) <sup>2)</sup>	1.0

<sup>1)</sup> 4 時間の UV-B 照射後, 4 時間白色光下に置いた。

<sup>2)</sup> UV-B 照射をせずに白色光下で栽培した。

## 2.2 地球の温暖化現象解明に関する研究

### 〔研究組織〕

地球環境研究グループ

統括研究官

安野正之

上席研究官

古川昭雄

温暖化現象解明研究チーム

○井上 元・野尻幸宏・向井人史・竹中明夫・町田敏暢

社会システム部

情報解析研究室

田村正行・安岡善文・山形与志樹

化学環境部

計測技術研究室

横内陽子

動態化学研究室

田中 敦

大気圏環境部

部 長

鷺田伸明

大気物理研究室

鶴野伊津志・光本茂記・高藪 緑・花崎秀史・沼口 敦・

菅田誠治

大気反応研究室

今村隆史・酒巻史郎・猪俣 敏・奥貫幸夫・古林 仁

大気動態研究室

内山政弘・遠嶋康徳

生物圏環境部

環境微生物研究室

広木幹也・渡邊 信

客員研究員 28名, 共同研究員 10名

### 〔研究概要〕

地球温暖化は人間活動の大規模化に伴う対流圏大気中の二酸化炭素, メタン, 亜酸化窒素, フロン類およびオゾンの増加によって引き起こされる。化石燃料の燃焼や森林伐採に伴うバイオマスの消費に起因する大気環境中の二酸化炭素の増加, 反芻動物である家畜の増加, 化石燃料の採掘, 有機物の処理などに伴うメタン放出量の増加, あるいは, メタンの大気中での消滅速度の低下に起因する大気中メタンの増加, 窒素肥料使用量の増加に伴う亜酸化窒素放出量の増加, フロンや代替フロンの放出, 窒素酸化物の放出量の増大に起因する対流圏オゾン濃度の増加などが, 人為活動による直接的原因として指摘されている。さらには, 気候変動に伴う大気海洋間の二酸化炭素交換の変化, 陸域植生の変動による二酸化炭素の収支の変化, 湿原の拡大や気温上昇によるメタン放出量の増加など, 温暖化と降雨の変化による二次的影響, フィードバック効果も, 温室効果ガスの自然環境による吸収・放出量に大きな影響を及ぼすと考えられている。温室効果気体の変動にかかわる研究が温暖化現象解明の

研究の一つの柱である。

それには, 生物地球化学的過程として, ①生物圏・大気圏・海洋圏の大気微量成分のフラックス, ②大気微量成分の大気圏内過程, ③表層・深層水の生物地球化学, ④陸域生態への施肥効果と炭素循環, ⑤陸域から海洋生態系への物質移流などの分野における研究が必要である。国立環境研究所で行っている温暖化現象解明の研究のうち, (1)「シベリア凍土地帯における温室効果のフィードバックの評価に関する研究」は, ①のプロセスを, 地球上で最も研究が遅れており, しかも, 面積的に大きいフィールドであるシベリアを対象として研究するものである。(2)「メタン・亜酸化窒素の放出源およびその放出量の解明に関する研究」においては, ①③に関連して湖沼から大気中へのメタン放出メカニズムの解明を行っている。(3)「地球温暖化にかかわる対流圏大気化学の研究」では, ②の化学反応にかかわる研究を行っている。(4)「地球温暖化にかかわる二酸化炭素・炭素循環に関する研究」においては, ①に関連して土壌中の微生物プロセスおよび③に関連して炭素の深層水への輸

送プロセスを研究している。

温暖化のフィードバック効果を見積もるには、生態系とその運動を理解するために、①構造と機能の長期的な観測、②気候とその他のストレスに対する応答、③物理的・生物学的プロセスの相互作用、④相互作用・フィードバック・応答のモデル、⑤生産と資源のモデルなどの研究が必要である。(1)「シベリア凍土地帯における温室効果のフィードバックの評価に関する研究」では、②に注目して樹木の成長と寒冷ストレスに対する応答の研究を①の視点から開始しているが、③④についてはまだ研究の緒についた段階である。

温暖化現象解明の研究のもう一つの柱は、上記のような温室効果気体の急激な増加に伴い、どのような気候変動が引き起こされるかを、大気・海洋・生物の各圏の相互作用を含むグローバルな気象モデルによって予測することである。これも長期的・総合的に進めるべき課題であり、そのためには、気候と水文学の研究として、①エネルギー収支における雲の役割、②海洋循環と熱フラックス、③陸、大気、海洋の水とエネルギーのフラックス、④気候結合システムと定量的リンク、⑤海洋圏、大気圏、水圏の相互作用などの分野における研究が必要である。

国立環境研究所で行っている温暖化現象解明の研究のうち(5)「気候モデルによる気候変動評価に関する研究」は、まず、大気圏におけるエネルギーと運動量の輸送を含んだモデルを開発し、海洋循環と結合したモデルに発展させ、さらには、生物圏や水圏を含む水とエネルギーの循環モデルを含んだ信頼性の高い気候予想モデルの構築を計画している。この目的で、いわゆる大気循環モデルの開発を進めるとともに、熱帯域で①の研究、接地境界層での③や⑤のプロセスをモデルに組み込むための基礎的研究などを行っている。

上記のような総合的な研究の推進という視点を持ちつつ、国際的・省際的な研究協力や分担を考慮して、国立環境研としてこの分野に最も寄与できる課題を重点として、以下の研究を行っている。

#### (1) シベリア凍土地帯における温室効果のフィードバックの評価に関する研究

①シベリアの自然湿地からのメタン発生の総量推定を行うため、シベリア大低地において地上観測および航空機観測を行った。その結果、自然湿地は夏期には120mg

CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/dayという化学肥料中心の水田にも匹敵する大きなメタン発生源であることが分かった。また、東シベリアの中心地であるヤクーツクを中心とした凍土地帯という特殊な地理学的条件で湖沼・湿原などからのメタン発生量の測定や、通年の環境大気中のメタン濃度の変動観測を行い、バイオマス起源のメタンが発生していることが明らかになった。②チクシの南西およびノリリスク北東のタイガ・ツンドラ移行帯において植生調査を行い、厳寒の環境が森林形成に及ぼす影響を調査した。③可視・近赤外の詳細な衛星画像データにより、湿原や植生の分類を行い、メタンなどの発生吸収との関連を明らかにするための検討を行った。さらに、マイクロ波の画像データを複合的に利用し、水位や凍結等の情報を抽出する手法を開発している。④航空機により温室効果ガスのフラックスを測定する目的で、二酸化炭素の垂直分布を高精度で連続測定する装置を開発し、航空機によりその実証試験を行い良好な結果を得た。

#### (2) メタン、亜酸化窒素の放出源および放出量の解明に関する研究

水中のメタンおよび亜酸化窒素を定量する自動分析装置を開発し、国内の湖沼、内湾で水中のメタン、亜酸化窒素濃度の測定を行った。富栄養湖沼である霞ヶ浦の継続的な観測から定量的解析を行った。霞ヶ浦のメタン濃度には明確な季節変化があり、12～3月と9月の高濃度期、4～7月の低濃度期、11月の濃度極小期がみられた。濃度変化を引き起こす原因は、底泥のメタン生成量変化、水中のメタン酸化速度変化、水面でのガス交換速度変化の複合であった。霞ヶ浦のメタン生成量年間平均値は6.1mg CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/dayで、うち3.1mg CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/dayが大気への拡散フラックス、3.0mg CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/dayが水中の微生物による酸化分解量であった。亜酸化窒素の濃度変化は、水温の変化に対応して冬に高く夏に低かったが、大気に対する過飽和濃度には季節性がみられなかった。貧栄養湖から富栄養湖にいたる多数の国内湖沼の水中メタン濃度実測値から、国内全天然湖沼のメタン放出量として1.6Gg CH<sub>4</sub>/yを得た。富栄養化している内湾として、東京湾の水中メタン濃度の観測を行い、平均の拡散フラックスとして4.1mg CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/dayを得た。

#### (3) 地球温暖化に係わる対流圏大気化学の研究

対流圏大気化学の面からの地球温暖化研究として、大

気中のラジカルの反応速度、大気中の微量成分の光解離過程、対流圏オゾンの生成・消滅過程等の研究を行った。イオン化質量分析計とレーザー光分解法の組合せで置換メチルラジカル ( $\text{CH}_2\text{X}$ ) と酸素分子の反応速度、メタンの酸化反応にかかわるラジカル反応の同位体効果についての研究を行い、 $\text{CH}_3+\text{O}$ 、 $\text{CD}_3+\text{O}$  の反応では  $\text{CH}_3$  の方が反応が10%程度速いことが明らかになった。シベリア上空でのオゾン観測データ解析から移流のモデル計算による成層圏オゾン降下の見積り法が検討された。海洋起源ハロゲン化合物が対流圏オゾン濃度に与える影響を評価する目的で、西太平洋および東アジア近海域における大気中のハロカーボンおよびガス状の無機臭素と塩素の測定を行い、これまでに報告例のないヨウ化エチルを含む海洋生物起源ハロカーボン類の緯度変動パターンおよび海洋上における光化学的な臭素原子生成を裏付ける無機臭素濃度の日変化データを得た。

#### (4) 地球温暖化に係わる二酸化炭素、炭素循環に関する研究

温帯域における土壌圏微生物群集をめぐる炭素循環の定量的解析として、福島県南会津郡南郷村、伝上山中腹において、土壌表面からの  $\text{CO}_2$  発生速度を測定した。さらに土壌を層位に分けて採取、室内で培養し、 $\text{CO}_2$  生成速度、土壌中の炭素含量、窒素含量および微生物バイオマスとの関係を解析した。その結果から、 $\text{CO}_2$  発生速度は土壌中の微生物バイオマス量に比例すること、土壌中の微生物バイオマスは窒素量が制限となっていること、調査地では土壌中の微生物による  $\text{CO}_2$  の生成は(リター層を除くと)大部分が表層10cm以内において行われていることが推察された。

同位体比による二酸化炭素の大気・海洋・生物圏間の交換に関する研究として、同位体比質量分析計による自動分析のための分析化学的研究を行い、分析精度を確認した。海洋と大気中の二酸化炭素の交換を解析するために、太平洋上の航路の大気試料の二酸化炭素を分離、抽出する処理ラインを製作し、炭素安定同位体比測定のための定期的な試料採取を開始した。また、土壌と大気中の二酸化炭素交換と、それに伴う二酸化炭素炭素安定同位体比の変動の測定を国内の森林で行った。

#### (5) 気候モデルによる気候変動評価に関する研究

二酸化炭素その他の温室効果ガスの増加に伴い、地表

面近くの大気温度の上昇、降水分布、乾燥度の変化等の気候変動がもたらされることが予測されている。その気候変動が人類の生活、産業にとって好ましくない影響を及ぼすことが懸念され、二酸化炭素の排出量を制限するなどの対応が議論されている。しかし、その基礎となるべき気候変動予測には多くの不確実性が残されている。したがって、信頼できる予測を与えるような優れた気候モデルの開発を行うことが緊急に必要な課題である。

現在の気候モデルにおいて気候予測の不確実性をもたらしめている大きな要因としては、海洋循環過程、種々の陸地面過程、および雲に関連した諸過程等の取り扱いの不十分さがあげられる。そこで、精密な気候モデルの開発と気候システムの諸過程の解明を目的として1991年度より本研究課題を継続している。本研究課題では、以下のサブテーマ

- 1) 気候モデルの開発、改良に関する研究
- 2) 気候変動に係わるフィードバックプロセスの詳細なモデル化に関する研究
- 3) 気候モデルを用いた気候システムの変動特性の定量的評価

を設定し、研究を行った。第1と3の課題では、現実的な気候値を定量的に再現することを目標として、大気大循環モデルの放射、雲、陸面等の各物理過程において、物理的考察に基づいたパラメタリゼーションの改良を行った。さらに、この気候モデルを用いた気候変動の定量的評価に関する研究を開始した。まず、現在と過去の気候の再現性を確認するために、過去の観測された海面水温を与えて、大気モデルを10年間積分し、その結果を観測資料と比較し、良好な結果を得た。

一方、第2の課題では、大気-陸地表面-地中1次元モデルの基礎的な数値実験の研究成果に基づいて開発した大気-陸面プロセスモデルを、3次元の大気大循環モデルに組み込んで、地球規模の大気循環に及ぼす陸面過程の効果を調べた。さらに、TOGA-COARE(熱帯海洋と全球大気プログラム/海洋-大気結合応答実験)観測のデータを用いた総合的な解析を行った。その結果、熱帯海洋上の積雲対流雲とアンビル雲とが準2日周期雲システムのような気候モデルの分解能に匹敵する大規模スケールの大気-雲システムによって組織化されていることが明らかになった。

## 【研究成果】

### (1) シベリア凍土地帯における温室効果のフィードバックの評価に関する研究

本研究においては、我が国から総勢30名余り（国立環境研究所からは9名）、ロシア側からは50名近くの参加者により、1994年7月中旬から8月末にかけて、シベリアにおける現地調査研究を行った。

シベリアの自然湿地からのメタン発生の総量推定を行うため、1994年はシベリア大低地の中央部であるハンチマンシスク、スルゲート、南部のプロトニコボにおいて、地上観測および航空機観測を行った。その結果、自然湿地は多様性の大きいメタンの発生源であり、その総量を測定するには夜間に接地逆転層に蓄積するメタン量を測定する方法が有効であることが実証された。また、季節変化、環境要素とのかかわりを明らかにするためにはチャンパー法が実質的であり、その方法で測定したメタン放出量は環境要因と複雑な関係があることも明らかになった。木道に沿って2カ所と湿原の奥の数カ所にステンレス製のベースを埋め込み、そのうえにプラスチックの箱をかぶせて、その中のメタンの濃度の増加を測定した。日射により箱の中の温度が上昇するのを防ぐため黒い布をかぶせて測定した。15分間に4サンプルをバイアルビンに採取し、分析室でFID-GCにより分析した。二酸化炭素のフラックスが $110\text{mg C/m}^2/\text{h}$ を中心とした $60\text{mg C/m}^2/\text{h}$ の幅を持つガウス分布をしているのに対し、メタンのフラックスは平均 $4\text{mg C/m}^2/\text{h}$ で分散 $5\text{mg C/m}^2/\text{h}$ の対数正規分布となった。また、冬季（3月）にも夏期の1%程度のメタン発生がみられたが、その成因は明らかでない。

東シベリアの中心地であるヤクーツクを中心とした凍土地帯という特殊な地理学的条件で湖沼・湿原などからのメタン発生量の測定や、通年の環境大気中のメタン濃度の変動観測を行い、バイオマス起源のメタンが発生しているが、その地球規模での寄与はそれほど大きくないことが明らかになった。また、ツンドラ地帯でのメタン発生量の測定と気象・雪氷環境の測定から、ツンドラ地帯全体からのメタン発生量を推定する研究を行っている。

東部シベリアの永久凍土地域の針葉樹林帯に存在する数多くの湖沼群からなる湿地からのメタン発生量を調査した。レナ川左岸と右岸のそれぞれの湖沼群を、1993年と1994年の夏に調査して、湖水表面とその周辺湿地から

のメタン放出量を測定した。水面からの放出量は1993年と1994年のそれぞれで、 $260, 227\text{mg CH}_4/\text{m}^2/\text{day}$ であった。湖沼周辺の湿地帯の放出量は乾燥草地で25、湿潤地で $369\text{mg CH}_4/\text{m}^2/\text{day}$ であった。これらの結果を、湖沼の水面から周辺草地までを適当な形態としたモデルに当てはめると、直径100m程度の小さな湖沼では $161\text{mg CH}_4/\text{m}^2/\text{day}$ 、500m程度の大きな湖沼では $138\text{mg CH}_4/\text{m}^2/\text{day}$ と推定された。この結果は、寒帯湿原のメタン放出量の従来の報告値と同程度であった。これらの湖沼の底泥から放出されるガス組成とメタン、二酸化炭素の炭素安定同位体比をGC/C/MS法により測定した。メタン濃度は65~80%であり、残りの大部分が窒素であり、少量の二酸化炭素を含んでいた。気泡のメタン炭素安定同位体比は平均-61パーミルであり、おもに二酸化炭素の還元による成因が推定できた。一方、二酸化炭素の炭素安定同位体比は、気泡のメタン濃度と強い相関を示し、メタン濃度が高いほど同位体比が高くなる結果となった。メタンの炭素安定同位体比と合わせて、これら小湖沼底泥でのメタン生成が、二酸化炭素の水素による還元を主たる経路として起こり、その過程での二酸化炭素の供給が発生量を制約していることが推定された。

温室効果ガスの動態と土壌・植生の状態との関連性を調べるために、西シベリア湿原において、高分解能衛星センサー（SPOT/HRV）と広域衛星センサー（NOAA/AVHRR）による地表面の観測を行った。プロトニコボテストサイトで得られたSPOT/HRV画像から土地被覆分類を行い、その結果と地上で測定したメタンフラックスのデータを用いて、衛星画像エリア内のメタン発生量を推定した。西シベリアをカバーするNOAA/AVHRRデータから、ハンチマンシスク周辺の植生指数の季節変化を求め、植生指数の変化パターンから土地被覆の推定が可能であることを示した。

シベリアにおける二酸化炭素の収支に関する研究として以下の二つの研究を実施している。

ユーラシア大陸の北極圏では、北緯70度前後まで森林が成立しているが、そのさらに北方には高木がまったく見られないツンドラが広がっている。ロシアの東部、シベリア地方では、もっぱらカラマツ属（*Larix*）の植物が北限の林を作っている。なぜ、環境が厳しさを増すとともに高木が姿を消すのかは必ずしも明らかになってはいないが、ぎりぎりの環境条件のなかで生きている北極圏のカラマツは、地球温暖化現象の影響を受けずにはい

られないと考えられる。気候の変化が森林の分布と動態に与える影響を予想するには、まず、北極圏の厳しい環境のなかでこれまで森林がどのように維持されてきたかを知る必要がある。そこで、1994年度は2カ所の北限の森林で野外調査を行った。本研究課題では、北緯70度以北の2地点において、北限の森林を構成するカラマツ個体の年輪サンプルを採取し、樹齢構成と空間分布パターン、および樹高成長パターンの解析を行った。その結果、以下の点が明らかになった。①個体の齢の分布は均一ではなく、数年から数十年の幅の期間に集中する。これは、新しいカラマツ個体の定着に適した時期とそうでない時期があったことを示唆する。②個体の齢の分布は、近接した調査区間でも異なったパターンを示す。③数個体のカラマツが近接して数mスケールのパッチ状になって生育している例が多く、新個体の定着に必要なミクロな条件の、空間的に不均一な分布を示唆する。④各地域ごとにカラマツが到達可能な最大樹高があり、樹齢を重ねても、これを越えることはできない。

二酸化炭素のフラックスを測定する目的で二酸化炭素の測定システムの開発を行った。1994年は、二酸化炭素濃度の高度分布を高精度でリアルタイム測定するために、航空機内の圧力の変動に耐える二酸化炭素測定機器の開発と、航空機ドルニエへに搭載するための実装、これの総合的性能を明らかにするための実証実験を行った。一般に二酸化炭素の測定法としては非分散赤外分光器かガスクロが用いられるが、航空機の高速度に対応した高速の応答を得るために非分散赤外分光器を使用することとした。この装置は二酸化炭素に対しては赤外吸収が一部非線形の領域を使用しており、また、吸収線の形が圧力により変動するので吸光係数が変わり、圧力に対する補正式はきわめて複雑な計算によるか、あるいは、様々な条件下で広い濃度範囲で実験的に補正係数を定めるといった膨大な校正実験を必要とする。このため、非分散赤外分光器内の圧力を一定に保つ機構を付加して、外気圧に依存しないように改造を加えた。科学技術庁宇宙航空技術研究所との共同研究として、これらの開発、改造の実証試験を行った。1994年11月に調布-名古屋-高知-宮崎-奄美-那覇-石垣の飛行を行い、西表および国立環境研究所のモニタリングステーションのある波照間上空の観測飛行を行った。

## (2) メタン・亜酸化窒素の放出源および放出量の解明に関する研究

本課題では、国立環境研究所は、閉鎖性水域からの放出量の解明に関する研究の課題を担当し、平成2～6年度の研究を行い、終了した。

二酸化炭素に次ぐ主要な温室効果気体であるメタンの放出源として、自然の水域の寄与は全地球の放出量の2割を占める重要なものである。水域(沼地、湿地、氾濫原、ツンドラ、湖沼など)のタイプによって、面積当たりの放出量、その季節変化、放出の形態がまちまちであり、グローバルな総メタン放出量の推定における不確かさが大きい。放出量と水域の生物生産量を結びつけるいくつかのモデルも提唱されているが、必ずしも十分な実測値に基づくものでない。また、同じく温室効果気体として重要な亜酸化窒素では、水域での挙動の解析研究が、メタンと比較してはるかに遅れた状況にあり、水域の違いによるその生成、消失量の違いを明らかにした研究例がいまだない。この研究では、メタン、亜酸化窒素の水中濃度の、国内水域での実測を行い、得られた水中濃度実測値に基づく放出量の解明を行うこととした。

水中のメタンおよび亜酸化窒素を定量する測定法を確立する目的で、自動分析装置の開発を行った。

富栄養湖沼である霞ヶ浦では、メタンと亜酸化窒素の濃度を継続的に観測し、定量的解析を行った。

1990～1995年度にかけて継続した霞ヶ浦のメタン濃度の測定によると(図1)、12～3月と9月が高濃度期、4～7月と11月が低濃度期であり、特に11月に必ず最低濃度がみられた。全域平均濃度で、高濃度期は200nM程度、低濃度期は100nM程度、11月の極小期は50nM程度であった。大気メタンの平衡溶解度は水温に依存するが2～5nMであるので、霞ヶ浦水面からは、常時正のフラックスが存在する。図1の折れ線がメタンの拡散フラックスで、溶存メタン濃度、風速、水温から算出した。拡散フラックスの最大期は、濃度が比較的高く水温の高い夏から初秋にかけてである。最小期は濃度が著しく低くなる11月であるが、高濃度期の冬季は拡散フラックスが小さい。春は低濃度期であることからやはり拡散フラックスが小さい。

湖水のインキュベート実験から水中でのメタン酸化分解速度を継続観測した。インキュベートの過程で、湖水中のメタン濃度は指数関数的に減少し、濃度の対数と経過時間に直線関係がみられた。すなわち、湖水中のメタ

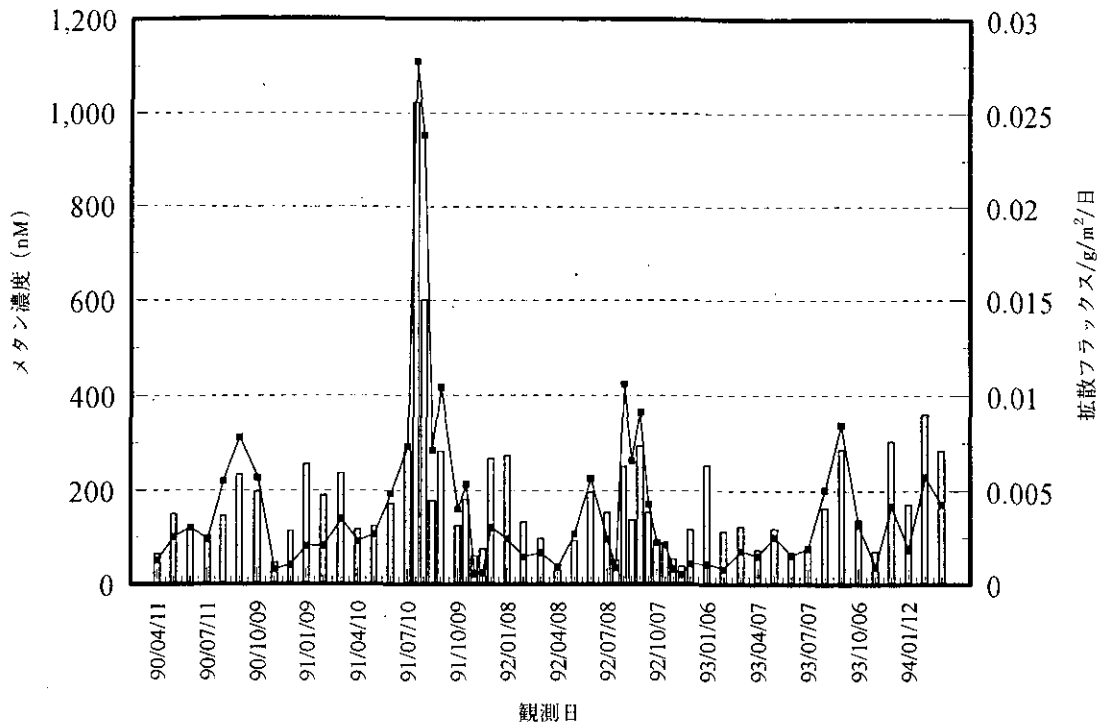


図1 霞ヶ浦の湖水中メタン濃度と湖面からのメタン拡散フラックスの変化

水中メタン濃度
  拡散フラックス

ン分解反応速度がメタン濃度に比例する一次反応であることが明らかになった。反応速度が大きい時期は夏から秋にかけてであり、反応速度最大期の場合、半減時間6時間で水中のメタンは消失するが、冬から春には著しく小さい酸化速度となる。

水中のメタン酸化反応速度と溶存濃度から、湖水中のメタン酸化分解量を計算した。1991年度は夏の著しい高濃度によって、拡散、酸化分解とも他の年度を大きく上回った。1992年度と1993年度を平常年としてその平均を求めると、拡散フラックス $3.1\text{mg CH}_4/\text{m}^2/\text{day}$ 、酸化分解量 $3.0\text{mg CH}_4/\text{m}^2/\text{day}$ 、両者の和としての生成量 $6.1\text{mg CH}_4/\text{m}^2/\text{day}$ が得られた。生成量に対する酸化分解量の比率は49%であった。

このように、霞ヶ浦の底泥で生成されたメタンのうち、およそ半分は湖水中で酸化分解され、残りが大気に拡散フラックスとして放出される。観測結果から、湖水濃度の季節変化が次のように解釈される。底泥におけるメタン生成は夏季が冬季より一桁大きい。しかしながら、大気への拡散、水中での酸化とも大きく、夏季の湖水中濃度上昇は大きくない。秋には酸化活性が高いまま生成量が低下するので11月の濃度極小は毎年必ず出現する。底

泥での生成量が低下するにもかかわらず、1月以降は酸化速度の著しい低下と拡散フラックスの低下で、夏季と同程度の湖水中濃度となる。春季は、水温の上昇で拡散フラックスが増大するにもかかわらず、底泥のメタン生成が冬季と同程度であることから、水中濃度は低下する。これらの結果から、浅い富栄養湖沼では、湖水のメタン濃度が必ずしもその時期の生物生産量とあるいはメタンの生成量と比例関係にはならないことが分かった。平均的湖水濃度、拡散フラックス、生成量を求めるためにも、通年の観測の重要性が明らかになった。

亜酸化窒素の濃度変化は、水温の変化に対応して冬に高く夏に低かった。亜酸化窒素は水中において分解されないため、過飽和濃度は亜酸化窒素生産の指標といえる。湖心における溶存亜酸化窒素濃度は低く、最大値 $19.1\text{nM}$ 、最小値 $5.4\text{nM}$ であった。霞ヶ浦湖心においては、溶存亜酸化窒素濃度が大気平衡濃度を上回る程度は小さく、その過飽和度に明確な季節性が見られなかった。また調査を行った34カ月間の内、8カ月はわずかに未飽和の値となった。霞ヶ浦における亜酸化窒素濃度は非常に低く、この全窒素濃度と比較した場合、その割合は0.01%程度にすぎない。亜酸化窒素の過飽和濃度の変化

は、各状態での窒素濃度の変化と対応しなかった。また、亜酸化窒素の生産量および放出量は、脱窒素量の指標に用いられるが、水域における窒素の収支を知るための、脱窒素、脱亜酸化窒素など、大気への窒素放出量の定量化が重要であり、今後の研究が必要である。

貧栄養湖から富栄養湖にいたる多数の国内湖沼の水中メタン濃度実測値から、メタンフラックスを推定した。表層水のメタン濃度を対数で表現する限りにおいて、栄養度との顕著な関係が見られた。湖水面から大気へのメタンの拡散性フラックス（ガス交換フラックス）は、濃度、水温、風速の関数である。したがって、今までの調査で得られた関係を一般的な栄養度の因子である透明度、リン濃度、クロロフィル量などについての関数で表現することにより、湖沼からのメタン放出量推定ができる。

栄養度の指標として、観測を行った湖沼の全リン濃度を用いることとして、水中のメタン濃度との相関を求めた。国内湖沼の面積、栄養度、結氷期間などをデータベース化した。フラックスは風速と水温に依存するが、各湖沼の現場の風速値を得ることが難しいので、すべての湖沼に同程度の風速を与えた。湖沼の大きさの効果を3段階に分けて調査した。国内の全天然湖沼を加算すると、 $1.6 \text{ Gg CH}_4/\text{y}$ の放出量である。この量は、国内のすべての発生源のメタン放出を合わせた推定量の0.1%程度に過ぎない。その中では、浅い富栄養湖である霞ヶ浦、中海、宍道湖、面積の大きな琵琶湖北湖などの寄与が大きいことが推定された。実測の濃度測定データを取り入れた推定は世界的にも例が少なく、同様な手法を湖沼および湿原などにあてはめ、世界の水域からのメタンフラックス推定を行うことは有用であると考えられる。

富栄養化している内湾として、東京湾の水中メタン濃度の観測を行った。メタンの拡散フラックスの観測期間18カ月の平均は $4.1 \text{ mg CH}_4/\text{m}^2/\text{day}$ であり、富栄養湖沼の霞ヶ浦をやや上回る量であった。このことは、沿岸海域のフラックスの重要性を意味するものであり、他の海域の観測の必要性が明らかになった。

### (3) 地球温暖化にかかわる対流圏大気化学の研究

地球温暖化現象は大気中の微量成分の増加（蓄積）が引き起こす問題である。大気中微量成分は自然及び人為的起源からの大気への放出がまずあり、その後それらが大気中で太陽光による光解離、OHラジカルなどによる

大気中でのラジカル反応を起こし、それによる消滅あるいは新しい二次生成物の生成といった種々の過程のフィルターを通して最終的には安定化合物の蓄積が行われる。これらの過程の解明がいわゆる対流圏化学の課題であり、地球温暖化現象が対流圏の問題である限り、これらの研究なしには温暖化の現象解明は進行しない。本研究は地球温暖化の現象を対流圏化学の立場から解明する試みをなすもので、大気化学反応にかかわる基礎データの測定を行う研究である。基礎データの測定は対流圏大気反応モデルの充実をもたらす、それによる対流圏の諸々の化学反応過程が解明され、ひいては温暖化の将来予測の強化がなされるのである。

#### 1) 対流圏の化学反応に関する研究

温暖化の現象解明を対流圏化学の切り口から行う目的で、紫外光の光解離によるフリーラジカルの生成過程と、生成したラジカルの大気中での反応速度・機構の決定が行われた。1994年度は特に、以下の二つの研究が行われた。

##### 置換メチルラジカルと酸素分子の反応速度の決定

パルスレーザー光分解と光イオン化質量分析法の組合せを用いて置換メチルラジカル( $\text{CH}_2\text{OCH}_3$ ,  $\text{CH}_2\text{NH}_2$ ,  $\text{CH}_2\text{I}$ ,  $\text{CH}_2\text{CN}$ )と酸素分子の反応を研究した。メチル基に $-\text{OCH}_3$ や $-\text{NH}_2$ のような電子供与基がある場合、反応速度は $\text{CH}_3$ に比べて非常に速くなった。得られた反応速度は $298 \pm 5 \text{ K}$ で $\text{CH}_2\text{OCH}_3$ に対して $(6.5 \pm 0.7) \times 10^{-12}$ ,  $\text{CH}_2\text{NH}_2$ に対しては $(3.5 \pm 0.4) \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \cdot \text{molecule}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ であった。また $0.6 \sim 6 \text{ Torr}$ の $\text{N}_2$ に対して反応速度の圧力依存性は観測されなかった。 $-\text{I}$ や $-\text{CN}$ のような電子吸引性の基を持つ $\text{CH}_2\text{I}$ や $\text{CH}_2\text{CN}$ の場合反応速度は遅くなった。 $\text{CH}_2\text{I}$ と $\text{O}_2$ の反応速度は $2 \sim 15 \text{ Torr}$ の $\text{N}_2$ に対して圧力依存性はなく、 $(1.6 \pm 0.2) \times 10^{-2} \text{ cm}^3 \cdot \text{molecule}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ であった。 $\text{CH}_2\text{CN} + \text{O}_2$ の反応速度は非常に遅く、 $2 \sim 6 \text{ Torr}$ の圧力範囲で $6.8 \sim 11.0 \times 10^{-15} \text{ cm}^3 \cdot \text{molecule}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ と圧力依存性を示した。これらの反応速度をラジカルのイオン化ポテンシャルや電気陰性度から議論した。

##### メタンの酸化反応に係わるラジカル反応速度の同位体効果の研究

近年地球環境研究において大気中の安定同位体（例えば $^{13}\text{C}$ ）の蓄積が問題となっており、その原因の一つは大気中でのラジカル反応速度の同位体効果が原因ではないかという説がある。この問題の解答にはラジカル反応



の同位体効果の定量的結果が必要とされる。本研究では  $\text{CH}_3$ 、 $\text{CD}_3$ 、 $^{13}\text{CH}_3$  と酸素原子および分子の反応速度の差の測定がなされた。同位体の反応速度の差は小さく、たとえば  $\text{CH}_3$  と  $\text{CD}_3$  など H/D の反応速度の差は 1~10% であり、低濃度のラジカルの測定自体容易でないのに、その反応による減衰速度の差を精度よく測定することはさらに困難である。この測定はレーザーによりラジカルを発生させその後のラジカルの濃度変化を質量分析器で測定するが、精度を出すためにはそのラジカルのイオンシグナルを 105 カウント程度まで積算する必要がある。それはレーザーショットで 105 回の積算を必要とし、約一週間の積算に相当する。 $\text{CH}_3$  と  $^{13}\text{CH}_3$  の反応速度の差はさらに小さく、(0.1~1%) の精度を得るには 106 カウントの積算が必要となり、それには約 1 カ月の積算を行うことになる。現在は 1% の差を明瞭にするところまで成功しており、 $\text{CH}_3$  と  $\text{CD}_3$  と酸素原子の反応速度の差が 10% 程度であることが決定された。

## 2) 対流圏におけるオゾン増加原因の解明に関する研究

温室効果気体としては最近になってエアロゾルや対流圏オゾンのような短寿命大気微量成分の地球温暖化に対する負または正の効果が、長寿命成分による効果に匹敵する可能性があるものとして注目されている。

海洋上大気中では陸域に比べて低濃度のオゾンが観測されているが、その一因として海洋由来のハロゲン原子によるオゾン破壊が考えられる。海洋生物から放出される種々のガス状ハロカーボン類の内、ヨウ化メチルやプロモホルムのように近紫外や可視部に吸収のあるものは光分解によってヨウ素や臭素原子を放出することが知られており、また、海塩粒子上の不均一反応によって臭素原子や塩素原子が放出されることも明らかとなっている。このような海洋起源ハロゲン化合物の増減は対流圏オゾン濃度に重大な影響を与えることになるが、その影響評価に必要な発生源や濃度の分布、反応速度等に関するデータは極めて少ない。そこで大気中ハロカーボン及びガス状の無機臭素と塩素の測定を、西太平洋およびベンガル湾海域で行った。

ヨウ化メチルはほとんどのサンプリング地点で 1 ppt 以下であったが、西太平洋の南緯 5~10 度付近では 4~5 ppt の高濃度を示した。大気の上昇が著しい熱帯域で特に高濃度のヨウ化メチルが検出されたことは上部対流

圏オゾンへの影響を考えた場合に重要である。また、東アジア近海ではヨウ化メチル、ヨウ化エチルともに往路と復路で大きな濃度差を示し、両者の間には正の相関 ( $R=0.6$ ) が見られた。このことはヨウ素化合物の発生あるいは消滅プロセスに気象条件等に左右されやすい共通のメカニズムがあることを示唆している。

西太平洋におけるプロモホルム濃度は南緯 20 度付近で最高 (2.9ppt, 2.1ppt) であった。東アジア海域ではプロモホルムはシンガポール港、ペナン港に停泊中に特に高濃度となるほか、ボルネオ島北部でやや高く (約 2 ppb)、ベンガル湾で低い (約 0.5ppb) ことが分かった。同一海域では往路と復路ではほぼ同じ濃度を示しており、植物プランクトン量などの発生源強度を反映しているものと考えられる。

$\text{Br}^-$  として測定されたガス状臭素はガス状塩素に比べて顕著な日変化 (日中濃度 > 夜間濃度) を示した。今回の日変化測定結果は以前報告されている値より高濃度であり、海塩粒子に由来する  $\text{Br}$  量をはるかに上回っている。特に西太平洋の場合、赤道付近を除いて昼/夜比が 2~10 以上という非常に大きな日変化が観測された。おそらく海洋表層部から供給される光化学反応性の高い臭素化合物が臭素原子を放出し、オゾンその他の物質と反応し、その最終生成物である  $\text{HBr}$  が日中の大気中に高濃度で存在しているものと考えられる。 $\text{Br}^-$  の日変化の振幅は、貧栄養でプロモホルム濃度も低いベンガル湾で小さく、何らかの生物学的な作用が臭素化合物の発生に寄与している可能性が高い。海洋大気中にはかなり大量の臭素元素が供給されてオゾン消費している可能性が高い。

## (4) 地球温暖化にかかわる二酸化炭素、炭素循環に関する研究

### 1) 温帯域における土壌圏微生物群集をめぐる炭素循環の定量的解析

陸域の土壌有機物および植物体等の形で存在する炭素の土壌中での分解と、分解にかかわっている微生物量および分解に影響を及ぼす環境要因との関係を明らかにすることは、主要な温室効果気体である二酸化炭素の動態を明らかにするために重要である。本研究課題では主として、温帯域の森林土壌において土壌からの二酸化炭素発生速度と土壌中の炭素量、微生物量などを実測し、土壌中の有機物分解活性の変動とその変動要因について土

壤微生物群集および環境条件とのかわりにおいて明らかにすることを目的とした。

福島県南会津郡南郷村、伝上山中腹（落葉広葉樹林、凝灰岩を母材とした褐色森林土壌）の尾根上から沢に向けて4地点において、土壌表面からのCO<sub>2</sub>発生速度を測定した。また、各地点の0～30cmまたは40cm層までの土壌を3層位に分けて採取、室内（22℃）で培養し、CO<sub>2</sub>生成速度、土壌中の炭素含量、窒素含量および微生物バイオマスの関係を解析した。その結果、土壌表面からのCO<sub>2</sub>発生速度はバラツキが大きかったが尾根上および沢沿いにおいて小さい傾向にあった。また、リター層上において測定したCO<sub>2</sub>発生速度よりもリターを排除して測定した値の方が大きかった。室内培養実験の結果、3地点では0～5cmまたは8cm層からはCO<sub>2</sub>の発生が認められたが、それ以下の層ではほとんど発生が認められなかった。沢に近い1地点でのみ5～20cm層においてもCO<sub>2</sub>の発生速度は大きかった。各土壌からのCO<sub>2</sub>発生速度は微生物バイオマスとの間に相関が高かった。また、微生物バイオマスおよびCO<sub>2</sub>発生速度は土壌中の炭素含量よりも窒素含量との相関が高かった。野外での実測値と室内培養実験における層位ごとのCO<sub>2</sub>発生速度を積算した値を比較すると、先の3地点では前者は後者の数倍となったが、沢に近い1地点では野外実測値の方が低かった。以上の結果から、CO<sub>2</sub>発生速度は土壌中の微生物バイオマス量に比例すること、土壌中の微生物バイオマスは窒素量が制限となっていること、調査地では土壌中の微生物によるCO<sub>2</sub>の生成は（リター層を除くと）大部分が表層10cm以内において行われていることが推察された。

## 2) 同位体比による二酸化炭素の大気・海洋・生物圏間の交換に関する研究

二酸化炭素は、地球上の各圏（大気、海洋、地圏、生物圏）間のやりとりを含め、多岐にわたる移動過程が存在する。大気中の二酸化炭素の増加は人為起源の二酸化炭素の放出量の増加に対応してはいるものの、大気-海洋間、また大気-生物圏間の二酸化炭素の出入りによってその増加率というものは大きく左右される。この研究では同位体比を二酸化炭素の挙動の指標にして圏間の動きを調べることを目的とし、大気-海洋間や大気-土壌間の二酸化炭素の動きの解析を行った。

同位体比質量分析計による自動分析のための装置条件

を検討し、トラップの時間や必要二酸化炭素量の検討を行った。前処理ラインを含めた再現性を検討するために、標準試料を数本ガラス封入し分析した精度は0.07パーミルの変動係数であった。今後さらに精度を上げられるものと考えられる。

海洋と大気の間での二酸化炭素の交換について炭素同位体比の観点から検討を行うために、太平洋上の航路をその大気サンプリングコースとして設定した。この航路は日本-オーストラリアの定期船舶の航路であり、これによって今後太平洋上の二酸化炭素濃度と同位体比の両者について、南北半球にわたる緯度分布が測定されていく予定である。その目的で、洋上大気試料の二酸化炭素を分離、抽出する処理ラインを製作し、定期的な試料の採取を開始した。

また、土壌と大気の間での二酸化炭素交換と、それに伴う二酸化炭素炭素安定同位体比の変動の測定を、国内の森林で行った。季節的な変化が測定され、夏期には土壌中で活発な有機物の分解が行われていることが、濃度及び同位体比の変化などから明らかになった。

土壌中の二酸化炭素の濃度分布と同位体の深さ方向分布の季節変化の例を図2、3に示した。土壌中濃度は表層に行くに従って低下するが、濃度は夏期において各層で50%から100%増加した。同位体比は冬期においては表層に大気（-8パーミル）の影響が見られ、表層で同位体比が大きくなっている。しかし夏期においては表層-22パーミル前後となり、活発な分解過程が存在することが明らかになった。二酸化炭素のフラックスは300mg/m<sup>2</sup>/hr程度から1500mg/m<sup>2</sup>/hrであったが、一カ所での空間的な変動が30%程度存在することが、多数点の測定から明らかになった。このような土壌二酸化炭素の同位体比の変化とフラックスの関連から交換過程を解析することができる。

## (5) 気候モデルによる気候変動評価に関する研究

地球温暖化をはじめとする気候変動を定量的に評価するためには、気候システムの力学とエネルギー・物質循環を表現する高精度の数値モデルが必要である。そのため本研究では、東京大学気候システム研究センター（CCSR）と共同でCCSR/NIES-大気大循環モデルの開発・改良を継続して、それをを用いた気候システムの変動特性の解析を行っている。

一方、地球気候システムにおける雲の効果は、太陽放

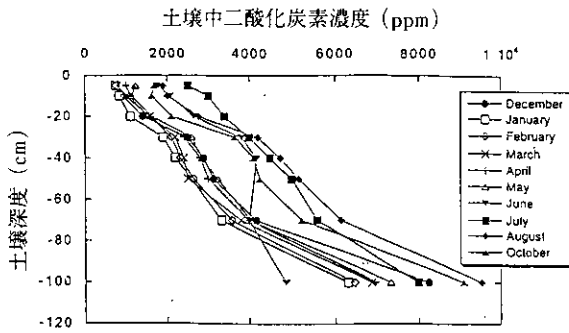


図2 森林土壌中の二酸化炭素濃度鉛直分布（つくば大学構内林）

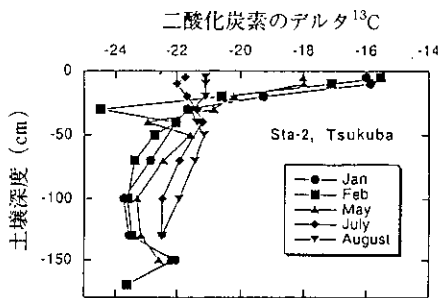


図3 森林土壌中の二酸化炭素の炭素安定同位体比（つくば大学構内林）

射の反射・散乱および赤外放射の吸収・射出といった放射過程、および水の蒸発・降水を介した潜熱エネルギーの輸送による力学・熱力学過程の2つの過程を通じて重要なかぎを握っている。そのため、気候モデルにおける特に、熱帯域の積雲過程のモデル化が大気水循環に及ぼすフィードバック機構に着目し、アンビル雲（かなとこ雲）や積雲対流雲との関係を適切に表現し得るような気候モデルの改良と、積雲対流雲と放射性的層状雲との相互関係の解明を目的とした研究を同時に展開した。

現実的な気候値を定量的に再現することを目標として、大気放射、雲、陸面等の各物理過程において、物理的考察に基づいたパラメタリゼーションの改良を行い、CCSR/NIES気候モデルの充実をはかった。海水面温度を境界条件としてモデルを長期間積分することにより、気候値の再現性は高いことが示された（図4）。これらの様々な数値実験によりCCSR/NIES気候モデルは、良好な気候再現性を有することが明らかになったが、より定量的な結果を得るためには各種のサブグリッドスケールの現象をモデルに導入する必要があることが分かった。以下に、気候モデルの平成6年度主な成果を述べる。

### 1) 大気放射過程パラメタリゼーションの最適化

大気放射過程の高精度の評価は気候値の定量的な見積もりの基本となるものである。しかし、高精度の放射フラックスの評価は通常膨大な時間を必要とし、高精度化とともに効率化が重要な問題となる。この研究ではチャンネル最適化アルゴリズムを使用して、放射パラメタリゼーションの精度向上と高速化を行った。

### 2) 雲と乱流の相互作用の適切化

雲と乱流の相互作用の適切な評価をするべく、湿潤リチャードソン数を用いた鉛直拡散係数の評価式をより適切なものに改めた。この結果、境界層上部での雲水量の強い極大が解消され、雲の水平分布の気候値再現性が向上した。

### 3) 陸面過程のパラメタリゼーションの精密化

熱と水蒸気に対する地表面の粗度は、運動量に対する地表面の粗度よりも通常一桁程度小さいとされている。その効果を表現するために、バルク係数を求める際に粗度の違いを考慮した補正を導入した。また、気孔抵抗の効果を簡略的に取り入れるために、地表面からの蒸発効率に土壌水分量に依存せず気孔抵抗の大きさに依存する上限を設けた。気孔抵抗は地表面のタイプに応じて決定される。これらの精密化によって、夏季の大陸上の蒸発量の過大が修整され、陸地表面の全体的な乾燥傾向が改善された。

### 4) 準2日周期大規模雲システムの詳細構造

CCSR/NIES気候モデルにおいて、雲は、積雲対流雲と大規模凝結雲との2つの過程で取り扱われる。前者は、対流活動に伴う積雲・積乱雲、後者は層雲・巻雲等の層状性の雲を表現する。気候変動問題において、熱帯海洋上のアンビル雲（かなとこ雲）による放射調節の効果の重要性が指摘されている。CCSR/NIES気候モデルにおいては、アンビル雲は大規模凝結雲として扱われるものであるが、現実にはこの層状性の雲は、必ず水物質の供給源としての活発な積雲対流雲と結合した雲クラスターという形で存在する。そこで、このようなアンビル雲と積雲対流雲との関係を適切に表現し得るような気候モデルへの改良を目標として、積雲対流雲と放射性的層状雲との相互関係の解明をTOGA COAREデータを用いて行った。その結果、1992年11月～1993年2月に熱帯太

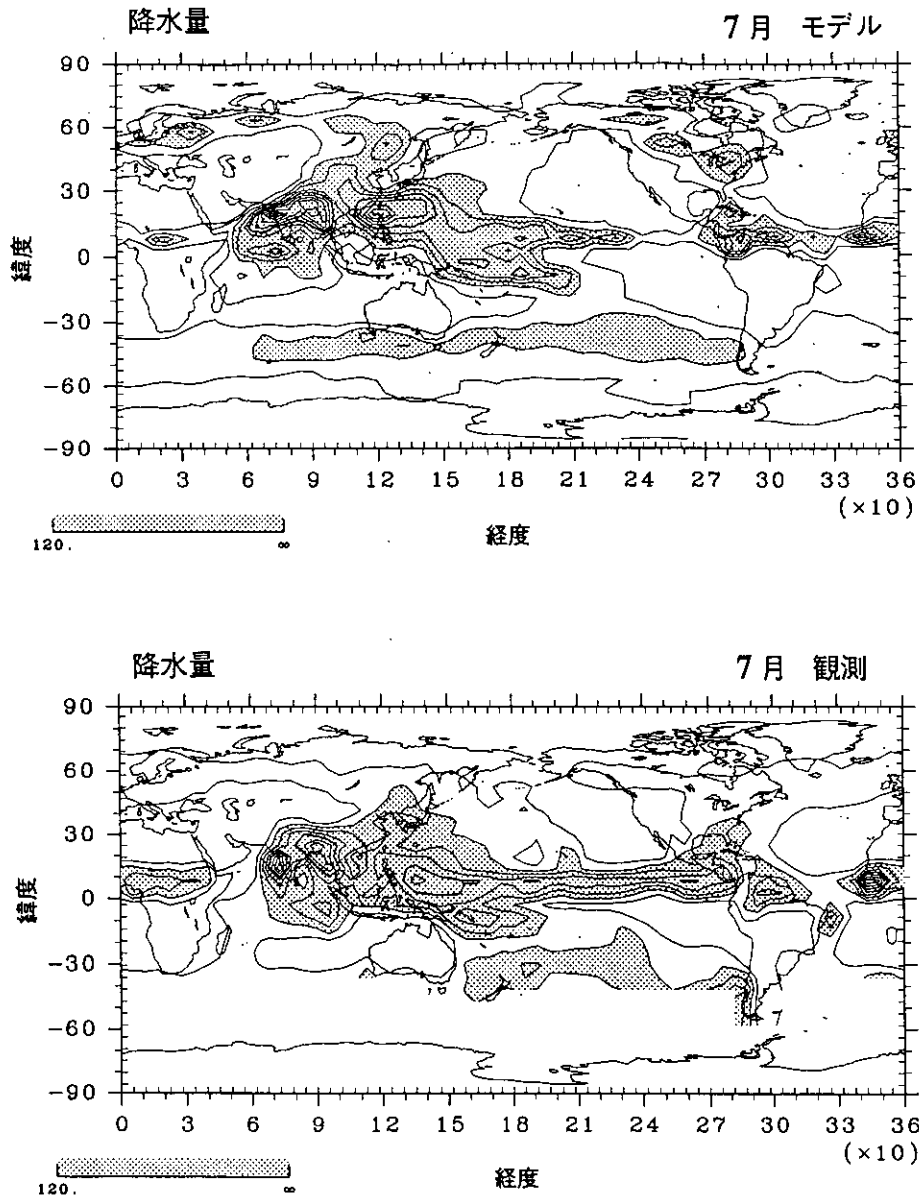


図4 7月の全球降水量分布 モデル(上)と観測(下)  
 コンター間隔は60mm/月で、陰影の領域は降水量が120mm/月を意味する。

平洋暖水域で展開された、TOGA-COARE(熱帯海洋と全球大気プログラム/海洋-大気結合応答実験)観測のデータを生かし、この期間に観測された準2日周期大規模雲システムの詳細解析を行った。まず、観測域の中心を含む経度7度×緯度5度(IFACR)および19度×19度(OSACR)の領域で平均した赤外黒体輻射温度の1992年12月の時系列を解析した。その結果、気候モデルのグリッドサイズに匹敵する7度×5度スケールで、約2日周期の雲活動変動が顕著である。時空間スペクトル解析の結果、この変動は、東西波長約15度~30度/dayで西進するモード $n=1$ の慣性重力波の特性をもっていることが分

かった。また、大気循環場の変動もこれと一致する構造を示していることが判明した。

4 kmのデータ分解能を生かした赤外ヒストグラムデータで、このシステムに伴う雲変動の鉛直分布の情報を表したのが図5である。-24RH(RH:コンボジット相対時間)から約10時間は、浅い雲頂高度にもっとも多いピクセル密度がみられ、高いものでも250K(~350hPa)にとどまっている。その後、約8時間(-14 to -6RH)は200K以下の非常に高い雲頂高度のピクセルが観測されるが、中・下層の雲も透けて見えるため、背の高い対流雲が立っている状態であると考えられた。基準時間を扶

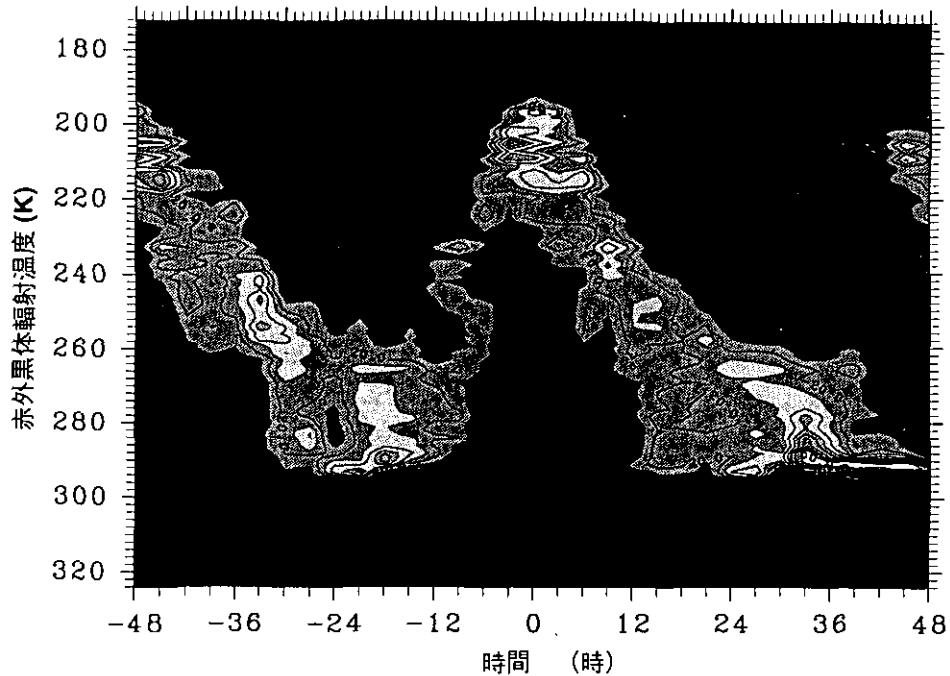


図5 赤外ヒストグラムデータを用いた雲変動の鉛直分布の時間空間変化  
(x軸は相対時間)

んで約12時間は、上層のアンビルに覆われた状態、その後+24RHに向けて、アンビルの衰退が観測される。観測船による2台の降雨レーダのデータを用いると、前半に対流性の降雨、後半に層状性の降雨を示す。

これらの解析の結果に対応して、準2日周期の一生を4ステージに分けることができた(図6)。Shallow Convection Stageでは、大規模擾乱の下降流によって、対流が低く抑えられる。中層が湿ってくると、深い対流が立ち(Initial Tower Stage)、その後、アンビルが維持される(Mature Stage)が後半から下層は安定化して対流は立ちにくくなり、雲システムは衰退していく(Decaying Stage)ことが明らかにされた。

本研究によって、熱帯海洋上の積雲対流雲とアンビル雲とが準2日周期雲システムのような気候モデルの分解能に匹敵する大規模スケールの大気-雲システムによって組織化されていることが明らかになった。この変動は、気候値的にも北半球冬期の熱帯太平洋上の雲擾乱として

卓越している。今後、気候モデル上における雲の役割をより現実的に表現するために、このような大規模力学を伴う積雲対流雲およびアンビル雲の結合した組織化をいかに表現していくかが検討すべき課題となった。

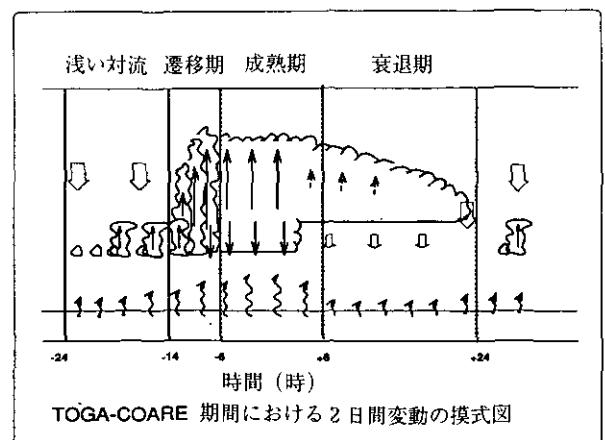


図6 準2日周期に伴う積雲の一生の4ステージの模式図

## 2.3 地球の温暖化影響・対策に関する研究

### 〔研究組織〕

地球環境研究グループ	
統括研究官	安野正之
温暖化影響・対策研究チーム	○森田恒幸・甲斐沼美紀子・増田啓子
地域環境研究グループ	
統括研究官	内藤正明
交通公害防止研究チーム	清水 浩・森口祐一
水改善手法研究チーム	稲森悠平・高木博夫・水落元之・西村 修
都市大気保全研究チーム	若松伸司・上原 清
大気影響評価研究チーム	安藤 満
社会環境システム部	
部長	後藤典弘
環境経済研究室	後藤則行・日引 聡・青柳みどり・川島康子
環境資源研究室	乙間末廣・森 保文
環境計画研究室	近藤美則
情報解析研究室	安岡善文
環境健康部	
保健指標研究室	山元昭二
環境疫学研究室	小野雅司・本田 靖
水圏環境部	
水環境工学研究室	今井章雄
土壌環境研究室	恒川篤史
生物圏環境部	
環境植物研究室	大政謙次・名取俊樹・戸部和夫・清水英幸
地球環境研究センター	
統括研究管理官	西岡秀三
研究管理官	原沢英夫・藤沼康実
客員研究員 19名	

### 〔研究概要〕

地球温暖化問題は、いま最も注目を集めている地球規模の環境問題である。

周知のとおり地球温暖化問題とは、大気中の炭素ガスやメタンガスなどの温室効果ガスの濃度が増加することによって地球上の平均気温が上昇し、海面水位の上昇、降水パターンの変化、農林水産物の生産や自然生態系の変化などの各種の影響が生じる問題をいう。この問題が注目を集める大きな理由は、第1に、深刻な被害が地球規模で予想されており、第2に、その解決のためには長

期間にわたって膨大な費用を注ぎ込む必要があり、第3に、このような大きな問題にもかかわらず未だ科学的に解明されていない部分が多く残されていることである。このため、いま世界中の研究者がこの問題の解明に取り組んでいる。

地球温暖化問題の未解明点は大きく3つある。第1は、地球温暖化のメカニズムであり、大気中の温室効果ガス濃度の変化とそれによる地球の気候変化の仕組みについて、多くの不確実な点が残されている。第2は、地球温暖化の影響であり、温暖化やそれに伴う海面上昇により

自然環境や社会経済にどのような影響が及ぼされるかについては、解明されていないことの方が多い。第3は、地球温暖化の防止対策についてであり、各種の対策技術や政策の有効性を評価するためには、関係する技術システムや社会経済システムの体系的解明とそのモデル化が必要である。

地球温暖化の影響と防止対策、すなわち、第2と第3の未解明の点に関して、全部で7つのプロジェクトがスタートしており、当研究所ではこのうち、水収支への影響及び海面上昇の影響を除いた次の5つを担当している。

#### (1) 地球温暖化の防止対策についての研究

- ①予測モデル開発：政策や防止技術の効果判定のための計算機シミュレーションモデルの開発
- ②対策技術評価：温暖化防止技術の評価手法の開発と民生部門及び電気自動車を中心とした各種技術の評価
- ③汚水・廃棄物処理システム評価：廃棄物・汚泥処理・処分システムの確立と評価

#### (2) 地球温暖化の影響に関する研究

- ①植物影響研究：施設実験及び予測モデルによる植物個体や自然植生への影響の解明
- ②健康影響研究：施設実験やフィールド調査等による人の健康や生存環境への影響の解明

以下に、各研究プロジェクトの活動状況と成果を紹介する。

### 【研究成果】

#### (1) 予測モデルの開発に関する研究

アジア太平洋地域において排出される温室効果ガスを予測し、その抑制方策を評価するために、この地域の研究機関と協力してシミュレーション・モデルの共同開発に着手した。本年度は、中国及び韓国を対象にして技術選択を考慮した二酸化炭素排出量の予測モデルを開発し、両国の部門別の二酸化炭素排出量や対策効果の評価を開始した。また、今後の温室効果ガス抑制対策が国内の大気汚染対策と連携して実施される見通しであることから、両国の国内の環境政策の発展過程を我が国と比較分析し、国別排出モデルの拡張のニーズを検討した。さらに、土地利用変化による二酸化炭素の排出量を予測するため、地球規模の熱帯林の減少モデルを開発した。

一方、温室効果ガス排出に伴う大気中の濃度変化を推定するため、ミッシングシンクの要因の一つとして注目されている二酸化炭素の肥活化減少に焦点を当て、詳細な陸域炭素循環モデルを開発するとともに、このモデルを組み込んで種々の排出シナリオのもとでの気温上昇を推定した。

また、アジア太平洋地域において温暖化により自然生態系や社会経済システムがどの程度の影響を受けるかを明らかにし、防止対策によってこれらの影響がどの程度軽減できるかを予測するため、この地域の研究機関と協力して総合的なシミュレーション・モデルの開発に着手した。本年度は、農業影響モデルに焦点を当て、小麦、コメ、ジャガイモ、モロコシ等の主要な穀物の潜在生産量が気候変化によってどのように変化するかを予測を試みた。また、中国と共同して、中国の温暖化影響モデルの精度を高めるために、地理情報システムを整備した。さらに、植生変化のモデルを改良するために、引き続きアジア地域の樹種のデータベースを整備した。

#### 1) 温室効果ガス排出モデル及び温暖化現象モデルの開発

AIMシミュレーションモデルは、温室効果ガス排出・気候変化・その影響といった一連のプロセスを統合して分析できる「総合モデル」である。この総合モデルは、各国や地域の経済活動と地球規模の気候変化を結びつけて検討できるだけでなく、地球規模の気候変化が国や地域の社会経済にどのような影響を及ぼすかについても検討できるため、各種温暖化対策を総合的に評価(integrated assessment)することが可能である。

AIMの全体構造は、図1に示すとおり、人為起源の温室効果ガスの排出量を予測する温室効果ガス排出モデル(AIM/emission)、排出された温室効果ガスの大気中濃度を予測して温度上昇を推定する温暖化現象モデル(AIM/climate)、それに、気候変化がアジア太平洋地域の自然環境や社会経済に及ぼす影響を推定する温暖化影響モデル(AIM/impact)から構成されている本サブテーマはこのうち、AIM/emissionモデルを中心に発展途上国等と共同研究を進めた。このモデルの特徴は、市場均衡を基本にして世界の経済活動の推移を予測するトップダウン型の経済モデルと、各種の技術の導入を考慮してエネルギー消費量等を部門別に積み上げて推定するボトムアップ型の国別エンドユース・モデルを統合したところ

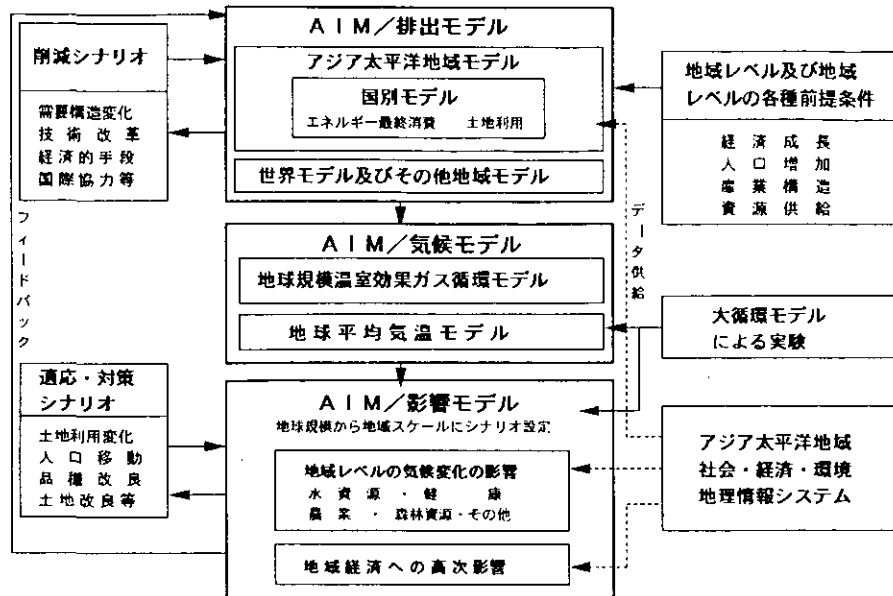


図1 AIMの全体構成

にある。これによって、世界的な社会経済の趨勢と各国の個別的な対策の効果との関係を体系的に明らかにすることができる。また、本サブテーマでは、AIM/climateモデルのうち炭素循環モデルの開発も進めた。

本年度得られた主要な成果は、以下のとおりである。

①中国および韓国の二酸化炭素排出モデルの開発

まず、AIM/emissionのうち、中国及び韓国の二酸化炭素排出モデルを中国エネルギー研究所、韓国エネルギー経済研究院及び韓国環境技術開発院と共同して開発した。この二酸化炭素排出モデルは、図2に示すように、エネルギーによってサービスされるべき各種需要（エネルギーサービス）を見積もる「エネルギーサービス量算出モジュール」、エネルギー効率の改善を計算する「エネルギー効率算出モジュール」、そして、エネルギー効率を決定する各種サービス技術を選択する「技術選択モジュール」から構成されている。

対象としたエネルギー消費部門は、中国モデルでは工業（鉄鋼・非鉄金属・建材・化学・石油化学・紙パ・繊維・機械）、農業（灌漑・農耕・食品加工・漁業・畜産）、家庭（都市、農村）、サービス、及び運輸である。また、韓国モデルでは産業（鉄鋼・セメント・石油化学）、家庭、業務、及び運輸を対象とした。そして、これらの部門ごとに、エネルギーの消費実態とその構造、エネルギーサービス量の将来見通し、エネルギーサービスを提供する際

に利用される技術等の実態を調査した。技術選択モジュールで評価対象とした技術は、中国で約300種類、韓国で100種類以上にのぼる。これらの全技術について、初期導入コスト、年次別普及基数、省エネ効果量、技術コーホート、投資回収期間等の基礎データを詳細に調査し、モデルのパラメータや初期条件を設定した。

こうして開発したモデルを用いて、中国及び韓国の二酸化炭素排出量とその削減の可能性についてシミュレートした。このモデルでは、技術導入の初期コストの増加とエネルギー節約による便益の増加の比較によって、省エネ技術の導入が判断される。したがって、炭素税によってエネルギー価格を増加させたり、補助金によって初期コストを下げるにより技術選択が変わり、結果として二酸化炭素の排出量が下がるという、温暖化対策の効果が具体的にシミュレートできる。図3は、中国の鉄鋼部門からの二酸化炭素排出量のシミュレーション結果であり、市場メカニズムの導入によって二酸化炭素排出量の伸びが緩和され、さらにこの市場メカニズムを活用して炭素1トン当たり100元程度の炭素税を導入すれば、大幅に排出量の伸びが抑えられることが分かった。また、図4は韓国の民生部門からの二酸化炭素排出量をシミュレートしたもので、断熱材の導入と太陽熱温水器の導入によって、この部門からの排出量を安定化できる可能性が示唆された。このようなシミュレーション分析は平成



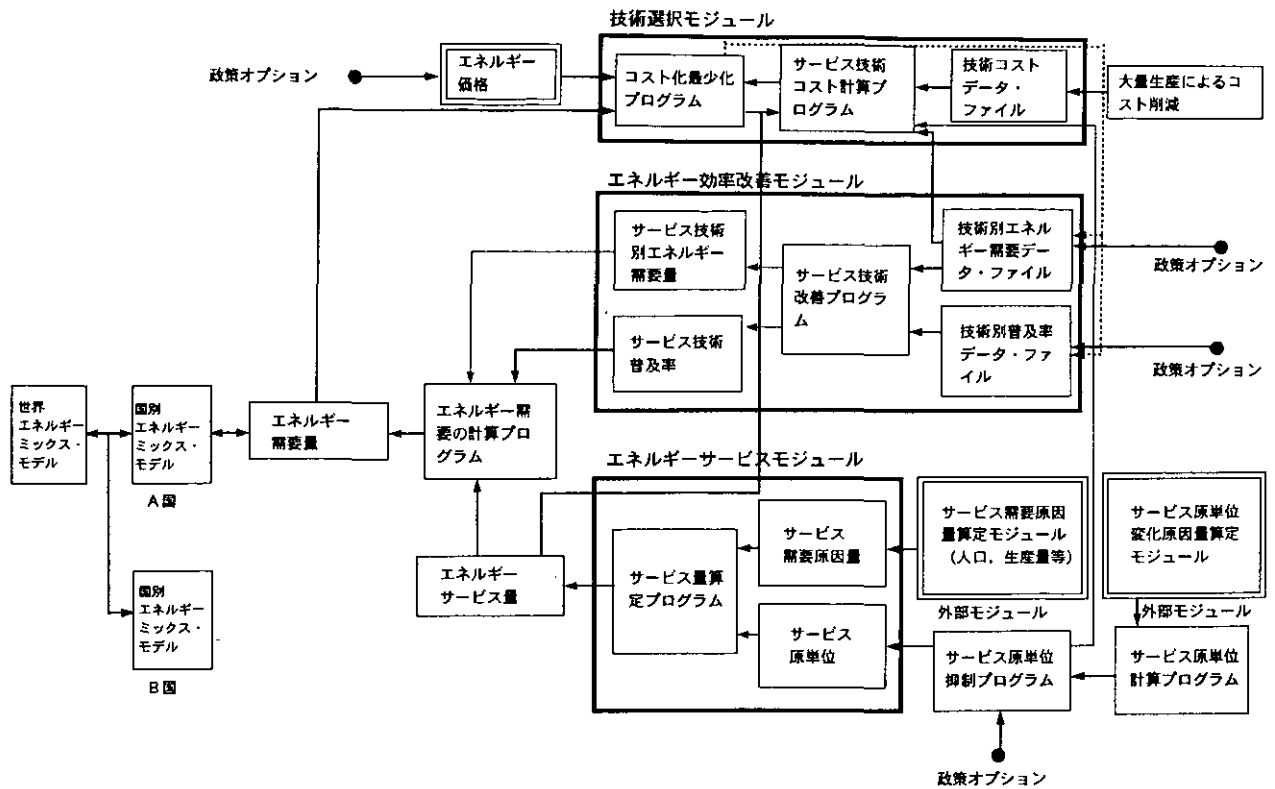


図2 二酸化炭素排出モデルの基本構造

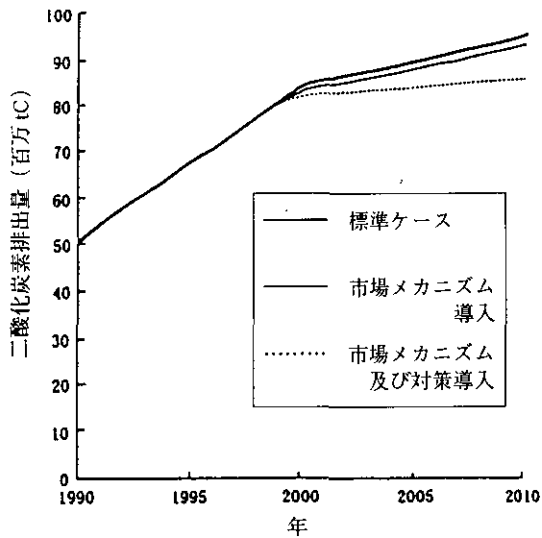


図3 中国の鉄鋼部門からの二酸化炭素排出量予測

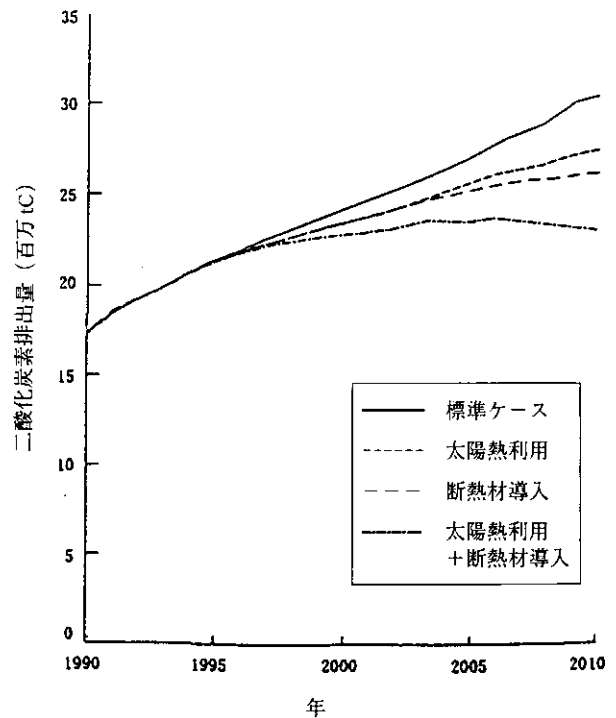


図4 韓国の民生部門からの二酸化炭素排出量予測

7年度に引き続いて実施する予定にしている。

②中国および韓国の環境政策の比較分析

中国及び韓国においては、地球温暖化防止の政策導入のインセンティブは非常に弱く、国内の大気汚染防止等

の政策が目下の緊急ニーズである。このため、二酸化炭素の排出抑制を国内の大気汚染防止と統合して進める可能性が検討されている。このようなニーズに対応するために、二酸化炭素の排出抑制と硫黄酸化物等の排出抑制との関係を体系的に分析できるよう、AIMモデルの拡張を検討中である。この拡張の方針を明らかにするために、中国及び韓国の環境政策の発展の歴史と今後の見通しについて分析した。

図5は、日中韓の今までの環境政策の歴史を比較したものである。日本と韓国で概ね12~14年、日本と中国で約21~24年のタイムラグがあることが分かる。図6はAIMのトップダウン型の経済モデルを用いて、日本、韓国、中国の排煙脱流の最適投資の経路を推定したもので、最も経済効率的な投資額を示している。日本の過去の排煙脱流投資は経済的にみても合理的なものであることが示唆されているが、この合理的な経路からみると、今まで排煙脱流が導入されていない韓国では1992年頃からこの種の自発的な投資があってもよいことになる。一方、中国では2014年頃まで自発的な脱流投資が期待できないと予想され、国際的な支援体制が検討される必要があることが分かった。これらはAIMの国内問題への拡張の際に重要な設計条件となる。

### ③熱帯林減少モデルの開発

化石燃料の燃焼以外に二酸化炭素を排出させる人為的要因に、土地利用変化がある。この中でも特に大きな要因は熱帯林の減少である。このため、AIM/emissionモデルの一部として、熱帯林減少モデルを開発した。このモデルは、農地への転換、過放牧、焼き畑等の熱帯林減少の要因を人口密度の指標で代表させ、この人口密度の増

加と熱帯林の減少との関係を過去百年間のデータを基に明らかにし、この関係を用いて将来百年間の熱帯林の減少量を予測するものである。

図7は、世界の熱帯地域の森林の面積率と人口密度のデータをサブリージョン単位に収集し、その関係をプロットしたものである。そして、AIMの国別人口予測モデルにより将来の熱帯地域の人口密度の推移を推定し、図7の関係をj用いて熱帯林の減少量を予測した。図8は、こうして予測した減少量を地域別に示したものである。特別の対策を導入しなければ、世界全体で2010年の1380万ヘクタールをピークに、徐々に減少しながら2050年には年間670万ヘクタールの減少が見込まれる。特に中南米の排出量の減少が著しく、今世紀から来世紀初頭にかけて年間の減少面積は600万ヘクタールを超えることが予想される。これによる二酸化炭素の排出量は世界全体で年間最大13億トン、アジア太平洋地域では3億トンである。アジア太平洋地域の熱帯林減少による二酸化炭素フラックスだけで日本の年間の排出量に相当するほど大きい。

### ④温暖化現象モデルの改良

温室効果ガスの排出量をもとに大気中の温室効果ガス濃度を決定し、気候変化を推定する温暖化現象モデル(AIM/climate)については、今までに開発されている大気化学反応、海洋交換、放射加熱、炭素循環、フィードバック、気候変化等の個別のモデルを、独自のフレームに基づいて組み合わせることによって開発している。このうち、炭素循環についてはイーストアングリア大学で開発された簡略なMAGICCモデルを用いているが、近年、ミッシング・シンクと見なされていた年間約20億

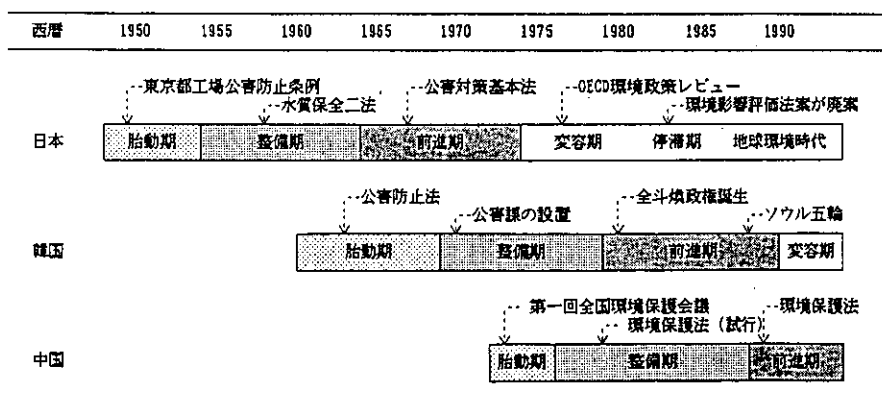


図5 日中韓の環境政策の発展過程の比較

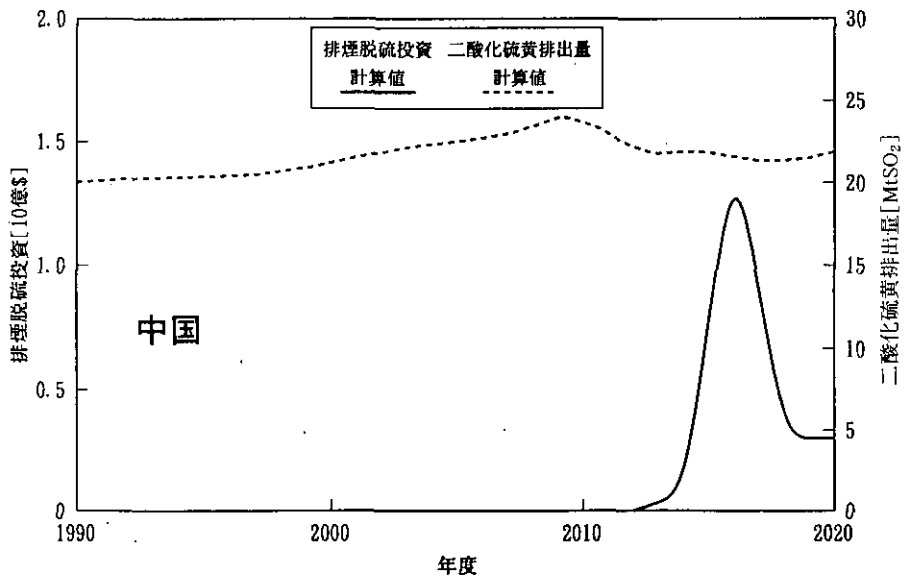
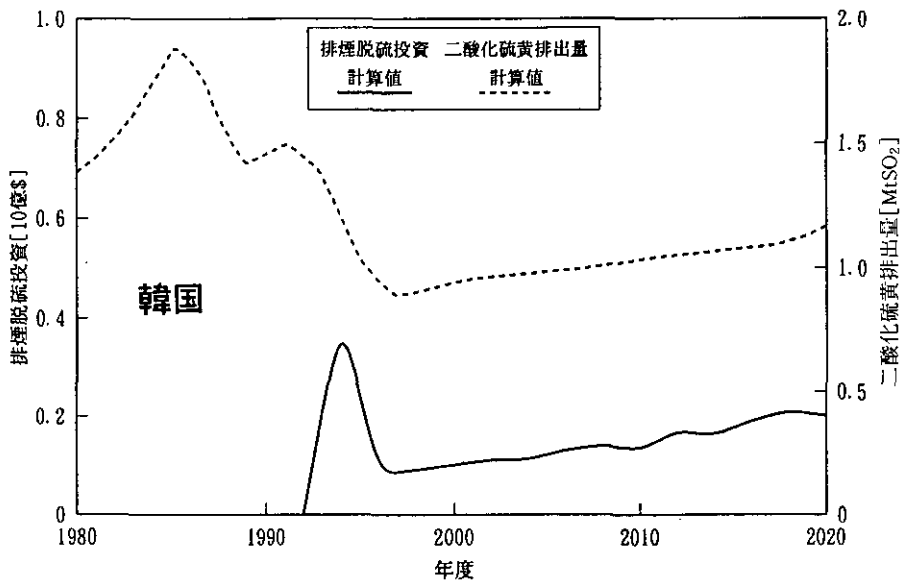
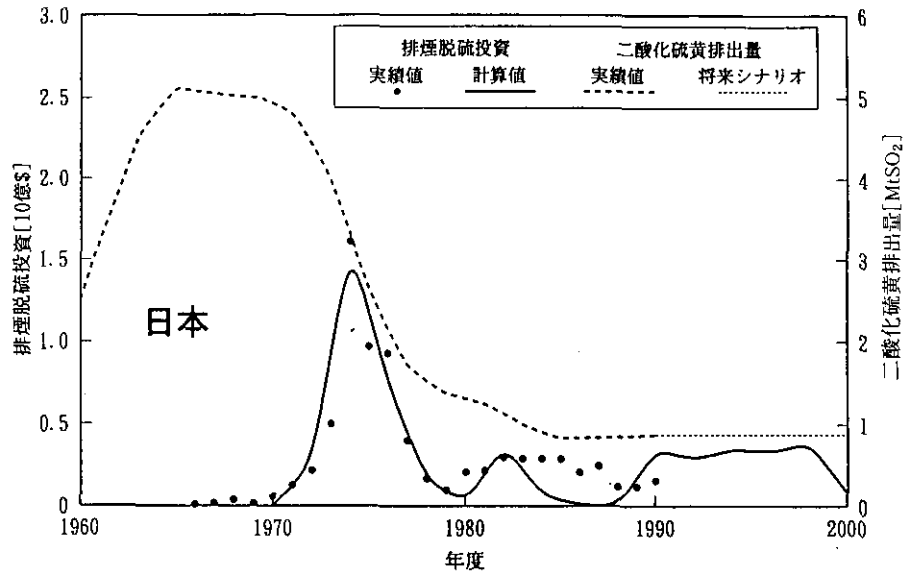


図6 日中韓の排煙脱硫投資の比較

炭素トンの行方が、植林や陸域植生の二酸化炭素肥沃化に帰せられる傾向になってきており、その詳細なメカニズムを分析することが求められている。

このため、陸域植生の二酸化炭素肥沃化現象を再現する目的で、陸域炭素循環モデル (AIM/TCCM) の開発に着手した。このモデルは、二酸化炭素濃度の増加に伴う植物の純一次生産の増加量を、標高制約、土壌制約、光合成経路の特性、水制約等を勘案して定式化し、0.5度メッシュごとに分割した世界の陸域の各植生分類ごとにこの純一次生産の増加量を求め、さらにこの増加量から種々の過程を経て大気中に排出される二酸化炭素の量を差し引いて、植物の生態系全体の純生産量 (NEP) を求

めた。図9はこうして計算された1990年のNEPの強度である。シベリア、北アメリカ、中国山間部などにおいてNEPの強度が大きく、これらの地域が二酸化炭素肥沃化による大きな吸収源になっていることが分かった。そして、二酸化炭素肥沃化による二酸化炭素の吸収量は1990年で9億炭素トン程度と推定され、ミッシングシンクと見なされていた量の約半分がこの現象によって説明できることが分かった。

また、こうして改良した温暖化現象モデルを用いて、今までに推定された種々の温室効果ガス排出シナリオを前提にしたときの、平均気温の上昇量をシミュレートした。図10は、気候感度を2.5℃に設定したときの気温上

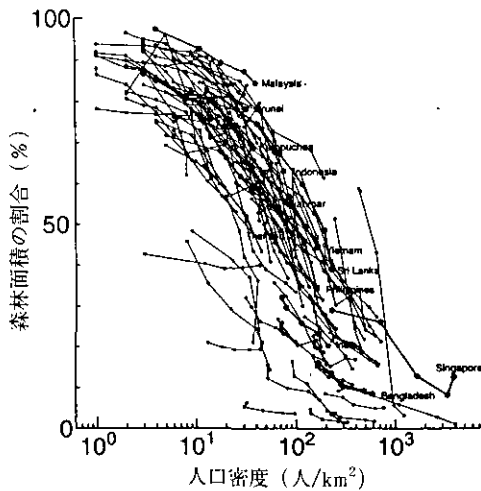


図7 熱帯林の森林面積と人口密度との関係

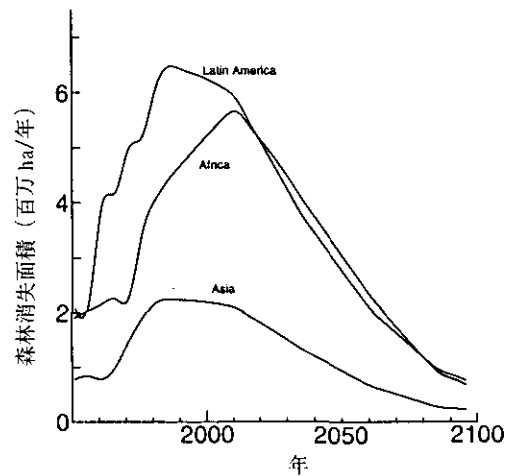


図8 熱帯林の減少予測

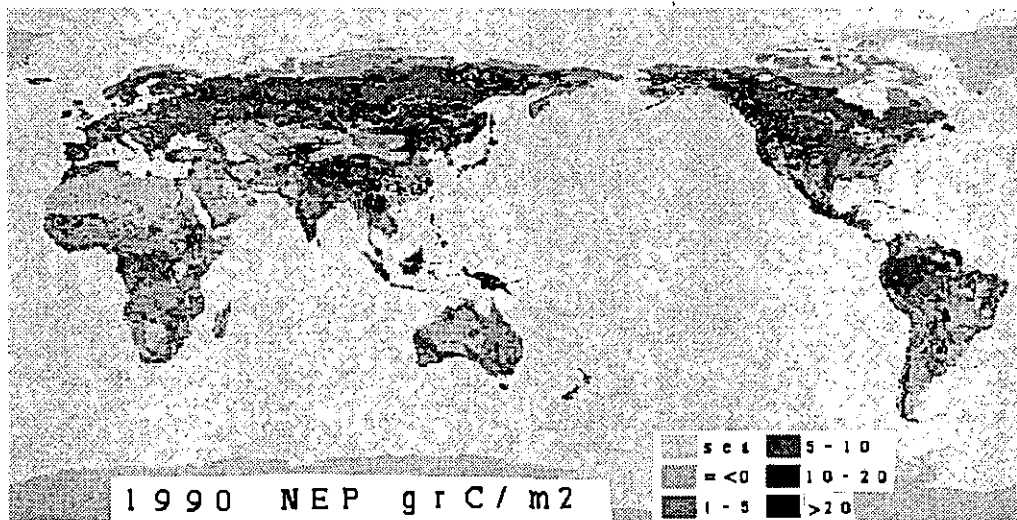


図9 植物の生態系全体の純生産量 (NEP) の強度推定



本年度は、気候変化が農業に及ぼす影響に焦点を当て、穀物の潜在生産への影響モデルを開発した。全体の農業影響モデルは図12に示ように、気候因子（日気温、日降水量、土壤水分量、放射量等）、穀物の自然的及び人為的特性、土壌因子（土壌ユニット、土壌相等）、それに農業生産のための労働や資本の投入量等によって生産量が決定され、これに気候変化による制約条件が課せられ

る構成になっている。今回開発したモデルはこのうち、灌漑、施肥、耕運などの人為的因子を除いた部分で、気候変化によって受ける潜在的な影響を分析することを目的としている。

表1には、このモデルで取り扱った12の作物について、主要なパラメータの一覧を示す。これらの作物について、さらに、土壌ユニット、土壌フェイズ、傾斜度、土性な

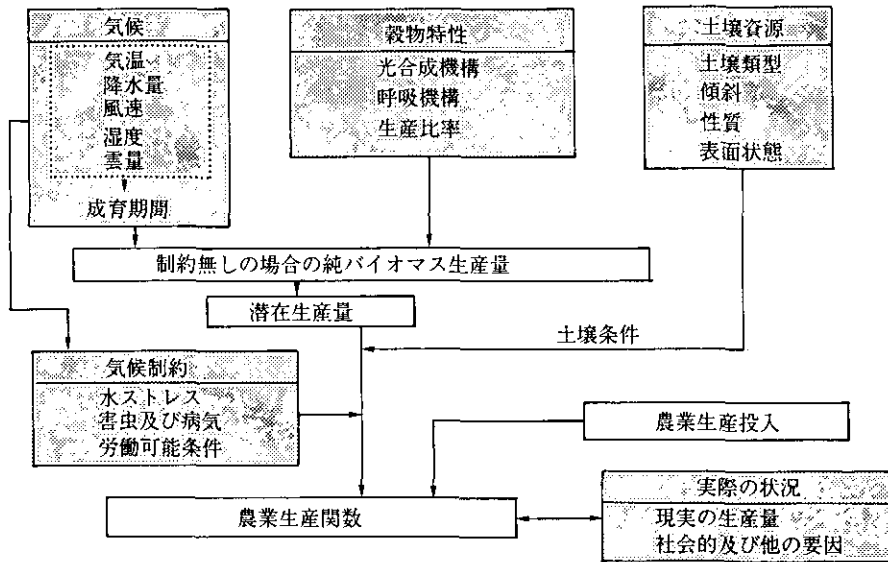


図12 農業影響モデルの基本構成

表1 農業影響モデルで扱った作物パラメータ

作物略称	日本名	作物 グループ	光合成経路	標準成育期間 N(日)	最低成育 期間(日)	LAI <sub>Max</sub>	Hi(ave.)	最低温度 T <sub>min</sub> (℃)	最高温度 T <sub>max</sub> (℃)
Wheat SC	春コムギ	I	C3	100*	100	5	0.4	5	25
Wheat WC	冬コムギ	I	C3	150	120	5	0.4	5	25
White potato	ジャガイモ	I	C3	150	90	5	0.6	7	30
Phaseolusbean TEC	温帯性インゲン	I	C3	90*	90	4	0.3	7	32
Phaseolusbean TRC	熱帯性インゲン	II	C3	120	90	4	0.3	7	32
Soybean	ダイズ	II	C3	120	90	4	0.35	13	38
Rice	イネ	II	C3	130	100	5	0.3	13	36
Sweet potato	サツマイモ	II	C3	150	120	4.5	0.55	10	40
Cassava	キャッサバ	II	C3	330	180	3	0.55	10	35
Pearl millet	トウジンビエ	III	C4	90	70	4	0.25	15	45
Sorghum TRC	モロコシ	III	C4	120	90	4	0.25	15	38
Maize TRC	熱帯性トウモロコシ	III	C4	120	90	4	0.35	12	40
Sorghum TEC	温帯性モロコシ	IV	C4	110*	110	3	0.25	15	38
Maize TEC	温帯性トウモロコシ	IV	C4	110*	110	4	0.35	12	40

\*印の作物の標準生育期間Nは、生育期間中の平均気温によって変化する。この表に示された値は20℃の時のNである。春コムギ、温帯性インゲンは、平均気温が20℃から0.5℃低下することにNを6日間長くする。例えば、平均気温15℃の時、春コムギでは表に示されたN(20℃のN)が100日であるから、 $N=100+12 \times (20-15)=160$ (日)となる。ただし、Nは、春コムギで最大190日まで、温帯性インゲンでは最大180日までとする。温帯性モロコシと温帯性トウモロコシも春コムギ、温帯性インゲンと同様の方法を採用するが、この2つの作物では、20℃から1℃低下することにNを40日間延長する。また、これら2つの作物のNの最大は310日とする。

どによる潜在生産性の制限についてのクライテリアを与え、アジア太平洋地域をほぼ50kmメッシュに分けて地理情報システムを整備することにより、気候が変化した場合の潜在的生産量の変化を推定した。なお、地域の気候変化シナリオにはカナダの大循環モデル（CCC）の出力を用いた。図13には、アジア太平洋地域における冬小麦の潜在生産量変化の推定結果を示す。中国東北部、東南部、モンゴル、中央アジア、インド東北部からバングラデシュにかけて、大幅な潜在生産量の減少が予想され

る。表2は、検討した作物のうち7種類の作物について、現在と2100年の潜在生産量の変化をアジア地域の主要な国について推定したものである。小麦やトウモロコシについて、世界の主要な生産地となっている中国やインドなどで大幅な減産の可能性があるほか、ジャガイモやモロコシについても生産が大きく減少する可能性があることが示された。このような地球温暖化による穀物生産の減少は、今後のこの地域の人口の大幅な伸びを考慮すると、大きな政治的課題になることが予想される。

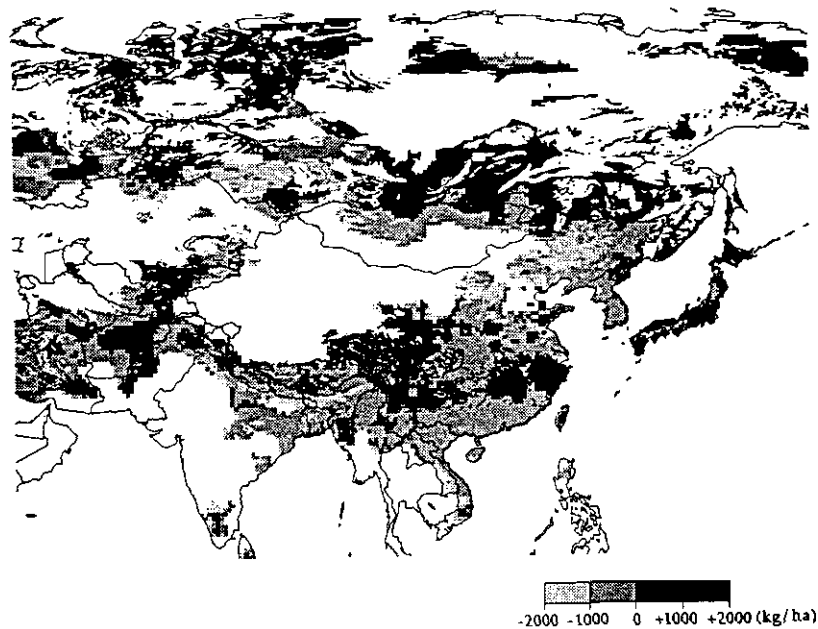


図13 気候変化に伴う冬小麦の潜在生産量の変化（2100年/現在）

表2 気候変化に伴うアジア地域の各国における主要な穀物の潜在生産量の変化

国名	現在と比較した2100年の増加率%						
	米	冬小麦	春小麦	トウモロコシ (温帯種)	モロコシ (ソルガム)	キャッサバ	ジュガイモ
バングラデシュ	3	-87	-	...	...	-	-5
ブータン	161	-40	-38	-16	1	-	-9
中国	10	-15	-21	-40	-54	28	-7
インド	-3	-55	-	...	...	5	-39
インドネシア	-2	-	-	...	...	-7	-11
日本	3	-5	-3	-51	9	-	-7
北朝鮮	0	-19	-6	-70	-87	-	-6
韓国	-3	-13	-4	...	...	-	-7
ネパール	-4	-52	-22	...	...	-	-29
タイ	-4	-	-	...	...	-24	-
ベトナム	0	-	-	...	...	-	-13

- : 現在、生産がほとんど行われていない地域

... : 生産がほとんど行われていないが、将来に熱帯性栽培種が生産可能な地域

温暖化影響モデルをこの地域の国々の具体的な政策立案に活用するためには、さらに質の高い地理情報を整備することが不可欠である。このため、中国自然資源総合考察委員会と共同で、中国の県単位の地域地理情報システムを整備した。今までに、人口や農業生産等の30種類のデータを、1987年から1990年の4カ年分用意し、データの整合性チェックを行った。図14はその一例であり、1990年のコメの生産量の出力である。これらのデータを用いて、中国の農業影響モデルの精度を高めることにしている。

一方、アジア地域の樹種のデータベースについても引き続き整備を進めた。これは、樹木の種ごとに名称、一般的特徴、平均直径、平均樹高、分布域、生育標高等を収録したもので、アジア地域各国の植物図鑑や辞典を収録し、これを計算機ファイルに入力している。これらのデータを用いてより精度の高い自然植生変化モデルを開発することになっている。

本年度は、農業影響に焦点を当て、穀物の潜在生産量の変化を予測するモデルを開発するとともに、温暖化影響の精度を高めるためにデータベースの整備を進めた。

来年度は、農業影響モデルをさらに発展させるとともに、中国の温暖化影響モデルの開発を進め、また、土地利用モデルの開発を開始する予定にしている。

## (2) 対策技術の評価に関する研究

前年度までに行ってきた対策技術関連の研究課題3課題を統合し、ライフサイクルの視点からみた技術評価を共通の目標として、重点研究課題として平成6年度から開始したものである。計13に及ぶサブテーマのうち、本研究所では、技術評価のためのライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量の分析、エコハウスの構築に関する技術的評価、エネルギー多消費型民生関連製品の技術評価、コンピュータ交通分野の車輛の社会的受容性、対策の総合評価手法の開発の各サブテーマを担当している。

技術評価のためのライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量の分析に関する研究では、個別のサブテーマで行う分野ごとの技術評価で共通して用いる資材や生産プロセスについてのCO<sub>2</sub>排出原単位（排出強度ともいう）を算定することが目的である。本年度はまず、新たに利用可能となった1990年産業連関表をもとに、その部門分類ごとに生産金

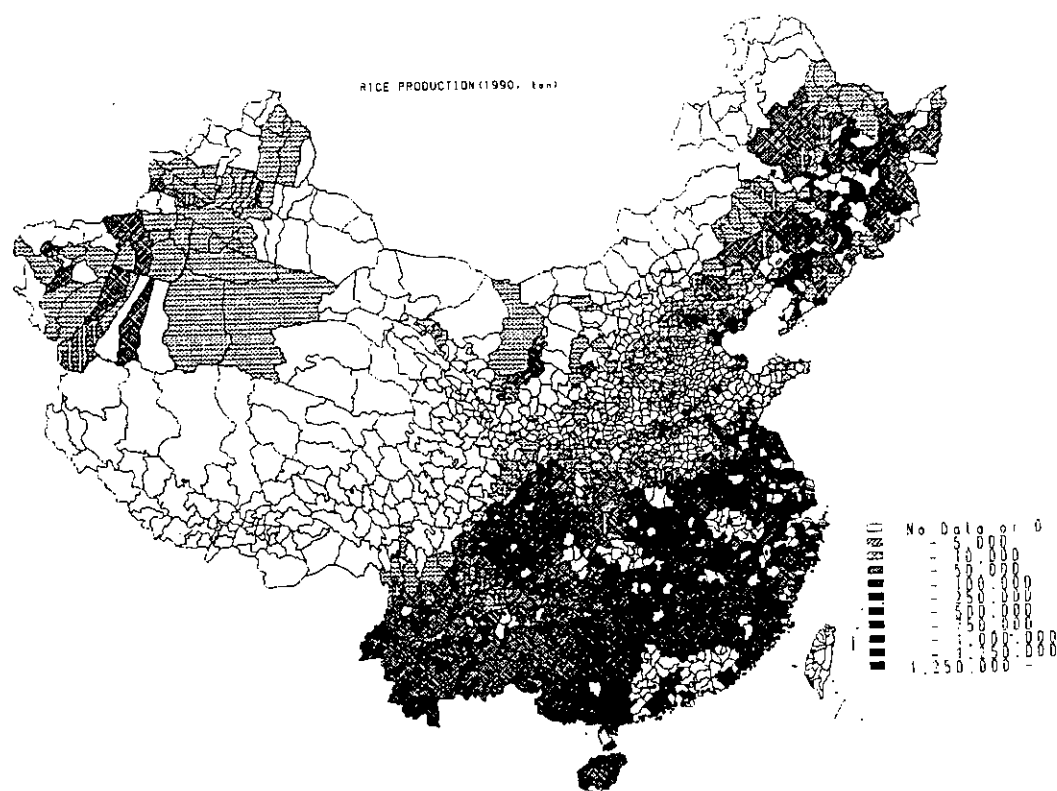


図14 中国地理情報システムの出力例（1990年の米の生産量、トン）



額当たりのCO<sub>2</sub>排出量（CO<sub>2</sub>排出強度）の算定を行った。部門別CO<sub>2</sub>排出強度はすでに1985年の産業連関表をもとに算定した実績があり、算定法の大略はこれと同じである。但し、気候変動枠組み条約に基づく温室効果ガス排出目録におけるCO<sub>2</sub>排出量算定法と整合させるため、石灰石起源の排出量の捕捉範囲を一部変更した。なお、1990年産業連関表に記述されたエネルギー消費量データと他のエネルギー関連の統計値とのクロスチェックを行い、整合のとれない部分はエネルギーバランス表や業種別統計によって一部修正を行うことにより、精度の向上を図った。また、1975年から1990年までの5年ごと4時点について、接続産業連関表等を用いて部門別の排出強度と各部門の最終需要による誘発排出量の経年変化を算定し、サービス関連の排出シェアが増大していることを明らかにした。こうした計算値は国内での産業構造やエネルギー需給構造を基礎にしたものであるが、原材料や製品の輸入の増大に伴い、ライフサイクル評価に海外で生産される際の実際のCO<sub>2</sub>排出量を反映させる必要性が増している。このため、99%を輸入に頼り、精錬のために多大な電力消費を要するアルミニウムについて、生産地域別の電源構成を反映させたCO<sub>2</sub>排出原単位を求めた。その結果、図15に示すように、石炭火力を主電源とする豪州産のアルミニウムの排出強度は、南米など水力発電を主体とする地域の原単位よりもはるかに高く、アルミニウム輸入全体に占める豪州のシェアの増大とあいまって、輸入アルミの排出強度を押し上げることに大きく寄与している。この問題は、国内の排出量には影響し

ないが、温室効果ガスの排出抑制が全球的課題であることを考慮すれば、アルミニウムへの大幅な材料転換を含むような対策技術の評価においては留意すべき問題である（図15）。

エコハウスの構築に関する技術的評価に関しては、室蘭並びに仙台において構築されているモデル住宅でのデータ収集を継続的に実施し、エネルギー性能評価を行った。また居住性の評価を温感工学的手法を用いて行った。エコハウス要素技術評価に関しては、パッシブソーラー、アクティブソーラー、クーリングシステム、室内通風等を利用した居住性の改善とエネルギー削減の検討を行った。地域特性評価に関しては、北海道で普及促進が進んでいる高断熱・高気密住宅が必ずしも本州方面でそれほど普及していない原因として、夏季の高温多湿時における居住性への懸念があるとの現状を踏まえ、主に夏季を中心に各種住宅について温湿度自動測定装置を用いた実測調査解析を実施した。二酸化炭素発生評価に関しては、家庭用エネルギーの消費の現状調査、120m<sup>2</sup>程度の実用的な高断熱・高気密戸建住宅における省エネルギー性能評価、省エネルギー機器の効果に関する評価、LCA的観点からの構法評価等を実施した。今後はエコハウスをエココミュニティとの関連で検討、評価することが課題である。

エネルギー多消費型民生関連製品に関する技術評価を実施するために、民生部門の業務用、家庭用の製品をエネルギー消費の観点から分類・整理し、多様な企業統計、業界統計、産業統計などを基にデータ収集を実施した。

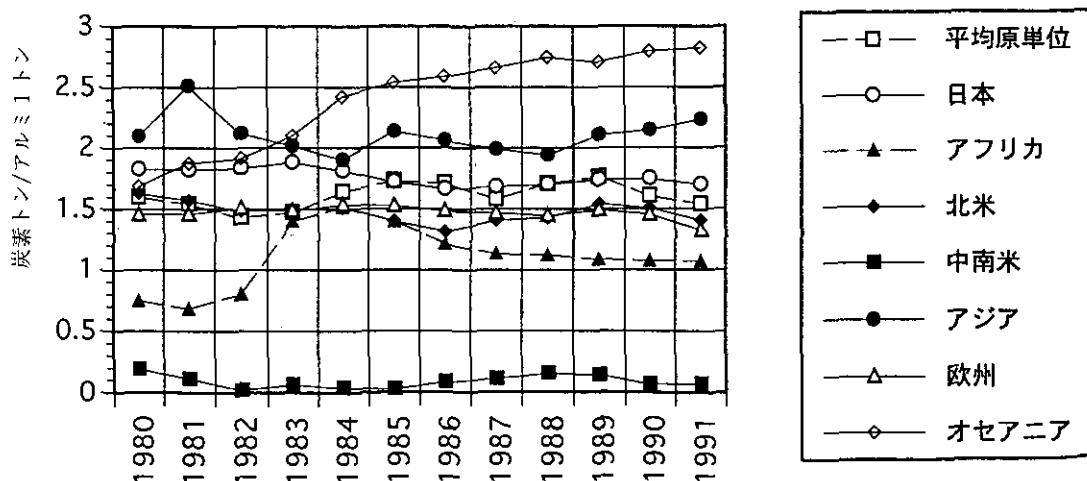


図15 アルミニウム単位生産当たり二酸化炭素排出原単位の地域別比較

次年度以降、これらのデータを解析し、エネルギー多消費型製品群の同定、業務部門と家庭部門の比較、経年変化の把握等を行う。また、エネルギー消費データの存在しない商品群については、関連データから間接的に推定することを試みる。国内のトータルで大型原子力発電1基分以上の電力を使用し、エネルギー多消費型の民生製品の1つと目されている飲料用自動販売機を対象に、ライフサイクルエネルギーの解析に着手した。通常の自動販売機は700近い部品からできており、その多くは下請け工場で生産されている。生産に関するデータは下請け部品工場およびメーカー組立工場の協力を得て収集している。一方、自動販売機の使用（供用）時のエネルギー消費は電力のみであり、耐用期間や冷凍機などの使用部品の仕様からエネルギー消費の概要は推測できる。例えば、一般的な冷蔵清涼飲料水の自動販売機が使用時に消費する平均電力の内訳は、冷凍機：209W（50%）、凝縮器側ファン：39W（9%）、冷却器側ファン：20W（5%）、照明：129W（31%）、その他：21W（5%）である。これらの値は機種や外気の状態によって異なるため、各地での実測も予定している。今後、自動販売機のライフサイクルを通じたエネルギー消費の実態を明らかにし、効率的な改善に結びつく対策技術の模索とその評価を行う。

### （3）電気自動車導入のための基本的性能の評価に関する研究

コモーター交通分野の車輛の社会的受容性に関する研究については、特に電気自動車をコモーターレベルの交通分野に普及するために残された技術的問題を中心に検討した。ここではまず、この分野に適用可能な電気自動車で得られる性能評価を行った。その前提として、投入できる新しい技術の検討を行った。その技術としては、新しい方式の駆動装置とフレーム構造を取り上げた。駆動装置は小型・高効率のブラシレスDCモーターに遊星歯車による減速装置、ベアリングおよびドラムブレーキを取り付けたもので、駆動部分の重量が25kg、最大トルク6.5kg、最高回転数8500回転でギア比が5の特性を持っている。フレームはアルミ押し出し形成技術を用いて構造体と電池収納容器を一体で作るバッテリービルトイン式フレームと名付けたものである。これらの技術を用いて二人乗りのコモーターカーの基本設計を行い、かつ性能評価シミュレーションモデルを開発した上で、その性

能の予測値を求めた。その結果、エネルギー密度32Wh/kgの電池を300kg積むものとして、時速100kmでの一充電走行距離が130km、10モード走行では170km、最高時速が150km、0～400m加速時間が17.1秒という値が得られた。もしこの性能が予測通り実現したとすると、市街地走行における一充電走行距離、最高速度、加速度は実用上問題がない。ただし、長距離を高速走行する際の実用性には欠ける。この問題を解決するには、スーパーエアロダイナミックアンドハイブリッドという概念が有効であると結論できる。これは車体の後ろにトレーラー形式でハイブリッドシステムのエンジンを直結するとともに、ここに車体全体の空気抵抗を著しく低下させるための空力処理を施すものである。

対策の総合評価手法に関する研究では、研究課題全体の視点であるライフサイクル分析についての共通の枠組みの設計と共通の問題点の検討を行う計画である。本年度は、ISO（国際標準化機構）等におけるライフサイクルアセスメントの検討状況について情報収集を行い、検討すべき問題点を整理した。主な検討課題には、分析の境界の設定法、主産物と副産物、あるいは多数の連産品の間における排出量の分配方法、リサイクルされる資材に対する初期投入エネルギーの分配方法などである。

### （4）植物生態系への影響予測に関する研究

温暖化が防ぎきれなかったときにどのような影響が出てくるかについて、植物生態系への影響の研究を紹介する。この研究では気温上昇と二酸化炭素濃度の増加などによって植物固体や植生にどのように影響を及ぼすかを分析している。平成5年度から我が国を含めたアジア太平洋地域に調査域を拡大して以下の研究を行っている。

#### 1) 植生に及ぼす影響研究

平成7年3月23日から29日までの間、中国科学院植物研究所より研究員1名を当研究所に招へいし、温暖化による植生シフトのモデリング、純一次生産力（NPP）のモデリング、今後の国際協力のあり方などについて協議した。また、中国科学院植物研究所によって作成されたメッシュ形式の気候データおよび植生データを用いて、植生分布を気候条件により、推定するモデルを作成した。ロボックによる中国の温暖化シナリオは等価二酸化炭素量が2倍になる時期の地域的な気候条件を2種類の状況で考えるもので、シナリオAは年平均気温2度上昇、降

水量20%増加、シナリオBは年平均気温4度上昇、降水量20%増加となっている。その結果、①北部に分布する針葉樹林域は、最適生息地が北方に移動するのに伴い、中国内では大幅に減少する、②東部に分布する広葉樹林域はシナリオAで約3度、シナリオBで約5度、北方にシフトする、③西部に分布する砂漠地域が拡大し、ステップ及びサバンナが減少する、と予測された。

また、高温・多湿な熱帯東南アジア域に分布する熱帯雨林は、多くの野生生物の安全生息場所であり、豊富な木材資源の宝庫でもある。また、活発な光合成活動を通じて地球の炭素バランスに大きな影響を与えている事が予想される。一方、この地域は人口爆発と経済成長の著しい地域で、熱帯雨林の将来が危ぶまれている。

東南アジアにおける純一次生産力に関する研究では、平年気候データ、CO<sub>2</sub>、倍増データ (GISS, GFDL, UKMO) 及び筑後モデルを用いて、この地域の自然植生の生産力と生産量への気候変化と土地利用の影響を評価した結果、①平年気候条件での、熱帯東南アジアの自然植生の純一次生産力の域内平均値は26.6t/(ha・yr)で、ポテンシャル生産量は77.6億t/yrとなった。これは陸地全体の5.7%に相当する。②気候帯の移動に植物種が追従して移動すると仮定すると、二酸化炭素の倍増による温暖気候下では、この地域の自然植生のポテンシャル生産量は、UKMO-モデルで8%、GFDL-モデルで16%、GISS-モデルで20%増加する可能性のあることが分かった。③植物生産への土地利用のインパクトを評価するために、インドネシア共和国について計算を行った。その結果、植物生産量(実生産量)はポテンシャル値(48×10<sup>8</sup>t/yr)の89%に低下していると予想された。

生物季節現象への影響研究は、我が国の1953～1990年の生物季節(開花・発芽・紅葉・落葉日)と緯度・経度・海拔高度、年平均気温(1951～1980年)との関係を調べた。既に緯度、経度、海拔高度、海岸からの距離、湿量指数、寒さの指数、積雪深、最高・最低・平均気温を用いた式が知られているが、それぞれの植物季節について検証した。年平均気温と緯度との関係が深く(図16)、緯度、経度、海拔高度の3要素の関係では、相関係数はさらに高く、 $r^2=0.976$ 、重回帰式は $y=38.494-0.967\phi+0.076\lambda-0.06h$ となり、北に緯度1度シフトすると0.967℃気温は下がり、東に経度1度で0.076℃上がり、海拔1m上がる毎に0.06℃下がる。つまり年平均気温1℃上昇すると緯度約1度北へシフトすることになる。

生物季節と緯度の関係は非常に高く、種によってシフトする速度が異なる。生物季節と緯度、経度、高度の関係を表3に示す。ソメイヨシノの開花日で見ると、緯度1度北に1度シフトすると4.6日遅くなり、東に1度シフトすると0.56日早くなり、海拔高度1m上がると0.012日遅くなる。ウメは北に1度で13.123日も遅くなり、東1度で2.076日早くなり、海拔高度1mで0.055日遅くなる。その他、タンポポ、アジサイ(装飾花)の開花、イチョウの発芽が緯度、経度、高度との相関が高い。アジサイ(真花)、ノダフジ、サルスベリは、緯度のみの相関が高く、ツバキ、ススキ、ヤマハギは緯度、高度との相関が高く現れる。イチョウ、カエデの紅葉・落葉日は緯度、経度、高度との関係は高く、イチョウは北へ1度で4日早く、経度1度で1日遅く、海拔高度1mで0.02日早くなる。カエデは北へ1度で約6日早く、東1度で約2日遅く、海拔高度1mで0.04日早くなる。開花・発芽日とは逆の傾向が現れる。図17はアジサイ(真花)と緯度との関係を示す。このように緯度、経度、高度、年平均気温からそれぞれの生物季節との関係式が表され、中国や韓国の生物季節分布域と年平均気温が分かれば、生物季節現象予測はできる。このように緯度、経度、海拔高度を用いたホプキンスの法則を、韓国を含めた広い地域の関係式を再検討中である。図18にサクラの開花日と3月の月平均気温との相関係数の分布を示す。アジア地域の低緯度地方には四季がないので、乾季と雨季の変動の出現状況をとらえエンソとの関係をみた。低緯度地方では温度よりも降水量の年変化に規定される。我が国のサクラの開花日の遅速と5回の典型的なエンソとの関係を表4に示す。

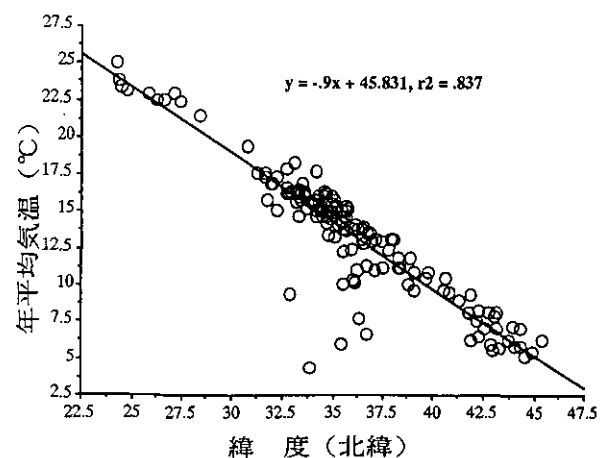


図16 緯度と年平均気温との関係

表3 日本における生物季節と緯度、経度、高度の関係

$$y = a + b\phi + c\lambda + dh \quad \{\phi : \text{緯度}, \lambda : \text{経度}, h : \text{海拔高度(m)}\}$$

y (日)	a	b	c	d (m)	r <sup>2</sup>
平均気温 (平均値)	38.494	-0.967	0.076	-0.060	0.976
ウメ開花	-135.576	13.123	-2.076	0.055	0.863
タンポポ開花	85.572	11.843	-3.153	0.033	0.739
ツバキ開花	-266.371	8.765	-	0.085	0.564
アジサイ (装飾花)	127.499	6.181	-1.376	0.029	0.889
アジサイ (真花)	-20.414	5.364	-	-	0.843
ノダフジ開花	77.588	5.481	-	-	0.924
ソメイヨシノ開花	3.201	4.746	-0.572	0.012	0.929
ソメイヨシノ満開	13.711	4.121	-0.438	0.010	0.910
ヤマツツジ開花	91.825	4.405	-0.977	-	0.565
イチョウ発芽	27.864	3.908	-0.469	0.012	0.835
サルスベリ開花	84.349	3.649	-	-	0.719
ススキ開花	353.87	-2.814	-	-0.042	0.638
ヤマハギ開花	337.35	-2.717	-	-0.036	0.370
イチョウ黄葉	303.126	-4.263	1.210	-0.022	0.667
イチョウ落葉	322.879	-4.417	1.123	-0.023	0.770
イロハカエデ紅葉	278.166	-5.571	1.777	-0.039	0.721
イロハカエデ落葉	337.627	-5.847	1.545	-0.037	0.787

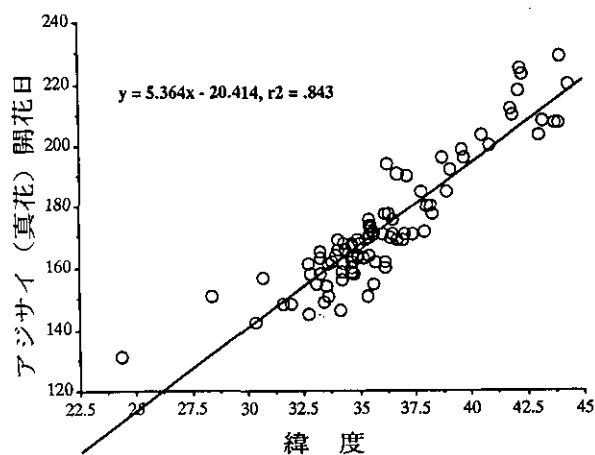


図17 緯度とアジサイ (真花) 開花日との関係

温暖化が陸水生態系に及ぼす影響予測手法の研究については、湖沼の水温分布を予測する鉛直一次元水温予測モデルを、これに対応した水界生態系モデルを作成し、複数の湖沼に対してその適合性を検討した。さらに、このシミュレーションモデルを用い、気温上昇した場合の将来予測を行うため、まず栃木県日光にある湯の湖を対象に4年間の流入・流出水量、流入水温、および気温、風速などの気象データを入力してモデル計算を行った。その結果、表層及び底層の水温変化を図19に示す。水界生態系モデルも同様に表層・底層の植物プランクトン及

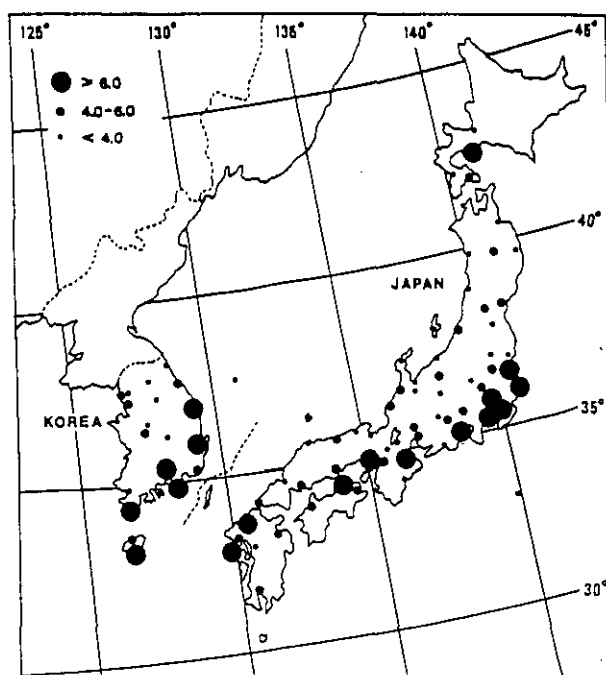


図18 サクラ (Prunus yedoensis) の開花日と3月の月平均気温との相関係数の分布

び溶存無機態リンの経日変化を図20に示す。次に鉛直一次元水温予測モデル及び水界生態系モデルを用い、湯の湖において気温及び流入水温が上昇したと仮定した場合の将来予測を行った。その結果、①気温1℃上昇すると、表層は0.5～1℃、底層は0～0.5℃上昇している。特に

表4 エル・ニーニョ年とラ・ニーニャ年におけるサクラの開花日の遅速の出現地域数

サクラの開花日	エル・ニーニョ年*	ラ・ニーニャ年**
かなり早い	18	0
やや早い	30	5
平年並(偏差-)	9	5
平年並(偏差+)	5	18
やや遅い	3	23
かなり遅い	0	14
合計***	65	65

注: \*エル・ニーニョ年は、1972、1976、1977、1982、1987年とした。

\*\*ラ・ニーニャ年は、1965、1970、1974、1975、1988年とした。

\*\*\*日本は15地域に気象庁のサクラ開花予想において区分されている。

ただし、九州南部と沖縄・奄美は資料の関係で省いたので、13地域×5=65となる。

表層は夏季の成層期に、底層は循環期に最も水温の上昇度が高く、 $\text{km}^2$ 成層期はより成層が安定する傾向を示した。②生態系においては、地球温暖化による気温上昇により、成層化が促進されるため、秋口の循環開始時期より高い植物プランクトンの増殖が見られ、循環開始時期の植物プランクトンによる水質悪化がより促進される可能性が示唆された。

## 2) 植物に及ぼす複合影響に関する実験的研究

二酸化炭素( $\text{CO}_2$ )など地球温暖化ガスの濃度増加と、それらによって引き起こされる気温上昇、乾燥化、大気汚染ガス濃度増加などの種々の環境変動が、陸上植物の栄養生長や生殖生長に及ぼす、単独及び複合影響について解明することを目的としている。本研究では、植物実験用環境調節装置を用いて、これらの環境要因を制御し、農作物を始めとする種々の植物の生長や生

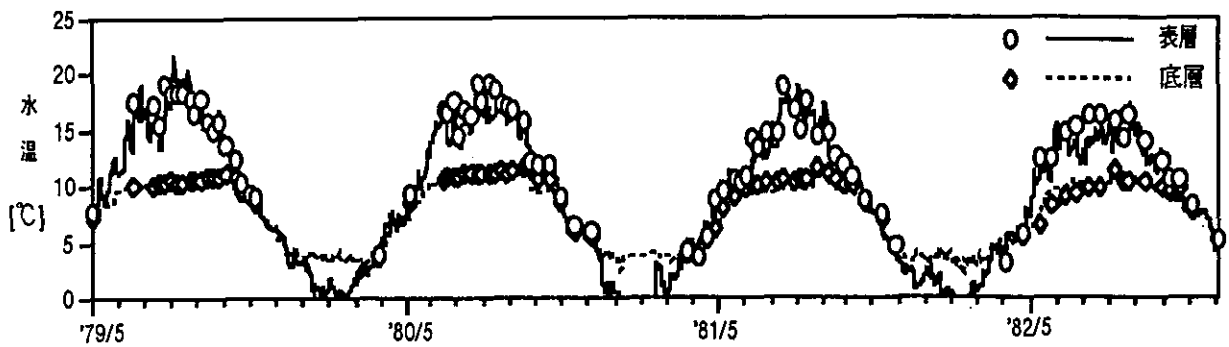


図19 湯の湖の水温変化(実線:計算値, 破線:実測値)

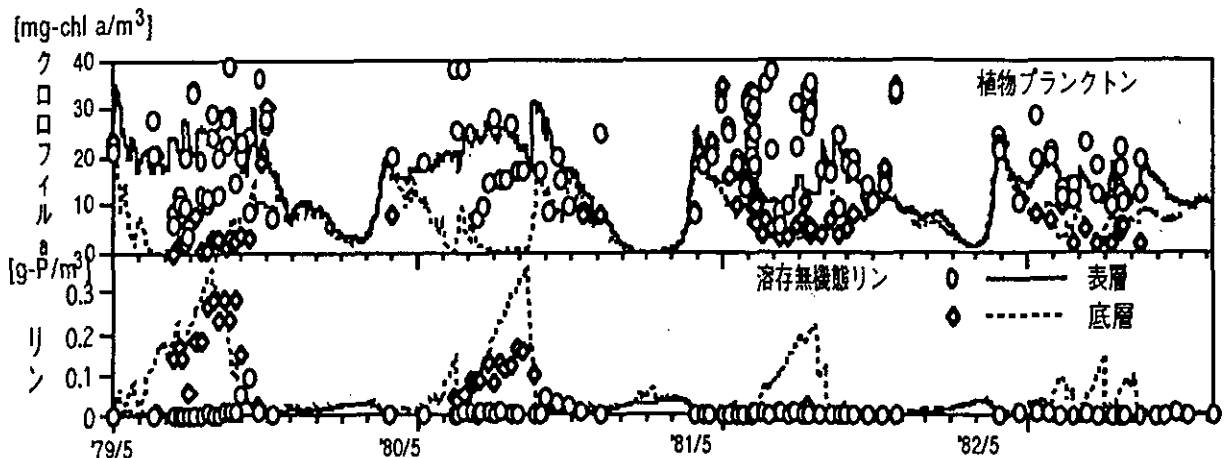


図20 湯の湖の植物プランクトンと溶存無機態リン

理機能に及ぼす影響を実験的に定量解析し、評価することを試みている。

昨年度新設された、CO<sub>2</sub>濃度や温湿度を広範囲で制御可能な人工光型環境制御室内に、液耕培養装置など複合影響研究用に構築した実験システムを設置し、種々の農作物の栄養生長に及ぼすCO<sub>2</sub>濃度と乾燥化の単独及び複合影響について検討した。実験材料としては、ハツカダイコン、ハクサイ、トマト、ナス、ピーマン、トウモロコシなどの農作物を用いた。環境制御室内の環境条件を、明期/暗期：14時間/10時間、照度：500 μE/m<sup>2</sup>/s、気温：25℃に設定し、CO<sub>2</sub>濃度：500ppmまたは1000ppm、相対湿度：37%または79%に各々設定して、5～10日間、生長実験を行った。高CO<sub>2</sub>濃度処理で、これらの植物の栄養生長は促進され、一方、乾燥化によって栄養生長は抑制された(図21)。しかし、両要因の間に複合的な効果は認められなかった。生長解析の結果、高CO<sub>2</sub>による相対生長率(RGR)の増加は、純同化率(NAR)の増加によっており、葉面積比(LAR)は、むしろ低下していた。一方、乾燥化によるRGRの低下には、NARとLAR両方の低下が影響していた。C<sub>4</sub>植物であるトウモロコシでは、他の植物に比べ、高CO<sub>2</sub>及び乾燥化のどちらの影響も小さかった。

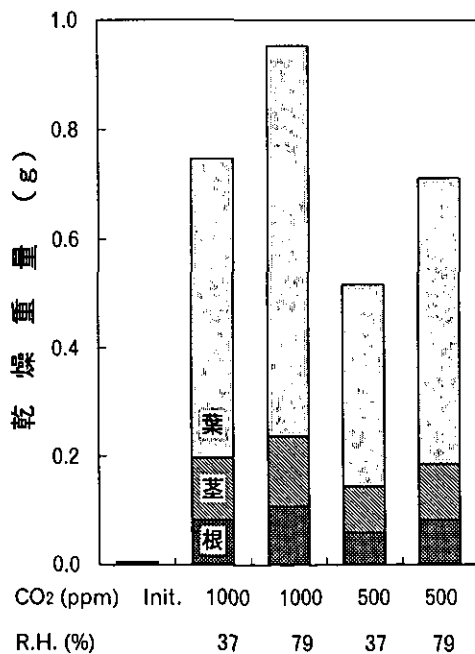


図21 ナスの乾燥成長に及ぼすCO<sub>2</sub>濃度、湿度の影響  
CO<sub>2</sub>濃度：500ppm/1000ppm、相対湿度：37%/79%、10日間処理。Init：初期値

一方、植物の生殖生長に及ぼす地球温暖化の影響を検討するために、2品種のイネ(アキヒカリ、コシヒカリ)を材料として、気温上昇の影響について検討した。出穂期まで育成したイネを、気温：26℃、相対湿度70%に制御した自然光型環境制御室に搬入し、36.5℃、38.0℃、39.5℃の高温処理を8日間(6時間/日)行った。両品種共、開花期の気温上昇によって受精率は低下した(図22)。アキヒカリの方が高温影響を受けやすく、50%不稔の気温はコシヒカリより2℃ほど低かった。高温条件下で、柱頭での付着花粉数や花粉発芽率を調べると、コシヒカリに比べて、アキヒカリの方が付着花粉数が少なく、両品種における開花期の高温感受性の差異はこのことに起因していることが推察された。

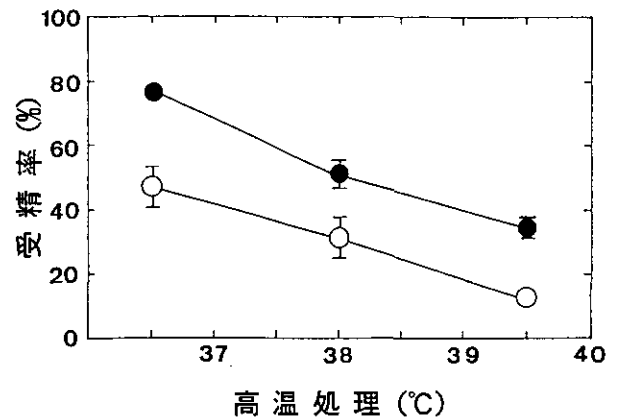


図22 イネ2品種の穎花の受精率に及ぼす高温の影響  
高温処理：36.5℃、38.0℃、39.5℃、8日間(6時間/日)。  
○：アキヒカリ、●：コシヒカリ

### (5) 健康影響に関する研究

#### 1) 暑熱による生体防御系と代謝解毒系の変動と疾病発生に関する研究

地球温暖化に伴い夏期の猛暑が著しくなると予想されているため、直接的健康影響として暑熱による熱ストレスが重要なリスク因子と指摘されている。夏期の猛暑は、アメリカ合衆国、中国、インド等大陸内部諸国や中緯度高気圧帯において著しい。中国においては、南京、武漢等の中南部の都市は、夏期の猛暑が頻繁に襲来する地域として有名である。このため暑熱による健康影響に関する疫学調査を、南京と武漢の研究グループと共同して実施している。

海洋性気候の日本においても、ヒートアイランド現

象の著しい大都市を中心に、夏期の暑熱が著しくなりつつある。特に1994年夏は数年来の猛暑を記録したため、その影響の著しかった東京における夏期の暑熱と熱射病発生との関連について疫学的解析を開始している。

これらの猛暑の状況にIPCCの夏期の気温上昇予測(BaU)を加味したモデル実験を行い、暑熱負荷がもたらす細胞病理学および免疫生化学的影響について解明しつつある。

日本においては、1993年は冷夏であり熱ストレスは少なかったが、1994年は猛暑となり著しい熱ストレスがあったと予想された。このため東京において、夏期の気温と熱射病患者の発生との関連資料を収集し疫学解析を行った。その結果、比較的空調設備の整った大都会である東京においても、ある閾値を超えた気温の上昇に比例して熱射病の発生がもたらされることが明らかとなった。

特に著しい熱射病の発生事象(10名を超える熱射病患者の搬送)は、平均気温で約30℃、最高気温で約34℃を超える猛暑の時期と一致している。また1994年において最大の熱射病患者が搬送された日は、平均気温が32℃、最高気温が36℃を超える猛暑の時期に一致していた。

東京に比べより激しい猛暑が襲来する中国南京市における調査によると、平均気温が連続して30℃を超えはじめると熱射病患者の発生が観察されている。特に数日連続して32℃を超える猛暑の時期には、著しい熱射病患者が発生するとともに、症状が重篤で熱射病患者の死亡の急増が観察されている。

東京において熱射病の発生が観察される閾値の気温は、中国南京市において熱射病患者の発生が急増する閾値の気温と類似しており、適応との関連を踏まえ、今後より詳細な解析を進めていく必要があることが判明した。

中国と日本において夏期の熱ストレスによる健康障害が観察された時期の平均気温がいずれも32℃付近にあることが判明したため、この閾値温度にIPCCの2030年の上位昇温予測値を加味し、平均気温35℃前後、湿度50±10%の人工環境下におけるモデル実験を実施している。実験動物に暑熱負荷を加え、熱射病の症状である高体温症の発症した際の個体への影響を、細胞病理学的検索と並行して免疫生化学的側面について検

討し、健康障害の発生機構を解析している。

疾病発生に深く関与する免疫系に対しては、熱ストレスの影響が強く反映し、免疫担当細胞の数や増殖活性の低下がみられるため、液性免疫応答の面より検討を進めている。一次抗体応答においては、暑熱負荷によりHVJ抗原(マウス・ラット等に肺炎を引き起こすウイルス)に対するIgG型抗体産生の抑制傾向が見られ、IgG型抗体産生に関与するヘルパーT細胞の胸腺の組織傷害に伴う変化が示唆される。(図23)

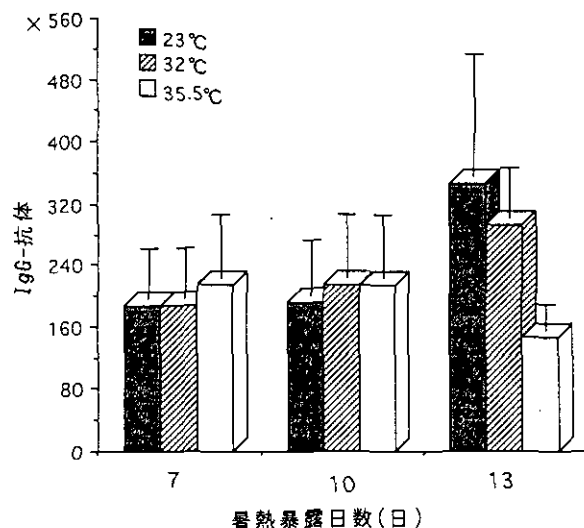


図23 暑熱暴露時のHVJ抗原に対する一次抗体応答の経時変化

さらに二次抗体応答においても、暑熱負荷によりHVJ抗原に対するIgG型抗体産生の抑制が起こり、ウイルス抗原に対する抗体産生の追加免疫効果の抑制が観察される。マウスの暑熱負荷によるウイルス抗原に対する液性免疫能の低下は、熱ストレスによって免疫担当臓器である胸腺と脾臓重量が減少するなかで、抗体産生に関与するメモリーB細胞の増加とプラズマ細胞への分化およびこれらが機能するのに必要なヘルパーT細胞への影響が予想される。(図24)

暑熱ストレスの結果副腎皮質ホルモン的一种コルチコステロンの誘導が起こり、暑熱負荷1日後にピークとなり、10日間の間合成が誘導される傾向がみられた。コルチコステロンは免疫能を抑制することが知られており、今後免疫能の低下との関連についてさらに検討を進める必要がある。(図25)

今後中国および日本における夏期の暑熱による健康

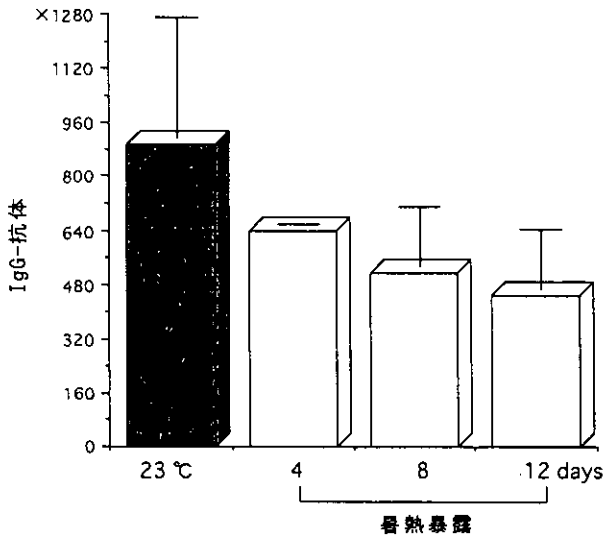


図24 暑熱暴露時のHVJ抗原に対する二次抗体応答の経時変化

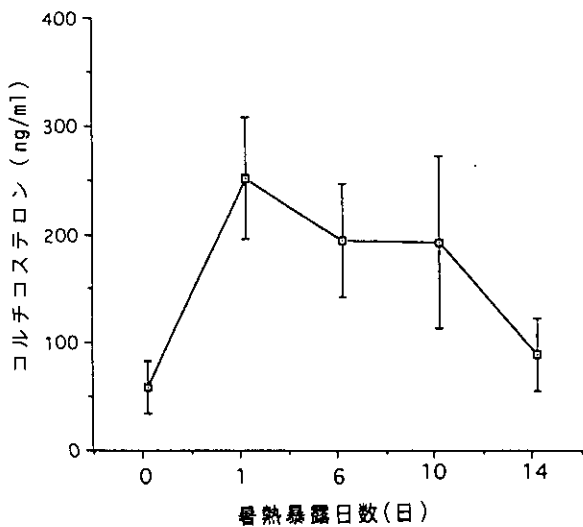


図25 暑熱暴露時の副腎皮質ホルモン(コルチコステロン)の誘導

リスクに関する詳細な疫学調査を進めるとともに、人工環境制御化下のモデル実験によって高体温症を再現し、熱ストレスによる健康障害の発現機構を解明していく予定である。

## 2) 東アジア地域におけるマラリアの拡大予測に関する研究

温暖化による影響を予測するための基礎資料となる、マラリア及び媒介蚊の地理的分布と気象条件との

関連を明らかにするために、前年度に引き続き、①中国雲南省における現地調査と、②現在の沖縄における媒介蚊の分布調査を実施するとともに、新たに、③中国国内各地のマラリア流行及び媒介蚊分布に関する統計資料の収集を行った。

中国雲南省における現地調査については、東アジア地域における現在のマラリア(熱帯熱マラリア, *P. falciparum*)分布の北限の一つといわれている中国雲南省で、流行情度の異なる3地区(高流行~低流行~非流行)を選び、中国側研究機関の協力を得て1992年9月より3年間にわたってマラリア流行及び媒介蚊の生態について現地調査を実施中である(図26)。地理的条件、気象条件の異なる複数地域における継続調査により、マラリア流行と媒介蚊の生息密度と各種環境要因との関連を、季節変動に基づいて明らかにすることが可能と思われる。

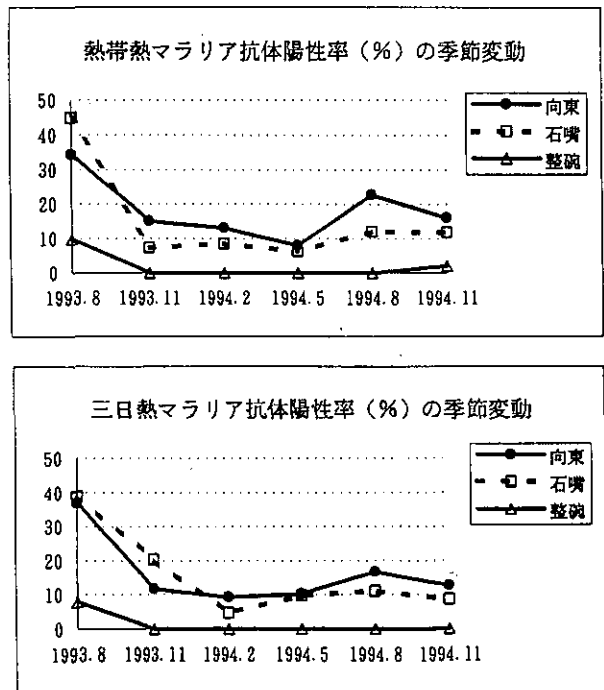


図26 マラリア抗体陽性率(%)の季節変動

マラリア流行と環境要因との関連に関する Ecological Study に関しては、中国南部3省・自治区(雲南省, 広西自治区, 海南省)の約70地区(township 単位)で過去10年間のマラリア流行, 媒介蚊生息密度及び気象データに関する資料, 並びにその他関連資料を収集し, マラリア流行と環境要因との関連を, 生態学



的な視点から解析中である。

日本におけるマラリア媒介蚊の実態並びに生態調査に関しては、我が国における主要マラリア媒介蚊の一種である *A. minimus* について、国外調査では実施困難な、詳細な生態調査を実施し、媒介蚊の生息密度と生息域の微小環境を調査し、媒介蚊の生息・成長を規定する要因の解明をを明らかにするための検討を行っている。

最終年度へ向け、マラリア流行域の拡大を予測するために、マラリア流行モデルについて検討を行った。

#### (6) 地球温暖化抑制のための汚水・廃棄物処理処分システムの確立と評価に関する研究

生活排水等の処理に伴い発生する温暖化ガスのうち  $N_2O$  については従来の好気処理に嫌気過程を組み合わせることにより発生抑制が可能であることが明らかになったが、運転条件の最適化については今後の検討が必要である。廃棄物埋立地については嫌気性埋立法と浸出水を循環させる管理手法を組み合わせることが埋立地からの  $CH_4$  発生量を増加させる上できわめて有効であることが明らかになった。家庭から廃棄させるプラスチック類のリサイクルについては各種のリサイクル方式を仮定し、そのライフサイクルエネルギー消費を比較検討することにより基礎的な知見の集積を行った。

温室効果ガスの発生抑制対策として、汚水、汚泥および廃棄物処理・処分システムを適正に構築することを目的として温室効果ガスの発生割合の低い汚水処理プロセスおよび廃棄物埋立プロセスの開発、家庭からの廃棄物の中で近年特に問題となっているプラスチック包装材の望ましいリサイクル方式の選定について基礎的な知見を得るために昨年度に引き続き検討を行った。

$CH_4$ 、 $N_2O$  などの温室効果ガスは生活排水および畜産排水を含む産業排水の処理施設から大量に発生していると考えられるが、これらの放出実態および抑制手法についてはほとんど明確にされていない。この場合  $N_2O$  は窒素の硝化および脱窒過程で生成されるといわれているが、前年度までの集合住宅の排水を処理する実処理施設における放出実態調査および室内実験から、生活排水処理の場合、嫌気性条件下で起こる脱窒過程は  $N_2O$  の生成に対してそれほど重要ではなく好気

性条件下で起こる硝化過程が重要であると考えられた。この場合、共存する硝酸塩濃度が大きく影響しており、その濃度が高いほど  $N_2O$  の放出量が増加する結果となった。つまり生活排水処理に伴う  $N_2O$  の発生量を抑制するためには好気性条件下で処理を行うばっ気槽内の硝酸塩濃度を低く保つことが重要となり、何らかの脱窒過程（嫌気条件での処理過程）を組み込む必要がある。一般的な生活排水処理プロセスである標準活性汚泥法は連続的にばっ気を行う好気性処理であり BOD の除去を主たる目的としているが、近年、閉鎖水域等の水質保全のために窒素およびリンの除去が求められるようになり嫌気処理過程が組み込まれることが多くなった。これまで調査を行ってきた実処理施設は標準活性汚泥法に嫌気処理過程を組み込んだ一つ的方式である間欠ばっ気法で処理を行っており、これまでの調査からも間欠ばっ気処理は連続ばっ気処理に比べ  $N_2O$  の発生量が抑制されることが明らかになっている。間欠ばっ気法において効率的に窒素およびリンの除去を行うためには適正な好気/嫌気処理の時間配分が必要である。したがって本年度は好気/嫌気処理の時間配分と  $N_2O$  の発生量について検討を行った。上記処理施設の好気/嫌気時間配分を 30/30分、30/60分、30/90分に設定し、水質と  $N_2O$  発生量を測定した。

各設定時間における  $N_2O$  の発生量を大気中に放出されるものおよび処理水中に溶存した状態で系外へ流出していくものを総合的に評価し、流入下水  $1 m^3$  当たりへに換算した測定結果を図27に示す。 $N_2O$  の発生量はそ

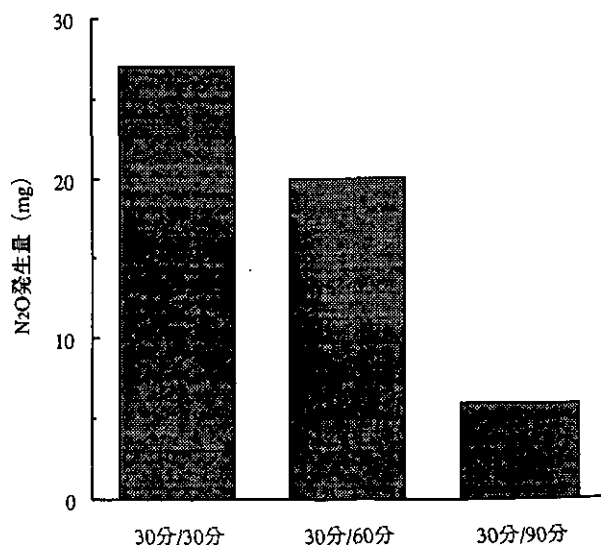


図27 流入下水  $1 m^3$  当たり  $N_2O$  発生量

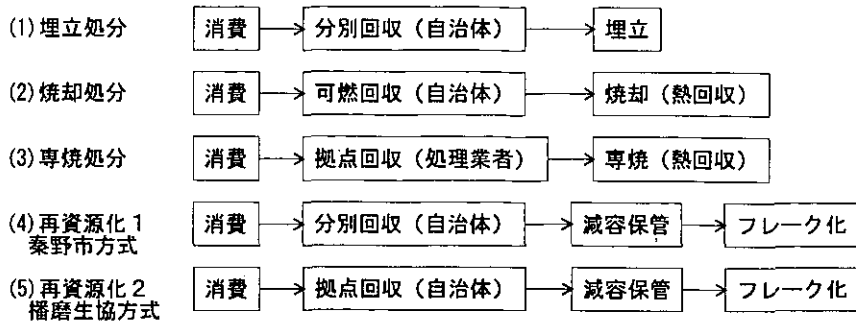


図28 PET ボトルのリサイクル代替案

れぞれ27, 20, 6 mgとなり嫌気時間が長くなるほど発生量は低下したが、窒素除去率は68, 76, 53%となり、今後は処理水質とN<sub>2</sub>O発生量の両面から運転条件の適正化を図る必要がある。

これまでコントロールおよび回収されることのなかった従来型の廃棄物埋立地から発生するCH<sub>4</sub>について昨年度まで、回収可能な埋立工法および埋立地管理方法を提案してきたが、本年度はこれらの手法によるエネルギー回収可能性と結果的に達成可能な地球温暖化の削減効果について解析的に評価した。その結果、廃棄物埋立地から発生が推定されるCH<sub>4</sub>を燃料として利用しCO<sub>2</sub>に変換して大気に戻すことによる温室効果ガス削減への寄与の割合は地球温暖化防止に無視できない程度の大きな効果を持つことが明らかになった。また、これらのCH<sub>4</sub>をガスエンジン燃料として発電した場合の電力エネルギー量の獲得量についても件とした結果、この方式が経済性のある技術になりうること、現行の生ごみ等の高含水量廃棄物の消却・熱回収によって得られるエネルギー回収量よりも大きいことが示された。

年々増加しているプラスチック包装材の望ましいリサイクル方式については今のところまだ意見の一致は見られていない。本年度はプラスチック包装材の中でも使用量が着実に伸びているPETボトルとSPSトレーに注目し各種リサイクル方式を想定し、それぞれのライフサイクルエネルギー消費を比較検討した。同じ方式であってもリサイクルの効率は地域の社会的状

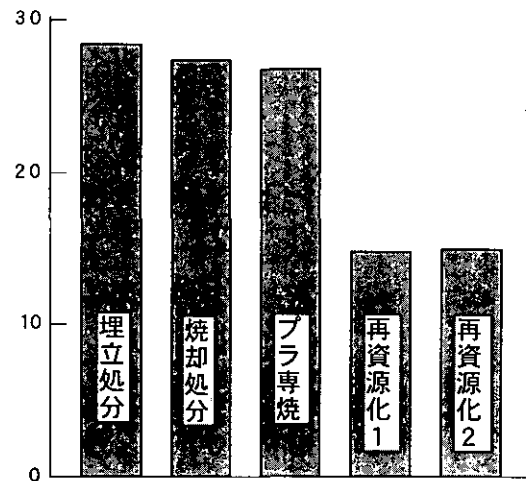


図29 PET ボトルのライフサイクル消費エネルギー (Mcal/kg)

況によって異なるためにここでは東京23区をモデル化した。PET ボトルについては図28のようなりサイクル方式を対象に、実在システムの調査とモデリングにより消費エネルギーを算出した。図29に結果を示す。収集方式に関係なく再資源化が(マテリアルリサイクル)が最も有効であり、消費エネルギーを埋立処理の約半分にする。一般ごみとの混焼や専焼(サーマルリサイクル)も効果はあるが、その程度はわずかである。PSPトレーについてもほぼ同様の結果が得られた。プラスチックのマテリアルリサイクルに関しては、再生品の品質向上、用途の開発および収集費用の低減が今後の課題である。

## 2.4 酸性雨に関する研究

### 〔研究組織〕

地球環境研究グループ	
統括研究官	安野正之
酸性雨研究チーム	○佐竹研一・畠山史郎
温暖化影響対策研究チーム	森田恒幸
温暖化現象解明研究チーム	向井人史
主任研究官	村野健太郎
地域環境研究グループ	
有害廃棄物研究室	西川雅高
化学物質生態研究室	笠井文絵
社会環境システム部	
情報解析研究室	清水 明・須賀伸介
化学環境部	
上席研究官	相馬光之
動態化学研究室	瀬山春彦・田中 敦
計測技術研究室	横内陽子
大気圏環境部	
大気反応研究室	福山 力
大気物理研究室	鶴野伊津志
水圏環境部	
水環境工学研究室	海老瀬潜一
土壌環境研究室	高松武次郎・服部浩之
生物圏環境部	
部 長	岩熊敏夫
分子生物学研究室	田中 淨
生態機構研究室	上野隆平
客員研究員 35名, 共同研究員 5名	

### 〔研究概要〕

酸性雨問題の原因は人類による化石燃料の大量使用にある。化石燃料の使用に伴って生成したイオウ酸化物、窒素酸化物などの酸性物質が森林や湖沼などの生態系や文化財等の人工物に被害を与えているのである。歴史をふりかえってみると産業革命を契機として石炭の大量使用の始まった英国でいわゆる酸性雨被害は著しく、人間及び自然に多くの犠牲が生じた。その後世界に広がった産業革命の波は酸性雨問題をはじめとするさまざまな公害問題を生み出した。そして、今や問題は地球的規模の広がりを見せ、大気を経由し国境を越えて移送される酸性物質が他国に大きな被害を与えるようになってきた。

その典型はスカンジナビア半島や中東部ヨーロッパまたは北米で1960年代以後問題視されるようになった森林の枯損及び及び湖沼、河川の酸性化による魚介類の死滅などである。

我が国でも酸性雨問題に関する関心の高まりとともに、全国各地で雨水の化学成分等の調査が行われた。その結果全国各地で欧米とあまり変わらない酸性雨が降っていることが確認され、さらに東アジア特に中国における化石燃料の使用量が著しく増加しているところからその影響が懸念されるようになってきた。

酸性雨問題は酸性物質の放出（生成）－降下・沈着－影響の諸過程、すなわち大気、森林、水、土壌などの自

然生態系を構成する諸要素ならびにそこで行われる物質循環に深く関係している。このため、酸性雨問題を理解し、その対策を考えるためには、これらの諸過程について研究を進め、理解を深めることが大切である。したがって、本酸性雨研究において設定された研究課題はいずれもこれに関係したものである。

平成6年度はこの研究の2年目に当たり、以下に述べる研究計画のもとで大気、植物、水、土壌などに関してそれぞれ次のような研究が行われた。

#### (1) 東アジアにおける酸性雨の動態解明に関する研究

ヨーロッパ大陸、北米大陸では前述したように酸性雨の被害が古くから顕在化していることもあって、酸性雨の大気中での反応、生成機構、その輸送プロセスなどかなり解明されている。我が国を含めた東アジア地域では酸性雨の動態はまだほとんど明らかになっていない。東アジア地域において地上の発生源から大気中へ放出されたSO<sub>2</sub>やNO<sub>x</sub>が大気中でOHラジカル等の過酸化物質と反応して硫酸や硝酸に酸化されるメカニズムと、それらがエアロゾルや雲に取り込まれて輸送され、地上へ到達するプロセスを明らかにするため、次の研究を行う。

さらに、日本、韓国、中国間の大気汚染物質の長距離越境汚染を明らかにするためにはシミュレーションモデルの開発が必要である。今後、このモデルの検証のために酸性雨モニタリングデータを収集するためにモニタリングネットワークを構築する。東アジア地域においてはSO<sub>2</sub>排出量も今後大きく増加するためシミュレーションモデルの基礎データとしてその将来予測を行う。また、日本、韓国を含む東アジア地域において、基礎データとしておもに家畜、肥料からのグリッド別NH<sub>3</sub>発生量マップの作成を試みる。

- 1) 東アジアにおける酸性雨及び関連物質の動態解明のための地上モニタリング及び酸性物質の沈着量マップ作成、硫黄、鉛同位体比測定による長距離越境汚染の解明
- 2) 東シナ海及び日本海上空での航空機観測とデータの解析
- 3) 地上モニタリング及び航空機観測のための微量酸性、酸化性物質計測システム及び構成システムの開発
- 4) 酸性、酸化性物質の物理的、化学的過程の研究
- 5) 東アジア酸性雨モニタリングネットワークの構築

6) 長距離越境汚染解明のためのシミュレーションモデルの開発

7) 東アジア地域におけるSO<sub>2</sub>排出量予測とアンモニア発生フラクスマップ作成

#### (2) 酸性物質の生態系に与える影響に関する研究

(酸性物質の植物環境系に与える影響に関する研究)

自然生態系は大気圏と岩石圏の境界に広がる生物圏の生態系、森林や湖沼や河川などの生態系の総称である。各々の生態系では生物を中心として土壌、水、大気の間で物質代謝が行われており、酸性物質の影響は生物の生存を支える環境要因に直接間接に及ぶ。酸性雨とその被害の関係を明確にとらえるためには、このような生態系構成要素ならびにその相互関係に関する基本的な理解が不可欠である。本研究では、このような点を考慮し、生物とその環境について特に酸性物質の影響という観点からその影響機構を解析する。また、酸性化に伴って変化する生態系の特色を知るために自然酸性環境にも注目し、研究を進める。さらに、本研究では、生態系に必要な生物地球化学的研究手法の検討開発を基礎にして、酸性雨被害の懸念される生態系及び典型的な酸性環境に分布する生物種ならびにこれらの生態系における物質代謝(イオウ代謝、窒素代謝、金属元素の代謝等)について研究し、酸性物質が与える生態系への影響を明らかにする。

本年度は以下に述べる課題を具体的に取り上げ研究を行った。

- 1) 植物環境系変化の指標となる生物地球化学的分析手法の開発検討に関する研究
- 2) 生態系における酸性雨関連化学種の挙動と影響に関する研究
- 3) 自然酸性環境の生態系に関する研究

#### 【研究成果】

##### (1) 東アジアにおける酸性、酸化性物質の動態解明に関する研究

###### 1) 地上観測に関する研究

東アジアにおける酸性、酸化性物質の動態解明のために、南西諸島(沖縄本島)、日本海(隠岐島)、および国内の適地(八方尾根、八甲田山)を選定し、雨水成分、エアロゾル成分、オゾン等の地上観測を継続している。さらに、酸性物質沈着量を求めるための大気汚染物質の

連続観測を国内7地点（福岡県等）で行った。S、Pb同位体比の測定を開始した。

### ①酸性物質沈着量マップ作成

大気汚染物質の濃度測定による乾性降下物の測定を行った。47mmのフィルターホルダーにフロロポアフィルター、 $K_2CO_3$ 含浸フィルター、燐酸含浸フィルターをそれぞれエアロゾル、 $HNO_3$ と $SO_2$ 、 $NH_3$ 捕集用としてセットした。年間の大気汚染物質（ $SO_2$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $HNO_3$ 、 $NO_3^-$ ）の濃度変動から、4季節の平均濃度が求められた。乾性沈着フラックスを求めるには、これに年間の平均の沈着速度を乗ればよい。 $SO_2$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $HNO_3$ 、 $NO_3^-$ の沈着速度は、それぞれ0.8、0.2、2.5、0.2cm/sを使用した。このようにして求めた大気汚染物質の4季節の沈着量を図1に示した。4季節の変動よりも物質による差異のほうが大きく、Sでは $SO_2$ が $SO_4^{2-}$ よりも非常に大きく年間平均でも10倍以上になっている。このため極論を言えば、 $SO_2$ のみを評価すればよいことになる。N系は $HNO_3$ が $NO_3^-$ の約7倍であり、これも $HNO_3$ を主に評価すればよいことになる。このように4季節の乾性沈着量が福岡において求められた。

### ②鉛同位体比を用いた大気汚染の長距離輸送に関する研究

大気中の鉛はその国や地域によって発生源が異なる。例えば、石炭使用の多い中国の都市では石炭の燃焼に伴って排出される鉛が強く鉛同位体比にも寄与している。本年度は貴州省貴陽市でのエアロゾルの捕集と鉛同位体比分析を行ったが、石炭特有の非常に新しい年代の鉛同位体比が測定された。これに対し、タイなどでは有鉛ガソリン中の鉛が強く大気中鉛に寄与しており、古い鉛鉱床の値になっている。このように、鉛同位体比はその都市特有の値を示す。

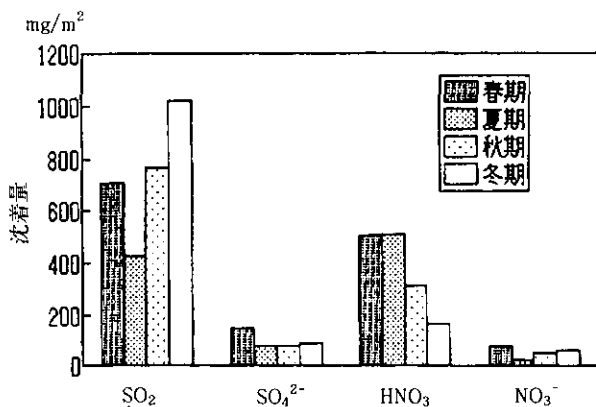


図1 年間の大気汚染物質の乾性沈着量

隠岐島において、各季節にエアロゾルを捕集しその時の鉛同位体比と気団の流れの分析を同時に行い、気団ごとに鉛同位体比がどのように異なるかを調査検討した。エアロゾルはメンブレンフィルターに1日間捕集されたものを用いた。鉛同位体比の測定は前年度検討したとおり、誘導結合プラズマ質量分析装置を用いて測定した。鉛同位体比と流跡線解析の結果を同時に図2に示した。これから流跡線ごとに、その鉛同位体比が異なっていることが分かる。特に朝鮮半島を横切り中国の中部から気団がくるような場合は、 $^{207}Pb/^{206}Pb$ の値が高く相対的に古い鉛であることが分かる。一方日本から気団がくる場合は $^{207}Pb/^{206}Pb$ の値が低く、日本の都市の鉛同位体比になっていることが分かった。また、ロシア方面からくる場合はその値はこれらの中間的な値となっており、このように地域ごとに鉛同位体比が異なることからこれらの値は長距離輸送の良い指標になることが明らかになった。

### ③硫黄同位体比測定

冬季に隠岐島（国設酸性雨隠岐局）で採取したエアロゾルの硫黄同位体比（ $\delta^{34}S$ 値）を測定した。それらの値を流跡線解析の結果などから検討を加え、エアロゾル硫酸塩の起源推定を試みた。エアロゾルの海塩粒子含有率は、冬型気圧配置となって海が時化するような場合は、50%を超えることが多く、高気圧に覆われて海が穏やかになるような場合には20%程度となった。図3に示したようにエアロゾルの硫黄同位体比は+5.5~+14.0の範囲を変動し、海塩粒子含有率に比例して大きくなった。一方、非海塩性硫酸塩の硫黄同位体比は、+3.5~+9.7であり、沿岸からそれほど遠くない海洋大気エアロゾルのものとして報告されている値の範囲内であった。

非海塩性硫酸塩には自然起源のものは無視できる程度に少なく、そのほとんどは人為起源であると推定された。人為起源については、気塊が北西風の方から流入する場合は中国東北部と北朝鮮の石炭燃焼起源のもの、西の場合は韓国の石炭と石油の燃焼起源のもの、南西の場合は我が国の石炭燃焼起源のものである可能性が高いと考えられた。（島根県衛生公害研究所担当）

### 2) モニタリングネットワーク、発生源インベントリ構築のための国際ワークショップ開催

韓国、中国、台湾を中心として東アジア地域の研究者を招へいして、東アジア地域のモニタリングネットワー

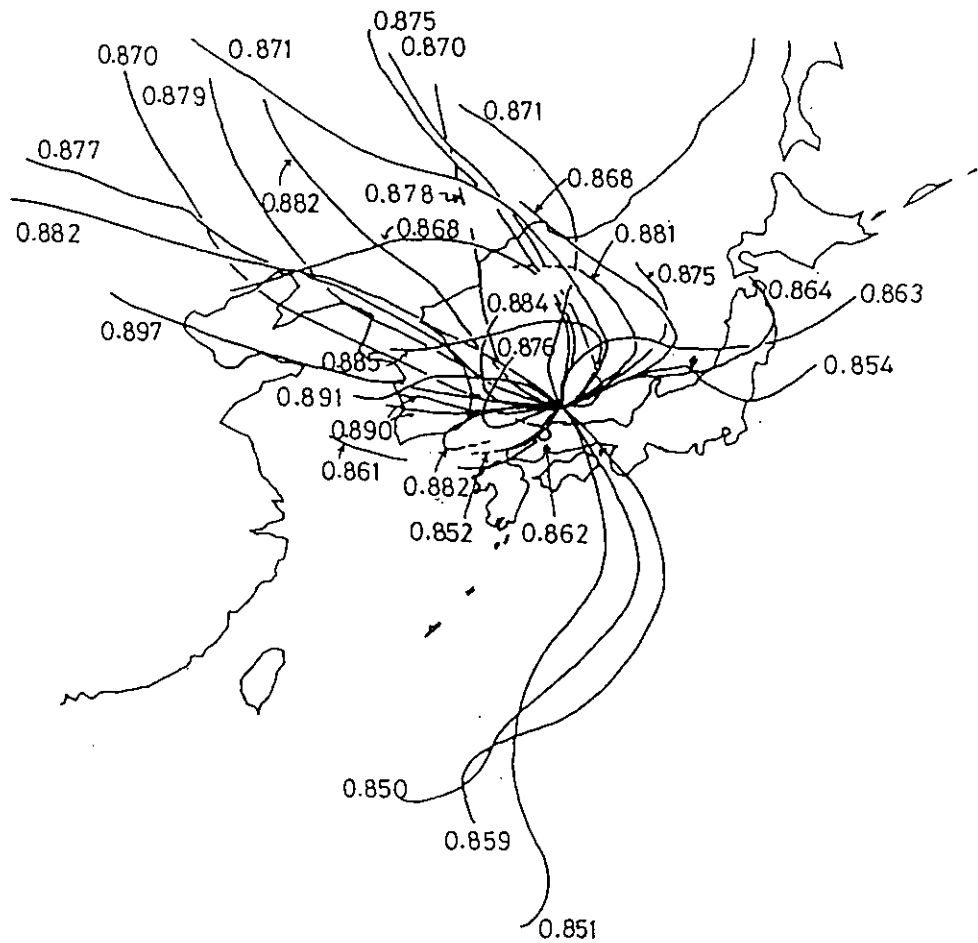


図2 鉛同位体比の流跡線依存性

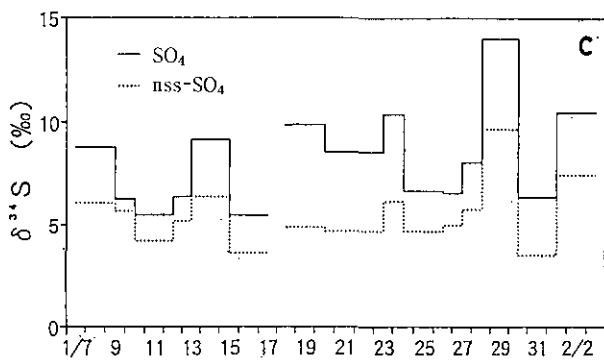


図3 エアロゾル中の硫黄同位体比

### 3) IGAC/PEACAMPOT 航空機調査

東アジア地域は今後、人口増加と工業の発展により大気汚染物質の排出量が増加し続けるものと考えられ、我が国にも、その結果として大量の酸性物質が降下するものと懸念される。本研究では平成3年度より、IGAC計画（国際地球規模大気化学計画）に基づき、PEACAMPOTプログラム（太平洋上の対流圏大気に対する東アジアの大陸性気塊の影響）と名付けた航空機調査を、韓国、中国を含めた国際共同観測として行ってきた。本年度は、酸性雨研究チーム被害が懸念される屋久島への大気汚染物質の輸送過程を明らかにする目的で、九州南西沖東シナ海上空、および大隅海峡上空において、異なる4高度を飛行して、汚染質の空間分布を求めたことを目的とした。屋久島においては集中地上観測も実施し、地上と航空機両面からの観測を行った。

本観測において観測の主な対象とした汚染質と測定方法は表1のとおりである。これ以外に外気温、湿度も測定されている。なお使用航空機はMerlin IV（所属 昭

ク構築のためにワークショップを1月31日から2月2日に開催した。会議は3日間で、第1日は各国の発生源インベントリー研究、第2日は各国のモニタリング手法とそのデータが発表された。第3日は総合討論で細部の議論がなされ、今後も情報交換を密にするために、定期的にワークショップを開催することが確認された。

表1 観測項目および測定方法

測定項目	測定手法
オゾン	紫外線吸収法
NO <sub>x</sub>	オゾン化学発光法
SO <sub>2</sub>	パルス蛍光法
PAN	低温カラム濃縮法
炭化水素	真空容器捕集法
アルデヒド, 有機酸	拡散スクラバー法
無機エアロゾル	ハイボリューム・サンプラー
COS, DMS	低温カラム濃縮法
エアロゾル個数濃度	パーティクルカウンター

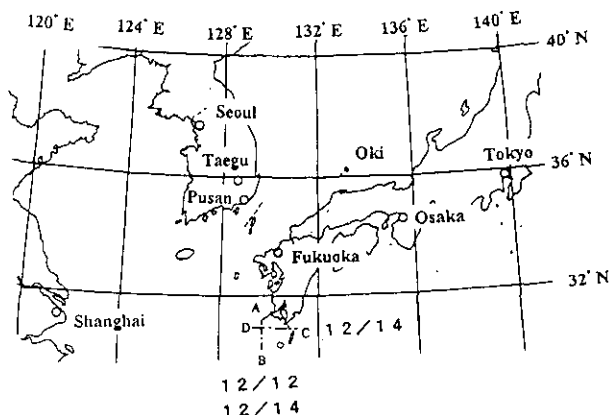


図4 平成6年度航空機調査観測コース

和航空(株)である。

航空機調査は鹿児島空港を基地として屋久島西方沖の東シナ海上空を南北方向に往復する2回の観測飛行と、大隅海峡の上空を東西方向に往復する1回の観測飛行を行った。高度は8,500, 5,500, 3,000, 1,500フィートで、各高度約30分ずつの観測を行った。各コースを図4に示す。ただし雲を避けるため高度および飛行コースは場合に応じて若干の変更がある。

九州南西沖東シナ海上空においては図5に示したように各高度においてSO<sub>2</sub>が0.5ppb以下と非常に濃度が低かった。NO<sub>x</sub>もおしなべて低い。風は概ね西ないし北西であったことを考えると、ガス状汚染質の大陸からの輸送は直接的には九州西岸や屋久島には到達しないものと考えられる。しかしこれまでの観測では、東シナ海上空における硫酸塩の濃度が、他の地域に比較して高いことが観測されており、大気汚染物質の酸化が輸送過程において進み、粒子状物質として我が国に到達していることを示していると言える。一方、大隅海峡上空の観測では、観測空域の東端で約6ppbに達する高濃度のSO<sub>2</sub>が観測された。またその濃度は高度1,500フィートよりも3,000フィートの方が高かった。これらのことは桜島の影響が現れたものと考えられる。

屋久島の地上観測では航空機観測では見られなかった非常に高濃度のSO<sub>2</sub>が観測された。上記航空機観測の結果と比較すると、この高濃度SO<sub>2</sub>は桜島や、屋久島の北方に位置する薩摩硫黄島などの火山に由来するものであると考えられる。

#### 4) 大気中における酸性・酸化性物質の生成過程に関する研究

有機過酸化物のうちヒドロペルオキシド類は自然起源の炭化水素とオゾンとの反応で生成することが知られて

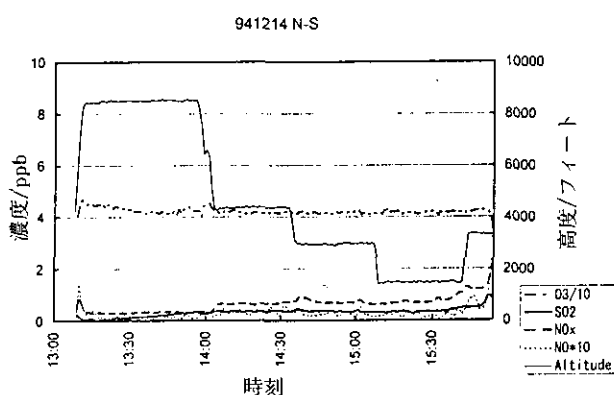


図5 九州南西沖東シナ海上空におけるオゾン, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>

おり、関東地方のスギ枯れ等植物の被害に大きな影響を及ぼしている可能性がある。これまで我々は内容積4 m<sup>3</sup>のエアロゾルチャンバーを用い、オゾン-天然炭化水素の空気中の反応によるヒドロペルオキシドの生成収率および生成機構に関する研究を進めてきた。本年度は、昨年度オゾンとエチレンの反応から生成する過酸化化物で、従来の報告ではメチルヒドロペルオキシド (MHP, CH<sub>3</sub>OOH) と考えられていた生成物が2-ヒドロキシエチルヒドロペルオキシド (2-HEHP, HOCH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>OOH) であることを明らかにしたことを受けて、これをさらに確実なものとするため、上記チャンバーを用い過酸化水素をラジカル源としてエチレン-OH反応を検討した。その結果、図6に示すように2-HEHPは反応時間によらない一定の収率を与えることが分かり、OHラジカルとエチレンの反応によって生成していることが明らかとなった。OHとオレフィンの反応から生成するヒドロペルオキシドとしては初めての発見である。

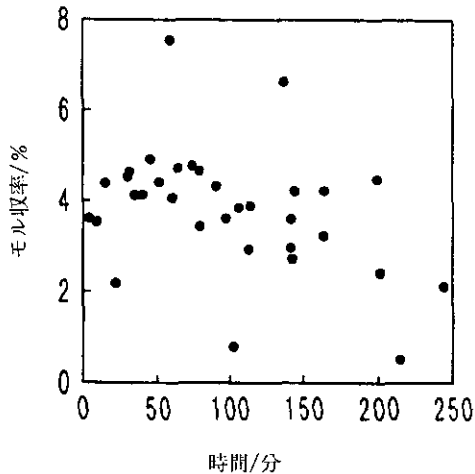


図6 エチレン- $\text{OH}$ 反応によって生成する $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OOH}$ の収率

#### 5) 大陸からの大気汚染物質の飛来のシミュレーションモデル開発

東アジアスケールにおける酸性・酸化性物質の輸送現象を明らかにするために、大気中の化学反応過程・沈着過程を含む3次元オイラー型モデルの基本フレームの検討・確立、および実際の気象・排出量を用いた化学反応を含むテスト計算を完了した。作成された3次元輸送・変質シミュレーションモデルの特徴は、①光化学反応をモデルに取り込むことにより、反応過程を正確にシミュレートできるようになったこと、② $\text{SO}_x$ とともに、従来の東アジアスケールにおける物質輸送・変質モデルではほとんど対象とされなかった $\text{NO}_x$ 及び $\text{NMHC}$ を対象物質としたこと、③これによって、 $\text{NO}_x$ 系の2次生成物質( $\text{NO}_3^-$ や $\text{HNO}_3$ 等)の予測が可能となった点、④将来的に、湿性沈着や固相・液相反応等の酸性雨現象を構成する諸過程をシミュレートできるようなモデル・フレームとしたこと等に大きな特徴を持っている。

このモデルを用いて、1991年6月および1992年2月の中国～韓国～日本域(東西約3,000km, 南北約4,000km)についてシミュレーションを行った。シミュレートされた $\text{SO}_4^{2-}$ 及び $\text{NO}_3^-$ の環境濃度は野外観測と比較して妥当なオーダーを示した。特に6月のシミュレーションでは光化学反応による $\text{O}_3$ の生成が見られ、今後、このような光化学反応による $\text{SO}_2$ から $\text{SO}_4^{2-}$ への酸化の寄与について定量的な評価を進める必要がある。

#### 6) 東アジア地域における $\text{SO}_2$ 排出量予測とアンモニア発生フラクスマップ作成

エネルギー経済モデルを改良して、トップダウンタイプの $\text{SO}_2$ 排出モデルを開発し、中国の将来の $\text{SO}_2$ の排出量を推定した。また、中国国内の人口移動現象を分析して簡単な人口移動モデルを開発し、これをもとに中国の将来の $\text{SO}_2$ 排出の空間的密度を推定した。

日本国内においては、県別、北海道においては支庁別のデータを得て、グリッド(緯度 $1^\circ \times$ 経度 $1^\circ$ )に換算した。肥料は高度化成肥料などのように組成が明らかでないものかなり使用されているため、全国の使用量をもとにそれを作付面積で割って各県の肥料使用量とした。県別データをグリッド別データにするためには、陸地面積比を用いた。韓国のデータは道、特別市別を各グリッドに当てはめた。

ヨーロッパにおいては、牛、豚それぞれ一頭からの年間の $\text{NH}_3$ の排出係数(エミッションファクター)が、これらの飼育状況にある程度考慮して決められているのでこれらを第一次近似で使用した。すなわち、乳用牛、肉用牛は23.04、豚が5.36  $\text{NH}_3\text{kg}/\text{animal}/\text{年}$ である。肥料に関しては、排出係数は欧州では硫酸アンモニウム、尿素がそれぞれ8、15%の $\text{NH}_3$ としての揮散であるが、高度化成の詳細な化学組成のデータがないため、これらの3種類に対して10%の $\text{NH}_3$ 揮散とした。

乳用牛、肉用牛、豚、肥料に関して、各グリッドごとの $\text{NH}_3$ 放出量を求めた。これらの日本の全国規模の放出量はそれぞれ4.6, 6.0, 4.4,  $4.9 \times 10^4$ トン/年であった。韓国の場合はそれぞれ、1.2, 3.7,  $2.4 \times 10^4$ トン/年であり、乳用牛による $\text{NH}_3$ 放出量が非常に低い。豚による $\text{NH}_3$ の発生量を図7に示した。関東地方と九州南部に2000トン $\text{NH}_3$ /年以上の特に高い発生量を示す地域があった。韓国では2000トン $\text{NH}_3$ /年以上を示すグリッドが6個あった。肥料による $\text{NH}_3$ の発生量は、各グリッドではそれほど大きな差はないが、北海道、関東地方、九州北部にやや高い発生量を示す部分があった。日本、韓国の家畜(牛、豚)の $\text{NH}_3$ 発生量は図8に示した。北海道に2グリッド、関東地方北部に2グリッド、九州南部に3グリッド、韓国で7グリッドで5,000トン以上を示していた。最高値は韓国の約10,000トンであり、韓国で発生密度が高かった。



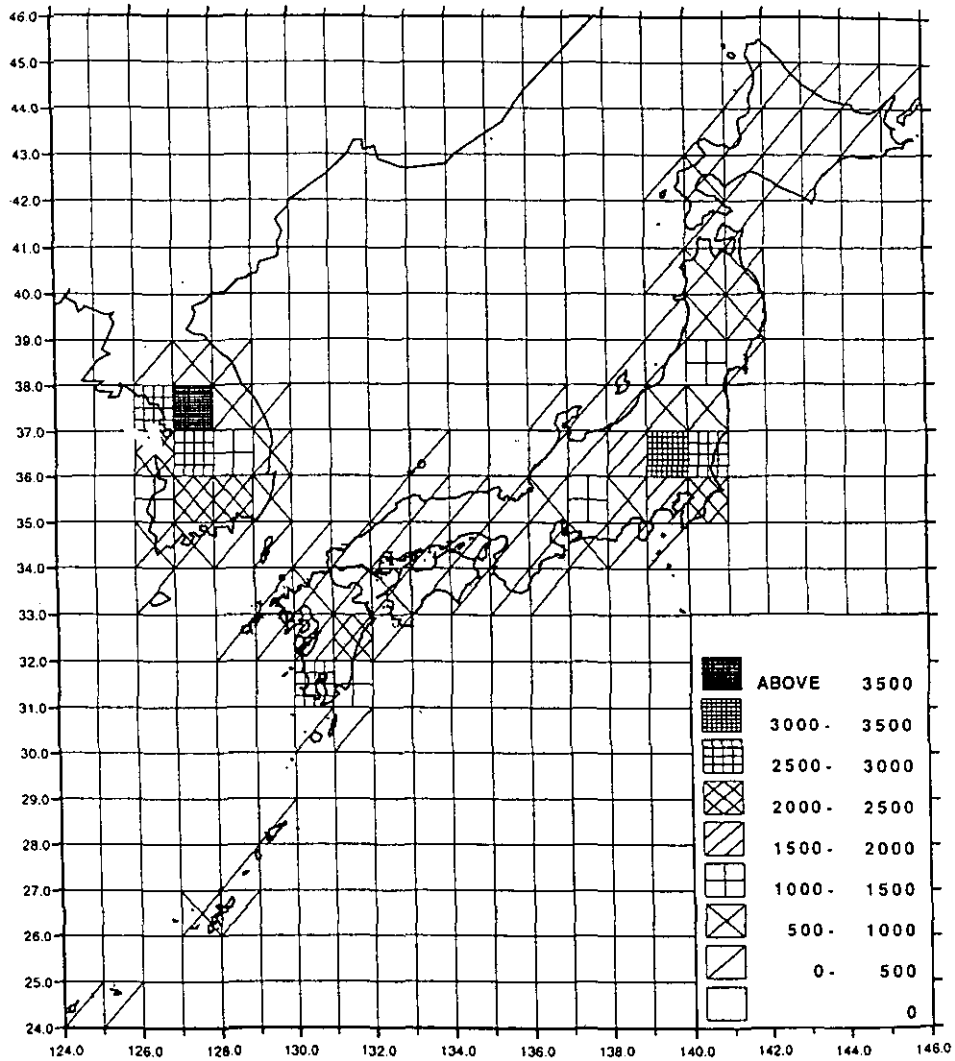


図7 豚によるNH<sub>3</sub>の発生量(トンNH<sub>3</sub>/年)

	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146
46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	61	55	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	54	234	106	9	35
43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24	96	216	524	592	223
42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	143	105	163	323	22	0
41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	121	47	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	244	212	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	219	368	0	0	0	0
38	0	0	33	151	62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	103	421	209	0	0	0	0	0
37	0	0	565	1084	288	55	0	0	0	0	0	14	11	90	273	340	0	0	0	0	0	0	0
36	0	0	656	843	535	232	0	0	0	7	0	62	130	459	849	549	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	369	776	707	289	0	0	47	158	189	85	216	314	208	392	461	0	0	0	0	0	0
34	0	0	237	206	40	42	7	88	147	200	213	129	153	177	48	23	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	123	0	0	172	329	170	165	112	100	29	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	32	55	594	624	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	788	301	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	41	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	118	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	99	62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	34	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

図8 家畜(牛, 豚)からのNH<sub>3</sub>発生量(10トンNH<sub>3</sub>/年)

## (2) 酸性物質の生態系に与える影響に関する研究

—酸性物質の植物環境系に与える影響に関する研究—

### 1) 植物環境系変化の指標となる生物地球化学的分析手法の開発検討に関する研究

酸性雨の植物環境系に与える影響を知る上で水のpHの測定は最も基本的な測定の一つである。pHの測定方法には現在JIS Z8802で規定されているガラス電極法が用いられている。しかし、酸性雨研究で登場する試料には低電気電導率や低緩衝性のものが多く、特に低電気電導率や低緩衝性である場合には、pH指示値が安定しないなど測定が難しいことが知られている。最近開発されたフロー式pHメーターはこのような溶液で安定したpH測定ができるpH測定システムである。一方このほかに、近年の環境問題への関心の高まりの中で、取り扱いが簡単であることから比色法も用いられている。本研究ではフロー式pHメーターによるpH測定法と比色法によるpH測定を比較し、次のような結果を得た。

①低電気電導率や低緩衝性溶液にpH指示薬を添加すると、pH指示薬の影響を受けて溶液のpH値が酸性側に变化する。常法で用いる濃度のpH指示薬を添加した場合は、1～2pH酸性側の値を示す。

②pH指示薬の影響は、その種類に関係なくいずれの場合もあった。

③pH指示薬の添加による溶液のpH値の変化は、溶液の電気電導率に関係なく同程度であったのに対して、アルカリ度についてはその値が高くなるほど小さくなった。これは、溶液の緩衝能によるためと考える。

したがって、環境試水のpH測定に比色法を用いると、pH指示薬の影響により大きな測定誤差を生じることがあり、今後、低電気電導率や低緩衝性の試水のpH測定に比色法を用いる際には、試水の緩衝能に注意する必要がある。

### 2) 生態系における酸性雨関連化学種の挙動と影響に関する研究

—笹群落が土壤の交換性陽イオンの保持と酸性化防止に果たす役割—

土壤—植物生態系に酸性降下物が添加されると、生態系は様々な緩衝作用を示す。土壤中のCaCO<sub>3</sub>による中和反応や交換基での陽イオンの交換反応はよく知られた作用である。また、土壤微生物による脱窒や硫酸還元反応によって硝酸や硫酸は土壤中から除かれ、植物によって

もこれらは活発に吸収される。

このような緩衝作用の中で、生物的反応、とりわけ植生の役割についてはあまり研究されていない。植物は硝酸や硫酸イオンなどの酸性成分そのものを吸収するばかりでなく、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>などの塩基性陽イオンも活発に吸収して土壤の酸性化を緩衝すると予想される。たとえば、火山性の含硫ガス(H<sub>2</sub>S)に暴露されている青森県下北半島恐山鬼石の硫気口域では、土壤pHは3前後にまで低下しているが、笹(クマイザサ, *Sasa senanensis*)は群落を形成し生育している。この群落内では笹がK<sup>+</sup>やCa<sup>2+</sup>などのイオンを活発に吸収するとともに、葉面からのイオンの溶出や落葉により元素を地表面に還元するので、元素が土壤—植物生態系内で迅速に循環し、結果として土壤pHが比較的高く保たれるとともに土壤—植物生態系内に元素がよく保持されている。

本研究では、我が国の林床でしばしば高密度に群生する笹に着目して、土壤—植物(笹)生態系内に保持されている元素量を、同一地域内の対照地と比較することにより、笹群落が土壤の交換性陽イオンの保持と酸性化防止に果たす機能を明らかにした。

調査地は通称きのこ山(茨城県真壁郡真壁町、標高約500m)、加波山(茨城県真壁郡真壁町、標高約600m)および屋久島(鹿児島県熊毛郡上屋久町 投石岳～安房岳、標高約1800m)で、いずれも代表的な花崗岩地域である。笹の種類はきのこ山ではミヤコザサ(*Sasa nipponica*)、加波山の笹群落1ではミヤコザサ、群落2ではクマイザサ(*Sasa senanensis*)、屋久島ではヤクシマダケ(*Pseudosasa owatarii*)であった。土壤コアは表層の落葉層を手で除いたあと採取した。また笹群落地からは笹植物体(地上部はすべて、地下部は1m×0.5mに含まれるもの)と落葉を、対照地からは落葉をすべて採取した。

採取試料については笹バイオマスおよび落葉量、土壤pH、土壤の交換性陽イオン、土壤、笹植物体および落葉の元素組成について測定、分析を行った。

本研究によって次のような結果が得られた。図9に土壤pH(H<sub>2</sub>O)の深度分布を示した。きのこ山では全層において笹群落のほうが対照地より高い値を示した。加波山では笹群落1、2ともに上層部(0～10cm)では笹群落のほうが対照地より極端にpHが低く、下層(15cm以下)ではその関係は逆転した。屋久島では、笹群落、対照地ともにpHは土壤深度に伴って増加したが、対照地の方が明らかに高かった。

土壤中の交換性陽イオンの分析結果から求めた陽イオン交換容量 (CEC) と塩基飽和度 (BS) の土壤深度分布を表2に示した。CECとBSは、それぞれ  $Ex-Al + Ex-Na + Ex-K + Ex-Mg + Ex-Ca$  及び  $(Ex-Na + Ex-K + Ex-Mg + Ex-Ca) / CEC$  とした。きのこ山のCECは笹群落地と対照地であまり差はなく、下層 (15cm~) では対照地の方が僅かに高くなった。BSは全層で笹群落のほうが高い値を示し、特に表層 (0~5cm) では60%を超えている。加波山のCECは、笹群落の上層部で高い値を示し、特に表層0~5cmでは笹群落は1, 2ともに対照地の約2倍の値を示した。しかし、下層では逆に笹群落のほうが対照地よりやや低くなった。BSは、表層部では笹群落のほうが対照地よりかなり低かったが、群落1では10cm以深で直線的に増加して深度30cm付近では対照地の3倍以上に達した。一方、群落2では、対照値と同様に、深度10~30cmにおいてほぼ一定値を示した。このBSの分布特性は、図表には示していないが、交換性Alの分布に依存したものと考えられる。つまり、交換性Alは、笹群落1, 2ともに上層土では対照地より圧倒的に多かったが、深度が増すにしたがって群落1では対数的に減少し、一方、群落2では対照地とほとんど差がなくなった。また、このBSの傾向はpHの深度分布とも

相関があるように思われる。屋久島では、CEC, BSともに全層で笹群落のほうが高い値を示した。笹植物体および落葉の元素分析の結果と土壤中の交換性陽イオンの分析結果から、試験地 (1m×1m×0.3m) の土壤-植物 (笹) 生態系内に含まれる元素 (植物が容易に利用できる元素) の全量を求め、図10に示した。きのこ山では、生態系内のAlは笹群落地に比べ対照地で明らかに高い値を示した。これは土壤pHやBSの結果とも整合性があり、笹群落地より対照地の方が酸性化していると判断できる。また、生態系内のKやCa量も笹群落の方が多く、笹群落地では栄養塩類がよく保持されている。加波山の生態系内Al量は土壤pHの結果をよく反映しており、群落1では対照地より低く、群落2ではあまり差が見られなかった。しかし、Kは笹群落の方が高い値を示し、群落地ではよく保持されているものと思われる。また、Caは対照地の方が高い値を示したが、これは対照地の落葉中に多量のCaが含まれていた結果から推測できるように、樹冠の影響が現れたものと思われる。屋久島では、全元素とも笹群落の方が高い値を示した。特にCaは約2倍、Kでは約3倍の元素が群落内に保持されていた。

以上の結果から、加波山 (群落2) の例外的なケース

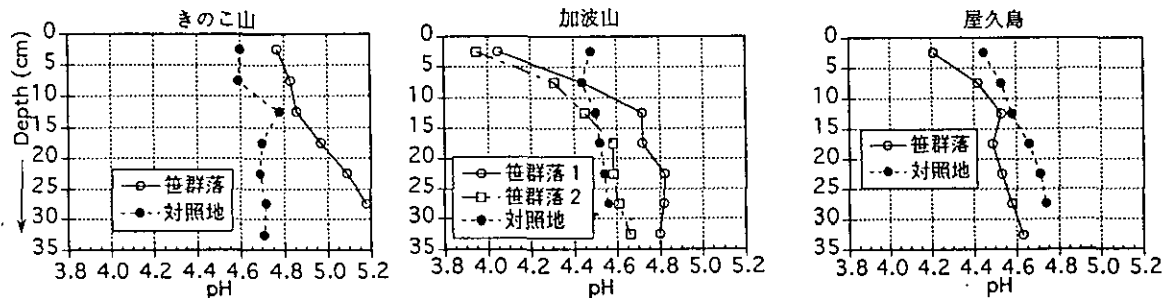


図9 土壤pHの深度分布

表2 陽イオン交換容量 (CEC) および塩基飽和度 (BS) の土壤深度分布

Depth (cm)	CEC (meq/100g)						BS (%)							
	きのこ山		加波山			屋久島		きのこ山		加波山			屋久島	
	笹	対照	笹1	笹2	対照	笹	対照	笹	対照	笹1	笹2	対照	笹	対照
0-5	7.27	6.39	10.85	11.87	6.40	4.29	3.33	65.7	49.3	36.2	32.6	53.5	33.2	26.8
5-10	4.34	4.23	5.80	4.93	3.59	3.74	3.04	34.5	28.2	19.4	13.8	20.9	30.7	22.3
10-15	2.96	2.73	3.26	3.60	2.98	2.94	2.15	29.5	24.1	23.2	14.4	15.6	28.4	16.4
15-20	1.91	2.56	2.17	2.54	2.52	2.47	1.81	31.3	21.8	29.3	14.4	15.3	25.4	14.1
20-25	1.68	3.39	1.57	2.10	2.46	2.06	1.67	35.1	33.5	38.3	14.1	14.0	20.8	13.7
25-30	1.76	3.05	1.14	2.05	2.70	1.89	1.35	48.1	35.5	47.8	13.1	17.6	17.0	15.2

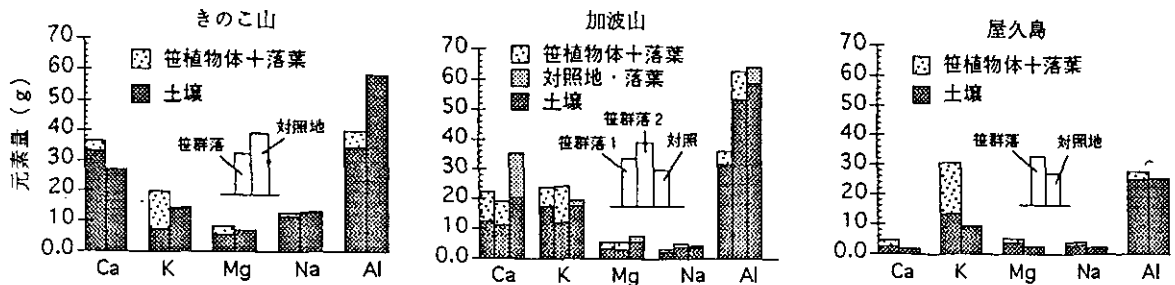


図10 試験地 (1 m × 1 m × 0.3 m) の土壌-植物生態系内に含まれる元素量

を除いて、塩基性陽イオンは対照地に比べ笹群落地により豊富に保持されており、BSも群落地で相対的に高いことが示された。また、この結果を反映して、土壌-植物(笹)生態系内に保持されているKやCaの量も多くの場合笹群落地で多い。しかしpHは、土壌中の有機物含量に大きく依存し、その増加に伴って低下するので、有機物の豊富な笹群落地ではBSの増加によるpH上昇効果が打ち消されて、しばしば対照地より低くなる。このような有機物の影響については、今後詳しく検討していく必要がある。また、笹群落の土壌特性は、笹の侵入年代にも依存すると思われる。つまり、ある地域に笹が侵入し始めると笹は自らの植物体を形成するために土壌中の元素を活発に吸収する。結果として、土壌中の交換性塩基が減少し土壌の酸性化が促進される。しかし、笹は土壌から元素を吸収するだけでなく、落葉や葉面溶脱により元素を土壌へ還元するので、土壌-植物生態系内での元素の循環はいずれは平衡状態に達する。この過程では、生態系内での迅速な元素循環の働きによって、それ以上の極端な酸性化はむしろ防止されると考えられる。今後は笹植物体がどの程度葉面溶脱などにより酸性雨を中和し、元素を土壌に還元・添加するのか、また酸性雨による土壌からの栄養塩の溶脱を、元素を活発に吸収することで、どの程度補償できるのかなどを検討する必要がある。図11に本研究で対象とした笹群落における物質循環の概念図を示す。

#### —スギ樹皮の化学特性に関する研究—

森林生態系における酸性雨の影響を調査する場合、林外雨、林内雨、樹幹流pHやイオン濃度が測定されている。これは、大気が汚染された地域では、植物に吸着した大気中の酸性物質や植物から溶脱した各種イオンが樹幹流中に溶け出して、土壌や植物に酸性物質やイオンを供給していると考えられているからである。しかし、樹幹流

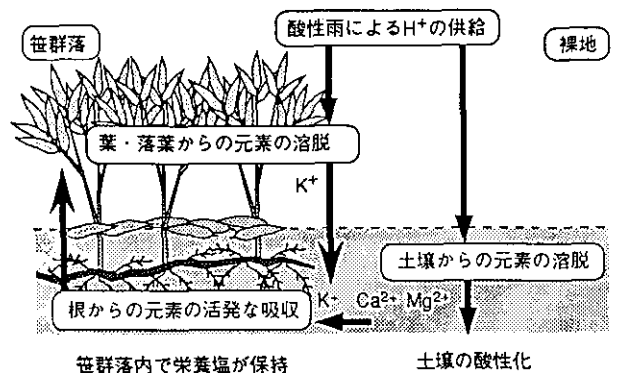


図11 笹群落による土壌の酸化防止能力の検討

が通過する樹木の樹皮に関する研究報告例は極めて少ない。これまでの予察的研究として、硫気孔からの酸性物質に常時暴露されている青森県の恐山や、大気汚染源が少ない屋久島でスギ外樹皮のpHを測定した結果、いずれもpH3程度の強酸性を示すことが報告されている。同じ地域に分布する広葉樹の樹皮がpH4-5であることから、この現象はスギ外樹皮の特性とも考えられる。本研究ではスギの外樹皮、内樹皮、形成層、木質部のpHの測定を行うとともに、スギ外樹皮の酸性物質の解明と特性について、新たな知見を得た。その結果をまとめると次のようである。

スギ外樹皮は採取地点によらず、pH3程度の強酸性を示す(図12, 図13)。この強酸性のスギ外樹皮を純水で洗浄した結果、樹皮pHは酸性を示すことから、樹皮の酸性は樹皮に含まれる水溶性のイオンの寄与は小さく、外樹皮を形成する有機物の官能基 $H^+$ を放出することによると考えられた。スギ樹皮の交換サイトを同定した結果、カルボキシル基の $H^+$ が解離することで強酸性を示す可能性が高い。外樹皮を酸処理した結果、交換サイトがH型化され、樹皮pHは2.4に低下した(図14)。この樹皮を、 $NH_4$ , Ba型化すると樹皮pHは4.3に上昇し

た。さらに、未処理の樹皮を純水洗浄し、2 mg/lのNH<sub>4</sub><sup>+</sup>溶液に浸漬した結果、溶液中にK<sup>+</sup>とNH<sub>4</sub><sup>+</sup>の交換比は約1であった。

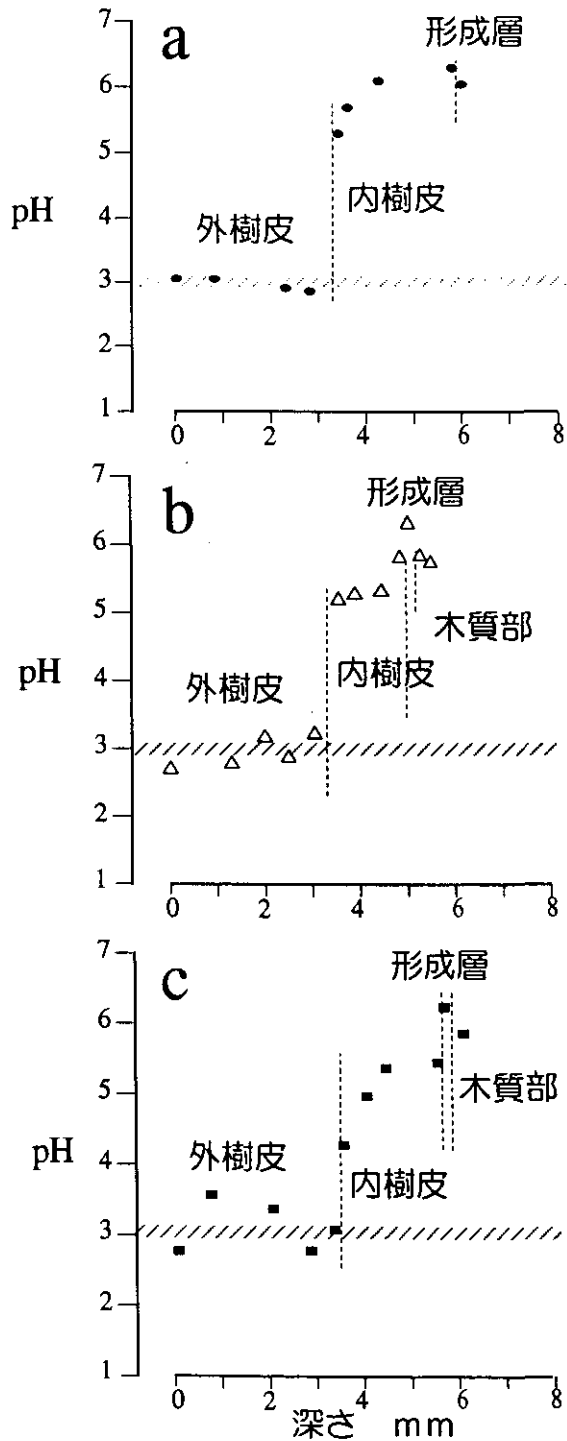


図12 杉の樹幹の外樹皮、内樹皮、形成層、木質部のpH分布 (a: 屋久島産杉, b: 恐山硫気横杉, 恐山美林杉)

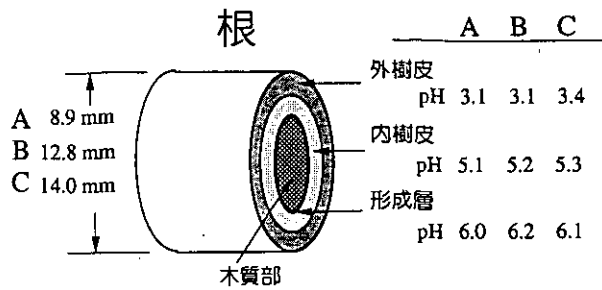


図13 杉根の外樹皮、内樹皮、形成層のpH分布

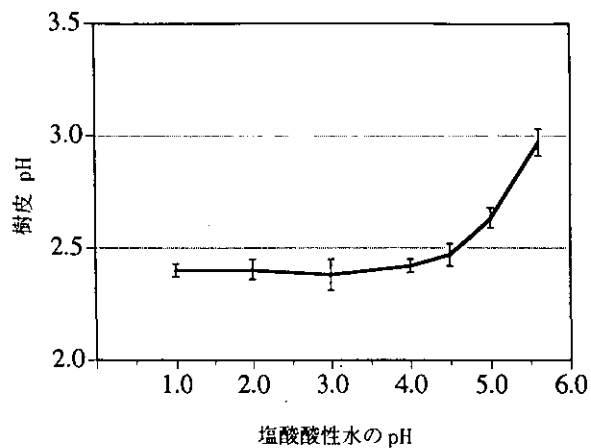


図14 塩酸処理後純水洗浄した杉外樹皮のpH

## 2.5 海洋汚染に関する研究

### 〔研究組織〕

地球環境研究グループ	
統括研究官	安野正之
海洋研究チーム	○原島 省・功刀正行・原田茂樹
温暖化現象解明研究チーム	野尻幸宏
森林減少・砂漠化研究チーム	宮崎忠国
地域環境研究グループ	
海域保全研究チーム	木幡邦男
社会環境システム部	
情報解析研究室	安岡善文・須賀伸介
化学環境部	
動態化学研究室	柴田康行
水圏環境部	
部長	渡辺正孝
土壌環境研究室	高松武次郎・恒川篤史

### 〔研究概要〕

有史以来の人間活動の結果、C、N、Pの循環には攪乱が生じており、これらの攪乱要素は最終的にはすべて海洋に負荷されている。この結果として海洋でどのような現象が起こり、また、逆に海洋の環境変化が地球環境に対してどのような影響を及ぼしているのかを明らかにすることが地球環境の保全を図る上で急務となっている。

海洋に流入する物質には、炭酸塩や各種栄養塩のように、海洋プランクトンの増殖に大きな影響を及ぼすものや、有害化学物質のように食物連鎖の中で生物濃縮を起こすものなどそれぞれの物質の特性等により異なった挙動をする。また、海洋は不均等な系であり、環境の空間分布や時間変動が顕著であり、しかも、これらの変動は海洋生態系を通して地球物理学的・生物化学的な素過程の連環（ダイナミカルリンク）によって生ずるものである。

したがって、海洋環境で起こっている現象を把握するためには、物質ごとに物理的・生物的な輸送速度（フラックス）を見積もり、海洋生態系における各素過程の持つ機能を解明するとともに、それら素過程間の連環を明らかにする必要がある。ここで、海洋生態系の代表的なものとして、植物プランクトンを底辺とする系と、サンゴ礁を土台として成立している系がある。近年、様々な環

境ストレスによりサンゴ礁の変質が起こっている事例が世界的に報告されている。これらの生態系については、物質フラックス等のプロセス研究を行うとともに、その長期変動を明らかにするために、時系列を取得する必要がある。このため、衛星可視域センサー、定期航路船舶による広域、高頻度・長期モニタリングの手法を確立する必要がある。

また、重金属や有害化学物質による海洋汚染が深刻な問題となっている。この問題も、海水の汚染のみならず、植物プランクトン→動物プランクトン→高次捕食者という物質フラックスに伴う生体濃縮機構の解明が重要な課題である。

#### (1) 大陸棚海域循環過程における沿岸-外洋の物質フラックスに関する研究

海洋生態系を通しての生物・化学過程は海洋物質循環の中で最も重要な要素である生物化学フラックス（Biochemical flux）を生み出す。生物・化学過程に基づく物質循環素過程を現場隔離生態系を用いて種組成変化とそれに伴う化学環境動態解明、及び安定同位体を用いた物質循環経路や循環速度の解明を行う。さらに、それら実験・観測データを用いて生物・化学過程に基づく物質循環のモデル化を行う。親生物元素・化学物質等負荷

の増加に対して最初に影響を受ける海産藻類は海洋生態系の土台となっているため、藻類での物質循環モデル精度はシステム全体の精度に直接影響をもたらす。制御実験生態系を用いて海産藻類の純粋培養を行い、物質循環機能のモデル化を行う。一方、海洋物質循環の変動の歴史は、沿岸域、大陸棚や南極海の海底堆積物中に記録をとどめている。この堆積物中の長期海洋物質循環機構を解明することは、地球環境変動や海洋汚染物質の機構解明にとって最も重要かつ有効な方法と考えられる。採取した海底堆積物試料に含まれる各種微化石、微量金属元素含有量、有機物質、人為的汚染物質等の分析から長期にわたる海洋物質循環の変遷を明らかにする。

海洋における硫黄循環特に近年注目されている硫化ジメチル (DMS) 及びその前駆体物質であるジメチルサルフォニオプロピオネイト (DMSP) の海水中での動態と微細藻類などの生態系とかかわりを隔離生態実験系において検討を行っている。

#### (2) 海洋汚染物質の海洋生態系への取り込み、生物濃縮と物質循環に関する研究

人間活動により海洋にもたらされる汚染物質 (重金属や有害化学物質など) は、まず一次生産者に摂取され、捕食を通して次第に高次捕食者へと取り込まれていく。動物プランクトンは、食物連鎖の底辺近くに位置する生物で、海洋での物質循環に重要な役割を果たすとともに、そこに含まれる汚染物質濃度は局所的大海域の汚染状況をよく反映する。本研究では、日本近海で採取した動物プランクトンの汚染物質濃度を分析し、汚染物質の海洋生態系への取り込み経路と濃縮機構、ならびに汚染物質の食物連鎖を通しての循環機構を明らかにしようとした。

また、イカ肝臓の蓄積化学物質による全海洋環境監視計画に関する研究の一環として、外洋汚染の指標生物として注目されるイカの肝臓中に蓄積されている重金属類、有機汚染物質類を高感度な手法によって分析し、イカを用いた外洋モニタリング (スクイッドウォッチ) の対象にしうる環境化学物質の範囲を探ることを目的として、研究を行っている。

#### (3) 定期航路連続計測と衛星データによる海洋環境指標の時空間変動に関する研究

植物プランクトンバイオマス量は、クロロフィル量に代表され、栄養塩などの海洋環境要素に依存している。

化学量は通常リモートセンシングの対象になりにくいが、クロロフィル量は、可視光域データ (海水色) という形で、衛星によるマッピングが可能である。したがって、クロロフィル量に基づいて、リン、窒素循環への人為介入や自然起源による海洋環境変動を指標化することが有力である。ただし、衛星取得量は、海洋の比較的上層の間接的な光学的情報であるから、海洋環境のパラメータと衛星取得量の関連を明らかにしてゆく必要がある。このような経緯から、地球環境推進費の課題 D-3「衛星可視域のグローバルマッピングによる広域海洋環境変動に関する研究」を 5 研究所 3 大学で分担し、国立環境研究所では、本サブテーマ名のもとに、地球環境研究センターのフェリーモニタリングデータおよび乗船調査による海洋実測データ、衛星データおよび環境要素間の関連を明らかにする部分を受け持った。同時にフェリーの連続取水系を利用した任意のフロースルー型のセンシング技術の発展も試みる。

#### (4) 水中画像アーカイビングによるサンゴ礁モニタリングに関する研究

サンゴ礁生態系を特徴づける要素としては、海水中の生態系と異なり、10年スケールでのサンゴ群体の成長、加入、白化 (共生藻類離脱現象)、種間競合などがあげられる。これらの長期時系列を得るには、衛星等では十分とはいえず、水中の画像を長期的・系統的に得る必要がある。この目的のために、コドラート方式と、海域航走方式の 2 つの水中画像取得手法を考案した。このシステムを、試験的に作動させ、得られた画像を CD-ROM に格納し、長期変動の解析に供する。

#### [研究成果]

##### (1) 大陸棚海域循環過程における沿岸-外洋の物質フラックスに関する研究

###### 1) 海洋物質循環の変動機構に関する研究

自然海域に存在する海洋生態系をそのまま捕獲した海洋メゾコズム (直径 5 m、深さ 18 m の円柱状の隔離水塊) を用い、主に沈降粒子による表層から下層への物質移動について検討した。実験開始直後、海洋メゾコズムの表層 (0 ~ 5 m) に、 $\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$  を DIC 濃度の約 1 % となるよう添加した。毎朝 9 時に鉛直 3 点 (5 m、10 m、15 m) に設置したセディメントトラップを引き上げ、沈降粒子を Whatman GF/F フィルター (0.7  $\mu\text{m}$ ) で捕捉し、C

量及び $^{13}\text{C}$ 量(封管燃焼・低温精製法による)を求めた。その他、栄養塩濃度、植物プランクトン種・固体数、動物プランクトン種・固体数、全菌数、色素量、諸形態炭素量などの鉛直分布と種々の物理化学的パラメータをモニターした。

各深度における沈降粒子態の過剰 $^{13}\text{C}$ 量(試料中のC量 $\times$ (試料中の $^{13}\text{C}$ 比-初期の $^{13}\text{C}$ 比))の累積値を図1に、C量の累積値を図2に示す。過剰 $^{13}\text{C}$ 量の累積値は下方ほど小さく、最終的に10mの累積値は5mの約63%、15mのものは5mの約43%であった。この結果は、沈降過程において粒子が速やかに分解される(粒子態から溶解態へあるいは $0.7\mu\text{m}$ 以下の粒子へと物質が移行すること)を示している。一方、図2においてC量の累積値は10m、5m、15mの順に大きく(最終的に、10mの累積値は5mの約85%、15mのものは5mの約132%に相当)、図1で示された $^{13}\text{C}$ の減少傾向と一致しない。2つの図の結果を満すためには、水深5m以下の水塊において $^{13}\text{C}$ 濃縮の小さい粒子態炭素が多く生産される必要がある。5~15m層での光合成による粒子態炭素生産は全層の数%以下であることが従来の研究で明らかとなっており、したがって下層での細菌生産の高さ、及びその基質への $^{13}\text{C}$ の濃縮の遅さが推察される。

硫黄の物質循環を明らかにするため、DMSの前駆体であるDMSPの動態を実験室内制御系(黒潮海水及び東京湾海水)を用いて検討した。両系において、DMSPは

海水中の微生物によって速やかに分解された。しかし、DMS放出量はDMSP分解量に対して黒潮海水で約20%、東京湾海水で約2%ときわめて少ない値であった。海水中のDMSP量に比べ、海中あるいは海洋表層大気中のDMS量が少ないという一般的な観測結果を実験室レベルでも再現できた。従来、DMSPの消費 $\rightarrow$ DMSの放出という機構が主要経路と考えられていたが、DMSを放出しないDMSPの分解、さらには放出されたDMSの海中微生物による消費、という2つの機構の重要性が新たに明らかとなった。さらに、これらの機構が同時に作用し、かつそのバランスが海水中微生物群の組成によって変化している可能性が示された。

## 2) 海産藻類による物質循環機能のモデル化に関する研究

海洋マイクロコズム(容量 $1\text{m}^3$ ;高さ $1.5\text{m}$ )を用いた*E. huxleyi*(CCMP374, Bigelow 海洋研究所)の無菌培養を行い、*E. huxleyi*細胞中の無機・有機炭素炭酸カルシウム、有機・無機炭素同位体比の動態を計測し、光合成と炭酸カルシウム形成における炭素循環を明らかにしようと試みた。

対数増殖過程(比増殖速度 $=0.7/\text{日}$ )では炭酸カルシウム形成は有機物生産に比して相対的に小さく、無機/有機炭素比は $0.3\sim 0.1$ 以下にまで達した。しかし培地中のN及びPが欠乏状態となつてからは炭酸カルシウム形

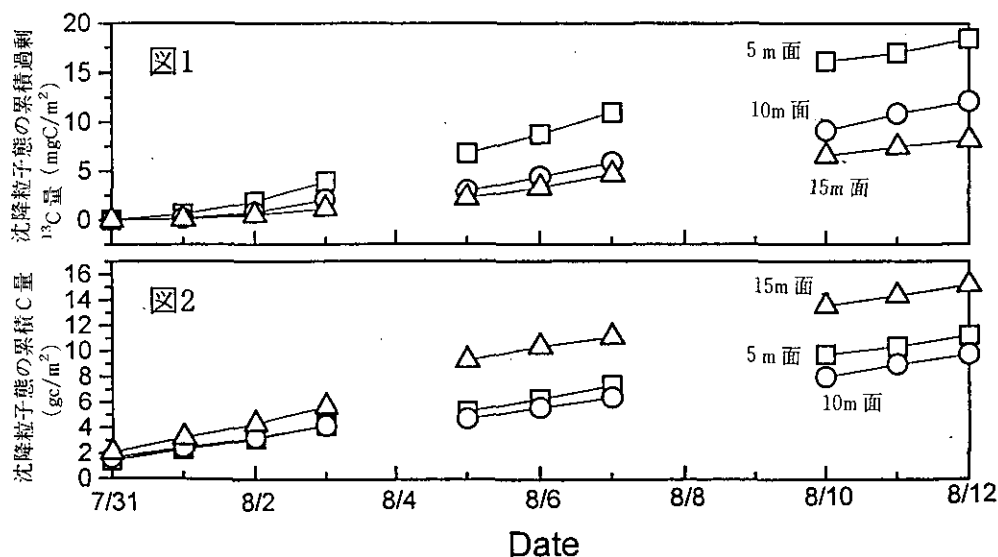


図1 沈降粒子態の過剰 $^{13}\text{C}$ 量の累積値

図2 沈降粒子態のC量の累積値



成は急増し、無機/有機炭素比は0.5~0.6にまで増加した。この時のpH (~8.8)と全炭酸 (~1200  $\mu$ M程度)から計算で求めた溶存態CO<sub>2</sub>は1  $\mu$ M以下であり、ほとんどの炭酸塩はHCO<sub>3</sub><sup>-</sup>の形態で存在していた。

細胞当たりの炭酸カルシウムはリン添加後は減少したが、リン欠乏後再び増加した。このことから炭酸カルシウム形成はリン欠乏によって促進されることが判明した。この間全炭酸は減少を続けpHも8.8から9.1まで増加した。その後細胞数は減少をはじめ、pHの低下と全炭酸の増加が観測された。このことから炭酸カルシウム形成により放出されたCO<sub>2</sub>は光合成に利用されており、培養終期には放出されたCO<sub>2</sub>が光合成に利用されなくなった結果としてpHの低下と全炭酸の増加が行われたことが示唆された。

E. huxleyi 有機の炭素同位体比は対数増殖期には-22から-17程度まで重くなり、培養17日目の栄養塩添加後-16から-14まで重くなり、細胞数の増加と連動して挙動した。同様に無機の炭素同位体比は0から8程度へと重くなり、有機炭素同位体比と連動した挙動を示した。

### 3) 海底堆積物を用いた長期海洋物質循環変動の推定手法に関する研究

南極海ケルゲレン海台から採取したGC1002コア(水深3685m, コア長3.96m)の生物性無定型ケイ酸(オパール)含有量及び、炭酸カルシウム含有量の鉛直分布を求めた。オパール含有量は、炭酸ナトリウム抽出法(2M Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, 85℃)で、また炭酸カルシウム量は1M塩酸で抽出されるカルシウムを原子吸光法で分析して求めた。その結果、オパール含有量は深さ110cm以深では2±1.5%でほぼ一定していたが、それ以浅では最高9%まで増加し、深さ10~20cmで約5%の極小値を示した。一方、炭酸カルシウム量は、既に前年度までに完了している放射化分析でのカルシウムの分析結果や各堆積層から分画採取した浮遊性有孔虫量から推測される値と良く一致したが、精度的には本法で得た結果が最良である。炭酸カルシウム含有量は、90cm以浅と160cm以深にはかなり豊富に存在したが、90~160cmの間は少なくほぼ1%以下であった。堆積物コア中のオパール含有量は、主に海洋表層でのケイ藻類の生産量を反映したものである。浮遊性有孔虫のC-14年代とケイ藻類の層序による年代を踏まえた解析から、この海域の生物生産は約8万年前頃から高まり、最終氷期には一旦やや低下した

ことが示唆された。一方、炭酸カルシウム量の変動は、海域の生物生産をそのまま保存したものではなく、水塊の炭酸カルシウムに関する保存条件(溶解性)の変動に起因すると考えられ、8万年前から6万年前の間は炭酸カルシウムの補償深度(CCD)が浅くなって、深低層水形成の速度が弱まった可能性が指摘される。

## (2) 海洋汚染物質の海洋生態系への取り込み、生物濃縮と物質循環に関する研究

1) 海洋にもたらされた汚染物質(重金属や有害化学物質など)は、まず一次生産者に摂取され、捕食を通して次第に高次捕食者へと取り込まれて行く。動物プランクトンは、食物連鎖の底辺近くに位置する生物で、海洋での物質循環に重要な役割を果たすとともに、そこに含まれる汚染物質濃度は局所的な海域の汚染状況を良く反映する。本研究では、日本近海で採取した動物プランクトンの汚染物質濃度を分析し、汚染物質の海洋生態系への取り込み経路と濃縮機構、並びに汚染物質の食物連鎖を通しての循環機構を明らかにすることを目的とした。

動物プランクトン試料は、1986~1994年の7~8月に、日本近海に設けられた測線(海流を横断するように設けられた5測線、内湾域測線、及び沿岸主要航路上測線;昭和61年度日本近海海洋汚染実態調査、昭和62年3月参照)上で、ORIネット(0.328mm目)の水平曳きを行い、海洋表層(水深150m以浅)から採取した。また、1994年の9月にはウラジオストックと新潟を結んだ測線上でも同様に採取した(なお、試料採取は、環境庁水質保全局が新日本気象海洋(株)に委託した「日本近海海洋汚染実態調査」と「日本海の海洋環境のための共同調査」の中で実施した)。

採取した試料は、直ちにXX13ネット(0.095mm目)に移してゴミなどを取り除いた後、0.01Mアジ化ナトリウムを含む0.5Mギ酸アンモニウム溶液で洗浄・滅菌して半凍結状態(-4℃)で実験室に持ち帰った。持ち帰った試料は、遠心分離またはフルイを用いて0.5Mギ酸アンモニウム溶液で充分洗浄した後、凍結乾燥して分析試料とした。また、試料の一部は実験室に持ち帰った後、実体顕微鏡下で種ごとに分別して、上と同様に乾燥試料を調製した。

乾燥試料は、中性子放射化、ICP-AES及び原子吸光などで分析して、最大32元素の濃度を定量した。中性子放射化はコンパレータ法で行った。ICPと原子吸光分析は、

試料をテフロン容器を備えたステンレス製高圧分解ポンプを用いて硝酸または硝酸+フッ酸（2：1）で分解して溶液試料を調製して行った。分析した元素は、Na, Mg, Al, P, K, Ca, Sc, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, As, Se, Br, Cd, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Hf, Ta, Pb, Th及びUである。

5年間の研究で得られた結果を以下に要約する。

- ①試料は十分洗浄したにもかかわらず、Al, Si, Sc, Ti, Feなどの地殻起源元素を多く含むものが存在した。これらは主に消化器官内の無機混入物に由来した。
- ②硝酸蒸気による酸分解とICP-AESを組み合わせた分析法を用いれば、上の無機混入物の影響を受けずに生物体組織中の元素濃度を分析することができた。
- ③沿岸、特に東京湾、大阪湾及び博多湾とその近くの試料は亜鉛、銅、鉛などで汚染されていた。また、日本海の試料は、亜鉛に比べて鉛を相対的に多く含んだ。
- ④20種余りの動物プランクトンについて、元素組成の種特性と一個体当りの元素保持量を明らかにできた。また多くの稚魚や浮遊卵についても同様の結果を得た。
- ⑤リンなどの多量必須元素の濃度は動物プランクトンの個体の大小とは無関係にはほぼ一定していたが、重金属などの微量元素の濃度は個体重量の減少に伴って増加し、微小な種には高濃度の重金属が含まれた。
- ⑥多元素の分析結果を用いたMKT-プロット  $\log(\tau_r \times CF_{sw})$  と  $\log CF_{sw}$  との関係； $\tau_r$ ：海洋での元素の滞留時間、 $CF_{sw}$ ：元素の海水中溶存濃度を基準にした動物プランクトンへの濃縮係数|の切片と勾配は、非汚染環境では元来種特異的ではほぼ一定しているので、動物プランクトンや魚の汚染度の有効な指標となることが分かった（重金属類で汚染されると勾配が顕著に増

大し、一方切片は一定もしくは多少減少する；図3にその様子を模式的に示した）。

2) 外洋汚染の指標生物として注目されるイカの肝臓中に蓄積されている重金属類、有機汚染物質類の中で、外洋監視（スクイッドウォッチ）の対象にし得る環境化学物質の範囲を探ることを目的として「イカ肝臓の蓄積化学物質による全海洋環境監視計画に関する研究」のタイトルのもとに研究を継続した。6年度はまとめとして、これまでに見いだした重金属の中で量的に多く、変動の認められる数種の元素の肝臓中存在形態に関する研究を行った。また芳香族、脂肪族炭化水素の分析を継続し、北太平洋を日本沿岸からアメリカ側に向かうにつれて一旦減少した後再び増加する特徴的なパターンを認めた。一方、同じ海域でとれたイカについて体長・体重とこれらの含有量と関係を調べたが、明確な相関は認められなかった。また、対象物質の範囲を探る目的で、クロルデン類、有機水銀等についても分析を行った。

### (3) 定期航路連続計測と衛星データによる海洋環境指標の時空間変動化に関する研究

1991年から1991年まで継続された日韓フェリー（釜山－神戸）に代わり、1994年3月から大阪－別府間の、1995年3月に大阪－那覇間のフェリーによって海洋モニタリングが開始された。この両プラットフォームにより、1994年7月に大阪－別府間の、1995年3月に大阪－那覇間のフェリーの連続取水系により海域現場実験を行い、紫外域吸収スペクトルによる溶存スペクトル、プランクトンの同定、レーザーによる植物プランクトン粒子サイズ組成、海水溶存CO<sub>2</sub>の計測を行った。この結果瀬戸内

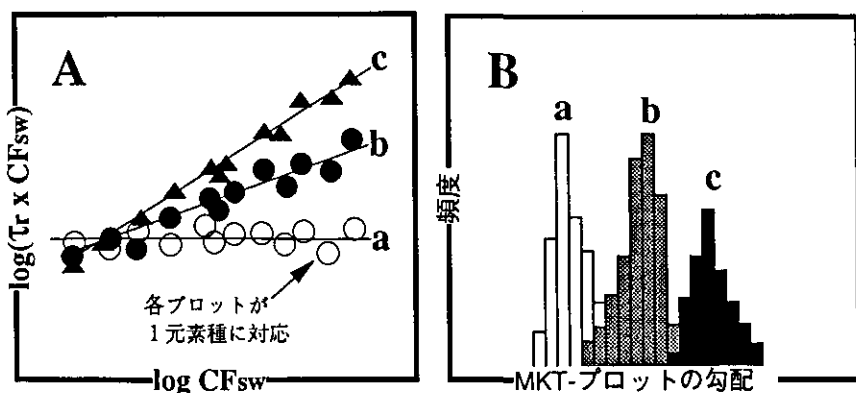


図3 MKT-プロット (A) とプロット勾配の頻度分布 (B) の模式図  
(a) 非汚染海域のプランクトン, (b) 汚染海域のプランクトン, (c) 食物連鎖上の高次捕食者 (魚など)

海浅海部において、夏季に低pHの存在が確かめられたほか、植物プランクトン卓越種およびサイズスペクトルが各海域ごとに異なることが明らかになった。低pH海域は、海水溶存CO<sub>2</sub>濃度が高いことから、海底堆積有機物の分解によるものと推定される。

また、モニタリングによる各栄養塩(N, P, Si)の年サイクルから、いくつかの異なるバイオトープが定義されることが分かった。従来、ドイツのHelgoland Instituteの北海における23年間のモニタリング結果から次のようなシナリオが提出されていた。ケイ藻による春期ブルーミングによりSiが消費された後にN, Pが残っていると、初夏に渦ベン毛藻(Siを必要としない)による第2ブルーミングが起こる。海域へのSi負荷が自然の風化によるのに対し、N, P負荷は農業、生活排水、土地利用形態等によるものであり、近年増加の傾向にあり、これが海洋生態系に長期のトレンドをもたらしているという仮説である。これを仮にHelgolandシナリオと呼ぶことにする。

本フェリーによる海洋表層モニタリングのカバーしている海域のうち、対馬海峡(海域(a))では、春季ブルーミングが進行して、N, Pの順に枯渇しても、Siが枯渇にまで至らない。また、大阪湾(海域(b))などのようなバイオマス濃度の高い海域では、Helgolandシナリオに準ずるようである。(b)以外の瀬戸内海(海域(c))でもSiは陸水から供給されるため枯渇しない。また、前述の低pH海域(海域(d))では、海底に堆積した有機物の分解からN, P, Siともに無期態の栄養塩が表層に補給されているようである。

レーザーによる植物プランクトンサイズスペクトルおよび出現種の同定から判明したのは以下のとおりである。一般的には、どの季節でもケイ藻が卓越していたが、海域(b)では、夏の観測で、微小ベン毛藻が多くみられた。また、海域(d)では夏でも大型のケイ藻の割合が多かった。このような出現種の海域差は、生物化学パラメー

タの年周期を反映しているものと考えられる。

生物化学量の年周期変化からバイオトープを定義する方法は、必ずしも一般的でないが、植物プランクトンを土台とする系のように、海水の浮遊生物が主体となっている場合には、単一時期のスナップショットだけでは済まず、本研究のように、フェリー等の高頻度の時系列に基づいた解析が必要であると考えられる。そして、対馬海峡のような大陸棚海域(a)、瀬戸内海のうち(c)、(d)などでは、Helgolandシナリオが必ずしも当てはまらない。ヨーロッパの大陸に隣接した海域と、モンスーンによる風化作用が顕著なアジア地域に隣接した海域とは、年周期および長期の変動に関して異なったシナリオが当てはまると考えられる。

#### (4) 水中画像アーカイビングによるサンゴ礁モニタリングに関する研究

サンゴ礁の長期環境変動をモニターするために、コドラート方式と、海域航走方式の2つの水中画像取得手法を考案し、撮像システムを作成した。前者では、同一の地点のサンゴ分布の経年変化を把握し、後者では、10kmほどのスケールの海域で、無作為抽出的な画像取得を目的とする。八重山諸島黒島において、本システムを試験的に作動させ、得られた画像をCD-ROMに格納した。また、海中公園センター(財)の協力により、過去に同海域で取得されていた水中画像を収集し、長期時系列の確立に供した。

このような画像は必ずしも統一された形式で撮影されたものではない。長期時系列として解析するためには、補正の過程が必要となる。この目的で幾何補正プログラムを作成し、数値ファイル化されたオリジナル画像(図4(a))から、それぞれ補正した画像画像(図4(b))を作成した。今後、このような統一した形式の画像アーカイブから、サンゴ礁の長期変動を解析する予定である。

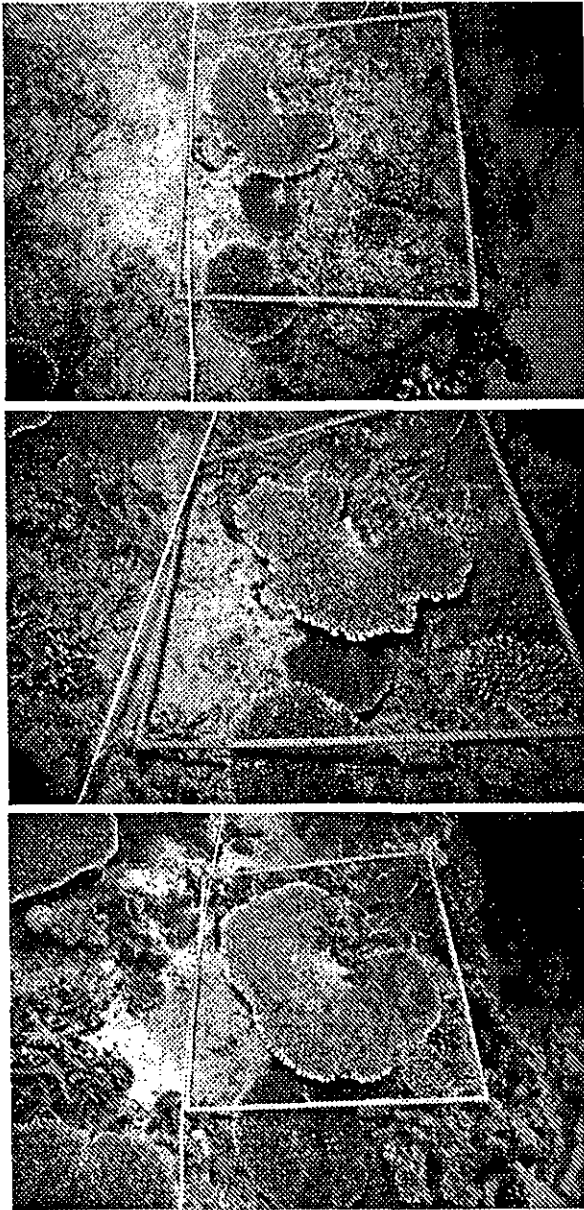


図4(a) 八重山諸島黒島北岸におけるコドラート地点の水中画像（オリジナル）の年変化  
 上から順に1990年1月、1990年12月、1991年11月に撮影されたもの。斜め上方から撮影されたため、1m×1mのコドラートがゆがんだ四辺形になっている。

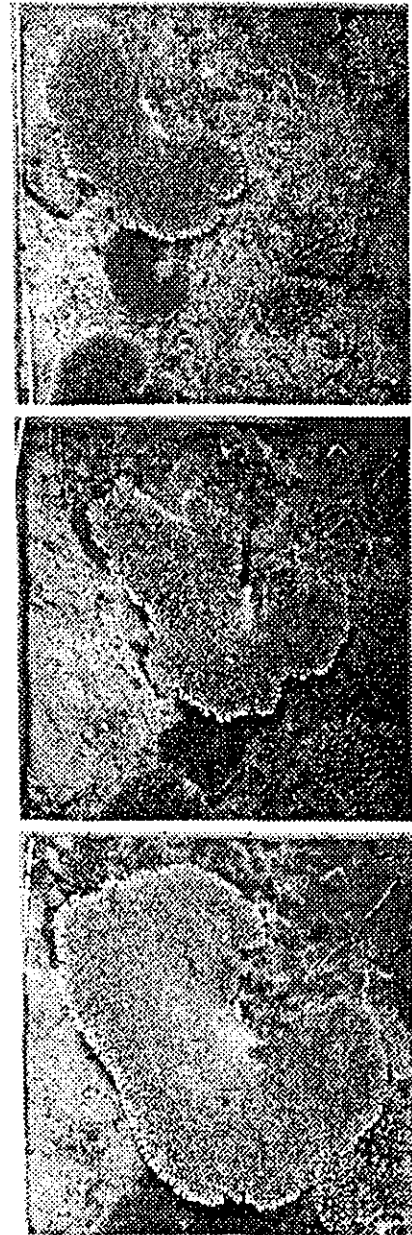


図4(b) (a)の画像を幾何補正アルゴリズムによって、コドラートが正方形になるように変換したもの。

## 2.6 熱帯林の減少に関する研究

### 〔研究組織〕

生物圏環境部

上席研究官

古川昭雄

地球環境研究グループ

森林減少・砂漠化研究チーム

○可知直毅・宮崎忠国・奥田敏統

野生生物保全研究チーム

○椿 宜高・高村健二・永田尚志

社会環境システム部

情報解析研究室

安岡善文

資源管理研究室

乙間末廣

科学技術庁特別研究員

足立直樹

### 〔研究概要〕

我々が推進している熱帯林の研究は、「1. 熱帯林生態系の環境及び構造解析に関する研究」、「2. 熱帯林生態系における野生生物種の多様性に関する研究」、「3. 熱帯林の環境形成作用の解明に関する研究」、「4. 熱帯林生態系の修復に関する研究」の各研究課題よりなり、国立環境研究所、森林総合研究所、国際農林水産業研究センターが中心となって推進している。また、一部の研究は北海道大学附属低温研究所、名古屋大学農学部、京都大学農学部、九州大学理学部、大阪市立大学理学部と自然環境研究センターの協力を得て行っている。

#### (1) 熱帯林生態系の環境及び構造解析に関する研究

近年における世界各地での森林の急速な減少は、森林資源の枯渇のみではなく、そこに生息する生物種の減少をまねき、回復不可能の段階にあると危惧されている。特に、野生生物の宝庫でもある熱帯林の減少は大規模で、多くの野生生物種が消滅しているといわれている。現在のところ熱帯林伐採跡地への植林が試みられているが、過去に熱帯の各地で見られた熱帯林更生にはほど遠く、自然条件における熱帯林生態系の基本的な知識、特にその環境と構造に関する知識が研究の基盤として必要である。このような観点に立ち、本研究においては、複雑な階層構造で知られている熱帯林動物と昆虫の群集動態に関する基礎調査および熱帯林構成樹種の落葉や種子落下の季節変化の調査を行う。

#### (2) 熱帯林生態系における野生生物種の多様性に関する研究

低地フタバガキ林の試験地であるパソの森が組成的、構造的に平衡状態であるかどうかを明らかにする目的で、50ヘクタールプロットで取得された2回のセンサスデータを用い以下の3つ視点から検証を試みた。1) 稚樹の密度依存的な死亡の所産としての稚樹の個体密度と同種の成熟木からの距離との関係、2) 成熟木と稚樹の空間分布パターン、3) 稚樹の生存率と補充率。第1回目のセンサスで確認された814種の本生植物のうち出現回数が100回以上の種、466種を選び各階層ごとに解析を行った。これらの個体群データの中から互いに40m以上離れている成熟木を抽出し、それらの周囲半径20m以内での稚樹(DBH<2cm)の個体密度を求めたところ、成熟木からの距離と正の相関関係を示すか中間地点で最高値を示す種は48種であった。各階層ごとの内訳は emergent 7種(全選抜種に対する割合、18.4%)、canopy (17種、10.5%)、understory (10.1%)、Treelet (8.5%)、Shrub (6.3%)であった。また、稚樹は集中分布するが成熟木はランダム、もしくは規則分布を示す種はわずかに7種であった。また、稚樹の生存率(死亡率)と補充率との関係についての解析からは emergent 層のみで死亡率と補充率との間に有意な相関( $P<0.05$ )が得られた。パソの森では宿主特異的な天敵の介在による密度依存型の稚樹の死亡が多様性の維持機構に深く関与しているとは考えられ難く emergent 層を除いて組成的に不安定であることが推察された。

### (3) 熱帯林の環境形成作用の解明に関する研究

熱帯林の急激な減少が地球環境に多大な影響を与えているとの考えがある。すなわち、熱帯林の年間降水量は温帯林の4倍以上にもなり、その約半分が蒸発散によって大気中に放出されている。さらに、熱帯林の伐採や焼払いによって熱帯林がCO<sub>2</sub>のシンクではなくソースになっているとの見解もある。しかし、環境形成要因としての熱帯林の役割に関して、実際のデータに基づいた解析はほとんどなされていないのが現状である。一方で、熱帯林の伐採は土壌の急速な劣化をもたらし、森林の再生を困難にしているとの報告がなされている。そこで、本研究では、熱帯林内外の微気象要因の測定、土壌形成に対する熱帯林構成生物の役割を解明することによって、熱帯林およびそれを取り巻く周辺地域の気候に対する影響と周囲環境の熱帯林生態系への影響を現地調査とモデルの構築によって解析し、地球的規模での熱帯林の環境形成作用を明らかにする。

### (4) 熱帯林生態系の修復に関する研究

乱伐や開発によって破壊された森林の生物資源と生態系の機能を回復させるためには、熱帯林生態系のもつ自己修復機能を利用して自然林の修復を図ることが重要であり、その機構を解明しこれらの知見に基づく熱帯林修復手法の開発が急務である。これらの研究によって得られた知見と技術は、荒廃した熱帯自然林生態系の効率的な修復に寄与するものと期待される。さらに、ここで得られた知見は、熱帯地域以外の自然林修復にも応用が可能である。

植物群落内の光環境の空間的変動は群落内に生育する稚樹の光合成・蒸散反応、形態的可塑性及び生存と成長に大きな影響を及ぼすと考えられる。したがって、熱帯多雨林の修復と更新の生態学的メカニズムを明らかにするため、林内光環境の時空間的不均一性、特に林内に生育する実生のスケールで微小空間の光環境を把握する必要がある。本研究ではマレーシアのパソー保護林において異なるサイズのギャップ下及び林床の稚樹の光環境、すなわち、光合成有効光子密度(PFD)の空間的変化を測定し、その生態学的意義を検討した。

### (5) 人工衛星データを用いた東南アジア地域の地表面被覆分布図の作成に関する研究

本研究では、1970年代、1980年代、1990年代の

LANDSAT MSS, TM等の人工衛星データを用いて、各年代の土地被覆分布図を作成し、さらにこの20年間における東南アジア地域の土地被覆状況の変化、特に、植生分布の変化を定量的に評価することを目的とする。本研究は、平成3～5年度に実施したNOAA AVHRRデータによる東南アジア植生分布計測(分解能1km)に比較し、高分解能センサデータであるLANDSAT TM(分解能30m)を用いることにより、焼畑や森林伐採など小規模での植生改変を把握することにより精度の高い土地被覆分布計測を行うものである。

平成6年度には、東南アジア地域をカバーする1990年代のLANDSAT TMデータ100シーン(全域の約半分をカバー)を入手した。このLANDSAT TMデータから土地被覆分類を行うための簡易手法について検討し、特定地域について地上調査データを用いて、土地被覆分類図を作成した。また、対象全域をカバーする衛星モザイク画像の作成のために、各TMデータの幾何補正を行い、一部対象地域のモザイク画像を作成した。

### 〔研究成果〕

#### (1) 熱帯林生態系の環境及び構造解析に関する研究

##### 1) マレー半島パソー林における小型ほ乳類の動態

##### ①はじめに

近年における世界各地での森林の急速な減少は、森林資源の枯渇のみではなく、そこに生息する生物種の減少をまねき、回復不可能の段階にあると危惧されている。特に、野生生物の宝庫でもある熱帯林の減少は大規模で、多くの野生生物種が消滅しているといわれている。今年度は、複雑な階層構造で知られている熱帯林動物群集動態に関する調査を、昨年度に引き続いて行った。

##### ②調査地および方法

調査はマレーシア国のネグリ・センビラン州(マレー半島部南西部)にあるパソ保護林で行った。パソ林は中心部の自然林と湿地林および1960年代に択伐の行われた周辺部の二次林とで構成されている。その境界域に10ヘクタール(200×500m)の永久調査区を設け、小型ほ乳類の個体数調査を1992年6月から行った。

##### ③結果および考察

調査区内の自然林、湿地林、二次林の割合はそれぞれ51.2%、19.2%、29.6%である。湿地林は雨が少なく一時的に地面が露出するが、それ以外の時期は水面に覆われる。植物のサイズを比較すると、自然林や湿地林で

はDBH 100cm以上の大きな木が多いのに比べ、二次林ではDBH 100cm以上の大きな木はほとんど見られずDBH 60cmから70cmの小さな木が多い。これから、1960年代に大きな木のほとんどは伐採されたことが分かる。これらの3タイプの林内にかごわな(17×17×44cm)を20m間隔で250個設置し、捕獲された小型ほ乳類の個体数密度を推定した。捕獲したほ乳類は体サイズ計測と繁殖状況の判定を行ったあと、指切り法および耳タグにより個体識別マークして放した。

1992年6月から1994年5月までの調査の結果を図1に示す。5目7科20種のほ乳動物が記録され、そのうち16種は成獣1kg以下の小型ほ乳類であった。そのうちではネズミ科が最も多く13種類、ついで8種のリスキ科、5種のツバイ科であった。全動物の密度を3つの森林タイプで比較すると、自然林で13.2/ha、二次林で10.1/ha、湿地林で7.2/haとなり、湿地林での密度が低いことが分かった。一方、種多様性指数 $\alpha$ で比較すると、それぞれ3.55, 3.23, 3.59となり、二次林が最も低いことが分かった。これは二次林ではリスやツバイが減ってネズミが増えるため動物相が単純化するためである。これらの結果から、1960年代の伐採の影響が、30年以上経過した現在でも、動物相に残っていることを示唆している。

## (2) 熱帯林生態系における野生生物種の多様性に関する研究

### 1) 低地フタバガキ林の組成的・構造的平衡性

#### ①はじめに

熱帯雨林の木本生植物の種類は温帯林や他の気候帯のそれに比べてはるかに高いことが知られている。この高い種多様性の維持機構の仕組みとその多様な森が組成的に、また構造的に定常状態にあるかどうかという点について2つの仮説が提示されている。すなわち、平衡説(equilibrium hypothesis)と非平衡説(non-equilibrium hypothesis)である。そもそも熱帯林では非常に多くの種が入り乱れて生活していることから、恐らくは種間の関係が非常に特異的に確立されているのではないかと想像された。したがってある植物(宿主)にはその種に特異的に寄生したり、捕食の危害を加えたりするバクテリア、菌類、動物がいるため、特定の種の植物が繁茂しにくい。なぜならば、それらが急激に勢力を拡大しようとしても「しがみついている天敵」による抑制効果が働き優占しにくいからであると説明できる。その意味において、これらの天敵による間引きは宿主の密度に依存していると考えてよいが、一方で少数派の宿主植物は天敵から見つかりにくい効果が働き、ある空間を占有で

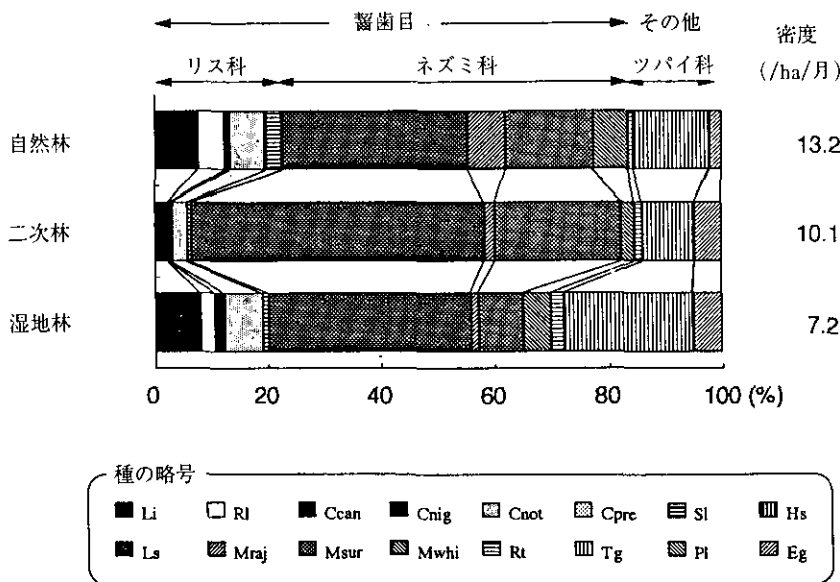


図1 自然林、二次林、湿地林における小型哺乳類の種構成

Li: *Lariscus insignis*, Ri: *Rhinosciurus laticaudatus*, Ccan: *Callosciurus caniceps*, Cnig: *Callosciurus nigrovittatus*, Cnot: *Callosciurus notatus*, Cpre: *Callosciurus prevostii*, Sl: *Sundasciurus lowi*, Hs: *Hylomyscus spadiceus*, Ls: *Leopoldamys sabanus*, Mraj: *Maxomys rajah*, Msur: *Maxomys surifer*, Mwht: *Maxomys whiteheadi*, Rt: *Rattus tiomanicus*, Tg: *Tupaia glis*, Pl: *Ptilocercus lowi*, Eg: *Echinosorex gymnurus*

占有できる権利が与えられている。結果として今ある植物はそれなりに占有権を保つことができ、森全体としては組成的にも構造的にも安定してゐる—これが平衡説の理屈である。

一方の非平衡説ではそれぞれの種が更新できるかどうかは、森林内で偶発的に発生する林冠空隙に種子供給可能な種が巡り会う確率に依存すると考える。たまたまラッキーチャンスに出くわした種が繁殖のスタンバイ状態になってれば生き残り、そうでない植物は減少する。したがって種組成は安定しておらず、遷移上の過渡期にある群落のように位置づけられる。

上記の2説について実際的な検証（森林が平衡、非平衡の状態にあるかを確認する）を行うことは熱帯林の持つ高い種多様性の維持機構を解き明かす上で興味深いテーマとなりうるが同時に森林の保護や持続的な開発を行う上でも大変重要な意味を持つ。例えば、もしも、ある森が非平衡の状態にあったとすれば、ある特定の種（とりわけ希少種や脆弱種）の人為的攪乱や伐採による減少はその種の絶滅につながる可能性があるのと同時に森林全体の組成と構造に決定的なダメージを及ぼす可能性がある。

我々がこれまで動物、植物の様々な角度から調べてきたバソの森ははたして、平衡、非平衡どちらにより近い状態にあるのであろうか？本来このことを検証するためには個々の種の生き死にを克明に調べる必要があるが、本研究ではバソの森に設置された50ヘクタールプロットでの2回のセンサスのデータを用いて解析を試みた。

平衡説の検証では森全体のregenerationに稚樹密度依存的な作用が働いているかを知る必要がある。そのためには稚樹の生存率と密度との関係を解析すればよいのであるが、便宜的に稚樹個体の密度が親木からの距離に応じて稚樹の個体密度がどのように変化するかを調べた。また、その結果として成熟木は稚樹に比べてよりランダムに分布しているかについても解析を行った。さらに、非平衡であるという仮定（それぞれの種の初期定着過程がどの程度安定しているかという視点から）に基づいて、森の構成種の稚樹の補充率（recruitment）と生存率（survivorship）との関係について調べた。すなわち、補充率と生存率がバランスよく保たれていれば、少数派にもニッチェが確保されていることになる。

## ②調査地及び方法

解析のもとになる資料はバソの森でスミソニアン研究

所とFRIMが共同で設置した50ヘクタールプロット（胸高直径1cm以上の全ての木本生植物が記録、マッピングされている）での2回にわたるセンサス（1985、1990年に開始した第1回と2回目のデータ）を利用した。第1回目のセンサスではプロット内で814種が記録されているが、今回の解析では出現頻度100回以上の種（全部で466種）を対象とし、5つの階層（emergent, canopy, understory, treelet, shrub）に分けて解析を行った。各階層での種数はemergent 38種、canopy 162種、understory 159種、treelet 59種、shrub 48種である。これらの階層区分は（Manokaran 他1991）に従った。

1987年の第1回目のセンサスデータから互いに40m以上離れた親木になりうる成熟木を抽出しそれらの周囲半径20m以内での稚樹の個体密度を求めた（それぞれの成熟木の中心から2mごとに稚樹の個体数を合計し1平方メートルあたりの個体数を算出した）。稚樹は胸高直径2cm以下の木とし、中心となる成熟木はemergent 30cm、canopy 20cm、understory 10cm、treelet 5cm、shrub 5cm以上の木とした。

成熟木、稚樹にわけて（成熟木、稚樹のカテゴリーは稚樹の個体密度の解析と同様）、森下 $I_0$ 指数を算出した。まず、50ヘクタールプロット（1000m×500m）の縦横のそれぞれの辺を1/26のサイズに細分化しそれらを最小単位の方形区として、そのサイズを2倍ずつに拡大しながら（1/25×1/25、1/25×1/24、1/21×1/20） $I_0$ 指数を求めた。この $I_0$ の値はランダム分布のとき1を示し、集中分布のときは $>1$ 、規則分布のとき0～1の範囲にある。本解析では $I_0$ の値が1から有意に外れているかをF検定によって確かめ仕切りの単位である方形区の面積が最小値から3番目までの間で（1/212～1/210）連続して1よりも有意に外れるかどうかを基準としてその植物の親木、稚樹がランダム、規則、集中分布しているかどうかを決定した。

各階層の選抜種において、第1回目と、第2回目取得されたデータの比較および、第2回目のセンサスにおいて新規に記録された稚樹個体のデータから、稚樹の補充率（新規個体/全稚樹個体数）、稚樹の死亡率（死亡個体数/全稚樹個体数）を算出した。

## ③結果及び考察

最近隣の成熟木からの距離（D）と稚樹の個体密度との関係について回帰分析を行った結果、DまたはDの対数軸に対して正の有意相関（ $P<0.05$ ）を示すか、もし



くはDの0~20mの中間地点で最高値を示す種 (optimal curveを描く二次曲線で有意に回帰できる) は選抜種466種のうち48種であった。各階層ごとの内訳は emergent 7種 (この階層に属する選抜種に対する割合, 18.4%), canopy 17種 (10.5%), understory (10.1%), Treelet (8.5%), Shrub (6.3%) で下層植生になるほど、その割合が低下することが分かった。一方、成熟木からの距離Dもしくはその対数値に対して負の相関を示す種は全部で43種で内訳は emergent 1種 (2.6%), canopy 7種 (4.3%), understory (11.9%), Treelet (20.3%), Shrub (8.3%) で正の相関を示す種の各階層ごとの割合とは逆に emergent や canopy で低くなることが分かった。この原因はそれぞれの種のもつ種子の散布能力が高木層と低木層ではっきりとした違いがあることによるものと思われる。すなわち、emergent や canopy 層の種においても今回の解析の対象にしたDの範囲 (20m) よりも長い距離で解析を行えばより多くの種が有意な相関を示すことが推察できるが、正の相関を示すものについては距離のレンジの取り方には影響されないものと思われる。上記の解析結果のうち典型的な増減パターンを示す3種を図2に示す。

成熟木と稚樹の分散構造の解析からはほとんどの種が稚樹、成熟木のサイズにかかわらず集中分布していることが分かった。いわゆる Janzen (1971) が示した「稚樹の段階では集中しているが成熟木は規則的に分布する」というカテゴリーに統計的に当てはまる種はわずか7種 (emergent 1種, canopy 6種) で、そのうち親木からの距離と稚樹の密度が正の相関を示すグループに属する種は *Parkia speciosa* のみであった。そもそも Janzen の仮説「親木のそばではその稚樹が育ちにくい結果、成熟木になるに従いより規則的な分散構造を示す」は表現があいまいで、統計的にその正当性を検証することがほとんど不可能であるが、上記の二つの解析結果から、親木の近隣域での稚樹の育ち難さが直接的にその種の分散構造を規定するまでには至っていないことが推察できる。

また、稚樹の生存率 (死亡率) と補充率との関係についての解析からは emergent 層のみで死亡率と補充率との間に有意な相関 ( $P < 0.05$ ) が得られた (図3)。すなわち emergent 層では「多産多死、少数精鋭」という図式が当てはまるが、他の階層ではこのパターンが必ずしも当てはまるとは限らない。おそらくは少数派の種でも多産派と同じくらい死亡率が高くなる種もあれば、逆に多産

で死亡率が低い種も存在し、最終的には少数派が絶滅してしまうような組成的に不安定な状態であるといえる。一方で emergent 層での死亡率に対する補充率の回帰式の傾きが1.0以下であったことから、このままの死亡率/補充率の比率が続けばこの階層においては多産種の個体密度は急激に低下するものの、一方の少数派の減衰率は多産種に比べるとはるかに緩やかなものであるため最終的にはすべての種が少数派になって共存できるような状況であることが考えられる。emergent 層では親木のそばで稚樹が育ちにくいような傾向をもつ種の割合が他の階層に比べて高かったことから、emergent 層の組成的安定性が密度依存型の稚樹の死亡に起因する可能性があるが、同時に林冠空隙 (ギャップ) を利用して更新を行う種の比率が階層間で異なるためではないかとも考えられる。

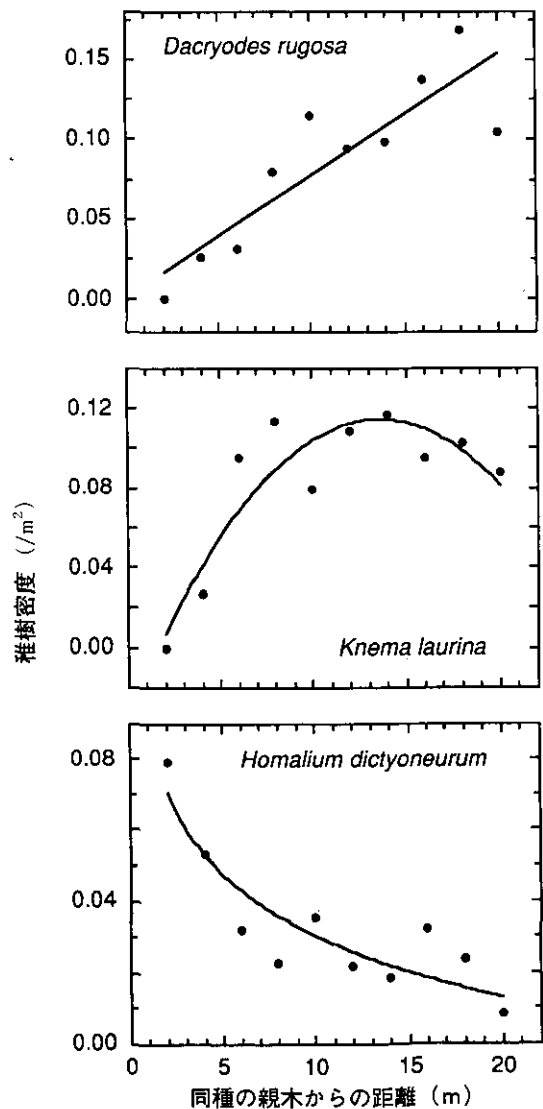


図2 成熟木 (親木) からの距離と稚樹の個体密度との関係

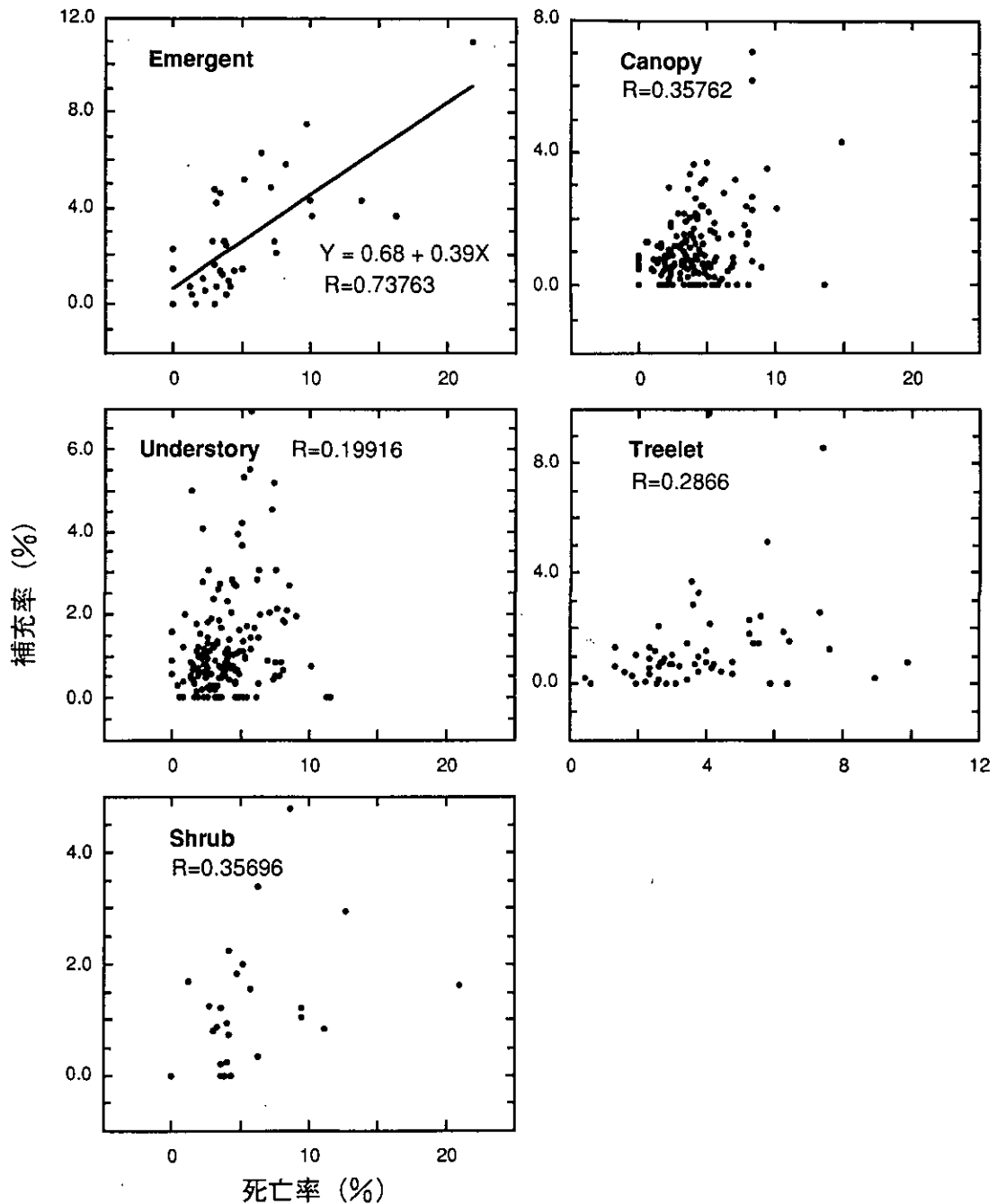


図3 5つの階層における稚樹の死亡率 (mortality rate %) と補充率 (recruitment rate %) との関係

結論としてはパソの森では宿主特異的な天敵の介在による密度依存型の稚樹の死亡が多様性の維持機構に深く関与しているとは考えられ難く、emergent層を除いて組成的に不安定になるポテンシャルが高いと考えられる。

### (3) 熱帯林の環境形成作用の解明に関する研究

#### 1) 木材の分解に果たすシロアリの役割

##### ①はじめに

熱帯林樹木の生産する一次生産産物は、木・葉・花等

の植物体となるが、やがてそれが枯死・落葉・倒木等の過程を通じて林床に供給される。林床に堆積した植物体は主として微生物活動によって分解されて土壤有機物となり土壤環境を形成する。この微生物活動は熱帯林では極めて活性が高く、したがって分解の進み具合は速い。その結果土壤有機物層は極めて薄く、その回転も速くなる。熱帯域に生息するシロアリはその生息量が極めて高く、土壤に生息する小動物の中ではアリと1, 2位を争う生息量を誇っている。そのシロアリが植物体分解に果

たす役割は大きいと報告されてきた。特に落葉・木材の分解においてシロアリがかかると植物体の体積が顕著に減少していくことは自然状態での分解過程において明瞭に観察される。しかしながらシロアリの影響を客観的に評価するには、シロアリが存在する条件とシロアリを除去した条件とを実験として設定することが必要であるが、このような試みは今までほとんど行われていない。本研究ではこのような実験を行っているが、まず木材についての中間結果を報告する。

### ②調査場所・手法

クアラルンプール郊外ケボンにあるブキット・ラゴン森林保護区とセランゴール州にあるパソ森林保護区との2カ所において実験・調査を行った。2カ所ともに低地熱帯雨林にあたり樹相は東南アジア熱帯雨林に特有のフタバガキ科樹木が優占している。気温は年間20～30度の範囲にあり、年間降雨量は2000mm前後で湿度が高い。

これらの調査地で行った実験では3種の木を用いた。その内の1種ゴホール (*Paranephelium macrophyllum*) は、森林から切り出した直径6cmほどの木を長さ20cmの丸木に切り分けて用いた。他の2種メランタイ (*Shorea macroptera*) とチェンガル (*Neobalanocarpus heimii*) については10cm×7cm×1cmの板を6枚束ねた物を用いた。これらの材を2種類の容器に入れて林床に置いた。容器は上側が開いたステンレス製の箱であるが、そのうち1種類は底面と側面の下部に口が開けてありシロアリが入れるようになっている(開き箱)。もう一つはその口が1mm目のステンレス網で覆ってあってシロアリが入れないようになっている(閉じ箱)。分解の進行具合の観察は年2～3回行い、一年おきに一部の木を回収して重量測定と成分分析を行っている。

### ③調査結果

ここでは実験の終了したゴホールについてその結果を紹介する。1991年10月に実験を開始して以来、1年おきに2地点の各種箱ごとに3本の丸木を回収した。実験期間3年間にわたる炭素重量の減少を図4に示した。この減少過程を以下の式で指数曲線に近似して求めた指数を減少率として用いた。

$$W_t = W_0 \cdot \exp(-kt)$$

$W_t$  は回収時の現存量、 $W_0$  は開始時の現存量、 $t$  は経過時間で、 $k$  が減少率である。

炭素重量の残存率を縦軸にとって実験経過日数を横軸

にとると、初めにあった炭素量のうち2年でほぼ半分、3年でそれ以上が分解されてしまっている。シロアリが閉め出されているかどうかでは差が認められず、地点間でも差が認められない。

縦軸に炭素重量の減少率をとって容器の種類と地点別に図5に示すと0.5付近を中心に減少率が求められるが、ここでも容器種類間と地点間のいずれでも差が認められない。

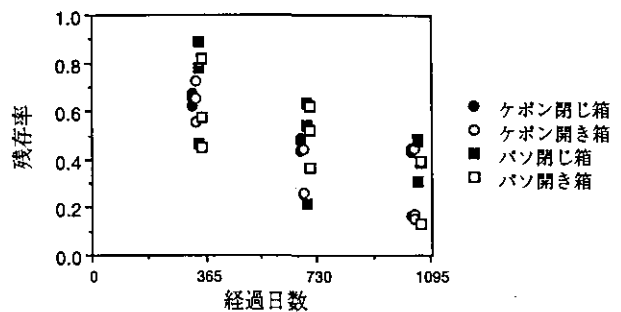


図4 ゴホール丸木の炭素重量の減り方

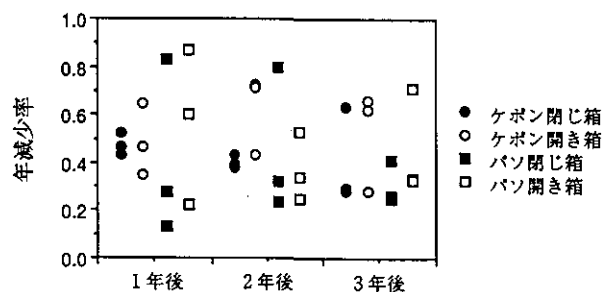


図5 ゴホール丸木の炭素量減少率の経年変化

以上の結果からみると、シロアリが閉め出されているかどうかがこの丸木の炭素重量減少に影響しているとは言えない。木材の密度によってシロアリに食われやすいかどうかが変わるということが一般的に指摘されているが、この丸木の場合も密度が影響している可能性がある。この点については、現在実施中のチェンガルとメランタイの分解実験で木材の密度が大きく異なる種を選んであるので、それらの実験結果と合わせて、シロアリの木材分解に果たす役割と木材の密度との関連を検討する予定である。

## 2) 落葉の分解過程

### ①はじめに

落葉は木材とは対照的に体積に対して表面積が大きいために、微生物による分解作用を速やかに受けるものと考えられる。しかしながら一方では落葉を好んで採食するシロアリもいるのでシロアリの影響も大きいと考えられる。また樹種によって葉の厚み・堅さに変化があるので落葉の分解過程はこれらの要素を考慮して調べる必要がある。ここではシロアリの影響を評価するために行っている実験のうち一つを紹介する。

### ②調査場所・手法

調査地はクアラルンプール郊外のブキット・ラゴン森林保護区である。この森林内に東南アジア熱帯林の代表的樹種の1つであるクルインブル (*Dipterocarpus baudi*) の植林地がある。この植林地においてこの樹種の新しい落葉を採集し、乾燥させて重量測定を行った後、2種類の網袋に封じて林床に放置した。網袋の1つは2mm目のプラスチック網地で、もう1つは0.5mm目のステンレス網地で作られた。後者は網目が小さいために土壤動物が入れないようになっている。1ヵ月あるいは2ヵ月おきに各種の網袋を10袋ずつ回収して重量測定と元素分析を行った。

### ③調査結果

クルインブルの葉の重量減少は2mm目の袋の方が0.5mm目の袋より顕著に速かった。実験開始後2ヵ月までは両者の間で差が認められなかったが、4ヵ月及び6ヵ月後には統計的に有意な差が認められた。6ヵ月後には0.5mm目では4割しか減少しなかったのに対して、2mm目では6割も減少した。

元素含有量は元素種によって増加したり減少したりしたが、減少した中にも初期の浸出によって急激に減少したものから徐々に減少したものまである。この過程の違いは落葉内養分の土壌への還元効率から考えて興味深い現象である。網目の違いによる減少率の差はいくつかの元素で認められ、樹木栄養分として重要な窒素・リンもこの中に含まれていた。

## (4) 熱帯林生態系の修復に関する研究

### 1) 熱帯林内の光環境の空間的不均一性とその生態学的役割

#### ①はじめに

乱伐や開発によって破壊された森林の生物資源と生態

系の機能を回復させるためには、熱帯林生態系のもつ自己修復機能を利用して自然林の修復を図ることが重要であり、その機構を解明しこれらの知見に基づく熱帯林修復手法の開発が急務である。これらの研究によって得られた知見と技術は、荒廃した熱帯自然林生態系の効率的な修復に寄与するものと期待される。さらに、ここで得られた知見は、熱帯地域以外の自然林修復にも応用が可能である。そこで、森林の自然更新の場となる林冠ギャップの光環境の空間的不均一性とその生態学的役割について検討した。

植物群落内の光環境の空間的変動は群落内に生育する稚樹の光合成・蒸散反応、形態的可塑性及び生存と成長に大きな影響を及ぼすと考えられる。したがって、熱帯多雨林の修復と更新の生態学的メカニズムを明らかにするため、林内光環境の時空間的不均一性、特に林内に生育する実生のスケールで微小空間の光環境を把握する必要がある。本研究ではマレーシアのパソー保護林において異なるサイズのギャップ下及び林床の稚樹の光環境、すなわち、光合成有効光量子密度 (PFD) の空間的变化を測定し、その生態学的意義を検討した。

#### ②方法

マレーシア半島部のパソー自然保護林内において、大きなギャップ (約600m<sup>2</sup>)、小さなギャップ (約50m<sup>2</sup>) と林床の三つのプロットで、1994年6月に光環境の測定を行った。それぞれのプロットで12ヵ所以上の地点においてLi-Cor社の光量子センサーを地上50cmのところまで水平に設置し、毎日8時から18時まで1分間隔で1週間にわたって連続して光合成有効光量子密度 (PFD) を測定した。同時に群落上のPFDも測定した。

測定したデータに基づいて、積算PFD、陽斑PFD、散乱光レベルなどを算出し、林内に生育する稚樹の光環境を評価した。また、光環境の空間的不均一性が林内の稚樹の物質生産に対する影響を明らかにするため、典型的な熱帯稚樹の陰葉と陽葉の光・光合成速度の関係をを用いて、それぞれの測定地点の光環境下において単葉の単位面積当たりの物質生産のシミュレーションを行った。

#### ③結果

積算PFD及び陽斑PFDの標準偏差とCVはプロットによって大きく変化することが分かった。また、大きなギャップでは80%以上の測定地点は、積算PFD、陽斑PFD、散乱光レベルとも小さなギャップや林床のほとんどの地点より有意に高いことが示された。一方、小さな

ギャップでは、林内と比べて積算 PFD はほぼ同じ値であったが、散乱光のレベルが高く、一方積算陽斑 PFD は低いことが分かった。PFD 頻度分布からみると  $50 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  以上の PFD が小さなギャップでは極めてまれなのに対して、林床ではわずかながら  $500 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  も越える場合があった (図 6)。

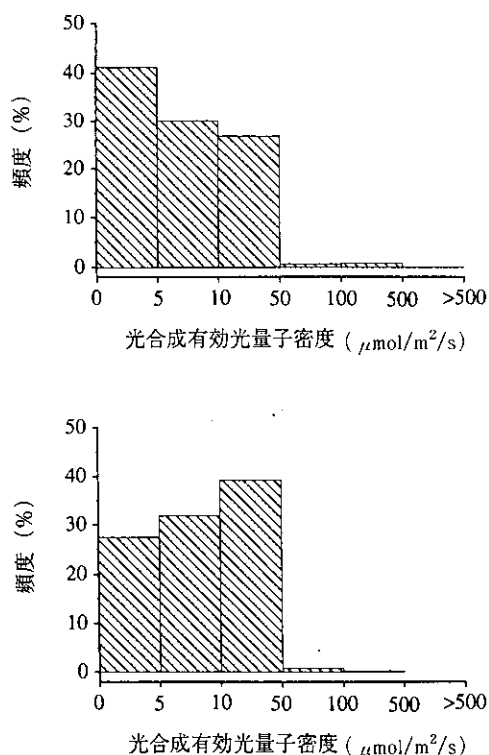


図 6 小さなギャップ (上図) 及び林床 (下図) においてそれぞれ 12 の測定地点で 3 日間の光合成有効光量子密度 (PFD) の頻度分布

Diffuse site factor, すなわち、散乱光条件下で森林の上の PFD に対する林内の PFD の比は測定地点の陽斑 PFD と正の相関関係を示したが、相関係数は 0.356 と 0.538 の間で低かった。

測定した光のデータに基づいて、稚樹の陰葉と陽葉の 24 時間の物質収支を計算した結果、大きなギャップ内において多くの地点の光環境は陽葉の物質生産に、小さなギャップと林床の光環境は陰葉の物質生産に有利であることが明らかにされた。

#### ④ 考察

これまで、熱帯林内のギャップまたは林床では光環境が均一であることを仮定して、論じられていたが、Chazdon (1986) はコスタリカの熱帯季節林での測定結

果に基づいてギャップ内でもマイクロサイト (Microsite) によって光環境が大きく変わることがあると指摘した。本研究によってマレーシアの熱帯多雨林内でもギャップ、あるいは林内の光環境が測定地点、すなわち、マイクロサイトによって大きく変動することが明らかにされた。

次に、本研究では小さなギャップでは、マイクロサイトの積算 PFD が林床とほぼ同じ値を示したが、小さなギャップより林床のマイクロサイトの積算陽斑 PFD が高く、散乱光が低いことが注目される。

さらに、草本群落、落葉広葉樹林及び針葉樹林に比べ、パソアの熱帯林では Diffuse site factor と積算 PFD 及び陽斑 PFD との相関関係が極めて低いことも特徴的である。

これらのことから、(1) 熱帯林内の光環境を評価するため、単一の指標またはパラメータで表現することには問題があると考えられる、(2) 陽斑 PFD または散乱光のレベルの違いに対して植物の馴化・適応能力の違いが生じた場合、それぞれの場所で光利用性の異なる樹種が定着し、更新する環境を提供し、林内に生育する樹木の多様性を維持できることが示唆された。

#### (5) 人工衛星データを用いた東南アジア地域の地表面被覆分布図の作成に関する研究

熱帯林の減少、砂漠化など東南アジア地域における地表面被覆状況の変化は著しい。これらの土地被覆の変化は、それ自身が地域にとって大きな問題であるばかりでなく、その変化が局地的また広域的な気候変動を引き起こすなど地球規模での環境変動に大きな影響を与えている。これらの問題に対処するために土地被覆の現状とその変化を正確にとらえることが緊急の課題となっているが、大陸レベルのような広い範囲を対象として地表面の状況を高精度観測することは容易ではなく、正確な情報が得られていないのが実情である。

本研究では、1970 年代、1980 年代、1990 年代の LANDSAT MSS, TM 等の人工衛星データを用いて、各年代の土地被覆分布図を作成し、さらにこの 20 年間における東南アジア地域の土地被覆状況の変化、特に、植生分布の変化を定量的に評価することを目的とする。本研究は、平成 3～5 年度に実施した NOAA AVHRR データによる東南アジア植生分布計測 (分解能 1 km) に比較し、高分解能センサデータである LANDSAT TM (分解能 30m) を用いることにより、焼畑や森林伐採など小規模

での植生改変を把握することにより精度の高い土地被覆分布計測を行うものである。

平成6年度には、東南アジア地域をカバーする1990年代のLANDSAT TMデータ100シーン（全域の約半分をカバー）を入手した。このLANDSAT TMデータから土地被覆分類を行うための簡易手法について検討し、特定地域について地上調査データを用いて、土地被覆分類図を作成した。分類手法は、従来から行われているクラスタリング（篩なし分類）による方法、最尤法（篩付き分類）による方法など複数の方法を比較し、さらに、東南アジアに特有な小規模単位での季節による変化を伴う土地利用形態を反映できる分類項目、手法の検討を行った。この結果、東南アジアでは一時期でのTM画像のみから土地被覆を判定することは難しく、多季節データの複合利用が有効であることが判明した。

また、対象全域をカバーする衛星モザイク画像の作成のために、各TMデータの幾何補正を行い、一部対象地域のモザイク画像を作成した。平成7年度に残る半数の

1990年代のTMデータを入手し、全域の土地被覆分類図を作成する予定である。また、今後さらに、1980年代、1970年代のLANDSAT MSS(分解能80m)データを入手し、この間の変化を評価する予定である。

さらに、高分解能センサーであるLANDSAT TMから得られる局地情報をより広域に外挿するために、LANDSAT TMとNOAA AVHRRデータの重ね合わせを行い、両者をつなぐスケーリングモデルについて検討を行った。スケーリングモデルは、多くの地球環境問題が、基本的には局地的/地域的事象から発していることから、高分解能ではあるが狭い範囲（180km）を観測するLANDSAT TMデータと低分解能（1km）ではあるが広い範囲（2700km）を高頻度（毎日2回）で観測するNOAA AVHRRデータを融合的に利用し、局所情報を広範囲に外挿することを目的とするものである。

なお、本研究の成果として得られたモザイク画像及び植生指数図データは、UNEP/GRID-TSUKUBAを通し世界に公開されている。

## 2.7 野生生物種の減少に関する研究

### 〔研究組織〕

生物圏環境部	
上席研究官	古川昭雄
地球環境研究グループ	
野生生物保全研究チーム	○椿 宜高・高村健二・永田尚志
森林減少・砂漠化研究チーム	可知直毅・唐 艶鴻
地域環境研究グループ	
都市環境影響評価研究チーム	高橋慎司
社会環境システム部	
情報解析研究室	安岡善文・田村正行・山形与志樹・清水 明
生物圏環境部	
環境微生物研究室	渡邊 信

### 〔研究概要〕

#### (1) 森林破壊が野生生物種の減少に及ぼす影響に関する研究

野生生物種の減少の主な原因は開発による森林、湿地、草原などの生息地の破壊にあるといわれている。この研究では複数のタイプの野生生物生息地における種多様性の差異を明らかにすることによって、森林破壊に伴う野生生物種の減少の機構解明を行う。本研究は国立環境研究所、森林総合研究所、自然環境研究センター、鹿児島経済大学による共同研究であり、研究期間は平成3年度から7年度までの5カ年である。

研究はマレーシア国の熱帯雨林で行っている。マレーシア側の共同研究機関はマレーシア森林研究所 (Forest Research Institute Malaysia)、マレー大学 (University of Malaya)、マレーシア国立大学 (Universiti Kebangsaan Malaysia) である。

研究調査地点はクアラランプールの北方約10kmに位置するウルゴンバック (Hulu Gombak) および南東約70kmのパソ保護林 (Pasoh) である。パソ林は平地に残った数少ない森林の一つで、周りをアブラヤシのプランテーションに囲まれた約2500ヘクタールの森林である。一方、ゴンバックは最近高速道路やリクレーション施設の建設が進んでいる地域の森である。昆虫や小形哺乳類に関しては主にパソ林内の地点間比較、鳥類に関しては2地点の比較研究を行っている。

#### (2) 希少野生動物の遺伝的多様性とその保存に関する研究

この研究は環境庁自然保護局、農林水産省森林総合研究所、農林水産省畜産試験場、農林水産省農業生物資源研究所、自然環境研究センター、早稲田大学との共同で行っており、研究期間は平成5年度から7年度までの3カ年である。

絶滅に瀕した野生動物の遺伝的多様性 (ヘテロ接合率が低下していることはいくつかの種で知られている。これは近交劣化とほぼ同等の現象であるので、その生存力への影響を見るために、メダカや昆虫に関して野生系統と室内飼育系統の遺伝的多様性の比較を行っている。その結果、長期間室内飼育された系統は遺伝的多様性が減少していることがDNA分析から分かってきた。一方、動物には本来左右対称であると考えられる部位がわずかに左右の長さが異なっていることが多い。そこで、左右対称性のゆらぎ (Fluctuating Asymmetry: 略してFA) と生存力や繁殖力との関連性を検討している。また、密度効果などの環境の影響がFAに与える影響を評価するための実験を行っている。

危機に瀕した種の絶滅を防止するには、生息域内における保全施策に加え、生息域外で保存し増殖させることも必要となる。そのために家畜繁殖技術として発達した系統保存、人工受精、始原生殖細胞の保存などの技術を応用して人工増殖などに活用する手法を開発する。

### (3) 人工衛星データ等利用による湿地植生分布の調査に関する研究

湿地は、近年、野鳥の生息地として、またメタンの発生源として、その重要性が指摘されている。本研究は、人工衛星からのリモートセンシングデータを利用して、湿地の植生、水、土壌等環境状態を調査し、さらに全球レベルでの湿地分布図を作成することを目的とするものである。

平成6年度は、前年度に引き続き実験フィールドである北海道釧路湿原、オーストラリア東部湿地帯において、LANDSAT TM等衛星データの収集、現地調査による地上観測データの収集を行った。また、タイ・パチョキリカン湿地、マレーシア・マタンマングローブ湿地など世界の代表的湿地の衛星画像データを収集するとともに、一部実験フィールドにおいて現地調査等による地上データの収集を行った。一方、衛星画像から湿地環境を調査するためのデータ解析手法について検討を行い、特に、マイクロ波帯域のセンサーである合成開口レーダー(SAR)画像データとLANDSAT TM等光学センサーデータ複合利用により植生分類を行うための手法を開発した。また、全球レベルでの湿地分布図作成のために、NOAA AVHRR東アジア時系列モザイク画像を入手し、湿地の季節変化パターンの評価を行った。

#### [研究成果]

##### (1) パソールにおけるおもな糞虫の個体数変動

糞虫は世界中のほとんどの森林に生息しており、ほとんどの地域で明らかな季節性を示すことが多い。温帯地域ではその個体数は主として温度変化に対応して変化し(夏に個体数と種類数が増加する)、気温変化の小さい熱帯地域では雨量に対応して変化する(雨期に増加する)ことが知られている。しかし、東南アジアにおいてはこれまで長期にわたる調査が行われたことがほとんどないため、また、東南アジア地域の多くでは乾期と雨期が明瞭でないため、季節性についての知見はほとんどなかった。我々が調査を行っているパソールも季節性が明瞭でなく、雨の少ない時期がやや不規則にある程度で、雨の全く降らない月はほとんどない。ここでは、そのような季節性の特徴をもつマレー半島部のパソールにおける主な糞虫の個体数変動を分析した。

ピットフォール型バイトトラップを使うことによって、パソールの糞虫を採集した。トラップ設置地点はパ

ソールの周辺から中心部にかけて200メートルごとに8地点を設定した。第2地点では1991年7月から10個のトラップを毎月設置している。第2地点を除く第1地点から第6地点までは1991年10月からそれぞれ3個のトラップの設置を開始した。さらに1992年2月から第7地点と第8地点にトラップを設置している。トラップの設置期間はいずれも2日間である。今回は種の同定が終了している1991年10月から1994年1月の結果について報告する。気象データはパソール気象観測ステーションの資料を用いた。

1994年1月までに4846頭の糞虫が採集され、少なくとも37種類の糞虫がパソールに生息することが分かった(図1)。そのうち最も個体数の多かったのが*Sisyphus thoracicus*で、全採集個体数の約30%を占める。この種は体長約6mmの小型の「ころがし屋」で、動物の糞を切り取って小型の球を作って適当な場所まで運び、そこで自分の巣を掘って地中に球を運んで産卵する。この種は林の周辺から中心まで分布するが、その密度は中心部ほど高いことが分かった(図2)。また、林の中心部ではほぼ6カ月周期の明瞭な個体数の振動がみられた。とこ

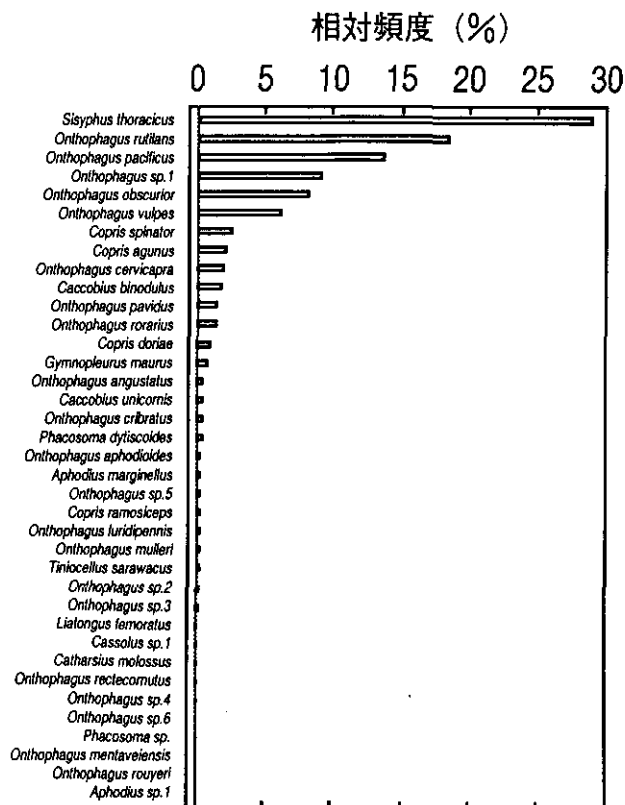


図1 パソールで1991年10月から1994年1月までに採集された糞虫のリストと捕獲個体数(%)



ろが林の周辺部では個体数の周期的変化が明瞭でない。このことは、この種の発生地が森林の中心部であること、また、発生周期が約6カ月であることを示唆している。気候的な周期性がほとんど見られない東南アジアの森林で、糞虫になぜこのような季節周期が認められるのか、気象データとのさらに詳しい検討が必要である。また、他の種類の個体数変動についても解析を進めている。

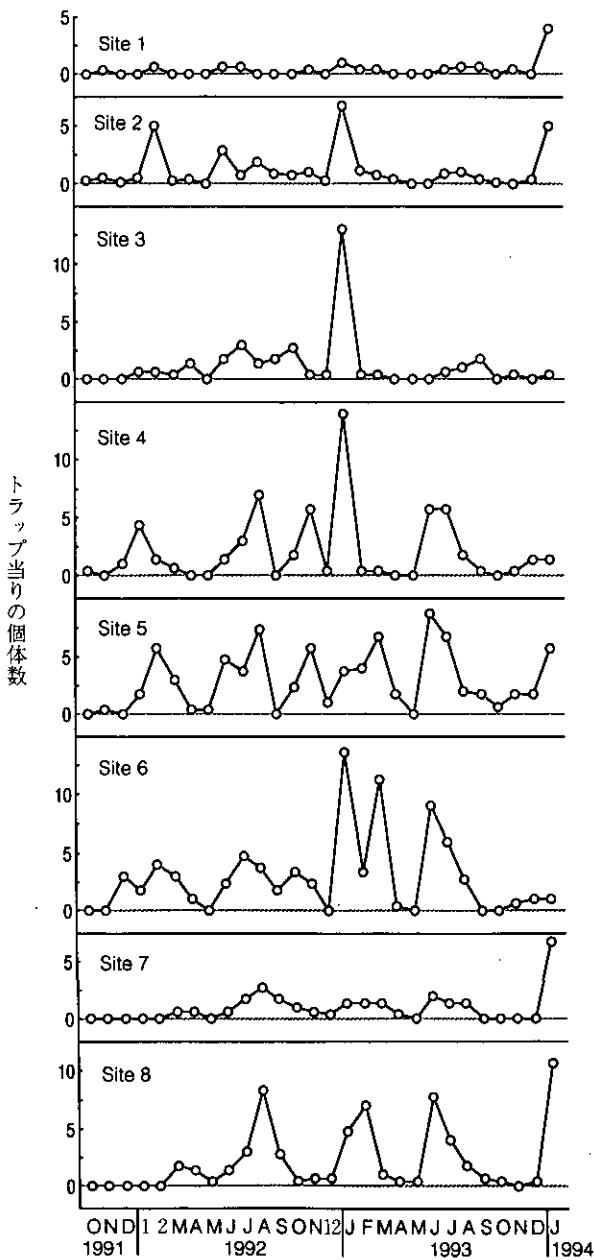


図2 パンシ林内の8地点における *Sisyphus thoracicus* の個体数季節変化

## (2) マレー半島における林床鳥類群集多様性の比較

マレー半島において記録されている621種類の鳥類のうち約370種類は熱帯林およびその林縁を主な生息地としている。多くの種はスダ地域固有の種であり、いろんなタイプのフタバガキ熱帯林で適応放散し種分化してきたと考えられている。特に、低地熱帯林はマレー半島部においてもあまり残っていないが、低山地熱帯林も減少の一途をたどっている。かく乱を余り受けていないが隔離されている低地熱帯林とかく乱されている低山地熱帯林において鳥類群集の多様性を明らかにし、熱帯林のかく乱に伴う鳥類群集構造やギルドを構成している種類の行動の変化を明らかにすることを目的としている。

研究調査地点として、あまりかく乱されていない隔離された低地熱帯林としてクアラルンプールの南東約70kmに位置するパソ森林保護区（以降パソと略す）とかく乱された低地熱帯林としてクアラルンプールの北約10kmに位置するウルゴンバックのマレーシア大学野外調査ステーションの周辺（以降ゴンバックと略す）を選んだ。ゴンバックにおいてはマレーシア研究者との共同研究でカスミ網による標識再捕調査と花蜜・昆虫食鳥類の採食行動の調査を毎月平行して行った。パソにおいても林床棲鳥類の標識再捕調査を毎月行うとともに、タワーを利用した樹冠部の標識調査を数回行った。各調査地の捕獲個体数および群集多様性パラメータを表1に示してある。記録された種類数は、調査の進んでいるゴンバックの方が多量のもの、シンプソンの多用度指数およびピエルーの均衡性指数はかく乱されていないパソ森林保護区がやや大きいものの大きな差は認められなかった。積算捕獲個体数および種類数と調査努力の関係から、それぞれ両地域の相対密度および推定生息種類数を求めた（図3）。相対密度は、積算捕獲個体数と調査努力のグラフの直線回帰の傾きで表される。ゴンバックの相対密度は $0.798 \pm 0.014$ （標準誤差）個体/網/日であり、パソの $0.411 \pm 0.008$ （標準誤差）個体/網/日のおよそ2倍であった。また、調査網数-種数関係を準ニュートン法を用いてゴンパーツ式に当てはめ、両地域の推定生息種類数を求めた。ゴンバックの林床棲鳥類の推定生息種類数は $88.6 \pm 0.58$ （95%信頼限界）種類であり、パソのそれは $57.4 \pm 0.64$ 種類であった。1970年代後半にパソで行われた同じような調査によると81種類の林床棲鳥類が記録されている。パソでは暴露種類数が少ないため推定値の精度には、まだ、問題があると思われるが、この20年

表1 両調査地間の群集多様性の比較

	パソ森林保護区	ウルゴンバック
森林タイプ	低地熱帯林	低山地熱帯林
攪乱の程度	小さい	大きい
調査日数・網数	763日・網	1177日・網
総捕獲個体数	340個体	963個体
捕獲種数	63種	84種
相対密度	0.41個体/網/日	0.8個体/網/日
群集多様度		
シンプソンのλ指数	20.23	17.41
シャノン・ウィーバー関数H'	4.96	5.1
ピエールの均衡性指数J'	0.83	0.8

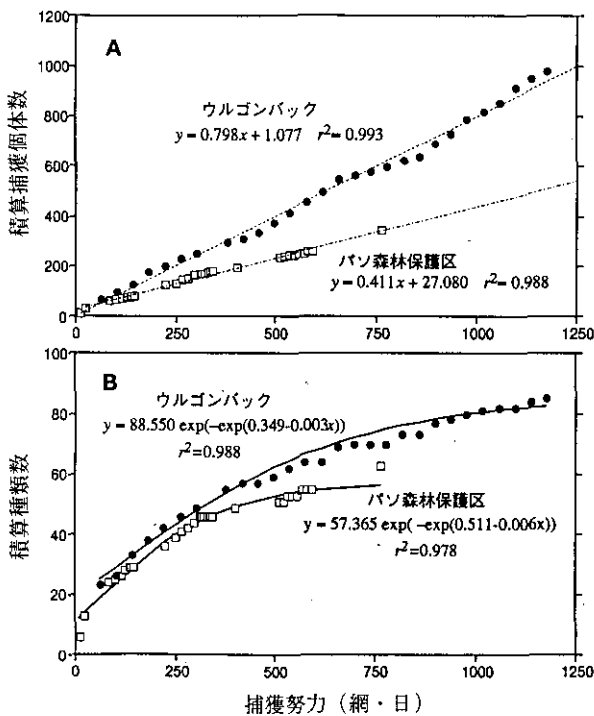


図3 両調査地における鳥類の捕獲努力量と積算捕獲個体数の関係 (A), および捕獲努力量と積算捕獲種類数の関係 (B)

間に15種類以上がパソから絶滅したと予想される。

暴露種数の多いゴンバックにおいて、α多様性がやや低い原因は群集内で優占度の最も高いコクモカリドリが群集全体の18.3%の個体数を占めていることによる(図4)。ゴンバックの優占度上位5種は、コクモカリドリ、タンビムジチメドリ、ハイガオカナムリヒヨドリ、オレンジハナドリ、ハイガシラモリチメドリである。パソでの優占度上位5種は、ミツエビカワセミ、アカハラシキチョウ、ヒゲチャイロチメドリ、ハイガシラアゴヒゲヒ

ヨドリ、コルリである。このうちコルリは、旧北区の温帯から亜寒帯で繁殖し、東南アジアで越冬するツグミ科の渡り鳥である。ゴンバックでは、優占度21位、鳥類群集中のわずか0.9%を占めているのにすぎないことから、パソのようなかく乱の少ない低地熱帯雨林がコルリの重要な越冬地となっているといえる。群集中で上位5種が占める割合は、ゴンバックで42%、パソで39%と両地域で大差はない。

群集を構成しているギルドに注目してみると、両調査地とも林床棲昆虫採食ギルドの個体数が大きな割合を占めていたが、かく乱されたウルゴンバックではこのギルドの占める割合がやや低かった。林床棲昆虫採食ギルドはチメドリ科とツグミ科で占められ、かく乱を受けていないパソにおいては20種類のチメドリ類が林床鳥類群集中の40%以上の個体を占めていたのに対し、ゴンバックではチメドリ科は8種類しか記録されず群集中の25%の個体を占めていたに過ぎなかった。林床棲昆虫採食ギルドに次いで優占するギルドは、果実-昆虫食および花蜜食ギルドであった。このギルドは主にヒヨドリ科、ハナドリ科およびタイヨウチョウ科で構成され、各調査地での果実-昆虫食ギルドの群集中の比率はほぼ等しかったが、花蜜食ギルドはの群集中の比率はコクモカリドリの優占するゴンバックがかなり高い。しかし、かく乱されていないパソでは8種類が記録されたのみであったのに対してゴンバックでは20種類が記録された。前年度報告したように林床棲昆虫採食ギルドは、かく乱されていない低地林において広いニッチ幅を持ち、多くの種類が熱帯林中に畳み込まれている。チメドリ類に加えてツグミ科やヤイロチョウ科等の林床棲昆虫食ギルドも、熱帯林のかく乱に敏感なグループであると結論できる。ヒヨド

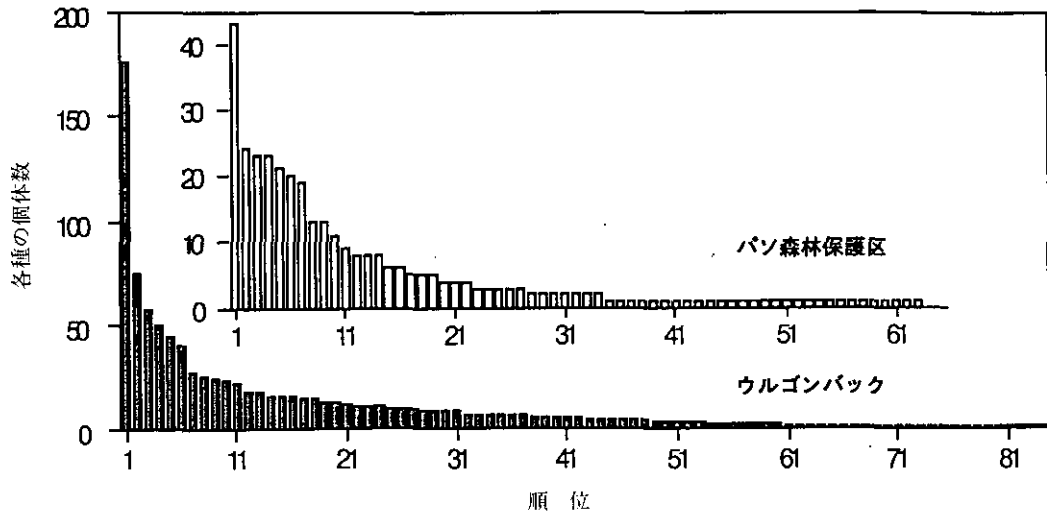


図4 両調査地の鳥類群集構造の比較

り類、ハナドリ類、タイヨウチョウ類は、本来、ギャップ・林縁などの遷移途中の植生に依存しているグループであるが、かく乱を受けている地域ではこれらに類似したハビタットが人為的に供給されるのでこれらのグループが優占しているといえる。実際に、森林のかく乱によって蜜花、漿果および液果等の餌資源がどのように変動するかは定量化する必要がある。

### (3) 昆虫の繁殖成功率と左右対称性のゆらぎ

本来左右対称であるべき形質でも、個体の発生過程における遺伝・環境ストレスによって、完全な対称性からのゆらぎ (Fluctuating Asymmetry: 略してFA) を生じる。形質の左右対称性がある種の繁殖において性選択とかかわってFAの小さい個体はストレスに抗して比較的正常に発育できた個体だと考えれば、FAは個体の質 (Heterozygosity 頻度や栄養的健康状態など) を表す指標として使える可能性がある。また、個体の質に自然淘汰や性淘汰が働いてFAと適応度との間には相関が見られるどうかを検証することは、FAが種個体群の保全に有用であるかどうかを判断する上で重要な作業である。そこでギフチョウやユスリカのオスについてFAを測定し、その交尾成功率との相関を解析した。

ギフチョウのオスは、交尾の際、メスの腹部に巨大な交尾栓をつけることが知られている。オスは腹部の毛を交尾栓の材料として使い、交尾の度に毛を消費するので、その消耗の程度からオスの交尾回数を推定することができる。このことを利用して、オスの翅に関するいくつか

の形質についてFAを測定し、交尾成功率との関係を検討した。その結果、FAの小さな個体は寿命が長く、生涯交尾成功率も高いことが分かった (図5)。

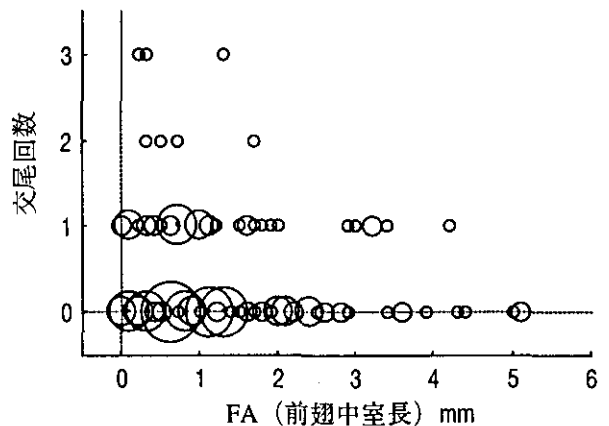


図5 ギフチョウ雄の前翅中室長に見られた左右対称性のゆらぎ (FA) と交尾回数との関係

アカムシユスリカ (*Tokunagayusurika akamusi*) は幼虫期に湖沼底泥に生息し、年1回晩秋になると成虫へと羽化し湖岸において交尾繁殖活動を行う。交尾行動として2型が知られており、雄が空中で集まって群飛を形成しそこに雌が飛来して交尾に至る空中交尾と、建造物や樹木などの上で停まった状態の雌を雄が捜して交尾に至る地上交尾とがある。

このユスリカの各々の交尾行動に成功した雌雄を対で採集し、また群飛が形成されず地上交尾行動も行われていない時間帯に地上に停まっている休息個体を採集し

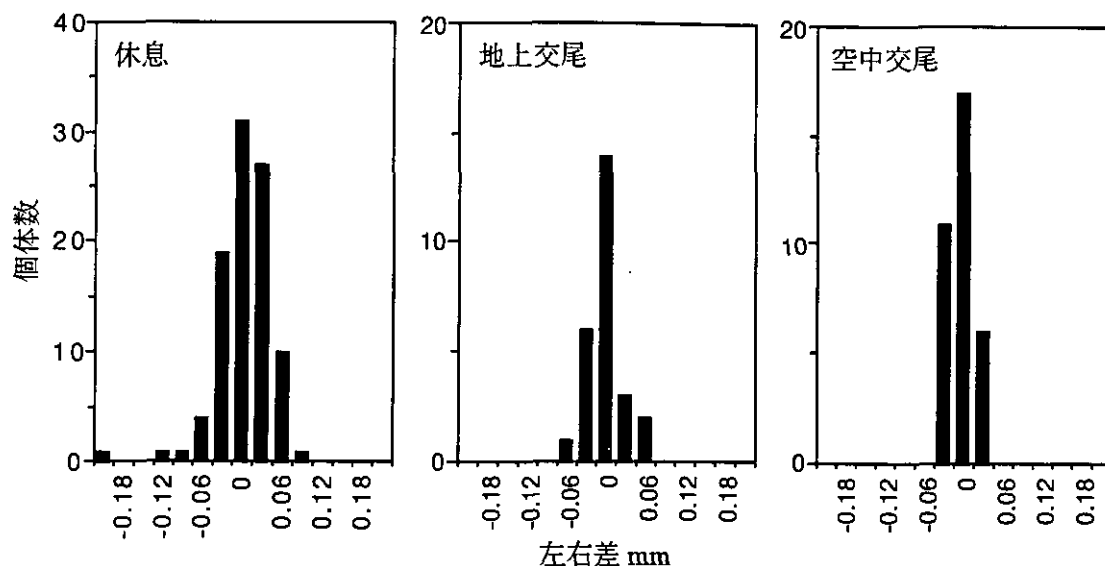


図6 アカムシユスリカにおける休息雄・地上交尾雄・空中交尾雄の全翅長左右差頻度分布

た。採集した個体の翅の全長を0.01mm単位で計測し、左右の差を求めた。採集は国立環境研究所の霞ヶ浦臨湖実験施設で11月に行った。

採集した個体のうち雄について翅長の左右差を求めたものを図6に示した。休息個体は採集地の全個体群を代表するものとして取り扱い、休息雄と、地上交尾雄・空中交尾雄の各々とを比較した。各々の左右差頻度分布はあらかじめ検定し正規性を確かめてある。地上交尾・空中交尾に成功した雄はともに休息雄に対して有意に小さな翅長左右差の分散（それぞれF検定で $P=0.015$ ,  $P<0.001$ ）を示し、雄の中でも翅長左右差の小さい個体が交尾に成功していることが示された。

今後は、個体群の大きさに対して個体群全体の翅長の左右対称性がどのように変化するか、またその変化に対応して交尾成功個体の翅長左右対称性が変化するかどうかを調査する予定である。

#### (4) 飼育密度環境がメダカのFAに与える影響

ひとつの個体群に属する個体の発育速度には個体差があることは古くから知られている。特に魚類では餌をめぐる競争のために、その個体差は大きくなり、最も大きな個体と小さな個体とでは数十倍の体重差が生じることがしばしばである。メダカの同時出生集団について発育速度の高かった個体と低かった個体のFA（ムナビレ長）を比較すると、発育の速い個体ほどFAが小さいことが分かった（図7）。このことはFAの個体差の原因とし

て2つの可能性があることを意味している。つまり、1) 個体の競争能力にもともと遺伝的背景を持つ優劣があり、それが原因で発育速度やFAの個体差として発現する、あるいは2) 出生時には全く遺伝的な優劣の差はないが、遺伝と関係なく偶然生じた差が発育に伴って拡大するという2つの可能性である。どちらの仮説かがメダカのFAパターンをよく説明するかを明らかにするために、いくつかの密度区を設けて同時出生個体群を飼育し、発育速度、FAの解析を行った。その結果、1)の仮説が支持され、FAの変異のかなりの部分が遺伝的背景を持つことが示された。

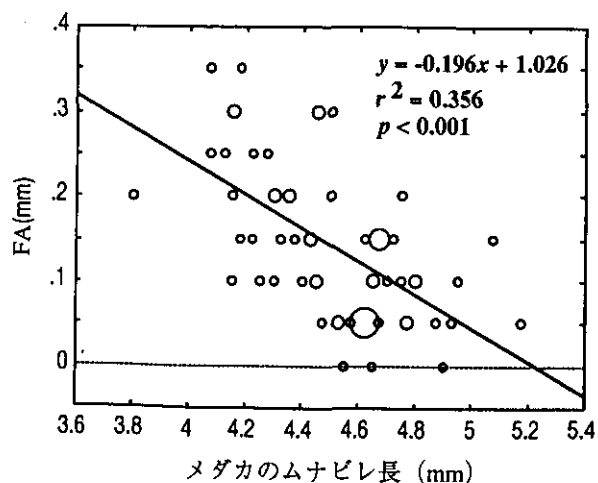


図7 メダカの同時出生集団におけるムナビレ長とFAの関係

(5) スズメ目鳥類の左右対称性のゆらぎと個体群特性の関係

生息地の減少および分断化により野生生物の個体数は急速に減少している。このような個体群サイズの減少は、個体群の持つ遺伝的多様性にも影響を与えていることが予測される。近年、個体群の遺伝的劣化を測定する指標として、左右対称性のゆらぎが注目されてきている。スズメ目鳥類を材料として個体群特性と左右対称性のゆらぎがどのように関連しているかについて注目し、これを遺伝的劣化の指標として利用できるかどうかを調べた。材料としては、環境庁のレッドデータブックで希急種に指定されているオオセッカ、同じく希少種に指定されているウチヤマシマセンニュウおよびコジュリン、また広く分布し今のところ絶滅の心配のないオオヨシキリ、コヨシキリ、セッカのウグイス亜科鳥類と、冬鳥としてあし原で越冬するオオジュリン、カシラダカのホオジロ科鳥類を材料として用いた。オオセッカ、オオヨシキリ、コヨシキリ、コジュリン、オオジュリン、カシラダカは茨城県鹿島郡神栖町の利根川河川敷および稲敷郡桜川村浮島のスゲ・ヨシ原において、ウチヤマシマセンニュウは博多湾入口の大机島において捕獲調査を行った。捕獲した個体は、足環装着後に各部位を計測したのちに採血を行い放鳥した。

博多湾に生息するウチヤマシマセンニュウが最も小さ

い個体群を形成していて生息個体数は200羽以下、有効個体群サイズは60羽であった。オオセッカは800羽程度の高密度の個体群を利根川下流域の比較的狭い地域に維持し、コヨシキリは分布は広いものの低密度の個体群を、オオヨシキリは広域にパッチ状に分布している比較的高密度の個体群を、セッカは分布は広いものの中程度の密度の個体群を維持している。コジュリンもオオセッカよりは分布域は広いものの利根川流域のみに分布し、比較的高密度の個体群を維持している。オオジュリン、カシラダカはあし原や草原に比較的普通に見られる冬鳥であるが、生息地の密度は中程度である。それぞれの種の翼長およびふ蹠長を計測し、種間で比較するためにそれらの部位の変動係数および、左右対称性のゆらぎの相対値「 $(R-L)/((R+L)/2)$ 」を計算し、各部位の左右対称性のゆらぎの分布特性を表2に示してある。歪度は、負の値のとき左に分布が偏り、正の値のとき右に分布が偏ることを示している。セッカとオオヨシキリの翼長では大きく左に偏っているが、これは標本数が少ないことによる計測誤差であると思われる。標本数が十分に大きくなれば、歪度はゼロ付近に収まると予想される。また、個体群サイズが小さくなると形質値の分散が大きくなり変動係数が大きくなると予想されるが、そのような傾向は認められなかった。左右対称性のゆらぎ (FA) の程度を最も良く表すのは分布の尖度であり、尖度は左右対

表2 スズメ目鳥類各種における左右対称性のゆらぎの分布特性

種名	翼長		翼長の左右対称性のゆらぎ $[(R-L)/((R+L)/2)]$					分布域	密度
	平均	変動係数	N	歪度	尖度	N	形質長との相関		
オオセッカ	53.284	5.90%	154	0.213	0.263	131	-0.179	極狭	高
ウチヤマシマセンニュウ	67.159	4.10%	86	0.434	2.669	86	-0.293	極狭	高
オオヨシキリ	82.521	4.70%	48	-1.473	5.106	38	-0.428	広	高
コヨシキリ	53.978	3.60%	81	0.580	0.965	69	-0.192	広	低
セッカ	49.705	6.90%	40	-3.040	0.159	27	-0.084	広	中
コジュリン	61.340	4.30%	77	0.314	-0.735	65	0.045	狭	高
オオジュリン	76.593	4.50%	67	0.117	-0.795	67	0.226	広	中
カシラダカ	71.614	3.50%	35	0.460	-0.359	35	0.010	広	中

種名	ふ蹠長		ふ蹠長の左右対称性のゆらぎ $[(R-L)/((R+L)/2)]$					レッドデータブック 渡り	ランク
	平均	変動係数	N	歪度	尖度	N	翼長FAとの相関		
オオセッカ	19.491	4.00%	150	-0.802	3.146	83	-0.070	留	危急種
ウチヤマシマセンニュウ	24.256	3.00%	86	-0.677	0.564	51	0.410	夏	希少種
オオヨシキリ	28.790	4.00%	43	-0.697	-0.137	11	0.019	夏	
コヨシキリ	21.204	3.20%	77	0.317	0.666	34	-0.303	夏	
セッカ	20.561	3.70%	40	0.444	1.825	20	0.458	留(夏)	
コジュリン	19.601	3.10%	67	0.838	5.606	44	0.363	留	希少種
オオジュリン	20.318	3.40%	41	0.007	-0.751	41	0.030	冬	
カシラダカ	18.685	2.40%	16	-0.253	0.607	16	-0.400	冬	

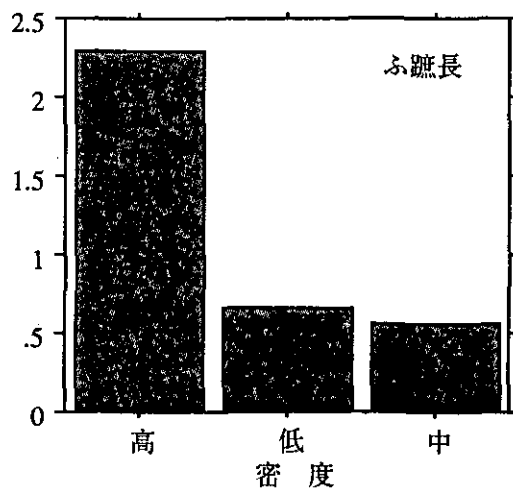
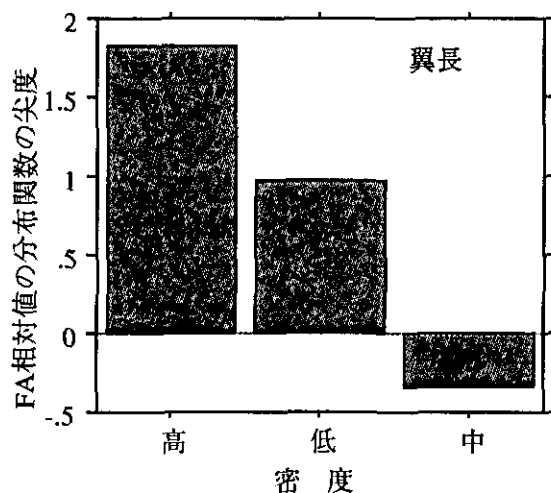
称性のゆらぎが大きくなり分布が広がってくれば尖度は負になり、左右対称性のゆらぎが少なくなり、左右差0に形質値が集まれば分布型は急尖となり正の大きい値をとり、分布型が正規分布を示せば0になる。各種のFAの相対値分布の尖度と個体群特性（分布域の広さ、密度）の関係を調べてみたところ、図8のように翼長・ふ蹠長とも高密度個体群を形成する種ではFAの程度が小さく（尖度が正で大きい）、翼長には分布域の広さで尖度の差はみられなかったがふ蹠長では分布の狭い種ほどFAの程度が小さいという結果になった。これらの結果から予想されるのは狭い地域に高密度の個体群を維持する種では有効個体群サイズが十分に大きければFAの程度が小さいということであるが、遺伝的多様性を決めるであろう実際の有効個体群サイズと左右対称性のゆらぎの関

係については、資料の蓄積を進めているところである。

#### (6) 近交系ウズラの遺伝的多様性と生息域外保存法に関する研究

絶滅の危機に瀕した野生動物の生息域内外において、先端技術による保存技術の確立が重要となっている。国立環境研究所動物実験施設では、ニホンウズラを40世代以上にわたって継代繁殖しているが、これらに近交退化現象が出現している。そこで、これらの近交系ウズラは、絶滅の危機に瀕した野生鳥類のモデルとして有用と考えられるので、選抜基礎集団から現在に至るまでの繁殖能力を分析した。また、近交系ウズラの始原生殖細胞（Primordial Germ Cells, PGCs）の有用性について検討した。

#### A. 密度の効果



#### B. 分布域の効果

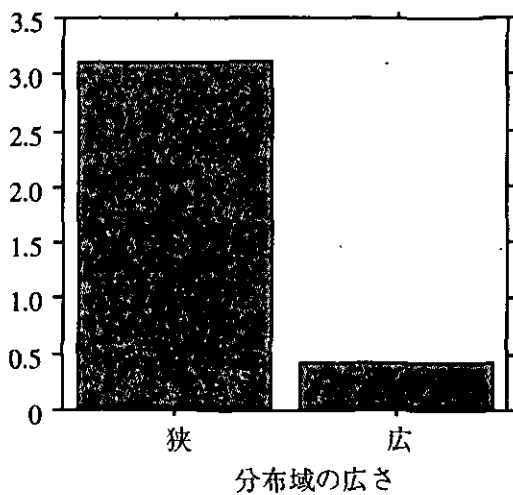
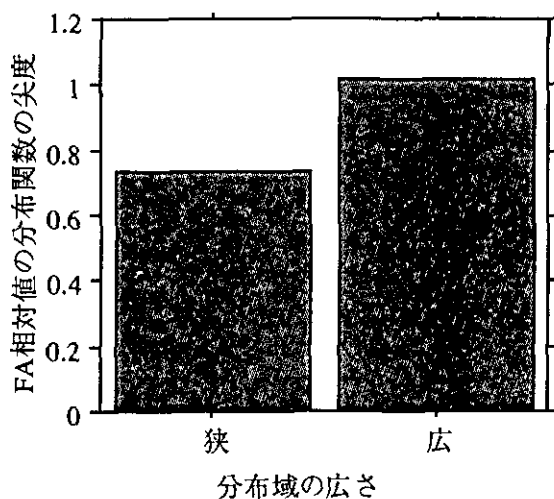


図8 左右対称性のゆらぎに個体群の分布様式が与える影響

近交系ウズラにおける血統、体重、卵重、羽装、受精率、発生率、血液性状などのデータを各系統及び世代ごとに詳細に入力し、これらのデータベース化を図った。作成したデータベースを用いて、近交系ウズラの絶滅モデルのシミュレーションプログラムを作成し、繁殖能力のボトルネック現象を解明した。なお、絶滅の危機に瀕した野生鳥類のデータ管理システムについては、パソコン通信を利用する方式を検討中である。

近交系ウズラのPGCsを採取し、培養を行った。その結果、ニワトリPGCsの採取培養法に従い、近交系ウズラのPGCsの採取時期の同期化を行うことによりウズラ胚の卵黄動脈等からPGCsを採取できた。次に、採取した血液からPGCsの単離を行い、その上清を除去した培養液と混合することにより、その混合液に高頻度でPGCsを回収できた。また、PGCsを含むフラクションを培養液に分散させ、これを遠心分離することで近交系のウズラのPGCsを精製することができた。

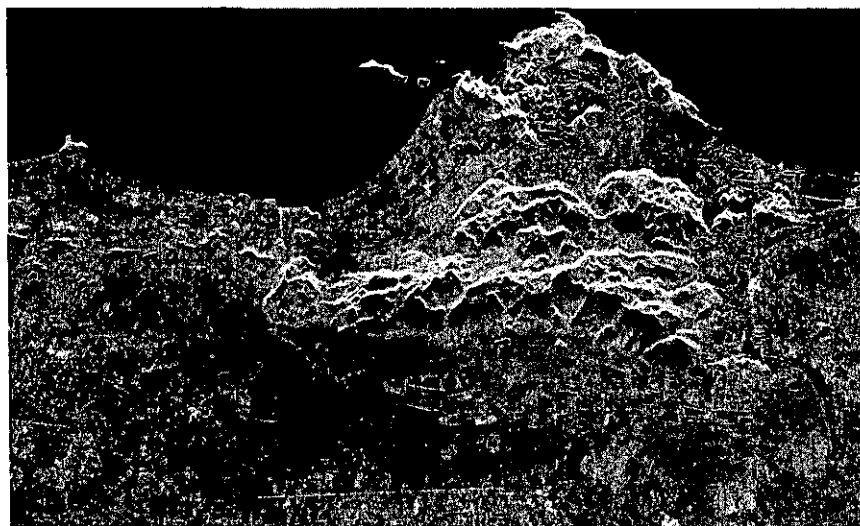
#### (7) 人工衛星データ等利用による湿地植生分布の調査に関する研究

沼沢地やマングローブ林などの湿地は地球環境を考える上で重要な地表面被覆形態の一つであり、野鳥など多様な生物種の生息域として、またさらには地球環境温暖化ガスであるメタンの発生源として、近年その実態を調査する必要性が指摘されるようになってきた。しかしながら、湿地は対象となる地域が広い上に、その分布が全地球レベルにわたっていること、また通常その中に入る

ことが難しく地上調査が容易ではないことから、地域レベルにおいても地球レベルにおいても、得られている情報は極めて少ない。本研究は、人工衛星からのリモートセンシングデータを利用して、個別湿地の植生、水、土壌環境を調査することを目的とするものである。

平成6年度は、前年度に引き続き実験フィールドである北海道釧路湿原、オーストラリア東部湿地帯において、衛星データの収集、現地調査による地上観測データの収集を行った。また、タイ・パチョキリカン湿地、マレーシア・マタンマングローブ湿地など世界の代表的湿地の衛星画像データを収集するとともに、一部実験フィールドにおいて現地調査等による地上データの収集を行った。一方、衛星画像から湿地環境を調査するためのデータ解析手法について検討を行い、特に、マイクロ波帯域のセンサーである合成開口レーダー（SAR）画像データとLANDSAT TM等光学センサーデータ複合利用により植生分類を行うための手法を開発した。

図9には、一例として、SAR画像により観測されたタイ・パチョキリカンの植生分布図を示す。本分布図は、1993年3月、6月及び9月に得られた3時期のJERS-1画像を重ね合わせ、その季節変化特性の違いから、対象地域をbog, fenなど7つのクラスに分類したもので、分類は地上調査データ（トレーニングデータ）を用いて最尤法により分類した。マイクロ波センサーは、雲を通じて地上を観測するため、シベリア地域、熱帯地域など雲に覆われることの多い湿地の観測には有効である。



B=1993/03/16,G=1992/06/25,R=1993/09/08

図9 SAR画像により観測されたタイ・パチョキリカンの植生分布

さらに、広範囲な湿地の分類を行うことを目的として、NOAA AVHRR の東アジア全域をカバーする 4 km 分解能モザイク画像（1982～1992年）を入手した。本データは、全域について15日間のデータを重ね合わせ、合成し

て雲のない画像を作成したものである。この NOAA AVHRR モザイク画像の時系列変化（季節変化）から湿地の植生分類を行う方法について検討を行った。



## 2.8 砂漠化と人間活動の相互影響評価に関する研究

<p><b>〔研究組織〕</b></p> <p>地球環境研究グループ</p> <p>統括研究官</p> <p>生物圏環境部</p> <p>上席研究官</p> <p>地球環境研究グループ</p> <p>森林減少・砂漠化研究チーム</p> <p>社会環境システム部</p> <p>情報解析研究室</p> <p>水土壤圏環境部</p> <p>土壌環境研究室</p> <p>地下環境研究室</p> <p>地球環境研究センター</p> <p>研究管理官</p> <p>客員研究員 5名</p>	<p>安野正之</p> <p>古川昭雄</p> <p>○宮崎忠国</p> <p>安岡善文</p> <p>恒川篤史</p> <p>木村 強</p> <p>大坪國順</p>
---	---

### 〔研究概要〕

砂漠化は、乾燥、半乾燥、半湿润地帯において気候変化、人間活動等、様々な要因に起因して起こる土地劣化である、と定義されている。国連環境計画（UNEP）の調査によると、砂漠化は全乾燥地域の70%にあたる3,600万km<sup>2</sup>で生じており、世界人口の約1/6に影響を与えている。砂漠化の最も顕著な影響は、貧困の拡大に加え3,300万km<sup>2</sup>の放牧地（全体の73%）の劣化、乾燥地域の限界降雨依存農地の内47%の土地生産性、土壌構造の劣化、乾燥地域のかんがい農地の内30%の劣化などである。砂漠化の自然的要因としては気候変動による乾性化や土壌荒廃が進行することであり、人為的要因としては人口の急激な増加に伴う耕作地の拡大や酷使、薪炭としての樹木の伐採、羊や牛などの過放牧等による環境資源の不適正な利用などと考えられている。このような砂漠の拡大に対して、人為的な要因による砂漠化現象を制御し、砂漠化に伴う環境への影響を予測するためには、これらの地域の生態系の現状とその変化、土壌、水文特性等の環境容量を算出する手法の開発を行い、人間活動と砂漠化危険地域の環境容量の観点から人為的要因による砂漠化進行機構を解明し砂漠化危険地域を予測、抽出することが急務である。また、砂漠の調査、砂漠化危険地域における砂漠化進行の防止技術の開発、持

続的発展のための社会システムの提言等においては地域社会的かつ国際的共同研究が不可欠である。

本研究の目的は、インド西部タール砂漠の極乾燥地、乾燥地および半乾燥地域の砂漠化危険地域において、様々な人間活動が砂漠化進行にどのような影響を及ぼしているかを、特に、植生、土壌環境および社会経済システムの面から明らかにすることである。また、世界の代表的な砂漠および土壌荒廃地域（アフリカ、インド、中国、タイ等）を複数箇所選定し、気象状況、地域特性、社会システム、経済活動等の違いによる砂漠化進行要因の国際比較研究を行った。以上の目的を達成するために、以下のような研究課題を設定して、砂漠化研究を実施した。

- (1) 乾燥・半乾燥地域における砂漠化に及ぼす人間活動の影響評価に関する研究
  - 1) 乾燥・半乾燥地における植生回復手法の解明に関する研究
  - 2) 砂漠化進行の広域的モニタリングに関する研究
  - 3) 砂漠化の人為的要因に関する研究
- (2) 砂漠化と人間活動の相互影響評価に関する国際比較研究
  - 1) 乾燥・半乾燥地域における砂漠化に及ぼす人間活

動の影響評価に関する研究では、平成4年度にインドの共同研究機関、中央乾燥地研究所 (Central Arid Zone Research Institute) と共同研究に関する研究協定書の調印を行い、極乾燥地と半乾燥地に試験地を設定し、植生に関する基礎的な調査を開始した。平成6年度は、平成4年度に設定した極乾燥地および半乾燥地の試験地において昨年度と同様な植生調査を行うとともに、羊の放牧圧の調査を両試験地において行った。また、平成5年度に設定した乾燥地の試験地では土壌調査、砂丘の移動調査、植物や土壌のスペクトル調査、社会調査等を実施した。さらに、平成4年度に構築した砂漠化地理情報システム (GIS) の更新を行った。3年間の研究で得られたデータを解析し、砂漠化危険地域における人為的要因による砂漠化進行機構の解明を試みた。

2) 砂漠化と人間活動の相互影響評価に関する国際比較研究では、平成4年度に砂漠化比較項目の検討を行い、比較項目の選出を行った。平成5年度はインドの砂漠化と人間活動に関する資料、データ等を収集し、比較項目毎にまとめを行った。平成6年度にはアフリカ、中国、タイの砂漠化と人間活動に関する資料、データの収集を行い、平成5年度に収集したインドのデータを含めて、これらの地域の砂漠化進行と気象状況、社会経済活動、社会システム等の比較を行い、砂漠化進行に関する地域的な要因の抽出とその比較を行った。さらに、平成4年度に構築した砂漠化研究情報データベースの更新を行った。本年度は特に研究論文の収集に焦点を合わせ情報収集を行い、砂漠化文献データベースに関する報告書の出版を行った。

## 【研究成果】

### (1) 乾燥・半乾燥地域における砂漠化に及ぼす人間活動の影響評価に関する研究

本サブテーマではインド西部のタール砂漠を研究対象として研究を行った。タール砂漠内の年間降雨量の異なる極乾燥地 (チャンダン)、乾燥地 (ジョドプール)、半乾燥地 (パリ) に設定した3試験地において、インド中央乾燥地研究所 (Central Arid Zone Research Institute) と共同で、植生、土壌、リモートセンシング、社会・経済調査を行い、砂漠化進行と人間活動に関する研究を行った。

#### 1) 乾燥・半乾燥地における植生回復手法の解明に関する研究

極乾燥地 (チャンダン)、半乾燥地 (パリ) に設定した試験地において、放牧の影響を受けない保護区と放牧の影響を受ける複数個の非保護区を作成した。各試験地には1保護区と5非保護区、計6区画作成し、1区画の面積は1ヘクタールとした。各区画にはそれぞれ0, 3, 3, 6, 6, 8頭の羊を入れ、牧草の成長速度と羊の頭数の関係を明らかにするため、各区において、①種組成調査、②乾物生産調査、③種子動態調査、④生物季節調査を行った。本調査は同一の調査地で長期にわたり植生をモニタリングするため、非破壊的な調査方法を採用した。調査対象とした種は両調査地で優先しているイネ科多年性草本を選択した。すなわちチャンダンではこの地域の草地群集のほとんどを占める *Lesiurus sindicus* と同じようにタソックを形成する *Cymbopogon juarancusa* を使い、パリでは優先種である *Cenchrus setigenus* と *Eremopogon feveolatus* を用いた。チャンダンとパリの調査結果を比較すると全個体数はパリ2,658個体、チャンダン932個体であった。各個体群を比較すると、地上乾重量の頻度分布は両地域とも小さい個体が多く大きな個体が少ないL字型を示すが、平均値はパリが31.9g、チャンダンが730.4gで、パリよりチャンダンの方が20倍以上であった。個体密度はパリが11.09/m<sup>2</sup>、チャンダンが0.48/m<sup>2</sup>、平均草高はパリ35.6cm、チャンダン79.59cmである。これらの違いにもかかわらず、1平方メートル当たりの推定地上部現存量はパリが344.89g、チャンダンが354.56gとほとんど同じ値となった。また、羊による放牧圧の影響を解析するために、1994年の雨期初期 (7月)、雨期 (8月) 及び雨期後 (10月) のデータを用いて、個体数を用いたマッカーサーの多様性指数及び被覆率に関して分散分析を行った。その結果、多様性に関しては放牧圧の影響が認められなかったが、被覆率については放牧圧が要因として認められることが示された。図1に羊の頭数と放牧圧の関係を示す。

#### 2) 砂漠化進行の広域的モニタリングに関する研究

乾燥地 (ジョドプール) のオシアン郡において、人工衛星リモートセンシングによる植生、土壌、土地利用分類等を行うためのスペクトル調査 (グラントルース) を行った。地表のスペクトル測定対象物質としては、天水農地、かんがい農地、オープンパスチャー、水域、人工物等を試験地周辺から選出し、それぞれの反射スペクトルと対象物質の状況、植生の種組成、植被率、土壌の物理性、化学性、土地利用等の調査を行った。かんがい

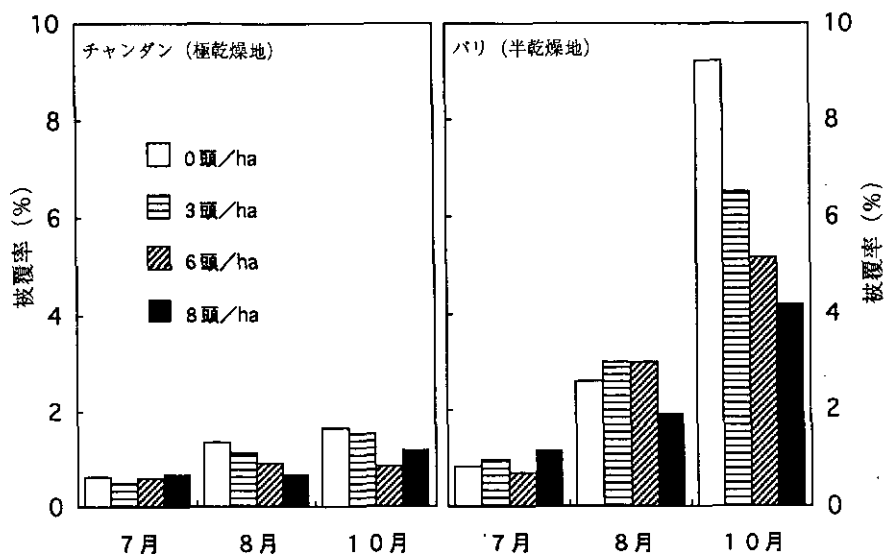


図1 植物被覆率と放牧圧の関係

農地であるチリ畑では700nm付近に光合成色素の反射による急激な立ち上がりがあり、典型的な植生の特徴を示している。しかし、オープンパステャーについてはほとんど裸地土壌と同じような反射パターンを示している。したがって、赤と近赤外の輝度値の比を用いる通常の植生指数をこの地域のオープンパステャーの植生に適用するには限界があることが示された。

人工衛星データを用いた広域モニタリングでは、米国のNOAAおよびLANDSAT衛星により得られた画像データを用いてラジャスタン州とオシアン郡の土地利用分類を行った。また、過去の衛星データと最近の衛星データの比較から砂漠化地域の増加やその速度を推定する手法の検討を行った。図2はNOAA衛星による画像から得られたラジャスタン州の雨季と乾季の植物の状況を示した図で、雨季直後の植生密度の高さがよく現れている。また、NDVI=0.05のラインは雨季には南東へ、乾期には北西へシフトするという動きに加えて、アラバリ山脈の落葉樹林の季節変化やかんがい農地における季節変化がモザイク状に入り込んでいることが分かった。図3は同じ地区の土地利用分類図である。この図から農業活動に依存する土地被覆状況が説明できる。砂漠の中心部に相当する砂漠の面積はジャイサルメールで7,437km<sup>2</sup>、ジョドプールで1,969km<sup>2</sup>、ピカネールで1,536km<sup>2</sup>の順で大きかった。LANDSATを用いた解析では、郡レベルの観測を行った。図4には160万分の1の地図にLANDSAT画像を重ねた図である。このような図から地

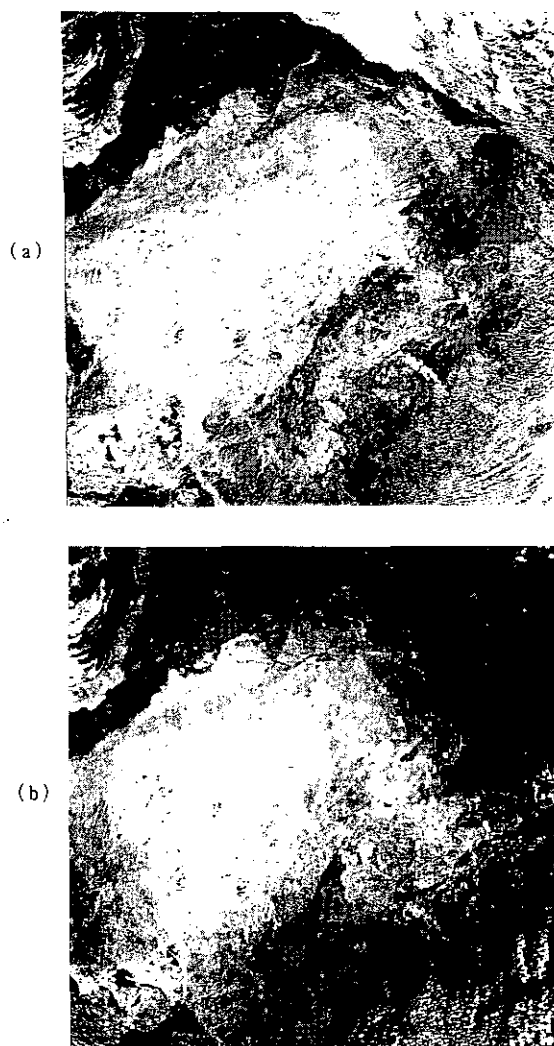


図2 タール砂漠のNOAA/AVHRR フォールスカラー表示 (a) 1989年1月8日(乾期), (b) 1989年8月7日(雨季)



図3 タール砂漠の土地被覆分類図

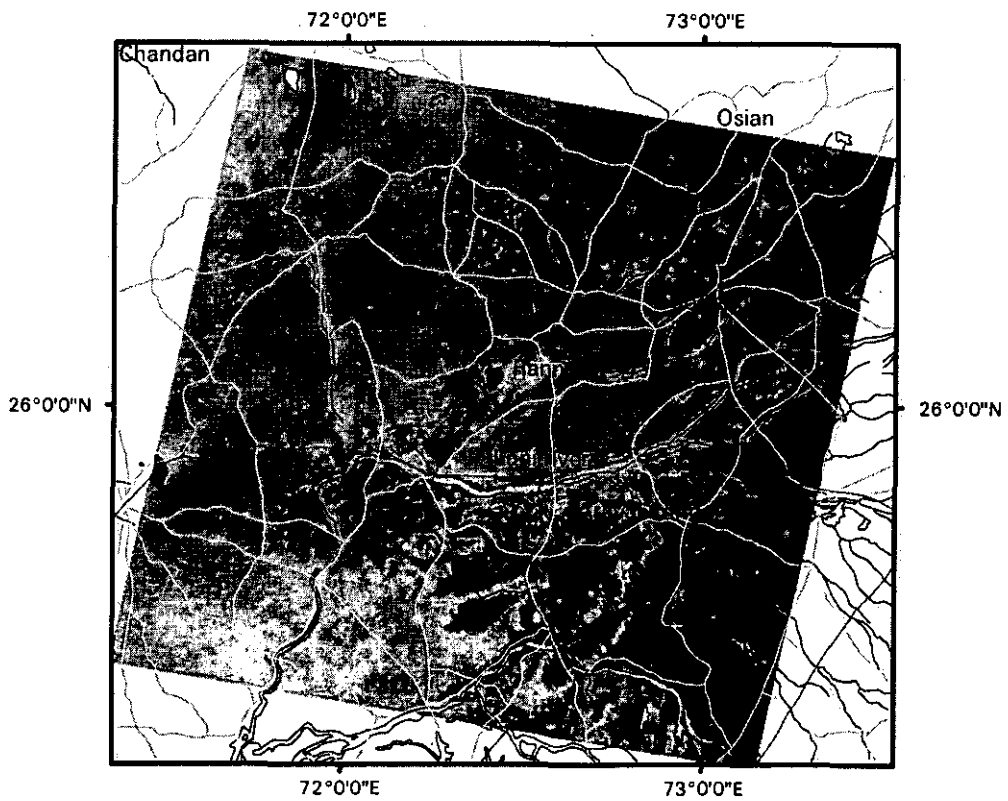


図4 ジョドプール県のLANDSAT画像(1990年11月11日)と地図の重ね合わせ

表被覆分類を行い山地、河川、湖、干上がった塩湖、パラボラ砂丘、市街地、灌漑農地等は明瞭に判別可能であるが、バルカン砂丘、オープンパステュー、天水農地などの判別は難しく、これは十分な空間分解能及びスペクトル分解能が得られていないことに起因する。

### 3) 砂漠化の人為的要因に関する研究

#### a) 社会調査

平成5年12月に続いて平成6年9月および平成7年3月にオシアン郡カブラカラン村において砂漠化と人間活動に関する社会調査を実施した。この村では天水農業を主体に、10数頭の家畜を飼うというインド北西部の典型的な農業形態がみられる。またこの一帯は、夏の強い風による風食の激しい地域としても知られている。調査は、インド人研究者が村人と1対1で面接し、一人当たり約1時間ほどかけて聞き取りを行った。調査の内容は、被験者の属性、水や燃料の使用量、農業形態、砂漠化の実態および影響、砂漠化の防止対策に関する住民の意見などである。この村の農法についてまとめると、この地域の伝統的天水農業は①ラクダを用いた土地の丁寧な耕起、②十分な休閑期間（通常3年）、③いくつかの作物を混ぜて植える混作、④収穫後の根株の保持（畑に根株を残す）を特徴としており、このことによって潜在的には強い風食の脅威にさらされながらも、長いこと持続的な土地利用を可能としてきた。しかし、この調査の結果によると、混作及び根株の保持については過半数の農家で実践されているものの、最近では耕起のためにほとんどの農家がラクダの代わりにトラクターを使用している。このため、土壌が地中深くまで細かく砕かれ、風により吹き飛ばされやすくなっている。また、休閑期間については平均して1.8年に減少していることが分かった。

このような農法の変化の背景としては、急激な人口増加による影響があると思われる。人口センサスによると、カブラカラン村の人口は401人（1951年）、687人（1971年）、1253人（1991年）で10年間で30%の割合で増加している。また、この調査によると、1戸当たりの平均と地所有面積は祖父の代の44.0ha、父の代17.8ha、現在10.1haと、1世代ごとに約半分になっている。このため、単位面積当たりの収穫需要が増大し、過耕作や不適切な土地利用などの問題を引き起こしていると考えられる。

#### b) 過耕作による影響

過耕作による土地生産力低下のメカニズムとしては、土壌中の栄養素の減少、土壌線虫などの病虫害の増加、アレロパシーの発生などが考えられる。村人からの聞き取り調査によると、土地生産力の低下はBajira（パールミレット）の連作によって生じ、休閑またはGuar（豆科作物）などとの混作によって対処するという。1996年9月の休閑の効果に関する調査では耕作地と休閑地の土壌の物理性及び化学性に関する分析を行い比較を行った（表1）。表2はその結果を示したものである。物理性については水分保持能および透水性については差異がみられなかったが、土壌硬度は耕作地に比べて休閑地で高く、三相分布についても固相の割合は休閑地において高かった。化学性については、EC、交換性塩基（特にCa）、全炭素は耕作地の方が高い値を示した。全炭素は耕作地の方が高い値を示した。全窒素についてはどちらも非常に低い値だった。休閑地における植生調査の結果によると、傾斜地では *Tephrosia purpurea*, *Cenchrus biflorus*, *Crotalaria burhia* が、平坦地では *Indigofera cordifolia*, *Tephrosia purpurea*, *Crotalaria burhia* がそれぞれ優先していた。両者に共通して *Tephrosia*, *Crotalaria*, *Indigofera* などのマメ科植物が多くみられた。

表1 カブラカラン村における調査地点一覧

調査地番号	土地利用形態	傾斜	土壌硬度
1	2年休閑地	傾斜地上部	1.7-1.9kg/cm <sup>2</sup>
2	2年休閑地	傾斜地下部	1.2-1.4kg/cm <sup>2</sup>
3	2年休閑地	平地	3.0-4.0kg/cm <sup>2</sup>
4	2年休閑地	平地	2.6-3.2kg/cm <sup>2</sup>
5	トラクタ耕起によるバジェラ畑	平地	1.4-2.0kg/cm <sup>2</sup>
6	トラクタ耕起によるバジェラ畑	傾斜地	
7	トラクタ耕起によるバジェラ畑	平地	
8	ラクダ耕起によるバジェラ畑	平地	1.2-1.9kg/cm <sup>2</sup>
9	ラクダ耕起によるバジェラ畑	平地	

表2 カブラカラン村における土壌分析結果

物理性

	三相分布 (%)			水分含有量 (%)			透水性 (cm/S)
	気相	液相	固相	水分張力1.5	水分張力2.0	水分張力3.0	
1	30.99	11.93	57.08	21.72	12.19	5.21	3.8*0.001
2	31.94	11.89	56.17	22.54	13.00	4.77	3.3*0.001
3	32.12	11.42	56.46	22.05	14.80	6.76	2.2*0.001
4	32.74	11.06	56.20	22.14	12.93	5.24	3.0*0.001
5	34.60	12.37	53.03	25.21	14.44	6.62	4.6*0.001
6	40.49	14.75	44.76	23.94	14.08	9.57	1.9*0.001
7	37.31	12.27	50.42	23.84	14.12	8.17	3.4*0.001
8	33.64	13.45	52.91	23.87	10.93	5.99	4.5*0.001
9	35.83	12.70	51.47	24.19	14.50	6.17	5.2*0.001

化学性

	水素イオン濃度指数		電気伝導度 (microS/cm)	交換性塩基			
	H <sub>2</sub> O	KCl		Ca	Mg	Na	K
1	9.04	8.13	39.90	7.09	0.58	0.13	0.26
2	9.03	8.19	50.20	7.38	0.61	0.10	0.26
3	8.92	7.92	53.80	9.26	0.65	0.12	0.21
4	9.16	8.05	50.00	15.52	0.60	0.12	0.19
5	9.07	8.13	62.10	22.50	0.65	0.15	0.23
6	9.00	8.08	60.20	17.76	0.68	0.14	0.25
7	8.97	8.01	59.00	15.83	0.68	0.14	0.17
8	9.02	8.11	52.30	4.84	0.57	0.08	0.24
9	8.84	8.14	61.20	5.25	0.61	0.09	0.22

(\* ) 土壌：水=1：5

	リン酸有効態		全リン酸	ピロリン酸塩			全炭素/全窒素比
	トローグ法	オルセン法 (mg P205/100g)		抽出炭素 (%)	全炭素 (%)	全窒素 (%)	
1	0.592	0.341	2.729	0.027	0.117	0.055	2.122
2	0.877	0.534	4.004	0.043	0.121	0.043	2.822
3	0.199	0.222	1.432	0.010	0.171	0.042	4.108
4	0.203	0.194	1.283	0.007	0.220	0.049	4.467
5	0.196	0.240	1.576	0.013	0.227	0.048	4.734
6	0.227	0.268	1.271	0.010	0.317	0.062	5.153
7	0.192	0.194	1.128	0.033	0.242	0.046	5.225
8	0.154	0.249	1.120	0.040	0.158	0.048	3.326
9	0.205	0.249	0.988	0.007	0.150	0.066	2.284

c) トラクタ耕起による影響

現地はもともと風食による被害の激しい地域であるが、近年、省力化のためにトラクタが導入され、それが風食の被害に拍車をかけていると言われている。9月の調査ではトラクタによる耕起地とラクダによる耕起地の土壌の物理性、化学性の分析を行った(表2)。物理性については、土壌硬度、三相分布、水分保持能、透水性

ともに差異はみられなかった。化学性については、pH、EC、可給態リン酸、全リン酸で差異がみられなかった。交換性塩基(特にCa)、全炭素はトラクタ耕起の方が高い値を示した。

d) 砂丘上の農業活動が砂丘差異活動に及ぼす影響

カブラカラン村においてみられるパラボラ砂丘は、今から1万年から1万8千年前の乾燥期に形成された古砂

丘だと言われている。村人からのヒアリングによると、砂丘上の耕作はもともと行われていたが、近年、トラクターが導入されたことで、飛砂量が飛躍的に増加し、それが砂丘再活動を促しているという。そこで、条件によっては数十cmの精度で位置測定が可能なディファレンシャルGPS (Global Positioning System: 地球測位システム) を用いて、砂丘全体の精密測量を行った。得られたデータは砂漠化GIS (Geographic Information System: 地理情報システム) を用いてDTM (Digital Terrain Model: 数値標高データ) に変換し、砂丘の三次元形状を算出し、砂や砂丘の移動を調査した。砂漠化地理情報システム (GIS) については、ラジャスタン州、オシアン郡、カブラカラン村の三つの空間レベルで、既存地区をデジタルサイズし、地理データセットを開発した。

## (2) 砂漠化と人間活動の相互影響評価に関する国際比較研究

砂漠化のメカニズムは地域によって多様であり、地域的な固有性・特殊性を強くもつ。したがって、適切な砂漠化対策を講じるためには、その地域の固有性・特殊性と世界の砂漠化地域に共通してあらわれる共通性・普遍性を十分踏まえておく必要がある。

このサブテーマでは、このような砂漠化の共通性・普遍性と地域固有性・特殊性を国際比較を通じて明らかにすることを目的としている。比較の対象は主としてアジア地域とし、具体的にはインド (ジョドプール・ジャイサルメール)、中国 (新疆・蘭溪・東北部)、カザフスタン、タイを対象とした。さらにアフリカからいくつかの地域を選び、アジア地域との比較を行った。

現在、国連の砂漠化防止策に関する専門家会議では、アフリカのボツワナ、ウガンダ、チュニジア、マリおよびいくつかのサブリージョナルな地域を対象にその砂漠化の現状を評価するために以下のような項目からなる「ミニマムデータセット」を作成している。これは砂漠化条約締結をうけて作成される砂漠化防止のための国別行動計画を策定する際の基本資料となるものである。本サブテーマではアジア地域及び一部のアフリカ地域を対象のこの「ミニマムデータセット」を作成し、砂漠化と人間活動の国際比較を行った。「ミニマムデータセット」の項目を以下に示す。

### 気候・気象

月平均気温、月平均降水量、乾燥度、暴風日数、過去

100年間の気候変動、干ばつ年

### 植生

植生図、植生型ごとの現存量、植被率、優占種、群落構造、植生荒廃の程度 (種組成の変化、現存量の変化等)

### 水・土壌

土壌図、土壌型ごとの粒径組成、透水性、化学性、EC、pH、塩基置換容量、地下水の水位・水質、流域、干ばつ年の水源の状況、砂の移動、塩性化、水食、風食、土壌に加わる人為インパクト

### 土地利用

伝統的土地利用システム、近年の土地利用形態の変化、土地所有システム、相続形態

### 社会経済

作物収量、家畜構成、家畜頭数、人口、死亡率、平均寿命、死因、移住者数、平均収入、主要収入源、主食、エネルギーソース

#### 1) 対象地域

アジア地域の比較対象砂漠あるいは土壌荒廃地としては、乾燥度からみた気候区分を軸として、表3に示すような地域を選定した。さらに、アフリカからいくつかの地域を選びアジア地域との比較を行った。候補地としてはケニア北部、ニジェール、ブルキナファソ、カメルーン北部を選んだ。

砂漠化情報データベースの更新では、本年度は砂漠化研究論文の収集に焦点を合わせ収集を行った。収集した砂漠関係の研究論文数は2998論文である。また、収集した砂漠化研究関連情報は総数で7049件である。

#### 2) 比較対象地域における砂漠化の現状および調査結果

##### a) インド

調査対象とした西ラジャスタンでは、全面積の11%が砂漠化の影響を受けており、このうち約4.3%はすでに砂漠化している。砂漠化の原因としては、不規則な降雨、砂嵐、風食、水食などによる砂の移動、塩類集積などのほか、都市化、廃棄物による土壌汚染、観光開発、遺跡の発掘など様々な要因が互いに影響しあっている。ジョドプールにおける砂漠化と人間活動に関する概念モデルを図5に示す。こうした概念モデルを作成し比較を行った。

##### b) 中国

調査対象とした蘭溪市は中国東部浙江省中部の盆地地域にあり、その周辺では気候的、社会的、地質的要因に

表3 比較対象地域と砂漠化の態様

地 域	気候区分	伝統的土地利用	砂漠化の態様
インド (ジャaisalメール)	極乾燥地	放牧	灌漑農地における塩性化
中国 (新疆)			
インド (ジョドプール)	乾燥	放牧, 牧畜, 降雨 依存農業	過放牧による砂の移動, 風 食, 草地荒廃
カザフスタン (ベレケ)			
中国 (東北部)	半乾燥	牧畜	砂の移動, 草地荒廃, 森林 荒廃, 水食
中国	半乾燥	降雨保存農業	森林荒廃
タイ (南部)	湿潤	降雨依存農業, 林 業	森林荒廃
中国 (東部, 蘭溪)			

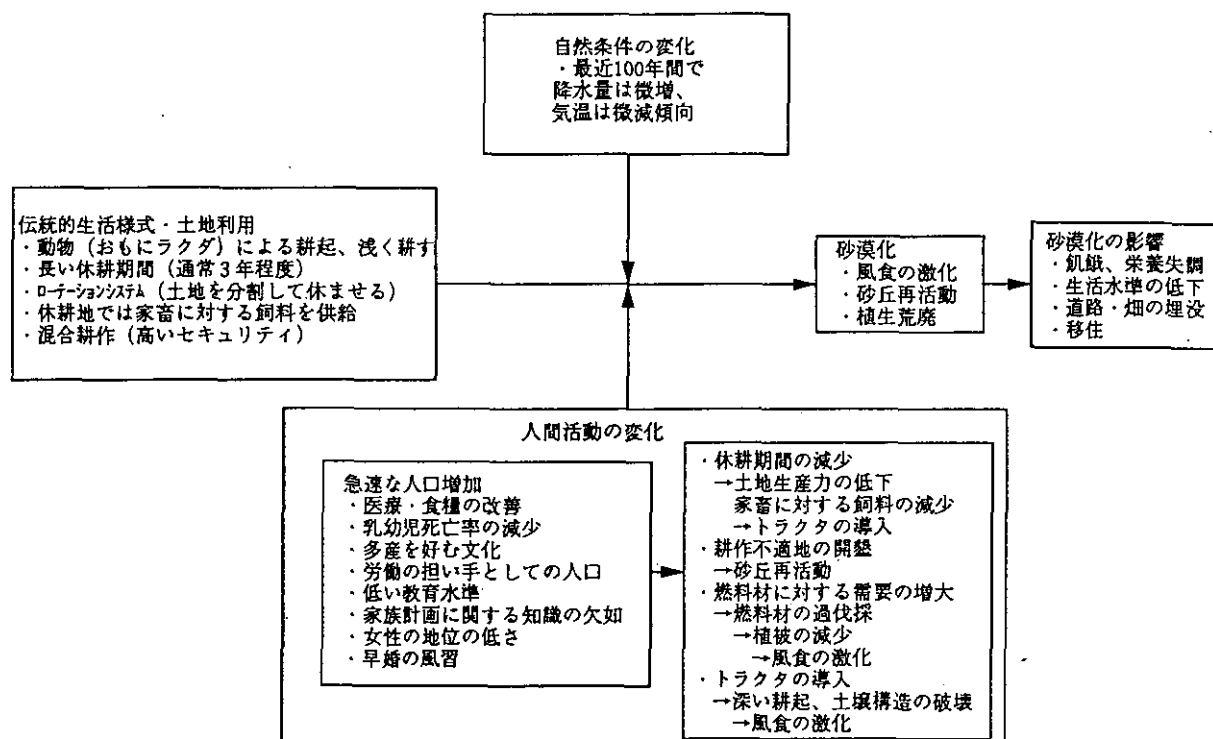


図5 砂漠化と人間活動に関する概念モデル (インド, ジョドプールにおける事例)

より「紅色砂漠」と呼ばれる砂漠化が広範囲に進んでいる地域である。中国東南部では水食作用による砂漠化面積は19.7万 km<sup>2</sup>にものぼり、その大部分は「紅色砂漠」と呼ばれる赤色土系地質の砂漠である1950年代に行われた大規模な伐採の後、丘陵地や斜面地において砂漠化が始まった。傾斜の緩やかな地形および礫層の露出した地形などでは人為圧が少ない場合は比較的植生が回復しやすい。しかし、肥料、飼料、燃料などのために木材や草

本が伐採されるため、植生の回復が妨げられている場合が多い。砂漠化対策の一つとして、「象湖 (シャンフー) 生態村」の事例が興味深い。ここでは人間、家畜の尿尿を蓄積・発行させることによりメタンを発生させ、調理、照明に利用し、過伐採の抑制に効果を上げている。

内蒙古のウランホトは年降水量300~400mmで、その70%が夏期に集中する。古くから人間活動による植生の退行はみられたが、砂丘再活動を中心とする大規模な土



地の退行が引き起こされたのは1950年代以降のことである。その原因としては、1950年代後半の製鉄のための樹木の伐採と家畜の増加に伴う植生の破壊である。例えば、ウランホトを含む3集落の人口は1950年代の200人から約1,300人へと増加し、それにつれて家畜の頭数も約2,000頭から70,000頭へと急激に増加した。ここの流動砂丘は、典型的なバルカン砂丘の形態を示し、東南東の方向へ移動している。砂丘の高さは15mにもなり、風下側に急斜面が形成される。砂丘の移動は毎年7～8mに達する。砂丘の移動を防ぐため、道路沿いにフェンスを設け、家畜の放牧を禁止したため、顕著な植生の回復がみられた。

c) タイ

南タイにおける砂漠化は主としてスズ鉱山跡地の砂礫堆積物に生じている。中央タイでは薪炭材の過伐採による土壌のラテライト化が主因であり、東北タイでは風化堆積物を母材とした土壌の焼き畑による生産性の低下、かんがいによる塩類集積、土壌浸食が砂漠化を引き起こしている。それぞれの地域ではアグロフォレストリーを中心とした土地の生産性回復の試験が行われた。その結果、ユーカリ、キャッサバの栽培等がラテライト化防止、土壌養分の保持、土壌流出の防止などに有効であるとの結果が得られた。

d) アフリカ

ケニアの国土のうち88%は乾燥・半乾燥地域 (ASAL) であり、そこに人口の約25%が住み、家畜の50%が飼育されている。ケニアにおける土地荒廃の概要を表4に示す。ケニア政府は早くから ASAL 地域の総合開発に力を

入れてきたが、1992年に ASAL 地域環境行動計画を策定した。ASAL プログラムの一環として砂漠化モニタリング・評価プロジェクトを実施してきた。その目的は、砂漠化プロセスを食い止め、生態的限界内で被災地域の生産性を回復するために必要な情報を得ることである。モニタリングと評価を通して、土地生産性の低下を未然に防ぐとともに、荒廃土地の修復のために適切な対策を決定することを直接の目的としている。砂漠化/土壌荒廃の問題点としては、乾燥地域からより湿潤な地域への人口移動とそれに伴う①燃料材の無差別伐採、②土地利用パターンの変化、③放牧地の農地化、④家畜の増加と過放牧、⑤土地の私有地化等があり、対策としては①土壌・水保全、②植林・造林、③飼料の生産、④荒廃地の植生再生、⑤家内手工業の導入による収入増、⑥地域住民の環境保全意識の啓蒙、⑦女性参加等があげられている。

e) カザフスタン

北部および中央アジアにおいて塩類集積土壌は約200万 km<sup>2</sup>を占め、その面積は地球上に存在するそれらの土壌の約20%に該当する。旧ソ連は1960年代から中央アジア地域において、アラル海やバルハシ湖等の内陸湖沼に流入する河川からかんがい水路を砂漠地域に引き込み、水稻や綿花栽培を目的とした大規模かんがい農業を開始した。開始当時は砂漠を緑にする世紀の大事業としてもてはやされたが、近年、内陸湖沼の水位低下や農耕地の塩類集積及びそれに伴う農民の健康被害が報告されはじめた。中央アジア地域では約100万ヘクタールの耕地が不適切なかんがい農業の実施により失われ、カザフスタン地域の灌漑農地の60～70%で作物の収量が塩害のため

表4 ケニア乾燥・半乾燥地域における地方別土地荒廃の概要

郡	区	主なインパクトと荒廃現象
ガリサ	モドガシュ区 セントラル区とその周辺	過放牧による顕著な風食と水食 燃料材としての伐採、とくにタナ川沿い
メル	ニンベキ ヒル タラカ区	新集落の顕著な土壌浸食 過放牧
キトゥイ	テシクル地域 キトゥイ町とその周辺	過放牧、樹木伐採 顕著な土壌浸食
カジアド	ロイトキトク スルタン ハムド	移住と低生産地域での過剰耕作 グループランチングと新設集落
トゥルカナ	トゥルカナ湖畔 トゥルクウエルダム	樹木伐採 (魚薫製用材、湖水位変化) 下流域へのインパクト
キシイ	タバカ区 ケロカ町域	土地細分化、顕著な土壌浸食 高人口密度、新居住地、顕著な土壌浸食
サンプロ	ワンバ区 ロロキ区	過放牧、顕著な風食・水食 新居住地、高密度野生動物、顕著な浸食

30～33%低下したと報告されている。調査対象地域のアルマアタ市北方のベレケは天山山脈に源を発するイリ川沿いの沖積低地にあり標高357m、年間降水量150mm、年平均気温9度の温帯砂漠気候をもつ。ベレケではイリ川からのかんがい水を取り入れることにより、水稻→水稻→大麦+アルファルファ→アルファルファの4年輪作を行っている。調査地周辺の土壌はGypsiorthids/Calciorthidsに分類される。土壌表層における塩類集積

はかんがい水路の周辺の耕地及び未耕地で進行している。これはかんがい水の水路からの染み出しにより引き起こされたものである。そのメカニズムは、塩類は自然条件下では本来下層土に蓄積されていたにもかかわらず、かんがい農業を実施した結果、水路からのかんがい水の染み出しにより蓄積されていた塩類が溶解され、砂漠気候下の強烈な土壌水分の蒸発散による毛管水の上昇に伴い土壌表層に移動、蓄積したものと判断できる。

## 2.9 総合化研究

### 〔研究組織〕

地球環境研究センター

総括研究管理官

研究管理官

交流係

地球環境研究グループ

温暖化影響・対策チーム

地域環境研究グループ

交通公害防止研究チーム

社会環境システム部

環境経済研究室

客員研究員 18名

○西岡秀三

大坪國順・原沢英夫

山崎邦彦

森田恒幸・甲斐沼美紀子・増田啓子

森口祐一

後藤則行・青柳みどり・日引 聡・川島康子

### 〔研究概要〕

地球環境研究センターにおいては地球環境研究総合推進費による総合化研究を実施している。この「総合化研究」という特殊な研究領域は、分野別の実施されている個々の研究プロジェクトと異なり、①個々の研究プロジェクトの成果を集約しつつ、経済学、社会工学的手法を含む観点から総合的かつ体系的に検討を行い、政策の具体的な展開に資する知見を提供する「政策研究」、②「課題別研究」として分野ごとに研究プロジェクトが推進される地球環境研究に対し、これら個々の分野にまたがる研究領域や共通する研究領域を体系的かつ集中的に解析する「横断的研究」、③個々の研究領域の重要性を地球環境問題の解決という観点から総合的に評価する「リサーチ・オン・リサーチ」の3つの役割を有しており、現在までに①の政策研究に該当する以下の3つの研究に着手している。

総合的な世界モデルの開発を目指した「持続的発展のための世界モデルの開発に関する研究」（世界モデル研究、平成2年度～）においては、個々の研究プロジェクトの成果を活用しながら地球環境の変化を総合的に予測する「環境総合モデル」と、この環境変化に影響を及ぼす経済活動を分析する「世界経済モデル」の2つを開発中である。この研究により、具体的な政策展開につながる知見の総合化、地球環境研究全体の推進方針及び各分野に共通する経済的前提の明確化等を行うことができる。

地球環境保全に必要な社会システムの構造変革の方向を探る「地球環境負荷低減のための都市とライフスタイルのあり方に関する比較研究」（社会システム研究、平成6年度～）においては、社会経済システムの構成要素のうち特に都市及びライフスタイルに着目し、低地球環境負荷型の社会像を描くとともに、その実現のための具体的手段の検討に資する知見を提供することを目的としている。

環境と経済を統合する評価体系づくりを目指した「環境資源勘定体系の確立に関する研究」（環境勘定研究、平成4年度～）においては、環境資源や環境汚染物質のフローとストックに着目して、個々の地球環境問題を横断的に解析することを目的としている。この解析の中で、自然の劣化や環境の汚染の収支決算を毎年集計し、それを経済的価値に換算することにより、従来の国民経済計算体系に環境の大切さを反映した新たな評価方法を開発することをねらっている。

以下では、この3つの研究について平成6年度の研究成果をとりまとめた。

### 〔研究成果〕

#### （1）持続的発展のための世界モデルに関する研究

地球的規模の環境問題を体系的に解明し、総合的な問題解決の方策を検討するためには、地球温暖化、オゾン層破壊、森林破壊、砂漠化、海洋汚染などの個別の問題の相互関係を明らかにして地球環境問題全体の構造を把

握するとともに、地球環境保全と世界経済の間のトレードオフを分析して、持続的発展の基本条件を見いだしていく必要がある。このため、従来からローマクラブの「成長の限界」や「西暦2000年の地球」などにおいて地球環境モデルが作成されてきたが、近年の科学的知見の蓄積を基礎にしたより体系的な研究が求められている現状にある。また、計量経済モデルを用いて環境保全投資の経済影響が検討されてきたが、近年、超長期の経済発展と地球環境保全とのトレード・オフを分析するために、新たな長期均衡タイプの経済モデルの開発も必要となってきた。さらに、世界規模で進められている各種の地球環境研究プログラムの成果を、人類の持続的発展に向けた政策展開に反映することも求められている。本研究は、地球環境研究総合推進費に基づく総合化研究として、個々の課題別研究の成果及びIGBPやHDPなどの国際研究計画の要請や成果に基づいて、地球環境問題を横断的・総合的に検討するとともに、世界経済との関係を検討することによって、持続的発展のための基本的条件を見出すことを目的としている。

本年度は、5年間の研究の最終年度であり、フレーム

ワークモデルを完成させるとともに、各種の経済モデルを完成させてシミュレーション分析を行った。その概要は以下のとおりである。

### 1) 地球環境フレームワーク・モデルの開発

地球環境問題の相互の関係やそれに関連する社会経済活動をマクロにとらえて、地球環境問題の構造やその重要なプロセス、それに問題の解決方針を見出すためには、個々の課題別研究や海外の研究活動から得られた知見を体系的に蓄積し、総合的に組み合わせるシステムが必要である。このため、人類の発展→その発展を支える基本的人間活動→これらの人間活動に不可欠な活動要素→これらの活動要素から生じる廃物→活動要素や廃物により変化する地球環境→地球環境変化によって生じる人間社会への影響→これらの影響による人類の発展の制約、といった一連の体系的分析が可能となるフレームワークモデルの開発を進めている。この構造は図1に示すように7つの指標群と8つのマトリクスによって構成され、各マトリクスの要素に科学的知見がファイリングされる仕組みになっている。

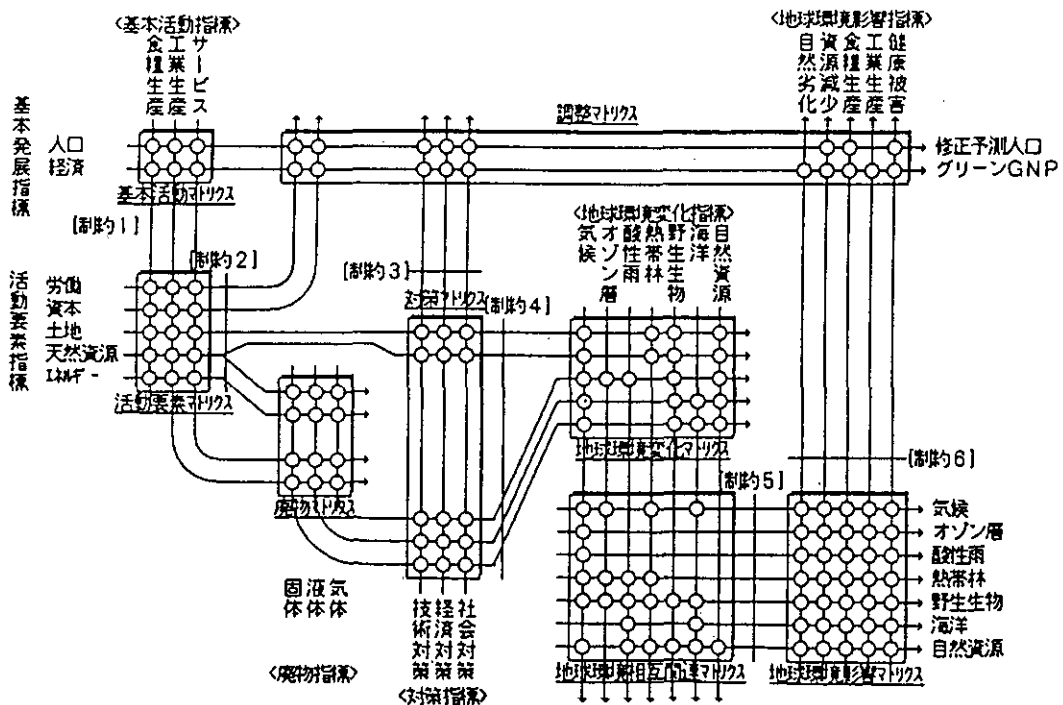


図1 地球環境フレームワークモデル

データについては、世界、アジア、日本、中国、インド、タイ等について収集し、それぞれのパラメータを設定してシミュレーションを実施した。例えば、表1は世界の人口が2倍、豊かさが10倍になったとき、生産、エネルギー消費、大気汚染物質等がどの程度増えるかをシミュレートしたものである。これによれば、エネルギー消費量が35倍、固形廃棄物が12倍、水質汚濁物質の排出が18倍、大気汚染物質の排出が12倍になることを示している。これらの環境負荷がどの程度の環境変化を引き起こすかについてのシミュレーションは、パラメータの設定に問題が残っており、今後の課題となっている。

## 2) 世界経済モデルの開発

長期均衡タイプのモデルとして2種類の動学的最適化モデル2種類のモデルを開発・改良して、地球温暖化問題の解析に適用した。これらのモデルは、アラン・マン教授の開発したグローバル2100、それにノルドハウス教授の開発したDICEモデルである。本年度は、両者のモデルを統合して、温暖化対策の最適経路の解析を試みた。

DICEモデルは世界全体を一つの閉鎖経済としたモデルであり、二酸化炭素の排出にとどまらず、温度上昇や温暖化による被害を簡単な関数形を用いて定式化しているため、温暖化の被害も勘案して最適経済成長の経路を推定することができる。このため、このDICEモデルとグローバル2100モデルの両者の特長を生かし、前者の温暖化と経済活動との相互影響関係のモデルに後者のエネルギー資源利用の考えかたを取り入れ、世界を1地域として地球温暖化と世界経済との相互影響をシミュレートするモデルを開発した。具体的には、エネルギーは石油、石炭、天然ガス、バイオマス、再生可能エネルギー、原

子力の6種の一次エネルギーが、一部の電力変換を経て産業、民生、輸送各部門に分配される。経済活動は1マクロ経済部門に統合され、資本、労働、エネルギーは生産関数で結ばれている。民生部門、輸送部門のエネルギー需要はこの算出額の関数で表される。温暖化プロセスは大気と深海の2槽モデル表現され、温度上昇は2次関数として産出額に負の影響を与える。この上で、最適な資本形成のパスを求めるものである。そして、このモデルのパラメータを最新の科学的知見に基づいて設定し、各種のシナリオのもとでの二酸化炭素排出の社会的費用を推定した。これによれば、二酸化炭素排出の社会的費用は、将来の消費をどのように現時点で評価するか(割引率)、温室効果ガスによってどの程度地球の温度が上昇するか(気候感度パラメータ)、世界の人口が今後どの程度伸びるか、温暖化がどの程度の経済的損害をもたらすか(被害関数の形状)、によって大きく異なることが明らかとなった。

このモデルはさらに、世界を日本、その他OECD、その他の3地域に分割した上、根岸ウェイトを用いてニューメレル財、石油、石炭、天然ガス、バイオマス及び原子力エネルギー源に関する国際貿易額とその国際市場取引価格の推移を求められるよう拡張された。特に、炭素排出量安定化シナリオでは、世界各地域に適当な炭素排出権を割り当てた上で、それらがどのような価格で国際市場で取り引きされるかまでをシミュレートできるようにした。

このようなモデル開発の結果、温暖化の影響を考慮した上で、①先進工業国と途上国及び日本の最適成長パスの相違、②化石燃料、バイオマス、原子力エネルギーの資源制約観点及び国際市場での長期的視点からの評価を

表1 シミュレーション結果

係数				初期設定	
基本生産マトリクス				人口	2.00
	食糧生産	工業生産	サービス生産	1人当たりGDP	10.00
人口	1.00	1.00	1.00	結果	
1人当たりGDP	0.19	1.00	1.20	食糧生産	3.10
生産要素マトリクス				工業生産	20.00
労働	0.30	0.25	0.30	サービス生産	31.70
資本	0.18	0.50	0.29	労働	3.78
土地	0.75	0.17	0.08	資本	14.94
自然資源	0.02	0.05	0.03	土地	5.12
エネルギー	0.08	0.48	0.42	自然資源	1.32
廃物マトリクス				固体	12.45
自然資源	0.23	0.08	0.00	液体	17.89
エネルギー	0.08	0.00	0.32	気体	12.41
サービス	0.23	0.23	0.00		
工業生産	0.46	0.69	0.46		

行うことが可能となった。A.標準ケース、B.原子力導入半減ケース、C.炭素排出安定化ケースの3通りのシナリオのもとでのシミュレーションの結果、(1)大気温度はケースA、Bでは2100年までに約3.3℃上昇するが、炭素排出安定化の場合は約2.1℃に留まる、(2)炭素排出抑制の経済活動への影響は、特に途上国地域で大きい等を得た。

### 3) 二国モデルの開発

日本及び中国の経済発展と地球環境との関連をモデル分析し、エネルギー価格高騰後の産業構造の変化が、両国の関係、地球環境、特に二酸化炭素排出量に与えた影響などを分析するため、中国と日本の二国モデルも開発した。

このモデルではまず、日本一国のモデルを作成し、2010年までの期間について炭素税導入によって削減を目指す政策と、炭素排出量を直接規制する政策が、日本経済に与える影響を比較評価した。分析結果によれば、炭素税導入のような経済的手段による方法が、直接規制よりも、実質総生産の大きさで表した経済厚生損失を低く押さえることが明らかにされた。2010年における炭素排出量を1990年レベルに押さえる場合、炭素税による削減では、累積損失が3兆円であるのに、直接規制では5兆円を上回ることに明らかにされた。さらに、国際収支などの対外的目標に対しても、直接規制が飢餓輸出を増加させるのに対して、炭素税導入が対外不均衡の解消にも役立つことが明らかにされた。

次に、経済発展の著しい中国の動向が、日本の環境に与える影響が大であることから、中国と日本の二国をモデル化して、経済発展が地球環境に及ぼす効果を分析した。この結果、次の諸点が明らかとなった。

- 日本の炭素排出量は、2010年には現在の水準の12%増となる。
- 日本の炭素排出量を安定させるには、年率2%でエネルギー価格を上昇させる炭素税の導入が必要である。
- 中国の炭素排出量は、2010年には現在の水準から40%増となる。
- 中国の炭素排出量を安定化させるには、年率4%でエネルギー価格を上昇させる炭素税の導入でも十分でない。
- 中国の炭素排出量を抑制する最も効果的な方法は、石炭から他のエネルギー源に転換することである。

- 日本が炭素税収入の一部を、中国における石油・天然ガスのパイプライン網の整備目的で資金協力すれば、両国の炭素排出量を減少させる最も効率的な政策となりうる。

### 4) 日本を対象とした一般均衡モデルの開発

地球環境保全と経済発展との相互関係を分析するためには、30年から100年という地球環境保全の時間スケールに合わせて、炭素税等の価格政策の効果や国際マーケットを通じたダイナミックなエネルギー需給の調整などの長期的な経済シナリオを描くモデルが必要となる。このため、長期均衡タイプの2種類のモデル、すなわち、一般均衡モデル及び動学的最適化モデルを開発した。

一般均衡モデルについては、米国のパテル研究所のエドモンズ博士を中心に開発中の第二世代モデル(SGM)のプロジェクトに参加して、日本モデルの開発を進めた。このSGMモデルは、エネルギー、農林水産、その他の3つの生産部門と家計部門及び政府部門からなる計量一般均衡モデルである。エネルギー部門は8つの部門にさらに分割され、温室効果ガス排出量を詳細に推定できるよう配慮されている。また、世界を最終的に20地域に分割する予定になっており、我が国は一つの地域として独立してモデル化される。そして、エネルギー、農産物、その他生産物に関して地域間貿易が考慮されている。このモデルの特徴は、エネルギー部門を詳しく描いたモデルである。

1985年時点の産業連関表を初期値として、5年を1期間として、1990~2030年までの9期間をシミュレートし、将来各期間の産業連関表が計算される。また、産業は、農林水産業、原油、天然ガス、石炭、核燃料、電力、石油石炭製品、ガス供給、その他産業の9部門に分割される。ただし、電力部門だけさらに、石油火力発電、LNG火力発電、石炭火力発電、原子力発電、水力発電の5小部門に分割している。

このモデルを用いて、我が国の二酸化炭素排出量を安定化させる場合に、どの程度の炭素税が必要で、それによってどの程度の経済影響が生じるかを分析した。その結果を、図2に示す。2000年以降CO<sub>2</sub>排出量を1990年レベルに安定化させるためには、2000年には28%のCO<sub>2</sub>を、以降年々CO<sub>2</sub>削減率は大きくなり、2030年には44%のCO<sub>2</sub>を削減する必要がある。このために必要となる炭素税率(円/TC)は、2000年時点で、40,000円であり、

CO<sub>2</sub>削減率の増加とともに、年々税率は高くなり、2030年には90,000円となる。これによって、石油、天然ガスの価格は、約2倍になり、石炭の価格は、約3倍になる。実質GDPは、2000年には、0.7%低下するが、以降税率の上昇に伴って、年々低下率は大きくなり、2030年には1.6%低下することになる。今までの研究成果と比較すると、小さい経済影響となっている。なお、この計算結果は、太陽エネルギーなどに関する新技術の導入については考慮されていない。したがって、新技術の導入可能性について考慮すると、実際には、ここで得られた計算結果よりも、より小さくなるであろう。

5) 日本を対象にした動的最適化モデルの開発

また、マクロ経済及びそれとリンクしたエネルギー市場からなるシステムを対象として、二酸化炭素排出量の抑制と経済活動やエネルギー消費との関係を分析する目的でGDMEEMモデルを開発した。これは、エネルギー生産部門とエネルギー消費部門、それに両者を統合する市場均衡と二酸化炭素排出算定モジュールから構成されている。

このモデルを用いて、我が国の二酸化炭素の排出抑制とそのマクロ経済影響との関係に分析した。この結果、表2に示すように、二酸化炭素排出量を1990年レベルに

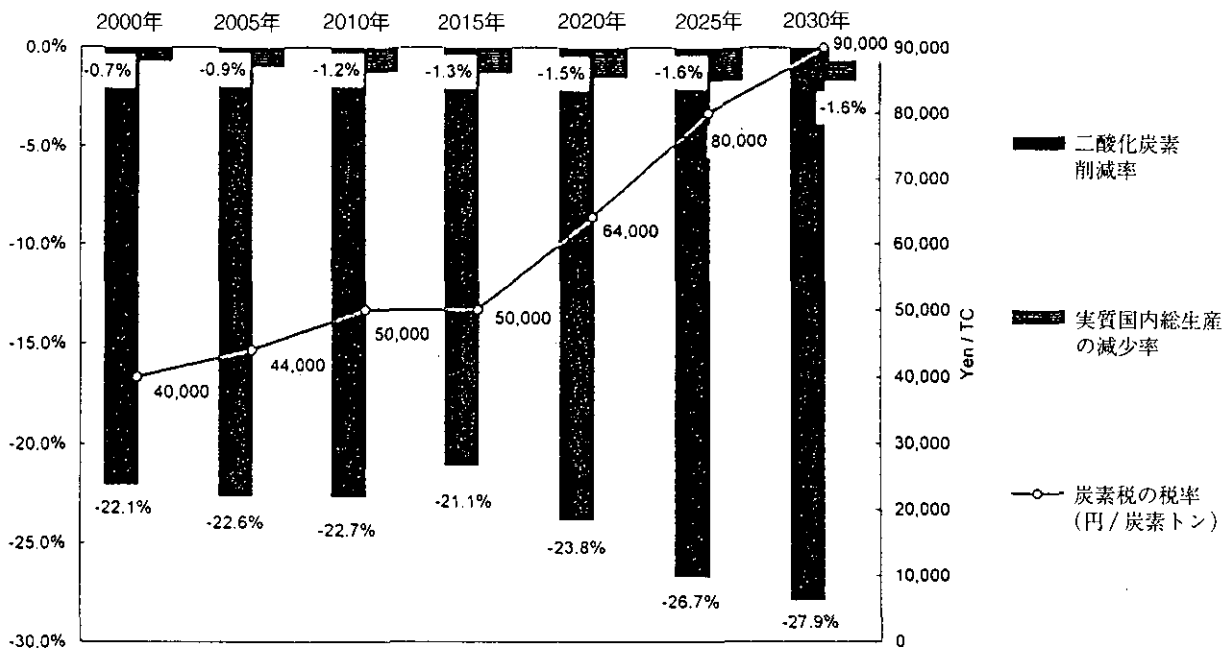


図2 SGMによる炭素税経済影響分析

表2 CO<sub>2</sub>レベル安定化時のマクロ経済損失

	暦年					平均伸び率(%/年)		累計(現在価値)
	1990	1995	2000	2005	2010	90/2000	90/2010	10億ドル
マクロ経済指標								
GNP(10億ドル/年) (対標準ケース乖離, %)	3,720 (0.00)	4,344 -(0.08)	4,980 -(0.17)	5,644 -(0.09)	6,348 -(0.04)	2.92	2.67	59,130 -(0.11)
総エネルギー需要(10 <sup>12</sup> kcal/年) (対標準ケース乖離, %)	3,141 (0.00)	3,218 -(7.71)	3,435 -(12.34)	3,587 -(16.21)	3,821 -(18.93)	0.90	0.98	
平均エネルギー価格(ドル/10 <sup>6</sup> kcal) (対標準ケース乖離, %)	61.48 (0.00)	85.32 (19.21)	98.75 (28.69)	117.35 (40.83)	134.26 (52.90)	4.74	3.91	
年間CO <sub>2</sub> 排出量(10 <sup>9</sup> 炭素トン/年) (対標準ケース乖離, %)	0.300 (0.00)	0.300 -(7.12)	0.300 -(16.67)	0.300 -(21.47)	0.300 -(26.47)	0.00	0.00	
Avg.(P.V.)								
シャドウ・プラス(ドル/炭素トン)	150.3	220.7	328.3	469.1	649.2	-	-	200.5

(1990年価格, 換算レート=120円/ドル, 割引率5%/年)

安定化する場合には、我が国のマクロ経済的損失が0.11%程度生じることが分かった。一方、新たな省エネ技術を導入する場合の経済的效果はGNPの0.1%程度あり、このため、新たな省エネ技術の効果を勘案して二酸化炭素排出量の経済影響を推定してみると、マクロ経済的損失は省エネ技術導入のメリットと相殺されて、二酸化炭素排出抑制はGNPに対して中立的な関係となる可能性が示された。

しかし、マクロ経済的効率性のみが望ましくかつ追求すべき唯一の評価基準でないことは明らかであり、「影響（負担）の公平性」というミクロ的視点からの分析へと発展させた。そこでの主要な結論の一つは、「効率性と負担の公平性は基本的にトレード・オフの関係にある」というある意味では自明なものである。試算結果によれば、「上述のCO<sub>2</sub>排出量安定化（炭素税、税収の中立性を仮定）に伴うマクロ経済的損失はGNP比で-0.1%程度に過ぎないものの、納税額を含む収益額の変化で評価した産業部門別影響は-0.3%（サービス）から-9.5%（鉄鋼）と大きなバラツキを伴う」ことが示された（図3）。さらに、このような傾向が各産業部門の合理的行動（利潤最大化等）の必然的な結果であることを理論的にも説明した。

次に、省エネ技術導入補助に向けた税収の還流による高い経済的効率性、及び上記トレード・オフ関係の緩和の可能性を評価した。特に前者では、1.4兆円の費用（省

エネ技術導入補助）によって約7.6兆円のマクロ経済的付加価値が誘発され、ある意味での経済的乗数効果は5倍強と試算された（図4）。

一連の研究からの主要なメッセージを要約すると、CO<sub>2</sub>抑制に対する経済的効率性及び影響（負担）の公平性に留意した社会的に柔軟な対応には、①経済的手段（課税）による市場メカニズムを通じた効率的抑制の実現と税収を財源とするエネルギー代替や省エネ投資への補助、及び所得配分に関する公平性（負担の公平性）に配慮した補償措置などソフトな移行を目指す諸緩和政策との望ましいカップリング、そして、その合意に向けた、②環境税という汚染者負担原則（P.P.P.: Polluter Pays Principle）の1つの具体化と税収の還流による公共財としてとらえた「快適な環境」の保全費用に対する社会的に広く受け入れられている負担（部分的な累進性）の適用という2つのいずれも根拠のある政策手段の理念的調和という視点からの議論の必要性和重要性が示唆された。

#### 6) まとめ

5カ年間の研究により、地球環境保全と経済発展の関係を簡略な構造で解析するフレームワーク・モデル、自然現象の体系的解析をめざす3次元物質循環モデル、それに各種の経済モデルを開発した。特に、経済モデルについては、計量経済モデル、一般均衡モデル、動学的最

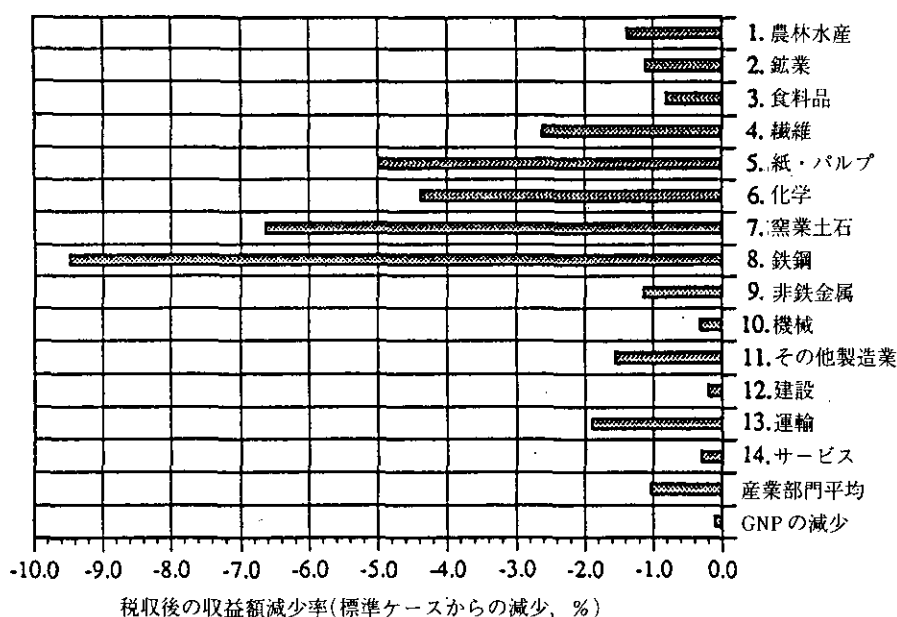


図3 炭素税の産業部門別影響



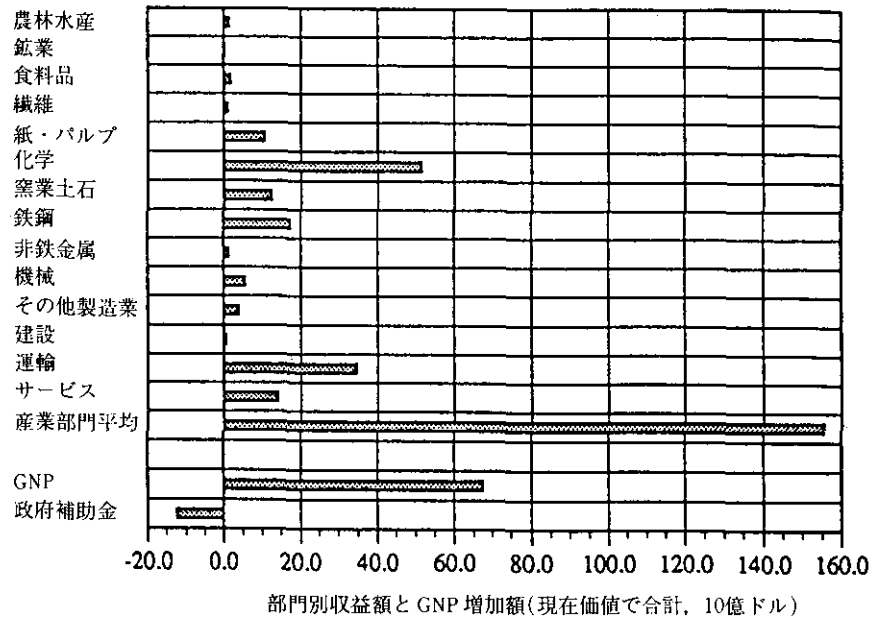


図4 補助金による部門別乗数効果

適化モデル、及び、システム・ダイナミクスモデルの開発を進め、持続的発展の分析のための基本的なツールを完成させた。また、社会科学・人文科学分野の我が国の地球環境の実態を調査して、今後の研究推進の基礎情報を得た。

今後はこれらの基本的なツールを体系的に組み合わせ、持続的発展の条件を解明する研究へと発展していきたい。

## (2) 地球環境負荷低減のための都市とライフスタイルのあり方に関する比較研究

地球環境保全のためには、個別の分野における技術的対策とともに、各分野に共通する経済構造、都市構造、ライフスタイル等の社会経済システムの基本構造の变革、いわゆる「社会的ブレークスルー」が必要と考えられる。こうした認識は、アジェンダ21の第4章「消費形態の変更」や、地球温暖化防止行動計画における二酸化炭素排出抑制対策にも盛り込まれているし、環境基本計画においても、この視点が一つの柱となっている。

本研究は、上記をふまえて、社会経済システムの構成要素のうち特に都市及びライフスタイルに着目して、低地球環境負荷型の社会像を描き出すとともに、その実現のための具体的手段の検討に資する知見を提供することを目的とする。この際、都市及びライフスタイルを、社会システムを構成する独立の2つの要素としてとらえる

のみではなく、都市化の進展とライフスタイルの変化との相互関係をも視野に入れて研究を進める(図5)。

社会システムの変革の方向を示すにあたっては、都市やライフスタイルの形態と環境負荷発生構造との関係をシステム分析的手法によって解明するアプローチと「あるべき社会像」を規範的・理念的側面から描き出すアプローチを相互補完的に用いることとする。

### 1) 都市の形態・運用・構築及び住まい方と環境負荷の関連分析

研究の開始にあたり、研究参加者間で上記フレームにそって以下の分担を定めた。すなわち、①環境調和型の都市像として、フロー・ストックに関する物理、都市の形態を規制する人間の行動特性、都市計画を規範している歴史的思想的背景それぞれからの分析、②都市の持つ環境容量を従来の環境基準及び地球環境負荷の観点からの定式化と、現状の都市構造、産業形態、生活様式からの負荷の分析、③都市内フローを担っている物流活動を変えてゆくために都市構造や生活をどう誘導していくべきか、その技術開発・社会基盤整備・制度面での対策の効果分析、④都市内エネルギー消費の多くを占める自動車交通に関して、現在の税などの制度が地球環境負荷補償のコストを反映しているかの分析、⑤静脈系都市施設建設、運用にともなう環境負荷についての分析、⑥地域における未利用エネルギーの最大利用可能性の分析、⑦

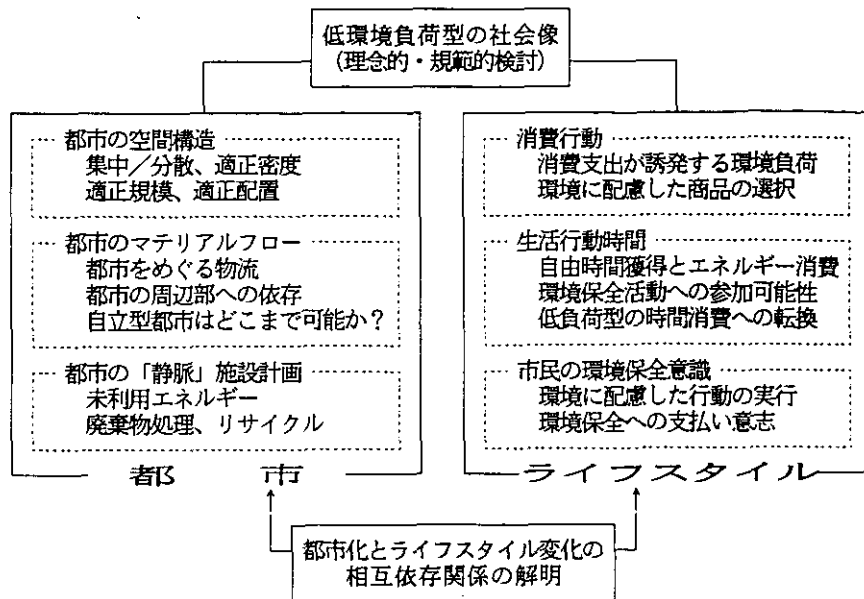


図5 研究のフレームワーク

都市におけるライフスタイル変化の断面を生活財・装置・サービスの産業連関分析よりとらえた、消費やモビリティを通じた相互依存の分析、⑧施設の使用過程及び施設整備のための資源やエネルギーの初期投入に伴う環境負荷も視野にいたした都市施設整備のあり方分析などである。

本年度の結果の例を以下に示す。

①自動車交通の外部不経済的費用と適正な燃料価格水準

顕在的・潜在的補助金がエネルギー消費を加速し、温暖化防止の観点からみると不適切なシステムになっていることが多い。都市交通の大半を占める自動車交通についてみれば、自動車利用者が「移動」の環境への負荷を含む種々の社会的コストに対して、燃料税、通行料、罰則金、一般税等を通じて十分の支払をしているか否かは疑問のあるところである。もし十分の支払をしていないとすれば、それは自動車利用を推奨する隠れた補助金の働きをしていることになる。本研究によると、自動車交通にかけられた費用は、道路投資額11.6兆円に加えて環境面からの外部不経済的費用2.7兆円の合計14.3兆円となる(表3)。一方自動車利用者が負担している税及び料金等は9.5兆円と計算されるので、その差5兆円は潜在的補助金となる。環境費用の算定手法(本研究はOECD国際比較研究の一部でもあり、そこでの共通算定手法を用いている)の妥当性あるいは「混雑」のコスト

評価をどうするといった問題が残っているが、各国比較でみると妥当な計算であると考えられる。この支払不足金額は、ガソリン・軽油をなべて9.4~58.3円/lとなり、本来この金額が税のような形で付加されてしかるべきである。さらに本研究では、2010年までの自動車交通発生予測、やはり60円/l程度の上乗せが将来にわたって必要であると推定している。

②都市建設に伴う環境負荷の評価

都市を構成する各種建築構造物の建設・維持管理・解体のライフサイクルにおいて発生する環境負荷(エネルギー)評価を目的として、まず静脈系の設備である下水道施設を対象とした試算を行った。下水道施設を管渠、処理場(ポンプ場を含む)に分け、それらの建設、維持・管理、廃棄にかかわるエネルギーを算定した。その結果、a.下水道システム全体のライフサイクルエネルギーのうち、運転エネルギーが約83%、管渠敷設エネルギーが約14%、処理場建設エネルギーが約3%を占める。b.下水道システム建設のうち、管渠敷設に投入されるエネルギーが約8割を占めている。また、管渠施設投入エネルギーのうち、管渠製造エネルギーが約32%を占めており、今後、管渠製造の技術向上が重要となる。c.さらに管渠の敷設について考慮すると、高い人口密度を持つ処理場ほど下水処理の原単位が下がる。下水処理場本体についてはスケールメリットが効く。

表3 自動車関係の税・料金および費用（1991年）

項目	税・料金および費用		
	費用（億円）	GNP比（%）	円/台数
1. 自動車利用者が負担している税および料金	95,300	2.08	159,360
1.1 特定財源	48,115	1.05	80,458
1.2 自動車利用者が負担する一般財源	19,533	0.43	32,663
1.3 財政投融资	26,701	0.58	44,649
1.4 反則金	951	0.02	1,590
2. 道路投資額 [項目2.5を控除した場合]	116,644 [75,767]	2.54 [1.65]	195,052 [126,697]
2.1 一般道路事業	44,685	0.97	74,722
2.2 地方道路事業	39,647	0.86	66,298
2.3 有料道路事業	30,312	0.66	50,688
2.4 政府関係人件費	2,000	0.04	3,344
[2.5 一般財源からの支出]	[-40,877]	[-0.89]	[-68,354]
3. 外部不経済的費用	27,421 (=73,353-45,932)	0.60	45,854
3.1 騒音	4,247 (=4,247-0)	0.09	7,102
3.2 地域規模の大気汚染	16,536 (=16,536-0)	0.36	27,652
3.2 地球規模の大気汚染	5,344 (=5,344-0)	0.12	8,935
3.4 交通事故	1,243 (=47,175-45,932)	0.03	2,079
3.5 森林の喪失	51 (=51-0)	0.00	85
4. 負担不足分 {=1-(2+3)} [項目2.5を控除した場合]	-48,766 [-7,889]	-1.06 [-0.17]	-81,546 [-13,192]

\*GNP=4,585,991(億円)

\*自動車台数=59,801,591(台)

### ③エネルギー有効利用のための都市施設計画

廃棄物、下水など従来環境へ悪影響を与えるとしてとらえられていた施設からのエネルギーを、地域冷暖房システムに導入することによって温室効果ガスの削減が果たせる。本研究では、実際にライフサイクル的にみてどの程度温室効果ガスの削減効果があるのか、また実際の都市の中で、都市活動の密度、土地利用がどのような場所にこのような未利用エネルギーを導入することが有効であるかを、ライフサイクルCO<sub>2</sub>評価によって解析した。

地域冷暖房において、⑦冷凍機とボイラーによって熱供給を行う方式（従来方式と呼ぶ）、④空気熱源のヒートポンプによって熱供給を行う方式（空気熱源HPと呼ぶ）及び②下水熱を利用し水熱源のヒートポンプによって熱供給を行う方式（下水熱源HPと呼ぶ）の三つのシステムを対象にし、地区の面積、平均容積率、建物利用用途が異なる12通りのモデル地区にそれぞれのシステムを適用した際のライフサイクルCO<sub>2</sub>（建設段階と運用段階を含む）を算出し比較した。そ

の結果、a.建設段階で発生するCO<sub>2</sub>の約7割はプラント設備工事に伴うもので、そのうち約6割は熱源機器によるものである。一方、地域導管に起因するCO<sub>2</sub>は全体の1割弱である。下水熱源HP方式が最も建設段階のCO<sub>2</sub>発生が大きくなる。一方、運用段階のCO<sub>2</sub>発生量は下水熱源HP方式が最小で、ついで空気熱源HP方式となり、従来方式ははかなり大きくなる。b.5～15年の運用期間を考えると、運用段階で発生するCO<sub>2</sub>が建設段階でのCO<sub>2</sub>発生量に比べてはるかに大きくなり、下水熱源HPが最も環境負荷が小さくなる。とりわけ、熱負荷の密度が高く、また供給地域が比較的大きい地区において下水熱源HPの優位性がある。

また、総熱負荷の高い方が供給床面積当たりのCO<sub>2</sub>発生量が低くなる。

### 2) 環境に関連するライフスタイルについての国際比較

ドイツのZUMA研究所を中心に推進されている「環境に対する態度と認識についての国際比較調査

(REAP)」に参加し、EC域内6ヵ国（アイルランド、北アイルランド、イギリス、オランダ、イタリア、旧東西両ドイツ）及び日本の調査データによる比較分析を行った。分析に当たっては、同時に行われた国際社会調査プログラム1993年環境調査（International Social Survey Programme 1993 Module on Environment - ISSP）の結果も用いた。調査は、個人面接によるもので、1993年に各国16歳以上（REAP日本版のみ20歳以上）の男女1800～2000人の全国から無作為抽出で選ばれた個人を対象とした。本調査は、国際的に Human Dimensions Programme のもとで1993年より進められている Global Omnibus Environmental Survey (GOES) の一環であり、世界規模でのライフスタイル調査に位置づけられている（図6）。

図7、8での評点は、表題の設問について、それぞれの「同意度」を尋ね、賛成=2、どちらかといえば賛成=1、どちらともいえない=0、どちらかといえば反対=-1、反対=-2の得点を与え、その平均を示したものである。図7は、「科学観」についての設問であるが、日本人は他国と比較するとかなり特異な回答パターンを示しており、「科学」のみによる環境問題の解決には楽観的ではない。だからといって科学に対して不信感を抱いているのではなく、「科学」だけでは環境問題の解決は困難であり、「科学」以外の「われわれの日常生活のあり方」の再考が必要であると考えているようで、「d.われわれが生活をあまり変えなくても、科学が環境問題を解決してくれるだろう」とは考えていない点で他の国と大きく異なっている。

図8は、「自然観・環境観」に関する設問であるが、「f.経済発展は常に環境破壊を伴う」の項で日本と他国とで大きく差がみられ、日本では、「そう思う」の割合が著しく高い。しかしながら、「c.環境を守るために、自国の経済成長は必要である」の賛成度が他国と同程度に高く、経済の急速な発展により環境を破壊してきたという過去の記憶がある一方、現在の環境を守るために経済成長は必要という、やや矛盾した考えにしていることが分かる。

この日本・EC6ヵ国の比較分析は、環境に対する価値観、意識と各種政策実施を結びつけることに役立つデータを提供している。たとえば、「環境税」の導入に関して、オランダなど既にエネルギー税の形で導入している国で賛成度は他国に比べて高く、国民が納

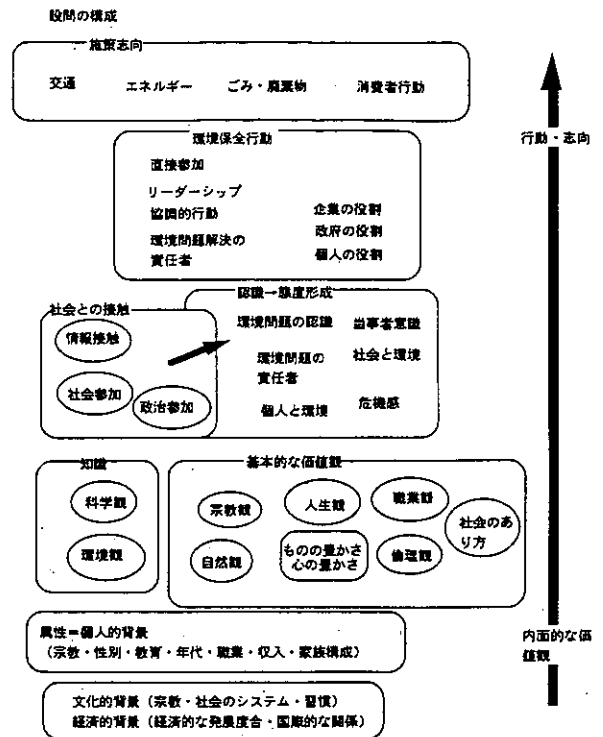


図6 ライフスタイル比較調査フレーム

得した形で導入されていると判断される。日本では、税金を環境改善に還元する形の課税に関しては少なくともオランダレベルの賛成度は得られているが、一般的な形での導入については賛成が少なく、課税と補助金の適切な組み合わせが賛同を得られやすい形態であることが読み取れる。

### (3) 環境勘定研究

「持続可能な発展」の達成に向け、環境保全と経済発展の両立を目指した新しい評価体系の確立が緊急の課題となっている。1989年のアルシュサミット経済宣言は、「経済と環境を両立させる政策決定をするうえで国際的な尺度となる指標を開発する」ようOECDに検討を依頼し、1992年6月の地球サミット（UNCED）で採択されたアジェンダ21でも1章を割いて、環境資源勘定開発の必要性を述べている。さらに、国連は、1993年の国民経済計算体系（SNA）改訂に際し、環境経済統合サテライト勘定（SEEA）を新たに導入することを決定した。一方、我が国でも昨年度に成立した環境基本法第30条において、「環境が経済から受ける影響及び経済に与える恵沢を総合的に評価するための方法の開発に関する科学技術の振興」を明記するなど、



この問題に対する関心は内外で急速に高まっている。本年度に閣議決定された環境基本計画では、第3部第4章第5節の今後推進すべき調査研究の一つとして、「統合された環境・経済勘定システムの確立等の環境と経済との相互関係に関する課題」を挙げ、環境勘定研究の重要性に具体的に言及している。

こうした内外からの要請に応えるために、我が国の環境資源勘定を作成する手法を整備することが急務であることから、平成3年度の予備的検討の後、平成4年度から経済企画庁、農林水産省の研究機関との省際研究プロジェクトを実施してきた。世界有数のCO<sub>2</sub>排出国で、自然資源の大半を輸入に依存する我が国では、地球規模の環境問題を視野にいれることが重要との観点から、国立環境研究所では、地球規模の環境変化を反映した環境勘定の手法開発を分担課題として設定した。今年度は3年間の研究プロジェクトの最終年度である。

本年度は、前年度に引き続き環境資源勘定に関する国際的活動に参加し、国連のSEEAへの対応など各国の取り組みを調査し、オランダ等における環境指標と環境勘定体系の連携の事例など、我が国の環境勘定の作成と利用に有益な情報を得た。これらの情報を含め、環境資源勘定に関する取り組みを再レビューし、その類型化を行った。また、貿易に伴う環境負荷発生状況の分析事例として、化石燃料、農畜産物等の一次産品の日本への輸入により海外で発生する環境負荷を、温室効果ガスの一つであるメタンを中心に推計した。一方、OECDの自然資源勘定のパイロットスタディで提案された様式に準拠した木材資源の部門/製品バランスの物量勘定表を産地別に作成し、国内での用途と、原産地の環境変化との関係をよりの確に表せることを示した。さらに、国際間の環境負荷フローの分析に用いてきた国連貿易統計の利用を円滑にするため、マスターファイルから特定の項目の貿易マトリクスを対話的に編集するシステムを整備するとともに、国際間、国内の部門間の自然資源や環境負荷のフローを表現するために行列形式の勘定表から地図やフローチャートを自動作成するシステムを構築した。

#### 1) 環境資源勘定に関する国際的活動への参加

我が国の環境資源勘定体系を確立していく上では、環境資源勘定開発に取り組んでいる諸外国、国際機関

等と共同研究や情報交換を行うことが重要と考えられる。こうした観点から、本年度も前年度までに引き続き、経済協力開発機構(OECD)環境政策委員会環境の状況グループ会合に出席し、環境資源勘定及び環境指標に関する加盟各国の調査研究状況について調査した。とりわけ本年度は、OECD環境資源勘定セミナーが開催されたことから、同セミナーにおいて我が国の調査研究の状況について発表を行うとともに、諸外国・国際機関の最新の動向についての情報を得た。本セミナーでは、環境資源勘定をどのように利用するか、という側面からの討議に力点がおかれた。主な結論は以下のとおりである。

①セミナーにおいて、さまざまな主体による取り組みについて有益な情報交換がなされたこと、②マクロレベルの利用(環境と経済の統合の達成状況評価など)とマイクロレベルの利用(部門別の資源管理やモデリングの基礎データなど)が想定されること、③正しく利用されるよう、環境資源勘定のもつ意味の「教育」が必要であること、④物量的勘定と貨幣的勘定の連携が重要であること、⑤環境資源勘定と環境指標の連携が重要であること、⑥OECD等の国際機関の役割として、情報交流の場を提供し、多種多様なアプローチのゆるやかな収束を目指すこと、⑦各国では、完全なものではなくても、徐々に調査研究の成果を政策決定のツールとして提供するように努力すること

#### 2) 環境資源勘定の多種多様なアプローチの類型化

従来、環境資源勘定に関するアプローチの分類については、OECDによる3分類、すなわち、①SNA自身の修正、②現在のSNAに付加する環境に関するサテライト勘定、③物量的な自然資源勘定、が日本ではよく用いられてきた。これに対し、上記のセミナーでオランダ及び世界銀行の専門家から代替的な分類案が提示されたことから、これらを包含する新たな分類案を試作した。その分類案を表4に、また、環境資源勘定に関連するデータ、手法の全体像における各アプローチの位置づけを図9に示す。

一方、こうしたグルーピングと並行して、多種多様なアプローチの分類の視点となる軸として、以下のよう

①貨幣的な勘定 ↔ 物量的な勘定

②ストック中心の勘定 ↔ フロー中心の勘定

表4 環境勘定に関するさまざまなアプローチの分類案

	OECD	オランダ提案	世銀ハミルトン提案
A 狭義の自然資源勘定	自然資源勘定	○	○
B 資源と汚染物質のフロー勘定	サテライト勘定	○	○
C 環境支出勘定		—	○
D 環境変化の貨幣価値による評価	グリーン GNP	○	—
E 国民経済計算の代替的集計値		○	○

注) 物量的な勘定 A, B ↔ 貨幣的勘定 C~E SEEAの範囲 B~D

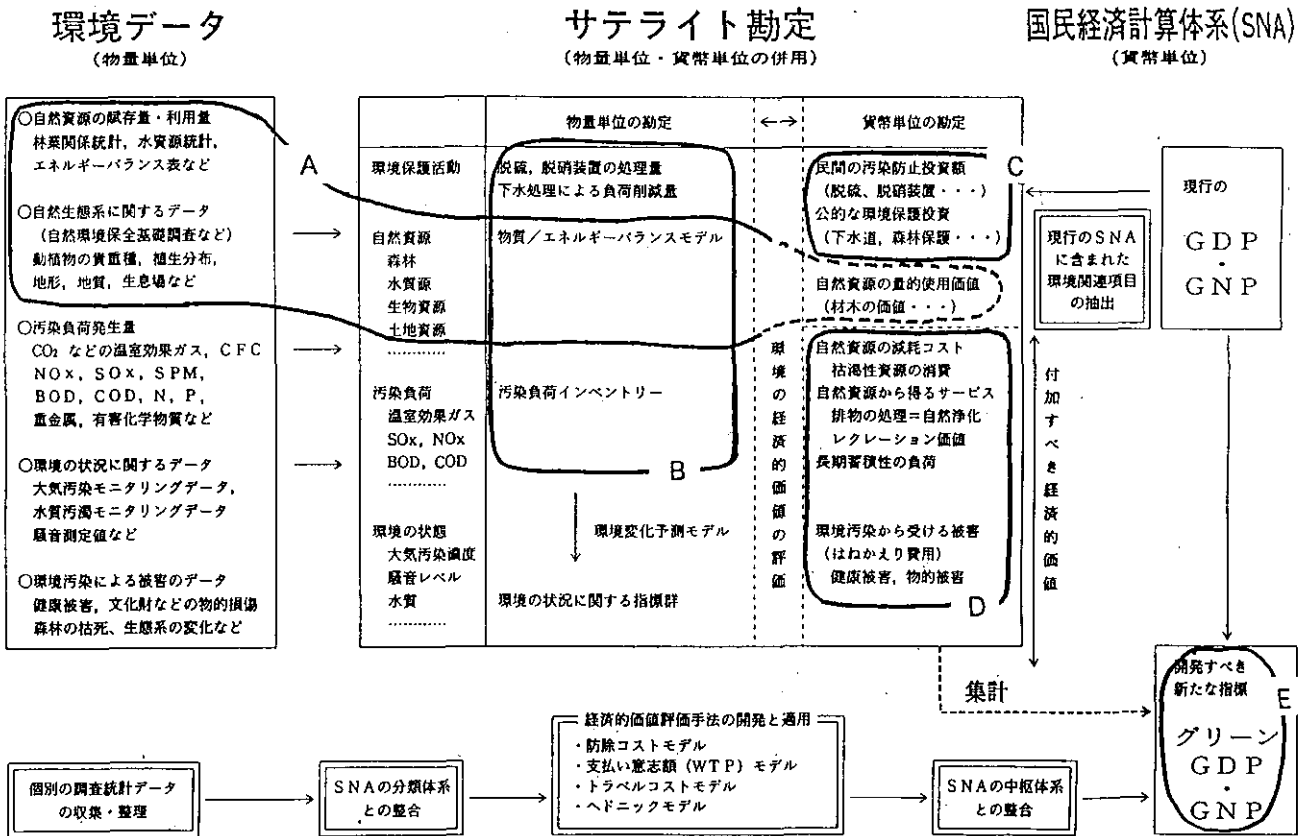


図9 環境勘定に関する代表的アプローチの位置づけ

- ③ SNAの枠組みに整合させたもの ↔ SNAと独立のもの
- ④ 勘定の内訳に意義を見いだそうとするもの ↔ 集計して単一の指標を得ることを指向するもの
- ⑤ 会計学的整合性を求めるもの ↔ 利用の面からの有用性を求めるもの
- ⑥ 自然資源を対象とするもの ↔ 環境汚染を対象とするもの
- ⑦ 発展途上国を対象とするもの ↔ 先進国を対象とするもの

3) 輸入に付随する海外での環境負荷発生的事例分析  
 我が国は、化石燃料や木材、農畜産物などの1次産品の大部分を輸入に頼っている。また近年、工業用原材料についても近隣諸国へ生産拠点を移す動きがある。従って、こうした資源、原材料の国際的取引によって海外で生じる環境への負荷を環境資源勘定体系に反映させる必要がある。前年度までにCO<sub>2</sub>について分析を行い、日本への輸入による海外での排出が、日本からの輸出品生産のための国内での排出を上回ることを明らかにしたが、今年度は同じ温室効果ガスであるメ

タンを対象とした事例分析を行った。

分析対象としたメタン発生源は、化石燃料採掘と家畜飼育によるものである。まず、これらの発生源に関連する貿易品目として、石炭、石油、天然ガス、牛肉、羊毛等を抽出し、原産地別の日本への輸入量に関するデータを整理した。一方、これらに関連するメタンの排出原単位をIPCC資料等から収集・整理した。また、家畜については、貿易で取引される量と排出原単位とを結び付けるため、飼育期間と期間中の生産量との関係を整理した。これらのデータに基づき、各品目の日本への輸入により海外で排出されるメタン量を試算した結果、化石燃料採掘によるものが約70万トン、農畜産物生産によるものが約60万トンと推計された。これらの合計値は、気候変動に関する国際連合枠組条約に基づく日本国報告書に記載された日本国内のメタン排出量の値（138万トン）に匹敵し、評価期間100年の地球温暖化指数で二酸化炭素に換算すると約900万トン（炭素換算量）、国内の二酸化炭素排出量の約3%に相当する。

日本国内でのメタン排出のうち、日本からの輸出品品に関係する量のごくわずかと考えられ、前年度までに分析を行った二酸化炭素と同様、メタンに関しても貿易に伴う内包環境負荷の国際収支は、輸入超過であるといえる。地域別では、石炭や羊毛の産地である豪州における排出分が日本への輸入に伴う排出全体の約半分を占める。

#### 4) 木材資源に関する原産地別のマテリアルフローの分析

我が国は、木材資源の過半を輸入に依存し、特に近年、熱帯林の消失との関係において南洋材の輸入についての論議が活発に行われている。このことは、紙のリサイクルなど、木材資源の消費節減への取り組みを促進していると考えられるが、実際の国内での木材資源の用途とその産地との関係を正確に把握しなければ、真の意味での対策には結びつかない。本研究では先に、OECD環境の状況グループにおいてノルウェーの主導で行われた木材資源勘定のパイロットスタディの様式に準拠して、木材資源の部門/商品バランスを表すマテリアルフローを作成したが、この表は供給量を輸入と国産に分類しているものの、加工、用途については産地を区別しておらず、上記のような目的には

不十分である。そこで今年度は、この部門/商品バランス表を木材資源の産地別に推計することによって、産地と用途との関係を明示できる勘定表を試作した。推計にあたっては、木材を国産材、南洋材、北米材、北洋材、その他にまず分類し、南洋材についてはさらに産地及び樹種によって細分類を試みた。図10は国産材、北米材、南洋材、北洋材について、1990年度の用途別の消費量を比較したものである。南洋材の用途が国産材や北米材とは大きく異なっていることが読み取れる。

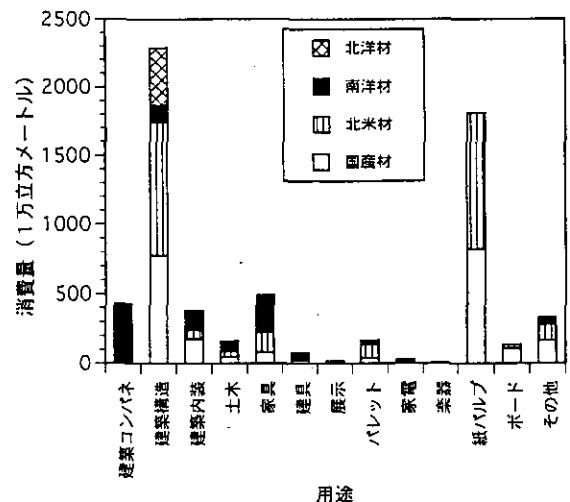


図10 日本国内における木材資源の産地別、用途別消費量

#### 5) 国際間、国内部門間の環境負荷フローの分析のための情報システム構築

上述したマテリアルフローの分析は、表4の分類ではBの「資源と汚染物質のフロー」に相当するが、このタイプの環境資源勘定は、表形式の表現では勘定の持つ意味が一般には理解されにくい。そこで、勘定表の内容の理解を支援するため、表形式のデータをもとに、マテリアルフローの内容を地図及びグラフの形で自動作図するシステムを構築してきた。本年度は、貿易に伴う国際間のフロー分析のシステムについて、これまで汎用計算機で処理していた国連貿易統計のマスターデータからのデータ編集機能をワークステーションに移植し、ワークステーション上でデータ編集から地図表示までを一貫して行うシステムを完成させた。また、国内の部門間の資源や汚染物質のフローを帯グラフで表現するシステムについては、リサイクルフローの作図機能等の機能強化を行い、部門間フローを容易に概観できるシステムとして完成させた。



## 2.10 課題検討調査研究

### 2.10.1 地域開発と環境保全の相互作用の分析と予測に関する予備的研究

#### 〔研究組織〕

地球環境研究センター ○大坪國順・西岡秀三・  
原沢英夫・山崎邦彦・  
橋本浩一

#### 〔研究概要〕

アジア・太平洋地域は自然条件、社会条件とも多様性に富み、かつ変化も著しいため、20年後、50年後などの近未来の土地利用・被覆変化を予測し、持続的発展のための適切な土地利用システムを提言することは非常に重要である。

本課題検討調査研究では、アジア太平洋地域の特性を考慮し、IGBP(地球圏-生物圏国際協同研究計画)/LUCC(土地利用・被覆変化プロジェクト)の一環として、地球環境保全への貢献を目指した研究を行うための土地利用・被覆変化研究計画の骨子について検討を行った。調査項目は、以下のとおりである。

- 関連研究等の世界的動向
- 既存の土地利用・被覆変化予測モデルの概要
- 既存の土地利用・被覆関連データベース
- ケーススタディ候補地の概要

調査は、既存資料の収集・整理、検討会における討議結果のとりまとめ、ケーススタディ候補地のカウンターパートとの打ち合わせ、及び有識者へのヒアリングにより行い、結果は、「地球環境保全に関する土地利用・被覆変化研究 (Land Use for Global Environmental Conservation: LU/GEC) 計画に関する報告書」としてまとめた。

### 2.10.2 気候変動に対する適応/閾値の評価に関する予備的研究

#### 〔研究組織〕

地球環境研究センター ○原沢英夫・西岡秀三  
地球環境研究グループ  
温暖化影響・対策研究チーム 森田恒幸・増田啓子

#### 〔研究概要〕

本研究は、気候変動の適応/影響評価について分野横断的に科学的な知見を集大成してガイドラインを作成すること、そして地球環境の限界的な負荷・閾値について概念整理を行い持続的発展へ向けての研究課題を検討することを目的としている。ガイドラインについては、英国グループと協力して、知見の集積、原稿作成・編集、各分野専門家・各国政府のレビューを経て、完成をみた。本ガイドラインは、気候変動枠組み条約の締約国会議(平成7年3月ベルリンで開催)にIPCCの特別報告書の一つとして提出されるとともに、今後の温暖化影響評価の指針として世界中で活用されることとなった。さらにIPCCは、気候変動枠組み条約第2条で示された大気中のCO<sub>2</sub>濃度を安定化させる人間活動の限界的な負荷(閾値)についての知見を集積するための活動を開始したが、平成7年11月のブラジルフォートレザの会合等を通じて、閾値の概念整理を行うとともに、分野毎に事例を収集整理するとともに今後の検討事項を明らかにした。

### 3. その他の研究

#### 3.1 衛星観測プロジェクト

##### 〔研究組織〕

地球環境研究グループ

衛星観測研究チーム

オゾン層研究チーム

大気圏環境部

高層大気研究室

地球環境研究センター

研究管理官

客員研究員 12名

○笹野泰弘・鈴木 睦・横田達也

中根英昭

杉本伸夫・松井一郎・湊 淳

神沢 博

##### 〔研究概要〕

「オゾン層の保護のためのウィーン条約（1985）」によれば、その締約国は、『人工衛星による観測網及び地上の観測網を統合した全球オゾン観測組織を最大限に活動させることによるオゾン層の状態（すなわち、気柱全量及び鉛直分布の空間的及び時間的変動）の観測』の分野において研究及び組織的観測を実施し・・・と定めている。さらに我が国の「特定物質の規制によるオゾン層の保護に関する法律（昭和63年）」でも、オゾン層の破壊の状況、関連物質濃度変化の状況監視、調査研究の推進等を行うことが定められている。

環境庁はこれらの条約、国内法に基づき、オゾン層の監視、調査研究の推進を目的として、人工衛星を利用した観測を行うこととし、平成元年度より衛星搭載機器の開発に着手した。すなわち、改良型大気周縁赤外分光計（ILAS：Improved Limb Atmospheric Spectrometer）、地上衛星間レーザー長光路吸収用レトロリフレクター（RIS：Retroreflector In-Space）及びRIS観測用レーザー送受信地上設備である。ILAS、RISは、宇宙開発事業団が1996年2月に打ち上げ予定の、地球観測プラットフォーム技術衛星（ADEOS：Advanced Earth Observing Satellite）に搭載され、3年間にわたってデータが取得される。

さらに、1999年に打ち上げが予定されている環境観測技術衛星（ADEOS-II）に、改良型大気周縁赤外分光計II型（ILAS-II）の搭載が決まり、開発に着手した。

国立環境研究所はこれに対応して、（1）搭載機器開発に係る科学面での支援、（2）データ処理運用のため

の地上システムの開発とその運用、を担当することとなった。前者には、機器の概念設計、開発に係る技術的知見の提供、性能評価試験の支援、機器検証実験計画立案支援等が含まれる。後者は、データ処理のためのアルゴリズム研究開発、データ処理運用システムの概念設計、システムソフトウェア開発のための基礎検討、計算機システムの概念設計、データ利用研究計画立案、等が含まれている。さらに、衛星データの取得が開始された後は、データを用いたオゾン層監視、オゾン層変動メカニズムの研究等の、データ利用研究の中心的役割を担うことになる。

これまで、研究所の体制の変遷につれ、研究所側の中心的な研究グループは大気物理研究室（旧公害研）、オゾン層研究チーム、衛星観測研究チームと移ってきたが、現在では衛星観測研究チーム、高層大気研究室、地球環境研究センター（衛星担当研究管理官）が中心となって、衛星観測プロジェクト（ILASプロジェクト、RISプロジェクト、ILAS-IIプロジェクト）を推進している。

さらに、ILAS、RISのそれぞれのプロジェクトを進めるため、サイエンスチームを組織して国内外の研究者の協力を得ている。また、RIS観測については、地上局からの衛星追尾が不可欠であるため、郵政省通信総合研究所との共同研究により、観測を行うこととしている。

なお、これらの事業は、環境庁衛星搭載機器等製作費（地球環境部研究調査室）、国立環境研究所地球環境研究センター地球環境モニタリング経費、地球環境研究総合推進費等により、実施されている。

## (1) ILASプロジェクト

ILASによる観測は、太陽掩蔽法を原理としている。

図1に測定の方法を模式的に描いている。衛星に搭載されたILASが、衛星から見た日の出、日の入り時に太陽の輝度重心を追いつつ、太陽光強度スペクトル(波長ごとの光の強さ)の時間変化を測定する。このスペクトルは、太陽光が地球縁辺の大気層を通過する際に、大気中に含まれる気体成分等によって吸収されることによって起きる。つまり、この吸収スペクトルには大気中の気体成分などの濃度に関する情報が含まれている。さらに、その時間変化は、太陽・衛星・地球の位置関係で決まる、光路の変化に対応している。すなわち、地上からの高度分布に換算することができる。

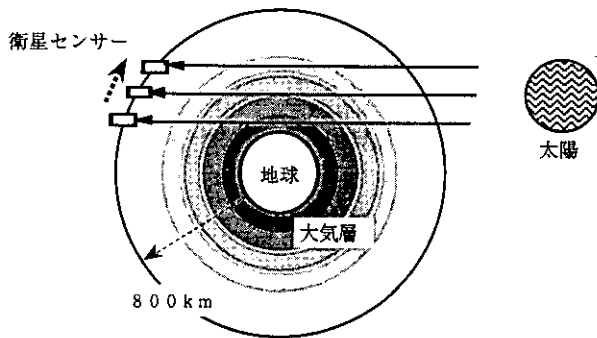


図1 ILAS測定の方法

衛星から、地球周縁の大気層を通して太陽光を分光測定する。衛星の進行につれて光路が変化し、異なる高度層の情報が得られる。

ILASの主な測定対象は、赤外波長(6.2 $\mu$ m~11.8 $\mu$ m)の吸収測定から、オゾン(O<sub>3</sub>)、二酸化窒素(NO<sub>2</sub>)、硝酸(HNO<sub>3</sub>)、一酸化二窒素(N<sub>2</sub>O)、メタン(CH<sub>4</sub>)、水蒸気(H<sub>2</sub>O)等の濃度の高度分布、エアロゾル消散係数等の高度分布である。図2に参考として、接線高度20kmにおける赤外領域での透過率スペクトルを示した。また、可視波長(0.753nm~0.784nm)における酸素分子による吸収測定から気温、気圧、エアロゾル消散係数の高度分布も同時に導出される。

以下に、国立環境研究所が主に担当している事項について、概要を記述する。

### 1) アルゴリズム開発

ILASデータの処理の中心部分は、赤外波長の吸収ス

ペクトルから気体成分濃度の高度分布を出す過程である。これは、非線形最小自乗法適用の問題である。このとき、極めて多数の吸収線に関する、計算時間のかかる計算を実行する必要がある。このため、効率的な計算手順を採用することが不可欠であり、検討の結果、あらかじめ吸収係数を気温気圧の関数として計算しテーブル化しておく方法の採用に決まった。また、最小自乗法によるスペクトルフィッティングに際し、効率がよく精度の高い手法の検討が必要である。

### 2) データシステム開発(ソフト・ハード)

衛星データ処理運用システムはソフトウェアとして、単に衛星データの処理にとどまらず、生データの受け入れ、高次処理、データベース管理、配布サービス、関連データの受け入れ・管理や、ILAS機器の運用に関するコマンドパラメータの生成、通信等の機能を持たせる必要がある。

計算機設備は、これらを定常運用として実行可能な性能・機能を持たせ、さらに研究者支援(データ解析等)の機能を持たせる。

### 3) 性能評価試験

衛星搭載機器の製作は環境庁の製作委託先の担当であるが、光学的な性能評価の方法の検討については、研究者の支援が必要である。取得された性能評価試験データを用いた、装置関数その他の機器パラメータの決定はデータシステムソフトウェアの開発に関連して、研究者側の作業として行う。

### 4) 検証実験

衛星搭載機器による測定データの妥当性の評価は、独立に取得された他のデータとの比較の作業によって行われる。これは機器動作の確認だけでなく、データ処理アルゴリズム、ソフトウェアの妥当性の確認の作業を兼ねている。そのためのデータ取得は検証実験として、特別に計画され実施される。重要な点は、ILASデータの検証に必要な質と量の検証データを収集することである。

平成6年度までに、検証実験の計画づくりが行われた。主たる検証実験は、スウェーデンのキルナにおける気球実験、昭和基地、アラスカ等における地上からの遠隔計測手法による観測である。

検証のためのデータ解析も、プロジェクトとしては不

ILAS 赤外チャンネル・シミュレーションデータ (接線高度=20km)

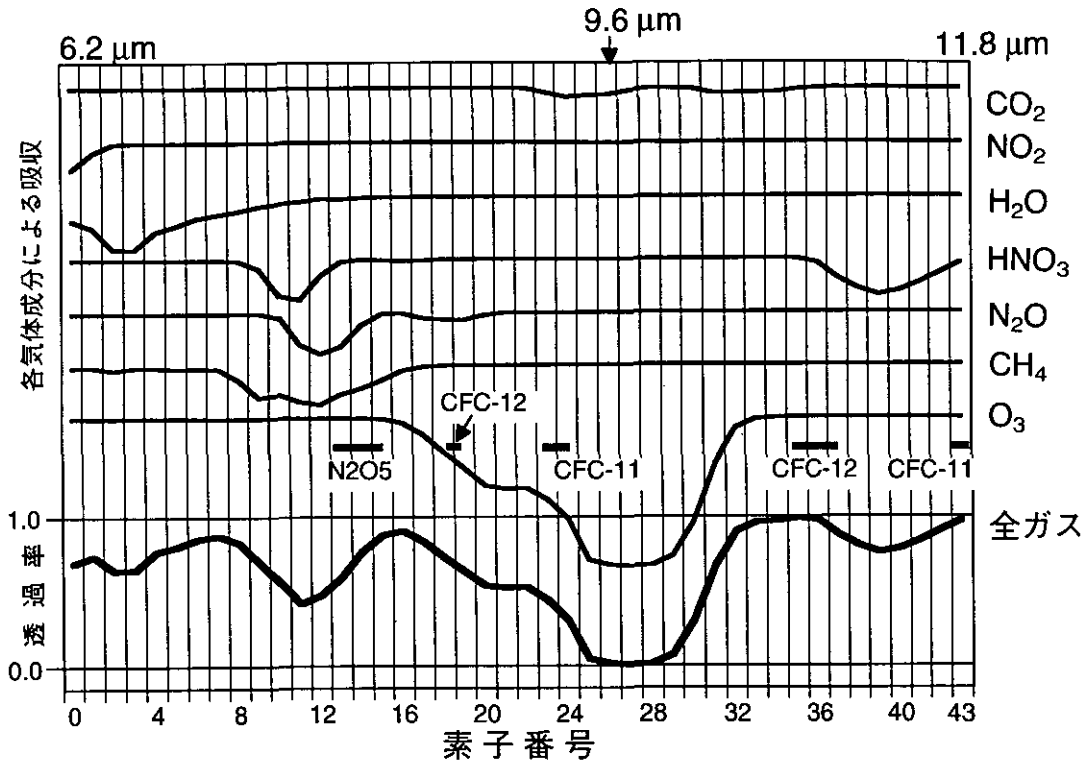


図2 各種気体によるILAS赤外チャンネルの模擬的な透過率信号  
接線高度が20kmの場合。

可欠の作業である。サイエンスチーム内で担当の研究者を定めて、検証のためのデータセットの作成作業に着手した。

5) データ利用研究

データ利用の方法については、衛星打ち上げ以前の早い段階から準備を進めておくことが必要である。そのため、サイエンスチームのメンバーから研究課題の提案を受けたほか、研究公募を行い、国内外からの研究提案を受け付けた。

(2) RISプロジェクト

RISによる観測の基本原理は、レーザーを用いた高分解能の吸収分光法である。地上から送信したレーザーをRISで反射することによって、地上と衛星の間をレーザー光が往復するときに受ける吸収を測定する。RISプロジェクトでは、炭酸ガスレーザーを光源とする地上システムを用いて、測定対象分子の吸収スペクトルを測定する。RISによる観測の概念を図3に示す。

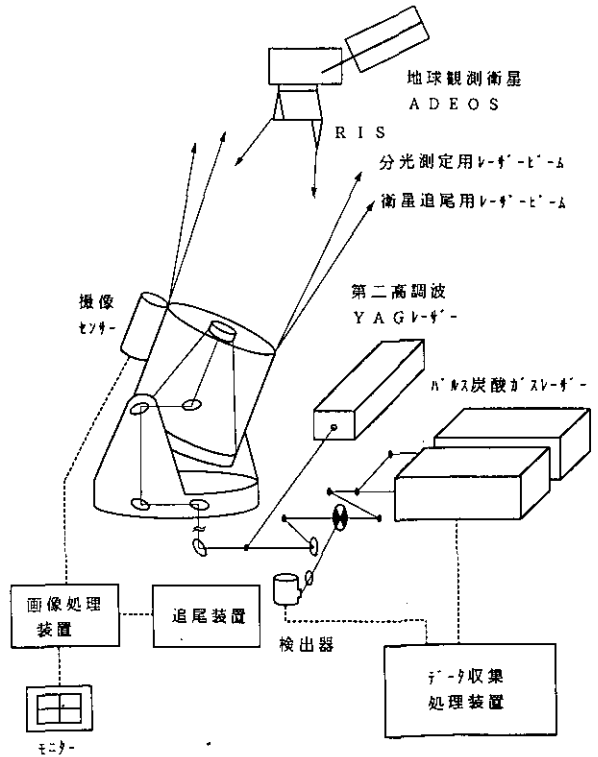


図3 RISによる観測の概念図

得られた吸収スペクトルから、測定対象分子の高度分布または気柱全量が求められる。測定は衛星が地上局に近いパスを通る時に行われ、頻度は天候を別とすれば、昼夜合わせて平均毎日1回程度である。測定対象は、同位体炭酸ガスレーザーの基本波(10 $\mu$ m帯)を用いてオゾン、CFC-12、硝酸、二酸化炭素、第二高調波(5 $\mu$ m帯)でCO、N<sub>2</sub>O、第三高調波(3 $\mu$ m帯)でメタンの観測を計画している。

#### 1) RISの設計開発

RISは地上から送信したレーザー光を地上に反射するためのリフレクターである。RISは、空洞型コーナークュープリトリフレクターと呼ばれる、3枚の平面鏡を直角に組み合わせた構造を持つ。この構造を持つリフレクターは、どの方向から入射した光でも正確に逆方向に反射する性質を持つ。したがって、リフレクターの姿勢に依存せず正確に光を反射する。RISの場合はADEOS衛星が高速で進行するため、反射光の方向が入射光の方向とずれる、光行差と呼ばれる現象が生じる。そこで、RISでは3枚の鏡の一枚にわずかな曲面を導入し、また、鏡面間の角度も直角からわずかにずらせることによって、広い範囲で効率良く反射光を受信できるように設計した。RISの開発の途上では、機械的特性、光学的特性を検証するための3種類のエンジニアリングモデルが製作された。フライトモデルは平成7年3月に完成し、正弦波振動試験および光学試験が実施された。試験結果は良好で、光学的にも設計値に近い反射波面の特性が得られることが確認された。

#### 2) レーザー送受信システム

RISを用いた分光観測では、光源とするレーザーの種類に応じて色々な方法が考えられるが、RISプロジェクトでは2台のパルス炭酸ガスレーザーを用いた観測手法を採用した。2台のレーザーのうちの1台は吸収の少ない発振線に固定し、大気効果やRISの反射率の変化などの影響を取り除くための参照用として用いる。分光観測では、衛星の進行に伴う、反射光の波長のドップラーシフトを利用する。観測時にはADEOS衛星は地上局に向かって進行するので、RISによる反射光は送信したレーザー波長よりも短波長側にシフトする。また、この波長シフトの大きさは衛星の位置に依存する。したがって、レーザー波長を測定対象の吸収線の近傍の適当な波長に

設定しておけば、反射波長の変化を利用して高分解の吸収スペクトルが測定される。また、レーザー波長を、測定の時間内にいくつかの発振線の間で切り替えることによって、さらに広い範囲のスペクトル情報が得られる。そこで、RISプロジェクトでは狭帯域でかつ発振線をすばやく切り替えることが可能な炭酸ガスレーザーを新たに開発し、これを光源とする送受信システムを製作した。

#### 3) データ処理アルゴリズム開発

RISを用いた測定は原理的には、地上から衛星までの大気の高分解能の吸収スペクトルの測定である。RISのデータ処理では、往路と復路のレーザー波長が異なること、光路長が測定の間に変化することなどを考慮する必要があるが、基本的には反転法または最小自乗法を適用することができる。RISのデータ処理のために3種類のデータ処理手法を開発した。ひとつはオゾン、メタンなど吸収の大きい分子について、吸収スペクトルの形状から反転法を用いて高度分布を求める手法、ひとつは比較的吸収の小さい分子あるいはレーザー波長の制約のために十分な情報が得られない分子について最小二乗法によりカラム濃度を求める手法、もうひとつは吸収がほとんど連続帯であるCFC-12について、炭酸ガスレーザーの複数の発振線を用いた多波長の差分吸収法によってカラム量を求める手法である。それぞれの方法について測定シミュレーションプログラムを作成し、評価を行った。

#### 4) 検証実験

RISの光学的特性の検証と、測定された微量分子濃度の検証の2種類がある。前者については、各波長の受信信号強度を衛星位置の関数として測定して、計算値と比較することによって行う。後者については、レーザーヘテロダイン分光計、赤外分光計、エタロン分光計、FTIR、大気球によるサンプリング測定、オゾンレーザーレーダー、オゾンゾンデによる検証を計画している。これらのうち、レーザーヘテロダイン分光計、エタロン分光計、オゾンゾンデについては、RIS観測と同期させて、RIS地上施設所在地(小金井市)、またはつくばにおいて、検証観測を実施する計画である。また、大気球、FTIR、レーザーレーダー等による観測は、比較的観測日時の近いデータの提供を求め、相互比較を行う計画である。

5) データ利用研究

RISプロジェクトでは、東京都小金井市にある地上局から観測を行う計画である。測定が可能なパスをADEOSが通過する頻度は、昼夜合わせて平均1日に1回であるが、測定は天候にも依存する。年間を通じての快晴比率は約30%であることを考え、定常的な運用では年間約50日程度の観測を計画している。

RISは成層圏オゾンの高度分布を、昼夜同じ方法で観測可能である点に特長がある。また、メタンの高度分布、CFC-12、硝酸などのカラム全量については、これまで頻度の高い観測例が少なく、RISによる高頻度の観測が期待される。これによって、これらの分子の高度分布またはカラム全量の季節変化、経年変化等の解析が可能である。

また、RISを用いた測定は、地上衛星間レーザー長光路吸収の世界初の計画であり、レーザー光の伝送特性など測定技術の観点からも重要なデータが得られるものと考えられる。

この他、英国、ドイツの研究グループにより、独自にRISを利用する研究が計画されている。

(3) ILAS-II プロジェクト

平成6年度は、衛星搭載機器の仕様決定のための、理

論計算等を実施し、概念設計に反映させた。ILAS-IIは、基本的にはILASを踏襲しているが、赤外チャンネルの波長範囲の下限をILASの6.2 $\mu\text{m}$ から3 $\mu\text{m}$ 付近まで拡大すること、CIONO<sub>2</sub>の観測のための特別のチャンネルを設けることが、大きな違いである。赤外チャンネルの拡大により、エアロゾルや極成層圏雲の光学的性質のより詳細な情報を求めることができる。また、CIONO<sub>2</sub>は、オゾン層破壊のメカニズムの中で、オゾン破壊の元凶である塩素のリザーバーとして働くことから、その挙動を理解することが極めて重要な物質である。

その他、太陽面輝度分布の測定機能を付加するなど、機構面でも改善を加えている。

〔研究成果〕

(1) ILAS データ処理アルゴリズムの研究

ILASには可視チャンネルと赤外チャンネルがあり、これらのデータから気温、気圧、エアロゾル、各種の微量ガス濃度(体積混合比)の高度分布を推定する。これまで検討を行ってきたILASデータ処理全体の流れを図4に示す。

ILASのデータ解析手法としては、非線形最小二乗法を用いる。その原理は次のように説明できる。まず、宇宙空間での測定プロセスを、計算機の中で高精度にモデ

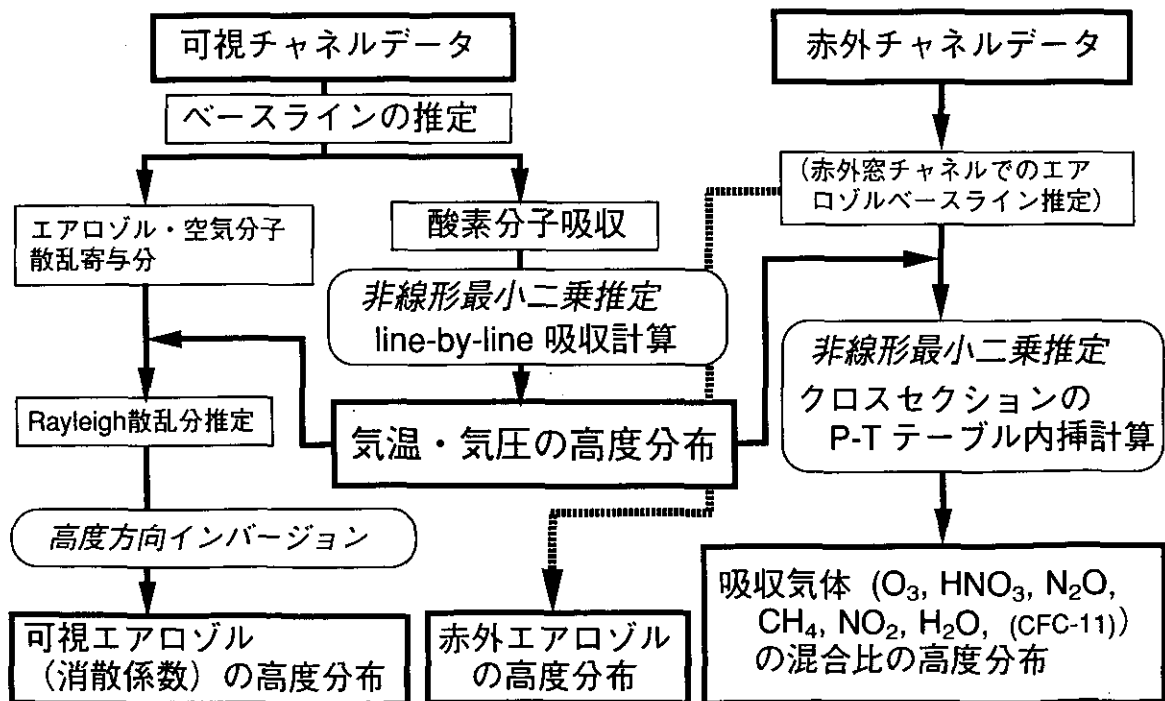


図4 ILAS データ処理の流れ

ル化する。プロセスには、太陽の光源スペクトルから、大気中の放射伝達過程、そして装置に起因する特性（装置関数）が含まれる。そこでは各種の気体の濃度分布を与えれば観測する吸収スペクトルが計算できるが、観測された値から求めたい濃度を直接的に計算することはできない。そこで計算結果のスペクトルが実際の測定スペクトルと一致するように（残差二乗和が最小となるように）、気体の濃度分布を調整しながら何度も計算を繰り返す。これによって、最終的に最適な推定値が求められる。ILASでは非線形最小二乗法としてマルカート法（Marquardt Method）を用いる。これは、初期推定値から、繰り返し推定を行う際に、残差の減少の程度によって次のステップにおける未知パラメータの調整の方向と大きさを柔軟に替えながら繰り返し推定を行う方法である。

この方法によって赤外44素子のデータからオゾン、メ

タン、硝酸、水蒸気、一酸化窒素、二酸化窒素の6種のガスの高度分布を同時に推定した場合の、推定精度の検討を行った。各種のノイズを模擬的な観測データに載せて推定を行ったが、上記の方法の繰り返し計算数が約4〜9回で十分に収束した結果が得られた。推定精度はガス種と高度範囲で異なるが、ほぼ期待した精度で推定できることが確認された。推定結果のオゾンの例を図5に示す。この例では、ほとんどの高度において相対誤差の大きさが±1.5%よりも小さかったことが分かる。なお、非線形最小二乗推定を行う際には、未知パラメータの値の変化に対するスペクトル残差の変化の割合（微分値）が必要であるが、赤外チャンネルではこれを比較的容易に数式として導出できる（数式微分値が得られる）ため、その計算式を用いて検討を行った。これにより、高い精度で効率的に収束値を得ることができる。

また、赤外チャンネルにおいて、装置の特性である素

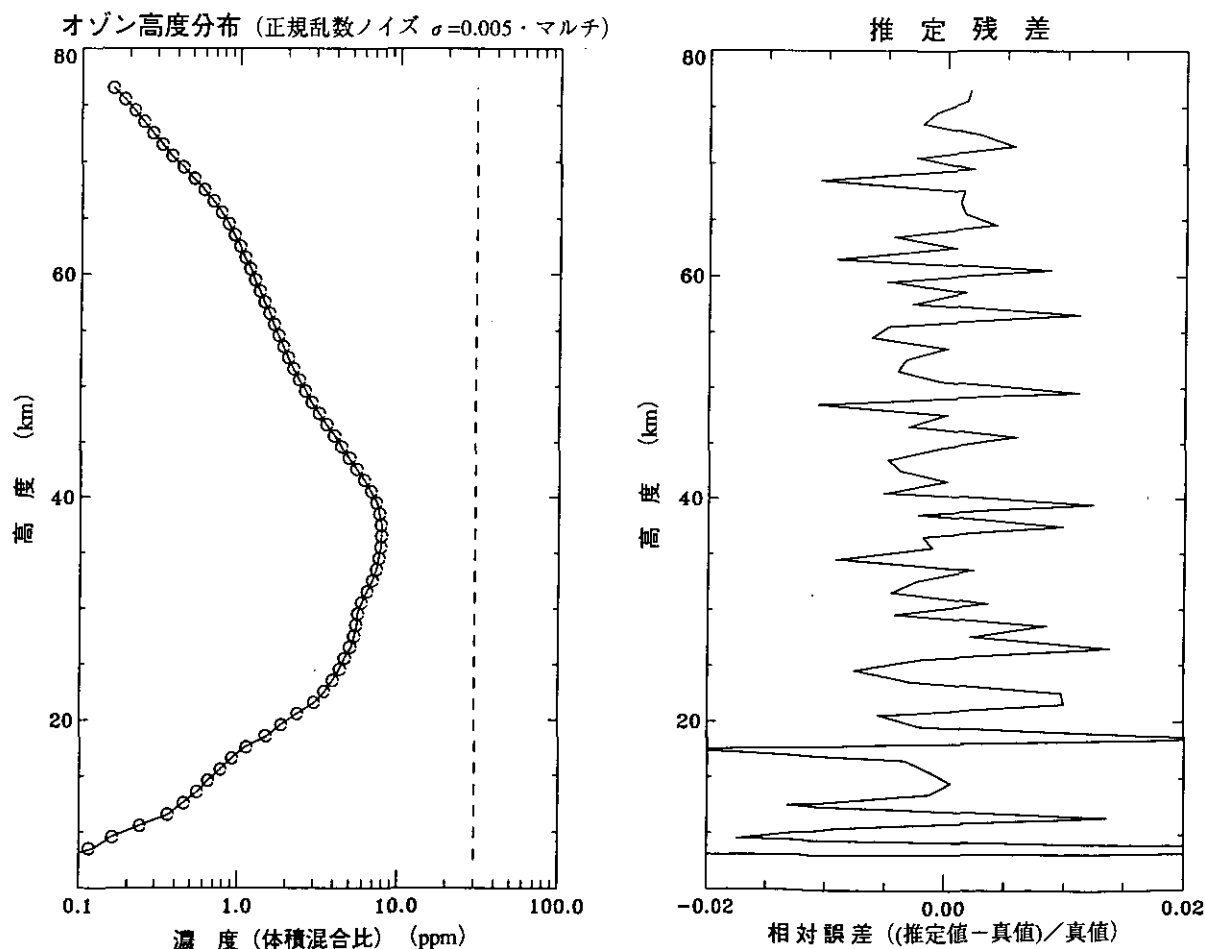


図5 赤外チャンネルにおけるオゾン推定結果の例  
 光学的厚さとして標準偏差0.005の大きさの正規乱数ノイズを与えた場合。左図：破線=推定前初期分布、  
 実線=推定結果、○=真値、右図：推定相対残差。

子間クロストークの見積もり誤りが推定結果に及ぼす影響についての検討を行った。打ち上げ前の装置の特性試験によってクロストークの値は正確に把握できるため、クロストーク値の大きな変動あるいは見積もり誤りがなければ、実際上誤差因子とはならないことが確認された。

さらに、統計学的に誤差の伝搬式を導出し、非線形最小二乗推定における44素子データの荷重の調整方法の検討を行った。

ILASでは観測視野が高度方向に幅を有する（接線高度層において約2 kmの幅に相当する）が、視野内を複数光路に分割してその平均信号から観測値を合成し、温度と圧力の推定における誤差評価を行った。その結果、視野内を少なくとも3本の光路に分割して加重平均により推定を行えば正しい推定値が得られることが分かった。なお、可視チャンネルでは、非線形最小二乗推定を行う際に、赤外チャンネルとは異なり、放射伝達方程式より原理的に簡単な形の微分式が得られないため、数式微分ではなく数値微分の方法（圧力と温度の値を微量だけ変えて透過率の残差平方和の変化量を計算し、微分値を求める方法）を採用する。

また、可視チャンネルからエアロゾルを推定するための、観測データにおけるベースライン（酸素分子による吸収とエアロゾルおよび空気分子による散乱の影響とを分離するための線）の推定方法についての検討を行い、使用するべきスペクトル範囲と、ベースラインとして当てはめる推定式を確定した。

## (2) ILAS 性能評価試験

ILASは70～80年代の、主に米国の大気センサーの経験を反映して、データ解析において大気吸収の個々の吸収線の厳密計算（Line-by-Line計算）を用いることを前提に概念検討研究がなされ、搭載機器の開発が行われた。Line-by-Line計算を行うと大気の透過率は、温度・気圧・微量成分濃度をパラメータとする非線形関数となり、観測データ列と理論計算結果を一致させる手続きを行うことで、微量成分濃度が決定できる。しかし、そのためには、実際の装置の「装置関数」をプログラムとして高精度に表現できることが前提となる。ここで「装置関数」は、現実の光源輝度と大気吸収で決まる分光輝度入力（の時系列）に対して、出力する信号を定義するものである。本研究は、そのため分光器の波長方向の感受特性の高精度決定、クロストークなど検出素子の特性決定、時間軸

に対する衛星全体を含む観測システム、検出器、信号処理、地上へのデータ伝送系のそれぞれにおける特性解析を対象とし、必要な仕様の決定、ガスセル実験の実施、関連するプログラム開発などを含む。

ガスセル実験は実際の搭載機器に対し、室内で良く制御された既知の気体吸収スペクトルを与えた時、理論値と測定値が十分な精度で一致するような、静的な装置関数を決定することを目的としている。観測対象となる気体（ $O_3$ 、 $CH_4$ 、 $N_2O$ 、 $CFC-11$ 、 $CFC-12$ ）等を光学干渉の少ない長さ1 mのセルに、ガス分圧・全圧・温度の十分な制御下で導入し、ガスセル中の気体吸収の与える信号を測定する。このとき、同時に光源、中間光路、ILAS機器を取り巻く雰囲気気体の温度の測定を行うとともに、極低湿度（露点温度 $<-20^{\circ}C$ ）に保つ。同時にフーリエ干渉分光器を光路長の等しい点に設置し、比較対照用の信号を取得する。

この実験では、高純度気体オゾンの生成を必要とするため、He冷凍機を用いて90Kでオゾンを分留し、真空チャンバーに導入するシステムを、新たに開発した。ILASの測定波長域において独立なスペクトルパターンを与えるような、光学的性質の良く知られた吸収構造を持つ気体を試験用気体として用いることは、このような実験では有効である。このため、高濃度の $CFC-11$ のほか、 $SO_2$ 、 $HCFC-21$ 他の気体に関するデータの取得も行った。

ILASの衛星搭載用モデルを用いて、1994年夏までに取得した約1,000個のスペクトルデータの解析と、装置関数の最適化を行った。図6に、 $CH_4$ の吸収を測定した場合の測定信号と、暫定的に決定した装置関数による計算結果の比較を示す。吸収バンドの与える特徴は、両者で良く一致しているが、吸収の両裾で誤差の符号が異なっている。検討の結果、例えば約 $20cm^{-1}$ の半値全巾に対して $0.1cm^{-1}$ 程度のわずかな中心波長ずれ（あるいは、2 cm程度の検出器位置ずれ）などが、このような誤差を生じることが明らかになっているが、他の要素を含めてさらに詳細な検討が必要である。

本研究では、アルゴリズム研究に先だってスペクトルの大量計算が必要となるため、ILASデータ処理プログラムに使われる多くのモジュールが先行開発され、これらは実用のデータ処理プログラムにも導入された。例えば、高速のLine-by-Line Voigt線形計算ルーチンの最適化・チューニング手法、スペクトルフィッティングに用いるMarquardt法のコード、気温と大気密度に対しての2



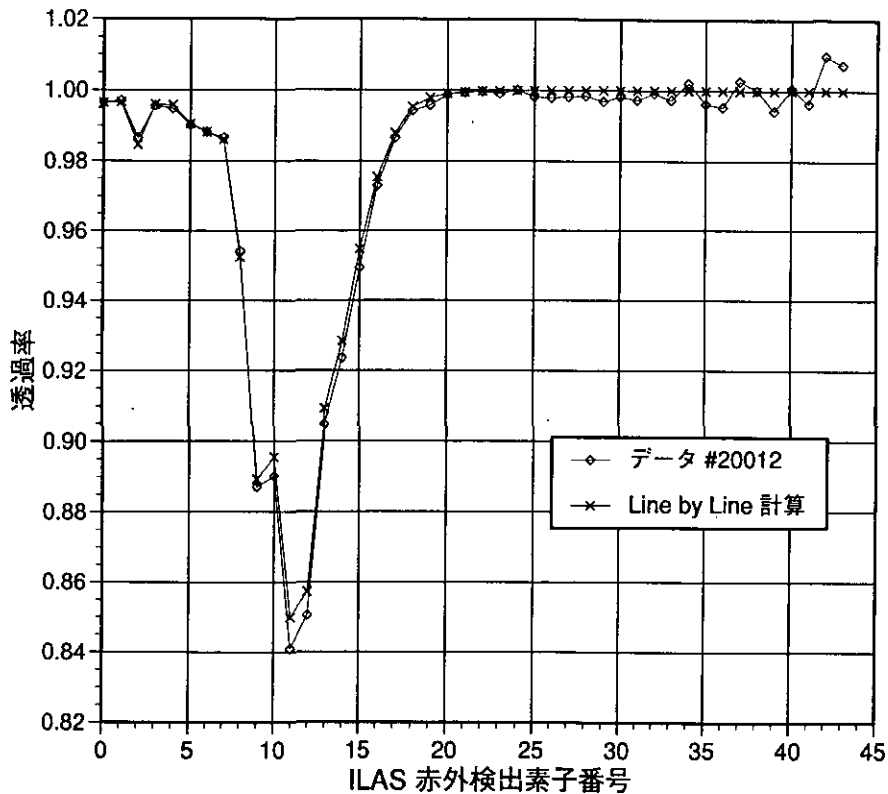


図6 Line by Line (LBL) 計算と実験結果 (データ #20012) の比較  
 メタン分圧10.001Torr, 全圧20.05Torr. LBL 計算での透過率は、光源モデルと吸収スペクトルから計算される輝度を「装置関数」でコンボリューションして得た計算上の信号を、ガスが無い場合の信号で規格化して得た。

次元B-spline補間によるクロスセクション計算コード等が、実用プログラムに取り込まれている。

### (3) RIS を利用する計測技術の開発

#### 1) RIS の光学的特性の評価

RISは3枚の鏡を直角に貼り合わせた構造を持つが、高速で進行する衛星からの反射光のビームパターンを最適化するために、3枚の鏡の内一枚に曲面を用いている。RISの反射特性の評価は、干渉計と呼ばれる装置を用いて、平面波のレーザー光を入射したときの反射波と基準の平面波との干渉縞を観測することによって、反射波面を測定する。RISが用いられる衛星軌道上では無重力状態であるので、無重力状態のRISの反射特性を測定する必要があるが、地上での測定では重力によるゆがみが避けられない。

小さな口径のリフレクターの場合、リフレクターを上に向けた場合と下に向けた場合の干渉縞を測定して、それらを平均することによって無重力状態の反射波面を推定することができる。しかし、RISの場合は口径が約

50cmあるため、このような方法は困難である。そこで、RISを光軸のまわりに回転できるように水平に設置し、6つの回転方向で干渉縞を測定した。測定には24インチ(61cm)の干渉計を用いた。測定された6つの干渉縞から、鏡面の形状に依存する成分(リフレクターの回転とともに回転する)と、ゆがみの成分(回転しない)を分離し、無重力状態のRISの反射波面とゆがみの効果を求めた。この結果、RISの反射波面が設計値とよく一致することが確認された。

#### 2) 分光観測用レーザー送受信システムの開発

分光観測システムの鍵となるのは、狭帯域(単一縦モード)で、かつ、すばやく発振線を切り替えられる炭酸ガスレーザーである。ここでは、時間ゲートゲインセル法という新しい方法を開発し、単一縦モード動作と急速な発振線の切り替えを両立させた。この炭酸ガスレーザー2台を光源とするレーザー送受信システムを設計製作した。システムは光源の他、検出システム、追尾システムとのインターフェイスのための光学系、検出システム、

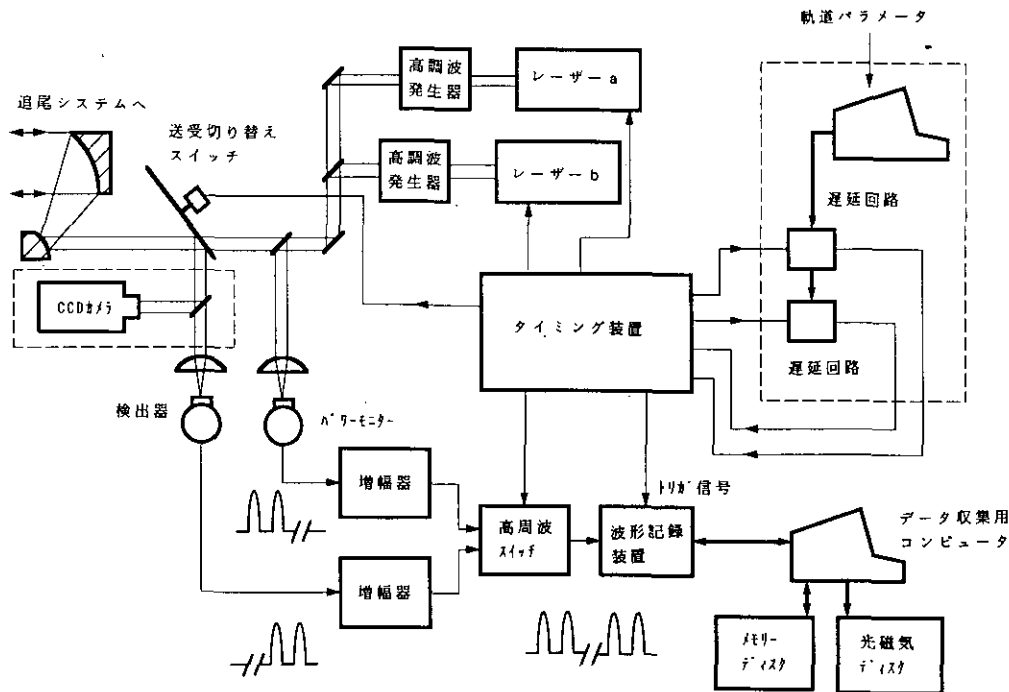


図7 RIS分光観測用レーザー送受信システムブロック図

データ収集システムから構成される。システムのブロック図を図7に示す。

観測では、信号用、参照用の2台のレーザーから送信されるパルスの波形と、それぞれの受信信号波形の合計4つの波形を記録する。レーザーの繰り返しは50Hzと高速であるため、メモリー長の長いディジタルを2台切り替えて、レーザーの1ショットごとに4つの波形を記録している。検出器には、基本波(10 $\mu$ m帯)ではHgCdTe、第二高調波(5 $\mu$ m帯)、第三高調波(3 $\mu$ m帯)ではInSbを用い、冷却した光学バンドパスフィルターを用いることによって雑音を低減している。表1に、分光観測用レーザー送受信システムの主な諸元を示す。また、表2に測定対象分子と測定に用いる炭酸ガスレーザー発振線をまとめて示す。

### 3) データ処理アルゴリズムの評価

吸収スペクトルの形状から反転法を用いてオゾンなどの高度分布を求める手法、高度プロファイルを仮定して最小自乗法により気柱全量を求める手法、フロンのようにスペクトルが連続的である場合について多波長の差分吸収法によってカラム量を求める手法の3種類の手法を開発した。

表1 レーザー送受信システムの諸元

レーザーパルスエネルギー (mJ)	100 (10 $\mu$ m) 10 (5 $\mu$ m) 5 (3 $\mu$ m) 100 (532nm)
ビーム拡がり角 (mrad)	0.1 (3-10 $\mu$ m) 3 (532nm)
パルス繰り返し数 (Hz)	50 (10, 5, 3 $\mu$ m) 16.7(532nm)
受信望遠鏡口径 (m)	1.5
光学系の効率	0.01
検出器の検出能 D* (cmHz <sup>1/2</sup> /W)	7 $\times$ 10 <sup>10</sup> (10 $\mu$ m) 1 $\times$ 10 <sup>11</sup> (5 $\mu$ m) 6 $\times$ 10 <sup>10</sup> (3 $\mu$ m)
検出器面積 (cm <sup>2</sup> )	0.001
検出器量子効率	0.6
信号処理時定数 ( $\mu$ s)	1

表2 測定対象分子と炭酸ガスレーザー発振線

測定対象分子	レーザー発振線 Line	炭酸ガス同位体	波数 (cm <sup>-1</sup> )
O <sub>3</sub>	P(18)	636	1002.4778
	P(20)	636	1000.6473
CO <sub>2</sub>	P(26)	626	938.6883
	R(36)	636	938.7776
HNO <sub>3</sub>	P(8)	636	907.0528
	CFC-12	R(6)-	636
R(12)		636	923.11
CO	R(28)SH*	626	2166.96
	R(30)SH	626	2169.27
H <sub>2</sub> O	R(38)SH	626	2178.002
CH <sub>4</sub>	R(14)TH*	626	2915.79
	R(16)TH	626	2919.87
参照用	R(34)	636	937.5844
	R(8)SH	626	2140.925
	R(26)TH	626	2939.12

\*SH第2高調波, \*TH第3高調波

地上局のパラメータやRISの反射特性、光検出の雑音などを考慮した測定シミュレーションプログラムを作成し、シミュレーションデータにデータ処理アルゴリズムを適用することによって、測定および解析手法の評価を行った。オゾンおよびメタンの高度分布の測定、CFC-12、硝酸、二酸化炭素、N<sub>2</sub>O、COの気柱全量の測定について良好な結果を得た。

さらに、オゾンとCFC-12などを一度の観測で同時に測定する場合についても検討を行い、ひとつの分子を測定する場合と比べて測定感度が大きく低下することはないことが示された。

#### (4) ILAS・RIS衛星データ処理運用施設の開発

ILASおよびRISの衛星データ処理運用のため、「ILAS・RIS衛星データ処理運用施設」(ILAS & RIS Data Handling Facility: ILAS & RIS DHF)と名付けた施設を国立環境研究所内に整備しつつある。ILAS & RIS DHFは、計算機システム(Computer System)、ソフトウェアシステム(Software System)に加えて、計算機システムが設置される部屋、空調設備、高速デジタル専用回線設備、等の全体を指している。衛星観測プロジェクトとしては、施設のシステム全体の概念設計を平成2年度よ

り行ってきており、来年(平成7年)度に予定されている衛星打ち上げ前の完成を目指している。

#### 1) ソフトウェアシステム

これまでの概念設計の結果固まってきたソフトウェアの機能を、図8に示す。本年度は、この図に示す各機能ごとのソフトウェア運用試験を行うとともに、各機能間のインターフェース設計を行った。

#### 2) 計算機システム

本年(平成6年)度に、ILAS & RIS DHFの中心部分である計算機システムの導入が行われた。本年度8月に仕様書が官報公告され、10月に技術審査、開札が行われて内容が決定し、2月に導入された。概念設計の結果を、計算機システム導入のための仕様書に反映させ、上記のソフトウェアシステムすべての機能を実現できる計算機システムとした。以下、本計算機システムの特徴を、図9を参照しながら述べる。

大量のILAS衛星センサーデータ(1日分約850MB程度)から1日分約1MB程度のオゾン等の鉛直分布データへと、1日分のデータ処理を数時間内で、処理を終えられることが必要条件である。そのため、データ処理の

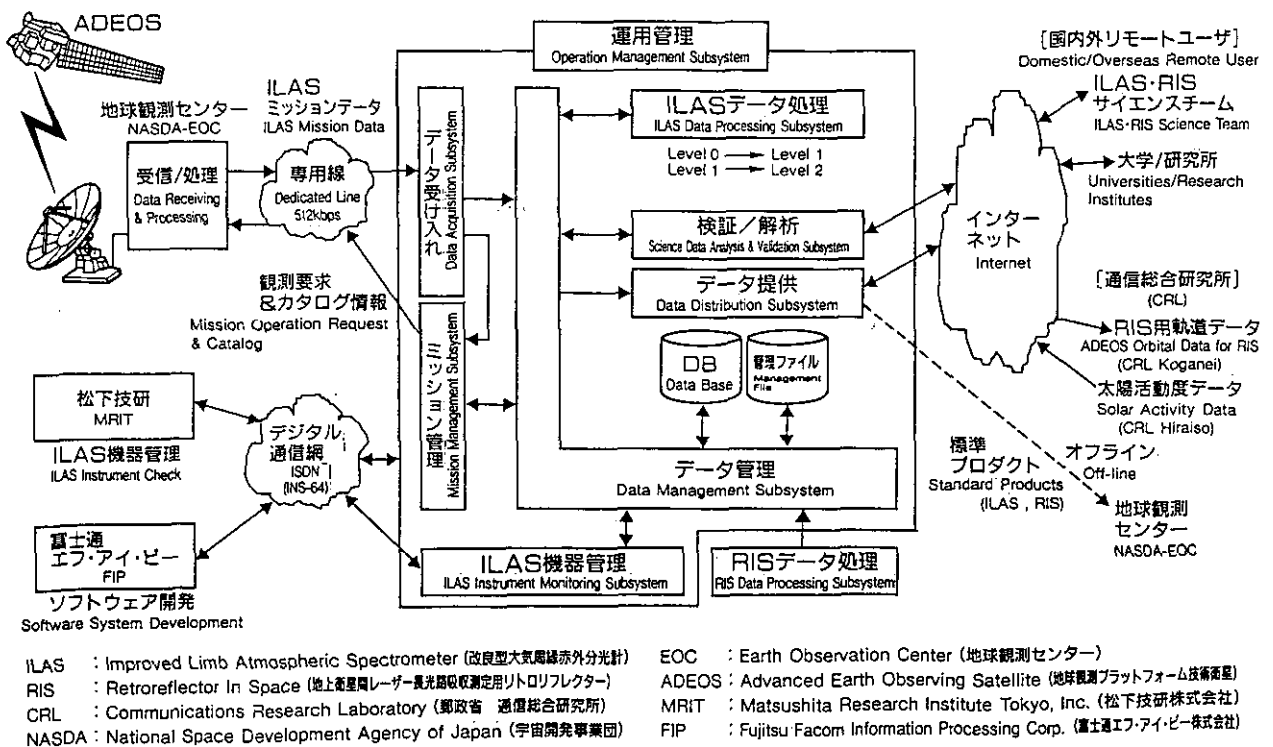


図8 ILAS & RIS DHF ソフトウェアシステムの機能

中心となる「分散処理装置」は、ワークステーション24個からなる並列計算機とし、24CPU並列計算機全体として、主記憶容量11GB、最大演算速度6.4GFlopsの性能を持たせた。なお、24CPUのうち、16CPUをデータ処理に、4CPUを処理アルゴリズム開発に、4CPUをデータサーバーに、割り当てる設計としているが、その時点での状況に応じて、割り当て方を変更できるという融通性がある。「デジタル・マス・ストレージ・システム」は、本システムで扱う元の衛星センサーデータ量が、予定されている3年間ミッション期間中全体で約1TB (= 1000GB = 1000,000MB) に達する事を踏まえ、1.4TBの

データを取めることができる能力を持たせた。

ILAS観測要求ファイル、ILASおよびRIS処理データカタログ等の宇宙開発事業団(NASDA)への送付、ILASセンサーデータ、RIS追尾用衛星軌道要素データ等のNASDAからの受け入れを、専用回線にて実行できる設計とした。また、「検証・解析用サーバー」等は、インターネット等の計算機ネットワークあるいは磁気テープ等の様々な入出力媒体送付を通して、国内外のILASおよびRISサイエンスチーム研究者等が使用できる設計となっている。

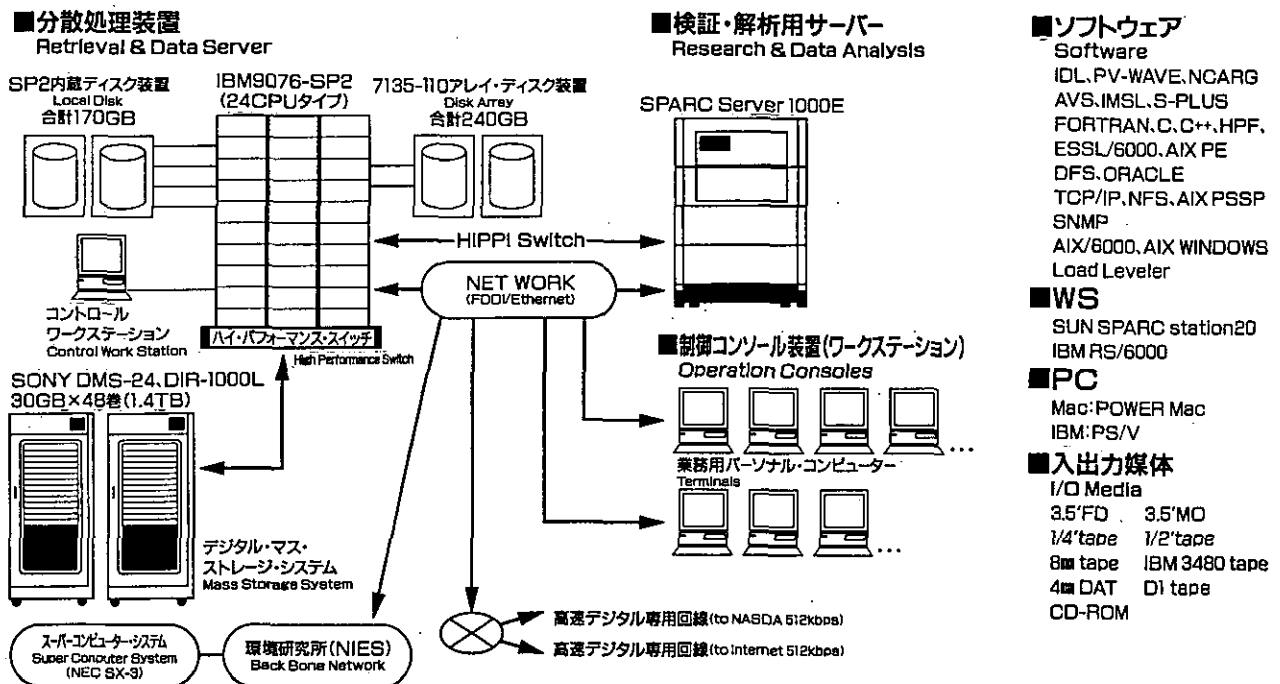


図9 ILAS & RIS DHF 計算機システムの構成

## 3.2 地球環境モニタリング

### 〔実施組織〕

地球環境研究グループ	
統括研究官	安野正之11
温暖化現象解明研究チーム	井上 元3, ④・野尻幸宏3, ⑤, ⑥, 7・竹中明夫11・ 向井人史3, 4・町田敏暢3, 4, 5,
オゾン層研究チーム	中根英昭①, 2, ⑨, 15
海洋研究チーム	原島 省6, ⑦・功刀正行7
森林現象・砂漠化研究チーム	宮崎忠国8
衛星観測研究チーム	笹野泰弘⑮・鈴木 睦15・横田達也15
地域環境研究グループ	
海域保全研究チーム	小幡邦男7・中村泰男7
有害廃棄物対策研究チーム	植弘崇嗣6, 13
化学物質生態影響評価研究チーム	花里孝幸11
社会環境システム部	
資源管理研究室	乙間末廣⑧
情報解析研究室	安岡善文8・田村正行4・山形与志樹8
化学環境部	
部長	森田昌敏10, ⑫
計測技術研究室	横内陽子3
計測管理研究室	伊藤裕康14・吉永 淳10
動態化学研究室	柴田康行⑩, 12・堀口敏弘10, 12
主任研究官	河合崇欣⑭
大気圏環境部	
部長	鷺田伸明③
大気物理研究室	鵜野伊津志3・光本茂記4
大気反応研究室	福山 力3・酒巻史郎3
高層大気研究室	杉本伸夫1, 9, 15・松井一郎1, 9, 15・湊 淳15
大気動態研究室	内山政弘3, 4・遠嶋康徳3
生物圏環境部	
部長	岩熊敏夫⑪
上席研究官	古川昭雄11
環境植物研究室	清水英幸11
環境微生物研究室	渡邊 信11
生態機構研究室	高村典子11・多田 満11
地球環境研究センター	
主任研究官	中島興基⑬
研究管理官	藤沼康実②・原沢英夫8・神沢 博⑯
地球環境モニタリング検討会委員	54名
事業委託・業務請負組織, 機関	16団体

※人名の後の数値は表1中の事業番号を示し、○印は各事業の実施代表者を示す。

## 〔事業概要〕

1990年10月に発足した地球環境研究センター（以後、センター）では、事業の3本柱の一つとして、「地球環境研究の総合化」、「地球環境研究の支援」とともに、「地球環境モニタリング」を推進している。

### （1）地球環境モニタリング事業の位置づけと特徴

当センターが推進する地球環境モニタリング事業は、地球環境保全に関する関係閣僚会議で決定される「地球環境保全調査研究等総合推進計画」に基づき、環境庁企画調整局長の私的諮問機関である地球環境研究等企画委員会が策定した「地球環境モニタリング計画」を踏まえて推進するものである。

また、それらの事業は、地球環境研究や行政施策に必要な基礎的なデータを得ることを目的に、世界各機関と連携しつつ、地球的規模での精緻で体系的、かつ長期間にわたる地球環境モニタリング（地球環境変動因子や地球環境変動による影響などの継続的監視・観測）を推進している。

これらのモニタリング事業の特徴は、第一に、研究者の発意によるものであることから、当該分野の最新の知見を踏まえ、地球環境にかかわる事象を把握することができ、モニタリング対象・目的を明確化・先鋭化することができる。第二に、種々な観測用プラットフォームを利用して実施されており、対象とする分野が広範囲であり、地球環境の物理・化学的手法によるもののほかに、地球環境変動が生物・生態系、ならびに人類に及ぼす影響、あるいは生物・生態系などの動態調査などまで含むことができる。第三に、波照間・落石岬に所在する地球環境モニタリングステーションなどの独自の観測用プラットフォームを所有するとともに、民間船舶（ボランティア・シップ）の協力を得て事業を推進しているように、民間協力を得た観測用プラットフォームを利用して、事業を推進していることである。さらに、第四に、所内の数少ない人的資源を補うために、民間の技術支援団体に事業実務を委ねているように、民間協力の導入や地方公共団体などの協力・連携を積極的に導入していることである。その他、世界各国・関係国際機関と連携しつつ国際的なネットワークの一員としてモニタリングを推進し、ネットワーク自体の構築・強化への貢献を考慮に入れていることは言うまでもない。

### （2）地球環境モニタリング事業の体制

現在、当センターで推進している事業は、地球環境研究総合推進費などによる研究によって開発・確立した手法などに基づいて実施するもの、地球環境研究に不可欠な観測データを提供するもの、あるいは、国際的な取り組みのもとで観測に参画・支援するものなどがあるが、常に地球環境研究と相互補完する視点に立って、長期・継続的に推進している。

それらの事業は、①種々な事象についての個別の地球環境モニタリング（個別事業）、②衛星搭載観測機器のデータ処理運用システムの開発・運用（衛星観測プロジェクト関連）、③国際的なモニタリングネットワークへの参画・協力（国際協力・支援事業）の3つに大別される。

#### ①地球環境モニタリング（個別事業）

所内の研究者から提案されたモニタリングの企画案を所内の意見を踏まえて、センターが調整し、実行計画を作成している。

モニタリング事業は、その進捗状況によって、原則的に次の3段階に分かれる。

##### 1) フィージビリティスタディ (FS) ;

観測対象・手法・体制などの予備的な検討・調査  
(原則1年)

##### 2) 試験モニタリング; 観測手法・体制の確立

(原則3年)

##### 3) 長期モニタリング; 長期・継続的な監視・観測

(3年ごとに見直し)

図1に、モニタリング事業の実施体制を示す。各事業は、新規提案時、段階移行時、事業見直し時に「モニタリングに係る地球環境研究センター運営委員会」で審査され、その評価を踏まえて事業計画を策定し、国立環境研究所幹部会議に報告される。また、事業結果および事業計画は、環境庁の「地球環境研究等企画委員会地球環境モニタリング小委員会」に報告される。

なお、各モニタリング事業については、所外の当該分野の専門家・有識者から構成される「地球環境モニタリング検討会」によって、事業の展開方針、事業実務; および観測データの検証などについて指導・助言を得ている。

本事業で得られた観測データは、広く一般に提供するために、速やかに公表することとしており、検証が済んだデータから順次、年次報告書「Monitoring Report on

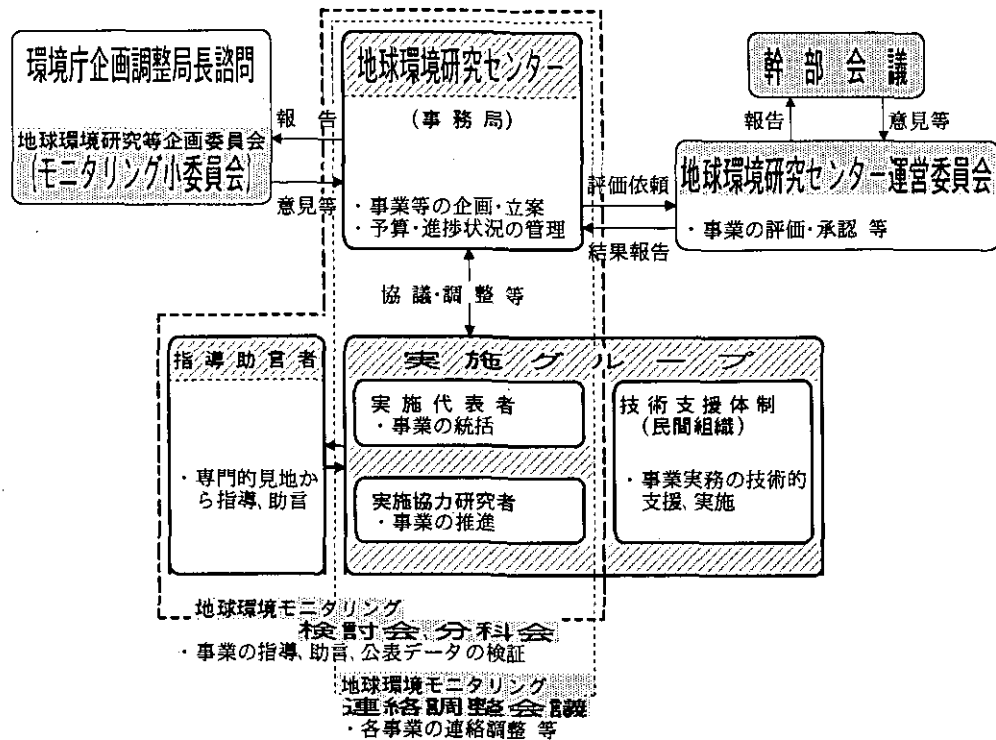


図1 地球環境モニタリング事業の実施体制

Global Environment」, CD-ROMなどの記録媒体で公表している。

②衛星観測プロジェクト関連

1996年に打ち上げが予定されている地球観測プラットフォーム技術衛星 (ADEOS) に搭載される改良型大気周縁赤外分光計 (ILAS) と地上-衛星間レーザー長光路吸収用レトロリフレクター (RIS) にかかわる科学技術面での支援, 観測データ処理運用のための地上システムの開発とその運用を担当するため, 1991年から地球環境研究グループ, 大気圏環境部, および当センターが中心となって, 衛星観測プロジェクトを推進している。

現在は, ADEOSに加えて, 1999年に打ち上げが計画されている ADEOS-II に, 改良型大気周縁赤外分光計 II 型 (ILAS-II) の搭載が決定し, 開発に着手している。

なお, 本プロジェクトの詳細については, 前節「3.1 衛星観測プロジェクト」を参照されたい。

③国際協力・支援事業

世界各国・関係国際機関と連携しつつ国際的なネットワークの一員としてモニタリングを推進すべきことは言うまでもないが, ネットワーク自体の構築・強化への貢献も我が国の責務であり, 当センターも必要に応じて精度管理, データ検証, 国内またはアジア太平洋地域関係機関への窓口業務などの支援事業を行うこととしてい

る。

現在, UNEP (国連環境計画) がWHO (世界保健機関) の協力の下で推進している GEMS/Water (地球環境監視システム/陸水監視プロジェクト) にかかわる支援事業を実施している。

(3) 地球環境モニタリング事業実務の実施

各モニタリング事業の実務は, 提案者である所内の研究者 (実施代表者) を中核として, 観測実務を協力・分担する所内の研究者 (実施協力研究者), 専門的見地から指導・助言をする所外の有識者 (指導助言者), ならびに事業実務を担当・補佐する民間組織 (技術支援団体) からなる事業実施グループが実施している。なお, 当センターの研究管理官 (観測担当) ・観測第一係が事務局として, 事業実施グループ・研究支援団体などと緊密な連携を取り合いながら事業の管理運営に当たっている。

図2に, モニタリング事業の実施運営体制の例として, 地上モニタリングにおける業務実施運営体制を示す。

なお, 現在推進しているモニタリング事業が長期にわたり継続するためには, 実施主体を所外に漸次拡張することとともに, 事業実務を実質的に担当/支援する民間技術支援団体を早急に育成・整備する必要がある。

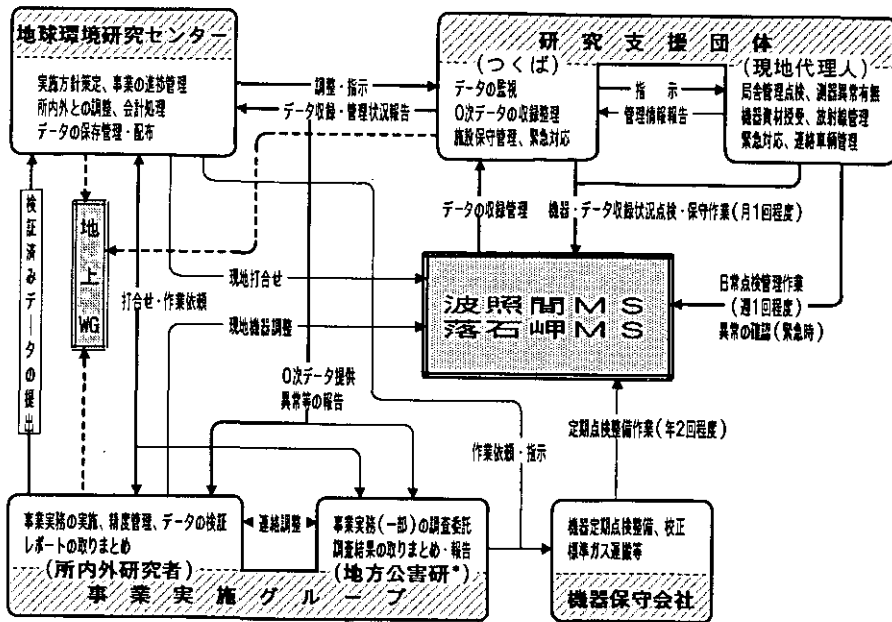


図2 地上モニタリングステーションの事業実務の流れ

〔実施概要〕

1994年度事業経過および1995年度事業計画について、1995年3月に環境庁の地球環境研究等企画委員会モニタリング小委員会に報告した。

1994年度に実施した地球環境モニタリング事業の一覧と図化した概要を、それぞれ表1、図3に示す。

以下に、個別事業と国際協力・支援事業について、分野別にその概要を記す。

(1) 地球環境モニタリング (個別事業)

1994年度には、1994年12月から1995年3月にかけて「モニタリングに係る地球環境研究センター運営委員会」を数回開催し、そこでの評価結果を踏まえて、1995年度実施事業を決定した。

その結果、「⑤定期船舶を利用した南北太平洋上大気モニタリング」が1995年度より長期モニタリングに移行する。なお、1994年度のFS「⑨ミリ波分光器による成層圏オゾン層モニタリング」、「⑩International Mussel Watch (二枚貝を指標生物とした海洋汚染の国際的モニタリング)」、「⑪温帯湖沼とその集水域における生態系モニタリング」の3課題であったが、このうち「⑨ミリ波分光器による成層圏オゾン層モニタリング」が、1995年度より試験モニタリングに移行することになった。「⑩

International Mussel Watch」と「⑪温帯湖沼とその集水域における生態系モニタリング」は、それぞれ、その観測対象などを再吟味して、再度、FSとして次年度も継続して予備的に検討することになった。

1994年度の長期モニタリングおよび試験モニタリングの概要を以下に示す。

＜成層圏オゾン層に係るモニタリング＞

①オゾンレーザーレーダーによる成層圏オゾン層モニタリング (長期モニタリング)

成層圏にかかわる事業は、最もデータ蓄積が進んでいる事業であり、センターが発足以前の1988年から、オゾンレーザーレーダーを用いて成層圏オゾンを観測しており、成層圏オゾンの国際観測網であるNDSC (成層圏変動探査ネットワーク) に加盟し、国際的連携の下で観測を推進しており、東アジア地域における数少ない観測点として、国際的責務を果たしている。

1994年度には前年度に引き続き、つくば上空の成層圏オゾンの垂直分布を観測し、観測日数は56日間に達した。また、稼働7年を経過し、機器の老朽化が著しく、観測に支障が生じ、本年度より年次計画でレーザー光源を更新することになった。

また、1991年12月から1992年11月までの観測データを



表1 地球環境研究センターが推進する平成6年度地球環境モニタリング事業等一覧

種別等	事業名等	事業概要	開始年月
長期モニタリング	1. オゾンレーザーレーダーによる成層圏オゾン層モニタリング	オゾンレーザーレーダーにより高度15~45kmに位置する成層圏オゾンの鉛直分布を観測する	1988.9~
試験モニタリング	2. 有害紫外線モニタリング	オゾン層破壊に伴う大都市地域での有害紫外線の増大を監視するため、東京霞ヶ関でブリューワ型分光光度計とUV-B計で観測する	1993.11~
	3. 地上ステーションモニタリング ・地球環境モニタリングステーション-波照間 ・地球環境モニタリングステーション-落石岬	地上観測施設により温室効果ガスのベースライン濃度を全自動無人観測する ・沖縄県八重山諸島波照間島に設置；太平洋気団の観測 ・北海道根室市落石岬に設置；シベリア気団・太平洋気団の観測	1992.5~竣工 1994.6~竣工
	4. シベリア上空における温室効果ガスに係る航空機モニタリング	ロシア連邦の観測用航空機を共同運航して、夏期にシベリア上空の温室効果ガスの空間分布・フラックスを集中観測する	1992~1994 (3年間)
	5. 定期船舶を利用した南北太平洋上大気モニタリング	日~豪間の定期船舶(日本郵船)を利用して、太平洋上大気の温室効果ガスの南北両半球の濃度分布を3°の間隔で定期的に自動採取し、測定する	1992.3~
	6. 定期船舶を利用した北太平洋域大気-海洋間ガス交換収支モニタリング	日~加間の定期船舶(ノルウェー船籍)を利用して、北太平洋域での大気-海洋間の温室効果ガス等の交換収支を定期的に自動観測する	1995.3~
	7. 定期船舶を利用した東アジア海域海洋汚染モニタリング	定期船舶を利用して、人為影響が顕著な大陸棚海域の海洋環境因子の広域分布を定期的に自動観測する ・神戸~釜山(大阪国際フェリー) <sup>1)</sup> 、 ・大阪~那覇・別府(関西汽船) <sup>2)</sup>	1)1991.6~ 1993.2 2)1994.1~
	8. リモートセンシングによるアジア地域の植生分布モニタリング	NOAA/AVHRR画像データを集成し、東南アジア地域全体の解像度1kmの雲なし画像を合成し、それらの画像をもとに植生指数分布図を作成する	1993~
	9. ミリ波分光器による成層圏オゾン層モニタリング	1995年に所内研究本館(Ⅲ)に設置予定のミリ波分光器による45km以上の高高度に分布するオゾンの鉛直分布の観測体制を検討する	—
フィージビリティスタディ	10. International Mussel Watch 11. 温帯湖沼とその集水域における生態系モニタリング	二枚貝を指標生物とした沿岸域の海洋汚染監視計画において、アジア太平洋地域での中核となることを目的として、その可能性を検討する 中禅寺湖をケーススタディとして、地球温暖化の温帯湖沼の集水域生態系への影響を観測する手法と体制を検討する	— —
その他	GEMS/Water 支援事業 12. リファレンスラボラトリー 13. ナショナルセンター 14. 摩周湖ベースラインモニタリング	GEMS/Water における東アジア・太平洋域の中核として事業を支援する ・各測定点における精度管理のため、評価用標準試料を作成し、配布する ・国内の河川トレンドステーションの測定データを取りまとめ、管理する ・陸水環境のベースラインステーションとして摩周湖で水質を観測する	1993~ 1994~ 1994~
—	15. 衛星観測プロジェクト関連	「ADEOS」に搭載されるセンサー(ILAS・RIS)により得られるデータを処理・収録・解析する	1991~

「Monitoring Report on Global Environment -1994-」に取りまとめ、公表した。

なお、1994年度にはFSとして検討してきた「ミリ波分光器による成層圏オゾン層モニタリング」が次年度より、試験モニタリングに移行することにより、成層圏オゾン層を2方式で観測できることになり、この組み合わせにより、高度15~45kmの低中高度成層圏オゾン層はオゾンレーザーレーダー、45km以上の高高度成層圏オゾン層はミリ波分光器で観測することが可能になり、観

測できる高度がほぼ成層圏全域に広がり、かつ、天候の影響も受けにくい観測体制が構築できる。

②有害紫外線モニタリング(試験モニタリング)

成層圏オゾンの減少により、その人体への影響が危惧されている有害紫外線量を、人間活動の活発な都市域(東京・霞ヶ関の第5合同庁舎屋上)においてブリューワ型分光器等によりB領域の紫外線(UV-B)の波長別強度を試験観測している。

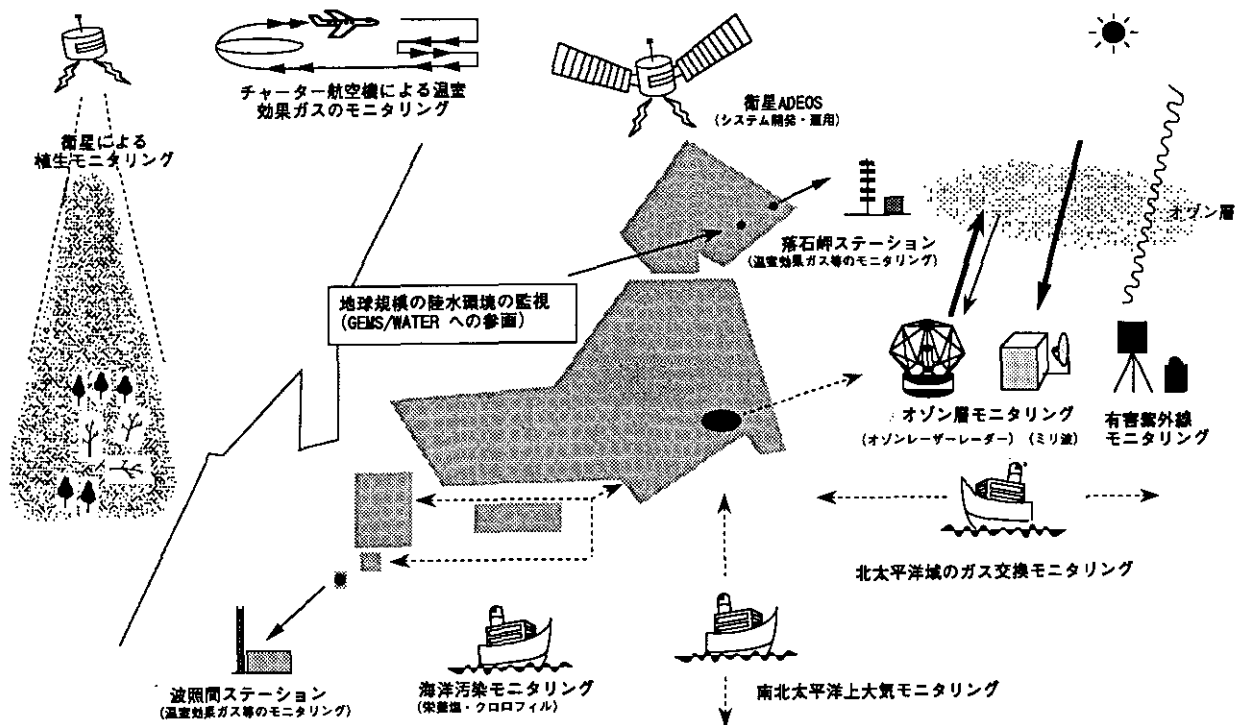


図3 地球環境モニタリングの概要

<対流圏の温室効果ガスに係るモニタリング>

③地上ステーションモニタリング (試験モニタリング)

対流圏にかかわる事業は、ベースラインレベル濃度の温室効果ガスの観測を主目的としており、ハワイ・マウナロアに所在するNOAAの観測ステーションに対比すべく、1992年に、我が国の最南端の有人島である沖縄県八重山諸島波照間島に太平洋気団に由来する温室効果ガスの観測ステーション(地球環境モニタリングステーション-波照間)を建設し、現在試験モニタリングを経て、長期・継続的な観測に向けて、観測機器・データ収録システムなどを再構築した。

さらに、我が国の北東端に位置する北海道根室半島落石岬にシベリア気団・太平洋気団に由来する温室効果ガスの観測ステーション(地球環境モニタリングステーション-落石岬)が1993年度末に竣工し、1994年6月には現地で開催式典を挙行し、測定機器を設置し、観測システムの整備に着手した。

なお、両ステーションでは、観測システムの全自動・無人運転を目指して、参画している研究者自らが創意工夫して取り組むとともに、ステーションが所在する地方公共団体の環境部局の研究機関(波照間:沖縄県衛生環境研究所, 落石岬:北海道環境科学研究センター), な

らびに、地元の地方公共団体(波照間:竹富町, 落石岬:根室市)や住民諸氏の協力を得て事業を推進している。

現在両ステーションともに、BAPMoN(大気バックグラウンド汚染観測網)の温室効果ガスの国際観測網に加盟すべく、観測データの傾向・特性の検討、観測の基準となる標準ガスの作成・供給体制の整備、ならびに、観測データの検証・ハーモナイゼーション方法の開発を進めている。

波照間ステーションでは、現在二酸化炭素、メタンの温室効果ガスのほか、採気する気団の起源を推定するための指標因子として、オゾン、粒子状物質、ラドン、気象因子などを観測している。落石岬ステーションでは、波照間ステーションとほぼ同様な項目を観測しているが、ステーションが集落や漁港などの温室効果ガスの人為発生源の比較的近隣に位置するために、硫黄酸化物・窒素酸化物も指標因子として加えている。両ステーションで得られた観測データと機器などの運転監視情報は、一般電話回線を経由して、つくば(国環研)で遠隔監視・収集できる。

なお、1994年の八重山諸島は、大型台風の当たり年であり、波照間ステーションにも最大風速70m/sを超す歴史に残る大型台風が続けて3つ来襲し、観測塔や気象測

器・大気採取管などが大きな被害を受けた。

④シベリア上空における温室効果ガスに係る航空機モニタリング（試験モニタリング）

温室効果ガスの全球的挙動において、海洋とともに陸域のアマゾン川流域やシベリアの凍土・森林地域における湿地や森林の役割についての見積もりが十分とはいえない。特に、地球温暖化によるシベリア凍土地域の氷融によるメタンの放出の見積もりの重要性が問われている。

本事業は、地球環境研究総合推進費による研究課題「シベリア凍土地帯における温室効果のフィードバックの評価に関する研究」との連携の下で、1992年度から3ヶ年計画で実施され、ロシア共和国中央大気観測所（CAO）の協力を得て、中型航空機を用いて大気を採取・分析している。

本計画の最終年次である1994年度には、前年度に引き続き、航空機を用いてシベリア各地で温室効果ガスなどの水平分布及び高度分布を観測するとともに、3年間で得られた観測データの解析を進めた。

⑤定期船舶を利用した南北太平洋上大気モニタリング（試験モニタリング、1995年度より長期へ移行予定）

⑥定期船舶を利用した北太平洋域大気海洋間ガス交換収支モニタリング（試験モニタリング）

温室効果ガスの全球的挙動において、海域が大きな役割を担っているが、海域の継続的な観測は困難であり、現状では、観測船や繫留ブイを用いた局所的・期間限定的な観測が行われているにすぎない。そのために、当センターでは、定期的・継続的に特定の海域で温室効果ガスなどの挙動を観測するために、海運会社の協力を得て、定期航路を航行する民間船舶（ボランティア・シップ）を利用したモニタリングを現在2航路で推進している。

その一つは、日本～オーストラリア東海岸間を航行するコンテナ運搬船（白馬丸：日本郵船株、年間8往復）に、大気の自動採取装置を設置し、太平洋上の温室効果ガス（二酸化炭素・メタン・亜酸化窒素）を緯度で約3度間隔で採取分析し、南北両半球の温室効果ガス濃度の空間分布、季節変動、経年変動を観測している。

1994年度には、前年度に引き続き、8航海で試験観測を行い、西太平洋域の温室効果ガス濃度の緯度・季節による変動が確認されるとともに、観測手法なども確立され、次年度から長期モニタリングに移行する予定である。

他は、生物生産が大きく、二酸化炭素の発生源/吸収源として重要な北部太平洋域での大気-海洋間の二酸化

炭素交換収支を観測するために、日本～カナダ西海岸間を航行する木材運搬船（スカグラン号；ノルウェー船籍、年間8～9往復）に、カナダ海洋研究所の協力を得て、コンテナ実験室・海水自動採取分析装置類を設置し、大気と海水中の二酸化炭素濃度・海水の水質を自動観測するとともに、大気を採取分析するものである。

1994年度には船舶に観測機器などを設置・調整し、次年度からの試験観測に備えた。

<海洋汚染に係るモニタリング>

⑦定期船舶を利用した東アジア海域海洋汚染モニタリング（試験モニタリング）

前述した船舶を利用した温室効果ガスモニタリングと同様に、定期航路を航行する民間船舶を利用した海洋の水質モニタリングである。

人間活動の増大による地球規模の物質循環の攪乱を把握するため、影響が顕在化しやすい縁辺海域（沿岸域～大陸棚海域）の海洋汚染をクロロフィルなどを指標に観測している。当初は、神戸～韓国釜山間を航行するフェリーで観測していたが、航路の廃止に伴い、1994年度より、大阪～沖縄間、および、大阪～別府間を航行するフェリー（関西汽船株）に海水自動計測装置と自動採水装置を設置して、我が国沿海の水質を高頻度に試験観測している。

なお、1991年6月から1993年2月までの観測データを「Monitoring Report on Global Environment -1994-」として、観測データ及び画像ファイルをCD-ROM（「Collected Data of High Temporal-Spatial Resolution Marine Biogeochemical Monitoring by Japan-Korea Ferry」）として公表した。

<植生分布に係るモニタリング>

⑧リモートセンシングによるアジア地域の植生指数分布モニタリング（試験モニタリング）

インドおよびインドシナ半島全域を含む東南アジア地域の植生および土地利用状況の変化を把握するため、衛星観測データ（NOAA/AVHRRデータ）を用いて当該地域の広域モザイク画像と1kmメッシュの植生指数分布図を作成している。本年度には、1986、87、94年次（各々前年12月～当該年3月）のデータを処理し、植生指数画像を得た。

(2) 国際協力・支援事業

GEMS/Water 支援事業

⑫リファレンスラボラトリー (参照研究室)

⑬ナショナルセンター

⑭摩周湖ベースラインモニタリング

UNEPでは、WHOと協力して、1977年からGEMS(地球環境監視システム)の下に、陸水の汚染などの監視情報を収集・統合化するプロジェクト(GEMS/Water)を開始した。

現在、本プロジェクトは第2期目に入り、当センターは、1993年度より、分析精度管理のための標準試料作成及び内外関係機関への配布などを行う「リファレンスラ

ボラトリー(参照研究室)」事業を担当し、1994年度には、水分析精度管理用標準試料、および河川底質標準試料を作成した。

また、1994年度より、我が国の地方公共団体などの河川・湖沼での観測点(19地点)における観測データの取りまとめ、およびGEMS本部との連絡・調整を行う「ナショナルセンター」業務を担当している。同時に、当研究所が十数年来、水質を継続的に観測してきた北海道摩周湖を汚染源の直接的な影響の少ない陸水のベースライン観測点として位置づけ、北見工業大学の協力を得て、長期観測を開始し、それらの観測地点の水質データを取りまとめ、GEMS本部へ報告した。

平成6年度編集委員会

委員長	松本幸雄
委員長代理	大政謙次
委員	栗原崇
〃	正木郎
〃	原田茂
〃	笹野泰弘
〃	米元純三
〃	田村正行
〃	柴田康行
〃	鈴木明
〃	鷗野伊津志
〃	服部浩之
〃	神沢博
事務局	環境情報センター

国立環境研究所地球環境研究年報  
平成6年度

平成7年8月31日

編集 国立環境研究所 編集委員会  
発行 環境庁 国立環境研究所  
〒305 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  
住所 つくば市天久保2-11-20

本年報は再生紙を使用しております。