

国立環境研究所特別研究報告

Report of Special Research from the National Institute for Environmental Studies, Japan

SR - 96 - 2011

地球温暖化研究プログラム (終了報告)

Priority Program on Climate Change

平成 18 ~ 22 年度

FY2006 ~ 2010

NIES



独立行政法人 国立環境研究所

NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

<http://www.nies.go.jp/>

地球温暖化研究プログラム (終了報告)

Priority Program on Climate Change

平成 18 ～ 22 年度

FY2006 ～ 2010

重点研究プログラム「地球温暖化研究プログラム」(終了報告)
(期間 平成 18 ～ 22 年度)

プログラム代表者：笹野泰弘

執 筆 者：笹野泰弘、向井人史、横田達也、江守正多、
甲斐沼美紀子、野沢 徹、名取俊樹、山形与志樹、
山野博哉、肱岡靖明、増井利彦、内田昌男、
編 者：笹野泰弘

序

本報告書は、国立環境研究所の第2期（平成18年度～22年度）中期計画において、重点研究プログラムとして実施してきた「地球温暖化研究プログラム」の成果を取りまとめたものです。本プログラムは、第3期中期計画（平成23年度～27年度）においても、プログラムを構成するプロジェクトの発展的な組み替えを行い継続して進めておりますが、今後の研究推進に反映させるための貴重なご意見を各方面よりいただくことを期待し、これまでの5年間の主な成果をとりまとめて公表するものです。

「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」は2007年秋に第4次評価報告書を公表し、その中で「気候システムの温暖化には疑う余地はない。このことは、大気や海洋の世界平均温度の上昇や雪氷の広範囲にわたる融解、世界平均海面水位の上昇が観測されていることから今や明白である。」、また「20世紀半ば以降に観測された世界平均気温の上昇のほとんどは、人為起源の温室効果ガスの増加によってもたらされた可能性がかなり高い。」と述べています。こうした背景のもとに、世界が脱温暖化社会、低炭素社会の構築に向けて大きく動き出そうとしています。2008年には、1997年に採択された京都議定書に基づく各国の温室効果ガスの削減にかかる約束期間（2008年～2012年）が始まりました。また、2009年には当時の鳩山首相は、国連気候変動首脳会議の場で「すべての主要国の参加による意欲的な目標の合意」を前提としながらも、日本は「2020年までに、1990年比で25%の温室効果ガス排出削減を約束する」と表明しました。

京都議定書における各国の削減目標の設定に関しては、必ずしも科学的な知見が十分に反映されたものとは言えない面がありました。しかしながら、将来の気候政策の立案の基礎として、以下に述べるように、科学研究の果たすべき役割には非常に大きいものがあります。

化石燃料の消費によって排出される人為起源の二酸化炭素のうち、何割が陸域生態系あるいは海洋に吸収され、何割が大気中に残り二酸化炭素濃度の年々の増大をもたらすのか。陸域生態系や海洋による吸収量の年々変動は何によってもたらされるのか、地理的な違いは何によるのか、さらに温暖化が進行すると予測される将来において、これらの吸収源は現在と同様の吸収量を維持するのか。将来において許容し得る二酸化炭素濃度レベルを設定するためにも、観測的手法に基づいて地球上の炭素循環プロセスを明らかにし、炭素循環モデルの高度化を図ることが非常に重要です。

また、大気中の二酸化炭素をはじめとする温室効果ガス濃度の上昇は、気候（地域分布）にどのような変化をもたらし、それが自然環境や人間活動（食料生産、水資源、自然災害などの社会経済環境）にいかなる影響を与えるのか。そのときのリスクの大きさはどう評価され、その推定の不確実性はいかなるものなのか。さらに、将来の低炭素社会の構築に向けて、具体的にどのような社会を目指し、どのような段階を踏んで進めていくことが必要とされるのか。また、世界の国々との協調の中で、どのような仕組みを作れば、最も効果的かつ衡平な取り組みにつなげることができるのだろうか。こうした問題ひとつひとつを丁寧に解明し、プロセスを理解し、将来を予測することや、将来の社会のあり方を描きそれに至る道筋を示すことなど、さらに研究を深めるべき課題として非常に重要な意味を持ち続けています。

2011年3月11日、東北地方を襲った東北大震災と東京電力福島第一原子力発電所の事故は誠に痛ましいものでありました。当該地域の復旧・復興が当面の最重要課題ですが、それに加えて、今後のエネルギー政策の見直しを軸に、各種のリスクに対する考え方・捉え方を共有し、望まし

い社会や街づくりのあり方など、国民と行政、そして研究者との真摯なコミュニケーションに基づき、科学的かつ中長期的展望に立った低炭素社会・持続可能社会に向けた発展の青写真を描いていくことがますます重要になっています。また、研究機関にとっては、世界の中の日本、アジアの中の日本の立場を踏まえ、国際的な視点で研究を進めることが不可欠です。

平成23年3月に終了した第2期の地球温暖化研究プログラムは、4つの中核研究プロジェクト、延べ9つの関連研究プロジェクト、ならびに地球環境研究センターが実施するモニタリング事業等のうち地球温暖化に関する事業から構成されていました。そのうち、本報告書ではプログラムの概要の紹介とともに、4つの中核研究プロジェクトの研究成果を中心に記載しています。

ご一読頂き、今後の国立環境研究所における地球温暖化研究のあり方に関して、忌憚のないご意見、ご指導を賜りますよう宜しくお願い申し上げます。

平成23年12月

独立行政法人 国立環境研究所
理事長 大垣 眞一郎

目 次

I. 地球温暖化研究プログラムの概要	
1. プログラム全体の目的、目標、構成等	1
2. 中核研究プロジェクトの概要	2
3. 関連研究プロジェクトの概要	5
4. 重点研究プログラムにおけるその他の活動の概要	9
II. 中核研究プロジェクト1：温室効果ガスの長期的濃度変動メカニズムとその地域特性の解明	10
1. 研究の目的と経緯	10
2. プロジェクトとしてのプラットフォーム	10
2.1 大気観測	10
2.2 海洋観測	10
2.3 陸域の観測	11
3. 研究の成果	11
3.1 広域大気観測	11
3.1.1 グローバルな二酸化炭素、メタン観測	11
3.1.2 地域的濃度分布	13
3.1.3 鉛直分布	13
3.1.4 時系列変化に見られるアジアからの影響	15
3.2 海洋、陸域フラックス観測	16
3.2.1 海洋CO ₂ フラックス観測	16
3.2.2 海洋の炭素循環観測	17
3.2.3 海洋生産と大気中酸素濃度変動	18
3.2.4 陸域フラックスの観測	18
3.2.5 チベット高原の炭素収支	19
3.2.6 フラックスの新たな観測方法	20
3.2.7 土壌呼吸量の温暖化影響	20
3.3 物質輸送、物質循環モデルによる検証	21
3.3.1 二酸化炭素	21
3.3.2 一酸化炭素	22
3.3.3 対流圏オゾン	22
4. まとめ	23
III. 中核研究プロジェクト2：衛星利用による二酸化炭素等の観測と全球炭素収支分布の推定	24
1. 研究の目的と経緯	24
2. 研究の成果	25
2.1 衛星観測データの処理アルゴリズム開発・改良研究	25
2.1.1 温室効果ガスカラム量導出アルゴリズムの開発	25
2.1.2 GOSAT 実観測データへの運用とアルゴリズム改良	26
2.2 地上観測・航空機等観測実験による温室効果ガス導出手法の実証的研究	27

2.2.1	衛星センサの地上試験モデルを用いた高所観測実験によるカラム量の導出精度確認	27
2.2.2	地上設置高分解能フーリエ変換分光器による二酸化炭素カラム平均濃度の 推定検討と衛星データの検証	30
2.3	全球炭素収支推定モデルの開発・利用研究	32
2.3.1	GOSAT データの利用による炭素収支推定の不確実性の低減	32
3.	まとめ	33
IV.	中核研究プロジェクト 3: 気候・影響・土地利用モデルの統合による地球温暖化リスクの評価	36
1.	研究の目的と経緯	36
2.	研究の成果	36
2.1	気候モデル研究	36
2.1.1	気候モデルの改良ならびに次世代モデルの実験の実施	36
2.1.2	予測の不確実性を考慮した確率的気候変化シナリオの開発	37
2.1.3	極端現象の発生メカニズムおよび土地利用変化・灌漑が気候に与える影響の解析	38
2.1.4	気候シナリオと社会経済シナリオを結び付ける手法の検討	38
2.2	影響・適応モデル研究	39
2.2.1	極端現象変化及び気候モデル不確実性を考慮した水資源・健康・農業の影響評価	39
2.2.2	気候・影響モデル結合とその予備作業としての影響評価モデル改良・検証	41
2.2.3	専門家・メディア関係者の意見交換会の実施	41
2.3	陸域生態・土地利用モデル研究	42
2.3.1	陸域生態系モデルに関する成果	42
2.3.2	土地利用モデルに関する成果	44
2.3.3	陸域統合モデルに関する検討	44
V.	中核研究プロジェクト 4: 脱温暖化社会の実現に向けたビジョンの構築と対策の統合評価	46
1.	研究の目的と経緯	46
2.	研究の成果	46
2.1	脱温暖化（低炭素社会）ビジョン・シナリオ作成研究	46
2.1.1	2050年70%削減は可能	46
2.1.2	低炭素社会に向けた12の方策	47
2.1.3	バックキャストモデルによる道筋の検討	47
2.1.4	アジア低炭素社会シナリオの開発	49
2.2	気候変動に関する国際政策分析	49
2.2.1	将来枠組みに関する多様な提案のレビューと分析	49
2.2.2	アジア太平洋地域の国際枠組みに関するダイアログ	49
2.2.3	次期国際枠組みの提案に関するディスカッションペーパーの作成	51
2.2.4	次期枠組みに関する国際交渉における主要国の国内意思決定に関する分析	51
2.2.5	気候変動に関する国際交渉における支援	52
2.3	気候変動政策の定量的分析	52
2.3.1	世界を対象とした技術選択モデルの開発とそれを用いた分析	53
2.3.2	世界を対象とした経済モデルによる試算	53
2.3.3	日本を対象とした技術選択モデル	53

2.3.4 日本を対象とした応用一般均衡モデルによる温暖化政策の経済影響の評価	54
2.3.5 アジア主要国を対象としたモデルによる分析	55
2.3.6 温暖化影響も含めた将来シナリオの検討	56
3. まとめと今後の課題	56

[資料]

I 研究の組織と研究課題の構成	59
1 研究の組織	59
2 研究課題と担当者	63
II 研究成果発表一覧	67
1 誌上発表	67
(1) 中核研究プロジェクト1	67
(2) 中核研究プロジェクト2	76
(3) 中核研究プロジェクト3	79
(4) 中核研究プロジェクト4	84
(5) 関連研究プロジェクト	91
2 書籍	97

I. 地球温暖化研究プログラムの概要

1. プログラム全体の目的、目標、構成等

温室効果ガスによる地球温暖化の進行とそれに伴う気候変化は、その予測される影響の大きさや深刻さからみて、人類の生存基盤に関わる最も重要な環境問題の一つであり、持続可能な社会の構築のためにはその防止及び影響緩和に向けた取組が必要不可欠である。その一環として、平成17年2月に京都議定書が発効したことにより、「京都議定書目標達成計画」(平成17年4月閣議決定、平成20年3月全体改定)の確実な実施による排出削減約束の達成が我が国の当面の重要課題となった。しかし、それに留まらず、京都議定書の第1約束期間以降の国際枠組みの構築、さらには将来の社会経済システムを温室効果ガスの排出の少ないものへと変革することを目指して、50年～100年後の中長期までを見据えた温暖化対策の検討を進め、脱温暖化社会(低炭素社会)の実現に向けた道筋を明らかにしていく必要がある。

このため本プログラムでは、温暖化とその影響に関するメカニズムの理解に基づいた、将来に起こり得る温暖化影響の予測のもとに、長期的な気候安定化目標及びそれに向けた世界及び日本の脱温暖化社会(低炭素社会)のあるべき姿を見通し、費用対効果、社会的受容性を踏まえ、その実現に至る道筋を明らかにすることを全体目標とした。また、以下のサブ目標を置いた。

サブ目標1 温室効果ガス濃度予測の高度化や排出インベントリの検証のため、温室効果ガスのグローバルな長期的濃度変動のメカニズムや地域別収支、温暖化影響を解明する

サブ目標2 衛星観測により二酸化炭素及びメタンのカラム濃度のグローバルな時間・空間変動を把握し、二酸化炭素の収支変動を高精度で推定することにより、温室効果ガス削減戦略に貢献する

サブ目標3 極端現象を含む将来気候変化とその自然生態系・人間社会への影響を高精度で予測できる気候モデル・陸域炭素モデル・影響モデルの開発と統合利用を行い、多様な排出シナリオ下での全球を対象とした温暖化リスクを評価する

サブ目標4 脱温暖化社会の実現に至る道筋を明らかにするために、ビジョン・シナリオ作成、国際政策分析、対策の定量的評価の連携による温暖化対策

を統合的に評価する

サブ目標5 IPCC等への参画を通じて国際貢献を図るとともに、アジア太平洋の発展途上国における人材育成と対策強化を支援するため、プログラムで開発した観測・評価手法等のノウハウを提供する。

本プログラムは、第1期(平成13年度～17年度)に実施された「地球温暖化の影響評価と対策効果プロジェクト」における研究成果と研究資産を引き継ぎ、さらにこれを発展させるべく、炭素循環にかかる観測的研究、気候モデルによる気候変化と影響評価、中長期的な温暖化対策の統合評価のそれぞれの研究を強くリンクさせることを意図している。

本プログラムは、研究部分として4つの中核研究プロジェクト、延べ9つの関連研究プロジェクト、さらにその他の活動として、地球環境研究センターが知的研究基盤の整備事業の一環として行う地球温暖化関連のモニタリング、データベース、研究の総合化・支援に係る事業が、本プログラムを構成する。

<中核研究プロジェクト>

- (1) 温室効果ガスの長期的濃度変動メカニズムとその地域特性の解明
- (2) 衛星利用による二酸化炭素等の観測と全球炭素収支分布の推定
- (3) 気候・影響・土地利用モデルの統合による地球温暖化リスクの評価
- (4) 脱温暖化社会の実現に向けたビジョンの構築と対策の統合評価

<関連研究プロジェクト>

- (1) 過去の気候変化シグナルの検出とその要因推定
- (2) 高山植生による温暖化影響検出のモニタリングに関する研究
- (3) 京都議定書吸収源としての森林機能評価に関する研究
- (4) 太平洋小島嶼国に対する温暖化の影響評価
- (5) 温暖化に対するサンゴ礁の変化の検出とモニタリング

- (6) 温暖化の危険な水準と安定化経路の解明
- (7) 温暖化政策を評価するための経済モデルの開発
- (8) アジア太平洋地域における戦略的データベースを用いた応用シナリオ開発
- (9) 日本における土壌炭素蓄積機構の定量的解明と温暖化影響の実験的評価

＜地球環境研究センター事業におけるその他の活動＞

- (1) 地球温暖化に係る地球環境モニタリング
 - 大気・海洋モニタリング
 - 陸域モニタリング
- (2) 地球温暖化に係る地球環境データベースの整備
- (3) GOSAT データ定常処理運用システム開発・運用
- (4) 地球温暖化に係る地球環境研究の総合化・支援
 - グローバルカーボンプロジェクト事業支援
 - 地球温暖化観測連携拠点事業支援
 - 温室効果ガスインベントリ策定事業支援

本プログラムの実施に当っては、地球環境研究センターの4研究室が4つの中核研究プロジェクトの実施主体として中心的な役割を担う。これに、地球環境研究センター及び関係ユニットの研究者がプロジェクトメンバーとして参画している。また、関連研究プロジェクトについては、地球環境研究センターの研究者、関係ユニットの研究者が課題を担当している。地球温暖化に関わる地球環境研究センター事業は3つの推進室を中心に、関係ユニットからの兼務研究者の協力を得て実施している。いずれの研究プロジェクト・事業においても、NIES フェロー、ポスドクフェロー、アシスタントフェローの寄与は大きい。また、高度技能専門員、アシスタントスタッフなどの支援を得ている。

本プログラムでは、二酸化炭素等の温室効果ガスや関連気体等の空間分布とその時間変動の観測とデータ解析に関する研究、人工衛星を利用した温室効果ガスの測定データ処理解析手法の開発、二酸化炭素濃度分布等の観測データと大気輸送モデルに基づく二酸化炭素収支の解析手法に関する研究を行った。また、気候・影響・陸域生態・土地利用モデルの統合によるシミュレーションモデルの開発及び将来の気候変化予測と影響評価に関する研究、将来の脱温暖化社会の構築に係るビジョン・シナリオ研究、気候変動に関する国際政策分析、気候変動対

策に関する研究等を行った。

観測・解析を中心とする研究においては、地上ステーション、民間船舶、民間航空機、人工衛星などを活用した観測研究により温室効果ガスの動態把握を進め、また大気輸送モデルと組み合わせることで発生源、発生量の推定などを行った。特に、21年1月に成功裏に打ち上げられた温室効果ガス観測技術衛星 GOSAT（通称：いぶき）については、国環研の担当となっているデータの hochuuri、高次プロダクトの検証、データの定常処理・配布などを順調に進めてきた。

温暖化リスク評価・温暖化対策評価に関する研究においては、IPCC の第5次評価報告書作成に向けてのモデルの改良を進めた他、IPCC の新シナリオの一つ（RCP6W）の作成を担当し、同時に、RCP6W について土地利用変化の空間分布シナリオを開発した。また、政府の温暖化対策中期目標の策定に向けての将来ビジョン・シナリオに関し、「2050年までに70%の排出削減が可能であること」、またそれを実現するための「12の方策」を提示した。

本報告では、まず本章において地球温暖化研究プログラムを構成する「中核研究プロジェクト」、「関連研究プロジェクト」、「その他の活動」について概要を紹介する。次章以降で、本プログラムのコアである4つの中核研究プロジェクトのそれぞれについて、研究の目的と経緯を述べ、平成18年度から22年度の間の研究の成果を取りまとめる。また、[資料]編に、研究の組織、研究課題と担当者、研究成果発表一覧を示す。

2. 中核研究プロジェクトの概要

(1) 中核研究プロジェクト1（温室効果ガスの長期的濃度変動メカニズムとその地域特性の解明）

アジア-太平洋域での広域大気観測による温室効果ガスの収支や地域的特性に関する研究を行い、その収支や地域特性を明らかにすると同時に、アジア太平洋領域での、海洋、陸域フラックスの地域変動を解析し、そのトレンドを求める。これらのデータを用いてモデル解析を行う。この結果、以下の主な成果を得た。

大気二酸化炭素のアジア太平洋地域の高度分布を含めた季節変化やトレンドなど地域特性を把握できた。二酸化炭素の長期的収支解析から、海洋と陸域の吸収量の分別比率が1:0.4程度であり、そのトレンドをみると、

近年の陸域や海洋の吸収量が二酸化炭素濃度上昇に対応し増加している効果が示唆された。発生源では中国などの人為発生源の倍増が、アジア太平洋地域の二酸化炭素の濃度分布を変化させてきていることが判明した。同時に、代替フロン類等（例えば HFC23、HCFC22）も波照間の観測から、中国に世界規模での大きな発生源があることが推定できた。メタンは近年に増加が認められたが、詳しい解析の結果、何らかの発生源の増加が伴っていることが示唆された。

海洋や陸上の二酸化炭素吸収量の変動が太平洋やアジア地域で調査され、その変動が解析された。北太平洋で吸収量は増加していることが推定できたが、地域的に西側と東側では吸収トレンドに差があることがわかり、海洋の地球科学的な変化がゆっくり進行していることが示唆された。陸域の吸収量は短期的には、湿潤なアジアでは太陽の有効放射量に対応し変動することがわかった。温度上昇に対して、土壌呼吸などの増加がどの程度起こるかを実験的に研究した結果、短期的にはこれまでのモデルが推定する以上の応答が日本の森林土壌ではあることがわかった。長期的には、土壌毎の炭素プールの差により場所ごとに応答が異なることがわかった。

本プロジェクトで高頻度に観測している大気二酸化炭素の変動を説明できるような、大気輸送・拡散にかかる新しい結合モデルを開発した。本モデルを酸素濃度データなどに応用し、観測の解釈の整合性を確認した。この手法をインバージョンモデルにも適用し、波照間などの高頻度観測データを使うことにより、排出量推定精度の改善が図れることを示した。海洋の二酸化炭素フラックスなどの観測データを4次元同化した結果をインバージョンモデルに適用することで、グローバルなフラックスの評価精度が向上した。

(2) 中核研究プロジェクト2（衛星利用による二酸化炭素等の観測と全球炭素収支分布の推定）

温室効果ガス観測技術衛星（GOSAT）プロジェクトは、環境省・国立環境研究所（NIES）・宇宙航空研究開発機構（JAXA）の三者共同プロジェクトである。京都議定書の第一約束期間（2008年～2012年）に、衛星で太陽光の地表面反射光を分光測定してSN比300以上を達成し（JAXA目標）、二酸化炭素とメタンのカラム濃度を雲・エアロゾルのない条件下で二酸化炭素については相対誤差1%、メタンについては相対誤差2%の精度で観測し、

これら全球の観測結果と地上での直接観測データを用いることにより、インバースモデル解析に基づく全球の炭素収支分布の算出誤差を地上データのみを用いた場合と比較して半減すること（NIES目標）を目標としていた。

本中核研究プロジェクトにおいては、衛星打ち上げ前に二酸化炭素・メタンのカラム量を高精度で導出するためのデータ処理手法を開発し、その実証実験を実施した。衛星打ち上げ後は、実際の観測データに適用した定常処理によって作成されたプロダクトの検証を行い、有効性と問題点を確認した。さらに、衛星データと地上観測データとを併用して炭素収支の全球分布を求めるための準備を、第2期中期計画期間中に完了することを目標とした。これらの研究の成果として、以下の成果を得た。

短波長赤外波長域での測定に関して、巻雲やエアロゾルの存在する様々な大気条件下での衛星取得データに対応するデータ処理手法を開発し、衛星打ち上げ前に、定常処理で使用するアルゴリズムを完成させるとともに、データプロダクトの誤差評価手法を確立した。短波長赤外波長域での測定に関して、データ処理手法の妥当性を確認し、取得データのデータ質の評価・検証を行うため、類似センサを用いた高所観測実験を2006年11月～12月に筑波山において実施し、データ解析を行った。この種の実験は、世界で唯一、当プロジェクトでのみ実施された。実験データの解析を通して、データ処理手法の妥当性・改良点などを確認し、データ処理手法の検証及びデータプロダクトの検証手段の検討と準備を進めた。

2009年1月に衛星が成功裏に打ち上げられた後の約2年間のGOSATの実観測データのうち、雲がないと判断された事例を解析した結果、二酸化炭素カラム量が北半球高緯度で特に明瞭な季節変化を示すことや、メタンカラム量が1年を通じて北半球で南半球よりも高濃度を示すなど、従来の知見に矛盾しない結果を得た。研究期間中に開発されたアルゴリズムを改良し、より精度の高い巻雲の検知、および酸素の吸収帯を利用した実効的な光路長補正が取り入れられることにより、当初のアルゴリズムで見られていた極端な濃度バイアスが概ね解消された。

地上及び航空機観測により取得された検証データを用いて、GOSAT TANSO FTS SWIR（短波長赤外波長域）の標準プロダクトである二酸化炭素とメタンのカラム平均濃度 XCO_2 と XCH_4 の検証を行った。GOSATのカラム量およびカラム平均濃度は検証データに比べて低めで

あり、XCO₂の場合は2～3%程度低いことが明らかとなった。また、GOSATのデータのばらつきは、検証データのばらつきに比べて大きい。帯状平均されたGOSATのXCO₂とXCH₄の緯度分布は、検証データに対して負のバイアスを持っているものの、概ね一致することが明らかとなった。つくばにおいて衛星との同期観測キャンペーンを実施し、巻雲やエアロゾルによって生じるGOSATの温室効果ガス濃度データのバイアスの原因が、実観測データより明らかになりつつある。

GOSATの観測データと地上観測データとを用いて炭素収支の全球分布を求めるためのモデルの整備を進めた。観測された大気中二酸化炭素の季節変動サイクルにフォワードモデルによる計算値がうまく適合するように、生態系データベースを一部整備し直し、生態系モデルパラメータの最適化を行った。これにより、炭素収支の地域間の差や地域レベルでの季節変動がモデルにより再現されるようになった。

大気輸送フォワード計算手法を改良して時間・空間分解能を精密化するとともに、GOSATデータを利用した場合に炭素収支推定誤差が地域別に低減する割合をシミュレーション計算により解析した。また、全球の炭素収支分布を推定するインバースモデル解析手法のシステム化を行った。大気輸送フォワードモデルとして、質量フラックス形式の線型モデル(NIES08)を開発した。このモデルでは、全球の温室効果ガス分布に地域フラックスの寄与を重ねて正確にシミュレートすることができるようになった。インバース解析により、全球64分割で月別の炭素収支を推定できるようにシステムを改良した。GOSAT観測から得られる二酸化炭素・メタンのカラム量全球データを用いた地表面炭素フラックスの評価の実施に向け、必要とされる地表面フラックス先験情報の整備を行った。

開発したインバース解析手法を用いて、これまで整備を進めてきた地表面収支先験データを使用し、GOSATの二酸化炭素濃度観測データと地上測定値の予測データを用いて、平成21年について全球64の各領域における二酸化炭素収支の暫定値を求めた。GOSATによる観測データを加えることにより、南米やアフリカ等の地上測定点の乏しい地域における収支量の不確実性が、地上測定値のみで推定した場合に比べ最大で3割程度(暫定結果)低減することが判明した。

(3) 中核研究プロジェクト3(気候・影響・土地利用モデルの統合による地球温暖化リスクの評価)

効果的な温暖化対策を策定するためには、近未来および長期の将来に亘って人間社会および自然生態系が被る温暖化のリスクを高い信頼性で評価することが必要である。そこで、本プロジェクトは、近未来については、将来30年程度に生起すると予測される極端現象の頻度・強度の変化を含めた気候変化リスク・炭素循環変化リスクを詳細に評価し、適応策ならびに森林吸収源対策の検討や温暖化対策の動機付けに資することを目的とした。また、長期については、安定化シナリオを含む複数のシナリオに沿った将来100年程度もしくはより長期の気候変化リスク・炭素循環変化リスクを評価し、気候安定化目標ならびにその達成のための排出削減経路の検討に資することを目的とした。地球温暖化研究プログラムにおける位置付けとしては、炭素循環観測研究から得られる最新の知見を取り込みつつ、主として自然系の将来予測情報を対策評価研究に提供することを目指した。これらの目的を達成するため、本プロジェクトでは、極端現象の変化を含む将来の気候変化とその人間社会および自然生態系への影響を高い信頼性で予測できる気候モデル、影響モデル、および陸域生態・土地利用モデルの開発と統合利用を行い、炭素循環変動に関する最新の研究知見も取り入れた上で、多様な排出シナリオ下での全球を対象とした温暖化リスクを、不確実性を含めて定量的に評価することとした。これらの研究により以下の成果を得た。

気候モデル研究、影響・適応モデル研究、陸域生態・土地利用モデル研究により、モデルの開発・改良を行うとともに、それを用いた将来予測およびその不確実性評価の研究を総合的に推進した。H19年度より、環境省地球環境研究総合推進費S-5課題が開始され、その4つのうち2つのテーマで本プロジェクトが中心になることで、国内の他機関を含むこの分野の研究コミュニティにおいて先導的な役割を果たした。

気候モデルに関する研究では、IPCC-AR5に向けた気候モデルの改良ならびに次世代モデル実験を行うとともに、短中期の自然変動の不確実性と長期のモデルの不確実性にそれぞれ注目して、不確実性評価研究を行った。また、極端現象等の気候変化メカニズムの研究を進めるとともに、気候シナリオと社会経済シナリオを結び付ける方法論の検討を行った。影響・適応モデル研究では、

水資源、農業、および健康の分野について、極端現象や不確実性を考慮した影響評価研究を行った。また、水文、農業などの影響モデルを統合し、気候モデルと結合する作業に取り組んだ。さらに、東京大学等と協力してメディア関係者との意見交換会を実施し、影響知見の社会への適切なコミュニケーションについて検討した。陸域生態・土地利用モデル研究では、陸域生態系モデルを改良し、不確実性を考慮した生態系影響評価を行うとともに、過去の炭素循環の推定と観測データによる検証を行った。また、土地利用変化モデルを開発するとともに、IPCC 新シナリオの一つである RCP 6W に対応した詳細な空間分布を持つ土地利用変化シナリオを開発した。

不確実性評価研究においては、主に気候モデル研究で開発した手法を用いて水循環影響評価に適用し、気候予測と影響評価にまたがる不確実性を評価した。IPCC 新シナリオの空間詳細化では、陸域生態・土地利用モデル研究において開発した人口、GDP シナリオを基に、気候モデル研究に適用する排出分布シナリオを作成した。また、本中核プロジェクト全体として、気候、水文、農業、陸域生態、土地利用のモデルの結合もしくは統合利用に取り組んだ。

(4) 中核研究プロジェクト4（脱温暖化社会の実現に向けたビジョンの構築と対策の統合評価）

本プロジェクトでは、地球温暖化の防止を目的として、空間的（日本・アジア・世界）、時間的（短期及び長期）、社会的（技術・経済・制度）側面から、中長期的な排出削減目標達成のための対策の同定とその実現可能性を評価するビジョン・シナリオの作成、国際交渉過程や国際制度に関する国際政策分析、および温暖化対策の費用・効果の定量的評価を行い、温暖化対策を統合的に評価した。本プロジェクトを通して、以下の成果を得た。

ビジョン・シナリオ作成、国際政策分析、対策の定量的評価を相互に連携して行うことにより、中長期の対策目標の設定、交渉枠組みの提案と対策の定量的評価を行った。2050年の我が国の低炭素社会のビジョン・シナリオを作成し、2050年までに大幅な温室効果ガスを削減するための方策について検討し、ロードマップを作成した。アジア主要国の研究機関と共同して本プロジェクトで構築した手法をアジアに適用することに着手し、アジア主要国および主要都市を対象とした低炭素社会シナリオを作成した。

国際枠組みを評価するための評価軸について整理を行い、この結果を踏まえて国際制度の諸提案を分析した。また、アジア太平洋地域の国際枠組みに関するダイアログを行い、次期枠組みについて議論し、各国が望ましいと考える国際制度の概要について、共通点や異なる点などを抽出した。交渉のフォーラムとしては、多様なフォーラムがあり得ても、最終的には気候変動枠組条約で統括されるべきだという意見にまとめられた。次期枠組みにおいては、途上国も応分の行動が求められることから、途上国にとって受け入れられる国際制度の検討が今後の課題として提示された。

温暖化対策の定量的な評価のための統合評価モデル AIM の改良を行った。政府の中期目標検討委員会において、技術積み上げモデルを使った各国の削減ポテンシャルと削減量に応じた国内対策メニューに関する分析や一般均衡モデルを用いた経済分析の結果を示し、2009年6月の総理による中期目標決定に際しての科学的根拠を提供した。2009年10月からは政府のタスクフォースにおいて2020年の日本の温室効果ガス排出量を1990年時点に比べて25%削減を実現する対策について分析した。2009年12月から環境省の地球温暖化対策に係る中長期ロードマップ検討会において、2010年4月からは中央環境審議会地球環境部会中長期ロードマップ小委員会において、AIM モデルを用いて2050年大幅削減を見据えた2020年中期目標の対策分析を進め、2010年12月に成果を発表した。低炭素社会に関する国際研究ネットワークへの参画、IPCC 第5次評価報告書に向けた新シナリオを提供する統合評価モデリングコンソーシアムに参加し、新シナリオに関する情報を提供した。

3. 関連研究プロジェクトの概要

(1) 過去の気候変化シグナルの検出とその要因推定

本プロジェクトでは、気候モデルによる20世紀気候再現実験の出力データを活用し、様々な気候学的な物理量に対して気候変化シグナルの検出とその要因推定を行うとともに、エアロゾルの取り扱いの違いに起因する不確実性についても調査した。また、さまざまな気候変化実験のデータ解析を通して、自然起源の気候変動要因に対する気候応答の不確実性に関する検討を加えた。この結果、以下の成果を得た。

さまざまな条件下での20世紀気候再現実験結果から、20世紀後半における熱帯夜の増加や冬日の減少は人間

活動に起因しており、温室効果ガスによる変化の一部をエアロゾルが相殺していること、20世紀後半の中国における地表日射量の減少は人為起源エアロゾルの増加に起因しており、その多くはエアロゾル直接効果によりもたらされていること、20世紀における北半球高緯度陸上の降水増加および低緯度陸上の降水減少は人間活動に起因しており、それぞれ温室効果ガスおよびエアロゾルの増加が主たる原因と考えられること、などを示した。また、大気中の水収支式に基づき、熱帯アフリカ地域での降水減少やユーラシア大陸北部での降水増加の物理的なメカニズムを解明した。これらの成果は、いずれも、近年の気候変化が人間活動に起因することを支持するものであり、温暖化対策の必要性を説く根拠の一つとなり得る。

炭素性エアロゾルの排出増加を考慮した場合と考慮しなかった場合の20世紀気候再現実験結果から、炭素性エアロゾルの増加を考慮した場合には、人為起源の温室効果ガスの増加による気温上昇と人為起源エアロゾルの増加による気温低下（の絶対値）が上方修正されることが分かった。この結果は、従来の気候モデル実験では考慮されてこなかったプロセスが、観測された気温上昇に対する各要因の寄与率推定に大きく影響する可能性を示唆しており、地球システム統合モデルによる研究の必要性を説く根拠となり得る。

さまざまな気候モデルによる数値実験結果を解析し、太陽変動や大規模火山噴火に対する気候応答について調べた結果、太陽変動に対する気候応答と温室効果ガスの増減に対する気候応答に差異が見られること、気候感度と噴火後の気温回復に要する時間に相関関係が見られること、気候モデルに含まれる物理過程の有無により、大規模噴火に対する気候応答に違いのあること、などが分かった。今後も解析を継続することにより、自然要因に特徴的な気候応答に関する知見を得ることができると期待される。

(2) 高山植生による温暖化影響検出のモニタリングに関する研究

本プロジェクトでは、我が国高山帯の地域の地域特性を考慮し、白山（石川県）、アポイ岳（北海道）、北岳（山梨県）に定点観測地を設定し、温暖化影響指標として選んだ高山植物の開花、越年性雪渓の越年規模の調査を行うとともに、既存の気象資料などから、過去の長期変化

を推定した。また、南アルプス南部などで、冬期の積雪深などの影響を強く受けているシカの食害調査やハイマツの年枝生長調査を行った。さらに、我が国の高山帯にかかわる既存の気象資料や生物季節資料などを収集・解析した

収集した既存の気象資料から、富士山頂での年平均気温は、100年当たり1.2℃の割合で上昇してきていることが判明した。我が国の中部以北（我が国の高山帯に相当）上空3000mでの年平均気温は、検討したほぼすべての地点で、富士山頂での長期傾向と極めて似た長期変化の傾向を示していた。定点観測地での観測や推定した温暖化影響指標から、高山植物の開花時期の早まり、越年性雪渓の越年規模の縮小傾向が認められた。積雪深や冬期気温の影響を強く受けるシカの個体数の増加や分布範囲の拡大により、近年、特に、南アルプスでは、高山帯に進出したシカによる高山植物の食害が大きな問題となってきた。そのほか、低地性植物の高地への侵入（白山 石川県）、高山草原群落の種組成の変化（アポイ岳 北海道）、無降雪期間の長期化（乗鞍岳 長野県）などの事例が報告・収集できた。

(3) 京都議定書吸収源としての森林機能評価に関する研究

本プロジェクトでは、京都議定書で認められた森林管理等の炭素吸収源活動に伴う吸収量評価モデルを開発した。テストサイトにおけるデータを用いて開発・検証されたモデルを用いて、最終的には国全体での吸収量の算定に利用可能とするための、地理情報データの整備とその精緻化も合わせて実施した。

この研究により、森林簿や蓄積表に代表される経験的な林業モデルと、生態学的な森林成長モデルを融合し、日本の各地域に合わせた森林の成長予測を行うモデルを開発した。このモデルと森林伐採モデルを組み合わせることで、2000年から2012年までの実質的な森林CO₂吸収量の推定を行った。これにより、今後は吸収量が減少していくことが予想された。

(4) 太平洋小島嶼国に対する温暖化の影響評価

本プロジェクトでは、環境変動に対する脆弱性が極めて高いと考えられる太平洋の島嶼国を対象として、リモートセンシングデータを活用した地形及び土地利用のマッピングとともに、全球規模で州島の形成維持に関わ

る要因の収集及び解析を行い、地形の形成維持プロセスを明らかにした。それに基づいて、現在及び将来の環境変動と経済システムの変化による応答を予測し、持続可能な維持のための方策を提案した。その結果、以下の成果を得た。

サンゴコアを採取し、解析を行って、過去からの降水量変動を復元し、現在は1000年前、2000年前と比較して降水量が減少している可能性を明らかにした。海面上昇の影響、砂生産変化の影響を考慮した地形変化モデルを構築した。地下水調査を行い、地下水の動態が潮汐変動の影響を大きく受けることを明らかにし、地下水流動モデルの開発を開始した。土地固有の知識や島嶼国の国民の居住に関する調査を行い、海岸環境の保全や人口移動による適応の可能性を検討した。環境変動に対する適応においては、グローバル（地球温暖化）な影響の低減、ローカル（人口増加）な影響の低減に加え、水タンクの設置など自然の状態では活用されていなかった資源の活用を行う、未利用資源の開拓が重要であると考えられた。

重点対象地域のツバルにおいては、要因において重要なものが、グローバルな要因である海面上昇と降水量変動、ローカルな要因である人口増加にともなう土地利用変化と汚染にあることが示された。適応策としては、元湿地帯を示したハザードマップによる都市計画の立案、海浜植生やサンゴ・有孔虫の保護区域の設定とともに、汚染の低減やサンゴ・有孔虫の増殖によって生態系を積極的に回復させて砂生産を増大させること、タロイモ畑における淡水保水力のある土壌を導入すること、環礁間や島外のネットワークを促進する運輸手段の増強を行うことなどが考えられた。

(5) 温暖化に対するサンゴ礁の変化の検出とモニタリング

近年、サンゴ礁では、共生している藻類が放出される白化現象が多数観察され、地球規模でサンゴ礁が衰退していることが報告されており、温暖化とともに、ローカルなストレスとの複合が原因として考えられている。本プロジェクトでは、白化現象を起こす地理的要因を明らかにするため、現地観測データや航空機、衛星センサー等リモートセンシングデータを用いた、サンゴ礁の変化の監視のためのアルゴリズム開発を行い、広域かつ継続的なサンゴ礁のモニタリングの実施に資することを目標とした。本研究を通して、以下の成果を得た。

ALOS AVNIR2 データを用いた東アジアのサンゴ礁分布図の作成を行った。サンゴ礁に隣接する流域の土地利用に関する調査を行い、流域からの土砂流入負荷の推定と、波当たりなど物理環境に基づいてサンゴ礁を類型化する手法を開発し、ストレスと物理量に基づくサンゴ分布の評価を行った。空中写真と衛星画像を用いて、過去数十年の流域の土地利用の復元を行い、沖縄復帰後の土地改良、減反政策によるサトウキビへの転換、牧畜の増加による変化が土砂や栄養塩の流出を起こしている可能性を示した。

さまざまデータを統合する日本全国のサンゴ礁データベースの構築を行った。サンゴ被度データベースと土地利用との対応を検討した結果、河川流入と水温上昇の複合影響がサンゴ被度低下をもたらしている可能性を示した。

(6) 温暖化の危険な水準と安定化経路の解明

本プロジェクトでは、濃度安定化等の温暖化抑制目標とそれを実現するための経済効率的な排出経路、および同目標下での影響・リスクを総合的に解析・評価するための統合評価モデルを開発する。本統合評価モデルを用いて、種々の温暖化抑制目標を前提とした場合の、「危険な影響」が発生する可能性とその発生時期を提示した。この研究を通して、以下の成果を得た。

地球環境総合研究推進費 S-4 のその他の研究課題で行われる影響予測・経済評価研究の結果を温暖化影響関数としてとりまとめ、様々な分野の影響指標を統合評価モデル (AIM/Impact[Policy]) に組み込む事に成功した。統合評価モデルを用いて、温室効果ガス濃度を 450ppm-CO₂eq. と 550ppm-CO₂eq に安定化させる 2 つのシナリオとなりゆきシナリオ 1 つを想定し、シナリオ下における日本への影響を物理的指標のみならず被害コストまで評価した。この結果は、日本の中期目標検討に際し目指すべき気候安定化レベルを議論するための科学的知見として大きな役割を果たした。

(7) 温暖化政策を評価するための経済モデルの開発

本研究プロジェクトでは、温暖化対策の効果と温暖化の影響を定量的に評価することを目的としてこれまで開発してきた統合評価モデル (AIM モデル) の改良や新たなモジュールの開発を行い、世界及びアジアの主要国を対象として、温室効果ガス排出量の削減ポテンシャル

や温室効果ガス削減による経済活動への影響について分析し、温暖化政策の評価を行った。また、将来ビジョン・シナリオの定量的な分析に関する研究に、開発したモデルを適用した。本研究を通して、以下の成果を得た。

温暖化対策税の導入による二酸化炭素排出削減の効果・経済活動への影響の評価、道路特定財源の暫定税率廃止時における自動車起源の大気汚染物質の排出変化を、日本経済モデルを用いて定量的に分析した。また、世界経済モデルに温暖化によるコメ・コムギの生産性の影響・適応策を評価するモジュールを組み込み、気候変動による農業影響とその経済活動へのフィードバックを分析した。超長期ビジョン研究で活用する日本を対象とした温暖化とその他の環境問題の総合的な解析のためのモデルの開発した。

(8) アジア太平洋地域における戦略的データベースを用いた応用シナリオ開発

本研究プロジェクトでは、環境イノベーションオプション（定量的なアジア各国のデータを含む）を整備し、戦略的データベースの拡充を図りイノベーション戦略を検討した。UNEP/GEO4での将来シナリオをベースとして、アジア主要国を対象として、温室効果ガス排出量、土地利用変化、大気汚染物質排出量などの環境指標の変化を推計した。これにより、以下の成果を得た。

技術、制度、管理に関する環境イノベーションオプションについて、アジア各国における定性的および定量的な情報を収集・整理し、戦略的データベースを拡充した。また、戦略的データベースと環境-経済統合モデルとのインタフェースを改良することにより、インドにおける気候変動対策シナリオとして、炭素制約シナリオと技術推進シナリオの2つを取り上げ、CO₂排出量と対策の経済影響について推計した。さらに、戦略的データベースのインタフェースを改良し、インドの民生部門でのバイオマスストーブ、太陽光発電、CFL照明などの導入による二酸化炭素削減効果と室内大気汚染の改善効果について分析した。また、運輸部門を対象として、電気自動車、バイオ燃料、交通信号の効果について推計した。

UNEP/GEO4の4つのシナリオ（市場優先シナリオ、政策導入シナリオ、防衛シナリオ、持続可能シナリオ）を取り上げ、それぞれのシナリオ下での、温室効果ガス排出量、土地利用変化、大気汚染物質排出量、安全な水にアクセスできる人口比率などを推計し、

UNEP/GEO4（国連環境計画が発行する地球環境白書）に情報提供した。

イノベーション技術導入による温室効果ガス排出量の抑制や環境負荷の効果を定量的に分析できるAIMモデル対策技術オプションデータベースについて、国連の持続的開発委員会の学習センターで講義し、モデルの普及を行った。イノベーション技術導入が国連のミレニアム開発目標である貧困や教育レベル改善に与える影響について分析した。

(9) 日本における土壌炭素蓄積機構の定量的解明と温暖化影響の実験的評価

本プロジェクトでは、核実験起源放射性炭素同位体をトレーサーに用い、土壌有機炭素の分解速度を表す滞留時間の観測を行った。これにより、黒ボク土を初めとする日本特有の火山灰性土壌における炭素蓄積機構を解明することを目的としている。この研究を通して、以下の主な成果を得た。

土壌の物理特性を破壊すること無く、最長50cmまで連続的に試料を採取する方法について検討を行った。検討の結果、森林内でも比較的可動性の高い電動式土壌コアサンプラーの試作を行い、実際の現場作業での有効性が確認された。この手法を用いて、北海道天塩の針広混合林および落葉広葉樹林、苫小牧のカラマツ林、ブナ林（苗場山）等で土壌コア試料を採取した。これらのコア試料を、1cm毎に分割し、仮比重、炭素・窒素含有率、14C濃度の分析を行った。これにより、土壌の炭素蓄積能を評価するために必要な基礎データを高分解能で得ることが可能となった。これらのデータから、単位面積あたりの土壌炭素蓄積量は、針広混合林やブナ林（標高700m、標高1500m）で高い傾向が認められた。また、針広混合林の土壌については、他よりも堆積速度が早いことが分かった。

土壌を①比重分画法と、②物理的方法（比重や粒径）と化学的方法（アルカリ・酸処理）を併用した手法で分離した試料の14C分析を行い、有機物の分解過程を考慮した分離法を検討した。①比重分画法を用いて褐色森林土壌を6画分に分離し14C分析をおこなった結果、A層（深さ5～15cm）でも滞留時間が150～350年の炭素が全体の約3/5を占めていることが明らかとなった。

4. 重点研究プログラムにおけるその他の活動の概要

(1) 地球温暖化に係る地球環境モニタリングの実施

1) 大気・海洋モニタリング

定点および移動体プラットフォームを利用した大気や海洋の観測を通してグローバルな視点での地球環境の現状把握を行い、また地球環境の変動要因を明らかにするための研究活動に資する高品質のデータを長期間モニタリングにより提供する。このため、以下の事業を行った。

- ・温室効果ガス等の地上モニタリング
- ・定期船舶を利用した太平洋温室効果ガス等のモニタリング
- ・シベリアにおける航空機モニタリング
- ・温室効果ガス関連の標準ガスの整備

2) 陸域モニタリング

陸域生態系での炭素収支（二酸化炭素フラックス）観測並びに生態系観測、陸水圏での水質のモニタリング等、陸域環境における重要なパラメータに関して国内外のネットワークを通じた長期モニタリングを実施する。このため、以下の事業を行った。

- ・森林の温室効果ガスフラックスモニタリング
- ・森林のリモートセンシング

(2) 地球温暖化に係る地球環境データベースの整備

地球環境研究や行政施策に資する基礎的データを取得・整備することを目的に、自然科学分野のモニタリングや社会科学分野のプロジェクトで得られたデータや成果を収集・整備し、データベースを構築する。また、各分野の複層的なデータベースを一元化し、円滑にデータ閲覧・取得できる統合化システムを開発・運用する。さらに、流跡線解析等の観測支援ツールを整備し、所内外の関連研究者の利便性の向上を図る。このため、以下の事業を行った。

- ・地球環境（大気・海洋・陸域）モニタリングデータベース
- ・温室効果ガス排出シナリオデータベース
- ・陸域炭素吸収源モデルデータベース
- ・温室効果ガス等排出源データベース
- ・炭素フローデータベース
- ・観測・解析支援ツール・データの整備・提供

(3) GOSAT データ定常処理運用システム開発・運用

温室効果ガス観測技術衛星（GOSAT）の観測データを定常処理（受信、処理、再処理、保存、処理結果の検証、提供）することを目的に、計算機システムを開発・整備し、運用した。衛星打ち上げ前はシステムの開発と整備を着実にを行い、衛星打上後はデータ処理・再処理・検証・保存・提供を行った。

(4) 地球温暖化に係る地球環境研究の総合化・支援

1) グローバルカーボンプロジェクト事業支援

Global Carbon Project (GCP) の国際オフィスとして、Earth System Science Partnership (ESSP) 計画のひとつである気候-炭素-人間統合システムに関する研究を国際的に推進し、同時にわが国の炭素循環研究を支援した。特に、炭素管理手法の向上に資することを目的として、炭素循環の自然科学的研究に「人間社会的次元」を統合した関連研究を国際的に推進した。

2) 地球温暖化観測連携拠点事業支援

「地球観測の推進戦略」（総合科学技術会議決定）に基づき、地球温暖化分野の連携拠点を支える地球温暖化観測推進事務局として、国内の関係省庁・機関の連携を促進し、利用ニーズにこたえる観測の実現、国際共同観測体制である全球地球観測システム（GEOSS）の構築に貢献した。気候、温室効果ガス、炭素循環プロセス、温暖化影響等にわたり、観測実施機関間の調整機能、観測担当者と関係研究者間のネットワークコア形成、観測データ流通効率化等の実現を図った。

3) 温室効果ガスインベントリ策定事業支援

日本の温室効果ガス排出量・吸収量目録の作成およびデータ解析、作成方法の改善を継続的に行うとともに、気候変動枠組条約締約国会合（COP）等における国際交渉支援、ガイドライン作成・排出係数データベース等の気候変動に関する政府間パネル（IPCC）への貢献、キャパシティブUILDINGプロジェクトの実施等の国外活動を進めた。

II. 中核研究プロジェクト1：温室効果ガスの長期的濃度変動メカニズムとその地域特性の解明

1. 研究の目的と経緯

大気中の温室効果ガスの多くは、人為的な寄与によってここ200年間、その濃度が増加している。特にここ10年では二酸化炭素、亜酸化窒素、フロンなどの増加が顕著である。このまま温室効果ガスが増加し続けると、地球の気候は今後大きく変化し、地球の生態系にとって危険をもたらしかねない状況にある。それを防止するためには温室効果ガスの発生量抑制が必須であり、その目標設定に科学的な根拠を与えるためには、将来の大気中濃度の変化をより正確に予測しなければならない。そのためには、大気と陸域及び海洋の各圏の間での生物学的過程あるいは物理的過程による温室効果ガスの循環や移動の実態と濃度変動メカニズムを解明し地球規模での収支を定量化する必要がある。

本プロジェクトでは、地球温暖化研究プログラムの中で、特に今後大きな経済成長を遂げると見込まれるアジア-オセアニア域に着目し、他のプロジェクトで行われる温暖化リスクの予測と評価や、対策の統合評価に資するため、将来の温室効果ガスの濃度増加に関するより精度の高い知見を与えることを目的に、温室効果ガスの発生や各圏間の循環や移動、蓄積等のメカニズムとその地域特性に関して研究を行う。これらの研究は地球環境研究センターの大気、海洋、陸域モニタリング事業や各種外部資金による観測研究とタイアップして、より高度な観測を推進した。

2. プロジェクトとしてのプラットフォーム

2.1 大気観測

本プロジェクトの大きな方向性として、航空機や定期船舶、陸上などの各種プラットフォームを用いた温室効果ガス観測網を整備した(図1)。航空機ではJALの定



図1 プロジェクトに協力をいただいている JAL 航空機および Transfuture 5 号 (トヨフジ海運)

期路線を航行する5機の航空機を用いて、アジア-オセアニア、ヨーロッパ、アメリカへの航路上の二酸化炭素連続観測を安定的に観測すると同時に、各国の飛行場付近の鉛直方向の濃度分布観測を行なった¹⁾。さらに日-オーストラリアの間を飛行する2機の機体によってボトルサンプラーで大気の採取を行い、CO₂、メタン、N₂O、CO、炭素同位体の分析を行なう。

民間船舶を用いた大気観測ではこれまでトヨフジ海運(株)の協力のもと行なってきた日本-オセアニア(Transfuture 5号)航路と、日本-中部アメリカ(Pyxis号)に加え、Seaboard International Shipping Co.の協力による、高緯度帯での日本-カナダ間の航路での大気観測を行なう。また、タイ、インドネシア、マレーシアなどを航行するアジア路線(トランスワールド号;トヨフジ海運所属)の観測を開始した。これらのプラットフォームでは、二酸化炭素連続観測に加え、酸素²⁾、同位体、オゾン、CO、フロン類、ブラックカーボンなど多種類の観測を展開する。

波照間、落石のモニタリングステーションでは主要な温室効果ガスの観測をモニタリング事業として行なっているが、これに加え酸素の連続観測や同位体比観測、多種類のフロン類の高頻度観測等を含め、総合的な観測を行なっていく。また、海外のサイトでのサンプリングを開始する。特に中国やインド、マレーシアでのサンプリングを行った。

2.2 海洋観測

海洋観測は太平洋をターゲットとしている。これまで地球環境研究センターのモニタリング事業として行って来たアメリカ西海岸または東海岸と日本を往復するPyxis号による北太平洋観測に加え、2006年から日本-オーストラリア-ニュージーランドを45日で周るTransfuture 5号での西太平洋観測を開始した。両者とも表層海水の二酸化炭素分圧の航路上での観測を行っている(図2)。これまでは西太平洋での観測データの蓄積は少なく、有効なデータが得られることが期待される。航路上では海水のサンプリングを行い、栄養塩や放射性炭素などの観測を行う。放射性炭素は炭素循環や海洋の流れの変化を調べるための良い指標となる。

表層海水の二酸化炭素分圧より、北太平洋や西太平洋での各年の地域的な二酸化炭素吸収量を求め、その長期的なフラックス変動を求め、これらのデータから長期的なフラックスの地域的な変動と大気の変動との対応を調べる。



図2 本プロジェクトの観測ルートと地点

2.3 陸域の観測

陸域の二酸化炭素のフラックスの観測として、苫小牧や富士北麓で行っているフラックス観測の時系列変化の解析が基本的なデータとして存在する。さらに、チベットの草原での二酸化炭素吸収の観測を行う。チベット高原は高度が高いために冷帯の気候帯に属し、土壌などに有機物の蓄積が見られる。こういった地域は温暖化の影響が比較的早く出ると考えられている。この他、熱帯でのフラックス観測などで、中国の雲南での共同観測体制を整える検討を行った。

土壌呼吸は温暖化により促進されると考えられており、大きな温暖化の炭素循環のフィードバックを引き起こす可能性があるものである。ここでは、大型土壌呼吸チャンバーを用いて、人為的に温暖化させた場合の土壌呼吸の変化を日本の森林土壌で調べ、温暖化の陸域炭素循環過程の地域的な変化について知見を得る。

3. 研究の成果

3.1 広域大気観測

3.1.1 グローバルな二酸化炭素、メタン観測

大気中の二酸化炭素をグローバルな観点から、その収支を検討した。そのために酸素の観測や同位体比の観測を行った。波照間・落石における大気中 O_2/N_2 比（酸素濃度と同等。 O_2/N_2 比 4.8 per meg が 1ppm の変化に相当）および CO_2 濃度のトレンドを図3に示す。観測

される O_2/N_2 比の減少率と CO_2 増加率および化石燃料の消費統計から海洋および陸域生物圏の CO_2 吸収量を推定することができる。1999年7月から2010年7月までの11年間の観測結果を用いて CO_2 収支計算を行った。なお、2010年の化石燃料消費量は過去の統計の外挿値を用い、海洋からの酸素放出による補正量には $0.48 \text{ Pg C yr}^{-1}$ を用いた。波照間・落石における11年間の観測結果に基づく海洋・陸域生物圏の CO_2 吸収量はそれぞれ 2.1 Pg C yr^{-1} および 1.1 Pg C yr^{-1} であった（表1）。ここで求められる陸域生物圏の CO_2 吸収量は森林破壊や土地利用変化に伴う CO_2 放出も含めた正味の吸収量である。過去11年間を平均すると、大気中に放出された化石燃料起源 CO_2 の約29%が海洋に、約14%が陸域生物圏に吸収されたことになる。この自然の吸収率は、平均的にはここ10年において大きな変化が表れていなかった。

同位体比の変動を用いて収支の年変動について検討を行った（図4）。この期間の陸域の二酸化炭素吸収は、気温変動と良く相関しており1998年、2002年2005年に吸収量の減少がみられた。2007年以降は吸収が続いていた。海洋側はこの期間で徐々に吸収が増加している

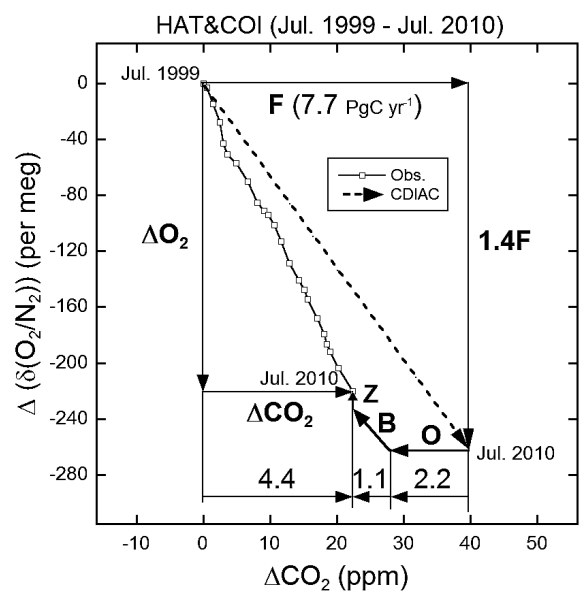


図3 波照間・落石での観測結果に基づく過去11年間の炭素収支計算の図解。

表1 平均的二酸化炭素収支 (Pg-C/年)

	人為発生	大気蓄積	海洋吸収	陸域吸収
酸素/窒素 1999-2010	7.7 ± 0.4	4.4 ± 0.1	2.2 ± 0.7	1.1 ± 0.9

ように見える。これらは、主に CO₂ 濃度の増加による施肥効果が現れているものと推定された。

安定同位体に加え放射性的炭素をトレーサーとして収支計算に用いるために、定期船舶で採取された大気試料の二酸化炭素中の ¹⁴CO₂ について、1994 年から 2005 年の各緯度の $\Delta^{14}\text{C}$ のトレンド、年々変動、季節変動成分を求めた。これまでに測定してきた定期船舶の $\Delta^{14}\text{C}$ データの全体の減少トレンドは他機関の観測データや他測器で再測定した結果と良く一致することが示された。季節変化を調べるために北緯 25 度と、波照間で 2007 年に観測されたバックグラウンド $\Delta^{14}\text{C}$ の季節変動を比較した結果 (図 5)、定期船舶で得られた個々の試料における $\Delta^{14}\text{C}$ の季節変動成分 (青曲線) は波照間で観測された季節変動とよく一致することが示された。大気輸送モデルを用いてシミュレーションを行った結果、冬期に低く夏期に高くなる季節変動が再現され、これは化石燃料起

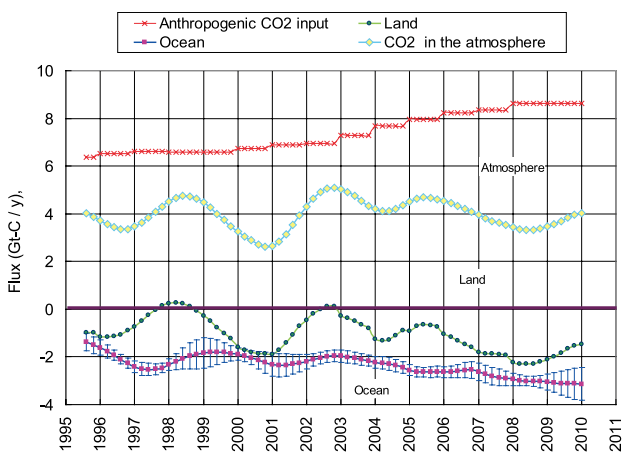


図 4 CO₂ の陸域、海洋吸収量の時系列変化の推定

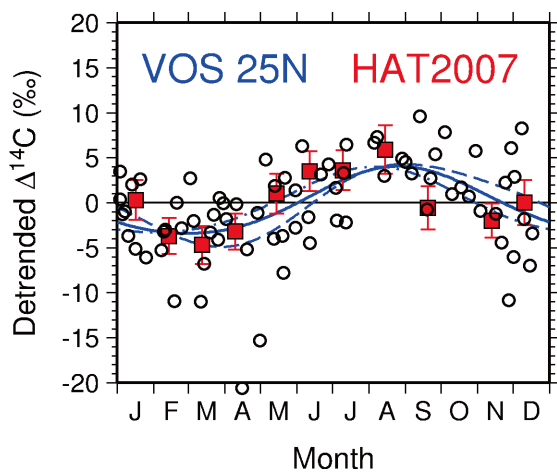


図 5 定期船舶の北緯 25 度 (○) と波照間 (■) で観測された $\Delta^{14}\text{C}$ の季節変動成分。

源 CO₂ の輸送に起因することが明らかになった。

メタンに関しては、定期船舶で観測されたメタン濃度の長期トレンドと年々変動について詳細な解析を行った³⁾ (図 6)。1997 年から 1998 年のエルニーニョ時のメタン増加率は、北半球中緯度で 10-16 ppb/yr、南半球で 12-22 ppb/yr であった。その後、メタン濃度は 1999 年から 2006 年にかけてほぼ一定であったが、2007 年に再び増加した (北半球中緯度で 10-12 ppb/yr、南半球で 7-8 ppb/yr)。これらのメタン濃度のトレンドと年々変動は、他機関の観測ネットワークによる観測結果と一致しており、北半球中緯度と南半球のグローバルな変動を捉えていると考えられた。2008 年以降は、北半球熱帯で 10-17 ppb/yr の大きな増加が観測されたものの、他の多くの緯度では大きなメタン増加率は観測されてない。

2007 年のメタン増加について、メタン消失源である OH 濃度が一定であったと仮定すると、南半球で $20 \pm 3 \text{ Tg-CH}_4/\text{yr}$ 、北半球で $24-27 \pm 3 \text{ Tg-CH}_4/\text{yr}$ のメタン放出量の増加が必要であることが示唆された。一方で、

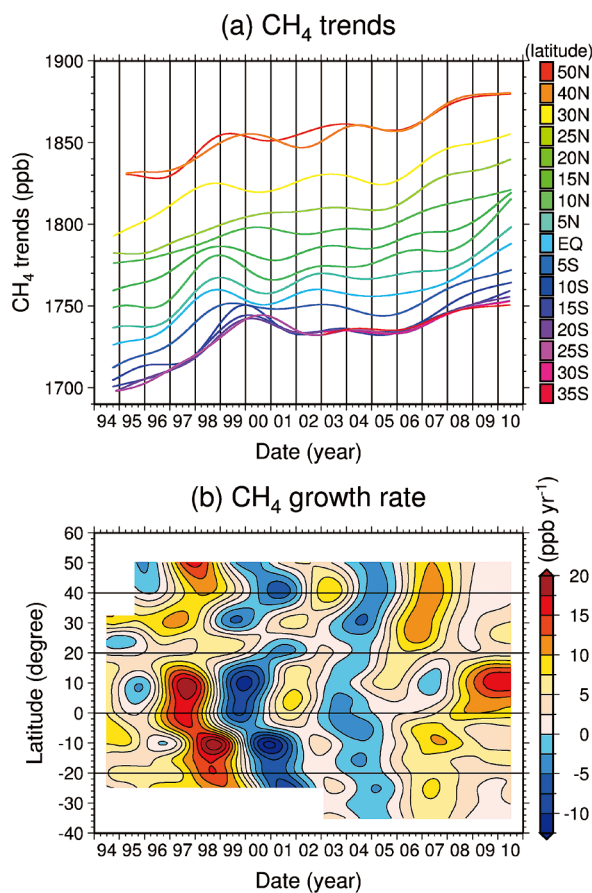


図 6 西太平洋で観測された北緯 50 度から南緯 35 度のメタン濃度の長期トレンド (上) とその増加率 (下)

大気輸送モデル NIES TM を用いて、メタン放出量が一定であったと仮定して計算すると、メタン濃度を再現するには、全球で OH 濃度が 4.5-5.5 % /yr 減少する必要があることが示された。

我々の定期船舶の観測結果から、熱帯西太平洋特有のメタン変動が発見された。1つは、1997 年中頃に観測された 15-19 ppb/yr の大きなメタン増加である。NIES TM の結果から、非常に強いエルニーニョに伴う西風偏差により、西太平洋上で東南アジア起源の空気塊を観測したことがわかった。1997 年には、インドネシアで大規模な森林火災が報告されており、これに伴うメタン増加を捉えたと考えられた。もう一つは、2007 年のラニーニャ時におけるメタン減少である。これは、西太平洋においてラニーニャ時に鉛直流が強くなる大気循環の変動に起因していることが示唆された。

3.1.2 地域的濃度分布

本プロジェクトでの定点の観測値は、波照間、落石に加え中国、インドなどに展開している。また、富士山での観測やハワイでの観測などを開始した。これによって、アジア地域の濃度の違いなどを検討している（図 7、図 8）。中国の貴陽での観測では、波照間と比べ CO₂ の濃度の大きさは同程度であるのに、CH₄ や CO などの濃度が相対的に高いことが特徴であった。インドにおいては、バックグラウンドに近い濃度が観測されたが、夏季の CO₂ の濃度は同じ緯度帯でのデータより低い特徴があり、この地域の特性が現れていると思われる。その他、熱帯雨林域のマレーシアのダナンバレーでのサンプリングを行った。

定点の他、東南アジア航路では汚染性大気におけるメ

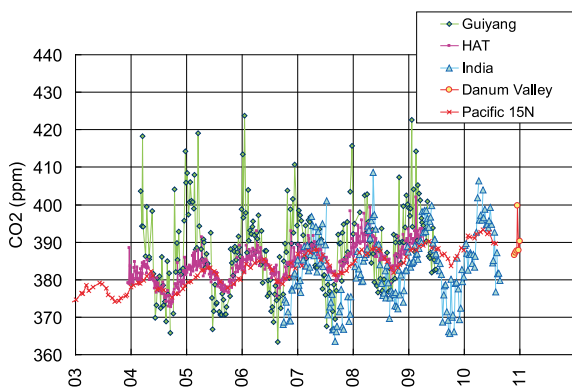


図 7 波照間、と太平洋の北緯 15 度、貴陽（中国）、インド北部、マレーシア（ダナンヴァレー）でのボトルサンプリングによる大気濃度データ比較

タン、亜酸化窒素、代替フロン類（HFC、PFC、SF₆ 等）、対流圏オゾンの濃度データを取得した。また、OH ラジカルとの化学反応を通じてメタンや代替フロンなどの大気中寿命に影響を及ぼすとともに、メタン、ブラックカーボン、代替フロン類の人為発生源からの放出量を推定する際にリファレンス兼トレーサーとなる一酸化炭素・二酸化炭素の測定を行ったほか、温室効果ガスと同様に温暖化に寄与し、アジアからの排出が多いブラックカーボンの連続観測のための検討と試験観測を行った。乾季においては、ブラックカーボンなどの排出があると推定される分布などが得られた。今後この海域の含むアジア大陸のメタンと亜酸化窒素の発生量の比が地域ごとにどのように異なっているのかが、本観測を含む大気ネットワーク観測から明らかになるものと期待される。

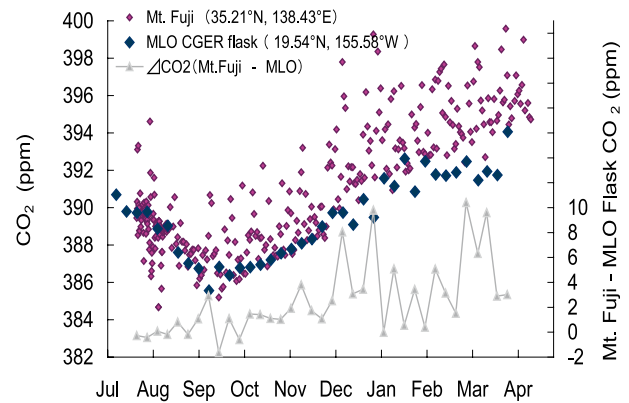


図 8 ハワイと富士山のデータ比較

3.1.3 鉛直分布

民間航空機を利用した CO₂ 濃度の連続観測は、2005 年 11 月より 2011 年 3 月までの間に 6,000 回以上の観測飛行を行い、航空機の離着陸時に約 10,000 本以上の鉛直分布データを取得できた（図 9）。

比較的観測頻度の大きい 9 点について行い、平均的

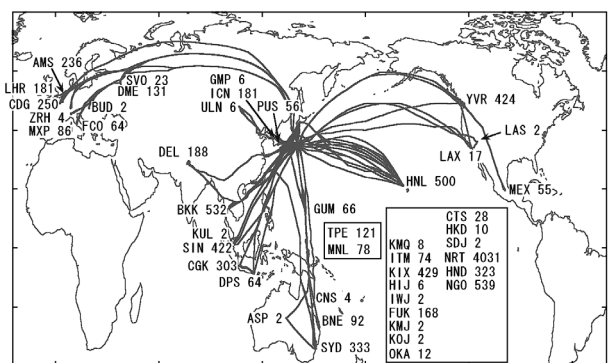


図 9 航空機の航路と鉛直分布採取数

なCO₂濃度の季節変動成分を比較した(図10)。モスクワ(MOW)上空の季節振幅は北ヨーロッパ(N.EU)やバンクーバ(YVR)に比べて明らかに大きくなっている。これは北ヨーロッパやバンクーバが大陸の西岸に位置しているのに対しモスクワは内陸にあり、陸上生態系の影響を直接受けやすいためであると考えられる。デリー(DEL)上空の大気境界層内では、夏季に非常に低いCO₂濃度が観測されることがある。一方で、春季の大気境界層内の濃度は自由対流圏より明らかに高くなることが多く、デリー近傍における陸上生態系の活動の季節性が大きいことが示唆される。ホノルル(HNL)は太平洋の中に位置しており周囲にCO₂の強い放出源や吸収源はないと考えられる。CO₂濃度の季節変動は自由対流圏の2kmから10kmまでほぼ同じ位相、振幅であり、海洋上におけるCO₂濃度の鉛直分布の特徴を表している。バンコック(BKK)上空の大気境界層内の濃度は極大値が1月-2月頃に表れている。自由対流圏でも高度2kmでは上空よりやや早い3月に極大を示す。これはバンコック周辺においてこの季節に頻繁に発生する森林火災の影響だと考えられる。シンガポール(SIN)はほぼ赤道上の北緯1度21分に位置しているが、CO₂濃度は明瞭な北半球性の季節変動を示し、振幅は2.6-2.9ppmである。南半球のシドニー(SYD)上空では季節変動の位相は北半球と逆になっており、振幅は北半球に比べて非常に小さい。

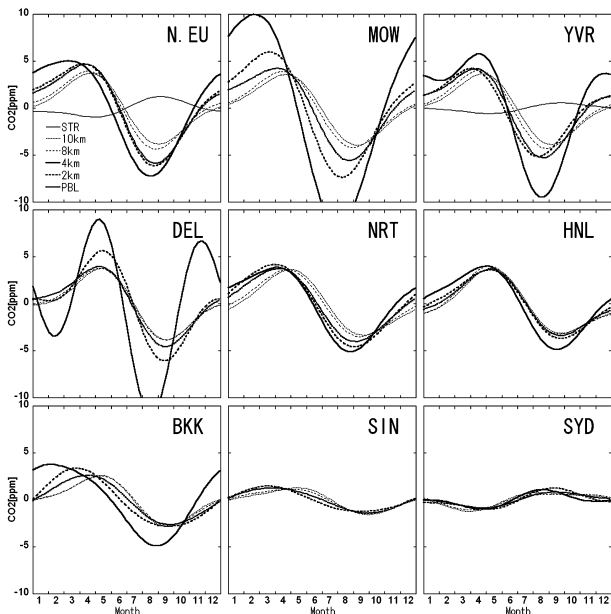


図10 N.EU、MOW、YVR、DEL、NRT(成田)、HNL、BKK、SINおよびSYD上空におけるCO₂濃度の平均的な季節変動

図10の季節変動の振幅を他の観測点の結果を合わせて緯度別にプロットしたものが図11である。自由対流圏の高度2kmではデリーとモスクワの振幅が大きく、観測地点付近の陸上生態系の活動が盛んであることを示唆している。北緯28度のデリーより北の観測点では低高度ほど陸上生態系の影響を強く受けて振幅が大きくなる鉛直構造が見られる。北緯21度のホノルルから赤道域にかけては、自由対流圏においても低緯度ほど振幅が小さくなるとともに、上下方向の振幅の差が非常に小さいことがわかる。赤道付近のシンガポール上空では小さいながらも季節変動が確認できたが、南緯6度のジャカルタ上空では有意な季節変動は見られなくなる。

上空におけるCO₂濃度の2009年の年平均値を緯度分布としてプロットしたものが図12である。南半球のシドニーは、いずれの高度においても全観測点を通して最も低い濃度を示している。シドニー上空では高高度ほど年平均値が高くなっていることがわかる。これは北半球のCO₂濃度の高い空気塊が赤道上空の上部対流圏を通過して南半球上空に輸送されるメカニズムが存在しているためであると考えられる。南緯6度のジャカルタにおいて

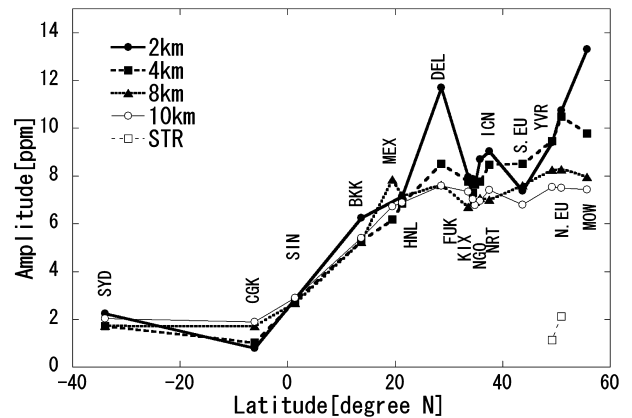


図11 高度別のCO₂濃度季節振幅の緯度分布

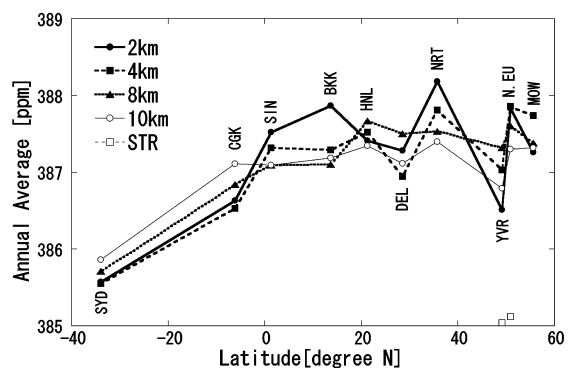


図12 2009年におけるCO₂濃度年平均値の緯度分布

も年平均値は上空の方が高いことから、この緯度帯においても上空の方が北半球の影響をより強く受けていると考えられる。北緯1度のシンガポール上空では季節変動の位相も北半球的であったが、CO₂濃度の年平均値も低高度ほど高く、北半球の性質を示している。シンガポールより北の年平均値は、季節振幅に見られたような明らかな緯度方向の濃度勾配は存在せず、北半球内ではほぼ似た濃度である。その中でもデリーとバンクーバは年平均濃度が低くなっており、周辺にCO₂の吸収源が存在していることが示唆される。

3.1.4 時系列変化に見られるアジアからの影響

濃度の空間分布のデータからアジアでの温室効果ガスの発生量の影響が大きいことが明らかになってきた。同時に、時系列データからもその影響が捉えられる。特に、二酸化炭素やフロン類などの影響が波照間での連続データから解析された。二酸化炭素は、特に中国での発生量の急増がここ数年懸念されている。

(a) 二酸化炭素

JAL 航空機を用いた高頻度 CO₂ 観測データを用いて、成田上空における CO₂ 濃度の短周期変動について変動幅の高度・季節変化を明らかにするとともに、輸送モデルを用いて、地上フラックスおよび輸送による寄与を調べた。その結果、自由対流圏では、大気境界層内よりも変動幅が小さく (1~2 ppm)、春季に、高高度ほど変動幅が増大する傾向、夏季に、全高度で他の季節に比べ変動幅が増大する傾向が見られた。また、上空に行くほど、変動幅に対する地表フラックスの影響が減少し、気象条件・輸送の影響が増大することが確認された。大気境界層では日本および東アジアの化石燃料フラックスが、自由対流圏では東アジアの化石燃料・植生フラックスが、一年を通して寄与が最大であった。タグ付きシミュレーションの結果より、春の上部対流圏における変動幅の増大は、東アジア起源の CO₂ に由来することが示唆された。

波照間で観測される高 CO₂ 濃度イベント時の大気試料を採取するために、遠隔地から任意の時刻にサンプリングを行うことのできるイベントサンプリングシステムを開発した。汚染イベント時の大気試料中の ¹⁴CO₂ を測定し、CO₂ 濃度変動に対する化石燃料起源成分の寄与率の推定を行った。波照間で 2010 年 3 月 7 日から 12 日にかけて観測された高 CO₂ イベント時の観測結果を図 13

に示す。CO₂ 濃度は、3 月 3 日から 6 日のベースライン濃度 (約 390 ppm) から、3 月 7 日朝に約 8 ppm、3 月 9 日深夜から 10 日未明に 10 ppm を超える急激な増加を示した。流跡線解析の結果から、前半の汚染イベントは朝鮮半島付近を経由した空気塊で、後半のイベントは中国華北から上海付近を経由した空気塊であると考えられた。

$\Delta^{14}\text{C}$ の観測値から化石燃料起源 CO₂ 量を求めた結果、前半のイベントでは、7.56 ppm から 3.39 ppm の CO₂ 濃度の増加のうち、72% から 83% が化石燃料起源であることがわかった。後半のイベントでは化石燃料起源 CO₂ の割合は前半のイベントより低く、9.45 ppm から 3.66 ppm の CO₂ 濃度の増加のうち、64% から 47% が化石燃料起源であることが示された。

オイラー・ラグランジュ結合モデルを用いて CO₂ 濃度のシミュレーションを行い観測と比較した結果、シミュレーションは CO₂ 濃度の増加をよく再現し、化石燃料起源 CO₂ の割合は $\Delta^{14}\text{C}$ の観測誤差の範囲内ではほぼ一致した。しかし、シミュレーションは観測と比べ化石燃料起源 CO₂ の割合が 10~20% ほど小さかった。これは、シミュレーションに用いた化石燃料起源 CO₂ のフラックスデータが東アジアの CO₂ 放出量を過小評価している可能性があることを示唆している。また、フラックスデータの空間解像度が、局所的な CO₂ 放出を捉えるには粗いことも一因として考えられる。

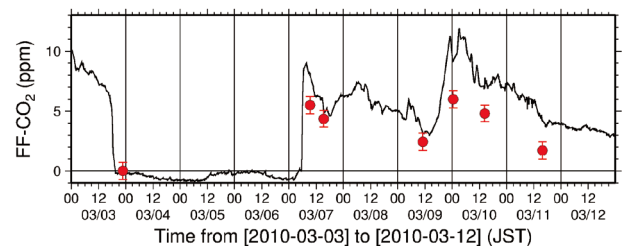


図 13 波照間で観測された CO₂ 濃度増加量 (2010 年 3 月 4 日 0 時を基準、実線) と、観測された $\Delta^{14}\text{C}$ から求めた化石燃料燃焼起源 CO₂ 量 (丸)。

(b) ハロカーボン

波照間観測ステーションおよび落石観測ステーションにおいて CFC 類 5 種 (CFC-11, CFC-12, CFC-113, CFC-114, CFC-115)、HCFC 類 5 種 (HCFC-22, HCFC-141b, HCFC-142b, HCFC-123, HCFC-124)、HFC 類 5 種 (HFC-23, HFC-134a, HFC-152a, HFC-125, HFC-32)、PFC 類 3 種 (PFC-116, PFC-218, PFC-318)、SF₆、ハロン 2 種、その他ハロカーボン 6 種 (トリクロロエタ

ン、トリクロロエチレン、クロロホルム、四塩化炭素、ジクロロメタン、テトラクロロエチレン) の高頻度観測を実施し、それらの東アジアにおけるベースライン濃度の経年変動を明らかにした。HCFC類、HFC類、SF6の大気中濃度には引き続き顕著な増加傾向が見られた(図14)。また、測定の高精度化のために、マルチディメンショナル GC/MS/ECD システムを開発し、四塩化炭素と PFC-14 の測定精度を大きく向上させた。国立環境研究所敷地内で新システムによる予備連続測定試験を実施して、観測の安定性を確認し、H23 年度以降落石岬に導入することを決定した。

NIES 輸送モデルと FLEXPART を組み合わせたカップルド輸送モデルを使って、波照間島におけるハロカーボン濃度の経年変化と季節変動を概ね再現することができた。また、PFC3 成分について、波照間 / 落石における観測結果とインバースモデル解析により東アジアにおける国別排出量を推定し、中国の寄与が特に大きいことを明らかにした。

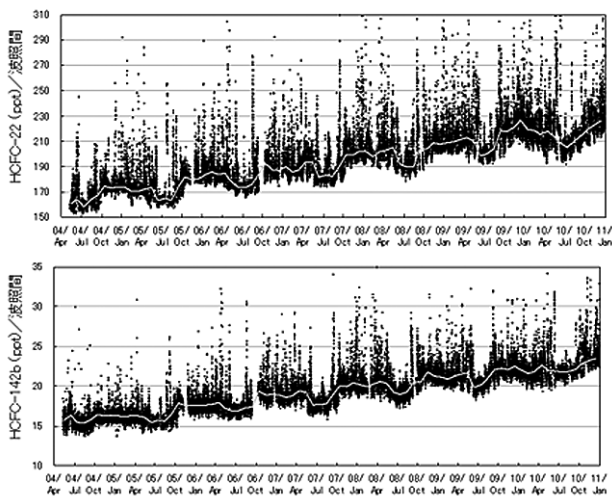


図14 波照間島で観測された大気中ハロカーボン濃度の変動(2004年5月~2010年)。上から HCFC-22、HCFC-142b

3.2 海洋、陸域フラックス観測

太平洋における二酸化炭素の吸収量の地域変動を時系列的に調べることによって、海洋による大気からの二酸化炭素吸収の変動について検討する。観測としては、これまで、データの蓄積のある北太平洋および西太平洋で行なった。

また、陸域では、アジアの地域での吸収量変動について、フラックス観測データの解析を行なった。またフラックス変動のプロセス解析のための方法論を検討した。同

時に、温暖化影響による変化する可能性がある土壌呼吸への応答を調べるために野外実験などを行った。

3.2.1 海洋 CO₂ フラックス観測

研究対象となっている北太平洋と西太平洋での海洋二酸化炭素分圧 (pCO₂sea) 観測を継続し(図15)、北太平洋においてはこれまでのデータをまとめ、ニューラルネットワークと呼ばれる手法を用いて2002年以降の北太平洋全域の pCO₂ sea 時空間分布を高解像度で再現し、海洋の炭素吸収量の経年変化(図16)や、その吸収の地域性を調べた。これによると2002年から2008年の北太平洋全域(北緯15-60度、東経120-240度間)における平均 CO₂ 吸収量は 0.41 PgC/yr であった。これは、全海洋吸収のおよそ25%を占めている。さらにその年々変動について見ていくと、2002年から2005年の夏季において北太平洋は CO₂ の海洋から放出域であったが、2006年以降はすべての月で海洋が CO₂ を吸収しており、CO₂ 吸収量が経年的に増加傾向にある事が分かる。これは、大気中の CO₂ 分圧が経年的に増加している一方で、特に北太平洋の西部海域で pCO₂ sea の増加傾向が見られないため、大気と海洋の CO₂ 分圧差が拡大している事が要因である。北太平洋の西部海域での pCO₂ sea に

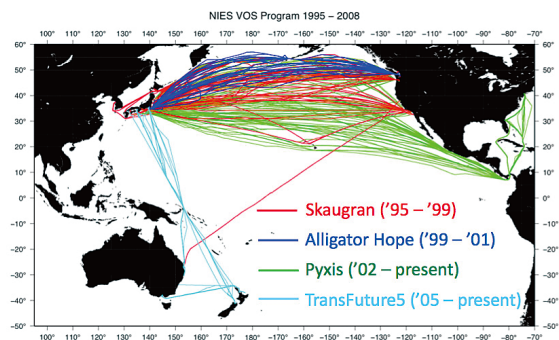


図15 これまでの北太平洋での海洋観測ライン

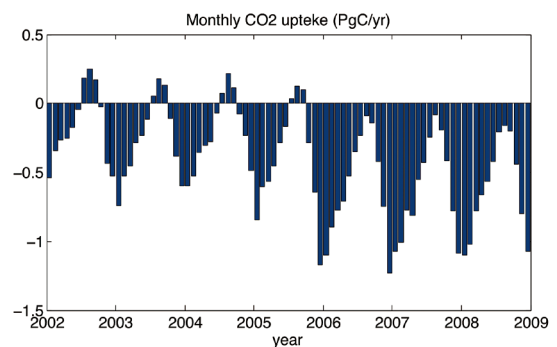


図16 北太平洋二酸化炭素フラックスの年々変化。縦軸は、月毎の CO₂ 吸収量(単位: PgC/年)。

見られるトレンドの原因については、今後の検討課題である。

西太平洋域においては、オセアニア航路を航行する民間船舶トランスフューチャー5（トヨフジ海運所属）に観測装置を搭載し、日本-オーストラリア-ニュージーランドの間の大気海洋 pCO_2 観測を2005年から実施してきた。図17に西部赤道海域東経150度周辺の大気 pCO_2 、海洋表層 pCO_2 、塩分、表面水温（SST）の観測値を示す。この海域で海洋表層 pCO_2 と熱帯太平洋中西部での ENSO の指標である南方振動指数（SOI）の相関は強く、 pCO_2 の変動が ENSO の影響を受けていることがわかった。 $pCO_{2,sea}$ の極大値はラニーニャのピークに3ヶ月ほど遅れて出現し、 $pCO_{2,sea}$ の極小値はエルニーニョのピーク前後に分かれて出現したことがわかった。 $pCO_{2,sea}$ 変動は塩分変動と密接に関係しており、塩分の極大・極小は $pCO_{2,sea}$ の極大・極小とほぼ一致する。一方、SST の変動が pCO_2 極大・極小と一致しているとはいえない。これは東部太平洋で良く知られる SST と pCO_2 の関係と異なるものである。

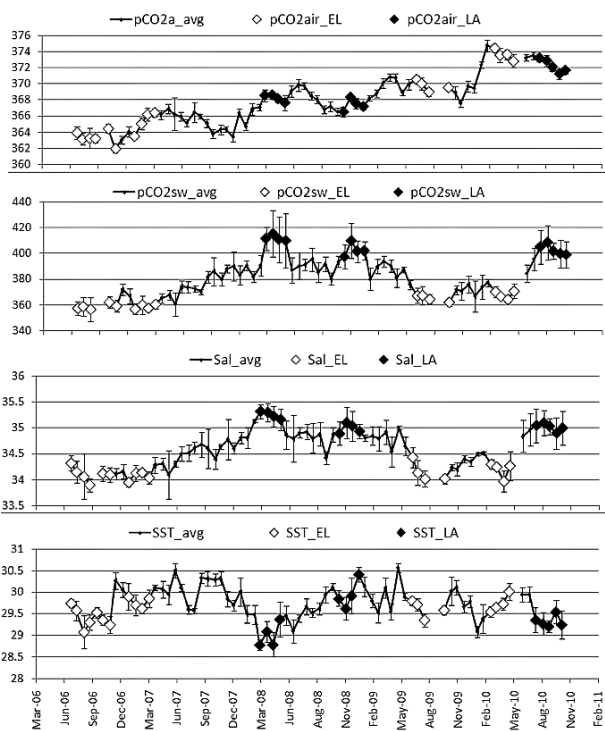


図17 西太平洋赤道域における大気と海洋 CO_2 分圧 (pCO_2)、塩分 (Sal)、表面水温 (SST) の年々変化。ELはエルニーニョ、LAはラニーニャの時期を示す。

3.2.2 海洋の炭素循環観測

海水に含まれる無機炭酸中の放射性炭素 ^{14}C は、その起源が大気-海洋間の二酸化炭素 (CO_2) 交換のみであり、海洋中では放射性崩壊によってその絶対量を減らしていくため、表層水の ^{14}C 濃度は各海域における CO_2 交換速度、表層流、海水の上下混合などのバランスによって決定されることとなる。それゆえ、海洋表層における無機炭酸中の炭素同位体比を長期的にモニタリングすることは、大気-海洋間の CO_2 交換速度や海洋表層循環の地域的、季節的変動を明らかにできるとともに、 CO_2 フラックスにおける海洋生態系の影響を定量的に解析することを可能にする。そこで本研究では、北太平洋亜熱帯域で得られた2003～2008年夏季の ^{14}C データをもとに、当該海域における大気-海洋間の CO_2 交換と海洋表層循環の関係について解析することを目的とした。

北太平洋の亜熱帯域には、反時計回りの表層流（黒潮及び黒潮続流、北太平洋海流、そしてカリフォルニア海流）が存在する。これらの表層流のうち黒潮及び黒潮続流と北太平洋海流は高温高塩分で特徴付けられる暖流であるのに対して、カリフォルニア海流は比較的低温低塩分で区別される寒流である。一方で北太平洋の北緯35度付近は暖水塊と冷水塊とが入り乱れる混乱水域も存在するので、水温と塩分の情報だけで観測点の流域環境を同定することは難しい。そこで水温、塩分、ならびに経度の情報をユークリッド距離によるクラスター分析することで、各観測点を統計学的に西部亜熱帯域、中央亜熱帯域、東部亜熱帯域の3つの海域にグルーピングした。なお、水温 $15^\circ C$ 以下、塩分 $35.5psu$ 以下の水塊で、かつ北緯 40 度以北で得られたデータについてはすべて親潮などの亜寒帯流域のものであると仮定して解析データから除外し、混乱水域は一切考慮しないこととする。海域分けされた2003～2008年夏季の表層水における $\Delta^{14}C$ のマッピングを図18に示した。2003～2008年の6年間の北太平洋亜熱帯域で得られた $\Delta^{14}C$ の平均値は、西部亜熱帯域、中央亜熱帯域、東部亜熱帯域、それぞれで、 $65.8 \pm 13.9\%$ 、 $65.8 \pm 9.6\%$ 、 $46.7 \pm 9.4\%$ と見積もられた。これは、1970年代から続く北太平洋表層水中の $\Delta^{14}C$ の減少傾向が2000年代初頭に停止したことを示している。スイス・ユングフラウヨッホで観測されているバックグラウンド大気中の $\Delta^{14}CO_2$ モニタリングの結果によると、1980年代に1年あたり9%の減少傾向が2000年代に入って1年あたり6%になっていて、

2007年の $\Delta^{14}\text{C}$ はおよそ50%であった。このことから、我々が見出した2000年代の表層水中 $\Delta^{14}\text{C}$ の減少傾向の停滞は、大気中 $\Delta^{14}\text{C}$ の減少傾向のスローダウンに原因があり、2008年の時点で大気中 $^{14}\text{CO}_2$ と北太平洋亜熱帯循環域表層水の $\Delta^{14}\text{C}$ が平衡に達していることを示しているものと思われる。

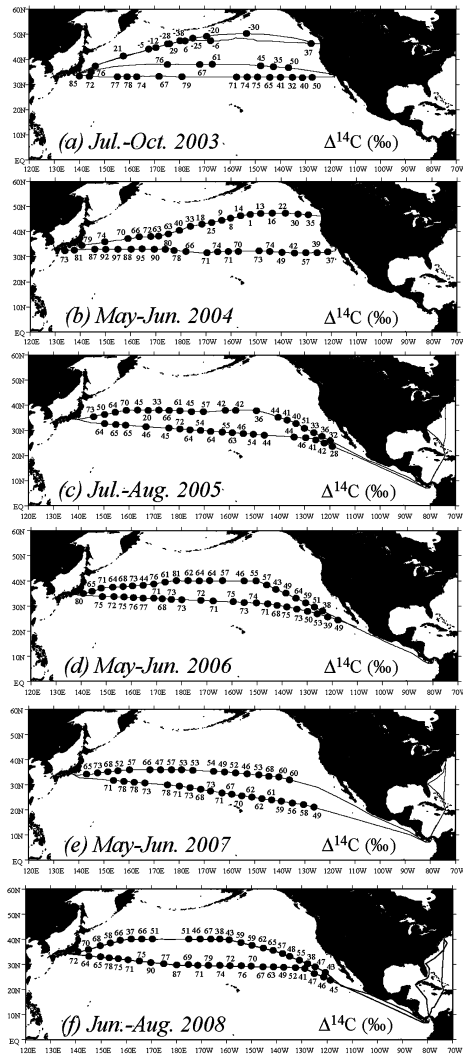


図18 北太平洋表層水中の $\Delta^{14}\text{C}$ の空間分布 (a:2003年、b:2004年、c:2005年、d:2006年、e:2007年、f:2008年、●:西部亜熱帯域、▲:中央亜熱帯域、■:東部亜熱帯域、○:亜寒帯域)

3.2.3 海洋生産と大気中酸素濃度変動

酸素の観測の時間分解能をさらに高めるために、大気中酸素/窒素比現場計測システムを構築し、2005年3月から落石岬、2006年10月から波照間島の地上モニタリングステーションにて現場観測を継続して行なっている。また新たに船上にて観測可能な大気中酸素/窒素比船上計測システムを開発し、2007年9月から日豪航路にて観測を行なっている。大気中酸素/窒素比の各緯度

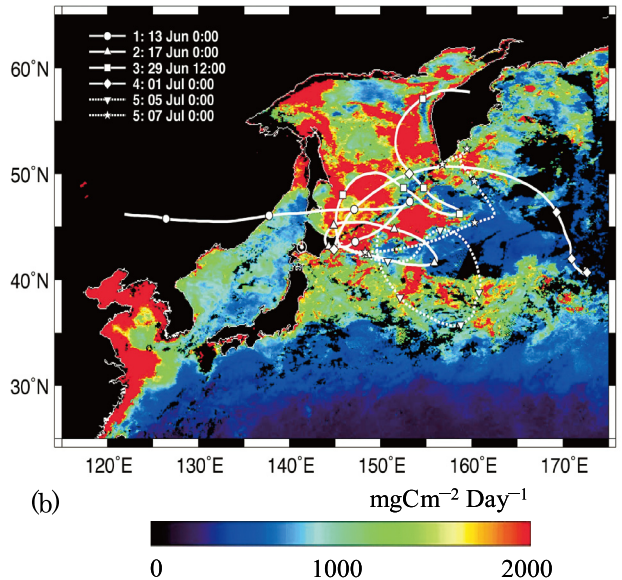
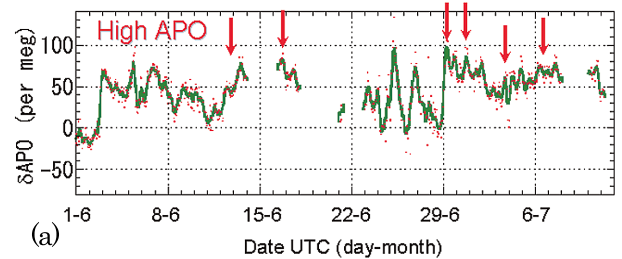


図19 APOの数日スケール変動と純一次生産量分布(VGPM*)の関係。(a):2005年6月のAPOの数日スケール変動、(b):5日間のバックトラジェクトリーと6月の純一次生産量分布。図(a)の矢印と図(b)のトラジェクトリーは対応している。
* Vertically Generalized Production Model

帯における季節変化および経年変化など、グローバルスケールの時空間分布の解像度が向上したのに加え、数日スケールの変動も明らかになりつつある。

酸素/窒素比と二酸化炭素濃度の変動比が化石燃料の燃焼、陸域生態系の光合成および呼吸により異なることを利用して、波照間島および日豪航路の観測から CO_2 の起源の解析を進めている。また落石岬では春から夏にかけてAPOの数日スケール変動が観測される。空気塊のバックトラジェクトリー解析を行った結果、APOが高いときは海洋の一次生産量が高い海域を通過していることが確認され(図19)、海洋の植物プランクトンの光合成により放出された酸素が落石岬にて観測されていることが確認された⁴⁾。

3.2.4 陸域フラックスの観測

本プロジェクトでは、地球環境研究センターが他機関と協力してフラックス観測を実施しているサイト(富士

北麓、天塩、苫小牧)のデータに加え、AsiaFlux データベースを利用し、アジア陸域の各種生態系の CO₂ 吸収・放出量に関するサイト間比較や、地上観測と衛星データを組み合わせた統合解析を行っている。

日本のサイトでは攪乱の影響が調べられている。成熟林の富士北麓サイトや台風攪乱前の苫小牧の吸収量は年間 200gC/m² 程度であったが、人為的な伐採や台風による倒壊で森林部が消失した後の天塩や苫小牧における CO₂ 吸収量を算出したところ、攪乱の直後は生態系は CO₂ を放出し、その後植物の成長にしたがって光合成による CO₂ の吸収量は年々増加し、数年間で吸収量と放出量が同等になる程度に回復した状況が観測された。自然攪乱および人為的な攪乱は森林の群落スケールでの炭素収支の年々推移に大きな影響を与えるものであり、苫小牧や天塩などの自然および人為攪乱の影響を受けたサイトでの長期的な観測により、攪乱の影響をモデル化するための重要なデータが集積されるものと期待される。

広大なアジア陸域生態系は、多様な気候と生態系を持つ。地球全体の陸域生態系の炭素収支を評価するため、この地域の炭素収支を把握する必要がある。ここでは、アジア陸域 49 の観測サイトの炭素フラックス観測結果を取りまとめ (図 20)、アジア陸域生態系の炭素吸収とそれに及ぼす環境要因を解明した。これまでの観測結果では、アジア陸域の年間純生態系交換量 (NEE) は、生態系によって大きく変化し、北方林、温帯林と熱帯林の平均値は、それぞれ 132.6、250.1 と 180.1 gC/m² と観測値から推定されている。これらの測定値の空間変

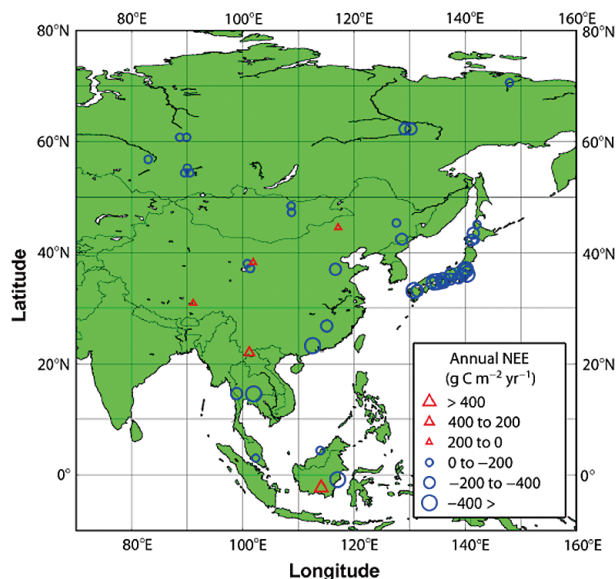


図 20 アジア陸域生態系の炭素フラックスの空間変動

動 (生態系の間の変動) は、緯度が低くなると大きくなることがわかった。また、アジア各地の生態系の年間 NEE は、年平均気温と降水量との間に高い相関が示された。この研究では、アジア陸域生態系は、現在炭素のシンクであることも示唆された。

次に、アジア各地の森林による CO₂ 吸収量が年による気象要素の変化に広域でどのように応答しているかを評価するため、アジア 6 地点のフラックス観測サイトのデータ、衛星リモートセンシングにより算出し各観測サイトで検証された気象要素 (光合成有効放射量ほか) の広域データ、経験型の陸域生態系モデルによる総光合成量 (CO₂ 吸収量の総量) のデータを取りまとめ、アジア陸域生態系の炭素吸収とそれに及ぼす環境要因の関係を求めた (図 21)。その結果、ユーラシア大陸東側の中・高緯度では夏季の光量はその年の総光合成量をほぼ決める (光量と生産量が正相関) が、低緯度や大陸内部では光量の多い年に CO₂ 吸収量が平年より少ない (光量と生産量が負相関) という応答を示すことがわかった。その原因の一つとして、低緯度の森林では平年に比べて光量の多い年に盛夏期の降水量が少なく、水不足のために光合成速度が低下する傾向があることが示唆された。

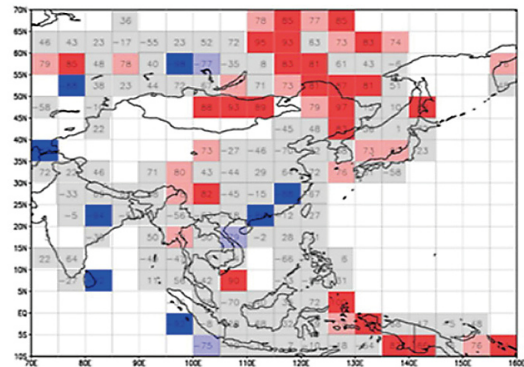


図 21 2001 ~ 2006 年における夏 (7-8 月) の光合成有効放射量と総光合成量の年々変動の偏差の相関関係。濃赤色: 正相関 (有意水準 0.05)、薄赤色: 正相関 (有意水準 0.10) 濃青色: 負相関 (有意水準 0.05)、薄青色: 正相関 (有意水準 0.10)、灰色: 有意でない、白: 解析対象外 (森林がほとんどない)。

3.2.5 チベット高原の炭素収支

チベット高原の草原生態系は、東アジア陸域面積の半分を占め、多くの炭素が蓄積されている可能性が高い。アジア全体の炭素収支を解明するため、この地域の炭素蓄積と植物の生産力を把握する必要がある。しかし、広範囲の現地調査データが極めて不足しており、その実態

がほとんど把握されていなかった。2001年から4年間、地球環境研究推進費の一部で北京大学と国立環境研究所が共同で大規模な土壤炭素調査を行った。その後、2005年から室内分析や、調査データの解析、さらに、渦相関法によるCO₂フラックスの測定結果、衛星データ、そしてシミュレーションモデルを利用して、この地域の植物一次生産力、バイオマスと土壤炭素の蓄積量についての推定を行った。

調査地域の草原では、深さ1 mまでの土壤炭素蓄積密度が平均6.5kgC/m²であることが分かった。すなわち、チベット高原の草原生態系の土壤炭素蓄積密度は、温帯林または冷温帯林の土壤炭素蓄積密度に近いことがわかった。また、調査地点によっては、土壤炭素密度が16-20kgC/m²という高い値も示された。チベット草原全体の土壤炭素蓄積は、東南から西北にかけて低下し、降水と温度の空間分布に相関していることが示された。降水量と気温の高いところは、土壤炭素の蓄積量も高い。さらに、高山メド (Alpine meadow) 草原は、高山草原より高い蓄積量が示された (表2)。

これまでの調査データでは、チベット高原の草原生態系の112万平方キロの面積だけで、73.6億トンの土壤炭素蓄積があると推定される。また、CO₂フラックスの測定とモデルの推定から、この地域の一次生産力はこれまでに報告されていた推定値より高く、平均0.28Gt C/yrの値を得た。

表2 青海・チベット高原の草原生態系における一次純生産 (NPP)、バイオマス炭素と土壤有機炭素の推定値 (Tan et al. in press より改訂)。*対象土壤の深さは0-20cm; **チベット高原だけを対象にした場合。

対象面積 (10 ⁶ km ²)	NPP		バイオマス		SOC		出典
	平均 (Pg C yr ⁻¹)	「密度」 (gC m ⁻² yr ⁻¹)	総量 (Pg C)	密度 (gC m ⁻²)	総量 (Pg C)	密度 (kgC m ⁻²)	
1.24			0.35	282.3			Piao et al., 2004
1.31	0.16	122					Piao et al., 2005
1.48	0.13	90			9.7*	6.57*	Zhang et al., 2007
1.14					7.4	6.50	Yang et al., 2008
1.39	0.28	201	0.33	238	12.0	8.63	Tan et al., 2010
0.82**			0.19	231			Wang et al., 2008
0.89**			0.19	213			Tan et al., 2010

3.2.6 フラックスの新たな観測方法

渦集積法と呼ばれる微気象学的手法に基づいた大気サンプリングと高精度の実験室内分析を組み合わせた観測手法の開発を行った。渦集積法は分析計に対する時間応答性の要求が低く、また大流量のポンプを必要としないため観測施設に対する電力要求量を低くすることが出来る。これらの特徴は、施設的な制約が大きい地域での観測展開に有利である。

CO₂の安定同位体比の高精度分析の技術は既に確立されており、硫化カルボニルについては高感度の検出器を使用したガスクロマトグラフと新たに開発した前処理装置を組み合わせて数十ccのサンプルから2%以内の精度で測定する技術を開発した。また、渦集積法を利用したサンプリング装置に用いる中間貯留容器について様々な材質について検討を行い、エチレン-ビニルアルコール共重合体樹脂のガスバリアフィルムでアルミ薄膜をラミネートしたバッグが硫化カルボニルやCO₂の安定同位体比に対して高い保存性を示すことを確認した。

森林内に無人で遠隔操作が可能な大気サンプリング装置を設置して動作確認と試験的なサンプリングを行い、得られた試料の分析を行った。分析値には有意な時間空間変動性が観察された。観測データから陸域生態系起源の情報をより正確に抽出するための今後の課題として、開発された群落スケールでのガス交換量の観測と連動して観測場所のバックグラウンド大気における各種ガス成分の変動特性の把握し、同時に生態系内の各吸収・放出源のガス交換量の変動プロセスの観察を行うことの重要性が示された。

3.2.7 土壤呼吸量の温暖化影響

土壤呼吸量増加に対する温暖化によるフィードバックの寄与を見積もるために、年間を通して土壤を人工的に3度程度加熱し、その寄与量を大型自動開閉チャンバーを用いて評価する調査を北海道の天塩、岩木山、つくば、苗場、広島、宮崎などに展開した (図22)。根切りを行い土壤の微生物呼吸のみに焦点を当てて、温度応答を調べた結果、初期には1度Cの昇温で北海道のサイトを除き3~9%程度の土壤呼吸の増加が見られた。これは、通常の温度特性に比べ半分程度の応答である。一方北海道では14~22%の増加が見られた。この応答は、通常の温度応答と同じ程度であり、もし温暖化が継続した場合には、土壤呼吸増加が問題になると考えられる。実験

を継続することによって、この温度応答には変化があること、温暖化による土壌水分量の影響があることが観測された。3年目以降のデータをみると、温度応答がほぼないと思われるケースも出てきており、有機物の内容の変化、供給量の変化、土壌環境の変化などが実際の土壌呼吸の温度特性に影響を与えている可能性があることが示唆された。泥炭があるような北海道の土壌環境では、温度応答が増大するケースもあり、1度あたり29%の増加が観測されるようなケースも存在することがわかった。

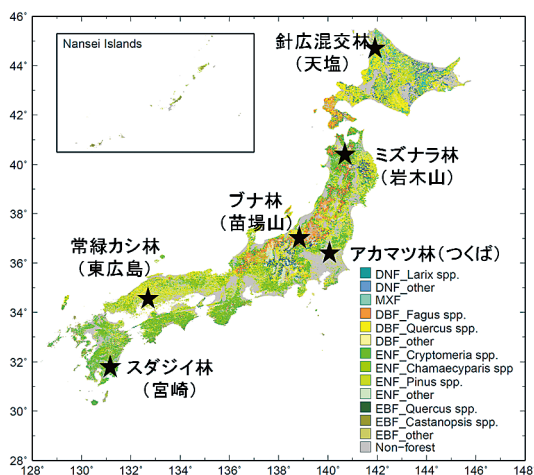


図 22 土壌呼吸の温度影響観測場所

3.3 物質輸送、物質循環モデルによる検証

本プロジェクトの中でのモデル研究は、中核研究プロジェクト2と連携しながら行なっている。最終的なグローバルな二酸化炭素収支の地域的分布を描き出すためのインバースモデル解析は、中核研究プロジェクト2のGOSATによる観測および本プロジェクトにおける各種の観測値などを利用しながら、グローバルな収支モデルを用いて行なうことになる。そのモデルの精度の向上のために、本プロジェクトでの実際の観測データを用いたパラメータの調整などが非常に有効である。例えば、航空機などを用いて観測している鉛直方向の分布のデータを用いて、インバースモデルの再評価などを行なった。

以下では、グローバルなモデルではなく、ローカルな観測結果に対する詳細なモデルについての報告を行なう。本プロジェクトでの温室効果ガスの観測データは各種あるが、ここでは特に二酸化炭素や、ハロカーボン、CO、オゾンなどに対する地域モデルシミュレーションの改良やその適用結果について報告する。

3.3.1 二酸化炭素

グリッド型モデルを用いて計算した全球の二酸化炭素濃度の三次元データと粒子拡散型モデルを用いて計算した空気塊のバックトラジェクトリーとを併用してフォワード計算を行う新規のモデル（結合モデル）を開発した。グリッド型モデルにはNIES輸送モデル ver. 08⁵⁾と粒子拡散モデルにはFLEXPART⁶⁾をそれぞれ採用した。

図23は結合モデルとNIES輸送モデルで計算したバロー (BRW)、サモア (SMO)、波照間 (HAT) の2003年の1～3月の二酸化炭素の濃度変動を観測値⁵⁾と比較したものである。尚、結合モデルの結果は波照間から放出した空気塊の二週間分のバックトラジェクトリーを使用して計算したものである。ピーク高やピーク形に関しては、結合モデルの方がより細かく観測値を再現しているように見られる。両モデル及び観測値の濃度変化から季節変動を取り除き、モデル結果と観測値との間の相関係数を計算 (2002-2004年) すると、NIES輸送モデルが0.43-0.49、結合モデルが0.55-0.62となり、結合モデルの方がより良い観測値との一致を示すことが確認された。

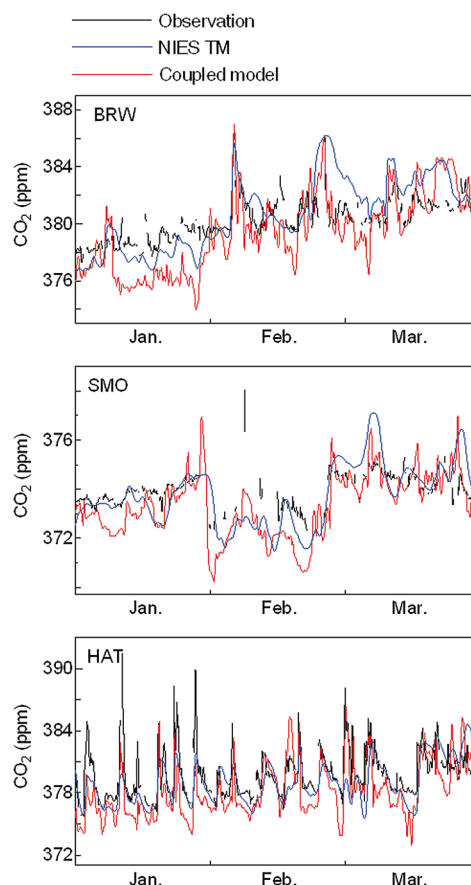


図 23 波照間の二酸化炭素モデルシミュレーション

このように、従来のグリッド型モデルより、トラジェクトリーを用いる新たなモデルの方が詳細な濃度変動に追従できる可能性を持っていることがわかった。ピークの詳細な一致度は季節によっても異なっていることから、トラジェクトリーライン上でのソースやシンクの精度が関連していることが想定され、このことから逆に、発生源密度や吸収速度見積についての情報が得られる可能性があると考えられた。

3.3.2 一酸化炭素

一酸化炭素の放出量と放出源の逆推定については、2005年3月に行われた集中観測で得られた8地点における地表観測データと領域化学輸送モデルを組み合わせることで行われた。一酸化炭素の排出については、2001年にNASA等によって行われた大規模航空機観測 (TRACE-P) で、中国からの排出が約40-50%過小評価であることが明らかとなったが、その後の情報は報告されていなかった。また、中国の急速な経済発展により、窒素酸化物の排出が急増していることが分かっているが、一酸化炭素についても懸念がもたれていた。逆計算で求められた、2005年における中国の排出量は165Tg/yrであり、2001年と比較して15%の伸びが認められた。また、伸びが認められる地域は、中国沿岸の北京から上海にかけてのエリアであった。窒素酸化物と比較しても小さな伸びであるが、エネルギー使用量増加により、生物燃料から石油・電気等へ利用エネルギーのシフトが起こったためと考えられる。また、MOPITT衛星センサーから得られた中国上空における一酸化炭素のカラム量の変化も、2001年から2005年にかけて、同様の微増傾向を示し、逆推計された放出量の推移と衛星から得られた濃度の推移が良く一致していることが明らかとなり、モデル、衛星、インベントリーの三者に整合的な結果が得られた (図24)。

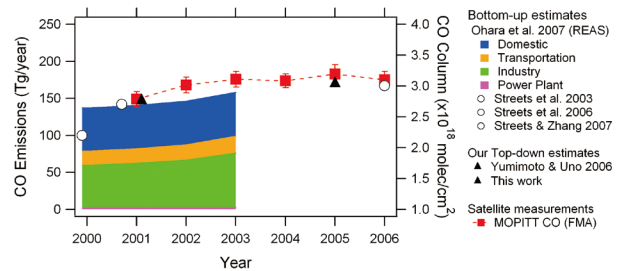


図24 (左) 逆推計モデル (本研究による2005年と2001年の▲)、排出インベントリー (Streets et al.: 2000年、2001年、2006年の○; Ohara et al.: 2000-2003年のカラーグラフ。青: 民生セクター、橙: 輸送セクター、緑: 工業セクター、ピンク: 発電セクター) による中国からの一酸化炭素排出量の推移と、MOPITT衛星センサー (赤線) によって観測された中国上空における一酸化炭素の気柱全量の推移。(右) 一酸化炭素排出量の当初推計結果と逆推計結果との差分 (単位は $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$)。都市部で当初推計値より増加していることが分かる。

3.3.3 対流圏オゾン

日本の清浄地域における春季対流圏オゾンのトレンドを1998年から2006年まで過去10年間にわたって調べたところ、離島などの地上では統計的に有意ではない一方、標高の高い山岳地域では顕著な増加傾向が見られた。特に、長野県・八方尾根における春季の対流圏オゾンのトレンドには、年率1 ppbvの平均濃度の増加が有意に見られた。また、2003年以降、高濃度オゾンが観測された日数が増えていることが分かった。領域化学輸送モデルによるシミュレーションは概して観測された傾向をよく再現したが、八方尾根における増加傾向は約半分しか再現されなかった (図25)。観測とモデルの不一致は、モデルがアジア大陸からの人為起源排出量が生成したオゾンの輸送量を過小評価している可能性があり、成長著

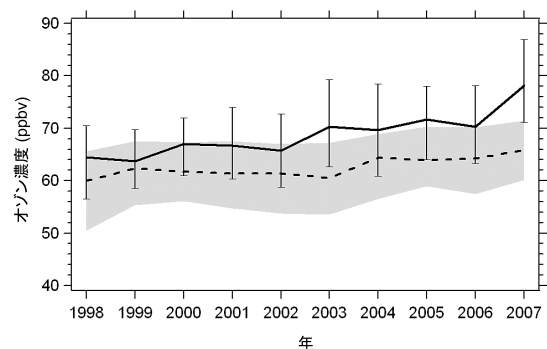


図25 八方尾根における春季対流圏オゾンのトレンド。実線は観測、破線はモデルの結果を示し、観測のエラーバーとモデルのハッチは四分位数範囲を示す。

しい東アジア地域からの越境汚染の影響が今後引き続き注目される。

4. まとめ

これまでの観測による温室効果ガス濃度変動の解析結果として、継続的な二酸化炭素、 N_2O 、代替フロンなどの増加が示された。メタンに関しては2007年以降、濃度上昇が見られた。

アジア地域を観測対象としている観点から解析して行くと、二酸化炭素やある種のフロンの急激なアジア地域の放出量の増加が検出されてきた。

グローバルな二酸化炭素収支観測では、陸域での変動は依然大きかった。ただし、二酸化炭素吸収長期トレンドは二酸化炭素濃度増加による施肥効果により増加傾向にあり、これは海洋でのフラックス観測とも同調的であった。

森林における吸収量の長期観測はまだ不十分であるが、気象との関わりが大きいかことや一般に温度に同調してNEPの増加が有りうることがわかった。一方で自然攪乱がおこると3年程度の放出が起こることがわかった。アジアでも寒冷な地域の炭素蓄積は重要であり、そういった場所も含め、土壌呼吸（有機物分解）速度の気候影響による炭素放出フィードバックが重要であると考えられた。

今後、全体の吸収の時系列の変動などが大気の変動とどのように関連し、収支を変化させるのにどの程度寄与しているのかを解析するために観測を継続する。

引用文献

- 1) Matsueda H., Machida T., Sawa Y., Nakagawa Y., Hirotsu K., Ikeda H., Kondo N., Goto K. (2008) Evaluation of atmospheric CO_2 measurements from new flask air sampling of JAL airliner observations. *Pap. Meteorol. Geophys.* (気象研究所研究報告), 59, 1-17
- 2) Tohjima, Y., H. Mukai, Y. Nojiri, H. Yamagishi, and T. Machida (2008), Atmospheric O_2/N_2 measurements at two Japanese sites: estimation of global oceanic and land biotic carbon sinks and analysis of the variations in atmospheric potential oxygen (APO), *Tellus*, doi:10.1111/j.1600-0889.2007.00334.x.
- 3) Terao, Y., Mukai H., Nojiri Y., Machida T., Tohjima Y., Saeki T., Maksyutov S. (2011) Interannual variability and trends in atmospheric methane over the western Pacific from 1994 to 2010, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2010JD015467
- 4) Yamagishi, H., Y. Tohjima, H. Mukai, and K. Sasooka (2008), Detection of regional scale sea-to-air oxygen emission related to spring bloom near Japan by using in-situ measurements of the atmospheric oxygen/nitrogen ratio, *Atmos. Chem. Phys.*, 8(12), 3325-3335.
- 5) Maksyutov S., Belikov D., et al. (2007) Application of the transport model for inverse modeling studies of the regional and global budgets of CO_2 , NIES Supercomputer Annual Report 2007. CGER NIES, Tsukuba, Japan, submitted.
- 6) Stohl A., Hittenberger, M., Wotawa G. (1998) Validation of the Lagrangian particle dispersion model FLEXPART against large scale tracer experiments. *Atmos. Environ.*, 32, 4245-4264.

Ⅲ. 中核研究プロジェクト2：衛星利用による二酸化炭素等の観測と全球炭素収支分布の推定

1. 研究の目的と経緯

温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOSAT) プロジェクトは、環境省・国立環境研究所(NIES)・宇宙航空研究開発機構(JAXA)の三者共同プロジェクトである。京都議定書の第一約束期間(2008年～2012年)に、衛星に搭載した観測装置により太陽光の地表面反射光を分光測定してSN比300以上を達成し(JAXA目標)、二酸化炭素とメタンのカラム量(地上から鉛直上方に大気上端まで延ばした大気柱内に存在する気体分子の総量)を雲・エアロゾルのない条件下で高精度で観測する(1000km四方の空間平均と3ヶ月間の時間平均で二酸化炭素については相対誤差1%、メタンについては相対誤差2%を目標としている)。これら全球の観測結果と地上での直接観測データを用いることにより、インバースモデル解析に基づく全球の炭素収支分布の算出誤差を地上データのみを用いた場合と比較して半減することを目標としている。本研究におけるインバースモデル解析とは、大気輸送モデルの逆計算によって、観測された全球の二酸化炭素の濃度分布とその時間変動(季節変化等)を説明するように地域別の二酸化炭素のネット吸収・排出量を推定する解析を指す。

本中核研究プロジェクトではこの目標達成に向けて、種々な観測条件下において取得されたデータに対して、雲・エアロゾル・地表面高度などの誤差要因を補正し、高精度で二酸化炭素・メタンのカラム量を導出することを目的に、衛星観測データの定常処理アルゴリズムを開発する。衛星打ち上げ前には、数値シミュレーションに基づいてデータ処理アルゴリズムを開発し、航空機や地上で取得する模擬データや直接観測データによりアルゴリズムの精度を評価し改良する。また、衛星打ち上げ後は、データ処理の結果を直接測定・遠隔計測データにより検証し、データ処理アルゴリズムの更なる改良を行う。また、この衛星観測データと地上での各種の直接測定データとを利用して、全球の炭素収支推定分布の時空間分解能と推定精度を向上することを目的にインバースモデルを開発し、データ解析を行う。

以上の研究目的を達成するために、本プロジェクトでは、以下の三つのグループにより研究を実施した。

1) 衛星観測データの処理アルゴリズム開発・改良研究

2) 地上観測・航空機等観測実験による温室効果ガス導出手法の実証的研究

3) 全球炭素収支推定モデルの開発・利用研究

なお、本プロジェクトが2006年度より開始されるまでに、2004年度より2006年度までの3年間、地球環境研究総合推進費により「温室効果ガス観測衛星データの解析手法高度化と利用に関する研究」が実施された。当研究(以下、「推進費による研究」)は、国立環境研究所を中心に、気象研究所、産業技術総合研究所、東京大学、京都大学、名古屋大学、筑波大学、東北大学、海洋科学技術センター地球フロンティア研究システムを研究分担者として研究が実施された。本プロジェクトの開始年度は推進費による研究の最終年度にあたり、その研究成果を受けて、当中核プロジェクトが開始された。推進費による研究では、温室効果ガスを対象とした衛星観測データ全般を対象に、雲・エアロゾルの影響がある衛星観測データから高精度に温室効果ガスのカラム量を導出する解析手法の検討を行った。当プロジェクトのこれまでの研究成果の一つである「巻雲存在下の温室効果ガスカラム量の2ステップ導出手法」は、推進費による研究で検討されていた3ステップ法を改良して得られたものである。推進費による研究では、実際に衛星によって観測されるデータの特徴を把握するため、類似仕様のセンサ(地上試験モデル)を地上設置及び航空機に搭載して模擬観測データを取得し、その解析手法の開発と実証を行った。開発しているカラム量解析手法の妥当性を検証するための実験は推進費の最終年度(当プロジェクトの初年度)に実施したが、その詳細なデータ解析は当プロジェクトの2年度目に行った。更に、推進費による研究では大気輸送モデル計算への衛星観測データの利用手法(データ同化手法)の開発研究を行った。以上のように、当プロジェクトの先行研究として推進費による研究が行われた。当プロジェクトでは、GOSATに特化した研究として、より精緻な実用化を目指した。

また、当課題の研究期間5年間のうち、3年度目にあたる2008年度末(2009年1月23日)にGOSATは無事に打ち上げられ、初期校正作業の後に、2009年4月以降の観測データが蓄積されたため、4年度目と5年度目には実観測データの解析と検証、検証に基づく解析手

法の改良研究を実施した。当研究で開発された手法に基づく二酸化炭素とメタンのカラム量のプロダクト (V00.50等) は2010年2月に、その改良版のプロダクト (V01.xx) は2010年8月より登録研究者と一般に公開されている。また、その解析結果と地上観測データを併せて用いた地域別の二酸化炭素のネット吸収・排出量の推定については、2009年の地上観測データが当研究期間中に入手できなかったため、過去の地土観測データの外挿値を作成して、本研究課題の最終年度に予備解析まで実施した。

2. 研究の成果

当プロジェクトで研究を実施した三つの研究グループごとに、5年間の研究により得られた主要な成果を紹介する。

2.1 衛星観測データの処理アルゴリズム開発・改良研究

衛星打ち上げ前は、GOSATの観測するデータを処理して二酸化炭素 (CO₂) 及びメタン (CH₄) のカラム量を導出するためのアルゴリズムの開発、それらにより導出されるCO₂及びCH₄のカラム量の誤差評価を、数値シミュレーションを中心に実施した。

衛星打ち上げ後は、開発したデータ解析手法をGOSATによる実観測データに適用し、解析を進めるとともに、実データ解析を通じて判明した問題点を解決すべく、データ解析手法の改良を実施した。

2.1.1 温室効果ガスカラム量導出アルゴリズムの開発

衛星打ち上げ前に温室効果ガスカラム量導出アルゴリズムを開発し、数値シミュレーションにより誤差評価を行った。

GOSATには温室効果ガス観測センサ (TANSO-FTS; 図26に観測波数範囲を示す) と雲・エアロソルセンサ (TANSO-CAI) が搭載されている。温室効果ガスカラム量導出の対象となる晴天の事例は、TANSO-CAIを用いて判断される。しかし、TANSO-CAIによってTANSO-FTSの観測視野内に雲が全く存在しないと判断されても、実際にはTANSO-CAIが検知できない薄い巻雲が存在する可能性がある。巻雲による散乱光は、実効的な光路長を短くする働きがあるため、その存在を無視してカラム量を導出すると、負のバイアスを生じる。巻雲を検知し、巻雲が存在する事例を解析対象から外すか、巻雲の影響を考慮したカラム量導出を行う必要がある。そこで、TANSO-FTSバンド3に含まれる水蒸気飽和帯を用いた巻雲の検知手法を開発した。一般に巻雲は高高度に存在し、それよりも上層には水蒸気がほとんど含まれない。そのため、上空に目立った散乱物質がない場合には入射した太陽光がすべて吸収されてしまうような水蒸気飽和帯であっても、巻雲が存在する場合には巻雲による反射光が水蒸気にほとんど吸収されずに衛星で観測される。水蒸気飽和帯で有意な信号が観測されるか否かで巻雲が存在するかどうかを判断することができる。これに加え、濃度が既知である酸素の吸収帯 (0.76 μm帯: TANSO-FTSバンド1) を利用することで、巻

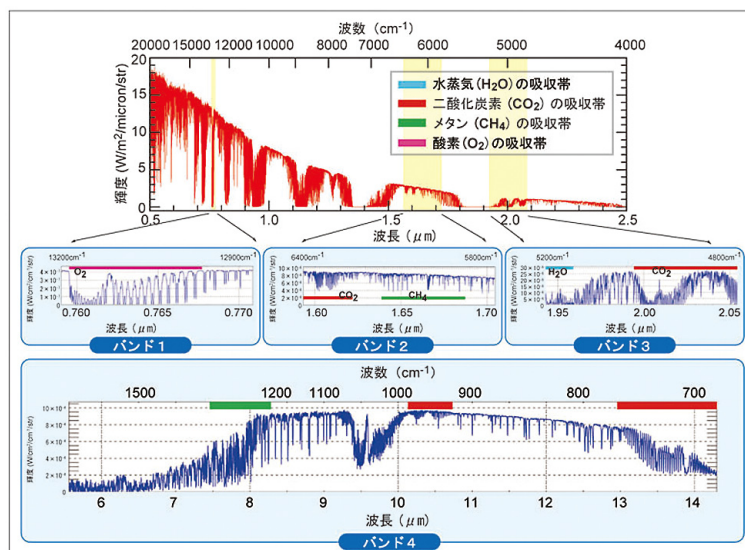


図26 TANSO-FTSが観測したスペクトルの例と、そこに現れた二酸化炭素やメタンの吸収帯。一番上のスペクトルはシミュレーション、各バンドのスペクトルはGOSATによる実観測データ。

雲の存在高度や光学的厚さ、有効粒径の推定が可能である。これらの巻雲物理量が得られれば、巻雲の存在する事例に対してもその影響を考慮したカラム量導出が可能である。

そこで、次のような逐次的なアルゴリズムを開発した。
 [STEP 1] TANSO-FTS バンド1とバンド3の水蒸気飽和帯から、巻雲の雲頂気圧、光学的厚さ、有効粒径と、エアロゾル光学的厚さ、およびバンド1の地表面アルベドを推定する。

[STEP 2-CO₂] STEP 1で求められた雲頂気圧、有効粒径を持つ巻雲が存在する大気に対し、TANSO-FTS バンド2のCO₂吸収帯からCO₂カラム量、エアロゾル光学的厚さ、巻雲光学的厚さ、および地表面アルベドを推定する。

[STEP 2-CH₄] STEP 1で求められた雲頂気圧、有効粒径を持つ巻雲が存在する大気に対し、TANSO-FTS バンド2のCH₄吸収帯からCH₄カラム量、水蒸気カラム量、エアロゾル光学的厚さ、巻雲光学的厚さ、および地表面アルベドを推定する。

なお、求める物理量は Maximum A Posteriori (MAP) 解析法¹⁾ による評価関数を最小とする解で与えられるとし、Levenberg-Marquardt 法の発展形である trust region 法を用いて推定する。

開発したアルゴリズムに対し、数値シミュレーションによりエアロゾル・巻雲・地表面アルベド等の条件を変えた大気場に対して模擬観測スペクトルを作成し、カラム量推定誤差を評価した。同一の観測条件に対して10パターンの異なる観測ノイズを加えた模擬観測スペクトルを用意し、カラム量推定処理を行った。なお、ノイズレベルは実際の装置特性を参考に決めている。カラム量の真値と推定値との差の平均値と最大値、最小値の一例を図27に示す。多くの場合、カラム量推定誤差は目標精度である1%以内であるが、砂塵粒子が豊富にあるような条件では推定誤差が大きくなる。晴天域に対してはTANSO-CAI からエアロゾル情報が得られるため、カラム量導出精度を議論する補助情報となることが期待される。

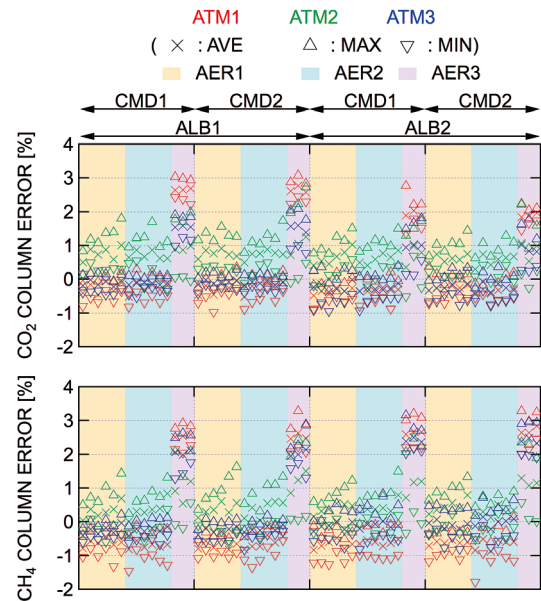


図27 数値シミュレーションによる二酸化炭素、メタンカラム量推定誤差の評価の一例。ATMは大気プロファイル、AERはエアロゾルの種類、CMDは巻雲の有効粒径、ALBは地表面アルベドの違いを表す。AERの区分内で複数の事例があるのは、巻雲とエアロゾルの光学的厚さを変えているため。AER3が砂塵粒子に対応する。

2.1.2 GOSAT 実観測データへの適用とアルゴリズム改良^{2,3)}

GOSATは2009年1月23日に打ち上げられ、同4月10日に定常運用へ移行し、定常的な観測を開始した。実観測データに対して前節で示したカラム量導出アルゴリズムを適用したところ、STEP 1で適切な解が得られないことが判明した。原因としては、観測スペクトルの校正が不十分であること、解析で使用している酸素分子の吸収線形を Voigt 線形としたことによる誤差などが挙げられる。そこで、巻雲が存在する事例を解析対象から除外し、巻雲が存在しないと仮定してSTEP 2-CO₂、STEP 2-CH₄を用いてカラム量導出を行った。図28は同5月28日に初期解析結果として発表した、陸上晴天域のCO₂とCH₄のカラム平均濃度(対象気体のカラム量の乾燥大気のカラム量に対する比)の全球分布である²⁾。この時期の特徴として、CO₂、CH₄ともに北半球で高濃度、南半球で低濃度という傾向がとらえられていることがわかる。北アフリカや中国に見られる極端に高濃度な点は、砂塵粒子や黄砂の影響による誤差である可能性も高い。その後、導出結果の品質を判定する手法を確立し、良品データをもとめたプロダクトを2010年2月に公開開始した。ただし、TANSO-CAIによるエア

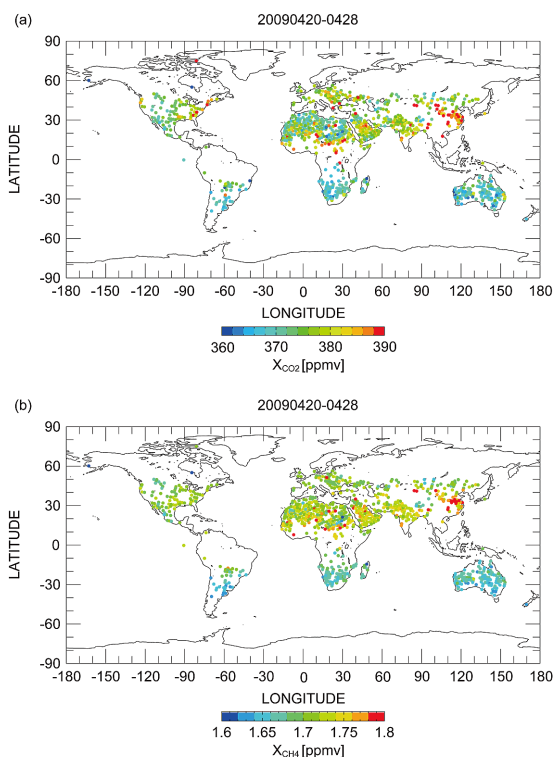


図28 GOSATによる二酸化炭素カラム平均濃度 (X_{CO_2})、メタンカラム平均濃度 (X_{CH_4}) の初期解析結果。

ロゾル情報は使用できる段階になく（外部の共同研究機関がエアロゾル情報の抽出利用開発を担当したが、当研究実施期間中には開発が完了しなかった）、砂塵粒子に起因すると考えられる極端な高濃度や、巻雲の検知が不十分なことに起因すると考えられる極端な低濃度を示すデータを完全には除去できなかった。

これらの問題に対応すべく、アルゴリズムの改良研究を行った。巻雲の検知は、地表面散乱の影響を受けにくいチャンネルの選択と、閾値の調整を行うことで、検出精度の向上を図った。TANSO-CAIによるエアロゾル情報が未だ得られないため、砂塵粒子の影響を受けている事例のみを適切に除く、ということができない。そこで、TANSO-FTSバンド1から地表面気圧を推定し、そこから計算される乾燥大気カラム量と CO_2 、 CH_4 のカラム量の比を取ることで、両方のカラム量に生じているエアロゾルの影響の大半を打消し、より精度の高いカラム平均濃度を求めることとした。なお、TANSO-FTSバンド1を利用するには、先に述べた酸素分子の吸収線形をより精度よく計算する必要があるため、**line-mixing, collision-induced absorption**^{4,5)}を組み込んだ。ちなみに、解析結果には大きく影響はしないものの、 CO_2 に対しても **line-mixing**⁶⁾を組み込んだ。加えて、使用していた CH_4 の吸

収断面積データベース⁷⁾には吸収の大きな線でバイアスが生じている可能性が示唆されたため、異なるデータベース⁸⁾に差し替えた。さらに、 CO_2 と CH_4 のカラム量を TANSO-FTS バンド2のそれぞれの吸収帯のスペクトルデータを利用して別々に推定していたが、観測データから一度により多くの情報量を得るため、両方のスペクトルデータを使用して CO_2 と CH_4 を同時推定することとした。

これらの改良を施したアルゴリズム³⁾を用いて解析を行った結果を図29、30に示す。砂塵粒子、巻雲に起因する極端な高・低濃度バイアスを持つデータがほとんどないことがわかる。大気輸送モデルの結果と比較すると、導出値は過小評価傾向にあり、季節変化の振幅や南北勾配は過大に評価する傾向にあるものの、これら温室効果ガス濃度の変動の特徴を捉えることができていることがわかる。

2.2 地上観測・航空機等観測実験による温室効果ガス導出手法の実証的研究

2.2.1 衛星センサの地上試験モデルを用いた高所観測実験によるカラム量の導出精度確認

衛星観測データから CO_2 カラム量を導出するアルゴリズムの妥当性を衛星打ち上げ前に評価するために、筑波山山頂付近 (36.2°N, 140.1°E, 標高約 800 m) に衛星センサと類似した仕様の地上試験モデル (BBM) を設置し、太陽の地表面反射光を観測すると同時に、観測光路中の CO_2 カラム量の状況を知るために CO_2 濃度計を小型航空機 (セスナ) に搭載して高度約 3 km までの CO_2 濃度プロファイル (in-situ データの取得) の直接観測を行う実験を 2006 年 12 月に実施した。その際、カラム量導出の誤差要因の一つである境界層内のエアロゾルの実態把握のため、スカイラジオメータとライダー (波長 355 nm) によるエアロゾル観測を併せて実施した。当フィールド観測の概要を図31に示す。

具体的には以下のように機器を配置し、観測を実施した。

- a) BBM を筑波山ケーブルカー山頂駅の駅舎 2 階に設置した。
- b) 筑波山旧気象測候所には、 CO_2 in-situ 測定装置、スカイラジオメータを設置し、全天カメラによる雲画像撮影を実施した。
- c) BBM 観測ターゲットにおいて、地表面反射率を測定した。
- d) BBM 観測ターゲット近郊の桜川市役所真壁庁舎には、 CO_2 in-situ 測定装置、ス

カイラジオメータ、気象測器、ライダーを設置して連続観測を行い、また、全天カメラによる雲画像撮影を実施した。BBMによる地表面散乱光観測時の観測光路をできるだけ重ねるようにして、セスナ搭載 CO₂ in-situ 測定を行った。セスナでは同時に、気温、気圧、湿度の高度分布を測定した。観測実験による解析及び検討結果の概要を以下に示す。

セスナ観測から、日によっては午前中に地表付近に高濃度の CO₂ が蓄積していることがあるものの、対流活動が活発化するにつれ上空のより低濃度の CO₂ と混合し、正午頃には大気境界層内で高度方向にはほぼ一様な CO₂ 濃度分布となる様子が見られた。

CO₂ カラム量推定の際、使用した太陽放射スペクトルの Fraunhofer 線の位置・強度に不備が見つかったた

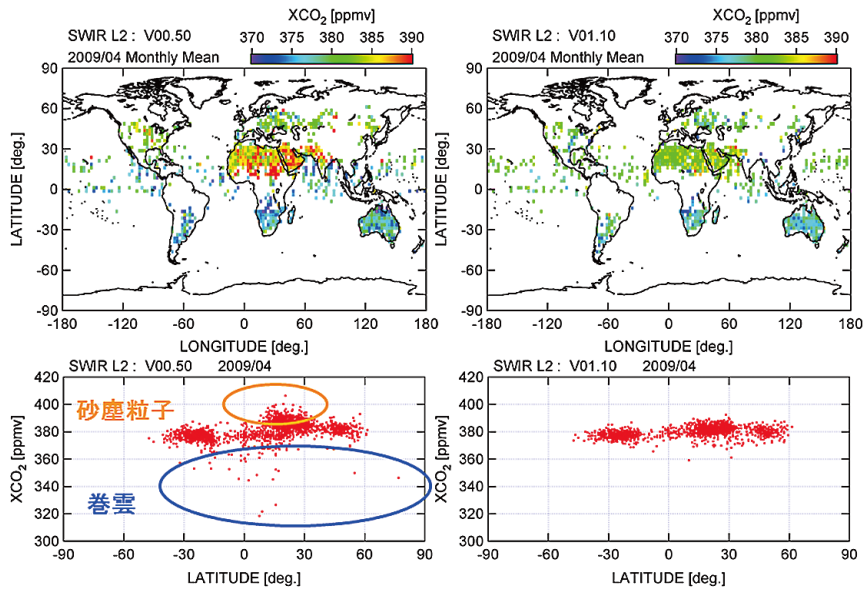


図 29 アルゴリズム改訂前後における XCO₂ 導出結果の比較。左)改訂前(V00.50)、右)改訂後(V01.10)。改訂後には砂塵粒子や巻雲による極端な高・低濃度バイアスを持つデータが減少した。

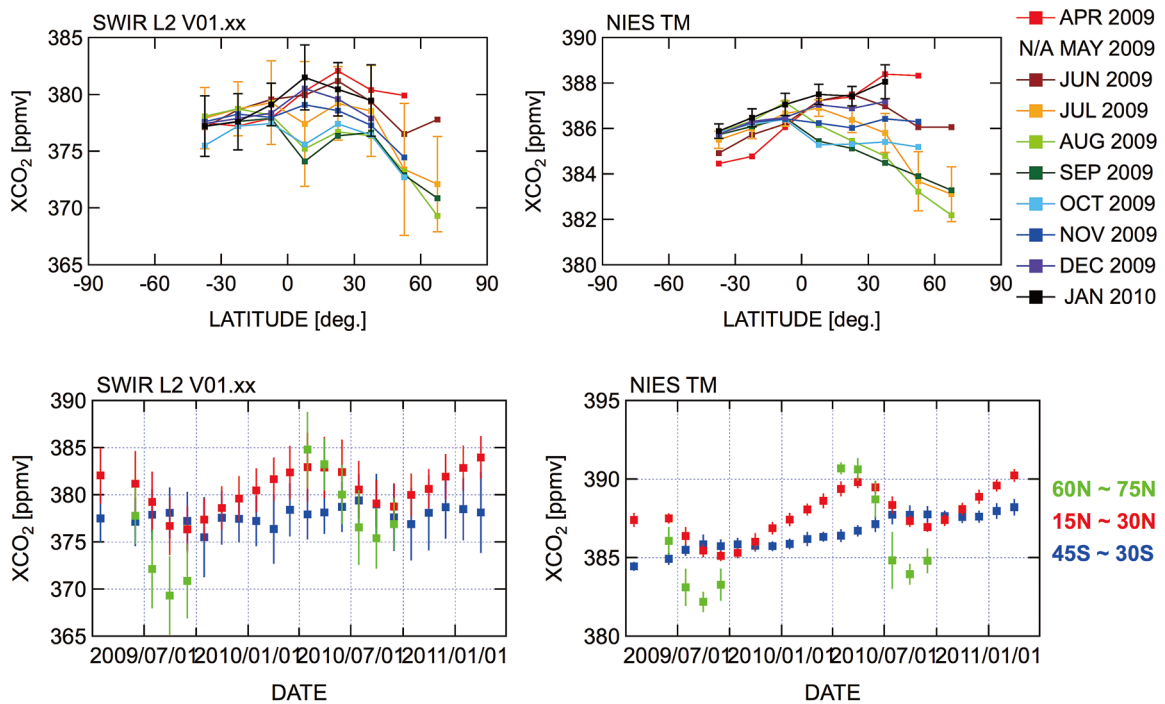


図 30 改良後のアルゴリズム (SWIR L2 V01.xx) による XCO₂ の帯状平均値とその時間変化。参考として、大気輸送モデル (NIES TM) による結果も合わせて示す。

2.2.2 地上設置高分解能フーリエ変換分光器による二酸化炭素カラム平均濃度の推定検討と衛星データの検証

衛星観測データの解析結果は、そのバラツキとバイアスを評価する必要がある。それをデータプロダクトの「検証」と呼んでいる。検証には、衛星観測データの導出結果よりも精度の高い測定器による極力近い場所と時刻に取得された観測結果と比較する必要がある。カラム量の検証として有効な計測手段として、地上設置の高分解能フーリエ変換分光器によるカラム平均濃度の取得が挙げられる。GOSATは、3日に1回つくば上空を通過するため、つくばに設置されている地上高分解能フーリエ変換分光計を検証観測装置として利用した。

国立環境研究所では、地上高分解能フーリエ変換分光計(FTS, Bruker IFS 120HR, 以下、地上設置 FTS とよぶ。)を用いて太陽直達光スペクトルを定常的に観測している。はじめに、地上設置 FTS の $1.6 \mu\text{m}$ 帯の CO_2 吸収スペクトルの解析から CO_2 カラム平均濃度 XCO_2 (CO_2 カラム量 / 乾燥空気のカラム量) の導出を行った。リトリーバル解析によって CO_2 濃度の鉛直分布が得られ、そこからカラム量が計算されるが、 CO_2 カラム量の変動は、大気中の CO_2 濃度の変動以外にも気圧の変動によっても起こる。地表における気圧の変動は数日で 3% 程度にも及ぶため、これに伴って CO_2 カラム量についても同程度の変動が起こり得る。そこで、 CO_2 カラム量を乾燥空気のカラム量で割り、鉛直方向に平均化された CO_2 濃度 (CO_2 カラム平均濃度 XCO_2) に変換することによって気圧変動の影響を補正した。ここで、乾燥空気のカラム量は、解析に用いた高層気象台(館野)のレーウィンゾンデ観測値と NCEP 再解析データの気圧及び気温の鉛直分布から得られる全空気カラム量から、同じスペクトルから CO_2 と同時に導出された水蒸気のカラム量を除くことによって求めた。

得られた結果を in-situ 航空機観測の結果(高度 3 km まで、それより高い高度はモデル計算値を使用)と比較し、FTS 観測から求めた XCO_2 の精度を評価した。ここで、両者を定量的に比較するために Rodgers and Connor の方法⁹⁾により、in-situ で観測された CO_2 濃度が FTS ではどのように観測されるかを FTS の Averaging kernel 行列と先験値を用いて求めた。その結果を in-situ で観測された CO_2 カラム平均濃度とみなし FTS 観測から得られた CO_2 カラム平均濃度と比較した結果、両者は 1%

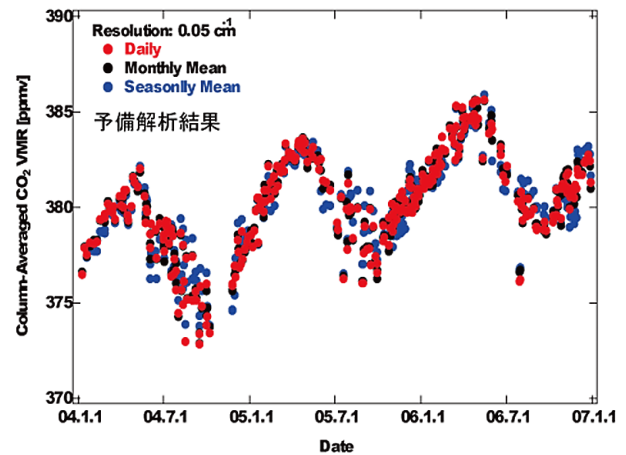


図 33 GOSAT データプロダクトの検証に利用する予定の地上設置高分解能フーリエ変換分光計による XCO_2 の推定例(予備解析結果)。導出された XCO_2 は初期推定値依存性が小さいことが解る。

の範囲内で一致した。

図 33 に初期推定値として日平均値、月平均値、季節平均値のそれぞれを用いた場合の CO_2 カラム平均濃度の予備解析結果を示す。これらから、初期推定値への依存性は小さく、安定して CO_2 カラム平均濃度が求められることが確認された。

図 33 の CO_2 カラム平均濃度の時系列からは明瞭な季節変動や経年変動が観測された。更に CO_2 カラム平均濃度の時系列に対してフィッティングを行い、季節変動および経年変動成分を求めた。観測値とフィッティングカーブとの残差の標準偏差は 0.8 ppm 程度で、地上設置高分解能フーリエ変換分光器が GOSAT の検証観測装置として有効であることが示された¹⁰⁾。

次に GOSAT による XCO_2 と CH_4 カラム平均濃度 (XCH_4) のデータ質の検証対象として、地上設置高分解能フーリエ変換分光計観測網である全炭素カラム量観測ネットワーク (Total Carbon Column Observing Network, TCCON)¹¹⁾ で取得されたデータを用いた。現在全球で 10 カ所以上の地点で、同一の観測条件で観測が行われ、共通の解析プログラムを用いて XCO_2 及び XCH_4 が導出されている。WMO スケールで値付けされた航空機観測によって取得された CO_2 や CH_4 濃度の高度分布を用いて、TCCON で導出される XCO_2 及び XCH_4 は校正される。校正後の TCCON データの不確かさは XCO_2 で約 0.8 ppm (約 0.2%)、 XCH_4 で約 4 ppb (約 0.2%) である¹²⁾。

また、GOSAT データの検証解析条件を以下のように定めた。図 34 に示す世界 9 カ所の TCCON 観測地点の

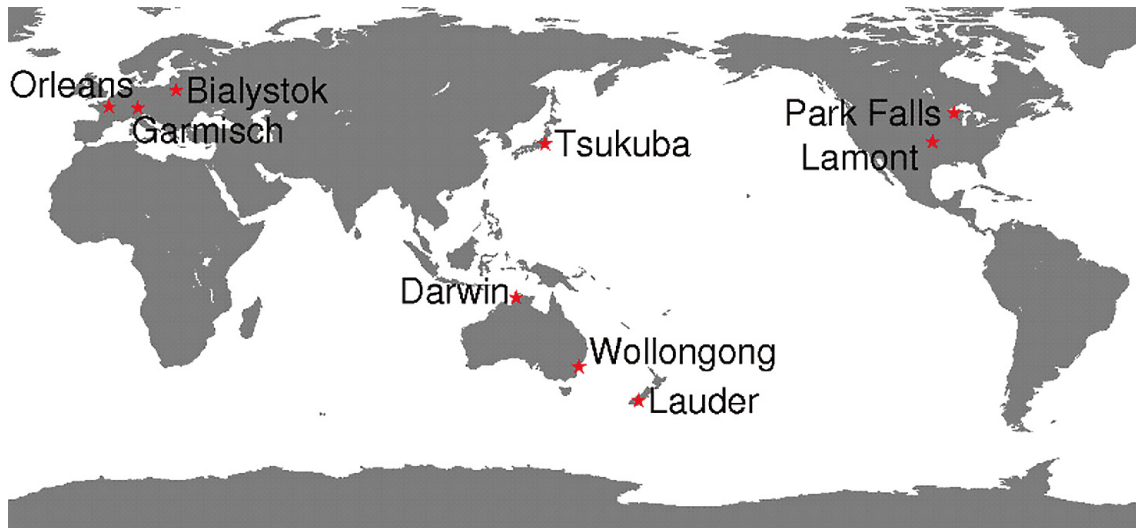


図34 GOSAT データの検証に用いた TCCON 観測地点 (★)

データを用いて、TCCON 観測地点周辺の GOSAT データについて検証を行った。

各 TCCON 観測地点において、GOSAT 通過時刻の前後一定の時間以内の TCCON データの平均値とバラツキ (1σ) を参照データとした。GOSAT データは、TCCON 観測地点を中心に一定の範囲の緯度 / 経度の正方形内のデータを対象とした。

以上の、TCCON 観測地点周辺の GOSAT データの検証結果は下記の通りである¹³⁾。GOSAT 通過時間の ± 30 分平均の 9ヶ所の TCCON データと $0.5 \sim 1.5^\circ$ の矩形内の GOSAT データとの比較結果について、図 35 に X_{CO_2} 、図 36 に X_{CH_4} の散布図を示す。同期データセット数は 62 であり、GOSAT の X_{CO_2} はバイアスが -8.85 ppm (2.29%)、バラツキが 4.75 ppm (1.23%)、 X_{CH_4} はバイアスが -20.4 ppb (1.15%)、バラツキが 18.9 ppb (1.06%) であった。

この比較の他に、同期条件を緩め、GOSAT 通過時刻の ± 60 分平均の 9カ所の TCCON データと TCCON 観測地点を中心に ± 2 度、 ± 5 度の緯度 / 経度の正方形内のデータの比較結果を求めた。GOSAT データが TCCON 観測地点を中心に ± 2 度の範囲の場合、同期データセット数は 256 となり、 X_{CO_2} はバイアスが -8.87 ppm (2.21%)、バラツキが 4.44 ppm (1.15%)、 X_{CH_4} はバイアスが -15.8 ppb (0.89%)、バラツキが 22.3 ppb (1.26%) の負のバイアスとなった。更に、GOSAT データが TCCON 観測地点を中心に ± 5 度の範囲の場合、同期データセット数は 966 となり、 X_{CO_2} はバイアスが -8.25 ppm (2.10%)、バ

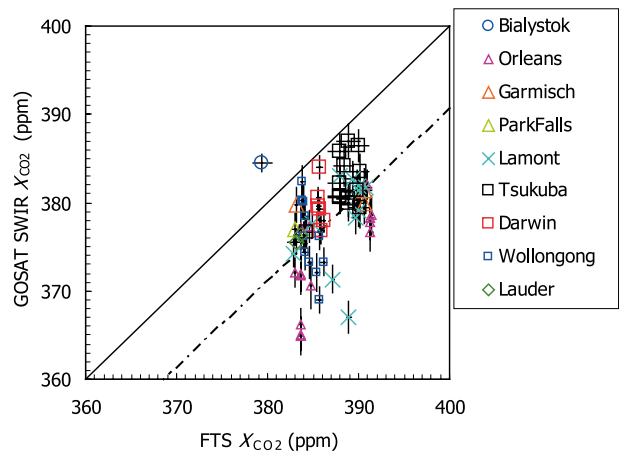


図35 TCCON 観測地点における GOSAT と TCCON の X_{CO_2} の散布図。

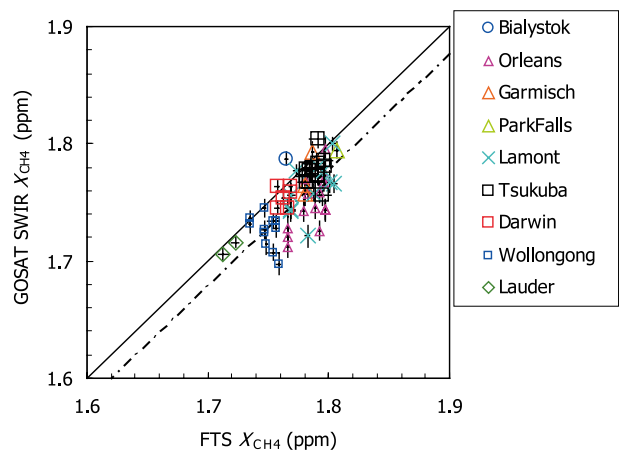


図36 TCCON 観測地点における GOSAT と TCCON の X_{CH_4} の散布図。

ラツキが 3.97 ppm (1.02%)、 XCH_4 はバイアスが -14.8 ppb (0.83%)、バラツキが 22.6 ppb (1.27%) のとなった。これらの結果から、GOSAT データとの同期範囲を変えても、GOSAT データのバイアスは XCO_2 の場合約 2%、 XCH_4 の場合約 1% の「負のバイアス」が生じており、ばらつきは共に 1% 程度であることが明らかとなった。TCCON 観測地点によるバイアスの差異は、GOSAT データのばらつきより小さいが、それらにおける傾向が見えつつある。今後詳細な検討が必要である。なお、これら負のバイアスの要因は、太陽スペクトルを含む分光パラメータ、薄い巻雲やエアロゾルによる導出誤差の影響であると考えられる。

さらに、全球の GOSAT データを緯度 15 度刻みで带状平均し、緯度分布の月別データセットを作成した。また、GOSAT が各地点を通過する予定時間（ほとんどの観測点で、現地時刻およそ 13 時 ± 30 分内）に取得された TCCON データの月平均値を計算し、GOSAT データと比較した。

これらの緯度帯別の濃度比較の結果を示す。図 37 は、2009 年 4 月における XCO_2 の緯度分布図である。GOSAT データは参照データと比べて約 9 ppm 程度低いものの、北半球で高濃度、南半球で低濃度という参照データと類似した分布を示している。北半球秋季においては濃度の緯度勾配が小さくなるが、それも GOSAT データと検証データで共通していた。一方、図 38 に示されるように、 XCH_4 は南半球より北半球で高濃度となる南北構造を持ち、 XCO_2 に比べてバイアスは小さいことがわかった。

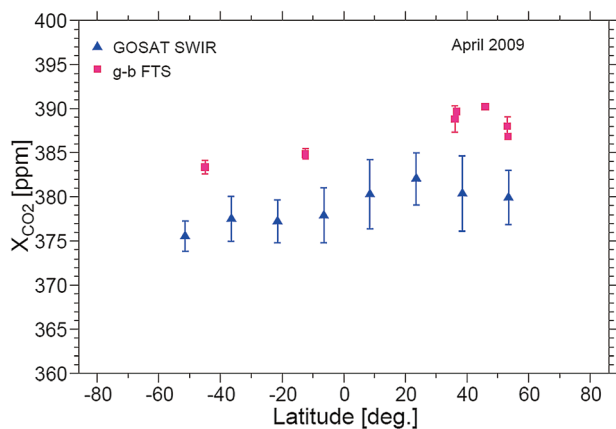


図 37 2009 年 4 月における XCO_2 の緯度分布図。▲は GOSAT データの带状平均値で、■は TCCON (g-b FTS) の月平均値である。エラーバーは月平均値からの標準偏差を表す。

2.3 全球炭素収支推定モデルの開発・利用研究

2.3.1 GOSAT データの利用による炭素収支推定の不確か性の低減

GOSAT の打ち上げに先立ち、インバースモデル解析による地表面 CO_2 収支推定の精度向上に、衛星観測によるカラム平均濃度データがどの程度貢献し得るのかについて評価を行った。この評価では、地上観測ネットワークより得られるデータ (GLOBALVIEW- CO_2 、以降 GV とする) と GOSAT 観測模擬データとの合成データを用い、 CO_2 収支量の不確か性と衛星データ利用による不確か性の低減率を求めた。GOSAT 模擬観測データは、気候学的な CO_2 地表面収支データに基づき大気輸送モデルを使用して求められた CO_2 カラム平均濃度の陸上での分布とした。得られた GOSAT 模擬観測による個々のカラム平均濃度値を経緯度 $7.5^\circ \times 7.5^\circ$ の格子ごとに月平均化し、インバースモデル解析を行った。その結果、地上観測データのみを使用した場合に比べ、GOSAT 模擬観測データと地上観測データの合成データを使用した場合には、陸域で平均 3 割程度低減するとの予想が立てられた¹⁴⁾。

インバースモデル解析によって与えられる解 (亜大陸領域ごとの CO_2 収支推定値) は、地表面収支の先験データを CO_2 観測データで最適化することにより導き出される。過去におけるインバースモデル解析の例では、上述のように気候学的地表面収支データが先験データとして普遍的に使用されていたが、収支推定値の確からしさをさらに向上させるためには、使用する先験データを、推定対象地域における CO_2 吸収・排出源の空間的分布

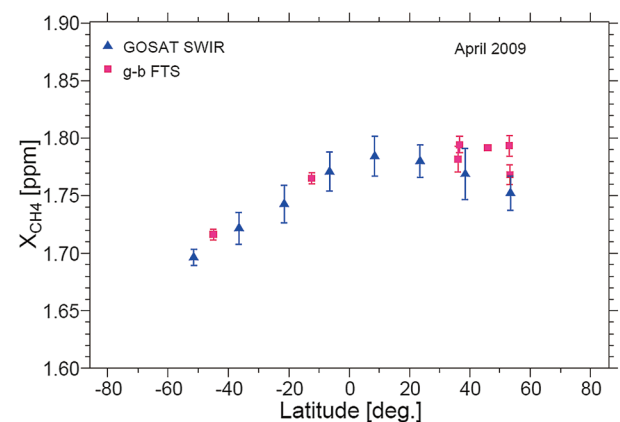


図 38 2009 年 4 月における XCH_4 の緯度分布図。▲は GOSAT データの带状平均値で、■は TCCON (g-b FTS) の月平均値である。エラーバーは月平均値からの標準偏差を表す。

(陸域の植生の広がりや人為的排出源などの地理的分布)と吸収・排出量の時間変化を適切に反映したものとなるように高精度化する必要がある。そのため、陸域植生-大気間収支先験データを与える生態系プロセスモデル VISIT¹⁵⁾ の各種植生の活動に関する主要なパラメータをバイオマス量などの地上測定データを基に最適化するスキームを構築し、また夜間光衛星観測データなどに基づいた高分解能人為的排出量データ ODIAC¹⁶⁾ に月ごとの人為的排出量情報¹⁷⁾ を結合させたデータ (図 39) を準備した。さらに、海面二酸化炭素分圧データを船舶による測定値に同化するシステムを構築し、準リアルタイムで海洋-大気間収支先験データを得るための基盤を整えた^{18,19)}。

これらの高精度化された地表面収支先験データと、打ち上げ後 2009 年 6 月から 2010 年 5 月までの 1 年分の GOSAT レベル 2 カラム平均濃度データ (V01.xx、洋上データを含む) および GV データを使用してインバースモデル解析を行い、地表面収支推定値の不確実性低減における GOSAT の貢献度を評価した。インバースモデル解析は全球を 64 分割する亜大陸領域²⁰⁾ について月単位で行った。なお、本評価を行った時点で公開されていた GV データは 2008 年分のみであったため、必要である 2009-2010 年のデータは外挿により求めた。全ての航空機観測サイト含む 139 の地上観測点での GV データを選択し、それらの月平均値を取った。また、GOSAT レベル 2 カラム平均濃度値はデータ検証結果に基づいて一律的にバイアスを補正し、それらを 5°×5°の格子ごとに月平均化した。

以上の方法に基づいて、GOSAT の実観測データを利用した場合の炭素収支推定の予備解析結果を求めた。イ

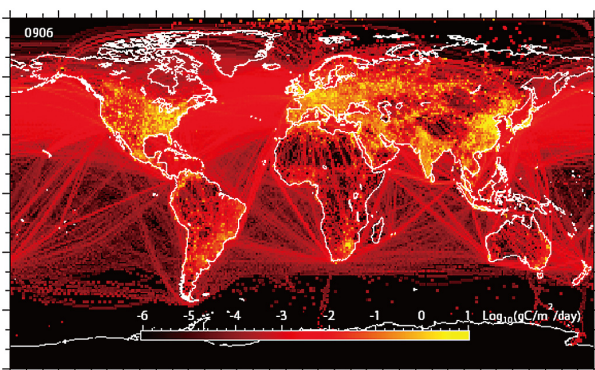


図 39 月変動を考慮した化石燃料燃焼由来の人為的排出量データ。2009 年 6 月の分布を示す。インバースモデル解析での先験データとして使用。

ンバースモデル解析による年平均 CO₂ 地表面収支推定値の不確実性の全球分布を、① GV データのみを使用した場合と、② GV データに GOSAT レベル 2 カラム平均濃度データを加えた合成データを使用した場合とでそれぞれ求めた。図 40 に GOSAT データが GV データに加ったことによる不確実性の低減率 $((1 - ② / ①) \times 100)$ を示す。地上観測ネットワークの空白域である南米、アフリカ、アジアなどにおいては、GOSAT による観測によってデータ点数が増加したことにより、最大 3 割程度不確実性が減少することがわかった。なお、以上は予備解析結果であり、改良された大気輸送モデルに基づく公開用の解析結果を 2011 年度に再計算する予定である。

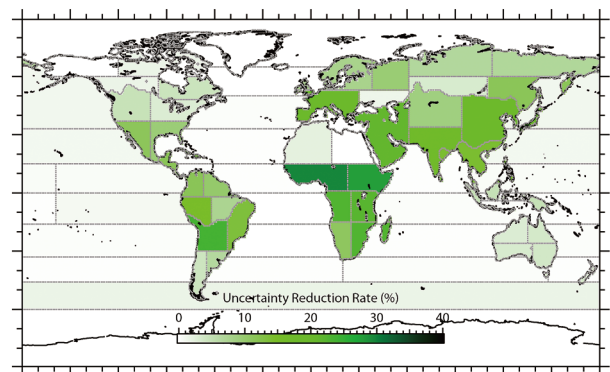


図 40 地上観測データに 2009 年 6 月から 2010 年 5 月までの 1 年分の GOSAT レベル 2 カラム平均濃度値を加えた合成データを使用した場合の、64 亜大陸領域における CO₂ 地表面収支推定値の不確実性の低減率 (年平均, 単位: %)。GLOBALVIEW-CO₂ の外挿値 (2009 ~ 2010 年) を地上観測データとして使用。

3. まとめ

当プロジェクトは、衛星観測により二酸化炭素及びメタンのカラム平均濃度のグローバルな時間・空間変動を把握し、二酸化炭素の収支変動を高精度で推定することを目標としており、そのため「いぶき」に関わる濃度算出アルゴリズムや、インバースモデルによる地球表面の地域別の二酸化炭素収支算出アルゴリズムの開発を進めた。また、GOSAT から算出される CO₂ などの検証作業のために収集・加工したデータを用いた解析を行い、実データに対する検証評価を実施し、GOSAT プロダクトにおけるバイアスとバラツキを評価した。さらに GOSAT データを利用して炭素収支推定を行うためのモデルの整備を進め、二酸化炭素カラム平均濃度の GOSAT プロダクトを利用して試験的な評価を実施した。

なお、米国の同種の観測衛星が 2009 年に打ち上げに

失敗したこともあり、GOSAT に対して世界の研究者やメディアから大きく注目されることとなった。

当プロジェクトで得られた主要な研究成果は、濃度データを導出するための開発手法の実証と検証、さらに検証に基づく手法改良と CO₂ 収支算出アルゴリズムの開発である。2011 年度以降には、GOSAT プロダクトが多くの研究者に利用され、研究成果が数多く得られることを期待したい。

引用文献

- 1) Rodgers C.D. (2000) *Inverse methods for atmospheric sounding: Theory and practice*. 238p., ISBN 981-02-2740-X, World Scientific.
- 2) Yokota T., Yoshida Y., Eguchi N., Ota Y., Tanaka T., Watanabe H., Maksyutov S. (2009) Global concentrations of CO₂ and CH₄ retrieved from GOSAT: First preliminary results. *SOLA*, 5, 160-163, doi:10.2151/sola.2009-041.
- 3) Yoshida Y., Ota Y., Eguchi N., Kikuchi N., Nobuta K., Tran H., Morino I., Yokota T. (2010) Retrieval algorithm for CO₂ and CH₄ column abundances from short-wavelength infrared spectral observations by the Greenhouse Gases Observing Satellite. *Atmos. Meas. Tech.*, 4, 717-734, doi:10.5194/amt-4-717-2011.
- 4) Tran H., Boulet C., Hartmann J.-M. (2006) Line mixing and collision-induced absorption by oxygen in the A band: Laboratory measurement, model, and tools for atmospheric spectra computations. *J. Geophys. Res.*, 111, D15210, doi:10.1029/2005JD0068669.
- 5) Tran H., Hartmann J.-M. (2008) An improved O₂ A band absorption model and its consequences for retrievals of photon paths and surface pressures. *J. Geophys. Res.*, 113, D18104, doi:10.1029/2008JD010011.
- 6) Lamouroux J., Tran H., Laraia A.L., Gamache R.R., Rothman L.S., Gordon I.E., Hartmann J.-M. (2010) Updated database plus software for line-mixing in CO₂ infrared spectra and their test using laboratory spectra in the 1.5-2.3 μm region. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 111, 2321-2331.
- 7) Lyulin O.M., Nikitin A.V., Perevalov V.I., Morino I., Yokota T., Kumazawa R., Watanabe T. (2009) Measurements of N₂- and O₂-broadening and shifting parameters of methane spectral lines in the 5550-6236 cm⁻¹ region. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 110, 654-668.
- 8) Rothman L.S., Gordon I.E., Barbe A., Chris Benner D., Bernath P.F., Birk M., Boudon V., Brown L.R., Campargue A., Champion J.-P., Chance K., Coudert L.H., Dana V., Devi V.M., Fally S., Flaud J.-M., Gamache R.R., Goldman A., Jacquemart D., Kleiner I., Lacombe N., Lafferty W.J., Mandin J.-Y., Massie S.T., Mikhailenko S.N., Miller C.E., Moazzen-Ahmadi N., Naumenko O.V., Nikitin A.V., Orphal J., Perevalov V.I., Perrin A., Predoi-Cross A., Rinsland C.P., Rotger M., Simeckova M., Smith M.A.H., Sung K., Tashkun S.A., Tennyson J., Toth R.A., Vandaele A.C., Vander Auwera J. (2009) The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 110, 533-572.
- 9) Rodgers, C.D., and Connor B.J. (2003) Intercomparison of remote sounding instruments, *J. Geophys. Res.*, 108, D3, 4116, doi:10.1029/2002JD002299.
- 10) Ohyama H., Morino I., Nagahama T., Machida T., Suto H., Oguma H., Sawa Y., Matsueda H., Sugimoto N., Nakane H., Nakagawa K. (2009) Column-averaged volume mixing ratio of CO₂ measured with ground-based Fourier transform spectrometer at Tsukuba, *J. Geophys. Res.*, 114, D18303, doi:10.1029/2008JD011465.
- 11) Wunch, D., Toon, G.C., Blavier, J.-F. L., Washenfelder, R.A., Notholt, J., Connor, B.J., Griffith, D.W. T., Sherlock, V., and Wennberg, P.O. (2011) The Total Carbon Column Observing Network (TCCON), *Philos. T. Roy. Soc. A*, 369, 2087-2112, doi:10.1098/rsta.2010.0240.
- 12) Wunch, D., Toon, G.C., Wennberg, P.O., Wofsy, S.C., Stephens, B.B., Fischer, M. L., Uchino, O., Abshire, J. B., Bernath, P., Biraud, S.C., Blavier, J.-F. L., Boone, C., Bowman, K.P., Browell, E.V., Campos, T., Connor, B. J., Daube, B.C., Deutscher, N. M., Diao, M.,

- Elkins, J. W., Gerbig, C., Gottlieb, E., Griffith, D. W. T., Hurst, D. F., Jiménez, R., Keppel-Aleks, G., Kort, E. A., Macatangay, R., Machida, T., Matsueda, H., Moore, F., Morino, I., Park, S., Robinson, J., Roehl, C. M., Sawa, Y., Sherlock, V., Sweeney, C., Tanaka, T., and Zondlo, M. A. (2010) Calibration of the Total Carbon Column Observing Network using aircraft profile data, *Atmos. Meas. Tech.*, 3, 1351–1362, doi:10.5194/amt-3-1351-2010.
- 13) Morino, I., Uchino, O., Inoue, M., Yoshida, Y., Yokota, T., Wennberg, P.O., Toon, G.C., Wunch, D., Roehl, C.M., Notholt, J., Warneke, T., Messerschmidt, J., Griffith, D.W.T., Deutscher, N.M., Sherlock, V., Connor, B., Robinson, J., Sussmann, R., and Rettinger, M. (2011) Preliminary validation of column-averaged volume mixing ratios of carbon dioxide and methane retrieved from GOSAT short-wavelength infrared spectra. *Atmos. Meas. Tech.*, 4, 1061–1076, doi:10.5194/amt-4-1061-2011.
- 14) Kadygrov, N., Maksyutov, S., Eguchi, N., Aoki, T., Nakazawa, T., Yokota, T., and Inoue, G. (2009) Role of simulated GOSAT total column CO₂ observations in surface CO₂ flux uncertainty reduction, *J. Geophys. Res.*, 114, D21208, doi:10.1029/2008JD011597.
- 15) Ito, A. (2010) Evaluation of defoliation impacts of tropical cyclones on the forest carbon budget using flux data and a process-based model. *J. Geophys. Res.*, 115, doi:10.1029/2010JG001314.
- 16) Oda, T. and Maksyutov, S. (2011) A very high-resolution (1 km × 1 km) global fossil fuel CO₂ emission inventory derived using a point source database and satellite observations of nighttime lights, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 543–556, doi:10.5194/acp-11-543-2011.
- 17) Andres, R.J., Gregg, J.S., Losey, L., Marland, G., and Boden, T.A. (2011), Monthly, global emissions of carbon dioxide from fossil fuel combustion, *Tellus*, 63B, 309–327.
- 18) Valsala, V., Maksyutov, S., and Ikeda, M. (2008) Design and Validation of an Offline Oceanic Tracer Transport Model for a Carbon Cycle Study. *J. Climate*, 21, 2752–2769. doi: 10.1175/2007JCLI2018.1.
- 19) Valsala, V. and Maksyutov, S. (2010) Simulation and assimilation of global ocean pCO₂ and air-sea CO₂ fluxes using ship observations of surface ocean pCO₂ in a simplified biogeochemical offline model. *Tellus B*, 62: 821–840. doi: 10.1111/j.1600-0889.2010.00495.x.
- 20) Patra, P.K., Maksyutov, S., Ishizawa, M., Nakazawa, T., Takahashi, T., and Ukita, J. (2005) Interannual and decadal changes in the sea-air CO₂ flux from atmospheric CO₂ inverse modeling, *Global Biogeochem. Cycles*, 19, GB4013, doi:10.1029/2004GB002257.

IV. 中核研究プロジェクト3：気候・影響・土地利用モデルの統合による地球温暖化リスクの評価

1. 研究の目的と経緯

効果的な温暖化対策を策定するためには、近未来および長期の将来に亘って人間社会および自然生態系が被る温暖化のリスクを高い信頼性で評価することが必要である。そこで、本プロジェクトは、近未来については、将来30年程度に生起すると予測される極端現象の頻度・強度の変化を含めた気候変化リスク・炭素循環変化リスクを詳細に評価し、適応策ならびに森林吸収源対策の検討や温暖化対策の動機付けに資することを目的とする。また、長期については、安定化シナリオを含む複数のシナリオに沿った将来100年程度もしくはより長期の気候変化リスク・炭素循環変化リスクを評価し、気候安定化目標ならびにその達成のための排出削減経路の検討に資することを目的とする。地球温暖化研究プログラムにおける位置付けとしては、炭素循環観測研究から得られる最新の知見を取り込みつつ、主として自然系の将来予測情報を対策評価研究に提供する。

この目的を達成するため、本プロジェクトでは、極端現象の変化を含む将来の気候変化とその人間社会および自然生態系への影響を高い信頼性で予測できる気候モデル、影響モデル、および陸域生態・土地利用モデルの開発と統合利用を行い、炭素循環変動に関する最新の研究知見も取り入れた上で、多様な排出シナリオ下での全球を対象とした温暖化リスクを、不確実性を含めて定量的に評価する。

平成18年度は、気候モデル、影響・適応モデル、陸域生態・土地利用モデルの各サブテーマについて、各モデルの開発・改良ならびに各モデルを用いた将来予測実験およびその解析を行うとともに、モデル間の結合もしくは統合利用に向けての準備作業を進めた。

平成19年度は、環境省地球環境研究総合推進費S-5「地球温暖化に係る政策支援と普及啓発のための気候変動シナリオに関する総合的研究」が開始され、その4つのテーマのうち2つで、本中核研究プロジェクトが主軸となり、国内の他の研究機関と密接に協力して研究を推進する体制が確立した。また、文部科学省「21世紀気候変動予測革新プログラム」も同時に開始され、本中核研究プロジェクトにおける気候モデル研究の一部はそこに位置づけられた。このため、これ以降平成22年度までは主に

これらの研究課題に沿う形で研究を進めた。

本報告書では、各サブテーマからのこれまでの主要な成果として、以下の各研究テーマについての成果を記述する。

サブテーマ1（気候モデル研究）

- 1) 気候モデルの改良ならびに次世代モデル実験の実施
- 2) 予測の不確実性を考慮した確率的気候変化シナリオの開発
- 3) 極端現象の発生メカニズムおよび土地利用変化・灌漑が気候に与える影響の解析
- 4) 気候シナリオと社会経済シナリオを結び付ける手法の検討

サブテーマ2（影響・適応モデル研究）

- 1) 極端現象変化及び気候モデル不確実性を考慮した水資源・健康・農業の影響評価
- 2) 気候・影響モデル結合とその予備作業としての影響評価モデル改良・検証
- 3) 専門家・メディア関係者の意見交換会の実施

サブテーマ3（陸域生態・土地利用モデル研究）

- 1) 陸域生態系モデルに関する成果
- 2) 土地利用モデルに関する成果
- 3) 陸域統合モデルに関する検討

2. 研究の成果

2.1 気候モデル研究

2.1.1 気候モデルの改良ならびに次世代モデル実験の実施

長期の気候変化の主要な不確実性の要因である雲のフィードバックについて、気候モデル間の違いを詳細に比較する手法を開発するとともに日英のモデルに適用し、日英のモデル間で雲フィードバックに違いを生じさせる仕組みを明らかにした¹⁾。また、日英の気候モデルそれぞれについて、物理パラメータをさまざまに変化させたモデルアンサンブルの結果を解析し、モデルの低層雲の再現性が気候感度の推定において重要であることを

確認した。

これと並行して、気候モデルの雲スキームの改良を行った。大気中水蒸気量の不均一性の予測と雲水の予測の計算を統合的に結合したところ、対流圏上層の雲量、雲水量の変化過程が従来よりも現実的に再現されるようになった²⁾。この新しい雲スキームの導入その他の改良を施した新モデルを旧モデルと比較したところ、気候感度に大きな違いがあることが確認された。この理由を理解するために、新旧モデルにおける雲などのフィードバックを比較する解析を行うとともに、不確実性についてより包括的な研究を行うために新モデル中の不確実パラメータを様々な変化させた物理パラメータアンサンブルの構築を開始した。

さらに、次世代モデル実験の準備として、気候モデルに火山噴火の放射強制力を与える方法を改良するとともに、IPCC 新シナリオを用いた気候モデル実験のためのエアロゾル等の排出量空間分布データを作成した。このデータはサブテーマ3の土地利用変化シナリオと共に世界の研究コミュニティに提供され、利用されている。

2.1.2 予測の不確実性を考慮した確率的気候変化シナリオの開発

年々の自然変動の不確実性を考慮した近未来の気候変化予測のための予備的解析として、初期条件の異なる10本の近未来予測実験を行い、特に極端現象の出現頻度に注目して解析を行った。この結果、大規模な火山噴火が無いなどの条件下で、気候の自然変動の不確実性を考慮しても、今後25年程度の近未来に陸上のほぼ全域において夏季の極端に暑い夜の日数が増えることなどが予測された³⁾。年平均降水量と極端な降水の強さの変化については、高緯度と熱帯では、温暖化シグナルが数十年規模の自然変動によって覆い隠される可能性は低いことがわかった。一方、亜熱帯では、数十年規模自然変動によって降水量変化の符号も代わり得ることが示された。この成果は、自然変動の不確実性を定量的に考慮した近未来の気候変化予測として発表時点で世界初の試みであった。なお、同研究に関連して公表した論文内容についてはH19年7月2日に記者発表を実施し、新聞掲載等の反響があった。

また、モデルによる気候変化予測の不確実性の定量化に向けて、複数のモデルによるデータを用いて、モデル間の気候変化予測パターンと現在気候の再現性の関係を

定量的に評価した。その結果として、熱帯域の夏季降水量および高緯度域の冬季地表気温に関する、現在気候の再現性と気候変化予測パターンの間に高い相関が得られた。すなわち、これらの要素に関して、現在気候の再現性が類似しているモデルほど、気候変化予測パターンも類似する傾向にあることが分かった⁴⁾。さらに、気候変化予測と影響評価の不確実性を定量化する手法を開発して、南米域の水資源量変化の問題を例にとり、手法の適用を試みた。複数の気候モデルによる計算結果のばらつきのうち、影響評価の対象となる変数に最も影響を与えるパターンを統計的に抽出し、そこに観測データとの一致度による制約をかけたところ、温暖化の進行により南米北東部で顕著な乾燥が起こるパターンが最も可能性が高いことが示唆された⁵⁾。この成果については次の2.1.2(1)で詳しく紹介する。

また、同様の手法を適用して、全球の気温上昇パターンの不確実性に関する解析も行った。観測データによる制約を用いると、複数モデルの単純平均は北半球高緯度の気温上昇割合を過小評価していることが示唆された。

2.1.2 (1) 気候変化予測から影響評価への不確実性伝播の解析手法開発

IPCC SRES A2シナリオにおける14の気候モデルの降水量変化、気温変化予測データ（気候変化予測）と、それを入力データとする流出量変化予測データ（影響評価）の間での不確実性伝播を解析した。ここで \mathbf{x} （空間、気候モデル）を流出量変化予測のベクトルであるとし、 \mathbf{y} （空間、気候モデル）を降水量変化・気温変化予測のベクトルであるとする（添え字は、空間分布およびマルチ気候モデルの自由度を持つベクトルであることを表す）。ただし \mathbf{x} 、 \mathbf{y} とも各空間グリッドでモデル平均を引いて、さらに各気候モデルの全球平均気温変化で正規化している。 \mathbf{x} と \mathbf{y} の共分散行列を \mathbf{C}_{xy} とする。 \mathbf{C}_{xy} を $\mathbf{C}_{xy} = \mathbf{p}_x^T \Sigma \mathbf{p}_y$ と特異値分解する。ここで Σ は特異値で、 \mathbf{p}_x と \mathbf{p}_y は左右の特異ベクトルである。もっとも大きな特異値に対する特異ベクトル \mathbf{p}_x^1 、 \mathbf{p}_y^1 は、最も大きな共分散を持つ流出量変化予測と降水量変化・気温変化予測の空間パターン（すなわち、流出量変化予測に最も大きな不確実性を与える、気候モデル間の不一致の大きい気候変化予測の空間パターン）を表す。

図41は、南米大陸の流量変化予測と全球の降水量変化・気温変化予測に対する共分散行列の第1特異ベクト

ルの空間パターンを表している。図 41a は、モデル平均に対して北側で流出量が少ないモデルは、南側で流出量が多くなることを示すパターンである。この流出量のパターンと共分散が大きいのが、図 41b、c の気温変化・降水量変化のパターンである。赤道東太平洋での気温上昇が強い（エル・ニーニョ型の気温上昇パターンが強く現れる）モデルほど、南米北部では降水量が減少し、南米南部では降水量が増加している。このため、そのようなモデルでは、図 41a のような流出量の変化パターンが現れることがわかった。

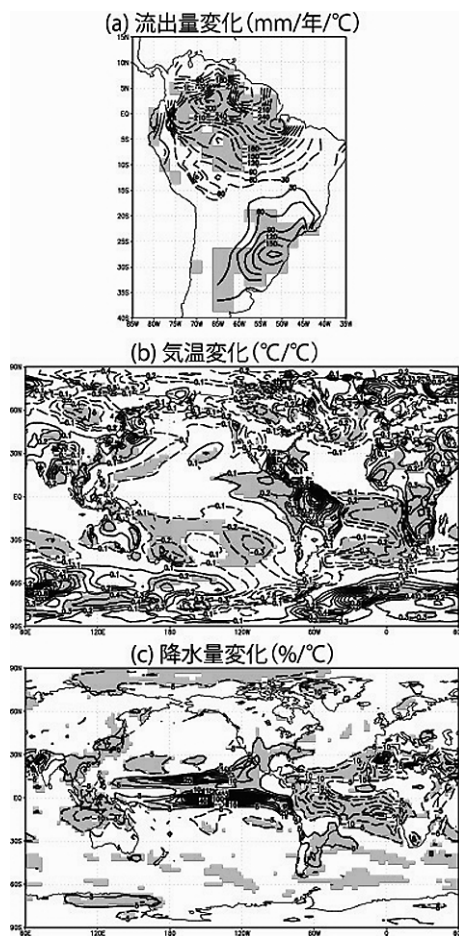


図 41 南米大陸の流量変化予測と全球の降水量変化・気温変化予測の共分散行列に対する第 1 特異ベクトルの空間パターン。

2.1.3 極端現象の発生メカニズムおよび土地利用変化・灌漑が気候に与える影響の解析

実験結果の解釈を容易にするために地表面から陸地を取り払った「水惑星」実験を用いて、温暖化により平均降水量と極端な降水の強さが変化するメカニズムを解析した。亜熱帯においては下降流の乾燥化とストームトラックの高緯度へのシフトにより大気下層の相対湿度が

低下し、弱い降水の頻度の減少により平均降水量の低下をもたらすことが示された。一方、温暖化による飽和水蒸気量の増加により、相対湿度が低下しても絶対湿度は増加しているため、極端な降水の強さは緯度帯によらず増加することが示された。

また、森林伐採などによる土地被覆変化条件を与えて大気-陸域生態系モデル実験を行った。現在気候条件下、土地被覆のみ将来シナリオにおいて予測される分布をモデルに与えて実験を行ったところ、耕作地面積が増加している領域の付近で気温の上昇が見られた。

2.1.4 気候シナリオと社会経済シナリオを結び付ける手法の検討

多様な排出シナリオに対応する気候シナリオを作成するスケーリング手法の観点から、降水量変化のスケーリング可能性について解析を行った。異なる排出シナリオに基づく気候変化予測の間で単位気温上昇量あたりの降水量変化がどのように異なるかを解析したところ、エアロゾルの排出量が多いシナリオほど降水量増加量が小さいという関係が有意に見られることが分かった⁶⁾。この成果については、次の 2.1.4 (1) で詳しく紹介する。

また、IPCC 新シナリオに対応する気温上昇パターンのシナリオ依存性を解析したところ、北半球中緯度と北極域で大きな依存性が見出された。中緯度についてはエアロゾル排出シナリオの違い、高緯度については海水減少などの非線形的な応答により依存性が生じていることが示唆された。

さらに、社会経済シナリオの不確実性を感度分析により調査する手法の検討を行うとともに、社会経済モデルに組み合わせて用いられる簡易気候モデルについて、その改良を行い、不確実性を定量化して示す手法を開発した。

2.1.4 (1) 降水量変化予測と水資源影響評価の排出シナリオ依存性の検討

14 の気候モデルによる気候変化予測実験データを解析した。用いたのは IPCC SRES A2 シナリオ（温室効果ガス濃度増加大・エアロゾル排出量大）、A1B シナリオ（温室効果ガス濃度増加中・エアロゾル排出量中）と B1 シナリオ（温室効果ガス濃度増加小・エアロゾル排出量小）に沿った 2009 年から 2099 年までの予測実験データである。また B1 シナリオに基づく降水量感度の空間パター

ンに A2 シナリオの全球平均気温変化を掛けた、降水量変化のパターンスケーリング予測を作成し、実際の A2 シナリオ実験との誤差を評価した。さらに全球水資源評価モデルに気候モデルの A2 シナリオ実験データを入力した場合と、パターンスケーリング予測データを入力した場合を比較することで、パターンスケーリングによって流出量変化予測にどのような誤差が生じるかを検討した。

図 42 は、B1 シナリオ（横軸）と A2 シナリオ（縦軸）における各モデルの降水量感度の散布図である。すべての気候モデルにおいて、B1 シナリオに対して、A2 シナリオでは降水量感度が小さいことがわかった。この降水量感度の排出シナリオ依存性は、エアロゾル排出量の違いによってもたらされていることも明らかになった。特に炭素性エアロゾルを考慮したモデル（図 42 の菱形）では、降水量感度の排出シナリオ依存性が大きくなる。

降水量感度の排出シナリオ依存性は、地球温暖化の影響評価・適応策・緩和策の研究にとっても大きな意味を持つ。これらの研究では、様々な安定化シナリオにおける影響評価や適応策・緩和策の分析を行うために、パターンスケーリングの手法が広く用いられている。降水量感度の排出シナリオ依存性は、降水量変化のパターンスケーリング予測に無視できないバイアスを与えることもわかった。そのために全球水資源評価モデルにパターンスケーリング予測を入力した場合は、気候モデルの予測実験データを入力した場合に比べて、流出量変化予測に大きなバイアスが生じることが明らかになった。

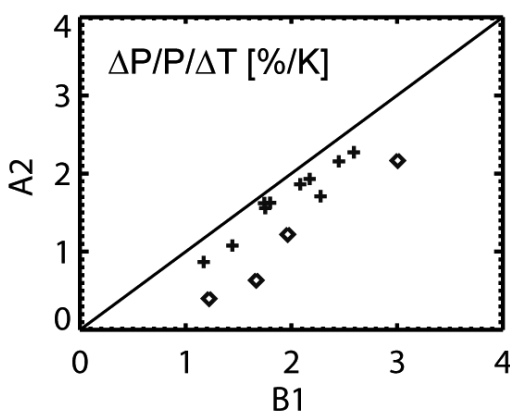


図 42 降水量感度の散布図。
横軸 B1 シナリオ、縦軸 A2 シナリオ。

2.2 影響・適応モデル研究

2.2.1 極端現象変化及び気候モデル不確実性を考慮した水資源・健康・農業の影響評価

水資源、農業および健康の各分野について、以下のとおり影響評価研究を実施した。

水資源分野については、ダム、農業、灌漑といった人間活動を結合した全球水資源モデルを用いて、高解像度気候モデルによる日単位の気候変化予測シナリオに基づく、将来 100 年の水資源予測実験を行った。これを将来 100 年の人口等の変化から予想される水需要変化と組み合わせ、将来 100 年の水需給バランスの評価を行った。この成果は、水需要と水供給の季節的なミスマッチを考慮に入れた世界初の全球規模影響評価である。水資源を得られない地域に住む人口の推移を推定した結果、経済発展重視・グローバル化を想定した IPCC SRES A1B シナリオでは、世界の総人口は 2050 年まで増加し以降減少するが、水資源が非常に逼迫する地域に住む人口は、21 世紀前半に人口増加とともに上昇し、21 世紀の後半、世界の総人口が減少に転じた後も、すぐには減少しないことがわかった。

農業分野については、IPCC-AR4 で評価対象となった約 20 の気候モデルによる最新の将来気候予測を用いて、アジア域の水稻を対象作物として取り上げ、気候モデル不確実性を明示的に考慮した気候変化による収量減少のリスク評価（確率的な影響評価）を行った。アジアの水稻生産量を対象に、このような統計的アプローチを用いて気候変化の影響を評価した研究は本研究が世界で初めてである。その結果、1990 年代に比べ、2020 年代には高い確率で水稻生産量が減少することが予測された。また、2080 年代には、二酸化炭素を最も多く排出するシナリオにおいて、水稻生産量の平均変化率が最も大きく減少すると予測された（図 43）。この結果は、近未来（2020 年代）の影響を軽減するための適応策を早急に検討・実施する必要があること、また長期（2080 年代）の影響軽減に向けた二酸化炭素排出量削減による緩和策の検討が必要であることを示唆している。なお適応策に関しては、品種変更・植え付け日の変更による適応が、現在の栽培地域での灌漑割合の拡大による適応に比べ、高いリスク軽減効果を持つことも同時に示した。なお、同研究に関連して公表した論文内容については H21 年 6 月 5 日に記者発表を実施し、新聞掲載等の反響があった。

健康分野については、IPCC-AR4 で評価対象となっ

た14の気候モデルによる最新の将来気候予測を用いて、世界全域を対象地域として、気候モデル不確実性を明示的に考慮した気候変化による人間健康影響（極端に暑い日の熱ストレスによる超過死亡数）のリスク評価（確率的な影響評価）に取り組んだ。適応の効果については、超過死亡が統計的に最小となる至適気温の将来変化の有無を仮定することで考慮した。前提とする気候モデルにより超過死亡数変化の推計結果に大きな差が生じることから、モデル平均した推計結果のみから対策を論ずることの不十分さが指摘された。この成果については、次の2.2.1 (1) で詳しく紹介する。

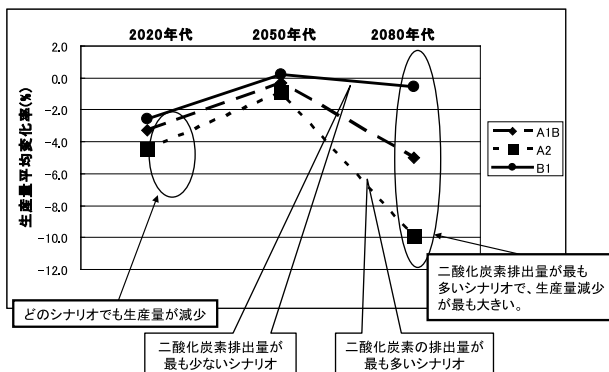


図 43 年代別（2020 年；2050 年代；2080 年代）、温室効果ガス排出シナリオ別（SRES A1B；A2；B1）のアジアの水稻の生産量平均変化率。基準年は 1990 年代。生産量平均変化率は、複数の気候モデルの将来気候予測を用いて計算した生産量変化率の平均値。

2.2.1 (1) 不確実性を考慮した熱ストレスによる超過死亡リスクの評価

今後次第に気候変化が進行していった場合に、熱ストレスによる超過死亡リスクが増大することが強く懸念されている。将来の気温上昇時の超過死亡リスクの変化に関しては、社会・経済的な側面も含めて多様な因子が関わるためにその推計は容易ではないが、換気・冷房といった具体的な対策の検討のためにも、なるべく正確なリスクの見積もりが求められている。

熱ストレスによる超過死亡リスクの見積りに際して、一つのカギとなるのは、人々が次第に高まる気温に対して、どの程度適応もしくは順応することができるかということである。気温と死亡率の統計的関係を各地で見た研究からは、多くの地点で気温が低すぎても高すぎても死亡率が高まる傾向が見られ、また統計的に死亡率が最小となる気温（至適気温）は地域により異なり、暖かい地域

ほど至適気温が高い傾向があることが示されている。本研究では、以上の至適気温の地域差を過去の気候に対する自発的適応の結果であるにとらえ、将来の気候変化に応じた至適気温変化を仮定することで熱ストレス死亡に対する適応の効果を実験的に考慮したリスク評価を実施した。

本研究では、Takahashi et al. (2007)⁷⁾の手法を踏襲し、全球を対象地域として熱ストレスによる超過死亡リスクの推計を実施した。Takahashi ら (2007) では、1972～1995 年の 24 年間について、47 都道府県の日死亡数データと、対応する各県庁所在地の日最高気温データを収集し、その間の統計的関係から、日最高気温を説明変数とする熱ストレス超過死亡数推計モデルを作成している。

日最高気温と人口密度(人/km²)を入力データとして、上記のモデルを全球に適用し、空間解像度 2.5' × 2.5' のグリッドセル別の現状 30 年間 (1971～2000 年) ならびに将来 30 年間 (2071～2100 年) の熱ストレスによる超過死亡密度 (人/km²/年; 単位面積あたりの年超過死亡数) を推定した。現状 (1971～2000 年) の日最高気温は、CRU 気候観測値データセットの月平均日最高気温に、ECMWF-ERA40 再解析データによる同期間の日々変動の情報を併せ、空間解像度 0.5° × 0.5° で作成した。将来 (2071～2100 年) の日最高気温は、前述の現状の日最高気温 (30 年分の日別データ) に、IPCC-AR4 で評価された 14 の AO-GCM による現状から将来の 30 年平年月平均気温の変化分を足し合わせ、さらに同 AO-GCM による現状から将来の 30 年平年月別の日最高気温の標準偏差 (日の変動性の大きさ) の変化率を掛け合わせることで作成した。なお、影響評価結果の不確実性に関しては、排出シナリオ別に 14 の AO-GCM 出力に基づいて実施した影響評価結果を正規分布にあてはめ、確率分布曲線として示した。

本研究では、将来の気候変化に応じた適応・順応について、(1) 気候変化にも関わらずに至適気温が現在気候でのものから変化しない (適応なし)、(2) 予測される気候変化にあわせて至適気温が変化する (適応あり) の 2 ケースを扱った。

適応 (気温変化に伴う至適気温の変化) が無いとした場合、気候変化量が比較的小さな B1 シナリオにあっても、人口密度が高い東アジア・南アジア・欧州・合衆国東海岸では熱ストレス死亡の増加は大きなものとなる。全球で見た場合の今世紀中の熱ストレス超過死亡は

150% (14GCMの平均・5~95%不確実性幅は86%~205%)増加すると予測された。気候変化量が最大となるA2シナリオでは327% (14GCMの平均・5~95%不確実性幅は207%~412%)の増加が予測された(図44a)。排出量の大小で熱ストレス死亡リスクにも大きな差が出ることがわかる。

一方で、今世紀中の気温上昇に合わせて適応が完全に行われると仮定した場合、熱ストレスによる超過死亡の大部分は抑えられることが示された。気候変化量が最大となるA2シナリオでも、全球で見た場合の熱ストレス死亡の増加は11% (14GCMの平均)にとどまる(図44b)。同様に、A1B・B1シナリオについては、熱ストレス死亡の増加はそれぞれ6%・3%と予測された。ただし、この完全な適応が想定されるためには、A2・A1B・B1シナリオで、それぞれ100年の間に $4.1 \pm 0.8^\circ\text{C}$ 、 $3.4 \pm 0.8^\circ\text{C}$ 、 $2.3 \pm 0.6^\circ\text{C}$ の至適気温のシフトが求められる。また、A2シナリオについて地域的に見た場合、中国東部、インド、チベット、地中海周辺、アフリカ大陸南部では、適応を想定しても熱ストレス死亡リスクの高率の増加が見られた。

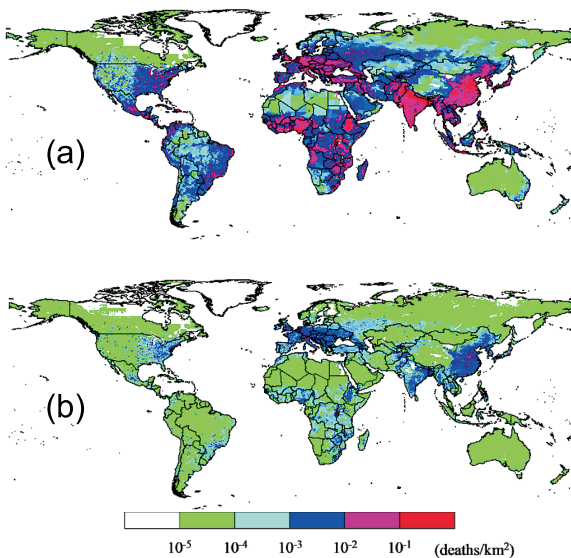


図44 現状(1971-2000)から将来(2071-2100)の熱ストレス超過死亡数の変化(SRES-A2排出シナリオでの14の大気海洋大循環モデルに基づく影響評価結果の平均)、(適応・順応については(a)考慮していない(b)考慮)

2.2.2 気候・影響モデル結合とその予備作業としての影響評価モデル改良・検証

気候モデル・陸域生態系モデルとの結合のための予備的作業として、影響評価モデルの高度化・検証に取り組

んだ。例えば、本プロジェクトにおいて気候モデルとの結合を進めている、ダム、農業、灌漑といった人間活動を結合した全球水資源モデルH08に関しては、国際モデル相互比較プロジェクトEU-WATCHに参加してモデル出力を提供し、世界的に有力な他の水資源モデルとの比較を通じて、その信頼性を高めるための多角的検証を行った。また、気候・陸域生態系モデルとの結合のため、全球水資源モデルH08中の陸面モデル・河川モデルのベクトル化コーディング・空間解像度依存性の解決を実施した。その結果、従来からの粗空間解像度での全球領域対象の水資源評価に加え、それと整合性を維持した地域的な高空間解像度での水資源評価の実施が可能になった。

農業影響モデルに関しては、気候モデルとの結合作業を目指した高度化を行った。従来手法に比べてより多くの因子・プロセスを考慮しつつ広域(全球・大陸スケール)農作物収量予測を高精度に実施するための新モデルを開発し、過去の統計情報を用いて検証を行った。

モデル結合並びに結合シミュレーションに関しては、全球水資源モデルH08と気候モデルのプログラムコードを結合した。その結果、灌漑のタイミングや供給水量に着目した、先行研究を大幅に上回る高度な解析を行う用意が整った。この結合モデルを用いた、灌漑が気候システムに与える影響の予備的評価からは、耕作期間中、無制限に灌漑水を利用可能と想定する実験において、灌漑を利用可能としない想定での実験に比して、全球の平均気温が0.08K下がり、降水量が1.5%増えることが示された。この効果は陸域でより顕著で、平均気温は0.17K下がり、降水量は3.8%増えることが示された。

以上のように、気候モデル・陸域生態系モデルとの結合に関しては、水資源・農業モデルの高度化やプログラムコードの変更などを進めるとともに、全球水資源モデルと気候モデルのプログラム結合と予備的解析を実施した。

2.2.3 専門家・メディア関係者の意見交換会の実施

地球温暖化リスク全体像の整理については、専門家・メディア関係者の意見交換会を複数回実施し、一般市民への情報伝達のあり方について議論を続けている。具体的には、まずプロジェクト初年度に、予備的調査の位置づけでメディア関係者・研究者計約35名を参加者としてシンポジウム形式での意見交換を行い、各分野のリスク伝達の鍵となりうる影響について検討した。さらに、

メディア関係者・研究者計約70名を交え、環境省・東京大学と共同で「温暖化リスク・メディアフォーラム」(第1回2009年3月・第2回2010年3月・第3回2011年2月)を実施した。意見交換会の取組みについては、その場で議論された内容を整理するだけでなく、そのようなコミュニケーションの場の有する可能性と課題点の検討も実施し、論文投稿を実施してきた。参加したメディア関係者の当日の反応、および事後インタビューより、ネットワーク構築の足がかりとしての有用性が期待できることが確認された。ただし対話の内容については、メディア関係者の期待する質が媒体や業務によって異なる可能性が示された。表3に過去3回のリスク・メディアフォーラムの概要を整理する。

2.3 陸域生態・土地利用モデル研究

2.3.1 陸域生態系モデルに関する成果

気候変動および人間活動が陸域生態系に与えてきた影響、そして将来的リスクを評価するための生態系モデル(VISIT)を構築し、影響評価や気候フィードバック効果の推定に応用した。このモデル単体でのシミュレーションにより生態系の構造・機能に関する解析を行うことができるが、気候モデルによる気候予測シナリオを入力し近未来の影響評価を行うことも目的としている。既存の炭素循環モデルを高度化し、窒素循環やメタン・BVOC・火災起源エミッションなど微量ガス交換を組み込むことで大気-陸域間の生物地球化学的相互作用を統合的に評価することができる。

表3 過去3回のリスク・メディアフォーラムの概要

	第1回	第2回	第3回
会合テーマ	IPCC第5次評価報告書に向けた温暖化リスク研究	気温上昇「+2℃」目標の意味を考える	地球温暖化予測の見方・伝え方
開催年月日	2009年3月11日	2010年3月6日	2011年2月23日
会場	学士会館	富士ソフトアキバプラザ	都市センターホテル
プログラム	・講演 ・ディスカッション ・押しボタンによるアンケート	・講演 ・パネルディスカッション	・講演 ・パネルディスカッション
講演	・IPCC第5次報告書に向けた温暖化リスク研究の動向/江守正多(国環研) ・中長期目標と温暖化リスクの関係/高橋潔(国環研) ・温暖化影響総合予測プロジェクトの概要/脇岡靖明(国環研)	・2℃の政策論的背景/松本泰子(京大) ・「+2℃」の科学的意味/江守正多(国環研)	・IPCC報告に向けた温暖化予測実験-目的ごとの3種のモデルと実験-/松野太郎(海洋研究開発機構) ・2004年の温暖化予測報道記事を振り返って/江守正多(国環研)
参加者	・メディア関係者39人 ・研究者31人	・メディア関係者19人 ・研究者23人	・メディア関係者20人 ・研究者25人
参加者コメント(抜粋)	・研究者とメディアでは伝えたい内容や、温暖化報道の伝え方が異なる。 ・不確実性や前提条件は、研究者 ・メディアの双方共に伝えるににくいと考えられている。 ・研究者にやや大げさに見える温暖化影響の報道も、メディアには比較的控えめに受け取られている。 ・研究者が伝えたいことと、メディアが効きたいことは必ずしも一致していない。	・「+2℃」の目標値は、科学的研究に基づき、将来の望ましい社会への価値判断を元に決定されている。 ・「+2℃」という数値の独り歩きは問題だが、ある程度の科学的根拠があれば、政治的なリーダーシップでも対策を進めることも必要とも考えられる。 ・研究が進むに連れ、根拠となる数値が変化する可能性を意識した決定が必要とされる。	※温暖化予測のメディア報道について ・一般市民に最悪の場合を伝え、注意喚起を促すのは、メディアの役割の一つである。 ・センセーショナルな報道で温暖化の一般市民の認知度が上がったことも評価すべきである。 ・目を引く記事だけでなく、詳細な説明も提供するバランスが重要となる。 ※研究者の情報伝達について ・研究者の情報提供の意義は、科学的知見を正確に伝えることではないか。 ・記事上の情報の選択はメディアが行うので、研究者は憶測で削除せず重要な情報は全て伝えた方がよい。 ・研究者がメッセージ性のあるコメントをした場合、研究の中立性を疑われる心配がある。 ・最近の研究成果の中身だけでなく、アウトリーチが強く求められることから、研究者側にプロジェクトをアピールしたい意識がある。

地球環境変動が陸域生態系に与える影響プロセスには多様なものが含まれるが、土壌流亡（エロージョン）は農業生産性や持続可能性に関わる最も重要なものである。そこで先ず、VISITモデルに土壌の流出過程を組み込み、土地利用変化や気候変動（降水の増減）への応答を推定した。ここでは土壌流出推定にRUSLE式を用い、IPCC AR4に記載された気候予測および土地利用変化シナリオを入力した⁸⁾。

その結果、2000年前後の期間において、陸域生態系から流出する炭素量は年間1.4ギガトンに達し、グローバル炭素循環において大きな寄与を持ちうることを示唆された。また、将来の森林破壊と気候変動により、土壌流出量は大幅に増加する可能性があることも明らかとなった。これは、土壌資源の枯渇と農業生産性の減退を招く危険性があり、さらなる土壌保全の必要性を示すとともに、炭素循環フィードバックを加味した気候変動予測において考慮すべき過程であることを示している（図45）。

気候変動が陸域生態系に与える影響プロセスとして、台風に伴う強風が植生の落葉を引き起こし、CO₂吸収などの生態系機能を低下させる可能性を検討した。2004年に上陸した10個の台風を例として、岐阜高山サイトにおけるフラックス観測と陸域生態系モデルによる台風

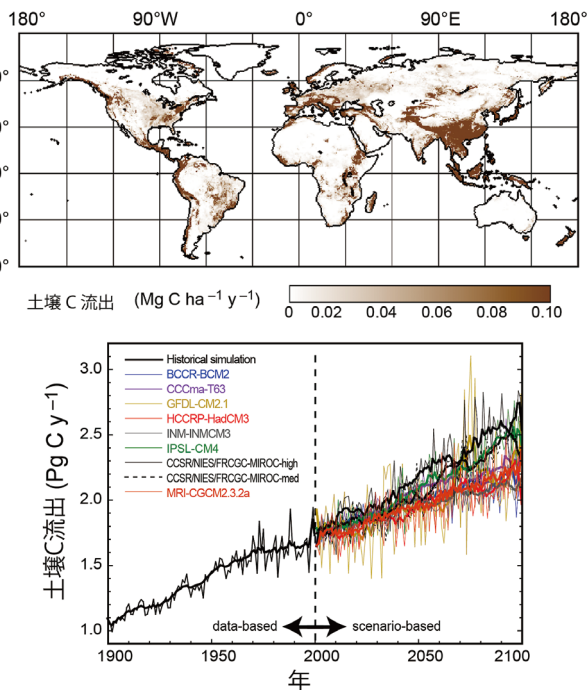


図45 (上) 陸域モデルで推定された土壌炭素流出量の分布。(下) 気候変動および土地利用シナリオに基づく土壌炭素流出量の変化予測。

影響評価を行った。観測されたCO₂フラックスに基づいて落葉強度パラメータを逆推定したところ、2004年は度重なる台風の影響で例年よりも季節半ばでの葉面積低下が顕著であり（図46）、それが正味CO₂吸収量の低下を引き起こしていた可能性が示唆された⁹⁾。

気候モデル研究により、将来的に台風の発生頻度は低下する一方で大型台風の相対的増加が予測されていることから、ここで示されたような台風影響は熱帯・亜熱帯の多くの地域でより強い影響をもたらす可能性がある。

VISITモデルにおいて多種類の微量ガス交換を扱う主要な目的は、陸域生態系から大気への生物地球化学的フィードバックを統合的に評価することである。CO₂の収支として吸収源となっても、火災起源エミッションや土地利用変化に伴う放出を加味した結果、炭素収支の総量としては必ずしもそうならない場合もある。また、メタン（CH₄）や亜酸化窒素（N₂O）といったCO₂以外の強力な温室効果を持つ気体の寄与を加味すると、大気への正味の効果は逆転する場合もある。そこで、主要な温室効果ガス交換プロセスに着目したグローバルな推定実験を行った（図47）。

これらの研究より、陸域生態系の大気に対する気候調節機能をより正確に理解し、将来の地球環境変動に伴う応答を評価することが可能となった。その応用例として、IPCC AR5に向けた気候予測実験で用いられる排出シナリオ（RCP）の開発において、森林生産力の推定、土地利用変化および火災起源エミッションの評価について推定データを与えることで貢献を行った。

モデル推定精度を向上させるために、各種の観測研究と連携して検証を進めてきた。アジア地域の代表的なフラックスサイトにおいて、観測値とモデル推定との比較

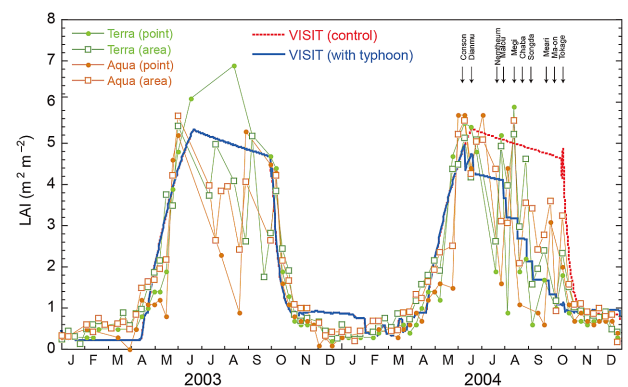


図46 岐阜高山サイトにおける2003-2004年の葉面積指数の時間変化。モデル推定と衛星観測（Terra/Aqua MODIS）を比較した結果。

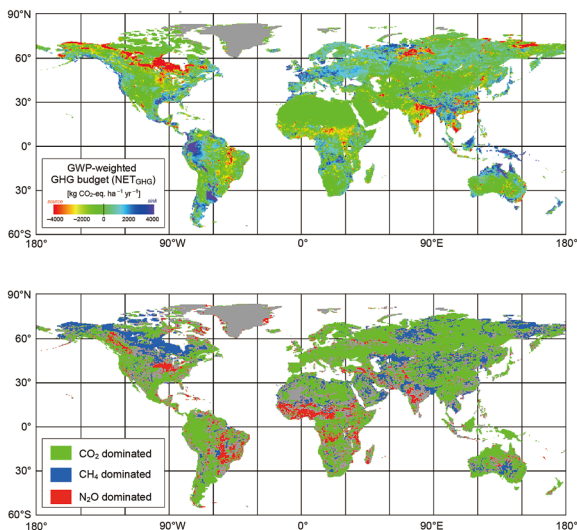


図 47 (上) 陸域における正味の温室効果ガス収支。温暖化係数(100年間)で各ガスの寄与を加重した結果。(下) 最も大きい寄与を持つガスを示す分布図。

を行った。さらに、検証されたモデルを用いて気候シナリオに基づく近未来予測を行い、各観測サイトでモニタリングを継続することでどのような変化が検出されると予想されるか、などの情報提供を行った¹⁰⁾。また、東アジア地域を対象としたモデル相互比較プロジェクトに参加し、VISITが他モデルと比較して推定結果にどのような特徴があるかを検討した。将来予測の不確実性を減少させるために、CO₂濃度上昇に対する植物応答を総合的に解明するプロジェクトに参画し、陸域モデルの生理生態学的基礎からの高度化を図った。

2.3.2 土地利用モデルに関する成果

プロジェクト開始時点では、森林減少の将来予測に重点をおいたモデルの開発を行った。食糧経済と林産経済の結合によって森林面積の減少の推定を行うと同時に、土地利用変化に起因する温室効果ガス排出の全球規模での推定を行った。つづいて、既存の複数の土地被覆図を独立で検証する新たな手法を開発し、複数の土地被覆図の精度検証を行なった。また、複数の土地被覆図からより高精度の新土地被覆図を開発したものを入力データとして用いた。新土地被覆図は、生態モデルや土地利用モデルなどに利用され、予測精度の向上に貢献した。また、森林面積と農地面積の将来予測に重点をおいたモデルの開発を行った。食糧経済と林産経済の結合によって土地利用変化の推定を行うと同時に、農産物、林産物需要の予測も同時に行った。さらに、全球土地被覆図を用いた、

都市サイズに関するランクサイズルールの適用性について検討を行い、従来の行政区域の人口によるランクサイズルールと同等もしくは有利であることを示した。特に、プロジェクト後半では、IPCC新シナリオの一つ(RCP6W)に対応した土地利用と、人口・GDPの空間詳細シナリオの作成を行った。従来は農地と森林のみであったが、牧草地や都市も含めたシナリオに拡張した。また、人口・GDPの空間詳細シナリオは、従来のシナリオよりも合理的な傾向を示すとともに、都市地域の面積的な拡大とも連動した新奇的なものが開発できた。続いて、このRCPの空間詳細シナリオの高精度化を行った。都市分布の将来シナリオには、人口、GDP、都市化率を元とすることで高精度なものとなった。RCP空間詳細シナリオに、バイオマスクロップのシナリオを追加作成した。また、土地利用の基準年の分布について精度を向上した。従来のマップ統合では、マップの多数決により作成したが、新たな統合マップでは、地上検証データを用いて統合を行った。

2.3.3 陸域統合モデルに関する検討

既存の自然システムを記述するモデル(気候モデル・生態系モデル)および人間活動を記述するモデル(水資源モデル・土地利用モデル・農業モデル)を結合させる方法を検討した。土地利用モデルでは、すべての土地利用要素(森林、農地、都市など)が相互作用して影響を与えあう。一方、土地被覆の物理状態は、気候に影響を与え、同時に、気候の変化によっても人間による土地利用は大きく変化する。また、土地利用の変化は生態系に影響を与え、気候変化を通して、人間による土地利用は大きく変化する。さらに、人間による土地利用に応じて、水や農作物の供給量が変化し、同時に、それらの重要な空間分布も大きく変化する。このような複雑な陸域システムを統合的にモデル解析することによって、地球温暖化や持続可能性の問題に関する検討を実施することが課題となってきており、より現実的な土地利用シナリオを構築するためにも必要となる陸域統合モデルの開発方針を検討し、開発に着手した。

具体的に用いるモデルは以下の通りである。既存の自然システムを記述するモデルとして、気候モデルおよび生態系モデルを考える。気候モデルとしては、世界の気候研究機関によって開発された気候モデルのアンサンブルを利用する。これは Coupled Modelling

Intercomparison Project phase 3 (CMIP3) において構築されたものである¹¹⁾。生態系モデルとしては、植物や土壤微生物などの生理的特性を考慮し、全球の炭素-窒素循環を記述する陸域植生モデル Vegetation Integrative Simulator for Trace gases (VISIT)¹²⁾ を利用する。また土地利用モデルとしては本プロジェクトで開発したモデルを用いる。さらに水利用に関するモデルは、全球の陸面および河川における水の挙動と、農業による水の需要を記述した水資源モデル H08¹³⁾ を利用する。また、農業に関するモデルとしては、農作物の成長過程を気温・降水・土壤水分量などの関数として経験的に記述した農作物モデル Soil Water Assessment Tool (SWAT)¹⁴⁾ を利用する。今年度は、VISITとH08の結合に関する作業を行った。このように自然システムと人間活動の統合的な解析を行うことによって、将来の世界像に関して、より信頼のおける知見を得ることが可能となる。地球温暖化問題だけでなく、人間社会の持続可能性の問題に関する知見を得ることにより、環境政策に大きく貢献することが期待される。

引用文献

- 1) Ogura T., Webb M.J., Bodas-Salcedo A., Williams K.D., Yokohata T., Wilson D.R. (2008) Comparison of cloud response to CO₂ doubling in two GCMs. SOLA, 4, 29-32
- 2) Watanabe M., Emori S., Satoh M., Miura H. (2009) A PDF-based hybrid prognostic cloud scheme for general circulation models. Clim.Dyn., 33 (6), 795-816
- 3) Shiogama H., Nozawa T., Emori S. (2007) Robustness of climate change signals in near term predictions up to the year 2030: Changes in the frequency of temperature extremes. Geophys.Res.Lett., 34, L12714
- 4) Abe M., Shiogama H., Hargreaves J.C., Annan J.D., Nozawa T., Emori S. (2009) Correlation between inter-model similarities in spatial pattern for present and projected future mean climate. SOLA, 5, 133-136
- 5) Shiogama H., Emori S., Hanasaki N., Abe M., Masutomi Y., Takahashi K., Nozawa T. (2011) Observational constraints indicate risk of drying in the Amazon basin. Nature Commun., 2, Article No.253
- 6) Shiogama H., Hanasaki N., Masutomi Y., Nagashima T., Ogura T., Takahashi K., Hijioaka Y., Takemura T., Nozawa T., Emori S. (2010) Emission scenario dependencies in climate change assessments of the hydrological cycle. Clim.Change, 99 (1/2), 321-329
- 7) Takahashi K., Honda Y., Emori S. (2007) Assessing mortality risk from heat stress due to global warming. Journal of Risk Research, 10 (3), 339-354
- 8) Ito A. (2007) Simulated impacts of climate and land-cover change on soil erosion and implication for the carbon cycle, 1901 to 2100. Geophysical Research Letters 34, L09403
- 9) Ito A. (2010) Evaluation of defoliation impacts of tropical cyclones on the forest carbon budget using flux data and a process-based model. Journal of Geophysical Research 115, G04013
- 10) Ito A. (2010) Changing ecophysiological processes and carbon budget in East Asian ecosystems under near-future changes in climate: Implications for long-term monitoring from a process-based model. Journal of Plant Research 123: 577-588
- 11) Meehl, G. A., Covey, C., Delworth, T., Latif, M., McAvaney, B. et al. (2007) The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research. Bull. Amer. Meteor. Soc., 88, 1383-1394
- 12) Ito A. (2008) The regional carbon budget of East Asia simulated with a terrestrial ecosystem model and validated using AsiaFlux data. Agricultural and Forest Meteorology, 148, 738-747
- 13) Hanasaki N., Kanae S., Oki T., Masuda K., Motoya K., Shirakawa N., Shen Y., Tanaka K. (2008) An integrated model for the assessment of global water resources - Part 1: Model description and input meteorological forcing. Hydrology and Earth System Sciences, 12, 1007-1025
- 14) Arnold, J.G., Fohrer N. (2005) SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. Hydrological Processes, 19(3), 563-572

V. 中核研究プロジェクト4：脱温暖化社会の実現に向けたビジョンの構築と対策の統合評価

1. 研究の目的と経緯

温暖化対策は京都議定書を契機として進展しているが、気候変動枠組条約の究極の目標である気候安定化を達成するためには、長期にわたる総合的な取り組みが必要とされている。全球平均の気温上昇を産業革命前と比較して2℃程度に抑えることを念頭に、洞爺湖サミット(2008年)では2050年までに温室効果ガス排出量を世界で半減する目標の共有が合意された。また、2009年12月に開催された第15回気候変動枠組条約締約国会議(COP15)においても2050年までの世界の温室効果ガス排出量を半減させることが世界の共通の課題として認識された。大幅な温室効果ガスの削減のためには、化石燃料由来のエネルギーに強く依存している現在の社会のあり様を大きく変えるための技術開発、ライフスタイル変化、社会システムの新しい方向を示す必要がある。このため、本プロジェクトにおいては、脱温暖化(低炭素社会)のビジョン・シナリオ作成、国際政策分析、対策の定量的評価を相互に連携して行うことにより、温暖化を防止する社会の構築やそれらを支える温暖化対策を支援することを目的とする。

ビジョン・シナリオ作成研究では、2050年までに大幅な温室効果ガスを削減するための方策を提案し、ロードマップを作成する。将来ビジョンの実現可能性を検討するためには、目標とすべき将来像から現状へ至る道筋を逆算し、その途中での各種判断が将来像に与える影響を推計する必要があるが、それらを整合性を持って定量的に検討できるモデルを構築する。国際政策分析では、国際的な温暖化対策の促進に向けた国際協調の可能性や条件について分析するとともに、気候変動枠組条約の下の2013年以降の国際枠組みに関する交渉過程を分析し、主要国にとって合意可能で、かつ、温暖化対策としても効果的な国際枠組みを検討する。また、アジア地域での協力の枠組みについても検討する。温室効果ガス排出量の評価や気候変動政策の効果、影響の定量化、さらには途上国における経済発展と環境保全の両立する経路を分析することを目的として、様々なモデルの開発し、具体的な温暖化目標設定に貢献する。

モデル開発及び政策分析の過程では、アジア各国との共同作業を通じた人材育成を行うことで、今後大幅な温

室効果ガスの増加が見込まれるアジア地域での温暖化対策に貢献する。また、「気候変動枠組条約」などの国際的政策決定過程や、「気候変動に関する政府間パネル(IPCC)」など科学的評価過程に貢献し、定量的な中長期目標の実現に向けた対策シナリオ・オプションを提示することにより、国内政策掲載過程に反映できる対策の提案を行う。

2. 研究の成果

2.1 脱温暖化(低炭素社会)ビジョン・シナリオ作成研究

2.1.1 2050年70%削減は可能

2050年のエネルギー需要の推移を分析すると、2つの社会経済像に対して今まで以上のエネルギーサービスを提供しても、1)住宅性能の向上、都市構造の変化によるモーダルシフト、サービス産業化などの社会経済構造の変化、サービスを提供する機器・手段の大幅な省エネ化を行う、等により2000年に比べてエネルギー需要を約40%削減するポテンシャルがあることがわかった(図48)。2050年のエネルギー供給については、1)2000年時点で一次エネルギー消費量全体の80%を占める化石燃料(石炭・石油・ガス)のシェアを約半分程度に減少させ、原子力やバイオマス、太陽・風力等のCO₂排出の少ないエネルギーに転換すること、2)ビジョンAでは石炭火力発電所で排出されるCO₂を炭素隔離貯留処分によって回収・処分すること、等によりエネルギー供給の低炭素化が可能になることがわかった。これらを組み合わせることで2050年のCO₂排出量を1990年に比べて70%削減することが技術的に可能なことが示された(図48)。

将来の対策費用は想定する社会・経済の発展方向によって違ってくる。2050年において想定した社会を実現させるには、産業転換や国土交通におけるインフラ投資を、今から適切に誘導する必要がある。これらの投資は必ずしも温暖化対策として実施されるもののみではなく、国際競争力強化、将来の安全・安心で住みやすく移動しやすい街づくり、あるいはエネルギー安全保障などのために、いずれにしても実施されるべきものである。

こうした投資が行われることを前提としたうえで、

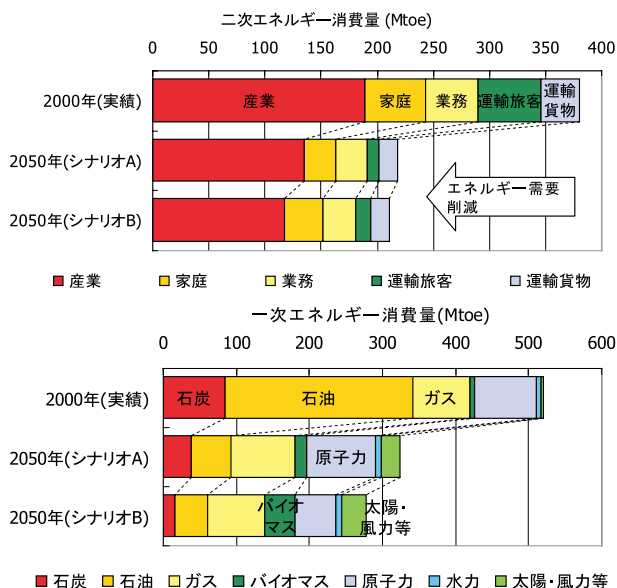


図 48 エネルギー需要（二次エネルギー消費量）と供給（一次エネルギー消費量）の変化(単位は Mtoe(石油換算百万トン))

低炭素社会を実現するには、さらに低炭素技術の導入を加速していく必要がある。2050年時点で、両シナリオでの70%削減低炭素社会における低炭素技術の直接費用を集計したところ2050年に必要な低炭素技術の年間直接費用合計額は、ビジョンAで8兆7千億円～10兆1千億円、ビジョンBで7兆2千億円～7兆8千億円と推定される。技術導入に関する追加費用は既存技術と低炭素技術の費用の差として推計した。この追加費用はシナリオAで1兆1千億円～2兆円、シナリオBで8千億円～1兆9千億円と推定される。対応する平均削減費用は、それぞれ概ね26,000円/tC～39,300円/tCと推定した。なおここでは、結果的に低炭素社会の構築にも貢献する投資が低炭素社会をも目指してタイミングよく行われるということを前提にしており、低炭素社会づくりのための技術費用としては組み込んでいない。

2.1.2 低炭素社会に向けた12の方策

ある対象分野での低炭素化を進めるためにとった技術的対策、社会制度改革、推進施策の効果は、その分野だけにとどまらず、他の対象分野の低炭素化を進めるものともなる。たとえば、家庭・オフィスを対象にした低炭素化では、直接には高断熱住宅の普及や太陽エネルギー利用が有効であるが、エネルギー供給側の低炭素化や自然エネルギー利用促進にも寄与する。逆に、自然エネルギー推進には家庭などでの利用場面拡大が必要である。

また、削減に向けては、いくつかの技術的社会的障壁があり、それらを取り除くには、順序だった手順で時間をかけてそれらを取り除いてゆく必要がある。さらに、「見える化」の促進や環境教育は、すべての施策を下支えする。こうした相互関係を念頭に置きながら、効果の大きさを勘案して程よくくりでまとめたものを「方策」と定義した。

モデル研究から得られた効果的削減可能分野を主対象として、その分野で取りうる対策とそれを推進する政策を組み合わせた12の方策を、有識者の意見を加えて、図49のようにまとめた。主な対象分野としてみれば、1、2は住宅オフィス系、3、4は農林業、5は産業・ビジネス、6、7は運輸系、8、9、10はエネルギー供給系、11、12はすべての分野を横断する方策となる。

なお、炭素税や排出量取引のような分野横断的に効果を持つ経済的手法は、一部の方策の中で政策として組み込まれているが、方策そのものとしてはあげていない。温室効果ガス排出量の大幅削減を行うためには当然炭素の価格付けが行われていくことが予想されるためである。また、公共事業、資本市場など社会資本整備は、低炭素社会に向けて適切になされていることが前提となっている。

2.1.3 バックキャストモデルによる道筋の検討

「低炭素社会に向けた12の方策」は、CO₂排出量を2050年までに大幅削減するのに有効な対策と施策の組合せをどのタイミングで行ったらよいかを定性的に示したものだ。そこで、2050年に低炭素社会を実現するための道筋(施策の導入経路)を定量的に分析するバックキャストモデルを開発した。ここでいうバックキャストモデルとは、サービス需要を満足しつつ施策導入に要する費用の合計を最小にするように、適切な投資のタイミングを分析する線形最適化型モデルをベースとし、12の方策で検討した個別の施策を評価することが可能となるように組み込んだものである。

その際、図50で示したように対策の導入量を拡大することによって生じる性能向上や初期費用の削減(いわゆる技術の習熟効果)や将来の革新技術を考慮してシミュレーション分析したところ、2010年から2020年までの早めの投資でコストを下げ効率を高めることで燃料費節減を促した方が2050年までの総費用を安くできる可能性があることがわかった。また、住宅のようなイン

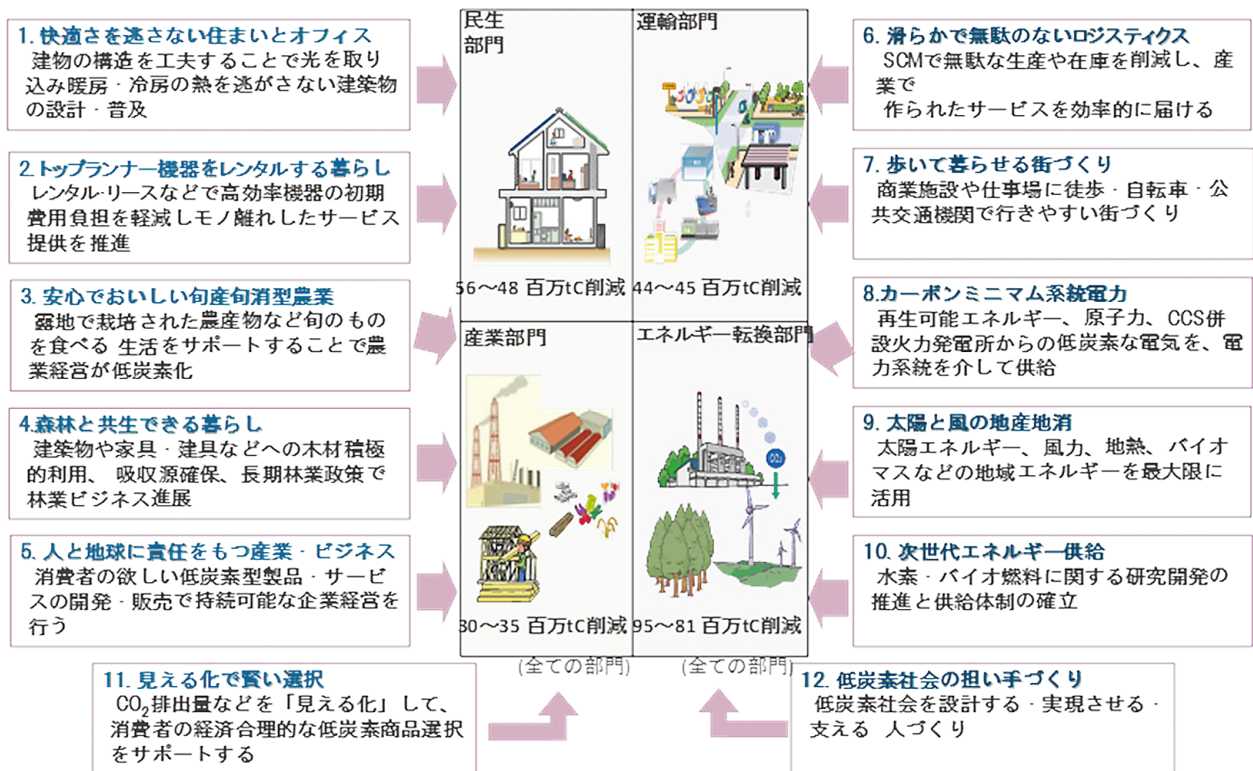


図 49 低炭素社会に向けた 12 の方策

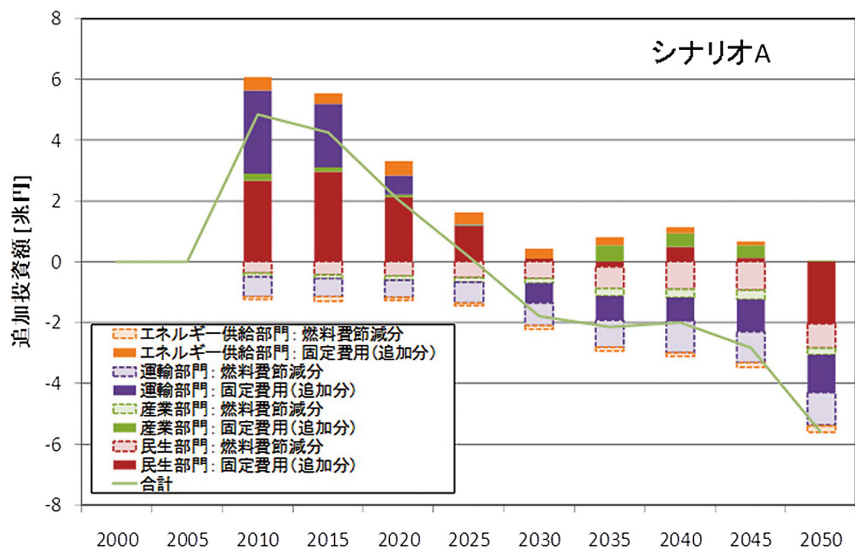


図 50 実現に要する総費用最小化の観点から得られた道筋の追加投資額の推移

フラ整備のように寿命の長いものや原子力のように設置するための時間（リードタイム）が必要なものは早めに低炭素型へと転換した方が得策であることが示された。

一方で、技術習熟が日本だけでなく世界で起こるため、他国が投資したことで安くなった対策を導入すれば総費用が抑えられる可能性があること、革新的な技術開発が進めば安価な対策が市場に出てくる可能性があること、などにより対策を後送りにした方が良い、という意見も

ある。

これに対しては、エネルギー・環境技術に先進性を持つといわれる日本の技術を飛躍させ国際競争力を高めるチャンスを逃すとともに他国で開発された対策技術を導入するためのコストが必要になること、将来の技術開発・普及には不確実性があること（たとえば、低炭素型技術の開発が予定通りに進まないなどの理由により予定していた導入量が確保できない恐れがある）、そして将来の

温度上昇に寄与するのは累積排出量であり、2050年単年のCO₂排出量を削減しても低炭素社会の目指す気候安定化は達成できないという意見もある。これらの要素を鑑みながら日本および世界の技術開発投資、低炭素型対策の普及を戦略的に進めていく必要がある。

2.1.4 アジア低炭素社会シナリオの開発

2007年に出されたIPCC第4次評価報告書をはじめとする科学的知見の積み重ねにより、G8や国連などのハイレベルな国際政治の舞台で、深刻な温暖化影響を避けるため全球平均気温の上昇を産業革命以前に比べて2℃以下に抑えることが世界共通の課題になってきた。一方、その目安となる2050年世界半減（日本では鳩山前首相により2020年までに1990年比25%、2050年までに80%削減目標が掲げられている）に至る道筋についてさまざまなシナリオ分析が行われているものの、特にアジア各国の実情に応じた大幅削減を実現する社会実装可能なロードマップづくりには至っていないのが現状である。そこで、アジア地域において、先進国が歩んできたエネルギー・資源浪費型発展パスを繰り返すのではなく、経済発展により生活レベルを向上させながらも、低炭素排出、低資源消費の社会に移行する方策を具体的に描くことを目的に研究を進めた。

まずは、対象となる地域と適用するシミュレーションモデルの同定からはじめた。具体的には、アジアの対象範囲および地域区分について、レベル1：特に重要となるアジア4地域（日本、中国、インド、その他アジア）、レベル2：世界35地域（そのうちアジアは15地域）、レベル3：アジア28地域、レベル4：アジア44地域に分解した。そして、それぞれのレベルを対象にした「主たる作業内容」と「使用する道具」を同定した。この中で、特にレベル2について2つのアプローチを試みた。一つは、世界シナリオから見たアジアの挙動について世界一般均衡経済モデルであるAIM/CGE [Global]と世界技術積み上げモデルであるAIM/Enduse [Global]を用いて分析する方法である。もう一つはアジア15地域のそれぞれに国を対象としたモデルある、AIM/CGE [Country]、AIM/Enduse [Country]、要素モデル (Element models)、スナップショットモデル (ExSS)、ロードマップ策定ツール (BCM、BCT) 等を適用するアプローチである (表4)。

低炭素社会の実現に必要な削減目標値を設定する

とともに、アジア低炭素社会シナリオ作成への適用に向けた世界モデルの改良を行っている。また、アジアの低炭素社会に向けたアジア主要国のシナリオの開発を行っている。

2.2 気候変動に関する国際政策分析

2.2.1 将来枠組みに関する多様な提案のレビューと分析

次期国際枠組みに関して多数の提案が論文や報告書として出版されていたため、国際枠組みを評価するための評価軸について整理を行い、その結果をふまえて国際制度の諸提案を分析した。160ほどの論文をレビューした結果、いくつかの特徴を見出すことができた (表5)。

(a) 国際制度に関する提案の大半が欧米諸国の研究者・研究機関から配信されたものであることが分かった。つまり、学術的なフォーラムにおける議論が欧米の意見を中心に進んでおり、途上国やアジア地域の意見が反映されにくい状態となっていることが明らかとなった。

(b) 欧米研究者による提案は、最初に全地球での総排出量を科学的知見をふまえて決定し、それを各国に振り分けることを前提とした提案と、各国がそれぞれ自国の中で経済効率的な排出削減政策を導入することを前提とした提案に大別されることが分かった。

前者の議論は主に欧州の研究者を執筆者とする論文に多く見られ、後者の議論は主に米国の研究者を執筆者とする論文に多く見られた。後者の方が米国をはじめとする主要国の合意を得られやすいが、科学的に求められている排出量削減幅を満たせる保証がない点が課題である。

(c) 途上国では、国際制度の研究を推進するための十分な能力がないことが判明した。しかし、次期枠組みにおいては、途上国も応分の行動が求められることから、途上国にとって受け入れられる国際制度の検討が今後の課題として提示された。

2.2.2 アジア太平洋地域の国際枠組みに関するダイアログ

2005年以来、年に1度の頻度で、アジア太平洋地域諸国（中国、インド、インドネシア、タイ、バングラデシュ）の政策研究者を招へいたワークショップを開催し、次期国際枠組みについて議論した。その結果、以下のことが明らかになった。(a) アジア太平洋諸国はそれぞれ異なる国情を抱えており、したがって望ましいと

表4 アジアシナリオ研究の対象地域及び空間スケール

スタイル	レベル	空間解像度	時間スケール	主たる作業内容	使用する道具
アジア全域統合的スタイル	レベル1	アジア4地域(日本、中国、インド、その他アジア)および世界その他地域	~2100	動的最適排出パスの超長期推計	AIM/IMPACT[Policy]
	レベル2	世界36地域	~2100	世界シナリオ下における長期経済・エネルギー需給の推計	AIM/CGE[Global] AIM/Enduse[Globa]
		アジア15地域	1950~2050	定性的・定量的社会・経済発展シナリオの構築とそれに対応した低炭素社会シナリオ・ロードマップの策定	AIM/CGE[Country] AIM/Enduse[Country] 各種のElement Models ExSS(スナップショットモデル) BCM(緩和施策バックキャスト用動的最適化モデル) BCT(緩和施策ロードマップ策定用ツール)
	レベル3	アジア25地域	~2030	レベル2の低炭素社会シナリオ・ロードマップに基づき、地域固有性及び地域間流動を考慮したディスアグリゲーション	
	レベル4	アジア43地域	~2030	コンバーターを用いたレベル3のディスアグリゲーション	
地域主体的スタイル	都市・地域・国レベル	イスカンダール地域、プトラジャヤ市、アーメダバード市、広州市、インド、インドネシア、タイ、ベトナム、京都市、滋賀県	~2030	対象地域における調査研究機関との共同研究。定性的・定量的社会・経済発展シナリオの構築とそれに対応した低炭素社会シナリオ・ロードマップの策定	各種のElement Models ExSS(スナップショットモデル) BCM(緩和施策バックキャスト用動的最適化モデル) BCT(緩和施策ロードマップ策定用ツール)

表5 次期枠組みに関する提案のレビュー結果

論文の年代	京都議定書未発効時(2001-03年)	提案レビュー・比較検討期(2004-05年)	京都議定書発効後(2006-07年)
提案の背景と全般的な特徴	米国の京都議定書離脱により議定書発効が危ぶまれた時期。京都議定書延長を前提とした提案と、京都議定書とは異なる制度提案とに2分できる。	ある程度多様な提案が出揃い、各種提案を比較する論文が増えた時期。京都議定書発効の見極めの時期でもあり、新提案は少ない。	京都議定書発効後、議定書の存在を前提とした制度提案が多数になる。望ましい制度のみならず、そのような制度に至る交渉過程に関する手続き論も。
代表的提案あるいは論文、報告書	Contraction & Convergence Multi-Stage Approach Hybrid Approach Climate Marshall Plan Technology Fund Dynamic Target	Bodansky, Chou, et al. South-North Dialogue Höhne and Lahme Kuik CEPS Task Force Group IISD	BASIC Project Policy INDABA CCAP Sectoral Approach IEA/OECD MATCH Project Development First
評価	最も多様で共通点の少ない提案が提示された時期。その後の時期の提案の原型の多くはこの時期に見出される。欧州と米国の研究者で大きく傾向が異なるのもこの時期の特徴。	定説的な提案をモデルに組み込み、提案の定量化を目指した研究と、「排出量」「技術」「排出量取引制度」等項目ごとに個別に議論を展開するタイプに分けられる。	気候変動枠組条約と京都議定書の2本だてのプロセスを踏まえた議論に。条約あるいは議定書をどのように改正すべきか、という観点からの議論も。

考える国際制度の概要も違っている点が多かった。(b)他方、共通点も見出された。CDMやAPPといった技術移転促進のためのメカニズムの推進、適応策に対する支援の充実、持続可能な発展に寄与する政策の実施、等が挙げられた。

また、交渉のフォーラムとしては、多様なフォーラムの活用があり得ても、最終的には気候変動枠組条約

(UNFCCC)で総括されるべきだという意見にまとめられた。

この意見交換の成果を英文の書籍として“Climate Change in Asia”というタイトルで2008年に出版した。この書籍では、アジア地域の途上国の多くが、適応策や技術移転に強い関心を持っていることが分かった。これらについては、必ずしも気候変動枠組条約の合意を待つ

ことなく、アジア地域で協力の枠組みを構築することも可能である。むしろ、地域で先に合意できるところから制度を構築し、徐々にそれを多国間レベルにまで拡大していく戦略も可能であることが指摘できた。

他方で、多くの途上国は、国連というフォーラムで国際的な協力の枠組みを構築することを希望しており、気候変動枠組条約との整合性やリンクは十分に配慮する必要がある。例えば、クリーン開発メカニズム（CDM）は、京都議定書の下での制度であり、多くの途上国の支持を得ている。他方で、手続きの複雑さや時間がかかるといった点で、多くの課題が指摘されている。これらの課題を克服するために、先進国の研究者を中心としてCDMを代替する新たな制度が検討されているが、途上国政府にとっては、非効率であったとしても国連の下での制度を継続することに意欲を持っている。このような点での議論が必要である。

2.2.3 次期国際枠組みの提案に関するディスカッションペーパーの作成

環境保全効果を持ち合意可能性があると考えられる国際制度について議論し、ディスカッションペーパーの形でまとめた。また、このディスカッションペーパーを国内外に配布し、議論のたたき台として活用した。本提案は、枠組みの構成要素の議論と、その枠組みを合意すべきフォーラムの2側面について議論している。

次期枠組みの構成要素としては、以下の4本柱を提示した。

①地球全体としての長期目標：気温上昇幅としての2℃目標や、温室効果ガスの大気中濃度としての550ppmなどは、世界全体が目指すべき長期的な目標である。この目標がないと、中期・短期的な排出削減目標の十分性を評価することができない。この長期目標の議論は、世界のすべての国の参加するフォーラムで検討する必要があるが、G8やG20といった政治的な決断が下せる場が適切な議論の場として想定できる。

②先進国の約束：これは、先進国による排出削減に関する約束である。2種類の中から選べるようにする。中期・短期的な排出削減目標として提示し、その目標達成に向けて最大限排出枠取引制度を活用するタイプの約束と、削減目標値そのものは法的拘束力を持たないが、その目標に必要と考えられる政策・措置の導入を国際約束として提示するタイプの約束である。前者は、京都議定書の

枠組みを活用することが前提となっている。後者は、気候変動枠組条約の4条を改正することが前提となっている。米国が京都議定書に参加していないという現状や、今後も参加しそうにないことが前提となっている。日本は、排出枠取引制度を活用した方が安いコストで削減目標を達成できるかも知れないが、排出枠取引への参加を認めない場合は後者の約束を受け入れることになる。

③途上国の約束：2種類の約束があるが、先進国の約束と違って選択性ではない。1つ目の約束は、自国の排出抑制策を表明するという、現在のMRVの議論に近い約束である。これは、必ずしも排出抑制そのものを担保するものではないため、すべての途上国を対象とする。さらに、国内において世界の相当分のシェアを持つエネルギー多消費型産業を保有する途上国については、セクター別の目標を提示することも追加的な約束として求められる。これについては、国全体の排出量が対象なのではなく、鉄鋼、セメント、アルミニウムといったいくつかの業種の排出量が対象となる。これらの業種においては、すでに先進国と途上国の格差はなくなっており、むしろ途上国の企業の競争力が強まっていることから、先進国・途上国を分け隔てることなく約束を提示することが求められる。

④約束実施を促進するための諸制度：こちらは、炭素市場の役割、技術移転、資金的支援、適応策、土地・土地利用変化・森林、途上国の「卒業」で構成されていた。それぞれ、一部は国連の外部で進展している複数の国際協力合意の下で進められるべきだと提案した。

2.2.4 次期枠組みに関する国際交渉における主要国の国内意思決定に関する分析

気候変動への対処を目的とした国際制度に関する交渉が2007年のCOP13以降行われているが、交渉は難航している。ここでは、国際交渉の動向に影響を及ぼす主要国として米国、欧州（EU）、ロシア、中国、インドの5カ国・地域の国内意思決定について研究し、それが国際交渉の行方に及ぼす影響を調査した。その結果、特に米国内における気候変動に対する消極性が他の国にも影響を及ぼし、その結果、国際制度に関しても、今後数年間は新議定書等の法文書の採択には至らない可能性が高いことを示すことができた。また、このことから、国際合意到達まで待つよりも、各国内での自主的な取り組みが重要性を増していることも指摘できた。

また、各国内の意思決定について詳細に分析をした。気候変動政策は、気候変動だけで決定されるわけではない。多くの国では、気候変動の悪影響の大きさに関する議論に加えて（あるいはそれ以上に）排出量削減に必要な費用の大きさ、それがその国の産業界の構造に及ぼす影響、その国のエネルギー政策、外交政策によって多分に影響を受けていることが分かった。また、その影響は、国の意思決定に参画している国内行為主体（アクター）の違いによっても異なる帰結となることが明らかとなった。

①気候変動の悪影響に関しては、EUが当初からその深刻さを強調し続けてきたが、近年は中国もそれに同調している。また、暖かくなった方が暮らしやすくなると主張し続けてきたロシアの論調も2008年頃から変化した。逆に米国では、気候変動メカニズムへの懐疑的な議論が強まっている。

②国の経済や産業構造に及ぼす影響に関する認識も、国ごとに大きく違い、また時代によっても変化する。EUでは、排出削減を新たなビジネス創出のチャンスと考え、プラスにとらえている。中国においても同様の機運が近年高まっており、その結果、例えば太陽光パネルの生産・輸出量は急増している。ロシアでは、一部で省エネがコスト削減につながるという主張があるものの、石油・天然ガス業界の圧力が強く、国の態度を変えるに至っていない。米国では、産業界のコストの議論が依然として強いままである。オバマ政権は、政権発足当時、グリーンニューディールとして、温暖化政策が雇用創出に寄与すると議論したが、数年経った段階でそのような実績は見えず、国内の論調は弱まった。

③国のエネルギー政策に関してもEUにおいては原油や天然ガスを域外の国や地域に依存し続けることに対して

危機感を持っており、それが再生可能エネルギーへの支持を取り付ける原動力となっている。急速な経済成長を経験している中国では、エネルギー需要の伸びに供給が追い付かないために、省エネが叫ばれており、その観点から気候変動対策の議論に同調している。米国でもエネルギー安全保障への関心は高いが、それを国内の省エネで達成するよりは、アラスカやメキシコ湾周辺の油田開発で達成しようとする動きが強まった。そして、この動きは2010年春のメキシコ湾周辺の原油流出事故につながり、これがオバマ政権に対する支持率低下、及び、気候変動政策への支持低下につながった。

④外交政策に関しては、特に中国が途上国グループの代表としての地位を保持しつつ、新たな役割を探っている点が顕著である。特に中国のアフリカ地域へのアプローチは近年強まっており、アフリカを味方につけることが中国にとっての一つの外交目標となっている。同様のことが欧州との協調を図るロシアのメドベージェフ大統領の動きにも言える（表6）。

このような分析を定期的にブリーフノートとして作成し、ホームページを通じて公表した。

2.2.5 気候変動に関する国際交渉における支援

気候変動枠組条約あるいは生物多様性条約の下での国際制度に関する交渉会議への参画、及び日本としての交渉ポジションのあり方に関する後方支援を定期的に行った。

2.3 気候変動政策の定量的分析

サブテーマ3では、これまでに開発してきたAIMの改良、モジュールの追加を行い、2008年から開始された中期目標（2020年の温室効果ガス排出削減目標）の

表6 政策の概要

	米国	EU	中国	ロシア
気候変動政策（炭素市場に関する動向を含む）	気候変動現象に懐疑的／温暖化法案審議中止	域内排出枠取引制度／2020年-20%削減目標	気候変動政策に関する政府内調整あり／原単位目標設定	気候変動ドクトリン／排出削減目標を設定
エネルギー政策・エネルギー安全保障	省エネ／スマートグリッド／石炭とCCSの組み合わせ／再生可能エネルギー	再生可能エネルギー／エネルギー安全保障の意識強い	省エネ／エネルギー供給量不足／原子力／再生可能エネルギー	エネルギー資源輸出国として外貨獲得・遅れた省エネ対策
外交政策・安全保障	協調外交路線／欧州との関係改善・中国やロシアと技術協力	NATOを中心とした軍事的安全保障から他分野へ安全保障概念の拡張	国際的責任の増大／国連重視／米国と対等の関係	親欧路線／テロ対策等で米国と協調／多方面外交
主な最終決定者	連邦議会／政党／大統領	欧州委員会／欧州理事会／加盟国首脳	主席／首相／国家発展改革委員会	大統領／関係省庁幹部の個人的資質

検討や2020年の排出量を1990年比25%削減するための検討においては、これらのモデルを用いて様々な試算を行ってきた。また、開発したモデル群を用いて、様々な国際的な比較プロジェクトに参加するとともに、IPCC報告書やシナリオ作成に貢献してきた。

2.3.1 世界を対象とした技術選択モデルの開発とそれを用いた分析

2020年の温室効果ガス排出量の削減目標（中期目標）を検討するにあたって、世界を対象とした技術選択モデル AIM/Enduse [Global] を改良し、わが国と各国との比較を様々な基準（限界削減費用均等化やGDPあたりの対策費用の均等化）を用いて試算した。表7に、2009年4月公表された中期目標検討委員会で6つの選択肢として示した試算結果を示す。わが国の削減量に対して、どのような公平性の基準を採用するかによって、各国の削減量が大きく変わりうることを明らかにした。また、本モデルを2050年まで拡張し、AME（Asia Modeling Exercise）やEMF（Energy Modeling Forum）等の国際比較分析プロジェクトに提供した。

2.3.2 世界を対象とした経済モデルによる試算

中核研究プロジェクト3で開発されている土地利用モデルや、所内外の他のモデルと共同で、IPCC第5次評価報告書において気候モデルの入力となるRCP（代表的濃度経路）の推計を、世界を対象とした経済モデルであるAIM/CGE [Global] を用いて行った。環境研が担当したのは放射強制力を6W/m²に安定化するシナリオであり、これは産業革命前と比較して全球平均気温上昇が約5℃となる想定であることから、図51に示すように温暖化対策は2060年までとられず、2100年における対策費用は比較的安価で、発電の石炭火力からガス火力への転換などの対策により実現される。また、この結果をもとに、排出量や土地利用のダウンスケールが行われ、RCP6として情報提供されている。また、AIM/Enduse [Global] と同様に、AMEやEMFに対して結果を提供してきた。このほか、IPCC第4次評価報告書では、世界を対象とした経済モデルを用いた分析結果が引用されている（図52）。

2.3.3 日本を対象とした技術選択モデル

日本を対象とした技術選択モデル AIM/Enduse

表7 AIM/Enduse [Global] を用いて計算した2020年の各国の排出量

選択肢	手法*	前提条件#	限界削減費用もしくはGDPあたり対策費用の比	排出量の変化（1990年比）										
				日本		EU25		米国		ロシア		先進国全体		
				エネ	GHG	エネ	GHG	エネ	GHG	エネ	GHG	エネ	GHG	
①「長期需給見通し」努力継続・各国目標並み	MAC均等	本分析	\$35/tCO ₂	+6	+4	-6	-14	+8	+6	-19	-29	-4	-9	
	GDP均等	サイドストーリー	0.02%	+6	+4	-5	-12	+12	+12	-16	-21	-1	-4	
	EU-20% (CDM有)	MAC均等	本分析	\$49/tCO ₂	+4	+2	-8	-16	+7	+5	-20	-31	-5	-10
		GDP均等	サイドストーリー	0.05%	+3	±0	-8	-16	+10	+8	-17	-24	-3	-8
	US ± 0%	MAC均等	本分析	\$62/tCO ₂	+3	±0	-9	-17	+2	±0	-20	-31	-7	-12
		GDP均等	サイドストーリー	0.21%	-2	-5	-12	-20	+2	±0	-19	-27	-8	-13
②先進国全体90年▲25% (限界削減費用均等)	MAC均等	本分析	\$166/tCO ₂	-2	-5	-19	-27	-21	-24	-23	-32	-20	-25	
	MAC均等	投資回収+電源構成	\$137/tCO ₂	-10	-12	-18	-26	-19	-22	-24	-36	-19	-25	
③「長期需給見通し」最大導入 (フロー対策強化)	MAC均等	本分析	\$187/tCO ₂	-5	-7	-19	-27	-21	-24	-23	-32	-20	-25	
	GDP均等	サイドストーリー	0.31%	-5	-7	-15	-23	±0	-2	-20	-28	-10	-15	
④先進国全体90年比▲25% (GDP当たり対策費用均等)	GDP均等	本分析	1.01%	-14	-17	-22	-31	-16	-18	-22	-31	-20	-25	
	GDP均等	投資回収+電源構成	0.34%	-14	-17	-20	-29	-17	-20	-22	-33	-19	-25	
⑤ストック+フロー対策強化	MAC均等	本分析	\$295/tCO ₂	-13	-15	-20	-29	-26	-29	-25	-34	-23	-29	
	GDP均等	サイドストーリー	0.79%	-13	-15	-21	-30	-12	-14	-22	-31	-18	-23	
⑥先進国全体90年比▲25% (各国一律▲25%)				前提としている日本のエネルギーサービス需要に対して、想定した技術のみでは25%削減を達成することができなかった。										

注：排出量の変化は基準年（1990年、一部1995年）のGHG総排出量に対する値を示す。

*：MAC均等：「EU-20%ケース」はEUの限界削減費用に、「US ± 0ケース」はUSの限界削減費用に、それ以外は日本の限界削減費用に等しくするように設定。

GDP均等：GDP当たり対策費用の割合を、Annex Iに属する国・地域で均等化するように設定。

#：本分析：中期目標検討会の選択肢①～⑥の前提で計算した結果。

サイドストーリー：本分析以外にAIM独自に設定した前提での試算結果

投資回収+電源構成：長い投資回収年を想定するとともに、火力発電の柔軟性に制約を課す場合の試算結果

[Japan] については、様々な文献調査や最新動向の収集等を通じて技術情報の更新を行うとともに、2030年までの温室効果ガス排出量の試算を行った。これらの結果は、他のモデルと同様に中期目標検討委員会や環境省中央環境審議会中長期ロードマップ小委員会等の各種検討会に提示され、温暖化政策の立案に貢献した。図53は、2010年12月に中央環境審議会中長期ロードマップ小委員会の中間整理において報告した部門別の温室効果ガス排出量である。2020年におけるわが国の温室効果ガス排出量を1990年比25%削減するケースについて、国内対策を15~25%削減する場合を想定するとともに、2020年のマクロフレームの変化の有無を分析したものである。2009年4月に示された中期目標検討委員会の「6つの選択肢」では、25%削減を技術のみで積み上げる

ことは不可能であったが、マクロフレームの見直しとともに、対策の強化によって、25%削減を国内で実現する経路も定量化できるようになった。

なお、AIM/Enduse [Japan] で計算される追加投資や対策技術の普及は、次項で示す日本を対象とした応用一般均衡モデルである AIM/CGE [Japan] の入力として用いられている。

2.3.4 日本を対象とした応用一般均衡モデルによる温暖化政策の経済影響の評価

AIM/CGE [Japan] は、わが国を対象とした応用一般均衡モデルであり、詳細な活動部門やエネルギー財を取り扱っている。わが国の温室効果ガス排出削減の中期目標を検討する際には、日本を対象とした技術選択モデ

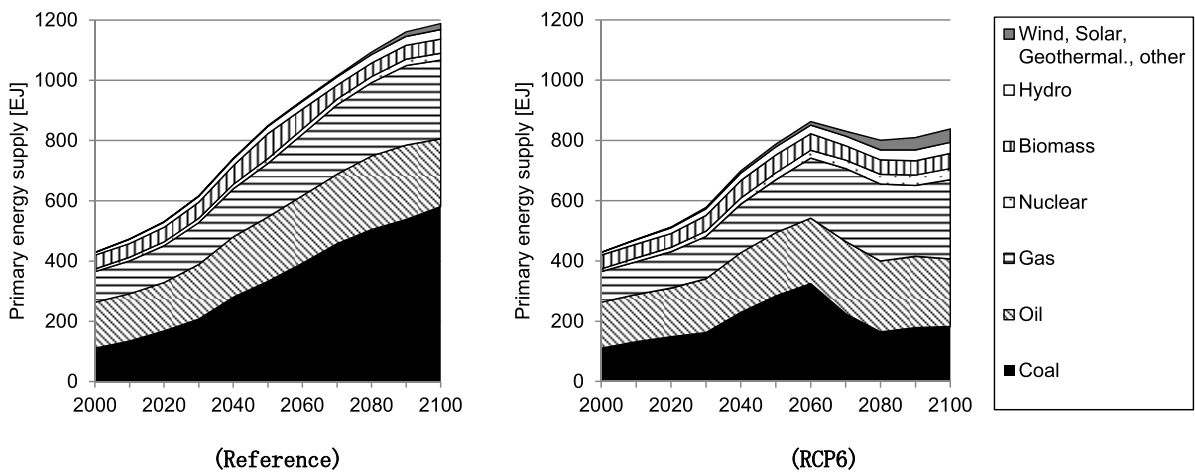


図51 AIM/CGE[Global]によるエネルギー種別一次エネルギー供給量の推移

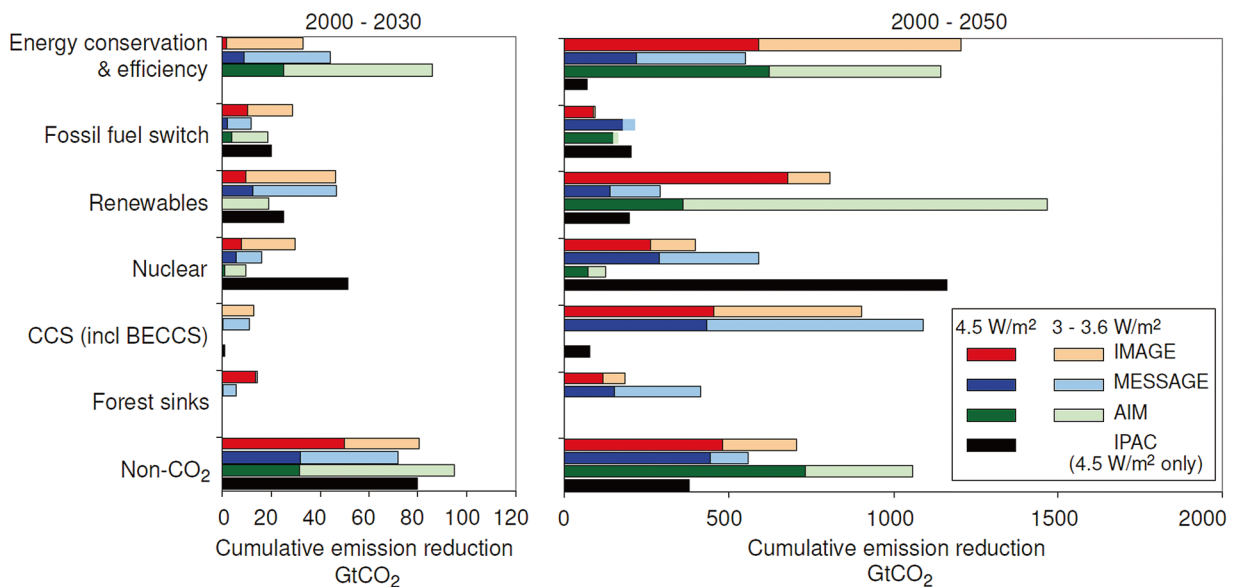


図52 温室効果ガス削減目標と対策別の削減量 (IPCC 第4次評価報告書より)

ル AIM/Enduse [Japan] の追加投資と温暖化対策技術の普及に関する結果を受けて、AIM/CGE [Japan] が経済影響を試算した。図 54 は 2010 年 12 月の中央環境審議会中長期ロードマップ小委員会の中間整理に提示した GDP の変化を示したものである。AIM/CGE [Japan] の結果から、温暖化対策を行うことでレファレンスと比較すると GDP は減少する傾向にあるが、現状に対してはいずれも成長しており、適切な政策の導入により、そうしたロスが緩和されうること示した。また、部門別の影響から、低炭素社会に向けた産業構造の変化について定量的に示すことが可能となった。

また、本モデルを用いて、温暖化対策税の導入による

影響や、ガソリン税の道路特定財源が廃止された場合の影響を試算し、中央環境審議会環境税の経済分析等に関する専門委員会で報告されるなど、温暖化政策にも貢献してきた。

2.3.5 アジア主要国を対象としたモデルによる分析

これまでに開発してきたエネルギー技術選択モデルや応用一般均衡モデルをアジア諸国に適用し、様々な将来シナリオの下での温室効果ガス排出量、対策導入による効果および経済影響などを総合的かつ定量的に示すことにより、各国の削減シナリオの作成に貢献した。中国についてはエネルギー技術選択モデルおよび一般均衡モデ

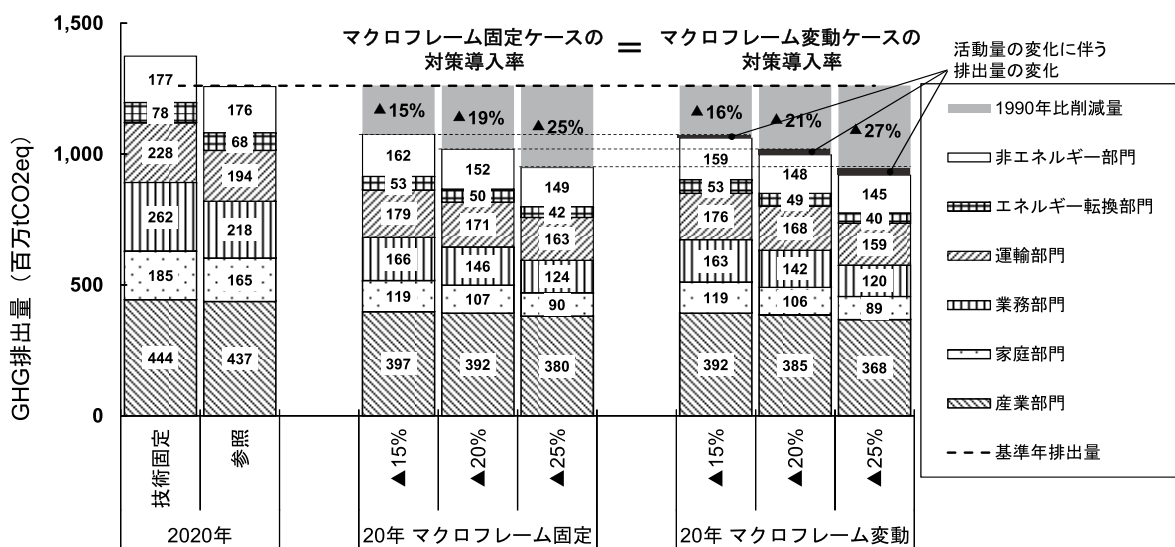
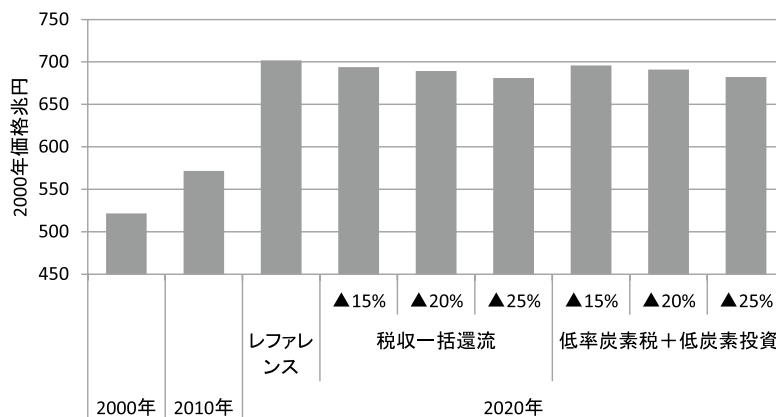


図 53 マクロフレーム固定／変動ケースの 2020 年排出量比較 (中長期ロードマップ小委員会 中間整理の前提を基準に、両ケースの対策導入率を同値とした場合)



注：税率一括還流：二酸化炭素価格を温暖化対策税として課し、税金をすべて家計に還流するケース。
 低率炭素税+低炭素投資：低率の温暖化対策税を課し、税金を温暖化対策税に活用するケース。

図 54 AIM/CGE [Japan] による GDP の推移と二酸化炭素の価格 (中長期ロードマップ小委員会 中間整理)

ルを用いて、2050年までの排出量・削減量の推計を行うとともに、その経済影響等を分析した。インドについては、AIM/Enduse [Local] モデルの適用を通じて、CO₂削減対策の効果や副次的効果について分析を行ったほか、世界での気温上昇の安定化目標を達成するという条件下での、インドの成長パスや対策技術の動向などについて評価を試みた。タイについては、一定の排出制約を設けた場合や、複数のポリシーパッケージを設定した条件の下での排出量・削減量の推計を行った。

2.3.6 温暖化影響も含めた将来シナリオの検討

簡易気候モデル、中核研究プロジェクト3で開発されている農業生産性変化モデルと統合することで、温暖化によるコメ、コムギ及びトウモロコシの生産性の変化がマクロ経済全体に及ぼす影響についても評価した。試算の結果、温暖化による農業生産性への影響は気温上昇とともに大きくなるが、作付時期の変更や作付種の変更といった適応策の導入により、生じる影響を抑えることが可能であることを示した。しかしながら、より高い気温上昇では、こうした適応策の効果も相殺され、温暖化の緩和策と適応策を適切に組み合わせることが重要であることを示した。

このほか、世界流域データベースを作成し、これをもとに全球を対象に詳細な空間単位で水不足評価を行った。ここで月単位水不足頻度とは、各月の水消費量が水供給量（河川流量）を上回った月数のことである。本研究では1986～1995年の120ヶ月を対象に月単位水不足頻度を計算した。空間詳細化により、一つの流域内であっても、人口分布や地形に左右され、水不足頻度は空間的に非一様であることが明らかとなった。

3. まとめと今後の課題

低炭素社会の実現に至る道筋を明らかにするために、ビジョン・シナリオ作成、国際政策分析、対策の定量的評価の連携による温暖化対策を統合的に評価することを目標として、他の共同研究機関とともに研究を進め、アジア主要国および主要都市を対象とした低炭素社会シナリオを作成した。我が国を対象として2020年温室効果ガス排出量25%削減、2050年80%削減を実現する方策を定量的に示した。また、バンコクなどにおいて、低炭素シナリオのシミュレーションモデルを実際に運用するキャパシティーワークショップを行うなど、人材育成を行った。IPCC第5次評価報告書に向けた新シナリオを開発し気候グループに提供した。さらに、気候変動に関する国際制度に関して、主要国が合意しうる国際制度のあり方について検討した。これらの研究成果は、中央環境審議会地球環境部会中長期ロードマップ小委員会などにおいて報告され、政策決定に少なからぬ貢献をはたした。

今後、日本、アジア地域、世界のそれぞれを対象に、将来の経済発展を実現しつつ温室効果ガス排出量を大幅に削減できる低炭素社会の実現可能性と、そこに至る道筋を一連のシナリオとして定量的、定性的に明らかにするために、様々な種類のモデルの開発を進め、それらを用いた分析を行う。また、難航する気候変動対処のための新たな国際法的枠組みに関する国際交渉や、気候変動影響を可能な限り抑える国際的な方策に資する定量的、定性的な分析を行う。

[資 料]

I 研究の組織と研究課題の構成

1 研究の組織

[A 研究担当者]

地球環境研究センター

センター長

笹野泰弘

副センター長

野尻幸宏

炭素循環研究室

室長

向井人史

高橋善幸

梁 乃申

寺尾有希夫

山岸洋明

下山 宏

奈良英樹

津守博通

中岡慎一郎

Maciej Telszewski

後藤誠二郎

橋本 茂

須永温子

衛星観測研究室

室長

横田達也

山野博哉

森野 勇（平成 19 年 4 月から）

吉田幸生

Sergey Oshchepkov

杉原 薫

青木忠生

井上 誠

田中智章

Andrey Bril

石原光則

荒木光典

江口菜穂

太田芳文

齊藤 龍（平成 20 年 3 月まで）

Raphaël Desbiens

宮本祐樹

浪崎直子

(炭素収支評価システム担当)

主席研究員

Shamil Maksyutov

古山祐治

齊藤 誠

Vinu Valsala

Dmitry Belikov

Nikolay Kadygrov

Claire Carouge

金 憲淑

齊藤 龍 (平成 20 年 4 月から)

Anna Peregon

小田知宏

佐伯田鶴

中塚由美子

高木宏志

温暖化リスク評価研究室

室長

江守正多

高橋 潔

小倉知夫

伊藤昭彦

長谷川聡

増富祐司

横島徳太

塩竈秀夫

阿部 学

岡田直資

飯尾淳弘

石崎安洋

Kuno Strassmann

Jung Hui-Cheul

Shin Yonghee

長友利晴

(陸域モデリング担当)

主席研究員

山形与志樹

木下嗣基

岩男弘毅

清野達之

加藤悦史

石渡佐和子

哈斯巴干

Anna Peregon

安立美奈子

温暖化対策評価研究室

室長

中道久美子

庄山紀久子

楊 珏

瀬谷 創

甲斐沼美紀子

亀山康子

藤野純一

花岡達也

Lee Huey-Lin

芦名秀一

池上貴志

酒井広平

岩渕裕子

明石 修

松本健一

加用現空

須田真依子

森田香菜子

Hancheng Dai

大気・海洋モニタリング推進室

室長

町田敏暢

白井知子

笹川基樹

宮崎千尋

眞坂栄一

陸域モニタリング推進室

小熊宏之

地球環境データベース推進室

室長

松永恒雄

循環型社会・廃棄物研究センター

センター長

森口祐一

アジア自然共生研究グループ

広域大気モデリング研究室

谷本浩志

永島達也

島崎彦人

流域生態系研究室

社会環境システム研究領域

領域長

原沢英夫

環境経済・政策研究室

室長

日引 聡

久保田泉

統合評価研究室

室長

増井利彦
肱岡靖明
花崎直太
金森有子
徐 燕
藤森真一郎

交通・都市環境研究室

室長

小林伸治
松橋啓介

化学環境研究領域

動態化学研究室

室長

横内陽子
荒卷能史
斉藤拓也

大気圏環境研究領域

大気物理研究室

室長

野沢 徹
日暮明子
川瀬宏明

大気動態研究室

室長

遠嶋康徳
山岸洋明

遠隔計測研究室

森野 勇（平成19年3月まで）

生物圏環境研究領域

生理生態研究室

名取俊樹
唐 艶鴻

[B 客員研究員等]

特別客員研究員

松岡 譲

(京都大学)

平成18年度～22年度

客員研究員

藤原健史

(京都大学)

平成18年度～19年度

倉田学児

(京都大学)

平成19年度～22年度

河瀬玲奈

(京都大学)

平成18年度～22年度

島田幸司

(立命館大学)

平成18年度～22年度

森 俊介

(東京理科大学)

平成18年度～19年度

山地憲治

(東京大学)

平成18年度～19年度

大政謙次

(東京大学大学院)

平成18年度

増沢武弘

(静岡大学)

平成18年度

野上達也	(石川県白山自然保護センター)	平成 18 年度
小川弘司	(石川県白山自然保護センター)	平成 18 年度
西川洋子	(北海道環境科学研究センター)	平成 18 年度
井上 元	(名古屋大学大学院)	平成 18 年度～ 19 年度
共同研究員		
蟹江憲史	(東京工業大学)	平成 18 年度～ 21 年度
梅宮知佐	(早稲田大学)	平成 19 年度～ 20 年度
Priyadarshi R. Shukla	(インド経営大学院大学)	平成 18 年度～ 19 年度

[C 海外共同研究機関] 平成 18 年度～ 22 年度にかけての海外共同研究機関名と国名

ベランギ政策提言 NGO	(インドネシア)
人民大学	(中国)
チュラロンコン大学	(タイ)
バングラディシュ先進研究所 (BCAS)	(バングラディシュ)
ソウル大学	(韓国)
インド経営大学院大学	(インド)
中国能源研究所	(中国)
アジア工科大学 (AIT)	(タイ)
フランス開発研究所	(フランス)
太平洋島嶼国応用地質委員会 (SOPAC)	(フィジー)
韓国海洋研究院	(韓国)
タマサート大学	(タイ)
キングモンクット大学	(タイ)
マレーシア工科大学	(マレーシア)
バンドン工科大学	(インドネシア)
レスター大学	(英国)
エジンバラ大学	(英国)
気候環境科学研究所	(フランス)

2 研究課題と担当者

地球温暖化研究プログラム

プログラムリーダー 笹野泰弘

副プログラムリーダー 野尻幸宏

中核研究プロジェクト 1 温室効果ガスの長期的濃度変動メカニズムとその地域特性の解明

プロジェクトリーダー 向井人史

サブテーマ 1 アジア-太平洋域での広域大気観測による温室効果ガスの収支や地域的特性に関する研究
向井人史、町田敏暢、遠嶋康徳、横内陽子、谷本浩志、齊藤拓也、山岸洋明、寺尾有希夫、下山 宏、奈良英樹、橋本 茂、須永温子

サブテーマ 2 アジア-太平洋域の CO₂ 海洋吸収及び陸域生態系フラックス変動特性の評価に関する研究
野尻幸宏、荒巻能史、津守博通、中岡慎一郎、Maciej Telszewski、宮崎千尋、高橋善幸、梁 乃申、唐 艶鴻

サブテーマ 3 物質輸送・循環モデルによる温室効果ガスの変動の検証に関する研究

Shamil Maksyutov、古山祐治、白井知子

中核研究プロジェクト2 衛星利用による二酸化炭素等の観測と全球炭素収支分布の推定

プロジェクトリーダー 横田達也

サブテーマ1 衛星観測データの処理アルゴリズム開発・改良研究

横田達也、吉田幸生、Sergey Oshchepkov、青木忠生、Andrey Bril、江口菜穂、
太田芳文、Raphaël Desbiens、田中智章

サブテーマ2 地上観測・航空機等観測実験による温室効果ガス導出手法の実証的研究

小熊宏之、森野 勇、井上 誠、田中智章、荒木光典、齊藤 龍、宮本祐樹

サブテーマ3 全球炭素収支推定モデルの開発・利用研究

Shamil Maksyutov、古山祐治、齊藤 誠、Vinu Valsala、Dmitry Belikov、
Nikolay Kadygrov、Claire Carouge、金 憲淑、齊藤 龍、Anna Peregon、小田知宏、
佐伯田鶴、中塚由美子、高木宏志

中核研究プロジェクト3 気候・影響・土地利用モデルの統合による地球温暖化リスクの評価

プロジェクトリーダー 江守正多

サブテーマ1 気候モデル研究

江守正多、野沢 徹、日暮明子、小倉知夫、永島達也、横島徳太、塩竈秀夫、
長谷川聡、阿部 学、岡田直資、飯尾淳弘、石崎安洋、Kuno Strassmann、川瀬宏明、
長友利晴

サブテーマ2 影響・適応モデル研究

高橋 潔、原沢英夫、肱岡靖明、花崎直太、増富祐司、Jung Hui-Cheul、
Shin Yonghee

サブテーマ3 陸域生態・土地利用モデル研究

山形与志樹、伊藤昭彦、木下嗣基、加藤悦史、岩男弘毅、清野達之、石渡佐和子、
哈斯巴干、Anna Peregon、安立美奈子、中道久美子、庄山紀久子、楊 珏、
瀬谷 創

中核研究プロジェクト4 脱温暖化社会の実現に向けたビジョンの構築と対策の統合評価

プロジェクトリーダー 甲斐沼美紀子

サブテーマ1 低炭素社会実現のためのビジョン・シナリオ作成

甲斐沼美紀子、藤野純一、亀山康子、花岡達也、原沢英夫、増井利彦、金森有子、
森口祐一、小林伸治、松橋啓介、Lee Huey-Lin、芦名秀一、池上貴志、酒井広平、
岩渕裕子、明石 修、松本健一、加用現空、須田真依子、Hancheng Dai
(客員研究員) 松岡 讓、河瀬玲奈、島田幸司
(共同研究員) Priyadarshi R. Shukla

サブテーマ2 国際交渉過程や枠組の検討を行う国際政策分析

亀山康子、久保田泉、森田香菜子
(共同研究員) 蟹江憲史、梅宮知佐

サブテーマ3 温暖化対策の費用・効果の定量的評価

甲斐沼美紀子、増井利彦、藤野純一、花岡達也、金森有子、日引 聡、肱岡靖明、
花崎直太、徐 燕、藤森真一郎、明石 修、松本健一、Hancheng Dai
(客員研究員) 松岡 讓、藤原健史、倉田学児、河瀬玲奈
(共同研究員) Priyadarshi R. Shukla

- 関連研究プロジェクト1 過去の気候変化シグナルの検出とその要因推定
 担当責任者 野沢 徹
 永島達也、塩竈秀夫、横畠徳太、阿部 学、岡田直資、川瀬宏明
- 関連研究プロジェクト2 高山植生による温暖化影響検出のモニタリングに関する研究
 担当責任者 名取俊樹
 原沢英夫
 (客員研究員) 増沢武弘、野上達也、小川弘司、西川洋子
- 関連研究プロジェクト3 京都議定書吸収源としての森林機能評価に関する研究
 担当責任者 山形与志樹
 サブテーマ1 吸収量評価モデルの開発
 山形与志樹、木下嗣基
 サブテーマ2 吸収量評価モデルの不確実性解析
 山形与志樹、木下嗣基
- 関連研究プロジェクト4 太平洋小島嶼国に対する温暖化の影響評価
 担当責任者 山野博哉
 サブテーマ1 小島嶼国に対する温暖化の影響評価と適応策
 山野博哉
 サブテーマ2 リモートセンシングによる脆弱性評価
 松永恒雄
 サブテーマ3 GISによる統合情報システムの構築
 島崎彦人
- 関連研究プロジェクト5 温暖化に対するサンゴ礁の変化の検出とモニタリング
 担当責任者 山野博哉
 サブテーマ1 統合モニタリング手法の開発と適用
 山野博哉
 サブテーマ2 リモートセンシングによるモニタリング
 松永恒雄、石原光則
 サブテーマ3 現地観測によるモニタリング
 杉原 薫
- 関連研究プロジェクト6 温暖化の危険な水準と安定化経路の解明
 担当責任者 肱岡靖明
 原沢英夫、高橋 潔、増井利彦、亀山康子、久保田泉
- 関連研究プロジェクト7 温暖化政策を評価するための経済モデルの開発 (平成18年度まで)
 担当責任者 増井利彦
 サブテーマ1 世界を対象とした技術選択モデルの開発
 甲斐沼美紀子、増井利彦、藤野純一、花岡達也、芦名秀一
 サブテーマ2 地球温暖化対策の影響を評価するための経済モデルの改良
 増井利彦、肱岡靖明、藤野純一、花岡達也、高橋 潔、徐 燕
 サブテーマ3 世界及びアジアの主要国を対象とした温暖化政策の効果と影響の評価
 増井利彦、甲斐沼美紀子、肱岡靖明、藤野純一、花岡達也、高橋 潔、芦名秀一、
 徐 燕

- 関連研究プロジェクト8 アジア太平洋地域における戦略的データベースを用いた応用シナリオ開発
担当責任者 甲斐沼美紀子
増井利彦、藤野純一、花岡達也、肱岡靖明、花崎直太、金森有子、徐 燕
- 関連研究プロジェクト9 「日本における土壌炭素蓄積機構の定量的解明と温暖化影響の実験的評価」
担当責任者 内田昌男
- サブテーマ1 日本の土壌炭素蓄積機構の解明
内田昌男、近藤美由紀、瀬山春彦
- サブテーマ2 土壌有機物分解における温暖化影響の評価
近藤美由紀、内田昌男、向井人史、高橋善幸、寺尾有希夫

II 研究成果発表一覧

1 誌上発表

(1) 中核研究プロジェクト1: 温室効果ガスの長期的濃度変動のメカニズムとその地域特性の解明

発表者・(刊年)・題目・掲載誌・巻(号)・頁

Araki, M., Morino, I., Machida, T., Sawa, Y., Matsueda, H., Yokota, T., and Uchino, O. (2010), CO₂ column-averaged volume mixing ratio derived over Tsukuba from measurements by commercial airlines, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 7659–7667, doi:10.5194/acp-10-7659-2010

Aramaki T., Nojiri Y., Imai K. (2009) Behavior of particulate materials during iron fertilization experiments in the Western Subarctic Pacific (SEEDS and SEEDS II). *Deep-Sea Res. II*, 56(26), 2875–2888

Aramaki T., Nojiri Y., Mukai H., Kushibashi S., Uchida M., Shibata Y. (2010) Preliminary results of radiocarbon monitoring in the surface waters of the North Pacific. *Nucl.Instrum.Methods Phys.Res., B*, 268(7/8), 1222–1225

Arshinov M.Y., Belan B.D., Davydov D.K., Inoue G., Krasnov O.A., Maksyutov S., Machida T., Fofonov A.V., Shimoyama K. (2009) Spatial and temporal variability of CO₂ and CH₄ concentrations in the surface atmospheric layer over West Siberia. *Atmos.Oceanic Opt.*, 22(1), 84–93

Arshinov M.Y., Belan B.D., Davydov D.K., Inouye G., Maksyutov S., Machida T., Fofonov A.V. (2009) Vertical distribution of greenhouse gases above Western Siberia by the long-term measurement data. *Atmos.Oceanic Opt.*, 22(3), 316–324

Barkley M.P., Monks P.S., Hewitt A., Machida T., Desai A., Vinnichenko N., Nakazawa T., Fedoseev N., Watai T. (2007) Assessing the near surface sensitivity of SCIAMACHY atmospheric CO₂ retrieved using (FSI) WFM-DOAS. *Atmos. Chem.Phys.*, 7, 3597–3619

Blake R.S., Patel M., Monks P.S., Ellis A.M., Inomata S., Tanimoto H. (2008) Aldehyde and ketone discrimination and quantification using two-stage proton transfer reaction mass spectrometry. *Int.J.Mass Spectrom.*, 278, 15–19

Brand W.A., Huang L., Mukai H., Chivulescu A., Richter J.M., Rothe M. (2009) How well do we know VPDB? Variability of $\delta(13)\text{C}$ and $\delta(18)\text{O}$ in CO₂ generated from NBS19-calcite. *Rapid Commun.Mass Spectrom.*, 23, 915–926

Chen J., Yamamura Y., Hori Y., Shiyomi M., Yasuda T., Zhou H., Li Y., and Tang Y. (2008) Small-scale species richness and its spatial variation in an alpine meadow on the Qinghai-Tibet Plateau. *Ecological Research* DOI 10.1007/s11284-007-0423-7

Chen J., Gu S., Shen M., Tang Y., Matsushita B. (2009) Estimating aboveground biomass of grassland having a high canopy cover: an exploratory analysis of in situ hyperspectral data. *Int.J.Remote Sens.*, 30(24), 6497–6517

Chen J., Shen M. G., Zhu X. L., and Tang Y. (2009) Indicator of flower status derived from in situ hyperspectral measurement in an alpine meadow on the Tibetan Plateau. *Ecological Indicators* 9: 818–823

Chevallier F., Ciais P., Conway T.J., Aalto T., Anderson B.E., Bousquet P., Brunke E.G., Ciattaglia L., Machida T., Mukai H. et al. (2010) CO₂ surface fluxes at grid point scale estimated from a global 21 year reanalysis of atmospheric measurements. *J.Geophys.Res.*, 115, D21307

Cui X., Niu H., Wu J., Gu S., Wang Y., Wang S., Zhao X., and Tang Y. (2006) Response of chlorophyll fluorescence to dynamic light in three alpine species differing in plant architecture. *Environmental and Experimental Botany* 58: 149–157

Cui X. Y., Gu S., Zhao X. Q., Wu J., Kato T., and Tang Y. (2008) Diurnal and seasonal variations of UV radiation on the northern edge of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology* 148: 144–151

Cui X., Gu S., Wu J., Tang Y. (2009) Photosynthetic response to dynamic changes of light and air humidity in two moss species from the Tibetan Plateau. *Ecol.Res.*, 24(3), 645–653

Deng F., Chem J.M., Ishizawa M., Yuen C-W., Mo G., Higuchi K., Chan D., Maksyutov S. (2007) Global monthly CO₂ flux inversion with a focus over North America. *Tellus B*, 59(2), 179–190

Fang J., Brown S., Tang Y., Nabuurs G., Wang X., and Shen H. (2006) Overestimated biomass carbon pools of the northern mid- and high latitude forests. *Climatic Change* 74: 355–368

- Fang J., Tang Y., Son Y. (2010) Why are East Asian ecosystems important for carbon cycle research?. *Sci.China: Life Sci.*, 53(7), 753–756
- Feng L., Palmer P.I., Yang Y., Yantosca R.M., Kawa S.R., Paris J.-D., Matsueda H., Machida T. (2010) Evaluating a 3-D transport model of atmospheric CO₂ using ground-based, aircraft, and space-borne data. *Atmos.Chem.Phys.Discuss.*, 10, 18025–18061
- Feng, L., Palmer, P. I., Yang, Y., Yantosca, R. M., Kawa, S. R., Paris, J.-D., Matsueda, H., and Machida, T. (2011), Evaluating a 3-D transport model of atmospheric CO₂ using ground-based, aircraft, and space-borne data, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 2789–2803, doi:10.5194/acp-11-2789-2011.
- Glagolev M.V., Kleptsova I.E., Filippov I.V., Kazantsev V.S., Machida T., Maksyutov S. (2010) Methane emissions from subtaiga mires of western siberia: The standard model Bc5. *Moscow Univ.Soil Sci.Bull.*, 65(2), 86–93
- Gloor M., Dlugokencky E., Brenninkmeijer C., Horowitz L., Hurst D.F., Dutton G., Crevoisier C., Machida T., Tans P. (2007) Three-dimensional SF₆ data and tropospheric transport simulations: Signals, modeling accuracy, and implications for inverse modeling. *J.Geophys.Res.*, 112, D15112
- Groisman P.Y., Clark E.A., Kattsov V.M., Lettenmaier D.P., Sokolik I.N., Aizen V.B., Cartus O., Machida T., Maksyutov S. et al. (2009) The northern Eurasia earth science partnership: An example of science applied to societal needs. *Bull. Am.Meteorol.Soc.*, 90(5), 671–688
- Gu S., Tang Y., Cui X. Y., Du M., Zhao L., Li Y., Xu S. X., Zhou H., Kato T., Qi P. T., and Zhao X. (2008) Characterizing evapotranspiration over a meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 113: 113, D08118, doi:08110.01029/02007JD009173
- H. Nara, H. Tanimoto, Y. Nojiri, H. Mukai, J. Zeng, Y. Tohjima, and T. Machida, (2011) CO emissions from biomass burning in South-east Asia in the 2006 El Niño year: shipboard and AIRS satellite observations. *Environ. Chem.*, 8, 213–223. doi:10.1071/EN10113
- Hirota M., Tang Y., Hu Q. W., Hirata S., Kato T., Mo W. H., Cao G. M., and Mariko S. (2006) Carbon dioxide dynamics and controls in a deep-water wetland on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Ecosystems* 9: 673–688
- Hirota M., Zhang P., Gu S., Du M., Shimono A., Shen H., Li Y., Tang Y. (2009) Altitudinal variation of ecosystem CO₂ fluxes in an alpine grassland from 3600 to 4200m. *J.Plant Ecol.*, 2(4), 197–205
- Hirota M., Zhang P., Gu S., Shen H., Kuriyama T., Li Y., Tang Y. (2010) Small-scale variation in ecosystem CO₂ fluxes in an alpine meadow depends on plant biomass and species richness. *Journal of Plant Research*, 123, 531–541
- Ichii K., Suzuki T., Kato T., Ito A., Hajima T., Ueyama M., Sasai T., Hirata R., Saigusa N., Ohtani Y., Takagi K. (2010) Multi-model analysis of terrestrial carbon cycles in Japan: limitations and implications of model calibration using eddy flux observations. *Biogeosciences*, 7, 2061–2080
- Inoue H.Y., Fukazawa Y., Tanimoto H., Matsueda H., Sawa Y., Wada A. (2008) Atmospheric CO₂ and O₃ observed on Rishiri Island from December 2006 to March 2007. *Pap.Meteorol.Geophys.*, 59, 31–38
- Irie H., Kanaya Y., Akimoto H., Tanimoto H., Wang Z., Gleason J.F., Bucsela E.J. (2008) Validation of OMI tropospheric NO₂ column data using MAX-DOAS measurements deep inside the North China Plain in June 2006: Mount Tai Experiment 2006. *Atmos.Chem.Phys.*, 8, 6577–6586
- Ishidoya S., Morimoto S., Sugawara S., Watai T., Machida T., Aoki S., Nakazawa T., Yamanouchi T. (2008) Gravitational separation suggested by O₂/N₂, δ(15)N of N₂, δ(18)O of O₂, Ar/N₂ observed in the lowermost part of the stratosphere at northern middle and high latitudes in the early spring of 2002. *Geophys.Res.Lett.*, 35, L03812
- Ishijima K., Patra P.K., Takigawa M., Machida T., Matsueda H., Sawa Y., Steel L.P., Krummel P.B., Langenfelds R.L., Aoki S. et al. (2010) Stratospheric influence on the seasonal cycle of nitrous oxide in the troposphere as deduced from aircraft observations and model simulations. *J.Geophys.Res.*, 115, D20308
- Kameyama S., Tanimoto H., Inomata S., Tsunogai U., Oki A., Yokouchi Y., Takeda S., Obata H., Uematsu M. (2009) Equilibrator inlet-proton transfer reaction-mass spectrometry (EI-PTR-MS) for sensitive, high-resolution measurement of dimethyl sulfide dissolved in seawater. *Anal.Chem.*, 81(21), 9021–9026

- Kameyama Y., Tanimoto H., Inomata S., Tsunogai U., Oki A., Takeda S., Obata H., Tsuda A., Uematsu M. (2010) High-resolution measurement of multiple volatile organic compounds dissolved in seawater using equilibrator inlet-proton transfer reaction-mass spectrometry (EI-PTR-MS). *Mar.Chem.*, 122(1/4), 59–73
- Kanaya Y., Pochanart P., Liu Y., Li J., Tanimoto H., Kato S., Suthawaree J., Inomata S., Taketani F., Okuzawa K. et al. (2009) Rates and regimes of photochemical ozone production over Central East China in June 2006: a box model analysis using comprehensive measurements of ozone precursors. *Atmos.Chem.Phys.*, 9, 7711–7723
- Kato T., Tang Y., Gu S., Hirota M., Du M. Y., Li Y. N., and Zhao X. (2006) Temperature and biomass influences on interannual changes in CO₂ exchange in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Global Change Biology* 12: 1285–1298
- Kato T., Tang Y. (2008) Spatial variability and major controlling factors of CO₂ sink strength in Asian terrestrial ecosystems: evidence from eddy covariance data. *Glob.Change Biol.*, 14(10), 2333–2348
- Koike M., Jones N.B., Palmer P.I., Matsui H., Zhao Y., Kondo Y., Matsumi Y., Tanimoto H. (2006) Seasonal variation of carbon monoxide in northern Japan: Fourier transform IR measurements and source-labeled model calculations. *J.Geophys.Res.*, 111, D15306
- Koike M., Kondo Y., Kita K., Takegawa N., Nishi N., Kashiwara T., Kawakami S., Kudoh S., Blake D., Shirai T. et al. (2007) Measurements of reactive nitrogen produced by tropical thunderstorms during BIBLE-C. *J.Geophys.Res.*, 112, D18304
- Kondo Y., Hudman R.C., Nakamura K., Koike M., Chen G., Miyazaki Y., Takegawa N., Blake D.R., Shirai T. et al. (2008) Mechanisms that influence the formation of high-ozone regions in the boundary layer downwind of the Asian continent in winter and spring. *J.Geophys.Res.*, 113, D15304
- Koyama Y., Maksyutov S., Mukai H., Thoning K., Tans P. (2010) Simulation of atmospheric carbon dioxide variability with a global coupled Eulerian-Lagrangian transport model. *Geosci.Model Dev.Discuss.*, 3, 2051–2070
- Koyama Y., Maksyutov S., Mukai H., Thoning K., Tans P. (2011) Simulation of variability in atmospheric carbon dioxide using a global coupled Eulerian-Lagrangian transport model. *Geoscientific Model Development*, 4, 317–324
- Kudo I., Noiri Y., Cochlan W.P., Suzuki K., Aramaki T., Ono T., Nojiri Y. (2009) Primary productivity, bacterial productivity and nitrogen uptake in response to iron enrichment during the SEEDS II. *Deep-Sea Res. II*, 56(26), 2755–2766
- Kulawik S.S., Jones D.B.A., Nassar R., Irion F.W., Worden J.R., Bowman K.W., Machida T., Matsueda H., Sawa Y., Biraud S.C., Fischer M.L., Jacobson A.R. (2010) Characterization of Tropospheric Emission Spectrometer (TES) CO₂ for carbon cycle science. *Atmos.Chem.Phys.*, 10, 5601–5623
- Kuwana M., Kondo Y., Miyazaki Y., Komazaki Y., Kim J.H., Yum S.S., Tanimoto H., Matsueda H. (2007) Cloud condensation nuclei activity at Jeju Island, Korea in spring 2005. *Atmos.Chem.Phys.Discuss.*, 7(6), 15805–15851
- Kuwata M., Kondo Y., Miyazaki Y., Komazaki Y., Kim J.H., Yum S.S., Tanimoto H., Matsueda H. (2008) Cloud condensation nuclei activity at Jeju Island, Korea in spring 2005. *Atmos.Chem.Phys.*, 8, 2933–2948
- Law R.M., Peters W., Rodenbeck C., Aulagnier C., Baker I., Bergmann D.J., Bousquet P., Brandt J., Bruhwiler L., Maksyutov S. et al. (2008) TransCom model simulations of hourly atmospheric CO₂: Experimental overview and diurnal cycle results for 2002. *Global Biogeochem.Cycles*, 22, GB3009
- Li C., Shimono A., Shen H., Tang Y. (2010) Phylogeography of *potentilla fruticosa*, an alpine shrub on the Qinghai-Tibetan Plateau. *J.Plant Ecol.*, 3(1), 9–15
- Liang N., Hirano T., Zheng Z.-M., Tang J., Fujinuma Y. (2010) Soil CO₂ efflux of a larch forest in northern Japan. *Biogeosciences*, 7, 3447–3457
- Luo C., Xu G., Chao Z., Wang S., Lin X., Hu Y., Zhang Z., Duan J., Chang X., Tang Y. et al. (2009) Effect of warming and grazing on litter mass loss and temperature sensitivity of litter and dung mass loss on the Tibetan plateau. *Global Change Biol.*, 16(5), 1606–1617
- Ma W., Liu Z., Wang Z., Wang W., Liang C., Tang Y., He J-S., Fang J. (2010) Climate change alters interannual variation of grassland aboveground productivity: evidence from a 22-year measurement series in the Inner Mongolian grassland. *J.Plant Res.*, 123(4), 509–517

- Matsueda H., Machida T., Sawa Y., Nakagawa Y., Hirokuni K., Ikeda H., Kondo N., Goto K. (2008) Evaluation of atmospheric CO₂ measurements from new flask air sampling of JAL airliner observations. *Pap.Meteorol.Geophys.* (気象研究所研究報告), 59, 1-17
- Matsumoto K., Minami H., Hayano T., Uyama Y., Tanimoto H., Uematsu M. (2007) Regional climatology of particulate carbonaceous substances in the northern area of the east Asian Pacific rim. *J.Geophys.Res.*, 112, D24203
- Matsuoka Y., Fujino J., Kainuma M. (2008) National implications of a 50% global reduction of greenhouse gases, and its feasibility in Japan. *Sustain.Sci.*, 3(1), 135-143
- Miyazaki Y., Kondo Y., Han S., Koike M., Kodama D., Komazaki Y., Tanimoto H., Matsueda H. (2007) Chemical characteristics of water-soluble organic carbon in the Asian outflow. *J.Geophys.Res.*, 112, D22S30
- Moriizumi J., Ohkura T., Hirano S., Nono Y., Yamazawa H., Kim Y.-S., Guo Q., Mukai H., Tohjima Y., Iida T. (2008) Continuous observation of atmospheric ²²²Rn concentrations for analytic basis of atmospheric transport in East Asia. *J. Nucl. Sci. Technol.*, 6, 173-179
- Moteki N., Kondo Y., Miyazaki Y., Takegawa N., Komazaki Y., Kurata G., Shirai T., Blake D.R., Miyakawa T., Koike M. (2007) Evolution of mixing state of black carbon particles: Aircraft measurements over the western Pacific in March 2004. *Geophys.Res.Lett.*, 34, L11803
- Muraoka H., Saigusa N., Nasahara K.N., Noda H., Yoshino J., Saitoh T.M., Nagai S., Murayama S., Koizumi H. (2010) Effects of seasonal and interannual variations in leaf photosynthesis and canopy leaf area index on gross primary production of a cool-temperate deciduous broadleaf forest in Takayama. *Japan Journal of Plant Research*, 123, 563-576
- Nakatsuka Y., Maksyutov S. (2009) Optimization of the seasonal cycles of simulated CO₂ flux by fitting simulated atmospheric CO₂ to observed vertical profiles. *Biogeosciences*, 6, 2733-2741
- Nara H., Tanimoto H., Nojiri Y., Mukai H., Zeng J., Tohjima Y., Machida T. (2011) CO emissions from biomass burning in Southeast Asia in the 2006 El Niño year: Shipboard and AIRS satellite observations. *Environ. Chem.*, 8, 213-223.
- Nassar R., Jones D.B.A., Suntharalingam P., Chen J.M., Andres R.J., Wecht K.J., Yantosca R.M., Kulawik S.S., Bowman K.W., Machida T. (2010) Modeling global atmospheric CO₂ with improved emission inventories and CO₂ production from the oxidation of other carbon species. *Geosci.Model Dev.*, 3, 689-716
- Noda H., Muraoka H., Tang Y., and Washitani I. (2007) Phenological changes in rate of respiration and annual carbon balance in a perennial herbaceous plant, *Primula sieboldii*. *Journal of Plant Research*: DOI 10. 1007/s10265-10006-10066-10268
- Ohtsuka T., Hirota M., Zhang X., Shimono A., Senga Y., Du M., Yonemura S., Kawashima S., and Tang Y. (2008) Soil organic carbon pools in alpine to nival zones along an altitudinal gradient (4400-5300m) on the Tibetan Plateau. *Polar Science* 2: 277-285
- Parrish D.D., Kuster W.C., Shao M., Yokouchi Y., Kondo Y., Goldan P.D., de Gouw J.A., Koike M., Shirai T. (2009) Comparison of air pollutant emissions among mega-cities. *Atmos.Environ.*, 43(40), 6435-6441
- Patra P.K., Law R.M., Peters W., Rodenbeck C., Takigawa M., Aulagnier C., Baker I., Bergmann D.J., Bousquet P., Maksyutov S. (2008) TransCom model simulations of hourly atmospheric CO₂: Analysis of synoptic-scale variations for the period 2002-2003. *Global Biogeochem.Cycles*, 22, GB4013
- Patra P.K., Niwa Y., Schck T.J., Brenninkmeijer C.A.M., Machida T., Matsueda H., Sawa Y. (2011) Carbon balance of South Asia constrained by passenger aircraft CO₂ measurements. *Atmos.Chem.Phys.Discuss.*, 11, 5379-5405
- Peylin P., Breon F.M., Serrar S., Tiwari Y., Chedin A., Gloor M., Machida T., Brenninkmeijer C., Zahn A., Ciais P. (2007) Evaluation of Television Infrared Observation Satellite (TIROS-N) Operational Vertical Sounder (TOVS) spaceborne CO₂ estimates using model simulations and aircraft data. *J.Geophys.Res.*, 112, D09313
- Qi P., Gu S., Du M., Tang Y., Wu L., Zhao L. (2008) Comparison of three methods for measurement of evapotranspiration in an alpine meadow. *Acta Ecol.Sin.*, 28(1), 202-211 <In Chinese>
- Qiao Y., Gu S., Tang Y., Du M., Zhao L., Li Y., Zhang X., Jiang S., Gao Y. (2008) Characteristics of diffuse radiation on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Sci.Nat.Univ.Nankai*, 41(3), 69-78 <In Chinese>

- Ren W., Tang H., Wu J., Deng Y., Wu Y., Tang Y., Cui X. (2010) UV light spectral response of photosynthetic photochemical efficiency in alpine mosses. *J.Plant Ecol.*, 3(1), 17-24
- Richardson AD, Black TA, Ciais P, Delbart N, Friedl MA, Gobron N, Hollinger DY, Kutsch WL, Longdoz B, Luyssaert S, Migliavacca M, Montagnani L, Munger JW, Moors E, Piao S, Rebmann C, Reichstein M, Saigusa N, Tomelleri E, Vargas R, and Varlagin A: Influence of spring and autumn phenological transitions on forest ecosystem productivity. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365, 3227-3246
- Saito H., Tsuda A., Nojiri Y., Aramaki T., Ogawa H., Yoshimura T., Imai K., Kudo I., Nishioka J., Ono T., et al. (2009) Biogeochemical cycling of N and Si during the mesoscale iron-enrichment experiment in the western subarctic Pacific (SEEDS-II). *Deep-Sea Res. II*, 56(26), 2852-2862
- Saito M., Kato T., Tang Y. (2009) Temperature controls ecosystem CO₂ exchange of an alpine meadow on the northeastern Tibetan Plateau. *Global Change Biol.*, 15(1), 221-228
- Saito T., Yokouchi Y., Stohl A., Taguchi S., Mukai H. (2010) Large emissions of perfluorocarbons in East Asia deduced from continuous atmospheric measurements. *Environ.Sci.Technol.*, 44(11), 4089-4095
- Sano T., Hirano T., Liang N., Hirata R., Fujinuma Y. (2010) Carbon dioxide exchange of a larch forest after a typhoon disturbance. *Forest Ecology and Management*, 260, 2214-2223
- Sasai T., Saigusa N., Nasahara K.N., Ito A., Hashimoto H., Nemani R., Hirata R., Ichii K., Takagi K., Saitoh T.M., Ohta T., Murakami K., Yamaguchi Y., Oikawa T. (2011) Satellite-driven estimation of terrestrial carbon flux over Far East Asia with 1-km grid resolution. *Remote Sensing of Environment*, 115, 1758-1771
- Sasakawa M., Ito A., Machida T., Tsuda N., Niwa Y., Davydov D., Fofonov A., Arshinov M. (2010) Annual variation of methane emissions from forested bogs in West Siberia (2005-2009): A case of high CH₄ and precipitation rate in the summer of 2007. *Atmos.Chem.Phys.Discuss.*, (10), 27759-27776
- Sasakawa M., Shimoyama K., Machida T., Tsuda N., Suto H., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Krasnov O., Saeki T., Koyama Y., Maksyutov S. (2010) Continuous measurements of methane from a tower network over Siberia. *Tellus B*, 62(5), 403-416
- Sawa Y., Tanimoto H., Yonemura S., Matsueda H., Wada A., Taguchi S., Hayasaka T., Tsuruta H., Tohjima Y., Mukai H. et al. (2007) Widespread pollution events of carbon monoxide observed over the western North Pacific during the EAREX 2005 campaign. *J.Geophys.Res.*, 112, D22S26
- Shen H., Tang Y., and Washitani I. (2006) Morphological plasticity of *Primula nutans* to hummock-and-hollow microsites in an alpine wetland. *Journal of Plant Research* 119: 257-264
- Shen H., Tang Y., Muraoka H., Washitani I. (2008) Characteristics of leaf photosynthesis and simulated individual carbon budget in *Primula nutans* under contrasting light and temperature conditions. *J.Plant Res.*, 121(2), 191-200
- Shen H., Klein A.J., Zhao X., Tang Y. (2009) Leaf photosynthesis and simulated carbon budget of *Gentiana straminea* from a decade-long warming experiment. *J.Plant Ecol.*, 2(4), 207-216
- Shen H., Tang Y., Washitani I. (2009) Ecological responses of *Primula nutans* to centimeter-scale topographic and environmental variability in an alpine wetland. *Ecol.Res.*, 24(1), 75-81
- Shen M., Chen J., Zhu X., Tang Y. (2009) Yellow flowers can decrease NDVI and EVI values: evidence from a field experiment in an alpine meadow. *Can.J.Remote Sens.*, 35(2), 99-106
- Shen M., Tang Y., Klein J., Zhang P., Gu S., Shimono A., and Chen J. (2009) Estimation of aboveground biomass using in situ hyperspectral measurements in five major grassland ecosystems on the Tibetan Plateau. *Journal of Plant Ecology* 1: 247-257
- Shen M., Chen J., Zhu X., Tang Y., and Chen X. (2010) Do flowers affect biomass estimate accuracy from NDVI and EVI? *International Journal of Remote Sensing* 31: 2139-2149, Doi:2110.1080/01431160903578812
- Shimono A., Ueno S., Gu S., Zhao X., Tsumura Y., Tang Y. (2009) Range shifts of *potentilla fruticosa* on the Qinghai-Tibetan Plateau during glacial and interglacial periods revealed by chloroplast DNA sequence variation. *Heredity*, 104, 534-542

- Shimono A., Ueno A., Tsumura T., and Tang Y. (2010) Range shifts of *Potentilla fruticosa* on the Qinghai-Tibetan Plateau during glacial and interglacial periods revealed by chloroplast DNA sequence variation *Heredity* 104: 534–542
- Shimono A., Zhou H., Shen H., Hirota M., Ohtsuka T., Tang Y. (2010) Patterns of plant diversity at high altitudes on the Qinghai-Tibetan Plateau. *J.Plant Ecol.*, 3(1), 1–7
- Shirai T., Yokouchi Y., Blake D.R., Kita K., Izumi K., Koike M., Komazaki Y., Miyazaki Y., Fukuda M., Konso Y. (2007) Seasonal variations of atmospheric C2-C7 nonmethane hydrocarbons in Tokyo. *J.Geophys.Res.*, 112, D24305
- Shirai T., Yokouchi Y., Sugata S., Maksyutov S. (2010) HCFC-22 flux estimates over East Asia by inverse modeling from hourly observations at Hateruma monitoring station. *J.Geophys.Res.*, 115, D15303
- Stephens B., Gurney K., Tans P., Sweeney C., Peters W., Bruhwiler L., Ciais P., Ramonet M., Bousquet P., Machida T. et al. (2007) Weak northern and strong tropical land carbon uptake from vertical profiles of atmospheric CO₂. *Science*, 316, 1732–1735
- Stohl A., Seibert P., Arduini A., Eckhardt S., Fraser P., Grealley B.R., Lunder C., Maione M., Saito T., Yokouchi Y. et al. (2009) An analytical inversion method for determining regional and global emissions of greenhouse gases: Sensitivity studies and application to halocarbons. *Atmos.Chem.Phys.*, 9, 1597–1620
- Stohl A., Kim J., Li S., O'Doherty S., Muhle J., Salameh P.K., Saito T., Vollmer M.K., Wan D., Yokouchi Y. et al. (2010) Hydrochlorofluorocarbon and hydrofluorocarbon emissions in East Asia determined by inverse modeling. *Atmos.Chem. Phys.*, 10, 3545–3560
- Takahashi Y., Liang N. (2007) Development of chamber-based sampling technique for determination of carbon stable isotope ratio of soil respired CO₂ and evaluation of influence of CO₂ enrichment in chamber headspace. *Geochemical Journal* 41, 493–500
- Takahashi Y., Liang N., Hirata R., Machida T., Fujinuma Y. (2008) Variability in carbon stable isotope ratio of heterotrophic respiration in a deciduous needle-leaf forest. *Journal of Geophysical Research* 113, G01022, doi:10.1029/2007JG000478
- Takahashi, T., Sutherland, S. C., Wanninkhof, R., Sweeney, C., Feely, R. A., Chipman, D. W., Hales, B., Friederich, G., Chavez, F., Sabine, C., Watson, A., Bakker, D. C. E., Schuster, U., Metzl, N., Yoshikawa-Inoue, H., Ishii, M., Midorikawa, T., Nojiri, Y., Kortzinger, A., Steinhoff, T., Hoppema, M., Olafsson, J., Arnarson, T. S., Tilbrook, B., Johannessen, T., Olsen, A., Bellerby, R., Wong, C. S., Delille, Bates. B., N. R., and de Baar, H. J. W., Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂, and net sea-air CO₂ flux over the global oceans, *Deep-Sea Res. II*, 56, 554–577, 2009
- Takamura, T. R., Inoue, H. Y., Ishii, M., and Nojiri, Y., Seasonal and inter-annual variations in pCO₂^{sea} and air-sea CO₂ fluxes in mid-latitudes of the Western and Eastern North Pacific during 1996–2006: Recent results utilizing voluntary observation ships, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 88, 883–898, 2010
- Tan K., Ciais P., Piao S., Wu X., Tang Y., Vuichard N., Liang S., Fang J. (2010) Application of the ORCHIDEE global vegetation model to evaluate biomass and soil carbon stocks of Qinghai-Tibetan grasslands. *Glob.Biogeochem.Cycles*, 24, GB1013
- Tan Z., Zhang Y., Schaefer D., Yu G., Liang N., Song Q. (2011) An old-growth subtropical Asian evergreen forest as a large carbon sink. *Atmospheric Environment*, 45, 1548e1554
- Tang Y., Wan S., He J., Zhao X. (2009) Foreword to the special issue: looking into the impacts of global warming from the roof of the world. *J.Plant Ecol.*, 2(4), 169–171
- Tanimoto H., Mukai H., Hashimoto S., Norris J.E. (2006) Intercomparison of ultraviolet photometry and gas-phase titration techniques for ozone reference standards at ambient levels. *J.Geophys.Res.*, 111, D16313
- Tanimoto H., Mukai H., Sawa Y., Matsueda H., Yonemura S., Wang T., Poon S., Wong A., Lee G., Jung J.Y. et al. (2007) Direct assessment of international consistency of standards for ground-level ozone: Strategy and implementation toward metrological traceability network in Asia. *J.Environ.Monitor.*, 9, 1183–1193
- Tanimoto H., Sawa Y., Matsueda H., Yonemura S., Wada A., Mukai H., Wang T., Poon S., Wong A., Lee G. et al. (2007) Evaluation of standards and methods for continuous measurements of carbon monoxide at ground-based sites in Asia. *Pap.Meteorol.Geophys.* (気象研究所研究報告), 58, 85–93

- Tanimoto H., Sawa Y., Yonemura S., Yumimoto K., Matsueda H., Uno I., Hayasaka T., Mukai H., Tohjima Y., Tsuboi K. (2007) Diagnosing recent CO emissions and springtime O₃ evolution in East Asia using coordinated ground-based observations of O₃ and CO during the East Asian Regional Experiment (EAREX) 2005 campaign. *Atmos.Chem.Phys. Discuss.*, 8(1), 3525–3561
- Tanimoto H., Matsumoto K., Uematsu M. (2008) Ozone-CO correlations in Siberian wildfire plumes observed at Rishiri Island. *SOLA*, 4, 65–68
- Tanimoto H., Sawa Y., Yonemura S., Yumimoto K., Matsueda H., Uno I., Hayasaka T., Mukai H., Tohjima Y., Tsuboi K. et al. (2008) Diagnosing recent CO emissions and ozone evolution in East Asia using coordinated surface observations, adjoint inverse modeling, and MOPITT satellite data. *Atmos.Chem.Phys.*, 8, 3867–3880
- Tanimoto H. (2009) Increase in springtime tropospheric ozone at a mountainous site in Japan for the period 1998–2006. *Atmos.EnvIRON.*, 43(6), 1358–1363
- Tanimoto H., Ohara T., Uno I. (2009) Asian anthropogenic emissions and decadal trends in springtime tropospheric ozone over Japan: 1998–2007. *Geophys.Res.Lett.*, 36, L23802
- Tanimoto H., Sato K., Butler T., Lawrence M.G., Fisher J., Kopacz M., Tantosca R.M., Kanaya Y., Kato S., Okuda T., Tanaka S., Zeng J. (2009) Exploring CO pollution episodes observed at Rishiri Island by chemical weather simulations and AIRS satellite measurements: long-range transport of burning plumes and implications for emissions inventories. *Tellus B*, 61(2), 394–407
- Tanimoto H., Tohjima Y., Mukai H., Nara H., Hashimoto S. (2009) Anomalous geographical gap in carbon monoxide mixing ratios over Hokkaido (Japan) in summer 2004. *Geochem.J.*, 43(5), e23–e29
- Terao Y., Logan J.A., Douglass A.R., Stolarski R.S. (2008) Contribution of stratospheric ozone to the interannual variability of tropospheric ozone in the northern extratropics. *J.Geophys.Res.*, 113, D18309
- Tohjima Y., Mukai H., Nojiri Y., Yamagishi H., Machida T. (2008) Atmospheric O₂/N₂ measurements at two Japanese sites: estimation of global oceanic and land biotic carbon sinks and analysis of the variations in atmospheric potential oxygen (APO). *Tellus*, 60B, 213–225
- Tohjima Y., Katsumata K., Morino I., Mukai H., Machida T., Akama I., Amari T., Tsunogai U. (2009) Theoretical and experimental evaluation of the isotope effect of NDIR analyzer on atmospheric CO₂ measurement. *J.Geophys.Res.*, 114, D13302
- Tohjima Y., Mukai H., Hashimoto S., Patra P.K. (2010) Increasing synoptic scale variability in atmospheric CO₂ at Hateruma Island associated with increasing East-Asian emissions. *Atmos.Chem.Phys.*, 10, 453–462
- Tsuda A., Takeda S., Saito H., Nishioka J., Kudo I., Nojiri Y., Suzuki K., Uematsu M., Wells M.L., Aramaki T. et al. (2007) Evidence for the grazing hypothesis: grazing reduces phytoplankton responses of the HNLC ecosystem to iron enrichment in the western subarctic Pacific (SEEDS II). *J. Oceanogr.*, 63(6), 983–994
- Tsumune D., Nishioka J., Shimamoto A., Watanabe Y.W., Aramaki T., Nojiri Y., Takeda S., Tsuda A., Tsubono T. (2009) Physical behaviors of the iron-fertilized patch in SEEDS II. *Deep-Sea Res. II*, 56(26), 2948–2957
- Valsala V., Maksyutov S. (2010) Simulation and assimilation of global ocean pCO₂ and air-sea CO₂ fluxes using ship observations of surface ocean pCO₂ in a simplified biogeochemical offline model. *Tellus B*, 62(5), 821–840
- Valsala V., Maksyutov S., Murtugudde R. (2010) Possible interannual to interdecadal variabilities of the Indonesian throughflow water pathways in the Indian Ocean. *J.Geophys.Res.*, 115, C10016
- Valsala V., Maksyutov S., Maciej T., Nakaoka S., Nojiri Y., Ikeda M., Murtugudde R. (2011) Climate impacts on the structures of the North Pacific air-sea CO₂ flux variability. *Biogeosciences Discussions*, 8, 4239–4280
- Wang J., Li Y., Du M., Wang Q., Tang Y., Xiao J., Zhang F., and Wang S. (2009) The features of microclimate and vegetation distribution on the southern Lenglonglin, Qilian Mountains. *Journal of mountain science* 27: 418–426
- Watai T., Machida T., Shimoyama K., Krasnov O., Yamamoto M., Inoue G. (2010) Development of atmospheric carbon dioxide standard Gas saving system and its application to a measurement at a site in west Siberian forest. *J.Atmos. Oceanic Technol.*, 27(5), 843–855

- Worthy D.E.J., Chan E., Ishizawa M., Chan D., Poss C., Dlugokencky E.J., Maksyutov S., Levin I. (2009) Decreasing anthropogenic methane emissions in Europe and Siberia inferred from continuous carbon dioxide and methane observations at Alert, Canada. *J.Geophys.Res.*, 114, D10301
- Wu Y., Tan H., Deng Y., Wu J., Xu X., Wang Y., Tang Y., Higashi T., Cui X. (2009) Partitioning pattern of carbon flux in a Kobresia grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau revealed by field ^{13}C pulse-labeling. *Global Change Biol.*, 16(8), 2322-2333
- Wunch, D., Toon, G. C., Wennberg, P. O., Wofsy, S. C., Stephens, B. B., Fischer, M. L., Uchino, O., Abshire, J. B., Bernath, P., Biraud, S. C., Blavier, J.-F. L., Boone, C., Bowman, K. P., Browell, E. V., Campos, T., Connor, B. J., Daube, B. C., Deutscher, N. M., Diao, M., Elkins, J. W., Gerbig, C., Gottlieb, E., Griffith, D. W. T., Hurst, D. F., Jiménez, R., Keppel-Aleks, G., Kort, E. A., Macatangay, R., Machida, T., Matsueda, H., Moore, F., Morino, I., Park, S., Robinson, J., Roehl, C. M., Sawa, Y., Sherlock, V., Sweeney, C., Tanaka, T., and Zondlo, M. A. (2010), Calibration of the Total Carbon Column Observing Network using aircraft profile data, *Atmos. Meas. Tech.*, 3, 1351-1362, doi:10.5194/amt-3-1351-2010
- Xiong X., Barnet C.D., Zhuang Q., Machida T., Sweeney C., Patra P.K. (2010) Mid-upper tropospheric methane in the high Northern Hemisphere: Spaceborne observations by AIRS, aircraft measurements, and model simulations. *J.Geophys.Res.*, 115, D19309
- Yamagishi H., Tohjima Y., Mukai H., Sasaoka K. (2008) Detection of regional scale sea-to-air oxygen emission related to spring bloom near Japan by using in-situ measurements of the atmospheric oxygen/nitrogen ratio. *Atmos.Chem.Phys.*, 8(12), 3325-3335
- Yamamoto T., Noma Y., Sakai S., Shibata Y. (2007) Photodegradation of perfluorooctane sulfonate by UV irradiation in water and alkaline 2-propanol. *Environ.Sci.Technol.*, 41, 5660-5665
- Yang Y., Fang J., Tang Y., Zheng C. (2008) Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands. *Glob.Change Biol.*, 14(7), 1592-1599
- Yang Y., Fang J., Smith P., Tang Y., Chen a., Ji C., Hu H., Rao S., Tan K., and He J. (2009) Changes in topsoil carbon stock in the Tibetan grasslands between the 1980s and 2004. *Global Change Biology*: doi:10.1111/j.1365-2486.2009.01924.x
- Yao Y., Zhang Y., Liang N., Tan Z., Yu G., Sha L., Song Q. (2011) Pooling of CO_2 in a Tropical Seasonal Rain Forest Located at a Small Valley. *Journal of Forest Research*, in press
- Yi, C., D. Ricciuto, R. Li, J. Wolbeck, X. Xu, M. Nilsson, L. Aires, J. D. Albertson, C. Ammann, M. A. Arain, A. C. de Araujo, M. Aubinet, M. Aurela, Z. Barcza, A. Barr, P. Berbigier, J. Beringer, C. Bernhofer, A. T. Black, P. V. Bolstad, F. C. Bosveld, M. S. J. Broadmeadow, N. Buchmann, S. P. Burns, P. Cellier, J.M. Chen, J.Q. Chen, P. Ciais, R. Clement, B. D. Cook, P. S. Curtis, D. B. Dail, E. Dellwik, N. Delapierre, A. R. Desai, S. Dore, D. Dragoni, B. G. Drake, E. Dufrêne, A. Dunn, J. Elbers, W. Eugster, M. Falk, C. Feigenwinter, L. B. Flanagan, T. Foken, J. Frank, J. Fuhrer, D. Gianelle, A. Goldstein, M. Goulden, A. Granier, T. Grünwald, L. Gu, H. Guo, A. Hammerle, S. Han, N. P. Hanan, L. Haszpra, B. Heinesch, C. Helfter, D. Hendriks, L. B. Hutley, A. Ibrom, C. Jacobs, T. Johansson, M. Jongen, G. Katul, G. Kiely, K. Klumpp, A. Knohl, T. Kolb, W. L. Kutsch, P. Laflour, T. Laurila, R. Leuning, A. Lindroth, H. Liu, B. Loubet, G. Manca, M. Marek, H. A. Margolis, T. A. Martin, W. J. Massman, R. Matamala, G. Matteucci, H. McCaughey, L. Merbold, T. Meyers, M. Migliavacca, F. Miglietta, L. Misson, M. Mölder, J. Moncrieff, R. K. Monson, L. Montagnani, M. Montes-Helu, E. Moors, Ch. Moureaux, M. M. Mukelabai, J. W. Munger, M. Myklebust, Z. Nagy, A. Noormets, W. Oechel, R. Oren, S. G. Pallardy, K. T. Paw U, J. S. Pereira, K. Pilegaard, K. Pintér, C. Pio, G. Pita, T. L. Powell, S. Rambal, J. T. Randerson, C. von Randow, C. Rebmann, J. Rinne, F. Rossi, N. Roulet, R. J. Ryel, J. Sagerfors, N. Saigusa, M. J. Sanz, G.S. Mugnozza, H. P. Schmid, G. Seufert, M. Siqueira, J. F. Soussana, G. Starr, M. A. Sutton, J. Tenhunen, Z. Tuba, J. P. Tuovinen, R. Valentini, C. S. Vogel, J. Wang, S. Wang, W. Wang, L. R. Welp, X. Wen, S. Wharton, M. Wilkinson, C. A. Williams, G. Wohlfahrt, S. Yamamoto, G. Yu, R. Zampedri, B. Zhao, X. Zhao (2010) Climate control of terrestrial carbon exchange across biomes and continents, *Environmental Research Letter*, 5, doi:10.1088/1748-9326/5/3/034007. 2010.7.27
- Yoshimura T., Ogawa H., Imai K., Aramaki T., Nojiri Y., Nishioka J., Tsuda A. (2009) Dynamics and elemental stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in particulate and dissolved organic pools during a phytoplankton bloom induced by in situ iron enrichment in the western subarctic Pacific (SEEDS-II). *Deep-Sea Res. II*, 56(26), 2863-2874

- Zhang F-W., Zhao X-Q., Li Y-N., Gu S., Wang Q-X., Du M-Y., Tang Y. (2008) Effects of one precipitation process on CO₂ flux and thermal transportation in alpine meadow of Qinghai-Tibetan Plateau. *Chin.J.Ecol.*, 27(10), 1685-1691 <In Chinese>
- Zhang P., Hirota M., Shen Z., Yamamoto A., Mariko S., Tang Y. (2009) Characterization of CO₂ flux in three Kobresia meadows differing in dominant species. *J.Plant Ecol.*, 2(4), 187-196
- Zhang P., Tang Y., Hirota M., Yamamoto A., Mariko S. (2009) Use of a regression method to partition sources of ecosystem respiration in an alpine meadow. *Soil Biol.Biochem.*, (41), 663-670
- Zhang X., Gu S., Zhao X., Cui X., Zhao L., Xu S., Du M., Jiang S., Gao Y., Ma C., Tang Y. (2010) Radiation partitioning and its relation to environmental factors above a meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau. *J.Geophys.Res.*, 115, D10106
- Zhang X., Nakazawa T., Ishizawa M., Aoki S., Nakaoka S., Sugawara S., Maksyutov S., Saeki T., Hayasaka T. (2007) Temporal variations of atmospheric carbon dioxide in the southernmost part of Japan. *Tellus B*, 59(4), 654-663
- Zhang Y., Liu C., Lei Y., Tang Y., Yu Q., Shen Y., and Sun H. (2006) An integrated algorithm for estimating regional latent heat flux and daily evapotranspiration. *International Journal of Remote Sensing* 27: 129-152
- Zhang Y., Tang Y., Jiang J., and Yang Y. (2007) Characterizing the dynamics of soil organic carbon in grasslands on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Science in China Series D-Earth Sciences* 50: 113-120
- Zhang Y., Yu Q., Jiang J. I. E., and Tang Y. (2008) Calibration of Terra/MODIS gross primary production over an irrigated cropland on the North China Plain and an alpine meadow on the Tibetan Plateau. *Global Change Biology* 14: 757-767
- Zhao L., Xu S., Li Y., Tang Y., Zhao X., Gu S., Du M., and Yu G. (2006) Relations between carbon dioxide fluxes and environmental factors of Kobresia humilis meadow and Potentilla fruticosa meadows. *Front. Biol. China* 2: 324-332, DOI 310.1007/s11515-11007-10048-11519
- Zhou H., Tang Y., Zhao X., and Zhou L. (2006) Long-term grazing alters species composition and biomass of a shrub meadow on the Qinghai-Tibet Plateau. *Pakistan Journal of Botany* 38: 1055-1069
- 青木陽二, 小口傑, 菊地正芳 (2008) 我が国の公園利用調査研究の歴史, 都市公園, (180), 97-103
- 植山雅仁, 齊藤誠, 滝本貴弘 (2008) Re-thinking global change science: from knowledge to policy -AsiaFlux Workshop 2008- の報告. 生物と気象, 8, D3
- 大倉毅史, 山澤弘実, 森泉純, 平尾茂一, 郭秋菊, 遠嶋康徳, 飯田孝夫 (2009) 東アジア域における大気中 222Rn 濃度連続測定ネットワークと洋上の孤島における大気中 222Rn 濃度の後方流跡線解析, 大気環境学会誌, 44 (1), 42-51
- 近藤豊, 竹川暢之, 小池真, 白井知子, 北和之, 川上修司, 小川利紘 (2007) 大型航空機による大気化学観測 - BIBLE/PEACE 計画 -. 気象研究ノート, 215, 67-80
- 白井知子, 笠井康子 (2010) 「第 11 回大気成分のリモートセンシング」. 日本リモートセンシング学会誌, 30 (5), 343-345
- 谷本浩志, 向井人史 (2006) 「総説」日本におけるオゾン標準とトレーサビリティシステムの構築. 大気環境学会誌, 41 (3), 123-134
- 谷本浩志 (2009) 対流圏における光化学オゾンとその支配要因に関する地球化学的研究. 地球化学, 43 (2), 73-87
- 谷本浩志, 橋本茂, 向井人史 (2009) 大気レベルのオゾン標準に関する日本における進展と世界の動向. 大気環境学会誌, 44 (4), 222-226
- 遠嶋康徳 (2010) 大気中酸素濃度の精密測定に基づくグローバル炭素収支の推定. 地球化学, 44, 77-93
- 長森正尚, 山田正人, 石垣智基 (2008) 維持管理及び安定化評価のためのモニタリング事例, 生活と環境, 53 (2), 66-72
- 野口泉, 林健太郎, 加藤拓紀, 山口高志, 秋山雅行, 大塚英幸, 酒井茂克, 高木健太郎, 深澤達矢, 柴田英昭, 藤沼康実, 三枝信子, 下鳥稔, 遠藤朋美, 家合浩明, 松田和秀, 角皆潤, 原宏 (2010) 北日本における亜硝酸ガス濃度と窒素酸化物由来成分の挙動. 大気環境学会誌, 45, 153-165
- 藤沼康実 (2007) 酸素濃度を測って二酸化炭素の挙動を推定する. グローバルネット, (207), 34-35

町田敏暢, 笹川基樹, 下山宏, Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Krasnov O., Fedoseev N., Mitin S., 須藤洋志, 勝又啓一, 津田憲次, 中澤高清, Maksyutov S. (2010) シベリアにおける温室効果ガスの時空間分布. 低温科学, 68, 9-19

向井人史 (2008) あらためて「地球温暖化を考える」Q3 温室効果とはどのようなもの? 大気中の赤外吸収物質により地表面が温まる効果, 化学, 63, 20-21

向井人史 (2008) あらためて「地球温暖化を考える」Q4 温暖化の原因は本当に CO₂ なの? CO₂ だけで温暖化が起こっていると考えられているわけではない, 63, 21-22

横内陽子, 斉藤拓也, 向井人史, 白井知子, 菅田誠治 (2009) 東アジアにおけるハロゲン系温室効果気体の排出に関する観測研究. 環境省地球環境局総務課研究調査室著, 地球環境保全試験研究費(地球一括計上)平成20年度終了研究成果報告集, 環境省地球環境局総務課研究調査室, 245-299

梁乃申 (2009) 日本における森林土壌有機炭素放出に及ぼす温暖化の影響. 関東の農業気象, 35, 7-11

(2) 中核研究プロジェクト2: 衛星利用による二酸化炭素等の観測と全球炭素収支分布の推定

Aoki T., Yokota T., Inoue G., Nobuta K., Kotani A. (2006) Information and disturbances contained in the reflected solar radiation spectra measured with space-borne Fourier transform spectrometer for greenhouse gas mapping. Proc. of SPIE, 6405, (640506), 1-15

Aoki T., Yokota T., Nobuta K., Kotani A. (2008) The correction of disturbed near infrared spectra to be observed by space-borne Fourier Transform Spectrometer of GOSAT. J.Remote Sensing Soc.Jpn., 28(2), 143-151

Araki M., Morino I., Machida T., Sawa Y., Matsueda H., Ohyama H., Yokota T., Uchino O. (2010) CO₂ column-averaged volume mixing ratio derived over Tsukuba from measurements by commercial airlines. Atmos.Chem.Phys., 10(16), 7659-7667

Belikov D., Maksyutov S., Miyasaka T., Saeki T., Zhuravlev R., Kiryushov B. (2011) Mass-conserving tracer transport modelling on a reduced latitude-longitude grid with NIES-TM. Geosci.Model Dev., 4, 207-222

Bösch H., Parker R., Cogan A., Knappett D., Monks P., Palmer P., Feng L., Yokota T., Maksyutov S., Crisp D., Miller C.E. (2009) CO₂ and CH₄ retrievals from GOSAT and SCIAMACHY. Proc.Atmos.Sci.Conf.

Bril A., Oshchepkov S., Yokota T. (2007) Carbon dioxide retrieval from reflected sunlight spectra in the presence of cirrus cloud: model studies. Proc.SPIE, 6745(674502), 1-8

Bril A., Oshchepkov S., Yokota T., Inoue G. (2007) Parameterization of aerosol and cirrus cloud effects on reflected sunlight spectra measured from space: application of the equivalence theorem. Appl.Opt., 46(13), 2460-2470

Bril A., Oshchepkov S., Yokota T. (2008) Correction of atmospheric scattering effects in space-based observations of carbon dioxide: model study of desert dust aerosol. J.Quant.Spectrosc.Radiat.Transfer, 109(10), 1815-1827

Bril A., Oshchepkov S., Yokota T. (2009) Retrieval of atmospheric methane from high spectral resolution satellite measurements: a correction for cirrus cloud effects. Appl.Opt., 48(11), 2139-2148

Chevallier F., Maksyutov S., Bousquet P., Breon F.M., Saito R., Yoshida Y., Yokota T. (2009) On the accuracy of the CO₂ surface fluxes to be estimated from the GOSAT observations. Geophys.Res.Lett., 36, L19807

Deng F., Chem J.M., Ishizawa M., Yuen C-W., Mo G., Higuchi K., Chan D., Maksyutov S. (2007) Global monthly CO₂ flux inversion with a focus over North America. Tellus B, 59(2), 179-190

Eguchi N., Yokota T., Inoue G. (2007) Characteristics of cirrus clouds from ICESat/GLAS observations. Geophys.Res. Lett., 34, L09810

Eguchi N., Yokota T. (2008) Investigation of clear-sky occurrence rate estimated from CALIOP and MODIS observations. Geophys.Res.Lett., 35, L23816

Eguchi N., Saito R., Saeki T., Nakatsuka Y., Belikov D., Maksyutov S. (2010) A priori covariance estimation for CO₂ and CH₄ retrievals. J.Geophys.Res., 115, D10215

- Groisman P.Y., Clark E.A., Kattsov V.M., Lettenmaier D.P., Sokolik I.N., Aizen V.B., Cartus O., Machida T., Maksyutov S. et al. (2009) The northern Eurasia earth science partnership: An example of science applied to societal needs. *Bull. Am.Meteorol.Soc.*, 90(5), 671-688
- Kadygrov N., Maksyutov S., Eguchi N., Aoki T., Nakazawa T., Yokota T., Inoue G. (2009) Role of simulated GOSAT total column CO₂ observations in surface CO₂ flux uncertainty reduction. *J.Geophys.Res.*, 114, D21208
- Kobayashi N., Inoue G., Kawasaki M. (2010) Remotely operable compact instruments for measuring atmospheric CO₂ and CH₄ column densities at surface monitoring sites. *Atmos.Meas.Tech.*, 3, 1103-1112
- Kokhanovsky A.A., Deuze J.L., Diner D.J., Dubovik O., Docos F., Emde C., Garay M.J., Grainger R.G., Hackel A., Ota Y. et al. (2009) The inter-comparison of major satellite aerosol retrieval algorithms using simulated intensity and polarization characteristics of reflected light. *Atmos.Meas.Tech.Discuss.*, 2, 3369-3439
- Kokhanovsky A.A., Deuze J.L., Diner D.J., Dubovik O., Ducos F., Emde C., Garay M.J., Grainger R.G., Heckel A., Ota Y. et al. (2010) The inter-comparison of major satellite aerosol retrieval algorithms using simulated intensity and polarization characteristics of reflected light. *Atmos.Meas.Tech.*, 3, 909-932
- Kokhanovsky, A. A., Budak V. P., Cornet C., Duan M., Emde C., Katsev D., A., Nakajima T., Ota Y., Yokota T. (2010) Benchmark results in vector atmospheric radiative transfer. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 111, (12-13), 1931-1946
- Koyama Y., Maksyutov S., Mukai H., Thoning K., Tans P. (2011) Simulation of variability in atmospheric carbon dioxide using a global coupled Eulerian-Lagrangian transport model. *Geosci.Model Dev.*, 4, 317-324
- Law R.M., Peters W., Rodenbeck C., Aulagnier C., Baker I., Bergmann D.J., Bousquet P., Brandt J., Bruhwiler L., Maksyutov S. et al. (2008) TransCom model simulations of hourly atmospheric CO₂: Experimental overview and diurnal cycle results for 2002. *Global Biogeochem.Cycles*, 22, GB3009
- Lyulin O.M., Nikitin A.V., Perevalov V.I., Morino I., Yokota T., Kumazawa R., Watanabe T. (2009) Measurements of N₂- and O₂-broadening and shifting parameters of methane spectral lines in the 5550-6236 cm⁻¹ region. *J.Quant. Spectrosc.Radiat.Transfer*, 110(9/10), 654-668
- Lyulin O.M., Perevalov V.I., Morino I., Yokota T., Kumazawa R., Watanabe T. (2010) Measurements of self-broadening and self-pressure-induced shift parameters of the methane spectral lines in the 5556-6166cm⁻¹ range. *J.Quant. Spectrosc.Radiat.Transfer*, 112(3), 531-539
- Maksyutov S., Kadygrov N., Nakatsuka Y., Patra P.K., Nakazawa T., Inoue G. (2008) Projected impact of the GOSAT observations on regional CO₂ flux estimations as a function of total retrieval error. *J.Remote Sensing Soc.Jpn.*, 28(2), 190-197
- Maksyutov S., Patra P.K., Onishi R., Saeki T., Nakazawa T. (2008) NIES/FRCGC global atmospheric tracer transport model: Description, validation, and surface sources and sinks inversion. *J.Earth Simulator*, 9, 3-18
- Morino I., Uchino O., Inoue M., Yoshida Y., Yokota T., Wennberg P.O., Toon G.C., Wunch D., Roehl C.M., Notholt J., Warneke T., Messerschmidt J., Griffith D.W.T., Deutscher N.M., Sherlock V., Conner B., Robinson J., Sussmann R., Rettinger M. (2011) Preliminary validation of column-averaged volume mixing ratios of carbon dioxide and methane retrieved from GOSAT short-wavelength infrared spectra. *Atmos. Meas. Tech.*, 4, 1061-1076
- Nakatsuka Y., Maksyutov S. (2009) Optimization of the seasonal cycles of simulated CO₂ flux by fitting simulated atmospheric CO₂ to observed vertical profiles. *Biogeosciences*, 6, 2733-2741
- Nakayama T., Fukuda H., Kamikawa T., Sakamoto Y., Sugita A., Kawasaki M., Amano T., Sato H., Sakai S., Morino I. et al. (2007) Effective interaction energy of water dimer at room temperature: An experimental and theoretical study. *J.Chem.Phys.*, 127, 134302
- Nikitin A.V., Mikhailenko S., Morino I., Yokota T., Kumazawa R., Watanabe T. (2009) Isotopic substitution shifts in methane and vibrational band assignment in the 5560-6200 cm⁻¹ region. *J.Quant.Spectrosc.Radiat.Transfer*, 110(12), 964-973
- Nikitin A.V., Lyulin O.M., Mikhailenko S.N., Perevalov V.I., Filippov N.N., Grigoriev I.M., Morino I., Yokota T., Kumazawa R., Watanabe T. (2010) GOSAT-2009 methane spectral line list in the 5550-6236 cm⁻¹ range. *J.Quant. Spectrosc.Radiat.Transfer*, 111(15), 2211-2224

- Oda T., Maksyutov S. (2011) A very high-resolution (1 km × 1 km) global fossil fuel CO₂ emission inventory derived using a point source database and satellite observations of nighttime lights. *Atmos.Chem.Phys.*, 11, 543–556
- Ohyama H., Morino I., Nagahama T., Machida T., Suto H., Oguma H., Sawa Y., Matsueda H., Sugimoto N., Nakane H. et al. (2009) Column-averaged volume mixing ratio of CO₂ measured with ground-based Fourier transform spectrometer at Tsukuba. *J.Geophys.Res.*, 114, D18303
- Oshchepkov S., Bril A., Yokota T., Inoue G. (2007) Application of the equivalence theorem to simulate GOSAT observation data under cirrus-present condition. *Proc.SPIE*, 6405, 640509
- Oshchepkov S., Bril A., Yokota T. (2008) PPDF-based method to account for atmospheric light scattering in observations of carbon dioxide from space. *J.Geophys.Res.*, 113, D23210
- Oshchepkov S., Bril A., Yokota T. (2009) An improved photon path length probability density function -based radiative transfer model for space-based observation of greenhouse gases. *J.Geophys.Res.*, 114, D19207
- Ota Y., Higurashi A., Nakajima T., Yokota T. (2010) Matrix formulations of radiative transfer including the polarization effect in a coupled atmosphere-ocean system. *J.Quant.Spectrosc.Radiat.Transfer*, 111(6), 878–894
- Parta.P.K, Houweling S., Krol M., Bousquet P., Belikov D., Bergmann D., Bian H., Smith P.C, Chipperfield M.P, Corbin K, Cheiney A.F, Fraser A., Gloor E., Hess P., Ito A., Kawa S.R., Law R.M., Loh Z., Maksyutov S., Meng L., Palmer P.I., Prinn R.G., Rigby M., Saito R., Wilson C. (2011) TransCom model simulations of CH₄ and related species: linking transport, surface flux and chemical loss with CH₄ variability in the troposphere and lower stratosphere. *Atmos.Chem. Phys.Discuss.*, 11, 18767–18821
- Saito M., Kato T., Tang Y. (2009) Temperature controls ecosystem CO₂ exchange of an alpine meadow on the northeastern Tibetan Plateau. *Global Change Biol.*, 15(1), 221–228
- Saito M., Maksyutov S., Hirata R., Richardson A. D. (2009) An empirical model simulating diurnal and seasonal CO₂ flux for diverse vegetation types and climate conditions. *Biogeosciences*, 6, (4), 585–599
- Saito R., Hacker J.M., Inoue G., Yokota T. (2008) Attempt to identify sources of atmospheric methane and carbon dioxide concentrations found in in situ aircraft measurements over Southern Australia. *J.Geophys.Res.*, 113, D14108
- Saito R., Tanaka T., Hara H., Oguma H., Takamura T., Kuze H., Yokota T. (2009) Aircraft and ground-based observations of boundary layer CO₂ concentration in anticyclonic synoptic condition. *Geophys.Res.Lett.*, 36, L07807
- Saitoh N., Ota Y., Taguchi S., Imasu R. (2007) Assessment of uncertainty in CO₂ concentrations retrieved from thermal infrared spectra of GOSAT satellite. *Proc.SPIE*, 6405, 640508
- Saitoh N., Imasu R., Ota Y., Niwa Y. (2009) CO₂ retrieval algorithm for the thermal infrared spectra of the Greenhouse Gases Observing Satellite: Potential of retrieving CO₂ vertical profile from high-resolution FTS sensor. *J.Geophys.Res.*, 114, D17305
- Tanaka T., Fukabori M., Sugita T., Yokota T., Kumazawa R., Watanabe T., Nakajima H. (2008) Line shape of the far-wing beyond the band head of the CO₂ ν₃ band. *J.Mol.Spectrosc.*, 252(2), 185–189
- Valsala V., Maksyutov S., Ikeda M. (2008) Design and validation of an offline oceanic tracer transport model for a carbon cycle study. *J.Clim.*, 21(12), 2752–2769
- Valsala V., Alsibai H.M., Ikeda M., Maksyutov S. (2010) Interannual variability of CFC-11 absorption by the ocean: an offline model study. *Clim.Dyn.*, 36(7–8), 1435–1452
- Valsala V., Maksyutov S. (2010) Simulation and assimilation of global ocean pCO₂ and air-sea CO₂ fluxes using ship observations of surface ocean pCO₂ in a simplified biogeochemical offline model. *Tellus B*, 62(5), 821–840
- Valsala V., Maksyutov S., Murtugudde R. (2010) Possible interannual to interdecadal variabilities of the Indonesian throughflow water pathways in the Indian Ocean. *J.Geophys.Res.*, 115, C10016
- Valsala V., Maksyutov S. (2011) A short surface pathway of the subsurface Indonesian throughflow water from the Java coast associated with upwelling, Ekman transport, and subduction. *Int.J.Oceanogr.*, 2010, Article ID 540783
- Wunch D., Toon G.C., Wennberg P.O., Wofsy S.C., Stephens B.B., Fischer M.L., Uchino O., Machida T., Morino I., Tanaka T. et al (2010) Calibration of the total carbon column observing network using aircraft profile data. *Atmos.Meas. Tech.*, 3, 1351–1362

- Yamano D., Sakamoto Y., Yabushita A., Kawasaki M., Morino I., Inoue G. (2009) Buffer-gas pressure broadening for the 2 ν₃ band of methane measured with continuous-wave cavity ring-down spectroscopy. *Appl.Phys.B*, 97(2), 523-528
- Yokota T., Yoshida Y., Eguchi N., Ota Y., Tanaka T., Watanabe H., Maksyutov S. (2009) Global Concentrations of CO₂ and CH₄ Retrieved From GOSAT: First Preliminary Results. *SOLA*, 5, 160-163
- Yoshida Y., Ota Y., Eguchi N., Tanaka T., Morino I., Uchino O., Kikuchi N., Nobuta K., Watanabe H., Yokota T. (2009) Preliminary results of the column abundances of global carbon dioxide and methane obtained from Greenhouse gases Observing SATellite (GOSAT). *Proc.Atmos.Sci.Conf.*
- Yoshida Y., Oguma H., Morino I., Suto H., Kuze A., Yokota T. (2010) Mountaintop observation of CO₂ absorption spectra using a short wavelength infrared Fourier transform spectrometer. *Appl.Opt.*, 49(1), 71-79
- Yoshida Y., Ota Y., Eguchi N., Kikuchi N., Nobuta K., Tran H., Morino I., Yokota T. (2011) Retrieval algorithm for CO₂ and CH₄ column abundances from short-wavelength infrared spectral observations by the Greenhouse gases observing satellite. *Atmos.Meas.Tech.*, 4, 717-734
- 今須良一, 横田達也 (2009) 宇宙からの温室効果ガス観測の新たなる幕開け. *パリテイ*, 25 (1), 65-67
- 植山雅仁, 齊藤誠, 滝本貴弘 (2008) Re-thinking global change science: from knowledge to policy –AsiaFlux Workshop 2008– の報告. *生物と気象*, 8, D3
- 内野修, 酒井哲, 永井智広, 坂下卓也, 鈴木健司, 柴田隆, 森野勇, 横田達也 (2010) ライダーで観測された2009年サリチェフ火山噴火による成層圏エアロゾルの増加. *日本リモートセンシング学会誌*, 30 (3), 149-156
- 太田芳文, 江口菜穂, 吉田幸生, 塩見慶, 中塚由美子 (2006) 第3回宇宙からの温室効果ガス観測に関する国際ワークショップ (3rd IWGMS) 参加報告. *天気* 9月号, 28, (2), 707-712
- 太田芳文, 吉田幸生, 横田達也 (2008) 衛星からの晴天域の近赤外太陽散乱光観測による二酸化炭素気柱量推定手法の検討 – 誤差評価と鉛直気圧グリッドの最適化 –. *日本リモートセンシング学会誌*, 28 (2), 152-160
- 齋藤尚子, 今須良一, 太田芳文, 丹羽洋介 (2008) 温室効果ガス観測技術衛星 (GOSAT) の熱赤外波長における二酸化炭素鉛直プロファイル導出アルゴリズム. *日本リモートセンシング学会誌*, 28, (2), 161-177
- 中島映至, 中島孝, 日暮明子, 佐野到, 高村民雄, 石田春磨, ニック シュトゲンズ (2008) GOSAT 衛星搭載イメージャー CAI を利用したエアロゾルと雲情報の抽出に関する研究. *日本リモートセンシング学会誌*, 28, (2), 178-189
- 森野勇, 内野修, 工藤泰子, 山口高明, 横田達也 (2008) GOSAT-TANSO 検証計画. *日本リモートセンシング学会誌*, 28 (2), 204-210
- 森野勇 (2010) GOSAT 搭載フーリエ変換分光計による温室効果ガスの観測と GOSAT データ検証. 第46回光波センシング技術研究会 講演論文集, 41-47
- 横田達也 (2006) 人工衛星 GOSAT による地球規模の二酸化炭素濃度観測. *電気評論*, (12), 58-59
- 横田達也, 青木忠生, 江口菜穂, 太田芳文, 吉田幸生, Oshchepkov S., Bril A., Desbiens R., 森野勇 (2008) GOSAT 搭載温室効果ガス観測センサ (TANSO-FTS) 短波長赤外バンドのデータ処理手法. *日本リモートセンシング学会誌*, 28 (2), 133-142
- 横田達也 (2011) 環境リモートセンシングの最新動向. *日本リモートセンシング学会誌*, 31, (2), 252-255
- 吉田幸生, 横田達也 (2009) 温室効果ガス観測技術衛星 GOSAT による CO₂ カラム平均濃度の初期解析結果. *大気化学研究会ニュースレター*, (22), 8-9
- 渡辺宏, 石原博成, 開和生, 松永恒雄, 横田達也 (2008) 国立環境研究における GOSAT 地上データシステムの開発とデータ処理方針. *日本リモートセンシング学会誌*, 28 (2), 127-132

(3) 中核研究プロジェクト3: 気候・影響・土地利用のモデルの統合による地球温暖化リスクの評価

- Abe M., Shiogama H., Hargreaves J.C., Annan J.D., Nozawa T., Emori S. (2009) Correlation between inter-model similarities in spatial pattern for present and projected future mean climate. *SOLA*, 5, 133-136

- Allen M., Pall P., Stone D., Stott P., Frame D., Min S., Nozawa T., Yukimoto S. (2007) Scientific challenges in the attribution of harm to human influence on climate. *Univ.Pennsylvania Law Rev.*, 155(6), 1353-1400
- Bagan H., Yamagata Y. (2010) Improved subspace classification method for multispectral remote sensing image classification. *Photogramm.Eng.Remote Sens.*, 76(11), 1239-1251
- Barnett T.P., Pierce D.W., Hidalgo H.G., Bonfils C., Santer B.D., Das T., Bala G., Wood A.W., Nozawa T., Mirin A.A. et al. (2008) Human-induced changes in the hydrology of the western United States. *Science*, 319, 1080-1083
- Bonfils C., Santer B.D., Bala G., Doutriaux C., Mirin A., Pierce D.W., Hidalgo H.G., Das T., Barnett T.P., Nozawa T. et al. (2008) Detection and attribution of temperature changes in the mountainous western United States. *J.Clim.*, 21, 6404-6424
- Canadell J.G., Kirschbaum M.U.F., Kurz W.A., Sanz M.J., Schlamadinger B., Yamagata Y. (2007) Factoring out natural and indirect human effects on terrestrial carbon sources and sinks. *Environ.Sci.Policy*, 10(4), 370-384
- Christidis N., Stott P.A., Zwiers F.W., Shiogama H., Nozawa T. (2010) Probabilistic estimates of recent changes in temperature: a multi-scale attribution analysis. *Clim.Dyn.*, 34(7/8), 1139-1156
- Dairaku K., Emori S., Higashi H. (2008) Potential changes in extreme events under global climate change. *J.Disaster Res.*, 3(1), 39-49
- Dirmeyer P.A., Gao X., Zhao M., Guo Z., Oki T., Hanasaki N. (2006) GSWP2 multimodel analysis and implications for our perception of the land surface. *Bull.Am.Meteorol.Soc.*, 87(10), 1381-1397
- Emori S. (2006) The reliability of future climate change projection by high-resolution climate models. *Global Environ. Res.*, 10(2), 143-149
- Gillett N.P., Stone D.A., Stott P.A., Nozawa T., Karpechko A.Y., Hegerl G.C., Wehner M.F., Jones P.D. (2008) Attribution of polar warming to human influence. *Nature Geosci.*, 1, 750-754
- Hanasaki N., Kanae S., Oki T. (2006) A global river discharge simulation taking into account water withdrawal and reservoir operations. *J.Hydros.Hydraul.Eng.*, 24(2), 53-63
- Hanasaki N., Kanae S., Oki T., Masuda K., Motoya K., Shirakawa N., Shen Y., Tanaka K. (2008) An integrated model for the assessment of global water resources -Part 1: Model description and input meteorological forcing. *Hydrol.Earth Syst.Sci.*, 12, 1007-1025
- Hanasaki N., Kanae S., Oki T., Masuda K., Motoya K., Shirakawa N., Shen Y., Tanaka K. (2008) An integrated model for the assessment of global water resources -Part 2: Applications and assessments. *Hydrol.Earth Syst.Sci.*, 12, 1027-1037
- Hanasaki N., Inuzuka T., Kanae S., Oki T. (2010) An estimation of global virtual water flow and sources of water withdrawal for major crops and livestock products using a global hydrological model. *J.Hydrol.*, 384(3/4), 232-244
- Hasegawa A., Emori S. (2007) Effect of air-sea coupling in the assessment of CO₂-induced intensification of tropical cyclone activity. *Geophys.Res.Lett.*, 34, L05701
- Hidalgo H.G., Das T., Dettinger M.D., Cayan D.R., Pierce D.W., Barnett T.P., Bala G., Mirin A., Wood A.W., Bonfils C., Santer B.D., Nozawa T. (2009) Detection and attribution of streamflow timing changes to climate change in the western United States. *J.Clim.*, 22, 3838-3855
- Hirabayashi Y., Shinjiro K., Emori S., Oki T., Kimoto M. (2008) Global projections of changing risks of floods and droughts in a changing climate. *Hydrol.Sci.J.*, 53(4), 754-772 <The 2009 Tison Awardawarded>
- Ikeda M., Greve R., Hara T., Watanabe Y.W., Ohmura A., Ito A., Kawamiya M. (2009) Identifying crucial issues in climate science. *Eos Trans.AGU*, 90(2), 15
- Ito A. (2008) The regional carbon budget of East Asia simulated with a terrestrial ecosystem model and validated using AsiaFlux data. *Agric.For.Meteorol.*, 148(5), 738-747
- Kawase H., Abe M., Yamada Y., Takemura T., Yokohata T., Nozawa T. (2010) Physical mechanism of long-term drying trend over tropical North Africa. *Geophys.Res.Lett.*, 37, L09706
- Kawase H., Nagashima T., Sudo K., Nozawa T. (2011) Future changes in tropospheric ozone under Representative Concentration Pathways (RCPs). *Geophysical Research Letters*, 38, L05801

- Kiktev D., Caesar J., Alexander L., Shiogama H., Collier M. (2007) Comparison of observed and modeled trends in annual extremes of temperature and precipitation using the results of several climate models. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L10702
- Kinoshita T., Ohki T., Yamagata Y. (2010) Woody biomass supply potential for thermal power plants in Japan. *Appl. Energy*, 87(9), 2923-2927
- Kraxner F., Yang J., Yamagata Y. (2009) Attitudes towards forest, biomass and certification - A case study approach to integrate public opinion in Japan. *Bioresour.Technol.*, 100(17), 4058-4061
- Masutomi Y., Takahashi K., Harasawa H., Matsuoka Y. (2009) Impact assessment of climate change on rice production in Asia in comprehensive consideration of process/parameter uncertainty in general circulation models. *Agric.Ecosyst. Environ.*, 131(3/4), 281-291
- Mochizuki T., Ishii M., Kimoto M., Chikamoto Y., Watanabe M., Nozawa T., Sakamoto T.T., Shiogama H., Awaji T., Sugiura N. et al. (2010) Pacific decadal oscillation hindcasts relevant to near-term climate prediction. *Proc.Natl.Acad. Sci.USA*, 107(5), 1833-1837
- Moss R.H., Edmonds J.A., Hibbard K.A., Manning M.R., Rose S.K., van Vuuren D.P., Carter T.R., Emori S., Kainuma M., Kram T. et al. (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, 747-756
- Obersteiner M., Bottcher H., Yamagata Y. (2010) Terrestrial ecosystem management for climate change mitigation. *Curr.Opin.Environ.Sustainability*, 2(4), 271-276
- Ogura T., Emori S., Webb M.J., Tsushima Y., Yokohata T., Abe-Ouchi A., Kimoto M. (2008) Towards understanding cloud response in atmospheric GCMs: the use of tendency diagnostics. *J.Meteorol.Soc.Jpn.* (気象集誌), 86(1), 69-79
- Ogura T., Webb M.J., Bodas-Salcedo A., Williams K.D., Yokohata T., Wilson D.R. (2008) Comparison of cloud response to CO2 doubling in two GCMs. *SOLA*, 4, 29-32
- Pall P. (2011) Anthropogenic greenhouse gas contribution to flood risk in England and Wales in autumn 2000. *Nature*, 470(7334), 382-385
- Pierce D.W., Barnett T.P., Hidalgo H.G., Das T., Bonfils C., Santer B.D., Bala G., Dettinger M.D., Cayan D.R., Nozawa T. et al. (2008) Attribution of declining western U.S. snowpack to human effects. *J.Clim.*, 21, 6425-6444
- Santer B.D., Mears C., Wentz F.J., Taylor K.E., Gleckler P.J., Wigley T.M., Barnett T.P., Boyle J.S., Bruggemann W., Nozawa T. et al. (2007) Identification of human-induced changes in atmospheric moisture content. *Proc.Natl.Acad.Sci. USA*, 104(39), 15248-15253
- Schlamadinger B., Bird N., Johns T., Brown S., Canadell J., Ciccarese L., Dutschke M., Fiedler J., Fischlin A., Yamagata Y. et al. (2007) A synopsis of land use, land-use change and forestry (LULUCF) under the Kyoto protocol and Marrakech Accords. *Environ.Sci.Policy*, 10, 271-282
- Seya H., Tsutsumi M., Yamagata Y. (2010) Income convergence in Japan: A Bayesian spatial Durbin model approach. *Econ.Model.*
- Shen Y., Oki T., Utsumi N., Kanae S., Hanasaki N. (2008) Projection of future world water resources under SRES scenarios: water withdrawal. *Hydrol.Sci.J.*, 53(1), 11-33
- Shiogama H., Christidis N., Caesar J., Yokohata T., Nozawa T., Emori S. (2006) Detection of greenhouse gas and aerosol influences on changes in temperature extremes. *SOLA*, 2, 152-155
- Shiogama H., Nagashima T., Yokohata T., Crooks S.A., Nozawa T. (2006) Influence of volcanic activity and changes in solar irradiance on surface air temperatures in the early twentieth century. *Geophys.Res.Lett.*, 33, L09702
- Shiogama H., Nozawa T., Emori S. (2007) Robustness of climate change signals in near term predictions up to the year 2030: Changes in the frequency of temperature extremes. *Geophys.Res.Lett.*, 34, L12714
- Shiogama H., Hasegawa A., Nozawa T., Emori S. (2008) Changes in mean and extreme precipitation in near-term predictions up to the year 2030. *SOLA*, 4, 017-020

- Shiogama H., Emori S., Mochizuki T., Yasunaka S., Yokohata T., Ishii M., Nozawa T., Kimoto M. (2010) Possible influence of volcanic activity on the decadal potential predictability of the natural variability in near-term climate predictions. *Adv.Meteorol.*, 2010, Article ID 657318
- Shiogama H., Emori S., Takahashi K., Nagashima T., Ogura T., Nozawa T., Takemura T. (2010) Emission scenario dependency of precipitation on global warming in the MIROC3.2 model. *J.Clim.*, 23(9), 2404-2417
- Shiogama H., Hanasaki N., Masutomi Y., Nagashima T., Ogura T., Takahashi K., Hijioka Y., Takemura T., Nozawa T., Emori S. (2010) Emission scenario dependencies in climate change assessments of the hydrological cycle. *Clim.Change*, 99(1/2), 321-329
- Shiogama H., Emori S., Hanasaki N., Abe M., Masutomi Y., Takahashi K., Nozawa T. (2011) Observational constraints indicate risk of drying in the Amazon basin. *Nature Commun.*, 2, Article No.253
- Stone D.A., Allen M.R., Stott P.A., Pall P., Min S.-K., Nozawa T., Yukimoto S. (2009) The detection and attribution of human influence on climate. *Annu.Rev.Environ.Resour.*, 34(1/16), 1-16
- Sugiyama M., Shiogama H., Emori S. (2010) Precipitation extreme changes exceeding moisture content increases in MIROC and IPCC climate models. *Proc.Natl.Acad.Sci.USA*, 107(2), 571-575
- Suzuki T., Takayabu Y.N., Emori S. (2006) Coupling mechanisms between equatorial waves and cumulus convection in an AGCM. *Dyn.Atmos.Oceans*, 42, 81-106
- Suzuki T., Ninomiya K., Emori S. (2008) The impact of the cumulus suppression on the Baiu front simulated by an AGCM. *J.Meteorol.Soc.Jpn.* (気象集誌), 86(1), 119-140
- Suzuki T., Ninomiya K., Takayabu N.Y., Emori S. (2008) AGCM experiment of the effect of cumulus suppression on convection center formation over the Bay of Bengal. *J.Geophys.Res.*, 113, D16104
- Tachibana K., Sugimoto N., Shiogama H., Nozawa T. (2009) Visualization of huge climate data with high-speed spherical self-organizing map. *J.Adv.Comput.Intell.Intell.Inf.*, 13(3), 210-216
- Takahashi K., Honda Y., Emori S. (2007) Assessing mortality risk from heat stress due to global warming. *J.Risk Res.*, 10(3), 339-354
- Toda M., Yokozawa M., Emori S., Hara T. (2010) More asymmetric tree competition brings about more evapotranspiration and less runoff from the forest ecosystems: A simulation study. *Ecol.Modelling*, 221(24), 2887-2898
- Toyoda T., Awaji T., Sugiura N., Masuda S., Igarashi H., Sasaki Y., Hiyoshi Y., Ishikawa Y., Mochizuki T., Sakamoto T., Tatebe H., Komuro Y., Suzuki T., Nishimura T., Mori M., Chikamoto Y., Yasunaka S., Kanamaru Y., Arai M., Watanabe M., Shiogama H., Nozawa T., Hasegawa A., Ishii M., Kimoto M. (2011) Impact of the Assimilation of Sea Ice Concentration Data on an Atmosphere-Ocean-Sea Ice Coupled Simulation of the Arctic Ocean Climate. *SOLA*, 7, 37-40
- Watanabe M., Emori S., Satoh M., Miura H. (2009) A PDF-based hybrid prognostic cloud scheme for general circulation models. *Clim.Dyn.*, 33(6), 795-816
- Watanabe M., Suzuki T., Oishi R., Komuro Y., Watanabe S., Emori S., Takemura T., Ogura T., Yokohata T., Nozawa T. et al. (2010) Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. *J.Clim.*, 23(23), 6312-6334
- Yang Jue, 吉田謙太郎 (2010) 水道水水質向上への支払意志額の視点から見る中国の水道事業民営化に関する研究. 長崎大学環境科学部 総合環境研究, 12 (2), 57-68
- Yokohata T., Emori S., Nozawa T., Ogura T., Okada N., Suzuki T., Tsushima Y., Kawamiya M., Abe-Ouchi A., Hasumi H., et al. (2007) Different transient climate responses of two versions of an atmosphere-ocean coupled general circulation model. *Geophys.Res.Lett.*, 34, L02707
- Yokohata T., Emori S., Nozawa T., Ogura T., Kawamiya M., Tsushima Y., Suzuki T., Yukimoto S., Abe-Ouchi A., Hasumi H. et al. (2008) Comparison of equilibrium and transient responses to CO₂ increase in eight state-of-the-art climate models. *Tellus A*, 60(5), 946-961
- Zhang X., Zwiers F.W., Hegerl G.C., Lambert F.H., Gillett N.P., Solomon S., Scott P.A., Nozawa T. (2007) Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. *Nature*, 448, 461-465

- 犬塚俊之, 新田友子, 花崎直太, 鼎信次郎, 沖大幹 (2008) 水の供給源に着目した日本における仮想的な水輸入の内訳. 水工学論文集, 52, 367-372
- 江守正多 (2006) 高解像度気候モデルによる気候変化予測とその信頼性. 地球環境, 11 (1), 3-10
- 江守正多 (2007) 大気と海洋はどのように変化したか. 科学, 77 (7), 702-708
- 江守正多 (2008) [入門] 今さら聞けない 地球温暖化と CO₂ の基礎知識 Q1 地球温暖化は本当に進んでいるの? Q2 温暖化によって将来の地球はどうなる?. 化学, 63 (7), 18-20
- 江守正多 (2008) 地球温暖化が進むとどうなるか-社会問題化する地球温暖化問題-. 道路建設, 2008 (7), 9-12
- 江守正多 (2008) 地球温暖化の将来予測とその信頼性. 人間環境論集, 8, 1-20
- 江守正多 (2008) 地球温暖化を「正しく」教えることの難しさと大切さ. 平塚教育, (213), 2-3
- 江守正多 (2008) 地球温暖化予測の「翻訳」に向けて. JGL: Jpn Geosci.Lett. (日本地球惑星科学連合ニュースレター), 4 (2), 1-3
- 江守正多 (2009) 地球温暖化による気温予測. 日本医事新報, (4453), 82-83
- 江守正多 (2009) 地球温暖化の科学をどう捉えるか. 世界と議会, (541), 9-13
- 江守正多 (2009) 地球温暖化を「正しく」教えるために. 社会科教室, 52, 8-11
- 江守正多 (監修) (2009) 平成 21 年スマートビジネスパーソンの常識 地球温暖化検定. 環境ビジネス, (6), 49-55
- 江守正多, 赤祖父俊一, 伊藤公紀, 草野完也, 丸山茂徳, 吉田英生 (2009) e-mail 討論 地球温暖化: その科学的真実を問う (2). エネルギー・資源, 30 (2), 1-19
- 江守正多, 赤祖父俊一, 伊藤公紀, 草野完也, 丸山茂徳, 吉田英生 (2009) 新春 e-mail 討論 地球温暖化: その科学的真実を問う. エネルギー・資源, 30 (1), 3-22
- 江守正多 (2010) 温暖化リスクの専門家の視点から見た WWViews へのコメント. 科学技術コミュニケーション, 7, 49-54
- 江守正多 (2010) 気候モデルの「社会的透明性」. 科学, 80 (12), 1200
- 江守正多 (2011) 地球温暖化論争を経験して, 科学リテラシーについて思うこと. 日本の科学者, 46 (2), 19-21
- 小林孝, 小尻利治, 野沢徹 (2008) 全球大気海洋結合モデル MIROC 出力のダウンスケールと流域内降水量の推定. 水文・水資源学会誌, 21 (6), 423-438
- 高橋潔 (2007) 温暖化影響はどのようなものが懸念されているか. Estrela, (164), 2-10
- 高橋潔 (2008) 「温暖化影響・適応研究」の張り目. 水文・水資源学会誌, 21 (6), 480
- 高橋潔, 松井哲哉, 肱岡靖明, 田中信行, 原沢英夫 (2008) 温暖化政策支援モデルのための県別ブナ林影響関数の開発. 地球環境研究論文集, 16, 111-119 <平成 21 年度地球環境論文賞受賞>
- 高橋潔 (2009) 温暖化影響・適応評価研究における気候予測情報の利用-現状と今後の課題-. 水循環 貯留と浸透, 71, 17-23
- 高橋潔 (2009) 温暖化影響予測研究の新展開. River Front, 66, 21-24
- 高橋潔, 肱岡靖明 (2009) 地球温暖化影響研究の現状. 全国環境研会誌, 34 (2), 9-15
- 中島映至, 江守正多 (2010) 気候変動予測の最先端-セッションの趣旨-. 月刊海洋, 42 (5), 261-263
- 野沢徹 (2007) 過去の気候変化シグナルの検出とその要因推定. 環境研究, (143), 73-79
- 花崎直太, 増富祐司, 高橋潔, 肱岡靖明, 原沢英夫, 松岡譲 (2007) 温暖化政策支援モデルのための全球水資源影響関数の開発. 環境システム研究論文集, 35, 367-374
- 花崎直太, 増富祐司, 高橋潔, 肱岡靖明 (2008) 全球水資源評価における家庭・工業用水取水量の将来推計式の相互比較. 地球環境研究論文集, 16, 1-8
- 肱岡靖明, 高橋潔 (2006) 地球温暖化抑制のための温室効果ガス安定化濃度・排出経路・影響閾値の統合評価. 地球環境, 11 (1), 129-138

- 脇岡靖明, 高橋潔, 久保田泉 (2006) 統合評価モデルを用いた温室効果ガス安定化濃度目標下におけるイネ・小麦の潜在生産変化の国別影響評価. 環境情報科学別冊/環境情報科学論文集, 20, 19-24
- 脇岡靖明, 高橋潔, 花崎直太, 増富祐司, 原沢英夫 (2009) 統合評価モデルを用いた日本を対象とした温暖化影響の総合評価. 地球環境, 14 (2), 127-135
- 前田芳恵, 三瓶由紀, 江守正多, 福士謙介, 青柳みどり, 高橋潔, 福田寛之, 田中泰義, 松本安生, 朝倉暁生 他 (2010) 温暖化リスクメディアフォーラム. 天気, 57 (12), 45-51
- 増富祐司, 花崎直太, 高橋潔, 脇岡靖明, 松岡譲 (2007) 季節変動を再現する河川流量計算モデルの開発と全球水不足評価. 水工学論文集, 51, 235-240
- 増富祐司, 高橋潔, 原沢英夫, 松岡譲 (2008) 気候予測の不確実性を考慮した近未来の気候変化がアジア域の水稲生産量に及ぼす影響及びその適応策の評価. 地球環境研究論文集, 16, 121-130
- 山形与志樹, Kraxner F. (2008) バイオエネルギー利用につながる森林管理. 木質エネルギー, 19, 2-5
- 山形与志樹 (2010) 低炭素都市づくりと吸収源としてのみどり. 都市緑化技術, (77), 14-17
- 山形与志樹 (2011) 低炭素都市のシミュレーションが重要に. 日経 BP
- 山本隆広, 花崎直太, 高橋潔, 脇岡靖明 (2011) 季節性を考慮した水逼迫指標を用いた全球温暖化水資源評価. 水工学論文集, 55, 259-264

(4) 中核研究プロジェクト4: 脱温暖化社会の実現に向けたビジョンの構築と対策の統合評価

- Akashi O., Hanaoka T., Matsuoka Y., Kainuma M. (2011) A projection for global CO₂ emissions from the industrial sector through 2030 based on activity level and technology changes. *Energy*, 36(4), 1855-1867
- Ashina S., Nakata T. (2008) Energy-efficiency strategy for CO₂ emissions in a residential sector in Japan. *Appl. Energy*, 85, 101-114
- Ashina S., Fujino J. (2008) Quantitative analysis for regional potentials of on-grid wind power towards low-carbon electricity sector in Japan. *Proc. 31st IAEE Int. Conf.*, E4
- Ashina S., Fujino J. (2009) Feasibility study for low-carbon grid with renewables in Japan. *Int. Energy Workshop 2009*, 1-14
- Arimura T.H., Hibiki A., Katayama H. (2007) Is a voluntary approach an effective environmental policy instrument? A case for environment management systems
- Arimura T.H., Hibiki A., Johnstone N. (2007) An empirical study of environmental R&D: what encourages facilities to be environmentally innovative?. In: *Environmental Policy and Corporate Behaviour* (Johnstone N. ed., Edward Elgar Publ., 278p.), 142-173
- Arimura T.H., Hibiki A., Katayama H. (2008) Is a voluntary approach an effective environmental policy instrument?. *J. Environ. Econ. Manag.*, 55, 281-295
- Dirmeyer P.A., Gao X., Zhao M., Guo Z., Oki T., Hanasaki N. (2006) GSWP2 multimodel analysis and implications for our perception of the land surface. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 87(10), 1381-1397
- Fujino J., Nair R., Kainuma M., Masui T., Matsuoka Y. (2006) Multi-gas mitigation analysis on stabilization scenarios using aim global model. *Energy J.*, 343-353
- Fujino J., Hibino G., Ehara T., Matsuoka Y., Masui T., Kainuma M. (2008) Back-casting analysis for 70% emission reduction in Japan by 2050. *Clim. Policy*, 8((Suppl.)), S108-0
- Hanaoka T., Kainuma M., Kawase R., Matsuoka Y. (2006) Emissions scenarios database and regional mitigation analysis: a review of post-TAR mitigation scenarios. *Environ. Econ. Policy Stud.*, 7(3), 367-389
- Hanasaki N., Kanae S., Oki T. (2006) A global river discharge simulation taking into account water withdrawal and reservoir operations. *J. Hydrosoci. Hydraul. Eng.*, 24(2), 53-63
- Hijioka Y., Masui T., Takahashi K., Matsuoka Y., Harasawa H. (2006) Development of a support tool for greenhouse gas emissions control policy to help mitigate the impact of global warming. *Environ. Econ. Policy Stud.*, 7(3), 331-345

- Hijioka Y., Takahashi K. (2006) Integrated assessment of greenhouse gas stabilization concentrations, emission pathways, and impact threshold values for control of global warming. *Global Environ.Res.*, 10(2), 261-270
- Hijioka Y., Matsuoka Y., Nishimoto H., Masui T., Kainuma M. (2008) Global GHG emission scenarios under GHG concentration stabilization targets. *J.Global Environ.Eng.*, 13, 97-108
- Hashimoto S. (2008) Different accounting approaches to harvested wood products in national greenhouse gas inventories: their incentives to achievement of major policy goals. *Environ.Sci.Policy*, 11(8), 756-771
- Hashimoto S., Moriguchi Y. (2010) Linkages among resources, climate, and Asian growth. *J.Ind.Ecol.*, 14(2), 185-187
- Hanaoka T., Akashi O., Hasegawa T., Hibino G., Fujiwara K., Kanamori Y., Matsuoka Y., Kainuma M. (2009) Global emissions and mitigation of greenhouse gases in 2020. *J.Global Environ.Eng.*, Mar., 15-26 <地球環境論文賞 (JSCE GEE Award) awarded>
- Hanaoka T., Kainuma M., Matsuoka Y. (2009) The role of energy intensity improvement in the AR4 GHG stabilization scenarios. *Energy Effic.*, 1-24
- Kameyama Y. (2008) Process matters: building a future climate regime with multi-processes. *Clim.Policy*, 7(5), 429-443
- Kainuma M., Matsuoka Y., Morita T., Takahashi K. (2009) The Asia-Pacific integrated model. *Integrated Reg.Assess. Glob.Clim.Change*, 214-230
- Kameyama Y. (2010) Comment on "Multi-level Governance and Global Climate Change in East Asia". *Asian Econ.Policy Rev.*, 5(1), 108-109
- Kameyama Y., Kubota I. (2010) What are the "objectives" meant to be? A comparative study of multilateral environmental agreements on articles on objectives, with primary attention on the United Nations Framework Convention on Climate Change. *Environ.Econ.Policy Stud.*, 11(1/4), 1-17
- Kawase R., Matsuoka Y., Fujino J. (2006) Decomposition analysis of CO₂ emission in long-term climate stabilization scenarios. *Energy Policy*, 2113-2122
- Kanie N., Nishimoto H., Hijioka Y., Kameyama Y. (2010) Allocation and architecture in climate governance beyond Kyoto: lessons from interdisciplinary research on target setting. *Int.Environ.Agreements*, 10(4), 299-315
- Kudoh Y., Matsuhashi K., Kondo Y., Kobayashi S., Moriguchi Y., Yagita H. (2007) Statistical analysis of fuel consumption of hybrid electric vehicles in Japan. *World Electr.Veh.Assoc.J.*, 1, 142-147
- Lamarque J-F, Bond T.C., Eyring V., Granier C., Heil A., Klimont Z., Lee D., Liousse C., Mieville A., Kainuma M. et al. (2010) Historical (1850-2000) gridded anthropogenic and biomass burning emissions of reactive gases and aerosols: methodology and application. *Atmos.Chem.Phys.*, 10(15), 7017-7039
- Lamarque J-F, Bond T.C., Eyring V., Granier C., Heil A., Klimont Z., Lee D., Liousse C., Mieville A., Kainuma M. et al. (2010) Historical (1850-2000) gridded anthropogenic and biomass burning emissions of reactive gases and aerosols: methodology and application. *Atmos.Chem.Phys.Discuss.*, 10, 4963-5019
- Masui T., Hanaoka T., Hikita S., Kainuma M. (2006) Assessment of CO₂ reductions and economic impacts considering energy-saving investments. *Energy J.,Special Issue*, 175-190
- Masui T., Xu Y. (2008) Assessing the impacts of an oil products tax in China using a computable general equilibrium model. *Environ.Econ.Policy Stud.*, 9, 81-105
- Masui T., Ashina S., Fujino J. (2010) -. Masui T.,Ashina S.,Fujino J.eds., Analysis of 4.5 W/m² stabilization scenarios with renewable energies and advanced technologies using AIM/CGE[Global] model
- Masutomi Y., Inui Y., Takahashi K., Matsuoka Y. (2009) Development of highly accurate global polygonal drainage basin data. *Hydrol.Process*, 23(4), 572-584
- Masutomi Y., Takahashi K., Harasawa H., Matsuoka Y. (2009) Impact assessment of climate change on rice production in Asia in comprehensive consideration of process/parameter uncertainty in general circulation models. *Agric.Ecosyst. Environ.*, 131(3/4), 281-291
- Matsumoto K., Masui T. (2009) Mid-term dynamic effects of carbon Tax based on the imputed price of carbon. *Environ. Sci.*, 22(6), 391-400

- Matsuoka Y., Fujino J., Kainuma M. (2008) National implications of a 50% global reduction of greenhouse gases, and its feasibility in Japan. *Sustain.Sci.*, 3(1), 135-143
- Matsumoto K., Masui T. (2010) Economic implications of avoiding dangerous climate change: An analysis using the AIM/CGE [Global] model. *J. Environ. Sci. Eng.*, 4(7), 76-83
- Matsumoto K., Masui T. (2011) Analyzing long-term impacts of carbon tax based on the imputed price, applying the AIM/CGE model. *Manage. Environ. Qual.: Int. J.*, 22(1), 33-47
- Moss R.H., Edmonds J.A., Hibbard K.A., Manning M.R., Rose S.K., van Vuuren D.P., Carter T.R., Emori S., Kainuma M., Kram T. et al. (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, 747-756
- Nakicenovic N., Kolp P., Riahi K., Kainuma M., Hanaoka T. (2006) Assessment of emissions scenarios revisited. *Environ. Econ. Policy Stud.*, 7(3), 137-173
- Strachan N., Fujino J. (2007) Low-Carbon Society modelling. Cornelius S.ed., *Achieving a Sustainable Low-Carbon Society: Symposium & Workshop (2nd workshop Jpn-UK Jt.Res.Proj.)*, Nobel House, 76p
- Strachan N., Foxon T., Fujino J. (2008) Low-Carbon Society (LCS) modelling. *Clim. Policy*, 8((Suppl.)), S3-S4
- Strachan N., Foxon T., Fujino J. (2008) Policy implications from the Low-Carbon Society (LCS) modelling project. *Clim. Policy*, 8((Suppl.)), S17-0
- Takahashi K. (2007) Impacts of global warming on agricultural production and adaptations in response. *Global Environ. Res.*, 10(2), 243-252
- Tran T.T., Fujimori S., Matsuoka Y., (2010) Changes of energy consumption and the CO₂ emissions structure in Vietnam from 1986 to 2005. *Environ. Syst. Res.*, 38, 289-299
- Van Vuuren D.P., Meinshausen M., Plattner G.-K., Joos F., Strassmann K.M., Smith S.J., Wigley T.M.L., Raper S.C.B., Riahi K., Fujino J. et al. (2008) Temperature increase of 21st century mitigation scenarios. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 105(40), 15258-15262
- van Vuuren D.P., van Ruijven B.J., Edmonds J., Smith S.J., Calvin K.V., Karas J., Thomson A., Kainuma M., Nakicenovic N., Riahi K. et al. (2010) What do near-term observations tell us about long-term developments in greenhouse gas emissions?. *Clim. Change*, 103(3-4), 635-642
- Xu Y., Masui T. (2009) Local air pollutant emission reduction and ancillary carbon benefits of SO₂ control policies: Application of AIM/CGE model to China. *Eur. J. Oper. Res.*, 198(1), 315-325
- 明石修, 我部山彰則, 松岡譲 (2008) 生産量および技術の変化を考慮した鉄鋼生産にともなう CO₂ 排出量の長期的推計. *地球環境研究論文集*, 16, 165-174
- 芦名秀一, 藤野純一 (2008) 多地域最適電源計画モデルを用いたわが国電力部門における CO₂ 削減シナリオの検討. *エネルギー・資源*, 29 (1), 1-7
- 芦名秀一 (2010) 日本の2020年の温室効果ガス排出量(中期目標)を読み解く. *エネルギー・資源*, 31 (1), 52-53
- 池上貴志, 荒巻俊也, 花木啓祐 (2007) 下水熱利用地域冷暖房システムの二酸化炭素排出削減ポテンシャルの評価～東京都区部を対象として～. *電気学会研究会資料メタボリズム社会・環境システム研究会 MES-07-1~9*, 25-30
- 池上貴志, 荒巻俊也, 花木啓祐 (2008) ライフサイクルインベントリ分析による下水熱利用地域冷暖房システム導入効果の解析. *土木学会論文集 G*, 64 (2), 107-122
- 池上貴志, 芦名秀一, 藤野純一 (2009) 地域別に描いた再生可能エネルギー大幅導入社会の理想像. *日立総研*, 4(1), 4-9
- 池上貴志, 荒巻俊也, 花木啓祐 (2009) 東京都区部への下水熱利用地域冷暖房システム導入による二酸化炭素排出削減可能量の評価. *土木学会論文集 G*, 65 (2), 114-129

- 岩淵裕子, 神戸麻美子, 藤野純一 (2010) 5章 省エネルギーの可能性 5.1 家庭 (1) 建築物・家族構成別のエネルギー利用. 資料編 5 買い替えモデルによる試算結果の詳細 ※ (本編 P72 の詳細). 茨城県牛久市環境経済部環境政策課編, 平成 21 年度 牛久市地域エネルギービジョン (地域新エネルギー・省エネルギー策定事業), 茨城県牛久市, 46-48. 資 61- 資 92
- 榎原友樹, 藤野純一, 日比野剛, 松岡譲 (2007) 低炭素社会検討の前提となる社会経済ビジョンの構築. 地球環境, 12 (2), 145-151
- 甲斐沼美紀子 (2006) アジア太平洋地域統合評価モデルの開発と適用. 計測と制御, 45 (10), 839-843
- 甲斐沼美紀子, 相沢智之 (2006) 京都議定書と CO₂ 削減対策. フルードパワーシステム, 37 (3), 12-16
- 甲斐沼美紀子 (2007) 低炭素社会の実現に向けた脱温暖化 2005 プロジェクト. 日本貿易会月報, (7/8), 27-29
- 甲斐沼美紀子 (2008) 温室効果ガス削減のための中・長期シナリオ. 環境浄化技術, 7 (4), 38-43
- 甲斐沼美紀子 (2008) 気候変動の影響と対策 AIM モデルにもとづくシミュレーション. 人間環境論集, 8, 21-35
- 甲斐沼美紀子 (2008) 地球温暖化対策の評価 アジア地域の対策の重要性を踏まえた提言. 公衆衛生, 72 (12), 938-942
- 甲斐沼美紀子 (2009) 低炭素社会への転換に向けて. 季報エネルギー総合工学, 32 (1), 31-36
- 金森有子, 松岡譲 (2010) エネルギーサービスの需給バランスを考慮した家庭部門のエネルギー消費量推計について. 地球環境研究論文集, 18, 131-142
- 蟹江憲史, 肱岡靖明, 西本裕美, 森田香菜子 (2008) 2050 年温室効果ガス世界半減シナリオの日本へのインプリケーション. 地球環境, 12 (2), 135-143
- 亀山康子 (2006) 2013 年以降の国際制度をめぐる動きと提案-現状動向と今後の予測-. 環境と公害, 35 (4), 37-42
- 亀山康子 (2006) 6.1 研究成果の概要. 地球温暖化はどこまで解明されたか-日本の科学者の貢献と今後の展望 2006 - (小池勲夫編, 丸善, 277p.), 183-188
- 亀山康子 (2006) 6.7 国内の行動主体の分析. 地球温暖化はどこまで解明されたか-日本の科学者の貢献と今後の展望 2006 - (小池勲夫編, 丸善, 277p.), 220-225
- 亀山康子 (2006) 国際環境政策. 環境経済・政策学の基礎知識 (環境経済・政策学会編, 有斐閣, 446p.), 220-221
- 亀山康子 (2006) 地球環境保護政策の現状-気候保全に向けた国際協調-. 公衆衛生, 70 (6), 437-440
- 亀山康子, 田村堅太郎, 高村ゆかり, 蟹江憲史, 新澤秀則 (2006) シナリオ・プランニング・アプローチを用いた気候変動対処のための国際枠組み分析. 環境情報科学別冊/環境情報科学論文集, 20, 505-510
- 亀山康子 (2007) ハイリゲンダムサミットから COP13CMP3, 洞爺湖サミットへの国際社会の動向. 資源環境対策, 43 (15), 24-28
- 亀山康子 (2007) 阪口功著「地球環境ガバナンスとレジームの発展プロセス-ワシントン条約と NGO・国家」書評. 国際政治, (149), 179-182
- 亀山康子 (2007) 長期協力への対話が始動. 日本経済研究センター会報, (961), 26-29
- 亀山康子 (2008) 気候変動問題と交通-身近な取組みとグローバルな対応-. 国土交通, 61 (3), 24-25
- 亀山康子 (2008) 気候変動問題に国際社会はどう取り組むか. 外交フォーラム, (240), 34-36
- 亀山康子 (2008) 国際交渉の動向-洞爺湖サミット, COP14 そして 15 へ. 資源環境対策, 44 (15), 24-28
- 亀山康子 (2008) 地球温暖化対策のための国際枠組みに関する動向. 土木学会誌, 93 (7), 26-27
- 亀山康子, 蟹江憲史 (2008) 気候変動に関する次期国際枠組み立案のための国内政策決定手続き-アジア諸国の現状. 環境科学会誌, 21 (3), 175-185
- 亀山康子 (2009) 気候変動対処を目的とした次期国際枠組みの構造分析-デルファイ手法およびクラスター分析を用いたアンケート調査結果-. 環境経済・政策研究, 2 (2), 12-21
- 亀山康子 (2009) 国際関係論の到達点と今後. 環境科学会誌, 22 (2), 133-136

- 亀山康子 (2009) 地球温暖化をめぐる国際交渉. グローバルネット, (218), 30-31
- 亀山康子 (2009) 地球温暖化問題に関する国際交渉の動向 - 大きく変わる COP15 への動きを検証. 資源環境対策, 45 (12), 26-31
- 亀山康子 (2009) 中期目標と国際枠組み: 気候変動抑制に向けた日本の挑戦. 経済セミナー, (645), 26-30
- 亀山康子 (2009) 米国次期政権の温暖化対策を COP14/CMP4 を通して探る. 資源環境対策, 45 (2), 25-30
- 亀山康子 (2010) 気候変動問題への国際的取り組み - COP15 の評価と今後の課題 -. 海外事情, 58 (2), 33-50
- 亀山康子 (2010) 国レベルの議論を喚起. 環境会議, 2010 (春), 106-111
- 亀山康子 (2010) 国際環境レジームと日本外交. 国際問題, (588), 39-47
- 亀山康子 (2010) 地球温暖化問題と対策 - COP15/CMP5 の現場からの報告. 資源環境対策, 46 (2), 67-72
- 亀山康子 (2010) 地球温暖化問題に関する国際交渉の動向 - COP16 への動きを検証. 資源環境対策, 46 (12), 21-26
- 亀山康子 (2011) 地球温暖化問題と対策 - COP16/CMP6 報告: COP17・ダーバンに向けた確かな一歩. 資源環境対策, 47 (2), 14-19
- 河瀬玲奈, 松岡譲, 藤野純一 (2006) CO₂ 大幅削減に向けた欧州諸国の取り組みとわが国の挑戦. エネルギー・資源, 27 (2), 53-59
- 工藤祐揮, 松橋啓介, 近藤美則, 小林伸治, 森口祐一, 八木田浩史 (2008) 乗用車の 10・15 モード燃費の向上による実燃費の推移に関する統計解析. 日本エネルギー学会誌, 87 (11), 930-937 <論文賞受賞>
- 久保田泉 (2006) 6.4 気候変動への適応策. 地球温暖化はどこまで解明されたか - 日本の科学者の貢献と今後の展望 2006 - (小池勲夫編, 丸善, 277p.), 202-209
- 久保田泉, 高橋潔, 肱岡靖明 (2006) 政策決定支援のための適応研究に関する検討. 環境情報科学別冊/環境情報科学論文集, 20, 457-462
- 久保田泉 (2007) 地球温暖化問題に関する国際交渉 - 適応策を中心として -. 森脇広, 河合溪編, 鹿児島大学多島圏研究センター, 19-27
- 久保田泉 (2008) 気候変動枠組条約第 13 回締約国会議 (COP13) および京都議定書第 3 回締約国会合 (CMP3) の成果と今後の展望. L&T, (39), 25-31
- 久保田泉 (2009) 気候変動枠組条約第 14 回締約国会議 (COP14) および京都議定書第 4 回締約国会合 (CMP4) の成果と今後の展望. L&T, (43), 90-93
- 久保田泉 (2011) カンクン会合の成果と気候変動対策の今後. Law Technol., (51), 32-39
- 栗林美紀, 亀山康子 (2010) 一般機械器具製造業における環境管理活動や雇用制度が経営に与える影響. 環境情報科学論文集, (24), 189-194
- 高橋潔 (2006) 5.3 農林水産業への影響. 地球温暖化はどこまで解明されたか - 日本の科学者の貢献と今後の展望 2006 - (小池勲夫編, 丸善, 277p.), 149-158
- 高橋潔 (2006) 6.2 気候変動を抑制するための長期目標設定. 地球温暖化はどこまで解明されたか - 日本の科学者の貢献と今後の展望 2006 - (小池勲夫編, 丸善, 277p.), 188-194
- 高橋潔 (2006) 温暖化が農業生産に及ぼす影響とその適応策. 地球環境, 11 (1), 111-119
- 高橋潔, 久保田泉 (2006) 温暖化の適応に関する研究およびその実施の促進をめざして - 温暖化影響のリスク評価・リスク管理の視点から. 環境情報科学, 35 (3), 39-44
- 高橋潔 (2008) 「温暖化影響・適応研究」の張り目. 水文・水資源学会誌, 21 (6), 480
- 高橋潔 (2009) 気候変動により引き起こされる影響の予測と評価に関する研究. 環境科学会誌, 22 (1), 53-56
- 橋本征二 (2007) 気候変化の短中期の緩和と緩和のための政策・措置・手法. グローバルネット, (199), 12-13
- 橋本征二 (2007) 地球温暖化問題と廃棄物管理. 環境技術会誌, (128), 9-16
- 橋本征二 (2009) 循環型社会の地球温暖化対策. マッセ OSAKA 研究紀要, 12, 77-92
- 長谷川知子, 花岡達也, 松岡譲 (2007) 農業・廃棄物部門における CH₄ と N₂O の排出量とその削減ポテンシャルの将来推計. 環境システム研究論文集, 35, 491-498

- 花岡達也, 明石修, 日比野剛, 長谷川知子, 藤野純一, 松岡譲, 甲斐沼美紀子 (2008) 世界地域別の温室効果ガス排出削減量と削減費用の評価. エネルギー・資源, 29 (4), 36-42
- 花岡達也, 明石修, 日比野剛 (2010) 温暖化緩和策における投資回収期間と対策費用に関する評価. 環境システム研究論文発表会講演集, 38, 297-305
- 肱岡靖明, 高橋潔 (2006) 地球温暖化抑制のための温室効果ガス安定化濃度・排出経路・影響閾値の統合評価. 地球環境, 11 (1), 129-138
- 肱岡靖明, 高橋潔, 久保田泉 (2006) 統合評価モデルを用いた温室効果ガス安定化濃度目標下におけるイネ・小麦の潜在生産変化の国別影響評価. 環境情報科学別冊/環境情報科学論文集, 20, 19-24
- 肱岡靖明 (2007) 気候安定化レベルと温室効果ガス削減目標. ESTRELA, 164, 11-19
- 肱岡靖明, 高橋潔, 久保田泉 (2007) 気候安定化レベル検討のための支援ツール開発-温暖化影響データベース. 環境情報科学論文集, (21), 423-428
- 肱岡靖明 (2008) 温暖化のわが国への影響. 公衆衛生, 72 (12), 943-947
- 肱岡靖明 (2008) 気候安定化を目指して. 季刊ひょうご経済, (98), 16-23
- 肱岡靖明 (2008) 地球温暖化がもたらす日本への影響-最新の科学的地検から-. 産業と環境, 37 (7), 22-26
- 肱岡靖明 (2008) 地球温暖化が日本にもたらす影響~温暖化影響総合予測プロジェクト~. グローバルネット, (217), 30-31
- 肱岡靖明 (2008) 地球温暖化は何が問題なのか. 月刊下水道, 31 (5832), 6-10
- 肱岡靖明 (2009) 温室効果ガス削減目標と温暖化影響. NIRA 政策レビュー, (43), 8-10
- 肱岡靖明, 高橋潔, 花崎直太, 増富祐司, 原沢英夫 (2009) 統合評価モデルを用いた日本を対象とした温暖化影響の総合評価. 地球環境, 14 (2), 127-135
- 日引聡, 有村俊秀 (2007) 事業所レベルの環境マネジメントのインセンティブとステークホルダーの影響-環境管理に関する OECD 事業所サーベイから-. 計画行政, 30 (2), 61-68
- 藤野純一 (2006) 6.5 日本の脱温暖化シナリオ. 地球温暖化はどこまで解明されたか-日本の科学者の貢献と今後の展望 2006 - (小池勲夫編, 丸善, 277p.), 209-215
- 藤野純一 (2006) 6.6 排出抑制を進める政策措置. 地球温暖化はどこまで解明されたか-日本の科学者の貢献と今後の展望 2006 - (小池勲夫編, 丸善, 277p.), 216-220
- 藤野純一 (2006) 温室効果ガス排出シナリオ. 環境経済・政策学の基礎知識 (環境経済・政策学会, 有斐閣, 446p.), 4-5
- 藤野純一 (2006) 脱温暖化社会: なぜ必要か? どうすれば実現できるか?. 技術と経済, 471, 2-15
- 藤野純一 (2006) 脱温暖化社会の実現に向けて-問われる日本の総合力-. 産業と環境, 21-24
- 藤野純一 (2007) "CO₂ 70%削減"の投げかけにともなう活発な議論と前向きな取組みに期待. 紙パルプ技術タイムズ, 50 (6), 57-60
- 藤野純一 (2007) IPCC 第4次評価報告書に見る地球温暖化の現状と将来: 低炭素社会に向けての課題. 産業と環境, 36 (6), 23-28
- 藤野純一 (2007) なぜ温室効果ガスを6%削減しなければならないのか. 環境会議, (春号), 136-141
- 藤野純一 (2007) 脱温暖化2050プロジェクトその成果と今後の展望. 電気評論, 92 (11), 26-30
- 藤野純一 (2007) 低炭素社会に向けた挑戦. 資源環境対策, 43 (5), 49-56
- 藤野純一 (2007) 低炭素社会に向けた挑戦~問われる日本の総合力~. 技術と経済, 486, 14-22
- 藤野純一, 日比野剛, 榎原友樹, 芦名秀一 (2007) 低炭素社会に向けたエネルギー選択に関する考察. 地球環境, 12 (2), 171-178
- 藤野純一, 日比野剛, 榎原友樹, 松岡譲, 増井利彦, 甲斐沼美紀子 (2007) 低炭素社会のシナリオとその実現の可能性. 地球環境, 12 (2), 153-160
- 藤野純一 (2008) IPCC 第4次評価報告書の概要と低炭素社会実現への取組み. 自動車技術, 62 (11), 17-21

- 藤野純一 (2008) 温暖化回避と豊かな生活の両立をめざす－低炭素社会実現に向けて－. ミルシル, 1 (4), 22-24
- 藤野純一 (2008) 自然に憧れられる日本. 日本エネルギー学会誌, 87 (2), 155
- 藤野純一 (2008) 新たな社会をデザインする 低炭素社会を実現させるカギは, 仕組みづくり. ナショナルジオグラフィック, (7), 26-33
- 藤野純一 (2008) 人口減少社会における都市づくりと地球環境. 新都市, 62 (2), 40-43
- 藤野純一 (2008) 世界のメインストリームとなった低炭素社会づくり. 産業と環境, 37 (2), 31-35
- 藤野純一 (2008) 低炭素社会に向けた挑戦－問われる日本の総合力. JUNKAN, (22), 4-6
- 藤野純一 (2008) 低炭素都市づくり－シナリオと取組み 第423回地域開発研究懇談会低炭素都市・地域づくり：その具体化に向けた展望. 地域開発, 525, 2-18
- 藤野純一 (2008) 日本低炭素社会に向けて－70%削減を実現する12の方策－. 産業と環境, 37 (8), 67-73
- 藤野純一 (2009) バックキャストで今こそ国づくりを. オルタナ, (15), 14
- 藤野純一 (2009) 地球温暖化未来予想図. tocotoco, 5, 122-123
- 藤野純一 (2009) 低炭素社会における住宅の役割－快適さを逃さない住まいとオフィスの中でトプランナー機器が手軽に利用できる暮らし方・働き方－. IBEC (建築環境・省エネルギー機構), 4/30 (175), 7-10
- 藤野純一 (2009) 低炭素社会に向けた12の方策. Re, (164), 54-55
- 藤野純一 (2009) 低炭素社会に向けた挑戦. 調査季報, 164, 2-7
- 藤野純一 (2009) 低炭素社会に向けた潮流と日本の歩む道. 建材マンスリー, (527), 1-6
- 藤野純一 (2009) 低炭素社会を実現するビジネス創出と技術開発. 商工ジャーナル, 35 (12), 14-18
- 藤野純一 (2009) 低炭素社会実現に向けたシナリオ分析. 電気学会誌, 129 (1), 12-15
- 藤野純一 (2010) 再開発にひとこと デザインを超えるデザインは可能か. 再開発コーディネーター, (147), 31
- 藤野純一 (2010) 低炭素社会に向けた2020年/2050年シナリオ. 建築設備, (717), 20-31
- 藤野純一 (2007) 温暖化の何が危険なのか. 環境会議, (秋号), 32-39
- 藤原健史, 松岡譲, 金森有子 (2007) 消費支出構造を考慮した家庭ごみ発生量推計モデルの開発. 環境システム研究論文集, 35, 471-480
- 増井利彦 (2007) 温暖化はまだ先の話なのか?. 環境会議, (秋号), 70-75
- 増井利彦 (2007) 低炭素社会をどのように構築するか. ESTRELA, (164), 20-27
- 増井利彦 (2007) 物質循環を考慮した統合環境政策評価モデルの開発に関する研究. 環境科学会誌, 20 (1), 81-83
- 増井利彦, 松岡譲, 日比野剛 (2007) バックキャストによる脱温暖化社会実現の対策経路. 地球環境, 12 (2), 161-169
- 増井利彦 (2008) 温暖化対策の視点から見た道路特定財源をめぐる議論. 環境と文明, 16 (1), 6-7
- 増井利彦 (2009) 温室効果ガス排出削減に関する中期目標検討について. 地球環境研究センターニュース, 20 (3), 2-5
- 増井利彦 (2010) モデル分析は将来を予測しうるか?. 環境と文明, 18 (9), 7-8
- 増井利彦, 住明正, 平松あい, 風間聡, 一方井誠治, 松岡俊二, 田村誠, 三村信男 (2010) 低炭素社会と循環型社会・自然共生社会. IR3S 温暖化フラッグシッププロジェクト編, サステイナブルな地球温暖化対応策, 東京大学, 17-21
- 増井利彦 (2011) 環境税 CO₂削減の足がかりに. 地球温暖化, 11 (1月), 16-19
- 増富祐司, 花崎直太, 高橋潔, 肱岡靖明, 松岡譲 (2007) 季節変動を再現する河川流量計算モデルの開発と全球水不足評価. 水工学論文集, 51, 235-240
- 増富祐司, 高橋潔, 原沢英夫, 松岡譲 (2008) 気候予測の不確実性を考慮した近未来の気候変化がアジア域の水稲生産量に及ぼす影響及びその適応策の評価. 地球環境研究論文集, 16, 121-130

- 松橋啓介 (2006) 持続可能な交通とまちづくりの方向性. 環境研究, (141), 22-28
- 松橋啓介 (2007) 低炭素社会に向けた交通システムの将来ビジョンの構築について. 都市計画論文集, 42 (3), 889-894
- 松橋啓介, 工藤祐揮, 森口祐一 (2007) 交通部門における CO₂ 排出量の中長期的な大幅削減に向けた対策. 地球環境, 12, 179-189
- 松橋啓介 (2007) 日本における低炭素社会に向けた対策の検討. 交通工学, 42 (6), 38-43
- 松橋啓介 (2009) 2050 年低炭素社会に向けたビジョン構築. 日交研シリーズ A, 462, 1-11
- 松橋啓介 (2009) 地球環境時代の交通システムのビジョンと実現策. 都市計画, 279, 25-28
- 松橋啓介 (2009) 低炭素社会実現に向けた交通システム改善のポイント. 調査季報, 16, 36-39
- 松橋啓介 (2009) 低炭素都市の実現に向けた LRT の役割. IATSS Review, 34 (2), 39-46
- 松橋啓介, 加藤秀樹 (2009) エコドライブの燃料消費量削減効果に関する研究. 室町泰徳編著, 運輸部門における温室効果ガス削減施策の長期的評価に関する研究 (日交研シリーズ A-489), 日本交通政策研究会, 11 月 23 日
- 松橋啓介, 加藤秀樹 (2009) 低炭素社会に向けたエコドライブの役割. 環境情報科学, 38 (4), 37-41
- 松橋啓介 (2011) 持続可能な交通の分析を踏まえた低炭素都市の構築に関する研究. 環境科学会誌, 24 (1), 64-66
- 松本健一 (2008) ポスト京都議定書における帰属炭素税. 総合政策研究, 30, 139-150
- 松本健一 (2010) 内生的技術変化を考慮した動学的応用一般均衡モデルによる気候変動対策の経済分析: 日本経済を対象として. 地球環境研究論文集, 18, 53-61
- 森口祐一, 松橋啓介 (2007) 日本の自動車を取り巻く社会情勢の将来展望. 自動車技術, 61 (3), 31-36
- 森口祐一 (2009) 温暖化対策としてのバイオ燃料の効果の評価. 環境情報科学, 38 (3), 43-49
- 森口祐一 (2009) 巻頭言 消費者を対象とした対策の重要性と有効性. 環境情報科学, 38 (4), 1
- 森口祐一 (2010) 家庭生活における温室効果ガスの見える化. 日本エネルギー学会誌, 89 (7), 615-622
- 山下隆久, 金森有子, 松岡譲 (2007) 人口・世帯構成と環境負荷発生量の係わりについて. 環境システム研究論文集, 35, 315-325
- 米澤健一, 松橋啓介 (2009) 自治体規模の違いによる自家用乗用車の CO₂ 排出量変化の要因分析. 都市計画論文集, 44 (3), 109-114

(5) 関連研究プロジェクト

【プロジェクト 1】

- Allen M., Pall P., Stone D., Stott P., Frame D., Min S., Nozawa T., Yukimoto S. (2007) Scientific challenges in the attribution of harm to human influence on climate, Univ. Pennsylvania Law Rev., 155(6), 1353-1400
- Barnett T.P., Pierce D.W., Hidalgo H.G., Bonfils C., Santer B.D., Das T., Bala G., Wood A.W., Nozawa T., Mirin A.A. et al. (2008) Human-induced changes in the hydrology of the western United States, Science, 319, 1080-1083
- Bonfils C., Santer B.D., Bala G., Doutriaux C., Mirin A., Pierce D.W., Hidalgo H.G., Das T., Barnett T.P., Nozawa T. et al. (2008) Detection and attribution of temperature changes in the mountainous western United States. J.Clim., 21, 6404-6424
- Christidis N., Stott P.A., Zwiers F.W., Shiogama H., Nozawa T. (2010) Probabilistic estimates of recent changes in temperature: a multi-scale attribution analysis. Clim.Dyn., 34(7/8), 1139-1156
- Gillett N.P., Stone D.A., Stott P.A., Nozawa T., Karpechko A.Y., Hegerl G.C., Wehner M.F., Jones P.D. (2008) Attribution of polar warming to human influence. Nature Geosci., 1, 750-754
- Hidalgo H.G., Das T., Dettinger M.D., Cayan D.R., Pierce D.W., Barnett T.P., Bala G., Mirin A., Wood A.W., Bonfils C., Santer B.D., Nozawa T. (2009) Detection and attribution of streamflow timing changes to climate change in the western United States. J.C

Kawase H., Abe M., Yamada Y., Takemura T., Yokohata T., Nozawa T. (2010) Physical mechanism of long-term drying trend over tropical North Africa. *Geophys.Res.Lett.*, 37, L09706

Kawase H., Nagashima T., Sudo K., Nozawa T. (2011) Future changes in tropospheric ozone under Representative Concentration Pathways (RCPs). *Geophysical Research Letters*, 38, L05801

Mochizuki T., Ishii M., Kimoto M., Chikamoto Y., Watanabe M., Nozawa T., Sakamoto T.T., Shiogama H., Awaji T., Sugiura N. et al. (2010) Pacific decadal oscillation hindcasts relevant to near-term climate prediction. *Proc.Natl.Acad.Sci.USA*, 107(5), 1833-1

Nagashima T.,Shiogama H.,Yokohata T.,Takemura T.,Crooks S.A.,Nozawa T. (2006) Effect of carbonaceous aerosols on surface temperature in the mid twentieth century, *Geophys.Res.Lett.*, 33, L04702

Pall P., Aina T., Stone D.A., Stott P.A., Nozawa T., Hilberts A.G.J., Lohmann D., Allen M.A. (2011) Anthropogenic greenhouse gas contribution to flood risk in England and Wales in autumn 2000. *Nature*, 470(7334), 382-385

Pierce D.W., Barnett T.P., Hidalgo H.G., Das T., Bonfils C., Santer B.D., Bala G., Dettinger M.D., Cayan D.R., Nozawa T. et al. (2008) Attribution of declining western U.S. snowpack to human effects. *J.Clim.*, 21, 6425-6444

Santer B.D., Mears C., Wentz F.J., Taylor K.E., Gleckler P.J., Wigley T.M., Barnett T.P., Boyle J.S., Bruggemann W., Nozawa T. et al. (2007) Identification of human-induced changes in atmospheric moisture content, *Proc.Natl.Acad.Sci. USA*, 104(39), 15248-15253

Shiogama H.,Christidis N.,Caesar J.,Yokohata T.,Nozawa T.,Emori S. (2006) Detection of greenhouse gas and aerosol influences on changes in temperature extremes, *SOLA*, 2, 152-155

Shiogama H.,Nagashima T.,Yokohata T.,Crooks S.A., Nozawa T. (2006) Influence of volcanic activity and changes in solar irradiance on surface air temperatures in the early twentieth century, *Geophys.Res.Lett.*, 33, L09702

Shiogama H., Emori S., Hanasaki N., Abe M., Masutomi Y., Takahashi K., Nozawa T. (2011) Observational constraints indicate risk of drying in the Amazon basin. *Nature Commun.*, 2, Article No.253

Stone D.A., Allen M.R., Stott P.A., Pall P., Min S.-K., Nozawa T., Yukimoto S. (2009) The detection and attribution of human influence on climate. *Annu.Rev.Enviroin.Resour.*, 34(1/16), 1-16

Tachibana K., Sugimoto N., Shiogama H., Nozawa T. (2009) Visualization of huge climate data with high-speed spherical self-organizing map. *J.Adv.Comput.Intell.Intell.Inf.*, 13(3), 210-216

Zhang X., Zwiers F.W., Hegerl G.C., Lambert F.H., Gillett N.P., Solomon S., Scott P.A., Nozawa T. (2007) Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends, *Nature*, 448, 461-465

小林孝, 小尻利治, 野沢徹 (2008) 全球大気海洋結合モデル MIROC 出力のダウンスケールと流域内降水量の推定. *水文・水資源学会誌*, 21 (6), 423-438

野沢徹 (2007) 過去の気候変化シグナルの検出とその要因推定. *環境研究*, (143), 73-79

【プロジェクト 2】

Toshiki Natori (2006) Impacts of global warming on alpine plants growing in the Japanese alpine zone and possibility of monitoring global warming impacts with alpine vegetation. *Global Environmental Research* 10(2) 161-166

名取俊樹 温暖化の高山植物への影響 - 温暖化影響モニタリングの可能性 地球環境 11 : 121-26

【プロジェクト 3】

無し

【プロジェクト 4】

Fujita K., Osawa Y., Kayanne H., Ide Y., Yamano H. (2009) Distribution and sediment production of large benthic foraminifers on reef flats of the Majuro Atoll, Marshall Islands. *Coral Reefs*, 28(1), 29-45

Murase T.,Tanaka, M.,Tani T.,Miyashita Y.,Ohkawa N.,Ishiguro N.,Suzuki Y.,Kayanne H.,Yamano H. (2008) A photogrammetric correction procedure for light refraction effects at a two-medium boundary, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 74(9), 1129-1136

Shimazaki H., Yamano H., Yokoki H., Yamaguchi T., Chikamori M., Tamura M., Kayanne H. (2006) Global mapping of factors controlling reef-island formation and maintenance, Proc.10th Int.Coral Reef Symp. (Suzuki Y. et al., Jpn.Coral Reef Soc.,1997p.), 1577-1584

Yamaguchi T., Chikamori M., Kayanne H., Yamano H., Yokoki H., Najima Y. (2006) Conditions and activities supporting early prehistoric human settlement on Majuro Atoll in Marshall Islands, Eastern Micronesia,Proc.10th Int.Coral Reef Symp. (Suzuki Y. et al., Jpn.Coral Reef Soc., 1997p.), 1549-1555

Yamaguchi T., Kayanne H., Yamano H. (2009) Archaeological investigation of the landscape history of an Oceanic atoll: Majuro, Marshall Islands. Pac.Sci., 63(4), 537-565

Yamano H., Yamaguchi T., Chikamori M., Kayanne H., Yokoki H., Shimazaki H., Tamura M., Watanabe S., Yoshii S. (2006) Satellite-based typology to assess stability and vulnerability of atoll islands: a comparison with archaeological data,Proc.10th Int.Coral Reef Symp. (Suzuki Y. et al., Jpn.Coral Reef Soc., 1997p.), 1556-1566

Yamano H., Shimazaki H., Matsunaga T., Ishoda A., McClennen C., Yokoki H., Fujita K., Osawa Y., Kayanne H. (2006) Evaluation of various satellite sensors for waterline extraction in a coral reef environment: Majuro Atoll, Marshall Islands, Geomorphology, 82, 398-411

Yamano H., Kayanne H., Yamaguchi T., Kuwahara Y., Yokoki H., Shimazaki H., Chikamori M. (2007) Atoll island vulnerability to flooding and inundation revealed by historical reconstruction: Fongafale Islet, Funafuti Atoll, Tuvalu, Global Planet.Change, 57, 407-416

Yokoki H., Yamano H., Kayanne H., Sato D., Shimazaki H., Yamaguchi T., Chikamori M., Ishoda A., Takagi H (2006) Numerical calculations of longshore sediment transport due to wave transformation in the lagoon of Majuro Atoll, Marshall Islands, Proc.10th Int.Coral Reef Symp. (Suzuki Y. et al., Jpn.Coral Reef Soc., 1997p.), 1570-1576

大西俊次, 今枝良平, 佐野滋樹, 伊藤和弘, 山野博哉, 茅根創 (2008) マーシャル諸島マジロ環礁におけるGPS測量とジオイド. 先端測量技術, 96, 48-51

桑原祐史, 横木裕宗, 佐藤大作, 山野博哉, 茅根創 (2008) ツバル国フナフチ環礁における沿岸域土地被覆変化の解析. 沿岸域学会誌, 21 (2), 21-32

佐藤大作, 横木裕宗, 藤田和彦, 桑原祐史, 山野博哉, 島崎彦人, 茅根創, 渡邊真砂夫 (2006) 海面上昇後のマーシャル諸島マジロ環礁における地形維持過程の数値シミュレーション, 海洋工学論文集, 53, 1291-1295

中田聡史, 山野博哉, 梅澤有, 藤田昌史, 渡邊真砂夫, 谷口真人 (2010) 比抵抗法による環礁州島における帯水層の塩水化評価. 日本リモートセンシング学会誌, 30 (5), 317-330

山野博哉 (2008) 地図の無い島-環礁州島における地理情報の整備と地球温暖化に対する脆弱性評価・適応策への応用-, 地学雑誌, 117 (2), 412-423

山野博哉 (2010) グローバル・ローカルな要因による小島嶼国の環境問題. 水環境学会誌, 33, 234-238

【プロジェクト5】

Abe O., Watanabe A., Sarma V.V.S.S., Matsui Y., Yamano H., Yoshida N., Saino T. (2010) Air-Sea gas transfer in a shallow, flowing and coastal environment estimated by dissolved inorganic carbon and dissolved oxygen analyses. J.Oceanogr., 66(3), 363-372

Adachi H., Yamano H., Miyajima T., Nakaoka M. (2010) A simple and robust procedure for coring unconsolidated sediment in shallow water. J.Oceanogr., 66(6), 865-872

Hanaizumi H., Akiba M., Yamano H., Matsunaga T. (2008) A pan-sharpening method for satellite image-based coral reef monitoring with higher accuracy. Proc.11th Int.Coral Reef Symp., 626-630

Hyeong K., Shimamura M., Watanabe T., Yamano H., Sugihara K., Kim J. (2008) Evaluation of Jeju/Tsushima hermatypic corals as sea surface temperature (SST) recorders, Ocean and Polar Research, 30(3), 351-359

Murase T., Tanaka, M., Tani T., Miyashita Y., Ohkawa N., Ishiguro N., Suzuki Y., Kayanne H., Yamano H. (2008) A photogrammetric correction procedure for light refraction effects at a two-medium boundary, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 74(9), 1129-1136

Pelletier B., Cabioch G., Chardon D., Yamano H. (2006), Lithologie des pentes externes du recif barriere de Nouvelle-Caledonie. Campagne de dragages dragages 2005-NC-DR du N.O.Alis (Sci.Terre; Geol.-Geophys.No.68) (Pelletier B. eds, IRD, 54p.) (in French)

Yamano H. (2007) The use of multi-temporal satellite images to estimate intertidal reef-flat topography, *J.Spatial Sci.*, 52(1), 71-77

Yamano H., Sugihara K., Nomura K. (2011) Rapid poleward range expansion of tropical reef corals in response to rising sea surface temperatures. *Geophys.Res.Lett.*, 38, L04601

Yoshida M., Hanaizumi H., Yamano H. (2006) A method for extracting flow lines in coral reef field using aerial photographs, *Proc.10th Int.Coral Reef Symp.* (Suzuki Y. et al., *Jpn.Coral Reef Soc.*, 1997p.), 1746-1752

杉原薫, 園田直樹, 今福太郎, 永田俊輔, 指宿敏幸, 山野博哉 (2009) 九州西岸から隠岐諸島にかけての造礁サンゴ群集の緯度変化. *日本サンゴ礁学会誌*, 11, 51-67

中尾有伸, 山野博哉, 藤井賢彦, 山中康裕 (2009) 日本のサンゴ被度データベースの作成と分析. *日本サンゴ礁学会誌*, 11, 109-129

浪崎直子, 山野博哉, 鈴木倫太郎, 大堀健司, 翁長均, 岸本多美子, 佐川鉄平, 町田佳子, 安村茂樹, 佐藤崇範 他 (2010) 日本海洋学会青い海助成事業 採択課題「日本全国みんなでつくるサンゴマップ」プロジェクト情報収集・提供機能拡張及びワークショップ開催報告書

藤井賢彦, 山野博哉 (2010) 『大森 (2010) 「中尾ら (2009) 日本のサンゴ被度データベースの作成と分析. *日本サンゴ礁学会誌* 11: 109-129」に対するコメント』への回答. *日本サンゴ礁学会誌*, 12, 53-57

山崎敦子, 渡邊剛, 俣康輝, 中地シュウ, 山野博哉, 岩瀬文人 (2009) 高知県竜串湾に生息する造礁性サンゴ骨格を用いた温帯域の古環境復元. *日本サンゴ礁学会誌*, 11, 91-107

山野博哉 (2008) サンゴ礁の今, *月刊みんぱく*, 9, 3

山野博哉 (2008) 日本におけるサンゴ礁の分布, *沿岸海洋研究*, 46 (1), 3-9

山野博哉, 浪崎直子 (2009) 最前線のサンゴ: 千葉県館山のエンタクミドリイシ群集の変化. *日本サンゴ礁学会誌*, 11, 71-72

山野博哉 (2010) 造礁サンゴとは. 杉原薫監修, 「造礁サンゴフィールド図鑑」伊豆・三浦・房総編 (前篇), NPO 法人 OWS

屋良由美子, 藤井賢彦, 山中康裕, 岡田直資, 山野博哉, 大島和裕 (2009) 地球温暖化に伴う海水温上昇が日本近海の造礁サンゴの分布と健全度に及ぼす影響評価. *日本サンゴ礁学会誌*, 11, 131-140

渡邊剛, 島村道代, 山野博哉 (2009) 北限サンゴ礁から採取されたキクメイシ属サンゴ骨格中の酸素・炭素同位体比. *日本サンゴ礁学会誌*, 11, 83-90

【プロジェクト6】

H. Harasawa: "Key Vulnerabilities and Critical Levels of Impacts in East & South East Asia", *Avoiding Dangerous Climate Change*, Cambridge University Press, 392pp. 243-249 (2006)

Hanasaki N., Kanae S., Oki T., Masuda K., Motoya K., Shirakawa N., Shen Y., Tanaka K. (2008) An integrated model for the assessment of global water resources - Part 2: Applications and assessments, *Hydrol.Earth Syst.Sci.*, 12, 1027-1037

Hanasaki N., Kanae S., Oki T., Masuda K., Motoya K., Shirakawa N., Shen Y., Tanaka K. (2008) An integrated model for the assessment of global water resources - Part 1: Model description and input meteorological forcing, *Hydrol.Earth Syst.Sci.*, 12, 1007-1025

Hideo Harasawa: "A Consideration on Dangerous Level of Global Warming", *Global Environmental Research*, Vol.10, No.2, pp.253-259 (2006)

Hijioka Y., Masui T., Takahashi K., Matsuoka Y., Harasawa H. (2006) Development of a support tool for greenhouse gas emissions control policy to help mitigate the impact of global warming, *Environ.Econ.Policy Stud.*, 7(3), 331-345

Hijioka Y., Takahashi K. (2006) Integrated assessment of greenhouse gas stabilization concentrations, emission pathways, and impact threshold values for control of global warming, *Global Environ.Res.*, 10(2), 261-270

- Hijioka Y., Matsuoka Y., Nishimoto H., Masui T., Kainuma M. (2008) Global GHG emission scenarios under GHG concentration stabilization targets, *J.Global Environ.Eng.*, 13, 97-108
- Honda Y., Kabuto M., Ono M., Uchiyama I. (2007) Determination of optimum daily maximum temperature using climate data, *Environ.Health Prev.Med.*, 12(5), 209-216
- Takahashi K. (2007) Impacts of global warming on agricultural production and adaptations in response, *Global Environ. Res.*, 10(2), 243-252
- Takahashi K., Honda Y., Emori S. (2007) Assessing mortality risk from heat stress due to global warming, *Journal of Risk Research*, 10(3), 339-354
- 一ノ瀬俊明 (2006) 都市部におけるヒートアイランド現象, アジア環境白書 2006/07 (日本環境会議, 「アジア環境白書」編集委員会編著, 東洋経済新報社, 317p.), 280-283
- 蟹江憲史, 肱岡靖明, 西本裕美, 森田香菜子 (2008) 2050年温室効果ガス世界半減シナリオの日本へのインプリケーション, *地球環境*, 12 (2), 135-143
- 兜眞徳 (2006) 気候変動と健康リスク研究の最近の動向, *地球環境*, 11 (1), 79-86
- 兜眞徳 (2006) 地球温暖化による健康への影響と対策, *高圧ガス*, 43 (6), 17-23
- 兜眞徳, 本田靖, 青柳みどり (2006) 夏季の曝露温度調節行動と暑熱ストレス関連症状の地域差-全国レベルのアンケート調査結果から-, *環境科学会誌*, 19 (1), 45-57
- 兜眞徳, 本田靖, 等々力英美 (2006) 国内3都市における下記の日最高気温と個人別曝露温度, 平成17年度ヒートアイランド現象による環境影響に関する調査検討業務報告書 (尾島俊雄編, 環境情報科学センター, 119p.), 22
- 久保田泉 (2006) 6.4 気候変動への適応策, 地球温暖化はどこまで解明されたか-日本の科学者の貢献と今後の展望 2006 - (小池勲夫編, 丸善, 277p.), 202-209
- 久保田泉, 高橋潔, 肱岡靖明 (2006) 政策決定支援のための適応研究に関する検討, *環境情報科学別冊/環境情報科学論文集*, 20, 457-462
- 高橋潔 (2006) 温暖化が農業生産に及ぼす影響とその適応策, *地球環境*, 11 (1), 111-119
- 高橋潔, 久保田泉 (2006) 温暖化の適応に関する研究およびその実施の促進をめざして-温暖化影響のリスク評価・リスク管理の視点から, *環境情報科学*, 35 (3), 39-44
- 高橋潔 (2007) 温暖化影響はどのようなものが懸念されているか, *Estrela* (164), 2-10
- 高橋潔, 松井哲哉, 肱岡靖明, 田中信行, 原沢英夫 (2008) 温暖化政策支援モデルのための県別ブナ林影響関数の開発, *地球環境研究論文集*, 16, 111-119
- 花崎直太, 増富祐司, 高橋潔, 肱岡靖明 (2008) 全球水資源評価における家庭・工業用水取水量の将来推計式の相互比較, *地球環境研究論文集*, 16, 1-8
- 原沢英夫 (2006) (コラム1) 気温上昇1℃, 2℃, 3℃で何が起きる?, *気候変動+2℃* (山本良一監修, ダイアモンド社, 144p.), 46
- 原沢英夫 (2006) 温暖化のもたらす異常気象とその社会影響, *環境情報科学*, 35 (3), 4-7
- 原沢英夫: *地球環境*, 11 (1), 121-127 (2006) “地球温暖化の危険なレベル”
- 原沢英夫 (2007) 気候変動と生態系の変化, *河川*, 63 (1), 48-51
- 原沢英夫 (2007) 地球温暖化の市民生活への影響, *地球環境*, 11 (1), 87-94
- 肱岡靖明, 高橋潔 (2006) 地球温暖化抑制のための温室効果ガス安定化濃度・排出経路・影響閾値の統合評価, *地球環境*, 11 (1), 129-138
- 肱岡靖明, 高橋潔, 久保田泉 (2006) 統合評価モデルを用いた温室効果ガス安定化濃度目標下におけるイネ・小麦の潜在生産変化の国別影響評価, *環境情報科学別冊/環境情報科学論文集*, 20, 19-24
- 肱岡靖明, 高橋潔, 久保田泉 (2007) 気候安定化レベル検討のための支援ツール開発-温暖化影響データベース, *環境情報科学論文集*, (21), 423-428

肱岡靖明 (2008) 地球温暖化は何が問題なのか, 月刊下水道, 31 (8), 6-10

増富祐司, 花崎直太, 高橋潔, 肱岡靖明, 松岡譲: 水工学論文集, 第51巻, 235 - 241 (2007) “季節変動を再現する河川流量計算モデルの開発と全球水不足評価”

【プロジェクト7】

無し

【プロジェクト8】

増井利彦 (2007) 物質循環を考慮した統合環境政策評価モデルの開発に関する研究, 環境科学会誌, 20 (1), 81-83

藤野純一 (2008) 自然に憧れられる日本, 日本エネルギー学会誌, 87 (2), 155

【プロジェクト9】

Kondo M., Uchida M., Shibata Y. (2010) Radiocarbon-based residence time estimates of soil organic carbon in a temperate forest: Case study for the density fractionation for Japanese volcanic ash soil. Nucl.Instrum.Methods Phys. Res.B, 268(7/8), 1073-1076

【中核研究プロジェクト1】

町田敏暢(2007)2.1.3b 航空機観測. 3.1.4 二酸化炭素. 3.1.14 酸素. 日本化学会編, 実験化学講座 20-2 環境化学(第5版), 丸善, 247-250. 64-67. 200-203

三枝信子(2011)世界の森林の二酸化炭素吸収量を測る. 日本生態学会編『エコロジー講座4: 地球環境問題に挑む生態学』, 文一総合出版, 20-23

谷本浩志(2007)3.1.2 オゾン・PAN. 日本化学会編, 実験化学講座 20-2 環境化学(第5版), 丸善, 193-196

遠嶋康徳・(2007)・2.1.2 清浄大気の調査法, 3.1.6 亜酸化窒素, 3.1.14 酸素・鷲田伸明編・第5版実験化学講座 20-2 巻・丸善・54-56, 207-209, 247-250

遠嶋康徳(2010)1.1.1 気体成分. 田中剛・吉田尚弘編, 地球化学実験講座8, 地球化学実験法, 培風館, 7-11

【中核研究プロジェクト2】

今城尚志, 住吉吉英, 藤原久志, 森野勇(2009)第5章 スペクトルデータの解析法. 日本分光学会編, 分光装置 Q&A (分光測定入門シリーズ), 講談社, 130-152

笹野泰弘(2007)2.1.3 衛星, 航空機, 気球観測 a. 衛星観測. 実験化学講座 20-2 環境化学(第5版)(日本化学会編, 丸善, 519p.), 61-64

横田達也, 吉田幸生, 内野修(2011)衛星による温室効果ガスリモートセンシングの意義. 短波長赤外域における温室効果ガスリモートセンシングの原理. 衛星による温室効果ガスリモートセンシングの例. 気象業務におけるリモートセンシングの利用. 日本リモートセンシング学会編, 基礎からわかるリモートセンシング, 理工図書, 20-21 21-22 25-27

【中核研究プロジェクト3】

枝廣淳子, 江守正多, 武田邦彦(2010)－. 枝廣淳子, 江守正多, 武田邦彦著, 温暖化論のホンネー「脅威論」と「懐疑論」を超えて－, 技術評論社, 220p

江守正多(2008)－. 江守正多著, 地球温暖化の予測は「正しい」か? 不確かな未来に科学が挑む, 化学同人, 240p

江守正多(2008)加速する温暖化. 江守正多監修, 駐日英国大使館, 12p

江守正多(監修協力)(2011)－. 枝廣淳子監修, ポプラディア情報館 環境, ポプラ社, 239p

脇岡靖明(2008)「温暖化はどのような影響を与えのか(1)」◆しのびよる将来への深刻な影響◆. 「温暖化はどのような影響を与えのか(2)」◆日本が受ける影響と急がれる対策◆. イミダス編集部編, imidas Special 時事・トレンド解体新書(imidas e Library), 集英社, (Web)

脇岡靖明(2010)－. 国立天文台編, 理科年表平成23年, 丸善, 1064p

脇岡靖明(2011)－. 国立天文台編著, 環境年表平成23・24年, 丸善, 408p

久野登久子, おぐらひろかず, 江守正多(2008)－. 江守正多監修, 地球が大変! ぼくたちわたしたちにできることは?, フレーベル館, 24p

野村辰寿, 江守正多(2008)－. 江守正多監修, こおりにのったペンギン ポーとちきゅう(1), ダイアモンド社, 32p

寺門和夫, 江守正多(2008)－. 江守正多監修, 図解雑学 地球温暖化のしくみ, ナツメ社, 223p

高橋潔(2009)IPCC 報告書とは?. 海面上昇で消える島国. 気温上昇抑制の目標. 国立環境研究所地球環境研究センター編著, ココが知りたい地球温暖化(気象ブックス26), 成山堂, 60-6. 86-9. 110-11

山形与志樹(2009)Q23: 植林による温暖化対策. Q24: 森林減少の防止による温暖化対策. 国立環境研究所地球環境研究センター編著, ココが知りたい地球温暖化(気象ブックス26), 成山堂, 138-142. 143-148

山形与志樹(2009)第4章 森林などの二酸化炭素吸収源に関する温暖化対策. 吉田文和, 池田元美編著, 持続可能な低炭素社会, 北海道大学出版会, 51-65

【中核研究プロジェクト4】

Alfsen K., Morlot J.C., Chesnaye F., Hourcade J.-C., Jiang K., Kainuma M., Rovere E.L., Matysek A., Rana A., Riahi K. (2007) Issues related to mitigation in the long-term context. In: Metz B., Davidson O. Bosch Peds., Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change, Cambridge Univ.Press, 169-250.

明石修, 日比野剛 (2008) 4.7 運輸貨物部分: 輸送システムの効率化, 輸送機器のエネ効率改善等で 60 ~ 70%削減. 西岡秀三編著, 日本低炭素社会のシナリオ-二酸化炭素 70%削減の道筋-, 日刊工業新聞社, 66

芦名秀一, 西岡秀三 (2008) 5.3 熾烈な国際技術競争時代に日本は勝ち抜けるのか-「省エネ改革停滞の15年」で揺らぐ技術日本. 西岡秀三編著, 日本低炭素社会のシナリオ-二酸化炭素 70%削減の道筋-, 日刊工業新聞, 84-86

芦名秀一, 藤野純一, 日比野剛 (2008) 4.9 供給側エネルギーの多様な選択可能性. 西岡秀三編著, 日本低炭素社会のシナリオ-二酸化炭素 70%削減の道筋-, 日刊工業新聞, 68-72

芦名秀一 (2009) Q25: 二酸化炭素 (CO₂) を回収・貯蓄する技術とは?. 国立環境研究所地球環境研究センター編著, ココが知りたい地球温暖化 (気象ブックス 26), 成山堂, 149-156

Bogner J., Ahmed M.A., Diaz C., Faaij A., Gao Q., Hashimoto S., Mareckova K., Pipatti R., Zhang T. (2007) Chapter 10 Waste management. In: Metz B. et al.ed., Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change, Cambridge University Press, 585-618

榎原友樹, 藤野純一, 日比野剛 (2008) 3.2 2050年の2つの日本:「活力社会」と「ゆとり社会」. 西岡秀三編著, 日本低炭素社会のシナリオ-二酸化炭素 70%削減の道筋-, 日刊工業新聞, 32-37

藤野純一, 松岡譲, 甲斐沼美紀子 (2008) 3章ビジョン: 2050年どんな日本にしたいのか. 4章 2050年のシナリオ: 70%削減の日本. 西岡秀三編著, 日本低炭素社会のシナリオ-二酸化炭素 70%削減の道筋-, 日刊工業新聞, 30-52. 53-74

藤野純一, 日比野剛 (2008) 4.1 2050年のシナリオ: 70%削減の日本. 西岡秀三編著, 日本低炭素社会のシナリオ-二酸化炭素 70%削減の道筋-, 日刊工業新聞, 53-57

藤野純一, 日比野剛, 芦名秀一 (2008) 4.8 エネルギー供給側: 低炭素エネルギー源の選択が鍵. 西岡秀三編著, 日本低炭素社会のシナリオ-二酸化炭素 70%削減の道筋-, 日刊工業新聞, 67-68

藤野純一 (2009) Q29: 二酸化炭素の削減と生活の質. 国立環境研究所地球環境研究センター編著, ココが知りたい地球温暖化 (気象ブックス 26), 成山堂, 175-180

藤野純一, 榎原友樹 (2009) 温暖化をくい止める方法-低炭素社会をつくろう. くさばよしみ編著, 温暖化をくい止めたい (14歳になったら考える地球を救う仕事6), 汐文社, 184-201

藤野純一, 榎原友樹, 岩淵裕子 (2009) -. 藤野純一, 榎原友樹, 岩淵裕子編著, 低炭素社会に向けた12の方策, 日刊工業新聞社, 198p

藤野純一 (2010) Q20: 石油がなくなれば温暖化は解決?. 国立環境研究所地球環境研究センター編著, ココが知りたい地球温暖化2 (気象ブックス 32), 成山堂, 149-156

藤野純一 (2010) 第5章低炭素社会実現への道筋. 小宮山宏他編, サステナビリティ学(2)気候変動と低炭素社会, 東京大学出版会, 99-129

浜中裕徳, 久保田泉 (2009) マラケシュ合意後. 浜中裕徳編, 京都議定書をめぐる国際交渉-COP3以降の交渉経緯, 慶応義塾大学出版会, 197-231

日比野剛, 芦名秀一, 藤野純一 (2008) 5.1 低炭素社会実現の費用はGDPの1%. 西岡秀三編著, 日本低炭素社会のシナリオ-二酸化炭素 70%削減の道筋-, 日刊工業新聞, 75-77

日引聡 (2010) Q22: 排出量取引成功のカギと適切な国内対策. 国立環境研究所地球環境研究センター編著, ココが知りたい地球温暖化2, 成山堂, 165-171

日比野剛, 藤野純一 (2008) 3.3 日本2つのシナリオの定量化. 西岡秀三編著, 日本低炭素社会のシナリオ-二酸化炭素 70%削減の道筋-, 日刊工業新聞, 37-38.

舩岡靖明 (2008) 2.1 日本的大幅削減を決める3つの要因. 西岡秀三編著, 日本低炭素社会のシナリオ-二酸化炭素 70%削減の道筋-, 日刊工業新聞, 17-20

- 肱岡靖明 (監修) (2008) - . 国立天文台編, 理科年表平成 21 年, 丸善, 1064p
- 肱岡靖明 (2009) Q20 : 2050 年までに排出量半減とは? . 国立環境研究所地球環境研究センター編著, ココが知りたい地球温暖化 (気象ブックス 26), 成山堂, 119-125
- 肱岡靖明 (監修) (2009) - . 肱岡靖明監修, 環境年表 (理科年表シリーズ), 丸善, 400p
- 肱岡靖明 (監修) (2009) - . 国立天文台編, 理科年表平成 22 年, 丸善, 1064p
- 肱岡靖明 (2010) - . 国立天文台編, 理科年表平成 23 年, 丸善, 1064p
- 肱岡靖明 (2011) - . 国立天文台編著, 環境年表平成 23・24 年, 丸善, 408p
- Kainuma M., Matsuoka Y., Masui T., Takahashi K., Fujino J., Hijioka Y. (2007) Climate policy assessment using the Asia-Pacific Integrated Model. In: Schlesinger M., Kheshgi H., Smith Jeds., Human-induced Climate Change, Cambridge Univ.Pr., 314-327
- 甲斐沼美紀子 (2008) 地球温暖化対策モデル. 土木学会編, 環境工学の新世紀, 技報堂出版, 241-244
- 甲斐沼美紀子 (2009) 2050 年日本低炭素社会実現の見通し. 吉田文和, 池田元美編著, 持続可能な低炭素社会, 北海道大学出版会, 107-126.
- Kainuma M. (2010) Pathways towards a Low-Carbon Society in Japan by 2050. In: Yoshida F., Ikeda M. eds., Sustainable Low-Carbon Society, Hokkaido Univ., 91-108
- Kanie N., Nishimoto H., Hijioka Y., Kameyama Y. (2011) Implications of Equity Considerations and Emission Reduction Targets: Lessons from the case of Japan's mid-term target. In: Brauch H.G eds., Coping with Global Environmental Change, Disasters and Security: Threats, Challenges, Vulnerabilities and Risks, Springer, 1393-1400
- 亀山康子 (2009) 7.3 法制度・社会的受容性. 住明正, 島田荘平編著, 温室効果ガス貯留・固定と社会システム, コロナ社, 206-228
- 亀山康子 (2009) Q21 : 温暖化対策の緊急性. 国立環境研究所地球環境研究センター編著, ココが知りたい地球温暖化 (気象ブックス 26), 成山堂, 126-131
- 亀山康子 (2010) - . 亀山康子著, 新・地球環境政策, 昭和堂, 246p
- 亀山康子 (2010) 国際社会は気候変動に対処できるのか. 「環境・持続社会」研究センター編, 「カーボン・レジーム」地球温暖化と国際攻防, オルタナ, 26-51
- Kameyama Y. (2008) 2 Evolution of debates over the "beyond 2012". 8 The "beyond 2012" debate in Japan. In: Kameyama Y. et al. eds., Climate Change in Asia: Perspectives on the Future Climate Regime, United Nations Univ. Press, 18-30. 120-131
- Kameyama Y., Kanie N. (2008) 16 Conclusion: Synthesis of findings. In: Kameyama Y. et al. eds., Climate Change in Asia: Perspectives on the Future Climate Regime, United Nations Univ. Press, 237-252.
- 久保田泉 (2008) 第 4 章 将来枠組みに関する諸提案の分析. 環境法政策学会編, 温暖化防止に向けた将来枠組み, 商事法務, 24-29
- 増井利彦 (2009) Q26: 「炭素税」は効果がある? . 国立環境研究所地球環境研究センター著, ココが知りたい地球温暖化 (気象ブックス 26), 成山堂, 157-162
- 増井利彦 (2010) 日本は 25%削減することができるのか? . 森晶寿, 植田和弘編, 温室効果ガス 25%削減 - 日本の課題と戦略, 昭和堂, 55-78
- 増井利彦, 武内和彦, 花木啓祐 (2011) 第 5 章 長期シナリオと持続型社会. 小宮山宏他編, サステイナビリティ学 1 サステイナビリティ学の創生, 東京大学出版会, 119-146
- Masui T. (2011) chap.7, Integration of a low-carbon society with a resource-circulating and nature-harmonious society. In: Masui T. ed., Climate change and global sustainability: A holistic approach, United Nations Univ. Press, 258-277
- 松橋啓介 (2009) Q27 : 車のかしこい使い方. 国立環境研究所地球環境研究センター編著, ココが知りたい地球温暖化 (気象ブックス 26), 成山堂, 163-167.
- 松橋啓介 (2010) 運輸部門からの CO₂ 排出量の中長期的削減に向けた対策. 大西隆, 小林光編著, 低炭素都市, 学芸出版社, 82-103

松橋啓介 (2010) 第1章自転車と環境. 都市型コミュニティサイクル研究会編, コミュニティサイクル, 化学工業日報社, 1-21

松橋啓介(2010)低炭素都市. 次世代自動車. 3R・低炭素社会検定実行委員会編, 3R・低炭素社会検定公式テキスト, ミネルヴァ書房, 350-351. 354-355

西岡秀三, 藤野純一 (2008) 4.2 エネルギー需要 40%削減が最大の鍵. 西岡秀三編著, 日本低炭素社会のシナリオ-二酸化炭素 70%削減の道筋-, 日刊工業新聞, 57-58.

Rothman D.S., Agard J., Alcamo J., Alder J., Al-Zubari W.K., Chenje M., Eickhout B., Galt M., Hijioka Y., Kainuma M. (2007) Section E The Outlook-Towards 2015 and Beyond, Chapter 9 The Future Today. In: UNEP ed., Global Environment Outlook GEO 4: Environment for Development, Progress Press, 395-454.

高橋潔 (2008) 1.2 気候モデルが予想する今世紀の大変化. 1.3 人間は気候変化の危険を察知できるか. 西岡秀三編著, 日本低炭素社会のシナリオ-二酸化炭素 70%削減の道筋-, 日刊工業, 7-12. 12-15

【関連研究プロジェクト】

Idip D., Jr., Kayanne H., Yamano H., Matsunaga T., Shimazaki H., (2007) Chapter 18. Coastal Habitat Map of Palau, Coral Reefs of Palau (Kayanne H. et al. eds., Palau Int.Coral Reef Cent., 231p.), 170-202

杉原薫 (2010) この図鑑の使い方. 北限域の造礁サンゴ類. 杉原薫監修, 造礁サンゴフィールド図鑑 伊豆・三浦・房総編, NPO 法人 OWS, ページ番号なし ページ番号なし

Yamano H., Shimazaki H., Murase T., Itou K., Sano S., Suzuki Y., Leenders N., Forstreuter W., Kayanne H. (2007) Construction of digital elevation models for atoll islands using digital photogrammetry, GIS for the Coastal Zone: A Selection of Papers from CoastGIS 2006 (Wollongong Pap.Maritime Policy, No.16) (Woodroffe C.D. et al. eds., Univ. Wollongong, 458p.), 165-175

山野博哉, 松永恒雄 (2010) 16 サンゴ礁-生物によって形成された地形. 加藤碩一他編, 宇宙から見た地形-日本と世界-, 朝倉書店, 69-71

REPORT OF SPECIAL RESEARCH FROM
THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES, JAPAN

国立環境研究所特別研究報告

SR - 96 - 2011

平成 23 年 12 月 28 日発行

編 集 国立環境研究所 編集委員会

発 行 独立行政法人 国立環境研究所

〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16 番 2

電話 029-850-2343 (ダイヤルイン)

印 刷 株式会社 イ セ ブ

〒305-0005 茨城県つくば市天久保 2 丁目 11-20

Published by the National Institute for Environmental Studies

16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506 Japan

December 2011

無断転載を禁じます

リサイクル適性の表示：紙へリサイクル可

本冊子は、グリーン購入法に基づく基本方針における「印刷」に係る判断の基準にしたがい、印刷用の紙へのリサイクルに適した材料 [A ランク] のみを用いて作製しています。