

国立環境研究所研究プロジェクト報告 第 112 号

NIES Research Project Report, No.112

SR－112－2016

地球温暖化研究プログラム

(重点研究プログラム)

Climate Change Research Program

平成 23 ～ 27 年度

FY2011 ～ 2015

NIES



国立研究開発法人 国立環境研究所

NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

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

国立環境研究所研究プロジェクト報告 第 112 号

NIES Research Project Report, No.112

SR－112－2016

地球温暖化研究プログラム

(重点研究プログラム)

Climate Change Research Program

平成 23 ～ 27 年度

FY2011 ～ 2015

国立研究開発法人 国立環境研究所

NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

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

重点研究プログラム「地球温暖化研究プログラム」
(期間：平成 23 ～ 27 年度)

プログラム総括：笹野泰弘（平成 23 ～ 24 年度）
江守正多（平成 25 ～ 27 年度）

執 筆 者：向井人史、江守正多、山形与志樹、高橋潔、増井利彦、藤野純一、花岡達也、
亀山康子

編 者：江守正多

序

本報告書は、国立環境研究所の第3期（平成23年度～27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4期中長期計画（平成28年度～32年度）においても、「低炭素研究プログラム」（低炭素で気候レジリエントな社会の実現に向けた地球規模研究プログラム）に衣替えして発展的に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年間の主な成果を取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2013年から14年に第5次評価報告書を公表し、その中で「気候変動を抑制するには、温室効果ガス排出量の抜本的かつ持続的な削減が必要である」と結論しました。そして、2015年末にフランスのパリで開催された国連気候変動枠組条約第21回締約国会議（COP21）では、新しい国際枠組である「パリ協定」が採択されました。パリ協定では、「世界的な平均気温上昇を産業革命以前に比べて2℃より十分低く保つとともに、1.5℃に抑える努力を追求する」こと、そのために「今世紀後半に人為的な温室効果ガスの排出と吸収源による除去の均衡を達成する」ことが合意され、国際社会は温室効果ガスを出さない世界を今世紀中に実現する決意を示しました。日本では、2016年5月に閣議決定された「地球温暖化対策計画」において、2030年までに温室効果ガス排出量を2013年を基準に26%削減する計画が策定され、さらに2050年までに80%の削減を目指すことが明記されました。

このように、世界は地球温暖化問題に対処するために大きく動いてきており、その中で科学研究が果たしてきた役割は大きいといえます。そして、いまだおぼつかない足取りで「低炭素」もしくは「脱炭素」の社会に向けて動き出した世界が着実に歩みを進めていくためには、科学研究が今後果たすべき役割はさらに大きいと考えねばなりません。

地球温暖化の直接の原因である温室効果ガスの大気中濃度変化は長期にわたるモニタリング研究の努力により精度よく把握されるようになってきました。しかし、その排出・吸収の分布の把握や変動をもたらすメカニズムの理解はいまだ不十分であり、より一層の努力を要します。特に今後は、複雑に変動する自然の排出源、吸収源の中で、人間活動による排出量の抑制が大気中濃度変化にもたらす効果を検出し監視する取り組みが求められます。われわれは衛星、航空機、船舶、地上ステーション等の多様なプラットフォームによる観測を組み合わせることによって、この取り組みの実現を目指しています。

温室効果ガス濃度の増加がもたらす気候変動は人間社会や生態系に様々なリスクをもたらすと考えられますが、その理解にも現状では大きな不確実性があります。気候予測研究のさらなる高度化と、その結果を社会の必要性に合わせて解釈してコミュニケーションする取り組みが重要となります。特に、社会が気候変動に適応するために必要な地域規模の詳細な予測情報の提供のみならず、「2℃」や「1.5℃」のような地球規模の対策目標の議論に必要な、包括性をもったリスク情報の提示にも、われわれは注力してきました。

社会が地球温暖化への対応を設計し実施するうえでも、研究は大きな役割を担います。われわれは世界、アジア、日本の各スケールにおいて、将来の低炭素／脱炭素の社会像を描き、そこに向けた社会経済の変化と対策技術の導入の道筋を整合的に提示してきました。また、「パリ協定」の合意に結実したこれまでの国際交渉および今後の展開についても、分析と提案を行ってきました。このような

研究は生々しい政治的な価値と背中合わせであり、研究としてそれとどう向き合っていくかにも腐心しています。

平成 28 年 3 月に終了した第 3 期の地球温暖化研究プログラムは、3 つの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係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、3 つの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お願い申し上げます。

平成 29 年 1 月

国立研究開発法人 国立環境研究所

理事長 住 明 正

目 次

1 地球温暖化研究プログラムの概要	1
1.1 研究プログラム全体の目的、目標、構成等	1
1.2 研究の概要	2
1.2.1 研究プロジェクト1（温室効果ガス等の濃度変動特性の解明とその将来予測に関する研究）	2
1.2.2 研究プロジェクト2（地球温暖化に関わる地球規模リスクに関する研究）	4
1.2.3 研究プロジェクト3（低炭素社会に向けたビジョン・シナリオ構築と対策評価に関する統合研究）	6
2 研究の成果	9
2.1 研究プロジェクト1：温室効果ガス等の濃度変動特性の解明とその将来予測に関する研究	9
2.1.1 サブテーマ1：大気観測によるグローバルな GHG 等の発生／吸収量分布評価に関する研究	9
2.1.2 サブテーマ2：GHG 等フラックス及びその関連指標観測による海洋、陸域の発生 / 吸収量評価と 将来予測に関する研究	22
2.2 研究プロジェクト2：地球温暖化に関わる地球規模リスクに関する研究	34
2.2.1 サブテーマ1：地球規模リスクに関わる将来予測の理解と翻訳	34
2.2.2 サブテーマ2：地球規模リスクに関わる統合的空間分布モデリング	38
2.2.3 サブテーマ3：地球規模リスクの管理方策の検討	43
2.3 研究プロジェクト3：低炭素社会に向けたビジョン・シナリオ構築と対策評価に関する統合研究	50
2.3.1 サブテーマ1：アジア低炭素社会シナリオ開発及び社会実装に関する研究	50
2.3.2 サブテーマ2：日本及び世界の気候変動緩和策の定量的評価	54
2.3.3 サブテーマ3：低炭素社会構築のための国際制度及び国際交渉過程に関する研究	59
[資料]	
1 研究の組織と研究課題の構成	67
1.1 研究の組織	67
1.2 研究課題と担当者	71
2 研究成果発表一覧	72
2.1 誌上発表	72
2.2 書籍	100

1 地球温暖化研究プログラムの概要

1.1 研究プログラム全体の目的、目標、構成等

地球温暖化問題に関し、気候変化の将来予測の高度化の観点からの重要課題のひとつとして、温室効果ガス（Green House Gas、以下 GHG）の自然起源の吸収・排出源の変動メカニズムの解明と将来の吸収能力の変化予測の高精度化が求められている。また、国際的な温暖化対策の推進に関し、地球規模のリスク管理戦略を構築していくことが必要とされている。同時に、脱温暖化社会の実現に向けて、各国の今後の温室効果ガス排出削減行動が重要であり、各国の政策オプション、国際協調のあり方などが依然として、重要な課題として残されている。第3期中期目標期間においては、これらの諸問題の解決を目指して、科学的な知見の集積・提供を図る必要があった。

そこで、地球温暖化の原因物質である温室効果ガスの濃度変動特性を、地上観測サイト、船舶、航空機並びに人工衛星をプラットフォームとした総合的な観測とモデル解析に基づいて解明するとともに自然起源の吸収源の保全に必要とされる科学的知見を提供することを目的として研究を行った。

また、地球規模の温暖化対策目標及び目標に至る道筋・方法についての議論を、リスクの管理に関する社会的な意思決定の問題として捉え、この意思決定を支援するため、地球規模の温暖化リスクに加え、水安全保障、生態系保全など関連する温暖化以外の地球規模リスク、及びリスク管理オプションについての検討を行い、リスクに対する社会の認知等も考慮した上で、リスク管理戦略の分析を行った。

アジア各国における脱温暖化社会に向けた取組の支援に資するため、世界及び日本における温室効果ガス削減目標及び対策の評価を行うとともに、中長期的な温室効果ガス排出削減目標の設定と、その目標を実現するための各国の諸状況に応じた政策オプションを提示するための研究を行った。また、国際制度・国際交渉に関する研究を進め国際協調のあり方を提言した。

以上の調査・研究を推進することにより、以下の方向を目指した。

- (1) 全球及び東アジア域を中心とした大気環境・温室効果ガスの観測・解析に基づき、これらの地域での物質循環・炭素循環の実態とその変動機構を明らかにするとともに、将来の気候変動影響下での温室効果ガス濃度予測精度の精緻化を図り、将来の気候変動の予測精度の向上に資すること。
- (2) 気候変動の実態の解明と将来予測の精緻化を進め、更に気候変動に対する地球規模の影響リスクの評価を行うことにより、気候変動政策の立案に資する科学的知見を提供すること。
- (3) 世界規模での温室効果ガス排出抑制策（緩和策）や気候変動に対する影響、適応策を総合的に評価し、国際交渉の実情をも考慮した実現可能な政策オプションを提示することにより、気候変動に対する国際的な緩和・適応策の推進に関する科学的知見を提供すること。

本プログラムは、次の3つのプロジェクトから構成された。

- (1) プロジェクト1（温室効果ガス等の濃度変動特性の解明とその将来予測に関する研究）
 - サブテーマ1「大気観測によるグローバルな GHG 等の発生／吸収量分布評価に関する研究」
 - サブテーマ2「GHG 等フラックス及びその関連指標観測による海洋、陸域の発生／吸収量評価と将来予測に関する研究」
- (2) プロジェクト2（地球温暖化に関わる地球規模リスクに関する研究）
 - サブテーマ1「地球規模リスクに関わる将来予測の理解と翻訳」
 - サブテーマ2「地球規模リスクに関わる統合的空間分布モデリング」
 - サブテーマ3「地球規模リスクの管理方策の検討」
- (3) プロジェクト3（低炭素社会に向けたビジョン・シナリオ構築と対策評価に関する統合研究）
 - サブテーマ1「アジア低炭素社会シナリオ開発及び社会実装に関する研究」
 - サブテーマ2「日本及び世界の気候変動緩和策の定量的評価」
 - サブテーマ3「低炭素社会構築のための国際制度及び国際交渉過程に関する研究」

1.2 研究の概要

1.2.1 研究プロジェクト1（温室効果ガス等の濃度変動特性の解明とその将来予測に関する研究）

プロジェクト1では、温室効果ガス、特にCO₂やCH₄、フロン等の濃度分布とその時系列変化を的確に把握し、その将来などを精度良く予測することを目標とし、トップダウンによるフラックス推定技術の開発やボトムアップからの各成分の発生量の推定方法の検討を行ってきた。CO₂やCH₄については、GOSATや航空機、海洋、地上を含めた広域観測ネットワークを展開し、モデル計算手法の改良により、吸収発生フラックスの地域特性をシベリア、東南アジア、中国、日本などで求めた。短寿命気候汚染物質（Short Lived Climate Pollutants、以下SLCP）においてもモデル予測を検討した。また長期間でのCO₂吸収トレンドについても研究が行われた。ボトムアップ法においては、スケールアップ手法が検討され、その推定精度の向上の検討を行った。これらによりアジアを含むグローバルな地域での、陸域、海洋域など将来の吸収能力に関しての収支の変化の可能性などを現状の把握やトレンドから議論できた。

(1) サブテーマ1（大気観測によるグローバルなGHG等の発生／吸収量分布評価に関する研究）

GOSAT、航空機、定期船舶、地上観測を組織的に行き、アジア・シベリアを含むグローバルな観測体制を拡充・整備した。GHG濃度観測や酸素、同位体比、その他トレーサーを用いて、濃度変動の地域性や相互関係を使い、アジアでの地域的なCO₂、CH₄、フロンなどインベントリの検証を行った。

1) GHGの濃度変動の地域特性の解明に向けて

バックグラウンド大気の広域観測ならびにGOSATによる地球全体のカラム濃度を観測では2014-2016年に年平均が400ppmを超えてきたことがわかった。酸素やCO₂同位体比の観測から大気中に排出された化石燃料起源CO₂の海洋および陸域生物圏による吸収量がそれぞれ約30%および約20%であり、吸収量は濃度に応答し増加していた。陸域生物圏は森林破壊の減少もあり、正味吸収が近年増加していることがわかった。また、地域的なCO₂やCH₄の発生・吸収特性の変化を広域観測する点において、GOSATの短波長赤外領域の濃度データの精度向上による広域的なデータ利用が可能になったことは重要な成果である。これにより、観測値の空白域（アフリカや南アメリカ、西アジア、シベリア、オーストラリア大陸）のデータが使用可能になり、地上フラックス推定や炭素収支の季節変動の解釈、大規模な森林火災や大都市によるCO₂やCH₄の増加の検出、関連規模の温室効果ガス濃度のアノマリ（偏差、平均値からのずれ）の検出等に、幅広く利用されるようになった。

民間航空機（JAL）による観測は広域かつ鉛直濃度分布観測として重要であった。本研究期間においては、合計9機の機体にCO₂連続測定装置を搭載し観測を実施した。大気採取観測は自動および手動大気採取装置を使用してシドニー線での長期観測を継続すると共に、2012年4月からは欧州線における観測を開始した。日本近辺では、高高度では大陸の放出・吸収源の影響を、低高度では日本の影響を強く受けていることを明らかにし、またグローバルには北半球から南半球への大気の輸送メカニズムを示すことに成功した。また、南中国のCO₂吸収量の評価が過大であることやインドでの吸収量評価が過小であること、欧州線の観測から対流圏・成層圏交換メカニズムを解明する情報を得た。

中国の人為的CO₂発生量は2002年以降3倍程度まで増加しており、これが東アジアのCO₂濃度の変動に影響していることが明らかになった。波照間島での高CO₂イベント時の大気試料の $\Delta^{14}\text{C}$ と $\delta^{13}\text{C}$ を分析することにより、輸送されてくる中国や朝鮮半島起源のCO₂の化石燃料起源の割合を推定することが可能になった。同時に $\delta^{13}\text{C}$ にも地域差が見られた。これらからアジアのCO₂発生起源を求めているインバースモデル結果の検証に用いることが可能となった。CH₄濃度は2007年以降グローバルな濃度上昇が認められその発生源について研究が各地で展開された。CH₄の起源としての湿地を持つ西シベリアのタイガにおいても2007年以降の増加とシベリアでの降水量との相関を見出した。熱帯西太平洋では大気循環の変動によって地上CH₄濃度が大きく変動することも明らかになった。稲作が大気CH₄濃度に与える影響を調査するため、インド北部の水田地帯や中国国内でのCH₄濃度は高く、両者ともGOSAT衛星での濃度データと整合的であった。さらに、東南アジアの海底油田によるCH₄発生に対しても評価を行った。また、波照間ステーションで観測される汚染イベント解析で、中国からの水田を除く人為起源CH₄の発生量が2002-2010年の期間に $1.1 \pm 0.2\text{TgCH}_4/\text{y}$ の割合で増加していると推定した。

CO については東南アジア海域ではどの緯度帯でも太平洋よりも高い濃度が観測されたが、モデルでは CO、PM_{2.5} と BC 濃度が過小評価され、今後熱帯アジアでのフラックス算定を改良していく必要があることが結論された。一方、中国から放出される人為起源 CO の発生量が 1999 年から 2005 年の期間は増加傾向にあったが、その後停滞し 2008 年以降減少傾向にある可能性が示唆された。フロン等については、国際共同観測ネットワークの枠組み等を活用して、波照間・落石の観測データの解析を進めた結果、大気中濃度が最も高いハイドロクロロフルオロカーボン（以下 HCFC）である HCFC-22 については、解析期間とした 2009 年までグローバルに排出量が増加する傾向にありアジアからの寄与が特に大きいこと、HCFC-22 生産時に副生される HFC-23 については、中国からの排出量がグローバルに見ても突出して大きく、2011 年以降は増加傾向にあることなどが示された。また、国内については、震災後のフロン類の排出量増加が落石などで捉えられ、成分によっては 2011 年の年間排出量を例年の 2 倍近くまで押し上げたことがわかった。

2) インバースモデルの高分解能化、高精度化さらには評価にむけて

GOSAT データにより定常的に処理される結果は世界を 64 分割したものであり、本研究ではさらに高分解能のフラックス推定値を導出するために、1) 観測データの拡充、2) モデルの高分解能化、3) 前提であるアプリアリのモデルの精緻化などを行い、高解像度インバージョンのアルゴリズム開発を実施した。モデルの高解像化、高時間分解能化の一環としてグローバルなモデルとトラジェクトリータイプのモデルを結合したモデルの適用性を評価した。観測データの拡充として本サブテーマで実施している地上観測のデータを、従来からの観測値データセットに加えて結果を再評価した。これにより、シベリアやアジアにおける CO₂・CH₄ フラックス推定精度の向上が図られた。また、GOSAT XCO₂ データを追加することにより、北ユーラシアの領域の気象アノマリに対する CO₂ フラックスの応答に関して解析を進めることができた。また、日本上空の高濃度メタン分布について、GOSAT XCH₄ によるメタンの高濃度イベントの検出が可能であることを検証した。

アプリアリモデルの精度改善のために、陸域生態系モデル（VISIT）のパラメータの調整を図った。既存の全球炭素循環研究ではほとんど考慮されてこなかった陸水（河川・湖沼・地下水など）を通じた炭素循環を定量的に評価するために、統合型水文生態系モデル NICE と既存の複数の物質循環モデルを結合することで陸域－水域間での（有機態・無機態・溶存態・懸濁態）炭素動態及び栄養塩（窒素・リンなど）との相互作用を内包する改良型 NICE を新たに構築した。このモデルを用いた全球シミュレーション結果は、陸水界面を通じた温室効果ガス交換（1.0-2.0 PgC/year）、河床土砂への堆積（0.2-0.6 PgC/year）、海域への流出（0.5-1.0 PgC/year）など、表面流－地下水間での相互作用を含む水循環に大きく依存する炭素循環について既存研究及び簡易型モデルと定性的に一致した。また、農地への施肥や都市からの汚濁排出に伴う陸水中での炭素循環の変化やダムからの温室効果ガス放出など、人為活動に大きく依存する炭素循環の構造も明らかになった。今後各項目についての更なる高精度化、海域炭素循環モデルとの結合、大気インバースモデルとの結合、などを通して、陸水の影響を含む全球炭素循環の精緻化に大きく寄与すると考えられる。

(2) サブテーマ 2（GHG 等フラックス及びその関連指標観測による海洋、陸域の発生 / 吸収量評価と将来予測に関する研究）

1) ボトムアップ手法によるスケールアップ

陸域フラックスを広域的に推定する際に用いる生態系モデルでは、フラックスデータによるモデルのチューニングに加えて、モデルに与える初期の森林の年齢やバイオマス量などのデータが重要であった。ここでは、北海道とボルネオ島に焦点を当て、陸域生態系モデル VISIT を改良し、複数のフラックス長期観測サイトのデータを用いて検証を行い、攪乱による影響とそこからの回復過程をモデルが良好に再現できることを示した。また、炭素収支の過去数十年間の変動をもたらした要因を、気象変動などの自然条件と、伐採・植林・残置有機物の処理などの人為的な条件に定量的に分け、数年以内の短期変動には気象要素が強く影響する一方、数十年の長期変動には伐採時の残置有機物の量が重要であることを明らかにした。これに関連し、世界の陸域生態系の GHG フラックスを推定するモデルにおいて、モデル相互比較プロジェクト（MsTMIP）に参加し、極端気象に対する陸域応答や土壌炭素推定の不確実性に関する解析に貢献した。また、大気－陸域間の CO₂ 交換に関する季節振幅の推定に関する複数モデル間比較を行い、近年の振幅拡大が主に光合成によるものであり大気 CO₂ の施肥効果と相乗的に作用していることを示唆する結果を得た。

バイオマス推定法においては、衛星搭載型ライダーのデータから北海道とボルネオ全域のバイオマスを地域別に推定することに成功し、陸域生態系モデルがモデル内で計算するバイオマス等の広域検証にライダーデータを有効に利用可能であることを示した。一方、地上に膨大な数が設置されている監視カメラ・ライブカメラ画像を収集し、画像ビッグデータ解析による植生フェノロジー観測手法を確立した。2002年から2014年までの間、北海道から中部地方の各地のフェノロジーのトレンドは殆ど変化していないことが明らかとなった。

温暖化による気候変動が土壌炭素の挙動に与える影響を研究するために、日本および熱帯を含むアジアでの土壌呼吸測定ネットワークを展開した。土壌炭素循環の温度応答が従来モデルよりも高い値 ($Q_{10} = 3.0$) を示すことがわかった。この数値を適用した試算では、大気中の二酸化炭素は従来の Q_{10} 値を 1.4 ~ 2.0 とした予測よりも大きなフィードバックが予想された。従来の将来予測に基づく温暖化対策よりも、一層効果的な対策が必要になるという可能性が示された。海洋における研究としては、定期船舶を用いた観測をもとにフラックスマップをスケールアップする研究を行った。人工知能タイプの解析手法を用いることによって、北太平洋、もしくは太平洋全域での二酸化炭素分圧を海洋の各種物理パラメータを用いて表現することが可能になった。これを用いて、時系列的な分析が可能になり、El Nino などによる太平洋の海洋 CO_2 フラックスの変動の大きさを評価した。トレーサーを用いたグローバルな CO_2 収支の変動から、濃度増加に応じた吸収量の増加トレンドが解析された。現状の気候状態においては、吸収量の大きな減少は認められなかったが、将来の温度に対する応答に関してはまだ不確実性が高く、さらなる観測が必要と考えられた。

2) ボトムアップ、トップダウン比較

ボトムアップ法では衛星観測による植生指標と複数の陸域生態系モデルによる一次生産量がユーラシア北東部において両者同様の増加傾向が得られ、ボトムアップモデルの合理性が示された。インバースモデルにおいては、シベリアの吸収量変動において、気象との整合性がみられ、地域的にもトップダウンとボトムアップの整合性が取れてきた。一方では、グローバルにはプロセスモデルや統計、観測との比較において特に熱帯域に不整合がみられた。このあたりの検討は今後の課題となった。海洋においては、ボトムアップ手法である人工知能タイプの二酸化炭素分圧推定から計算される大気海洋間二酸化炭素交換量とトップダウン法であるインバースモデルで得られる交換量を比較し、北太平洋全体では両者の年々変動が整合的であることが示された。さらに手法に改良を加え、国別、地域別の炭素収支を精度よく評価できるようにする必要がある。フロンに関しては、トップダウン法によるフラックス推定が有効であり、災害などのケースでも推定値を出すことができた。

1.2.2 研究プロジェクト2（地球温暖化に関わる地球規模リスクに関する研究）

プロジェクト2では、気候予測研究に関しては、アンサンブル実験を用いて予測の不確実性について理解を深め、パターンスケリング手法について使用上の注意点を整理した。また、気候変化のメカニズムについて理解を深めると共に、IPCC 第6次報告書に向けて気候モデルを精緻化した。生態系、土地利用、水資源等を統合したモデル分析に関しては、モデルの統合と検証を進めるとともに、個々のモデルによる将来の気候変動影響・適応に関する実験、分析を行い、国際的なモデル相互比較にも貢献した。また、社会経済シナリオのダウンスケーリングも実施した。地球規模リスク管理の検討に関しては、リスク管理フレーミングの検討とリスクの網羅的整理を進めるとともに、統合評価モデルの高度化とそれを用いた分析を行った。環境研究総合推進費課題 S-10 の枠組みで、リスク管理戦略を提示した。

(1) サブテーマ1（地球規模リスクに関わる将来予測の理解と翻訳）

気候予測の不確実性について評価するため、気候モデルを用いた新しいアンサンブル実験を設計・実施し、不確実性の幅を定量化した。さらにアンサンブルメンバー間の比較を通して予測に不確実性が生じる仕組みを明らかにし、観測データ等を用いて予測の不確実性に制約を与えた。また、複数のアンサンブル実験結果を相互に比較することにより各アンサンブルの信頼性を評価した。さらに、気候シナリオと社会経済シナリオを結び付けるためのパターンスケリング手法については、「気候変化の空間分布が排出シナリオ間で共通である」という仮定がどの程度妥当なものか検討を行い、中高緯

度で空間分布のシナリオ依存性が生ずる仕組みを明らかにした。また、過去の気候変化のメカニズム解明については、異常気象の発生確率に対する地球温暖化の寄与の定量化に取り組み、過去に発生した熱波や旱魃等の個々の事例について評価を実施した。また、過去 10 年程度の地球温暖化の停滞現象（ハイエイトス）について要因を検討し、太平洋の水温に見られる内部変動の寄与が大きいことを明らかにした。以上に加えて、気候モデルにおける積雲対流過程を精緻化することにより、現在気候の再現性を低緯度の雲・放射場を中心に改善した。また、上記の精緻化により下部対流圏の鉛直混合が活発化し、気候感度が高まる方向に雲フィードバックが変化することを確かめた。

(2) サブテーマ 2（地球規模リスクに関わる統合的空間分布モデリング）

陸面物理過程・陸域生態系・水資源・農作物・土地利用のサブモデルを統合した陸域統合モデルの開発を行うことにより、土地・水・生態系の相互作用を考慮し、気候変動および気候変動対策に伴うリスクの評価を行った。特に、気候変動リスクの連鎖や、低炭素化を目指す場合の気候変動対策の持続可能性を評価した。そのため、ダウンスケール手法の発展として、都市の空間構造やその発展を記述するモデルを開発し、将来の人間活動の変化と地球環境変動の相互作用を評価する研究を実施した。

陸域統合モデルについては、陸面物理・生態系・水資源にかかわる変数の交換を通して、様々な部門の間の相互作用を表現しつつ、安定的に稼働するモデルの開発を行うことができた。今後、過去の再現・将来の予測実験の解析を通して、気候変動リスクの評価を総合的に行う。陸域生態系モデルについては、気候変動や土地利用が生態系の諸過程に与える影響を扱えるモデルを構築し、独自のリスク評価や管理方策の検討を実施した。複数シナリオを用いた影響モデル相互比較などを通じて、将来の気候変動影響に関する解析を進めてきたが、バイオ燃焼生産を含む人為影響に関する解析は今後更に進めるべき課題が残されている。今後は、水資源や農業など他セクターとの相互作用を考慮した解析を進展させる。水資源モデルについては、温暖化と社会変化に伴う水需給バランスの変化を、さまざまなシナリオの下で、世界全体・長期間にわたって時空間詳細に推定した。さらに、水逼迫の特性や地域の状況に応じて、海水淡水化や貯水容量増設、水利用効率改善による節水などの適応策案を提示できるようにモデルの改良と解析の高度化を実施した。

ダウンスケール手法の発展として実施した将来の人間活動の変化の評価については、土地被覆や交通網、都市分布などを考慮した複数のモデルを統合して国別人口・GDP を 0.5 度グリッド毎にダウンスケールすることができた。またダウンスケールされた人口・GDP を Web 上で公開した。現在は都市の成長メカニズムや都市間の相互作用が明示的に考慮できるようにダウンスケールモデルの修正を試みており、今後この修正版モデルを用いてダウンスケール結果の不確実性の評価などについても実施する。

(3) サブテーマ 3（地球規模リスクの管理方策の検討）

地球温暖化対策をリスク管理の問題として捉えるフレームの検討に関して、地球規模の気候変動リスク管理の概念整理を実施するとともに、文献調査に基づいて地球温暖化のリスクおよびそのリスク間の因果関係について網羅性を重視したリストの作成を行った。

気候・影響シナリオと社会経済・対策シナリオを統合した分析に関しては、そのための手法開発・改良の一環として、影響リスク統合評価ツールに対して、気候予測の不確実性を考慮するための仕様変更、ならびに評価対象の影響リスクの拡充を行った。また、逐次的な意思決定の支援を企図し、気候変化の進展に伴う気候予測不確実性の減少の見込みの推定手法を提案するとともに、気候安定化目標の達成に必要な二酸化炭素排出削減率の不確実性幅の推定に応用した。また、気候・影響予測の不確実性を考慮した緩和・適応によるリスク管理戦略検討に関しては、1) 複数気候モデルによる最新の気候シナリオを利用した影響予測、2) 気候変化による単収変化と緩和策実施の影響を統合的に考慮した食料消費・飢餓リスクの影響分析ならびに最新社会経済シナリオ（SSP）を活用した 21 世紀の食料消費・飢餓リスクシナリオの開発、3) 作物生産において必要な適応強度の時間変化に関する分析、4) 各種のリスク管理戦略の実現に必要な最適排出経路の経済モデル分析を行った。温暖化リスク評価研究と国際交渉・制度の関わりの考察については、国際交渉において適応実施のための資金拠出の国際制度が焦点の一つとして扱われていることをふまえ、適応費用推計に関連した既存知見の調査

を実施した。以上に加えて、環境研究総合推進費課題 S-10 の枠組みで、国内の共同研究機関からのリスク評価情報ならびに対策評価情報を総合化し、リスク管理戦略を提示した。また、同様の評価手法を用いて、国際交渉・制度の観点から、COP21 前に各国政府により提出された INDC（約束草案）の評価を実施した。

1.2.3 研究プロジェクト 3（低炭素社会に向けたビジョン・シナリオ構築と対策評価に関する統合研究）

プロジェクト 3 では、世界や国、都市など様々な領域を対象とした技術積み上げモデル（AIM/Enduse）、応用一般均衡モデル（AIM/CGE）等について改良を行い、これらを用いることで世界の平均気温上昇を産業革命前と比較して 2℃ 未満に抑えるようなビジョンの実現に向けて必要な施策の効果や影響について定量的分析を行った。分析結果は、東日本大震災後の日本における温室効果ガス排出削減の検討のために中央環境審議会等に提供されるとともに、国際的なモデル比較研究にも提供された。また、開発したモデルを発展途上国に適用することを目的として、人材育成のためのトレーニングワークショップを開催するとともに、各国の政策担当者との議論を通じて各国の発展状況や課題に対応した低炭素シナリオの開発を行った。タイやマレーシア・イスカンダル開発特区、ベトナム・ホーチミン市では、これらのシナリオをベースに政府の温暖化対策目標やその実行計画が作成されるなど、アジアにおける低炭素社会の実現に向けて貢献した。こうしたビジョン実現に必要な国際制度や国際交渉のあり方や、適応策の実施に向けた衡平な資金移転についても検討を行い、2015 年末にパリで開催される COP21 に向けて、実効性を高めるための方策を明らかにした。

(1) サブテーマ 1（アジア低炭素社会シナリオ開発及び社会実装に関する研究）

アジア地域を対象に、1) アジア地域全体、2) 国レベル、3) 自治体・都市レベルでの低炭素社会シナリオ開発及び社会実装に関する研究を行った。

アジア地域全体の研究としては、主に推進費 S-6-1 により、2050 年までにアジア地域の人口、経済、エネルギー消費、GHG 排出量が世界全体に大きな影響を及ぼし得ることをシミュレーション結果から示し、2℃ 目標を達成するために特にアジアがとるべき対策を定性的および定量的に、交通や物質循環の専門家らと協働しながら“10 action”としてまとめ、COP や IGES が主催する LCS-RNet（低炭素社会研究ネットワーク）LoCARNet（低炭素社会アジア研究者ネットワーク）等の機会に研究者や行政担当者等のステークホルダーに周知した。

国レベルの研究としては、推進費 S-6 および JCM、SATREPS により、中国、インド、韓国、タイ、インドネシア、マレーシア、ベトナム、カンボジア、バングラデシュ等の国レベルの低炭素社会シナリオの構築を各国の研究者や行政担当者と協働で行った。それぞれの状況に応じたトレーニングワークショップを随時行い、AIM のノウハウを移転するとともに、低炭素社会シナリオ開発、現地における政策対話、COP や国際シンポジウムでの発表を行うことで、政策立案に資する工夫を行った。特にタイでは天然資源環境省の担当官が INDC 構築に AIM/Enduse を活用していることを対外発表で示し、インドネシアではエネルギー評議会の入力に用いられるなど、各国の温暖化政策立案に活用されている。

自治体・都市レベルの研究としては S-6-1、JCM および SATREPS により、中国・広州市、インド・ボパール市、韓国・京畿道、タイ・コンケン市、マレーシア・イスカンダル開発地域、プトラジャヤ市、ベトナム・ホーチミン市等を対象とした低炭素社会シナリオ構築を行った。特にプトラジャヤ市やイスカンダル開発地域では、当該地域の行政担当者、マレーシア工科大学と共同で構築した手低炭素社会シナリオおよびロードマップにもとづく実行計画が承認され、それをきっかけに担当の部署が設立された。また、イスカンダル開発地域では、研究成果をもとに行政担当者が優先すべき 10 のプロジェクトを選定し実行している。その中の一つの「イスカンダル・マレーシアエコライフチャレンジプログラム」は、京都市の公立小学校約 170 校で全校実施されているプログラムを参考に、2013 年に 23 校、2014 年に 80 校、2015 年に全校にあたる 226 校で実施され、計画づくりをきっかけに現場での実施につながる（社会実装）調査・分析・コーディネーションを行った。また、東京都が実施している建築物報告書制度（一定規模以上の建築物のエネルギー消費量・GHG 排出量を所有者が報告し、東京都が省エネアドバイス・支援を行う制度）をプトラジャヤ市およびイスカンダル開発地域に適用すべく分析・調査研究を進めている。

これらの研究成果は、COP での公式サイドイベントや ASEAN 持続可能な都市のハイレベルセミナー、環境未来都市国

際フォーラム等の国際シンポジウム、各国の会合等で報告され、各国の研究者が自国の研究費を獲得するきっかけになったこと、環境省 JCM 事業の優先実施としてイスカンダル地域が選定され北九州市のグループが FS 調査を実施するきっかけになったこと、OECD が進めている“Urban Green Growth in Dynamic Asia”のケーススタディー都市としてイスカンダル地域が選ばれたこと、京都市および環境教育を進めている機関がイスカンダル開発地域を対象とした低炭素教育支援を進める JICA 草の根事業に採択されたこと、など広がりを見せた。

(2) サブテーマ 2（日本及び世界の気候変動緩和策の定量的評価）

推進費 A-1103 および推進費 2-1402 を基礎として、日本及び世界を対象としたモデル開発・改良および IPCC 第 5 次評価報告書等の最新の知見を踏まえ日本および世界の中長期の気候変動緩和策の定量的な評価を実施した。日本を対象とした分析では、日本経済モデル（AIM/CGE [Japan]）を用いて、国内排出量取引制度や温暖化対策税など施策の効果の評価や東日本大震災後にみられた節電など需要側の行動変化を加味した 2020 年における温室効果ガス削減の経済影響を評価した。また、日本技術選択モデル（AIM/Enduse [Japan]）を用いて、カンクン合意における 2020 年削減目標やの INDC（約束草案）における 2030 年削減目標の評価、長期的な 2050 年大幅削減に向けた排出経路や技術的な実現可能性について評価した。東日本大震災後の電力需給の問題を詳細に取り扱うことを目的として電源開発モデルの開発を行い、短中期の原子力発電所の将来シナリオを折り込んだ電源構成や CO₂ 排出量変化を定量的に分析した。また、これまで個別に運用してきた技術選択モデルと経済モデルについて、技術選択モデルを簡略化することで、経済モデルにおいても技術選択を考慮できるようにモデルの改良を行った。これらを通じて、環境省中央環境審議会 地球環境部会 2013 年以降の対策・施策に関する検討小委員会、経済産業省 総合資源エネルギー調査会 基本問題委員会、エネルギー・環境会議などの各種国内委員会に試算結果を提供し、また国際的には DDPP（Deep Decarbonization Pathways Project）や MILES（Modelling and Informing Low-emission Strategies）に参画し、わが国における気候変動緩和策の技術的・経済的な評価や低炭素社会にむけた大幅削減への道筋の議論などに貢献してきた。

世界を対象とした分析では、世界経済モデル（AIM/CGE [Global]）を用いて、各国に対する初期割当の違い（1 人あたり排出量均等化、GDP あたり均等化等）を考慮して、2050 年世界半減シナリオ達成時のアジアにおける排出経路やサブテーマ 1 で示されたアジア低炭素シナリオの各施策の定量的な評価、世界の新たな共通社会経済シナリオ（SSPs: Shared Socio-economic Pathways）の作成およびその定量化や、2℃ 目標に該当する放射強制力 2.6 W/m² シナリオを達成するための世界の排出経路や経済影響などを評価した。また、土地変化も考慮できるようにモデルを改良した。また、世界技術選択モデル（AIM/Enduse [Global]）を用いて、2℃ 目標シナリオや 2050 年世界半減シナリオ（温室効果ガス安定化濃度 450 ppm-CO₂ 換算に相当）の実現にむけた技術的な実現可能性の評価、原子力や CCS に依存しない世界半減シナリオの検討とその時の対策費用などを評価した。推進費 S-12-2 を基礎として、世界及びアジア主要国の大気汚染物質対策も評価できるような技術選択モデル（AIM/Enduse）の改良、国モデルについては地域特性も評価できるモデルを開発し、気候変動緩和策に伴う副次的な便益の一つである大気汚染対策に関する定量的な評価や、2℃ 目標シナリオにおける長寿命温室効果ガスと短寿命大気汚染物質の技術的な削減効果を評価した。また、低炭素社会の実現に鍵となる再生可能エネルギー利用可能量の評価について、世界全体を対象に、再生可能エネルギー設備立地地点と都市との距離を同定し、都市との距離を考慮することによる陸上風力発電のポテンシャル変化を分析した。また、技術選択モデルを動学的最適化モデルに拡張したエネルギーシステムバックキャストモデルの改良を行い、技術選択を反映させた排出削減経路の計算を行った。これらの世界モデル群の開発を通じて、国際モデル比較研究である EMF（Energy Modeling Forum）、AME（Asia Modeling Exercise）、AMPERE（欧州におけるモデル比較研究）、ADVANCE（欧州におけるモデル比較研究）等に参画し、国際社会での低炭素社会にむけた世界の排出経路の議論に貢献してきた。

このほか、気候変動緩和策と適応策については、推進費 S-10-4 および推進費 S-14-5 を中心に、本地球温暖化研究プログラムのプロジェクト 2 サブテーマ 3 と連携して、気候変動による農業生産性への影響を評価するためのモデルへの拡張や、適応策も考慮した SSP シナリオの評価などを行った。また、モデルの普及を目的としたトレーニングワークショップを毎年度開催し、中国、タイ、インド、ネパール、インドネシア、マレーシア、ベトナムなどの途上国からの研究者に対する人

材育成を行った。例えばタイやインドネシアでは、トレーニングをした研究者による試算結果が自国の排出削減目標の評価に用いられるなど、アジア各国の低炭素社会シナリオの分析に貢献し、人材育成を目的としたモデルトレーニングの実施は、研究のアウトリーチ活動としてもますます重要になっている。

(3) サブテーマ3（低炭素社会構築のための国際制度及び国際交渉過程に関する研究）

5年間で1) 推進費 2E-1201 COP21 で合意可能かつ気候変動抑制に実効性を持つ合意文書案の提示、2) アジア地域の低炭素社会実現に必要な資金メカニズムに関する研究、3) 国際レベルにおけるフロンガスの生産・消費・排出規制に関する研究、4) 適応策策定・実施のための資金移転を促進する方策に関する研究を行った。

具体的には、1) について、2015 年末の COP21 までに、2020 年以降の国際的な取り組みを規定する国際制度の合意を目指すという決定が 2011 年の COP17 で採択されて以降、抽象的な議論にとどまる状況が続く中、3 年間の研究を実施した。年に 1 度のウェブアンケート調査を実施し、その時々に関係者の意識をまとめ、英文レポートとして公表した。

また、2) について、推進費 S-6「アジア低炭素社会研究プロジェクト」のサブテーマの一つを担い、アジア地域での低炭素社会実現に必要な資金メカニズム案を検討し、英文論文としてとりまとめた。ここでは、今後、アジアが地域として十分な排出削減を実施するためには、多くの初期投資が必要となるが、化石燃料への補助金の撤廃、地域レベルでの排出量取引制度、炭素税、民間企業の投資の誘導などの政策に対して地域レベルでの合意が得られれば、必要な初期投資額に見合うだけの資金を集めることが可能ということを示すことができた。

さらに、3) について、本件に関する国内外での議論を整理し、これらを踏まえて、制度構築の方向性について検討した。モントリオール議定書や気候変動枠組条約の中では、それぞれに、フロン対策について議論する余地が残されていることが分かった。また、これらの交渉が難航している間は、二国間協力や複数国間での国内対策ネットワーク化が一部の手段において効果的であることを指摘した。

加えて、4) について、京都議定書下の適応基金及び世界銀行・気候投資基金の「気候変動影響への対応力強化のためのパイロット・プログラム」(PPCR) の運用状況をレビューした結果、両者の支援対象国はほとんど重複していなかった。適応基金は、現存する適応オプションを実施に移す際の支援として機能するという強みがあるが、他方、プロジェクト構築能力を持たない気候変動影響に脆弱な国が支援を得るのは難しい。一方、PPCR は、脆弱性を軸に対象国を選定しており、資金配分の衡平性確保を目指しているが、世界全体で見ると、適応策実施の効率性を下げるおそれがある。これら 2 つの基金の対象国／対象プロジェクト選定方法は、相互に補完的であり、いずれの資金配分方法も、今後、緑の気候基金をはじめとする、適応関連資金供与メカニズムに組み込まれる必要があることを明らかにした。

2 研究の成果

2.1 研究プロジェクト1：温室効果ガス等の濃度変動特性の解明とその将来予測に関する研究

2.1.1 サブテーマ1：大気観測によるグローバルな GHG 等の発生／吸収量分布評価に関する研究

(1) 研究の目的と経緯

将来の地球温暖化に伴う気候変化とその影響の予測モデルの入力条件をより現実的にするため、地上観測サイト、船舶、航空機ならびに人工衛星をプラットフォームとした包括的な観測ならびにモデル解析に基づき、地球温暖化の原因物質である温室効果ガス（GHG）を含む放射収支関連物質の濃度変動特性（人為発生量変化、陸域生態系や海洋による吸収・放出量の地理的分布や季節変動・経年変動、気候変化に伴うフィードバックなど）を、解明する研究を行った。人為排出、自然吸収源等の変化に関する科学的知見を提供すると同時に、温暖化緩和策としての温室効果ガスの中長期的な排出削減に関し、削減目標に役立つ情報の提供を図ることを全体の目的とした。

サブテーマ1では、アジア太平洋地域を中心としたグローバルな大気中 GHG の分布や変動を求めていくことを主な研究テーマとして、これらの広域、高頻度観測データを用いて人為発生量や陸域、海域吸収／発生量分布およびその変動を推定することを目的として研究を行った。観測網に関しては、これまで温暖化プログラムにおいて開発してきた海外サイトや、モニタリング事業で運営されているプラットフォームを利用発展させていくことに加え、GOSAT 衛星による観測データの利用を進めることが重要な課題である。それらによって得られたデータを元に大気モデルを用いた収支計算方法の高度化を行い、地域的な GHG 吸収／発生量を精度高く推定していく研究を行った。それにより、物質循環の観点から気候変動の影響を含めた温室効果ガスの発生／吸収変動を評価した。また、サブテーマ2と共同し、プロセスモデルなどから推定された吸収／発生量との比較・調整を通じて、より不確実性の少ない将来の予測モデル作成に貢献した。

(2) 方法

観測方法とその地域を図1に示す。サイトの特性や観測項目などを表1に示す。地上でのステーションを含め、国外での簡易的な観測地点の展開が行われた。特に東南アジアやインドへの展開、ハワイでの NOAA との共同観測、中国や、シベリアでの観測などを含んでいる。また、太平洋域では、定期貨物船による海洋バックグラウンド大気の観測が行われた。



図1 プロジェクトで観測を行った地上、海洋、航空機大気観測サイトやルート

表 1 観測サイトの場所と概要

サイト	場所、国	観測項目	方法など
波照間	沖縄	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、CO、フロン類、同位体比、酸素	NDIR、GC-ECD、GC-RGD、GC-MS、同位体質量分析装置、GC-TCD
落石	北海道	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、CO、フロン類、同位体比、酸素	
富士山山頂	日本	CO ₂	NDIR
ナイニタール	インド	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、CO、SF ₆ 、H ₂ 、同位体比、酸素	ボトルサンプリング、現場 NDIR
貴陽	中国	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、CO、SF ₆ 、H ₂ 、同位体比、酸素	ボトルサンプリング、現場 NDIR
マウナロア	ハワイ	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、CO、SF ₆ 、H ₂ 、同位体比、酸素	ボトルサンプリング、現場 NDIR
ダナンバレー	ボルネオ島	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、CO、SF ₆ 、H ₂ 、同位体比、酸素	ボトルサンプリング、現場 NDIR
ダッカ	バングラデシュ	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、CO、SF ₆ 、H ₂ 、同位体比、酸素	ボトルサンプリング、現場 NDIR
西シベリア	ロシア	CO ₂ 、CH ₄	NDIR、半導体 CH ₄ センサー、CRDS
各地国際空港上空 ならびにその間	アジア、ヨーロッパ、 米国、オセアニア	CO ₂	JAL、NDIR
日-米、日-豪、 日本-東南アジア	太平洋	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、CO、SF ₆ 、H ₂ 、同位体比、酸素	貨物船、NDIR、CRDS、 ボトルサンプリング
つくば、佐賀、 陸別	TCCON ネットワーク	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O	太陽光光源とした FT-IR

NDIR：Non-dispersive Infrared absorption method（非分散赤外線吸収法）、

GC-ECD：Gas Chromatography with an Electron Capture Detector（電子捕獲検出によるガスクロマトグラフ法）、

GC-RGD：Gas Chromatography with a Reduction Gas Detector（還元ガス検出によるガスクロマトグラフ法）

GC-MS：Gas Chromatography - Mass Spectrometry（ガスクロマトグラフ質量分析法）

GC-TCD：Gas Chromatograph with a Thermal Conductivity Detector（熱伝導度型検出によるガスクロマトグラフ法）、

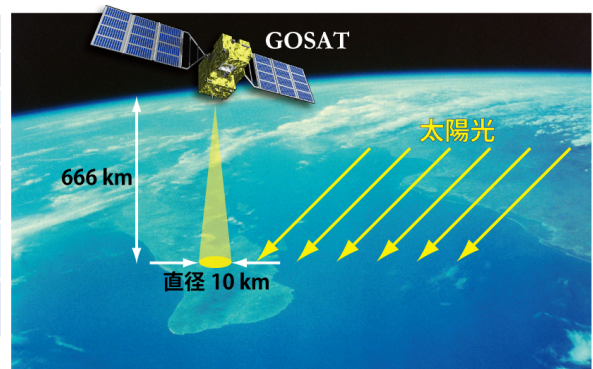
CRDS：Cavity ring-down spectroscopy（キャビティリングダウン吸収分光法）、

FT-IR：Fourier Transform Infrared Spectroscopy（フーリエ変換赤外分光法）

表 2 GOSAT における観測諸元

	バンド 1	バンド 2	バンド 3	バンド 4
波長範囲 [μm]	0.758~0.775	1.56~1.72	1.92~2.08	5.56~14.3
分光分解能 [cm ⁻¹]	0.2	0.2	0.2	0.2
偏光観測	あり	あり	あり	なし
観測対象	酸素	二酸化炭素 メタン	二酸化炭素 水蒸気	二酸化炭素 メタン
瞬時視野角	15.8 mrad（地表面への投影直径：約 10.5 km）			
1 走査データの 取得時間	1.1, 2.0, 4.0 秒（観測運用モードによる）			

* 1 μm = 1/1000 mm



また、アジアへ定期運行される貨物船による、東南アジア域での観測も展開された。航空機を用いた観測は、日本航空の協力による対流圏上部での二酸化炭素変化や世界の国際空港近辺の鉛直分布観測を高頻度で行った。また、シベリアにおいても、定期的な航空機観測が行われた。

この他、温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOSAT)での観測の概略を示す。GOSAT は地上約 666 km の高度を飛行して約 100 分で地球を一周し、3 日間で同じ軌道に戻る。GOSAT に搭載される観測装置は、Thermal And Near-infrared Sensor for carbon Observation (TANSO) と呼ばれる。TANSO は、「温室効果ガス観測センサ (Fourier Transform Spectrometer; FTS) “TANSO-FTS”」、「雲・エアロソルセンサ (Cloud and Aerosol Imager; CAI) “TANSO-CAI” という 2 つのセンサから

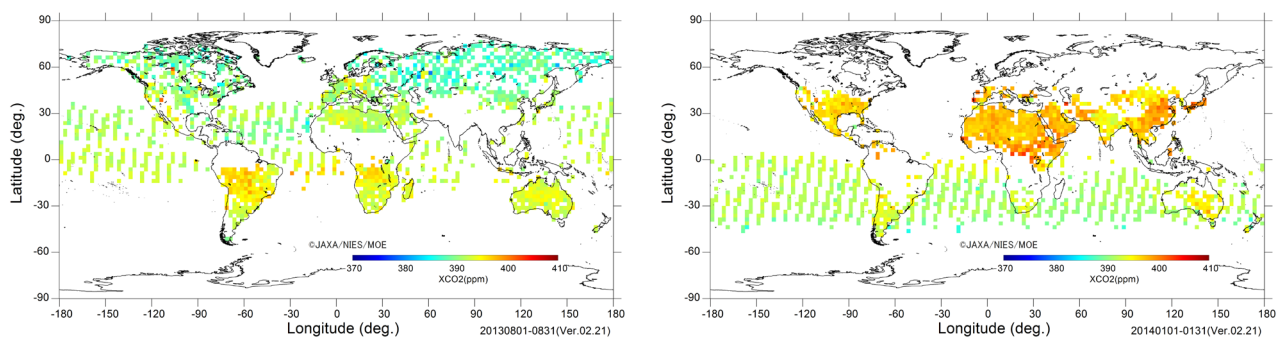


図2 GOSAT の夏（8月）と冬（1月）のデータ取得の様子

構成される。表2に、FTS センサの観測対象や波長帯を示した。このうち、バンド1～3は昼間観測する波長帯であるが、バンド4は熱赤外領域であり、夜間でも観測を行えるものである。基本バンド1～3により導出される昼間のCO₂、CH₄のカラム平均濃度などが解析に用いられている。

実際には、雲があると測定ができないことと、太陽高度が低い地域では散乱してくる太陽光が弱く観測ができないので、高緯度や反射の悪い海洋、それから雲の多い熱帯など観測できないところもある。典型的な夏と冬のデータの取得状況を図2に示した。

(3) 結果と考察

トップダウン研究は、GOSAT を含む広域大気観測の実施ならびに、インバースモデリング手法の開発がそのミッションである。以下にそれぞれの活動の成果を示す。

1) 国内、アジアでの新規広域濃度観測

地上ステーションとして、国内3地点（波照間、落石岬、富士山）に加え、ハワイ、貴陽（中国）、ダナンバレー（マレーシア）、ナイニタール（インド）、ダッカ（バングラデシュ）、シベリアタワーサイトで継続的に大気観測を行った。富士山での二酸化炭素濃度は、ハワイのマウナロア山より平均で1 ppm 高く、アジア大陸の二酸化炭素の影響が見られた。また、波照間、落石、富士山ともマウナロアよりも半年程度早く2014年の終わりには年平均濃度は約400 ppm に達した（図3）。これらは、大陸の風下にある西太平洋の領域である日本の領域では、特に近年の二酸化炭素の排出量の増加が著しいアジアでの影響

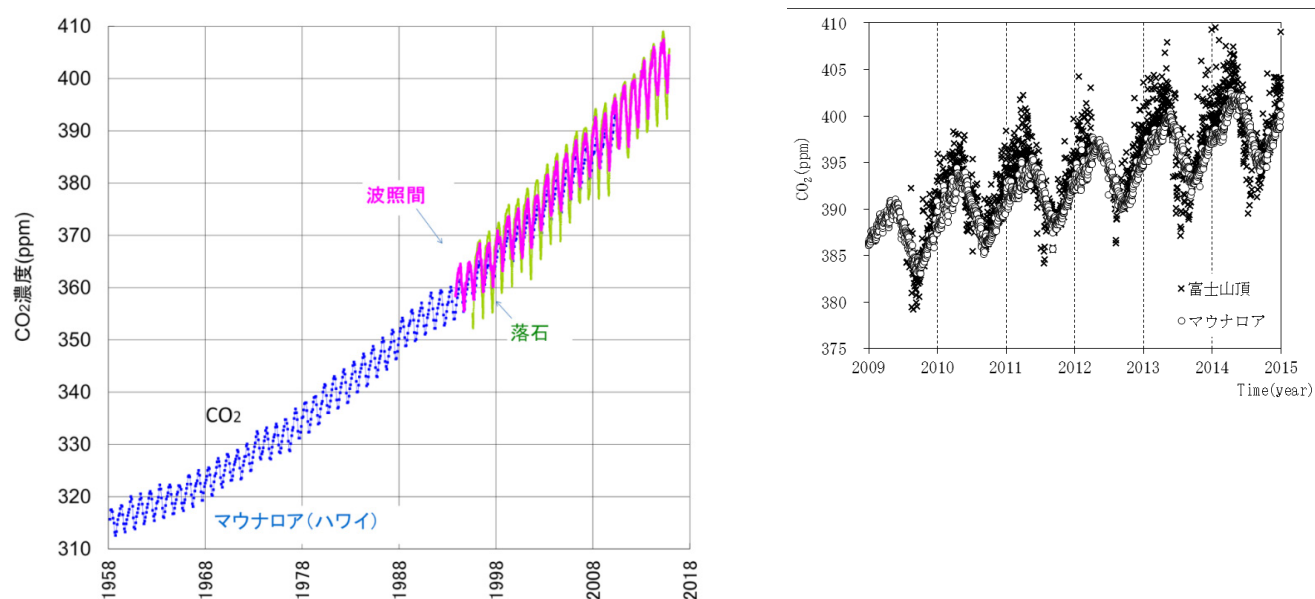


図3 二酸化炭素濃度の長期的変化（波照間、落石、富士山頂とマウナロアの比較）

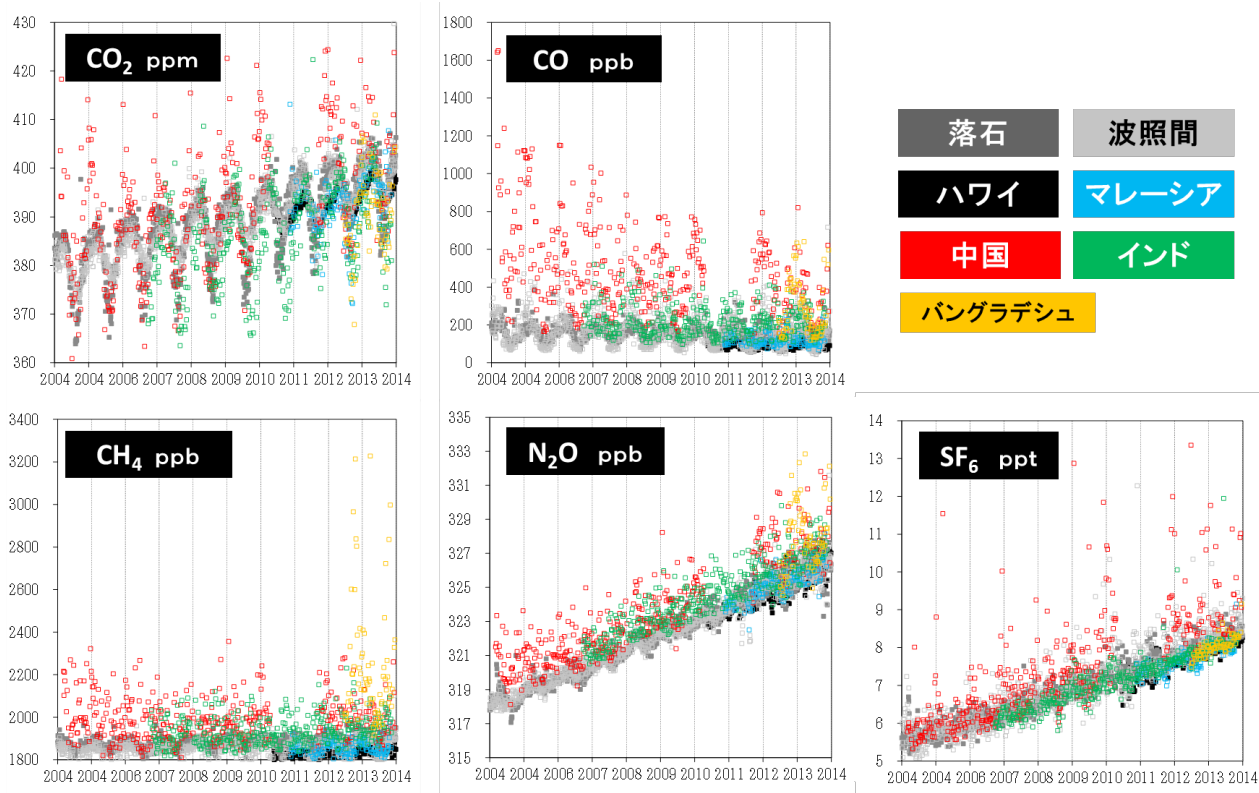


図4 プロジェクトでの新規に展開したアジアでの観測拠点での各種温室効果気体の変動

下にあることを明確に示した。同時に本プロジェクトで展開したサイトでの各温室効果ガスの観測結果を図4に示したが、中国のサイトの二酸化炭素高濃度やインドにおける低濃度などが顕著であった。メタンに関しては、中国、インド、バングラデシュなどアジアにおける高濃度が観測された。これは、GOSATで観測されるCH₄データと整合的であった。COに関しては、中国での濃度低下が顕著であることがわかる。またSF₆に関しては、中国の発生源が大きいことも示唆された。その他、現在インドネシアの大都市圏のGHG排出を捉えるために、ボゴールやジャカルタ周辺で地点の選定や測定装置のシステム設置を進めており、引き続きアジアでの観測網が充実できると考えられる。これらの、ネットワークによるデータは、GHGの発生源の地域性などを示す良いネットワークであり、これまで、アジアにおいて、あまり観測データがなかったものを本プロジェクトで補うことができたことと評価できる。同時に、他のプラットフォームとして、航空機、船舶、衛星などの利用が進んできたことにより、立体的な観測網が整備されたと言える。

2) シベリアでの観測

ロシア共和国のシベリア域は、グローバルな温室効果ガスの循環にとって重要な放出源・吸収源が分布している上に、地球温暖化に伴う永久凍土の融解やタイガ植生の遷移が報告されており、気候変動に対して脆弱な地域である。しかし世界の温室効果ガス観測網の中でシベリア域は観測の空白域であった。我々は平成14年度からトップダウンアプローチによる亜大陸規模のCO₂収支推定の手法を確立することを目指して、シベリア域においてタワーを用いたCO₂濃度観測ネットワークの構築を開始している。平成16年度以降徐々にCH₄濃度の測定も加え、平成20年度には9カ所まで展開し、JR-STATION (Japan-Russia Siberian Tall Tower Inland Observation Network) として多点同時観測を行えるようになった¹⁾ (図5)。観測の空白域であったシベリア域における温室効果ガスの長期変動を捉えるための貴重なデータが蓄積されてきている。

西シベリアの中部・北部サイトは湿地とタイガが混在する環境であり、更に北部のサイト周辺では天然ガスや石油も採掘されるため、これらの地域では時により多量のCH₄放出が想定される。CH₄濃度の変動を沿岸域の同緯度帯のNOAAのバックグラウンドサイトと比較すると、JR-STATIONの西シベリアの観測サイトで観測された1時間値は高濃度で不規則な濃度変動を示した。NOAAのバックグラウンドサイトのフラスコデータは2007年以降に増加する明確な経年変化を示す。

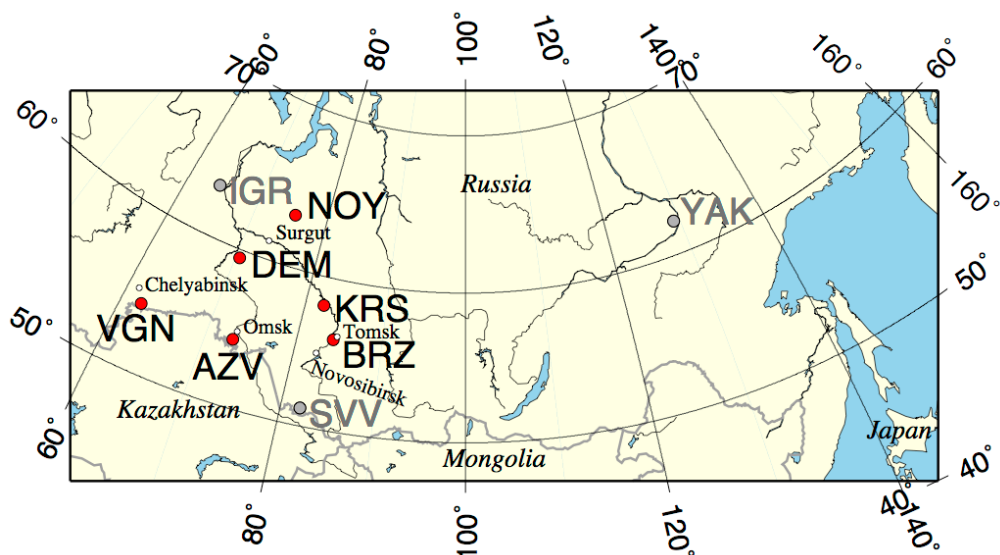


図5 JR-STATIONの位置 (●)。●は現在観測を停止しているサイト。主要都市は○で示す。

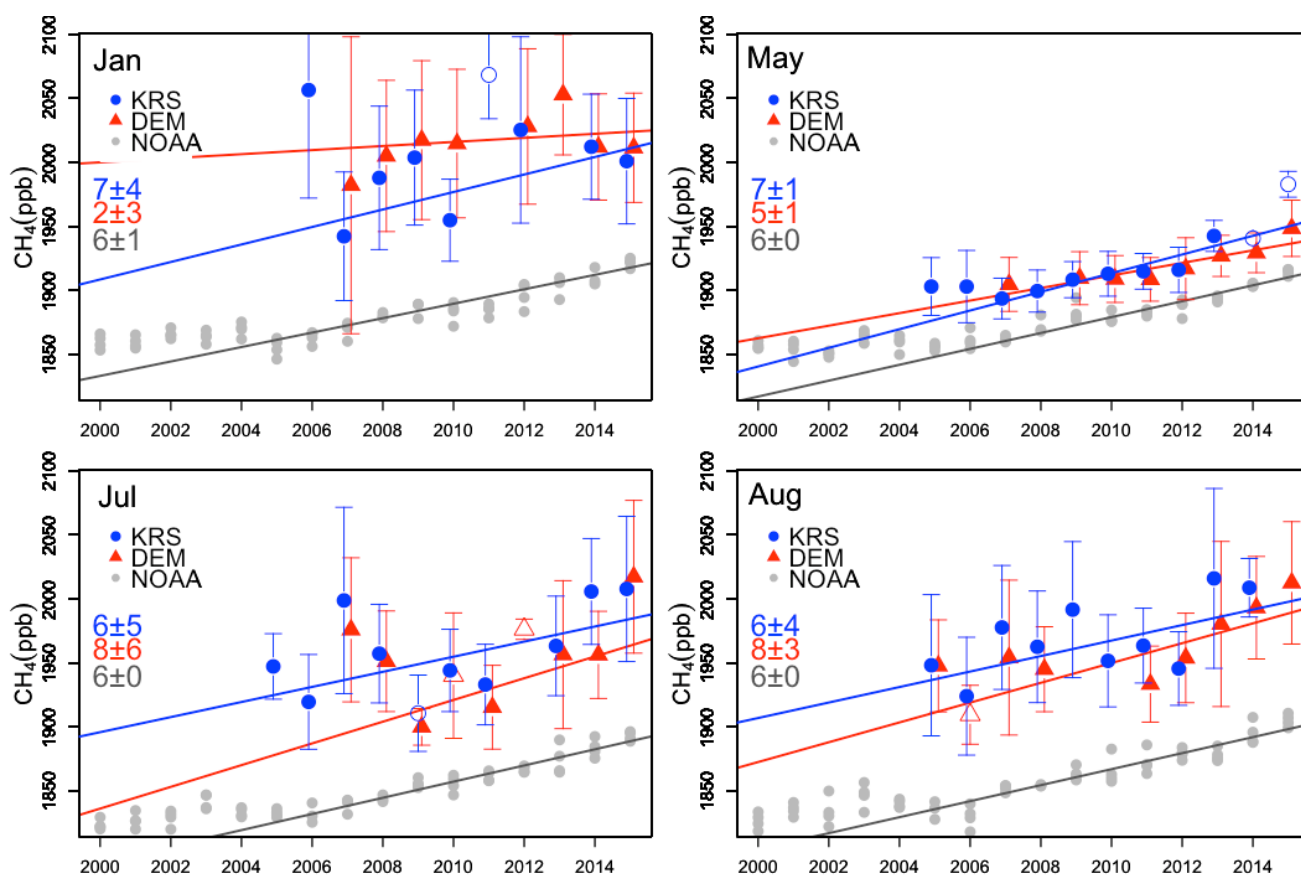


図6 KRSとDEMの高々度インレットで観測された CH_4 濃度の日中値(13:00-17:00 LST)の月平均値の経年変化(1月、5月、7月、8月)。エラーバーは標準偏差。直線は2007年以降のデータを重み付き線形回帰したもの。数値は各回帰直線の傾き±標準誤差(増加率; ppb/年)。日中値は低高度と高々度インレットの濃度差が50 ppbより小さい場合のみ使用した。月平均に使用した日中値がN=28より少ない場合は白抜きで表し線形回帰には使用していない。エラーバー無しの灰丸は同緯度帯の沿岸域のバックグラウンドサイト(NOAAのサイト; CBA, ICE, MHD, SHM)の月平均値。全てNIE94 CH_4 スケールに変換済み。

一方変動の大きい JR-STATION のデータでは月毎の日中値の経年変動で解析したが、欠損が少なく長期観測の行われた KRS と DEM の、5 月の値に注目すると 2007 年以降全球で観測されているような経年増加（KRS で 7 ± 1 ppb/年、DEM で 5 ± 1 ppb/年）が観測された（図 6）。このように春季（3-6 月）と秋季（10 月）は比較的ばらつきが小さく、バックグラウンドサイトに対して数 10 ppb 高い濃度レベルを維持しながら似たような増加率を示した。一方他の月も、2007 年以降は概ね増加傾向を示すが、特に冬季（11-2 月）と夏季（7-9 月）の濃度変動は大きく、サイトや月毎に長期トレンドが変わった。冬季の高濃度メタンは人為発生のためであるが、夏季の高濃度はシベリアの湿地からのメタン放出のためである。

特に気候変動により、シベリアからのメタン発生増加等が懸念されるところであるため、陸域生態系モデル（VISIT）によって計算される西シベリア湿地帯からの CH_4 放出量変化を解析した。その結果、大気中 CH_4 濃度の観測値から計算した CH_4 放出量を再現するようなパラメータを考慮することで、KRS における 2007 年 7 月、2009 年 8 月、2013 年 8 月、および DEM における 2007 年 7 月の CH_4 日中値の増加は、春季の降水量の増大による地下水面位の上昇が湿地からの CH_4 放出量を増大させたためであったことを説明できた²⁾。これは、気候変動によりシベリアによるメタン発生へのフィードバックを推定するために有効な結論であると思われる。

3) 航空機による立体観測

CO_2 など温室効果ガスの広域空間分布を観測する世界で唯一の民間航空機観測である CONTRAIL プロジェクトでは、8 機のボーイング 777-200ER 型機に加えて 2 機のボーイング 777-300ER 型機を用意し、このうち常に 3～4 機に CO_2 連続測定装置（CME）を搭載して世界各地の濃度観測を実施した。特にアジア域での観測を強化するために CME 搭載機を 1 機増やすことによってアジアの各空港上空の詳細な鉛直分布の季節変動を明らかにした。例としてタイのバンコック上空における CO_2 濃度鉛直分布の季節変動を図 7 に示す。また、大量の CO_2 濃度観測値から CO_2 濃度の南北-高度分布の季節変動を明らかにし、北半球大気が赤道上的上部対流圏を通して南半球に流入・拡散する状態を捉えることに成功した。

自動大気サンプリング装置（ASE）や手動大気サンプリング装置（MSE）による大気採取観測はシドニー線での観測によって上部対流圏における緯度別の温室効果ガスの長期変動を捉えることに加え、 CO_2 濃度の南北差が化石燃料消費量やエルニーニョサイクルと密接に関係していることを明らかにした。またヨーロッパ線での大気採取観測によって CO_2 以外の温室効果ガスの圏界面付近における季節変動が明らかになり、上部対流圏とその直上の下部対流圏では季節変動の位相や振幅が全く異なっており（例として図 8 に SF_6 濃度の観測値を示す）、これらは対流圏-成層圏間の大気輸送や成層圏の沈降流の影響を受けていること

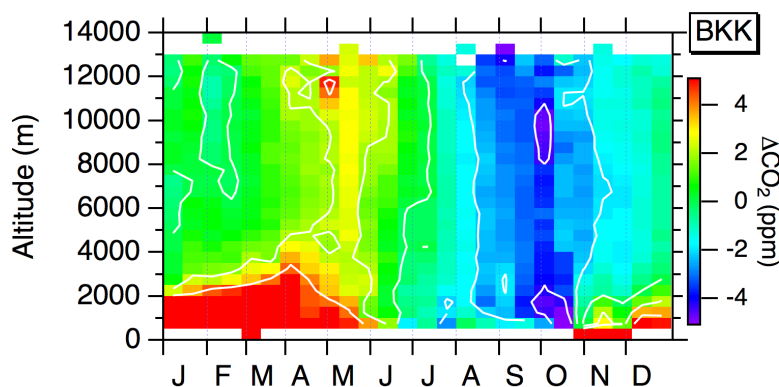


図 7 バンコック上空における CO_2 濃度鉛直分布の季節変動

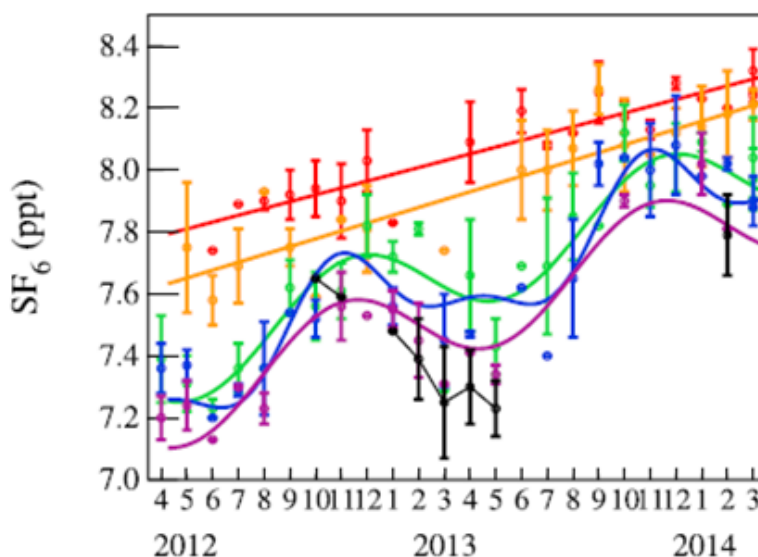


図 8 圏界面付近における SF_6 濃度の時間変動。紫や黒が下部成層圏の、赤が上部対流圏の、他の色はその間の高度における変動を示す。

が裏付けられた。さらに、下部成層圏と上部対流圏における SF_6 の濃度差から、下部成層圏の大気年代とその季節性を見積もることにも成功した。

CONTRAIL プロジェクトの CO_2 濃度観測値と地上観測値を利用してアジア域における CO_2 フラックスを推定したところ、CONTRAIL のデータによってフラックスの推定誤差を大きく低減できることを確認するとともに、地上観測値だけの推定では南中国の CO_2 吸収量の評価が過大であることやインドでの夏季の吸収量評価が過小であることがわかった。さらに、今後世界の民間航空機需要の主力になると考えられるボーイング 787 型機での観測の基礎データを取得するためにボーイング社との協力体制を図り、787-8 型機に CME と ASE を搭載するための基礎設計を行った。

4) 二酸化炭素の収支推定技術の開発

4.1) グローバルな収支－酸素と同位体比－

グローバルな二酸化炭素の収支に関して研究が展開された。特に CO_2 の陸上生物圏および海洋への吸収量を推定するために、大気中の CO_2 と酸素濃度の経年変化の観測を実施した。大気中の酸素濃度の変化は、化石燃料の燃焼に伴う酸素の消費、陸上生物圏の CO_2 吸収（または放出）に伴う酸素の放出（または吸収）、さらに海洋温暖化に伴う酸素の脱ガス、で決まる。そこで、大気中の CO_2 と酸素濃度の観測結果や、化石燃料消費量統計、海洋脱ガス量の推定値を用いて大気中の CO_2 と酸素の収支に関する連立方程式を解くことで、全球の炭素収支を求めることができる。ここでは、酸素濃度と陸域の収支から推算されるポテンシャル酸素（ $=\text{O}_2+1.1\times\text{CO}_2$ ）を使用した。

波照間、落石の観測データ、太平洋上の観測データを長期的に採取、解析した（図 9）。その結果、2000 年から 2015 年までの 15 年間の海洋および陸上生物圏の CO_2 吸収

量はそれぞれ $2.6 \pm 0.6 \text{ Pg-C yr}^{-1}$ および $1.6 \pm 0.8 \text{ Pg-C yr}^{-1}$ となった。これは、これまでに、推定されている値とはほぼ同等であった。これをさらに、5 年毎の 3 つの期間（2000-2005、2005-2010、2010-2015）について海洋・陸上生物圏の CO_2 吸収量を計算すると、それぞれ、 $2.4 \text{ Pg-C yr}^{-1} \cdot 0.8 \text{ Pg-C yr}^{-1}$ 、 $2.3 \text{ Pg-C yr}^{-1} \cdot 2.1 \text{ Pg-C yr}^{-1}$ 、 $3.0 \text{ Pg-C yr}^{-1} \cdot 1.9 \text{ Pg-C yr}^{-1}$ となった。この結果は過去 15 年間で海洋および陸上生物圏の吸収量が増加傾向にあることを示しており、このことが近年の化石燃料消費量の増加にもかかわらず大気中 CO_2 濃度の増加が抑制されている原因となっていることが示唆された。

さらに経年変化を太平洋での炭素同位体比観測にさらに解析を試みた。炭素同位体比は、同位体比的に軽い化石燃料起源の二酸化炭素が、あまり同位体効果の大きくない海洋へ吸収されるか、それとも同位体比の大きな陸域の植物によって吸収されるかを検出して、両者を分離していくものである。炭素同位体比による吸収量変動と酸素観測によるものを比較したものを図 10 に示した。これまでの陸域生物や海洋の吸収量の時系列推定結果から、1996 年～2014 年の間に吸収量は両者とも増加していることが分かったが、その主原因は大気濃度増加によるようであった。温度に対してどのように吸収量が応答するかは、今後の大気中の二酸化炭素の増加量に影響するものである。感度分析をしたところ、海洋の温度応答は小さかったが、陸域の吸収量の温度に対する負のフィードバックが有意にあることなどが推定された。しかし、温度変動が森林火災などの二酸化炭素発生を同時に引き起こすことから、純粋に陸域の植物の吸収量減少との関係性を導き出すためには、火災による二酸化炭素発生量を求める必要があった。特にエルニーニョ現象と森林火災が同時に起こることから、近年でも森林火災の影響が CO や CO_2 の濃度に影響が認められる。しかし、ここ数年の傾向として森林火災の規模の縮小傾向がある。人為発生量はここ数年で急激に増加しており大気中の濃度増加速度も 1.5 ppm/年 から 2 ppm/年 以上に増加が認められたが、それでも、海洋や陸域の自然の吸収は、この期間では減少することなく増加傾向にある。今後、気候変動

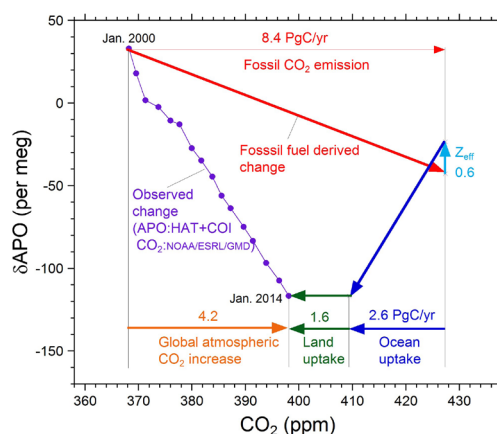


図 9 波照間・落石での大気中酸素観測に基づく 15 年間（2000-2015）の炭素収支計算の図解。炭素収支計算には $\text{APO} (= \text{O}_2 + 1.1 \times \text{CO}_2)$ と CO_2 濃度の変化を用い、図中の丸印は観測値、太線破線矢印は化石燃料の消費から予想される変化を表す。

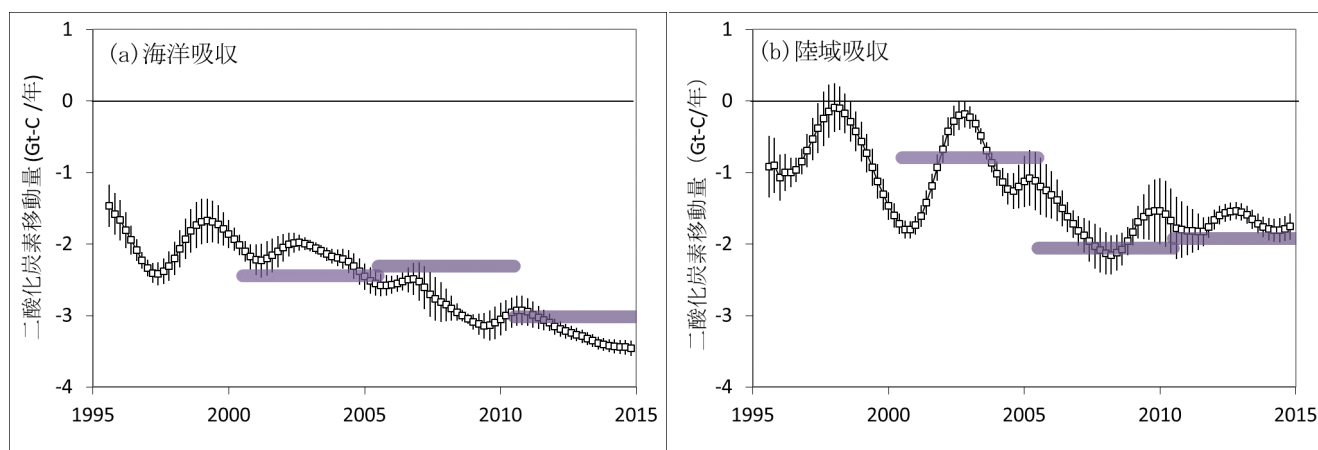


図 10 炭素同位体比から見積もった海洋、陸域吸収量の年変動と酸素から見積もった吸収量の期間平均との比較

が大きくなるにつれて、これらの吸収量の増加が継続するかどうか問題であり、今後の 30 年間に於いて、吸収量の変化を観測する必要がある。

4.2) 地域的発生源分離

同位体比の高度利用として、放射性炭素を用いた炭素収支を測定する試みも行われた。具体的には、波照間ステーションおよび落石ステーションにおいて、CO₂ 濃度増加時における化石燃料起源 CO₂ 量の割合を求める手法の開発を行うために、放射性炭素同位体比 ($\Delta^{14}\text{C}$) 分析を行った。両ステーションには、定常サンプリングに加えて、イベントサンプリングシステムを設置して運用を開始した。また、 $\Delta^{14}\text{C}$ 分析を推進するために、炭素用小型加速器質量分析計 Compact Carbon AMS (NIES-CAMS) を導入し、本格的な稼働を開始した。NIES-CAMS を用いた $^{14}\text{CO}_2$ 分析について、精度管理のための実験を行い、現代炭素のサンプルで 2.5% 前後の精度で $\Delta^{14}\text{C}$ 分析を行うことが可能となった。

波照間における定常サンプリングで得られたバックグラウンド大気中の $\Delta^{14}\text{C}$ データから、2004 年から 2012 年の間に平均で $-4\% \text{ yr}^{-1}$ の減少トレンドが検出され、年平均 $\Delta^{14}\text{C}$ 値は 2005 年の 58% から 2012 年の 28% に減少した。 $\Delta^{14}\text{C}$ には大きな年々変動があり、最も大きな偏差は 2009 年の増加と 2010 年の減少であった (2009 年中頃に $2 \sim 4\% \text{ yr}^{-1}$ 、2010 年末に $-10\% \text{ yr}^{-1}$)。この $\Delta^{14}\text{C}$ の大きな年々変動は、半年遅れで落石でも観測された。これら $\Delta^{14}\text{C}$ の年々変動は、数か月の位相のずれがあるものの、CO₂ 濃度の年々変動と逆相関があることが示唆された。また、波照間の $\Delta^{14}\text{C}$ データから、振幅の大きさが約 7% で、冬期 (1 月) に最小、夏期 (7 月) に最大となる明瞭な季節変動が観測された。 $\Delta^{14}\text{C}$ の季節変動が負になる 1 月から 4 月の間、CO₂ の季節変動は 2 ~ 3 ppm の正になったが、大気輸送モデルの結果から、この 2 ~ 3 ppm の CO₂ の冬期増加のうち、約 1 ppm は化石燃料起源 CO₂ であると推察された。1 ppm の化石燃料起源 CO₂ は $\Delta^{14}\text{C}$ で -2.8% に相当することから、観測された $\Delta^{14}\text{C}$ の冬期の減少は化石燃料起源 CO₂ でほぼ説明できることがわかった。波照間とはほぼ同じ緯度帯に位置するマウナロアのデータは、季節変動が明瞭でなく、振幅も約 3% と非常に小さい。このことから、東アジアの東端に位置する波照間では、季節風の影響で冬季に化石燃料起源 CO₂ の影響がより強くなることが示唆された。

また、波照間のイベントサンプリングシステムで取得された冬期の高 CO₂ イベント時における CO₂ 濃度、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\Delta^{14}\text{C}$ の観測データを用いて、各高 CO₂ イベント空気塊の化石燃料起源 CO₂ 量の割合 ($C_F/d[\text{CO}_2]$) を求めた結果、 $C_F/d[\text{CO}_2]$ 比は空気塊の地理的起源によって異なることが明らかになった (表 3)。中国大陸由来の空気塊では $C_F/d[\text{CO}_2]$ は平均で 61% (53 ~ 73%)、それ以外 (朝鮮半島や日本) の空気塊では C_F の割合は平均で 81% (67 ~ 93%) であることがわかった。これらから、冬期の中国大陸起源の空気塊は、陸域生態系から放出された CO₂ を 40% ほど含んでいるが、半島や諸島では陸域生態系からの冬期の CO₂ 放出が非常に小さく、CO₂ 放出の大部分が化石燃料起源であることが推察された。また、キーリングプロットから推定した CO₂ 放出源における $\delta^{13}\text{C}$ 推定値にも地域差が見られ、多くのイベントが $-24 \sim -29\%$ であるのに対し、黄海や中国華東沿岸を経由した空気塊では、 $-20 \sim -23\%$ であることが明らかになった。これは、中国華東におけるセメン

表3 波照間で観測された高 CO₂ イベント空気塊の、流跡線解析から推測された空気塊の起源領域、CO₂ 増加量に対する $\Delta^{14}\text{C}$ から求めた C_{ff} 比の平均±標準偏差、ならびに Keeling plot から求めた放出源の $\delta^{13}\text{C}$

EventID	Date	Air mass from	C _{ff} /dCO ₂ (%)	¹³ Csource (‰)
1A	2010/03/07-09	Korea	75 ± 6	-29.0
1B	2010/03/09-11	East China	63 ± 0	-24.5
2	2010/04/22-23	Philippine	81 ± 6	-28.1
3	2010/12/13-14	Japan	81 ± 5	-23.9
4	2011/03/01-02	North China	53 ± 6	-24.2
5	2011/04/11-12	Yellow Sea	93 ± 10	-20.3
6	2012/01/19-20	Japan/Yellow Sea	92 ± 7	-22.8
7	2012/02/15-16	Japan/Korea	82 ± 6	-28.6
8	2012/03/07-10	Korea	86 ± 11	-25.8
9	2012/11/11-12	East China	58 ± 5	-23.7
10	2013/01/22-25	East China	73 ± 6	-22.6
11	2013/03/01-02	Yellow Sea/N. China	76 ± 3	-24.1
12	2013/03/13-14	North China	59 ± 13	-26.6

ト生産起源の CO₂ を捉えている可能性がある。 $\delta^{13}\text{C}$ は、石油・石炭起源が -29‰、陸域生態系起源が -25‰ に対し、セメント生産起源は 0‰ と、大きな差があるため、 $\Delta^{14}\text{C}$ と $\delta^{13}\text{C}$ の観測を統合的に解析することで、化石燃料起源 CO₂ の定量化のみならず、化石燃料の内容（セメントと石油・石炭）を分離評価できる可能性がある。一方、落石でのイベントサンプリングからは、陸域生態系が CO₂ を放出するとともに大気 ¹⁴CO₂ が増加することが明らかになった。また、CO₂ 濃度が明け方にかけて減少している時も $\Delta^{14}\text{C}$ は増加を続けており、これは $\Delta^{14}\text{C}$ がグロスの CO₂ 放出を捉えていることを反映していると考えられた。サンプリングを継続して $\Delta^{14}\text{C}$ 分析結果を増やしていくことで、陸域生態系が放出する CO₂ の同位体特性とグロスの CO₂ 放出量の推定を行うことが可能になると期待される。本研究によって、 $\Delta^{14}\text{C}$ の観測が化石燃料起源 CO₂ を定量化する上で、また大気輸送モデルを評価する上で、非常に重要な役割を果たすことが確認された。

4-3) 海洋の炭素収支と海洋循環

本プロジェクトでは 2003 年より北太平洋を横断する自動車運搬船を利用して二酸化炭素フラックス測定の際に得られる表層海水中の放射性炭素濃度 ($\Delta^{14}\text{C}$) の測定を開始している³⁾。表層水中の $\Delta^{14}\text{C}$ は大気海洋間の二酸化炭素交換に加えて比較的濃度の低い下層の海水との混合によって決定するので、これを継続的にモニタリングすることは、大気海洋間の二酸化炭素交換速度の季節変動や表層海水の流動の変化などを解析する上で貴重な情報を得ることとなる。本研究では、海洋表層が比較的成層化する夏季（ここでは便宜上 5～9 月を夏季と定義する）について、2003～2014 年採取分までの $\Delta^{14}\text{C}$ 測定を実施した。図 11 には、測定の一例として、2010 年 5～8 月に実施された愛知・田原港と米国東岸および西岸を往復した航海で得られた表層水における $\Delta^{14}\text{C}$ の空間分布を示した。東岸航路の場合はパナマ運河を経由するために北緯 40 度より南側の亜熱帯循環域を、西岸航路の場合はオレゴン州ポートランド入港後にカリフォルニア州ロングビーチ港を経由するために往路では亜寒帯循環域、復路では北緯 40 度付近の混乱水域を航行する。したがって西岸航路で得られる $\Delta^{14}\text{C}$ は、全炭素に占める放射性炭素の割合が低い太平洋深層水の湧昇の影響を受けて著しく低い値となっている。なお、観測を実施した 2003～2014 年は全航海の 8 割以上が東岸航路だったため、亜熱帯循環域で得られた試料が大半を占めた。

本研究では、同時に得た水温・塩分データをもとに、亜熱帯循環域については A：黒潮・続流域、B：北太平洋海流域、C：カリフォルニア海流域、北緯 40 度以北航行時は D：混乱海域、E：亜寒帯海流域、F：アラスカ海流域の合計 6 つに大別し、最近 10 年間の $\Delta^{14}\text{C}$ の変動を評価した（図 12）。亜熱帯循環域の $\Delta^{14}\text{C}$ は、A ≥ B ≫ C の傾向があり、10 年間この傾向を保ちながら減少している。1973 年 8～10 月に観測が実施された GEOSECS では、海域 C が約 200‰ と最も高く、海域 A では約 150‰ と現行とは正反対の分布をしていた⁴⁾。これは、1973 年当時は核実験に由来する放射性炭素 (bomb-¹⁴C)

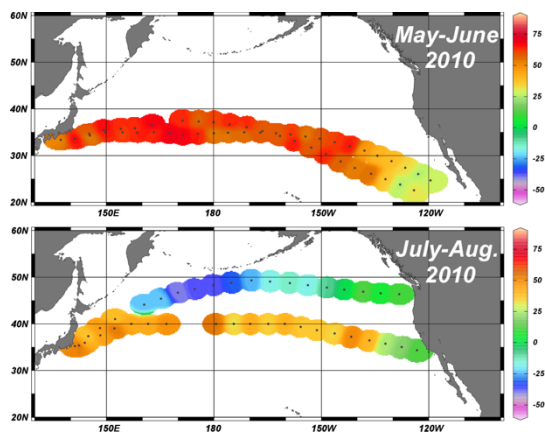


図 11 2010 年夏季の北太平洋における $\Delta^{14}\text{C}$ (‰) の空間分布 (上図：米国東岸航路，下図：米国西岸航路)

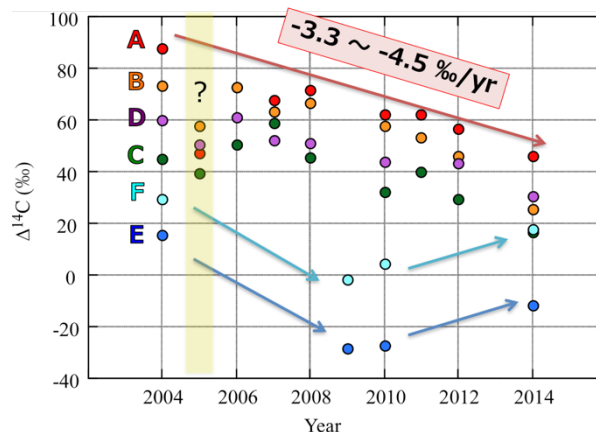


図 12 各海域における $\Delta^{14}\text{C}$ (‰) の 10 年変動

の大気中濃度分布がアメリカ大陸寄りに偏っていたこと、カリフォルニア海流が亜寒帯域から米国西岸を南下する海流である上に、東部北太平洋表層が赤道湧昇の影響を比較的受け易いことなどによるものと考えられる。一方、大気中の $\Delta^{14}\text{C}$ が 1963 年の部分的核実験禁止条約の締結以降は指数関数的に減少していることに呼応して、亜熱帯循環域の表層水中の $\Delta^{14}\text{C}$ は若干のタイムラグを伴って 70 年代後半以降は減少傾向を示している。その速度は、海域 A：-3.6‰/yr、海域 B：-4.5‰/yr、海域 C：-3.3‰/yr と計算され、GEOSECS (1973 年) から WOCE (1991 年) までの平均減少速度 (海域 A：-2.2、海域 B：-3.3、海域 C：-5.8) と比べると海域 A 及び B では減少が促進、海域 C では低下している。これは、大気中 bomb- ^{14}C 濃度の 1970 年代における水平分布の偏りや、2000 年代以降の減少速度の鈍化⁵⁾と密接に関わっていると考えられる。一方、亜寒帯循環域 (海域 E 及び F) の $\Delta^{14}\text{C}$ は、測定件数及び頻度が少ないものの、2009～2010 年頃を境に減少から増加へ転換したように見える。亜寒帯循環域では冬季の冷却による対流によって下層水との活発な上下混合が起きているため、当該海域の表層水は大気海洋間のガス交換によってもたらされる高い $\Delta^{14}\text{C}$ を持つ大気 CO_2 のみならず、低い $\Delta^{14}\text{C}$ を持つ下層水の影響を強く反映しており、亜熱帯循環域に比べて著しく低い $\Delta^{14}\text{C}$ が観測されている。2008 年以降の増加傾向は、下層水に蓄積された bomb- ^{14}C が上下混合によって表層へもたらされた結果を示唆している可能性がある。

5) アジア地域でのメタンの発生の再評価

メタンは二酸化炭素の次に大きな温室効果の増加に寄与しているものであるが、2007 年以降の新たな濃度増加が認められており、各地での観測によって自然起源寄与を含む発生源変動に高い関心がある。ここでは、大きな自然発生源をもつシベリアでの観測を強化したことに加え、中国やインドなどの発生源の変化などについて観測によって評価を行った。

波照間ステーションにおける大気観測では、冬季を中心とした晩秋から初春にかけて GHG 等の濃度が数時間から数日の期間高濃度となる短期変動、いわゆる汚染イベントがしばしば観測される。これは、東アジアモンスーンの影響により、大陸の発生源の影響を受けたエアマスが輸送されるために生じる。また、波照間で観測される汚染イベントでは、例えば CO_2 と CH_4 の濃度変化に非常に高い相関が認められ、それらの変動比は大陸からの CO_2 および CH_4 の放出比を反映していると考えられる。そこで、人為起源 GHG の中でも排出量の推定値の不確かさが比較的小さい CO_2 の排出統計値を用い

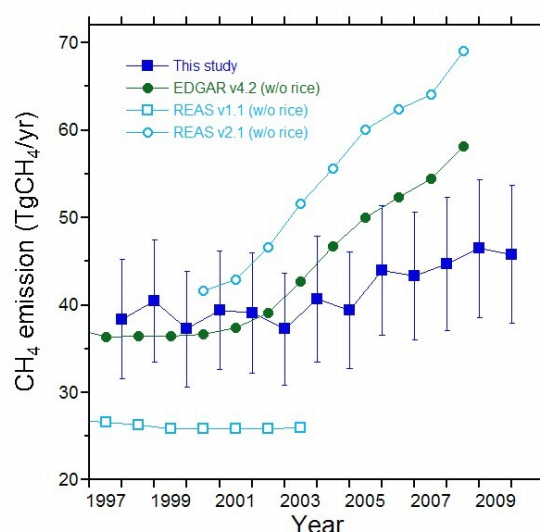


図 13 中国からの水田を除く人為起源発生源からの CH_4 放出量の推定値と他の報告値との比較。

て、波照間で観測される CH_4 と CO_2 の変動比 ($\Delta\text{CH}_4/\Delta\text{CO}_2$) の経年変化から、中国における CH_4 排出量の経年変化を推定した。なお、推定にはラグランジアン型の大気輸送モデルを用い、計算される $\Delta\text{CH}_4/\Delta\text{CO}_2$ 変動比の経年変化が観測結果と一致するように、大陸からの放出量を求めた。その結果、中国からの水田を除く人為起源 CH_4 の発生量が 2002-2010 年の期間に $1.1 \pm 0.2 \text{ TgCH}_4/\text{y}$ の割合で増加していると推定された (図 13)。この増加率は EDGAR や REAS といったボトムアップ手法による放出量推定値と比較して小さく、これらのボトムアップ手法による推定が放出量を過大評価している可能性が示唆された。

さらに広域の中国からのメタンの輸送については、GOSAT 観測や地上 FT-IR 観測によって検出することができた。2013 年 8 月と 9 月に東北アジアの中国北東部 - 朝鮮半島域 (図 14) と日本の上空で取得された GOSAT データを解析した結果、2009 ~ 2013 年の夏季の平均よりも約 20 ppb 高い高濃度 CH_4 を検出することに成功した (図 15)。GOSAT と同様の原理で地上から上空までの CH_4 を測定している全量炭素カラム観測ネットワーク (Total Carbon Column Observing Network、TCCON) 日本国内つくば及び佐賀のサイトのデータを解析したところ、同時期に同程度の高濃度 CH_4 が観測されており、この現象は正しいことが分かった (図 15)。さらに日本列島の 3 カ所 (落石岬 (NIES)、綾里及び与那国島 (気象庁)) で観測された地上のメタン濃度を解析したところ、落石岬および綾里のみで高濃度が検出されたため、極端な CH_4 増加は限られた本州・北海道上空を中心とした地域で起きていることが分かった (図 16)。この現象の原因を調査するために、大気輸送モデルを用いた解析を行い、このような増加は 2013 年夏季のアジア上空の気圧配置が例年と異なるパターンとなり、

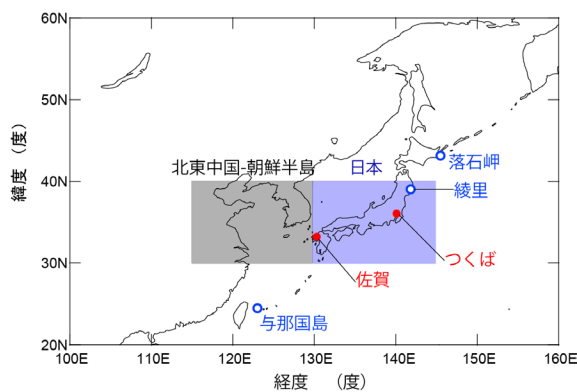


図 14 GOSAT CH_4 カラム平均濃度の解析に用いた範囲 (灰色、青色の長方形、灰色は北東中国 - 朝鮮半島上空、青色は日本上空)。GOSAT の観測結果を確認するために使用した TCCON の観測地点 (赤丸) と地上観測点 (青丸)。

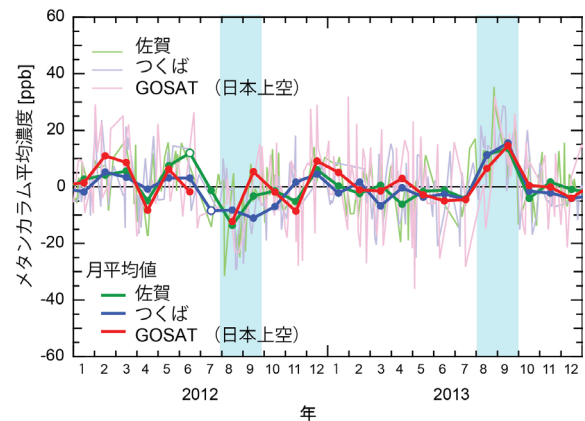


図 15 長期変動成分と平均的な季節変動成分を除外した GOSAT データ及び、つくばと佐賀 TCCON による CH_4 濃度の月平均値の時間変化。緑と青は佐賀及びつくばの TCCON データ。赤は日本上空の GOSAT データ。薄色は毎日の平均値。水色で塗りつぶしたところは本研究で注目した期間。

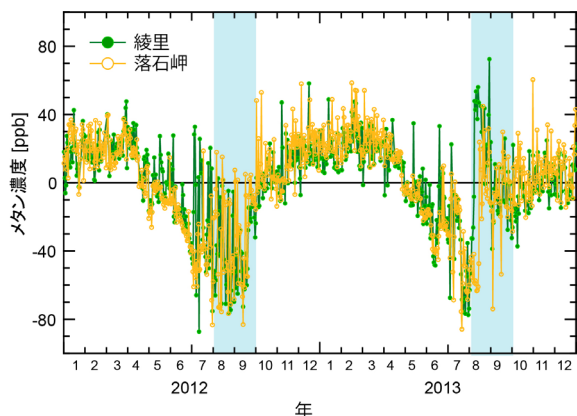


図 16 長期変動成分を除外した綾里と落石岬の地上観測による CH_4 濃度の時間変化。緑色と黄色は綾里と落石岬の地上観測データ。水色で塗りつぶしたところは本研究で注目した期間。

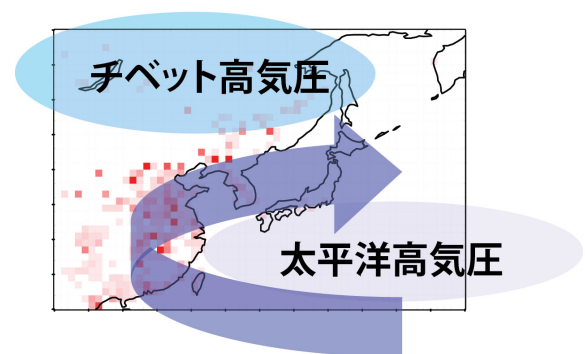


図 17 2013 年夏季の通常と異なる気圧配置と大気輸送の関係の図解。赤色の正方形は、EDGARv4.2FT2010 (人為起源 CH_4) から、稲作による Emission を除いた 2 年間 (2009-2010) の平均値。

中国東部の強いメタン発生源地域から日本へ効率的に高濃度 CH_4 が輸送されたことが原因であると分かった。概念図を図 17 に示す。そして、中国東部から運ばれてきた高濃度の CH_4 を含む大気が、東西に約 1,000 km 離れた 2 カ所の TCCON サイト（つくば・佐賀）にちょうど沿うように分布していたことが分かった。日本の夏季の気候には、地上付近下層は太平洋高気圧、上層はチベット高気圧の配置が大きく影響する。例年より太平洋高気圧は西に張り出し沖縄を含む日本列島の西部まで大きく発達し、チベット高気圧は日本列島本州近くまで張り出していたため、2013 年夏季の中国東部から日本への高濃度メタンの輸送は、通常と異なる気圧配置により起こったと考えられる。同じ地点を 3 日ごとに観測する GOSAT は TCCON データと同程度の確度で総観規模（数千 km 規模）のメタン濃度の増加を観測することに成功し、このことから GOSAT は総観規模の現象を検出できる能力を有することを証明することができた。

6) GOSAT 観測の進展

地域的な CO_2 や CH_4 の発生・吸収特性の変化を広域観測する点において、GOSAT の短波長赤外領域の濃度データの精度向上による広域的なデータ利用が可能になったことは重要な成果である。これにより、観測値の空白域（アフリカや南アメリカ、西アジア、シベリア、オーストラリア大陸）のデータが使用可能になり、地上フラックス推定や炭素収支の季節変動の解釈、大規模な森林火災や大都市による CO_2 や CH_4 の増加の検出、相関規模の温室効果ガス濃度のアノマリの検出等に、幅広く利用されるようになった。

GOSAT 観測値を用いて地球のバックグラウンド大気平均濃度の算定を試みた（図 18）。その結果 GOSAT から求められる地球全体のカラム濃度平均は、北半球の地上濃度より 5 ppm 程度低く、2014 年に地上濃度が 400 ppm を超えてきたのに対して、少し遅れて 2016 年に 400 ppm を超えてきたことがわかった。また、増加速度は、地上の観測とほぼ同値度であり約 2 ppm/年であることがわかった。

その他の研究として、GOSAT の短波長赤外（SWIR）および熱赤外（TIR）バンドから各々導出されるメタン全カラム量（分子/cm²）および高度毎のメタン濃度（ppb または分子/cm³）を利用した対流圏中部から下層のメタン濃度の推定に関する研究を実施した。TIR バンドからの高度毎のメタン濃度は気圧 600 hPa から 300 hPa の間の高度領域において最も高い観測情報を有する。はじめに測定精度の高い情報源として、観測頻度は月に一回と限られるが、西シベリアでの航空機観測（Surgut と Novosibirsk）からのメタン濃度を利用し、TIR バンドからのメタン濃度の妥当性を調べた。ここでは高度 5.5 km（～500 hPa）と 7 km（～430 hPa）のデータを利用した。一方、同じ地点の上部対流圏から下部成層圏領域（8.5 km から 11 km 付近）における高度毎のメタン濃度の情報源としては GOSAT 観測期間中も運用を続ける ACE-FTS（太陽光を光源とした大気周縁測定センサ）のデータを利用した。

その結果、航空機観測から水平距離差 300 km 以内の TIR バンド観測の各月の変動幅は高度 5.5 km と 7 km とともに +/-10 ppb から 30 ppb 程度であり夏期に低く、冬期に高くなる季節変化を示していた。またその変動幅内に航空機からの観測値が収まっており、お互いの時間変化の傾向は良く一致していた。一方、高度 8.5 km から 11 km（気圧 300 hPa から 200 hPa）の間で、TIR バンドと ACE-FTS との比較を水平距離差 500 km 以内の範囲で実施した。その結果、季節を通じて TIR バンドからのメタン濃度が高めになり、特に春期に ACE-FTS ではメタン濃度が低くなる季節変化を示すが、TIR バンドからはそのような傾向は見られなかった（最大で 100 ppb

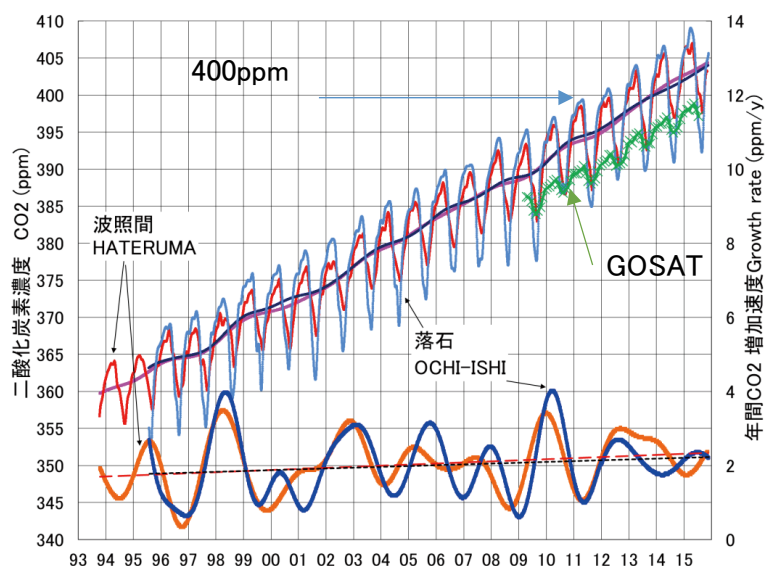


図 18 地上サイト（波照間、落石）と GOSAT による地球平均カラム濃度との比較

以上の差)。したがって 300 hPa レベルより上の高度では現状の TIR バンドからのメタン濃度の利用には注意が必要であり、正確な全カラム濃度の算出には大気周縁観測センサの情報が必要である。

今後より詳細に航空機との比較を実施し、新たな TIR バンドからのメタン導出結果の妥当性が確認できれば、TIR バンドと大気周縁センサの複合利用により 600 hPa レベルより上のメタン部分カラム量を算出することが可能となる。これを SWIR からの全カラム量と比較することで、対流圏中部から下層の部分カラム量の推定が期待される。これらのデータセットは将来的にはメタンのソースシンク推定のためのインバースモデルへの入力として価値のあるものとなり得る。

7) CO₂ 以外の温室効果ガス観測

7-1) CO, CH₄, オゾンなど

二酸化炭素に加えて、それ以外の長寿命・短寿命温室効果物質（メタン、亜酸化窒素、オゾン、ブラックカーボン等）は、地球温暖化への寄与も大きく、それらを合計すると二酸化炭素の大きさにほぼ匹敵することが知られており、対策の上でも重要な物質である。また、一酸化炭素は大気中の水酸ラジカルとの反応を通じて、メタンや代替フロンの大気中濃度に影響を与える。これら物質の大気中濃度の空間分布や時間的推移を把握するために、特に観測データに乏しいアジア・オセアニア地域におけるデータを得ることを目的として、西部太平洋上の日本－東南アジア航路、日本－オセアニア航路を航行する 2 隻の定期貨物船舶を用いて洋上大気中の微量温室効果気体の連続観測を行った。日本－オセアニア航路では、陸域から遠く離れたバックグラウンド的な大気観測、日本－東南アジア航路では、アジア沿海域における地域的汚染を含んだ大気観測が可能であり、2 隻の特徴的な船舶観測を対比させることによって東アジア・東南アジア地域からの温室効果物質の放出影響をより良く理解することができると考えられる。

これら両航路における一酸化炭素濃度分布の観測データから、緯度帯別の季節変化を導出した。また、両海域において、領域化学輸送モデルを用いた計算を行った結果と比較した(図 19)。北半球の CO 濃度は冬季に増加し夏季に最小となるが、

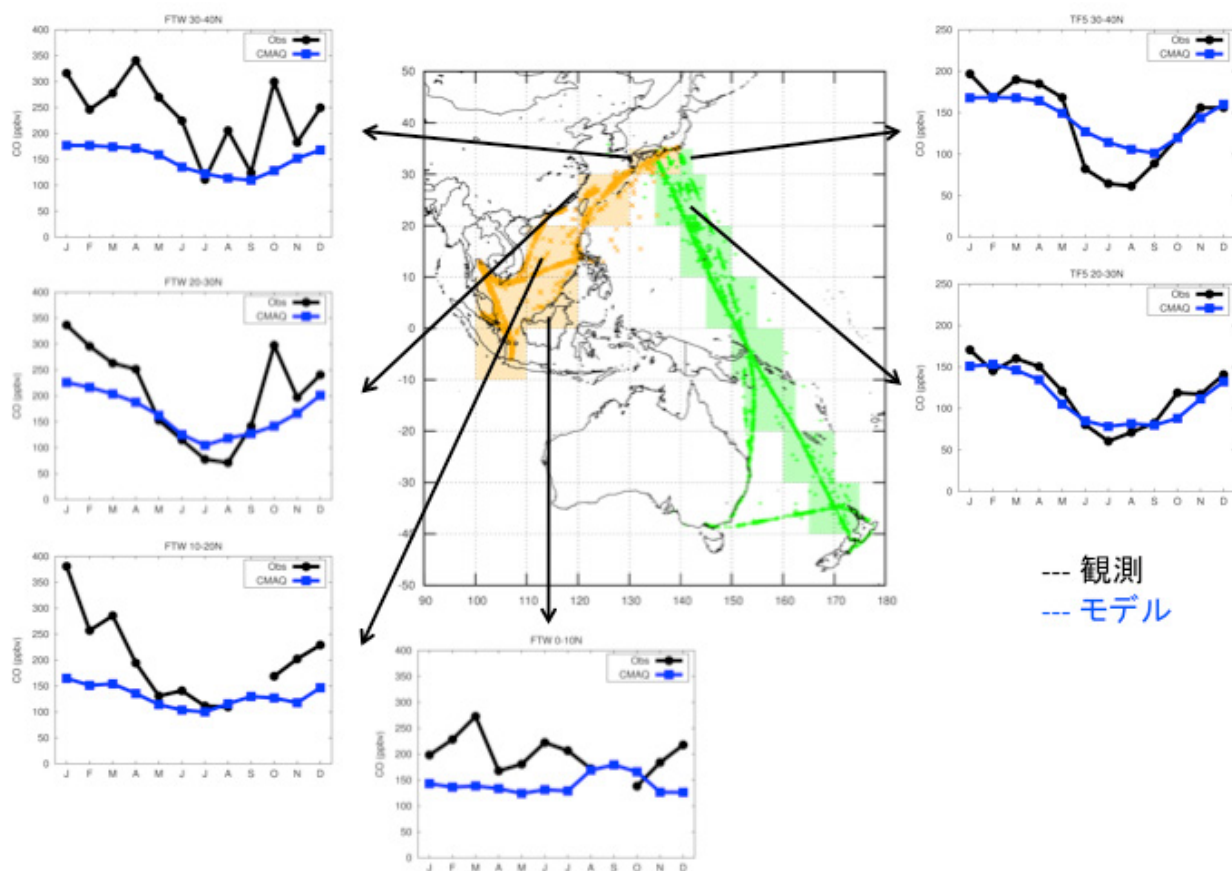


図 19 日本－オセアニア航路および日本－東南アジア航路における一酸化炭素濃度の観測と領域化学輸送モデルの緯度帯別季節変化の比較

モデルの CO は季節変動の振幅が小さく冬季に過小評価気味とであることが分かった。CO の過小傾向は、排出源に近い東南アジア航路でより顕著であり、これはインベントリにおける排出量が過小評価であることを意味する。CO については東南アジア海域ではどの緯度帯でも太平洋よりも高い濃度が観測されたが、モデルでは過小評価され、今後熱帯アジアでのフラックス算定を改良していく必要があることが結論された。一方、中国から放出される人為起源 CO の発生量が 1999 年から 2005 年の期間は増加傾向にあったが、その後停滞し 2008 年以降減少傾向にある可能性が示唆された。こうした知見は今後、アジア地域における排出量推定の高精度化に寄与することが期待できる。

7-2) フロン類の観測

強力な温室効果気体や成層圏オゾン破壊物質として働くフロン類の東アジア域における排出量を把握するため、波照間及び落石岬ステーションにおいてフロン類の大気観測を実施した。国際共同観測ネットワークの枠組み等を活用して、波照間・落石を含む観測データの解析を進めた結果、大気中濃度が最も高い HCFC である HCFC-22 については、解析期間とした 2009 年までグローバルに排出量が増加する傾向にありアジアからの寄与が特に大きいことがわかった。また、工場での HCFC-22 生産時に副生される HFC-23 については、中国からの排出量がグローバルに見ても突出して大きく、2007 年から 2009 年に横ばいだった排出量は 2010 年以降増加傾向にあることなどが示された。

日本国内からのフロン類の排出については、波照間・落石に加え気象庁による岩手県・綾里の CFC-11 データに基づいた逆推定を行い、2010-2012 年における排出量を推定した。その結果、CFC-11、HCFC-22、HCFC-141b、HFC-134a、HFC-32、SF₆ の排出量は震災が発生した 2011 年 3 月以降、大きな増加を示し、2011 年の年間排出量はその前後の年と比べて 38-91% の増加となった（図 20）。この排出量増加は、冷媒や発泡剤として空調や断熱材などに充填されていたフロン類が、被災した建物等の倒壊に伴って大気へ漏出したものであると考えられた。震災後の排出量増加は PRTR などによるボトムアップ排出量の推計値には見られず、災害時など正確な統計データの取得が困難な際には大気観測データの逆計算解析によるトップダウンの排出量推定が特に有効であることが示された。

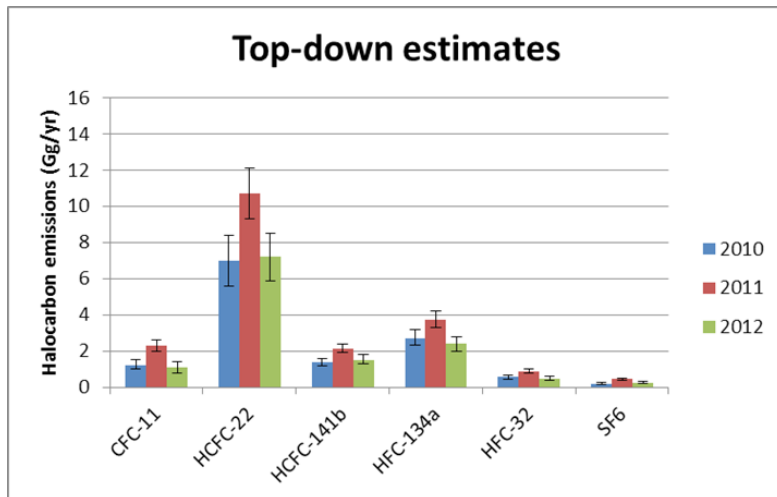


図 20 2010-2012 年の日本国内におけるフロン類 6 成分の年間排出量の推定値

2.1.2 サブテーマ 2：GHG 等フラックス及びその関連指標観測による海洋、陸域の発生 / 吸収量評価と将来予測に関する研究

(1) 目的と経緯

日本を含むアジア - 太平洋域での GHG の現場フラックス測定を通して、本地域の CO₂ をはじめとするフラックス強度やその年々変動を求めることが主眼である。ここでは特にアジアの陸域生態系の吸収フラックスの現場観測からのスケールアップや太平洋を主体とした地域での海洋の吸収量を長期変化とともに観測から求めることを行う。これにより、気象や気候の変化に対する応答や影響を調べ、モデルへとその情報をフィードバックさせることにより、吸収量の将来予測の

ための検討を行う。一方で、実験的に温度変化に対する陸域土壌呼吸応答などをフィールド実験から求めていき、将来の予測モデルへの精緻化に知見を提供する。同時に、サブテーマ1から得られた、吸収量分布などとの整合性を検討して、よりよい将来予測ができるようにモデルの改良なども行い、排出量削減の科学的基礎を与えるための資料とする。

(2) 方法

陸域の二酸化炭素吸収量観測においては、国内の北海道苫小牧での観測や、天塩でのフラックス変化観測、富士北麓での観測に加え、最もフラックス推定が困難である熱帯域、ここでは東南アジアのボルネオ島での研究を展開することとした。国内のサイトでは、フラックス観測が長期間行われているので、そのデータを解析することとし、それらに対応する生態系モデル VISIT による吸収量予測のパラメータなどを調整し、吸収量予測の精度を向上させることとした。また、同様に、ボルネオの二酸化炭素吸収量予測に関しても、現場のデータとモデル計算との比較を行いつつ、モデルの予測向上を行った。また、ボルネオ島や北海道でのバイオマス量の変動を人工衛星から求めるといった技術を開発し、ボルネオの森林の炭素量変動を抑える方法を開発した。

海洋では、地球環境研究センターで行ってきた太平洋表層海水の二酸化炭素濃度の長期観測データを用いて、太平洋全域の二酸化炭素の吸収量変動を求めるための方法を開発し、長期的な海洋二酸化炭素吸収量変動に関してのモデル計算値を与える試みを行った。

海洋・陸域のフラックス観測データを元に広域化された GHG フラックスのボトムアップ手法による時空間分布と、大気観測を元にしたトップダウン手法による結果を比較し、両手法の不確実性について評価を行った。

(3) 結果と考察

1) 陸域生態系による二酸化炭素吸収量変動解析

陸域フラックスを広域的に推定する際に用いる生態系モデルでは、フラックスデータによるモデルのチューニングに加えて、モデルに与える初期の森林の1) 年齢や2) バイオマス量などのデータが重要であった。このプロジェクトの中では、ここでは、北海道とボルネオ島に焦点を当て、陸域生態系モデル VISIT を改良し、複数のフラックス長期観測サイトのデータを用いて検証を行い、攪乱による影響とそこからの回復過程をモデルが良好に再現できることを示した。まず、北海道の樹齢情報を収集し、精度の高い攪乱マップ（いつ木を植え替えたかなど）を作成した。この攪乱マップをモデル計算

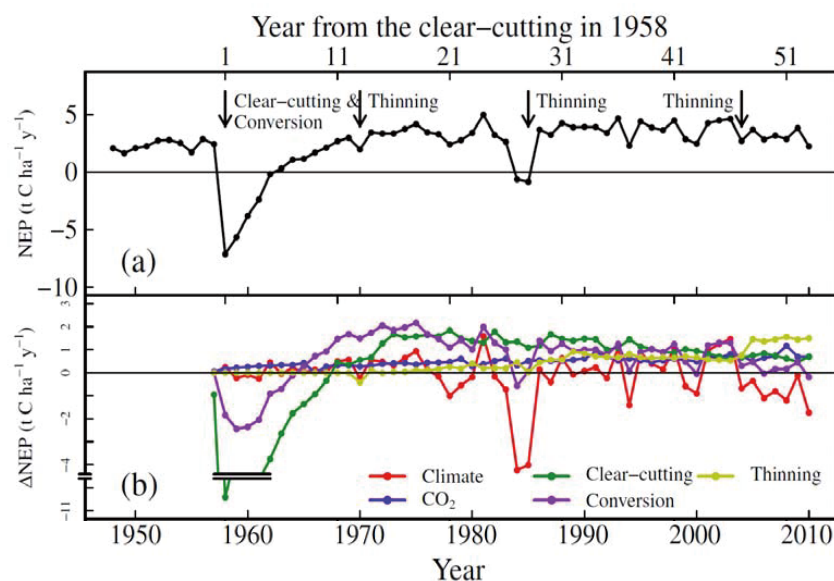


図 21 観測データを用いて、改良された陸域生態系モデルにより再現された、森林の攪乱（皆伐）からの回復過程における森林の NEP（純生産量）の長期推移。

(a) 北海道カラマツ林の CO₂ 吸収・放出量の年次変動。針広混交林だった森林が 1948 年に皆伐され、カラマツが植林された。(b) CO₂ 吸収・放出量の変動の要因毎の寄与。皆伐の影響（Clear-cutting）は 50 年後も残っている一方、年々変動は気候要因の影響が強い。

に組み込むことにより、これまでよりも高精度の広域炭素収支を評価することができるようになった。

これらを用いて、炭素収支の過去数十年間の変動をもたらした要因を、気象変動などの自然条件と、伐採・植林・残置有機物の処理などの人為的な条件に定量的に分けて評価した。その結果、数年以内の短期変動には気象要素が強く影響する一方、数十年の長期変動には伐採時の残置有機物の量が重要であることを明らかにした（図 21）。また、世界の陸域生態系の GHG フラックスを推定するモデルにおいて、モデル相互比較プロジェクト（MsTMIP）に参加し、大気-陸域間の CO₂ 交換に関する季節振幅の推定に関する複数モデル間比較を行った。その結果、近年の振幅拡大が主に光合成によるものであり大気 CO₂ の施肥効果と相乗的に作用していることが示唆された。

2) 東アジア草原炭素収支について。

東アジア草原に及ぼす温暖化影響を把握するため、気温と降水環境が大きく異なる青海草原、チベット草原、モンゴル草原及び内モンゴル草原について、1982 年から 2009 年まで衛星データから、草原の一次生産の変化とその影響要因を調べた。その結果、モンゴルと内モンゴル草原は、年々変動が大きく、期間中に地域の一次生産量はほぼ変わらなかった。一方、標高の高い青海、チベット草原は、地域の一次生産は統計的に有意に増加することが示された。さらに解析した結果、モンゴル、内モンゴル草原では、一次生産量は年降水量の年変動に有意な正の相関、すなわち、年降水量の高い年には、一次生産が有意に高いことがわかった。一方、青海とチベット草原では、草原全体の一次生産は、年降水量から影響が少なく、年平均気温の影響が大きいことも示唆された。さらに、炭素収支の年変動のメカニズムを把握するため、青海チベット高原やモンゴル草原における衛星データのフェノロジー解析も行った。青海・チベット草原は、気温の上昇に伴い、春の展葉日が早くなったが、秋の枯れる時期はあまり変わりがなかった。その結果、生育期間が長くなったことは、青海・チベット高原の一次生産が増加したことの一要因と考えられる。

また、青海草原とチベット草原の炭素収支を把握するため、青海の海北草原とチベットの当雄草原において、それぞれ 2001 年と 2006 年から、渦相関法による CO₂ フラックスの観測を行った。これまでの結果では、年変動の大きいものではあるが、いずれの草原も CO₂ の正味吸収となっている。青海草原では、多くの年では、年間 100 gCm⁻² 前後の炭素吸収速度で、チベットの湿地草原は、それよりやや高い吸収量を示す年が多い。

3) ボルネオ島でのバイオマス量推定法の開発

深刻な森林減少が続いている東南アジア熱帯域のボルネオ島を対象とし、地球温暖化防止の観点から注目されている森林の炭素貯留量や伐採にともなう炭素排出量把握のため、人工衛星のデータを用いた樹高とバイオマスの推定方法を開発した。用いたデータは、NASA の ICESat 衛星の観測値である。この衛星は、軌道直下において 170 m ごとに約 60 m 径の範囲をレーザ光で照射して、地表面から反射されたレーザ光の強度変化を波形として記録する。観測された波形の特徴量を複数組み合わせることで、樹高については自乗平均平方根誤差 4.0 m、森林バイオマスについては 1 ha あたり 38.7 トンの計測精度で推定することができた。従来用いられてきた合成開口レーダ等を利用する方法では、1 ha あたり約 150 トンを越える高バイオマスの熱帯林では正確なバイオマスの計測が難しかったところ、本技術により計測精度を大幅に改善できた。また計測地点数は、ボルネオ島で約 128,000 カ所にのぼり、今後の研究開発に重要な検証データを獲得することができた。さらに、ボルネオ島の森林バイオマスの総量が 1.034×10^{10} トンであること、2004～2007 年におけるボルネオ島の森林消失率が年間 2.4% であることを明らかにした⁹⁾。また、図 22 のとおり、ボルネオ島の森林バイオマスの空間分布（州ごとのバイオマスとその頻度）を把握することに成功した。開発された手法は、森林伐採や土地利用変化に伴う温室効果ガス排出量の推定に多大な貢献をすることが期待される。

4) 森林土壌呼吸の温暖化影響

アジアを中心としたグローバルな陸域 CO₂/CH₄ 循環の推定及び将来予測の高度化を図ることを目的として、地球環境研究センターが開発・推進している世界最大規模のチャンバー観測ネットワークをさらに拡張し、日本・台湾・中国（雲南）及びマレーシアまでのモンスーンアジアの広域トランセクトで展開した。温暖化実験では、特に宮崎と雲南（哀牢山）の

亜熱帯常緑樹林における長期観測結果がまとまりつつある。宮崎では、6年間の観測の結果、1℃当たりの温暖化が平均9.4%微生物呼吸を上昇させ、その値は本サイトの微生物呼吸から年別に導かれた温度反応モデルの数値10.1%に近いものであった。また、温暖化効果の年々変動に関しては、夏季の水分条件が強く影響していることが明らかになった（図23）。雲南では、4年間の観測の結果、1℃当たりの温暖化が平均10.9%微生物呼吸を上昇させることが明らかとなっており、この結果は既にScientific Reportsに掲載されている。これらの結果では、いずれも長期的な温暖化条件下で、微生物呼吸に対する促進的な温暖化効果は低減しないという見解が得られている。また、宮崎と哀牢山の様な湿潤な森林生態系と比較

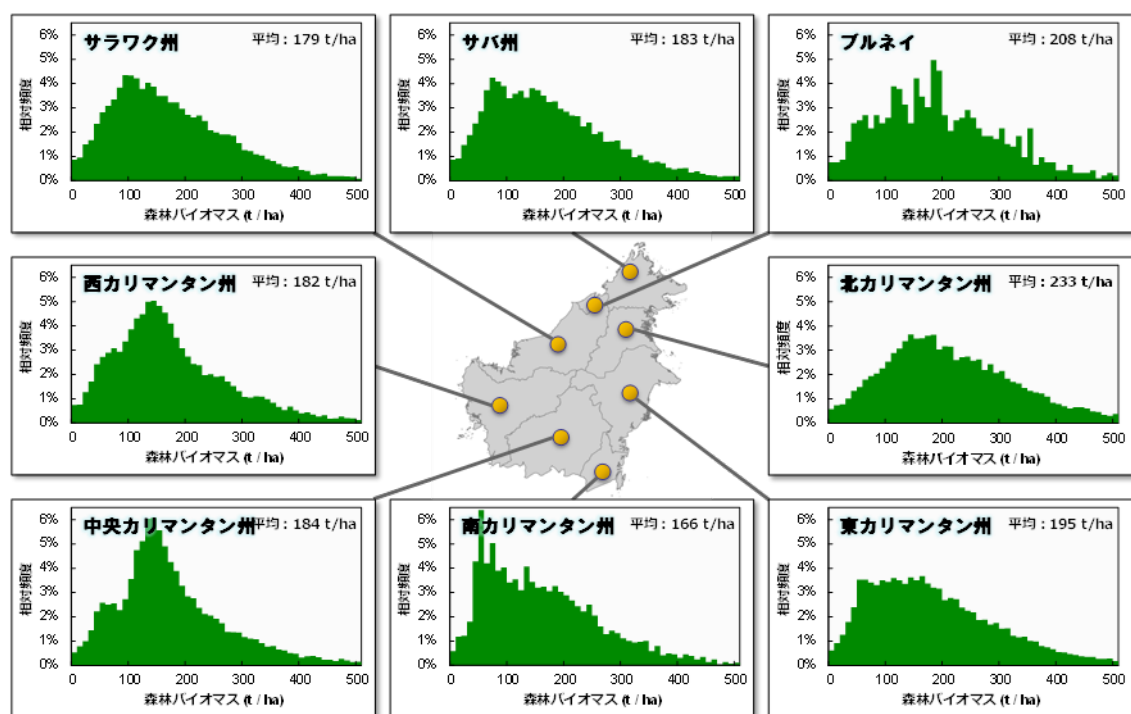


図 22 ボルネオ島において州別に求めた森林バイオマスのヒストグラム（度数分布図）。

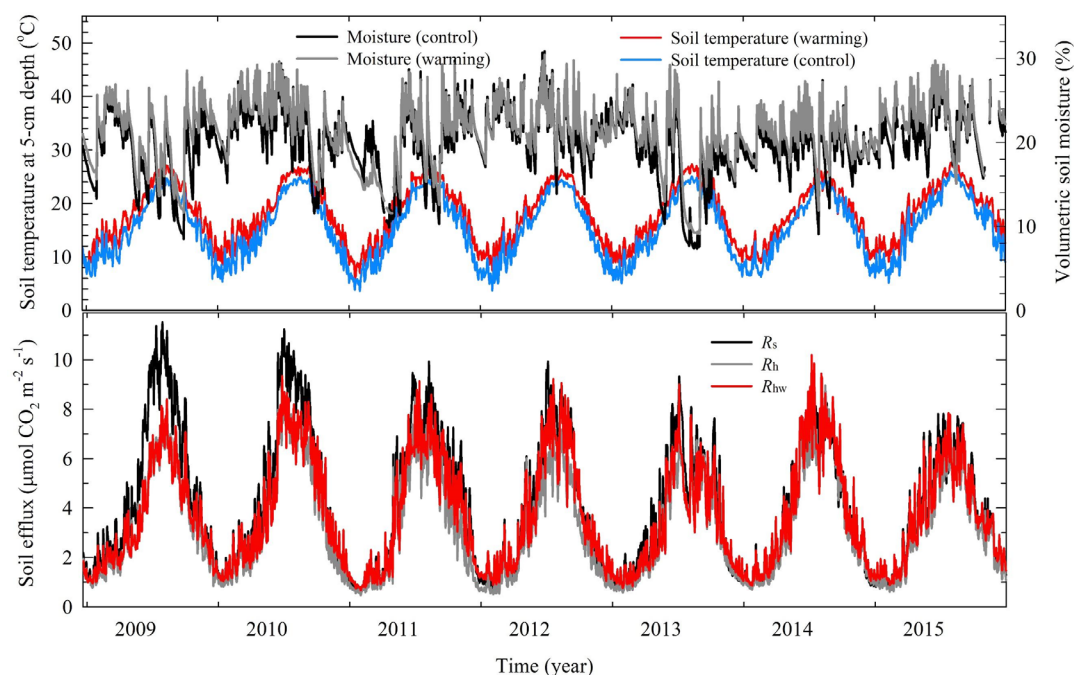


図 23 宮崎温暖化操作実験サイトにおける、2009-2015 年のチャンバー観測結果。R_s: 総土壌呼吸；R_h chambers: 微生物呼吸；R_{hw} chambers: 加熱を受けた微生物呼吸。

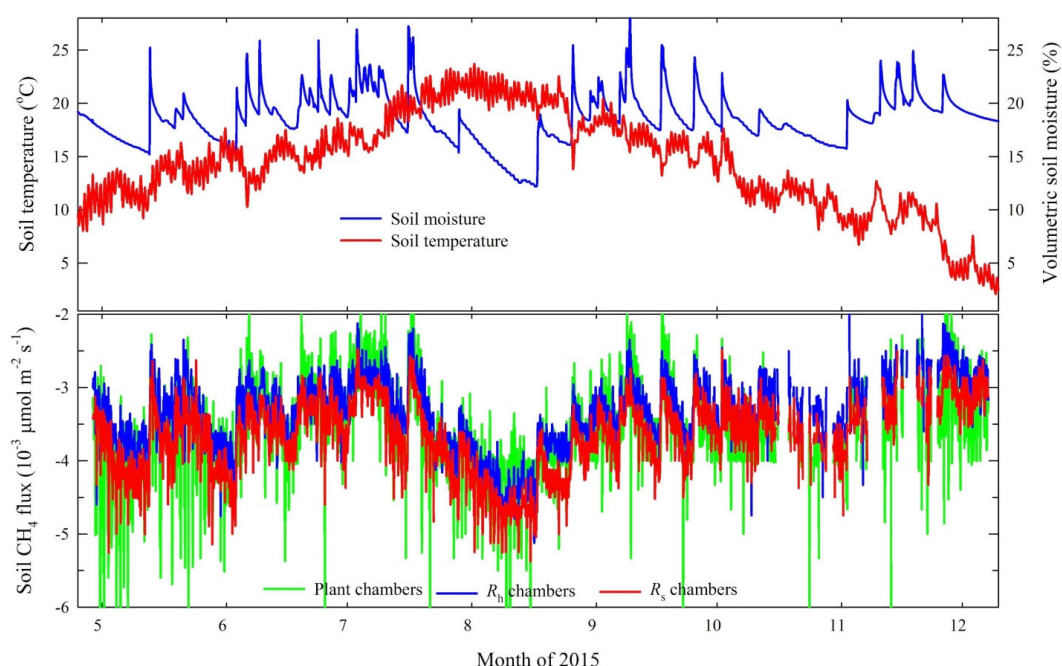


図 24 富士北麓カラマツ林における、土壌 CH₄ フラックスの観測結果。R_s chambers: 対照区のチャンバー；R_h chambers: 根切り区のチャンバー；Plant chambers: 林床植生を被せたチャンバー。

すると、亜熱帯高山森林生態系（雲南麗江）における土壌呼吸の温度感受性が明らかに高いこと（ $Q_{10}=5\sim6$ ）が確認された。一方、東南アジアの熱帯雨林では、土壌呼吸、特に根呼吸と土壌含水率との間には正の相関が認められ、低地天然林でも一次総生産（光合成）は土壌水分によって制限を受けていることが示唆された。またパソ熱帯林における CH₄ の観測に関しては、シロアリの活動を抑制した根切り区に比べて、対照区での CH₄ 吸収速度は約 36% 低かった。この原因は、シロアリの CH₄ 放出と考えられる。熱帯林におけるシロアリの CH₄ 放出の定量評価は今後の課題となる。

富士北麓の約 50 年生のカラマツ人工林では、24 チャンネル自動開閉チャンバーシステムを用いて、土壌呼吸および林床部炭素収支について連続観測を行っている。2006 年から 2015 年までの年積算平均値は、総土壌呼吸で $7.9 \text{ tC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 、微生物呼吸で $6.5 \text{ tC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 、林床植物を含めた林床部炭素収支で $7.0 \text{ tC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ であり、各区のフラックスに対しては、地温や日射量（植生区）の影響が大きかった。一方、2015 年 3 月末に行われた約 30% の間伐の影響で林床部の光強度が約 65% 増加したのに対し、林床部植生の総一次生産（GPP）は約 69% 増えたことが観測された。この間伐が、林床部の炭素収支にどの程度影響していくのか、今後注目していく必要がある。

また、2015 年からの土壌 CH₄ フラックスの新規観測結果を図 24 に示す。富士北麓カラマツ林における土壌の CH₄ 吸収源は約 $18.0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ であり、CH₄ の温暖化ポテンシャルを考慮した場合、この CH₄ 吸収源は土壌呼吸による CO₂ 排出の約 6% を相殺することが可能であると示唆された。他サイトの観測においても、これまで多量の観測データが得られており、これらのデータは順次解析中である。

5) 太平洋での二酸化炭素吸収の地域性と長期変化

観測に基づく海面 CO₂ 分圧と大気海洋間 CO₂ フラックスの分布推定について、北太平洋からより広域へとスケールアップする研究を行った。まず、人工知能タイプの解析手法を用いて観測された CO₂ 分圧と、緯度経度情報、および客観解析データセットや人工衛星データから得られる海面水温、塩分、混合層深度、クロロフィル濃度を関連づけた。これによって太平洋の観測を行っていない時期・海域について海洋の各種物理パラメータを用いて CO₂ 分圧を表現することが可能になった。再現の結果、エルニーニョ南方振動によって特に赤道域の CO₂ 分圧分布が大きく変動することを示した。例えば、20 世

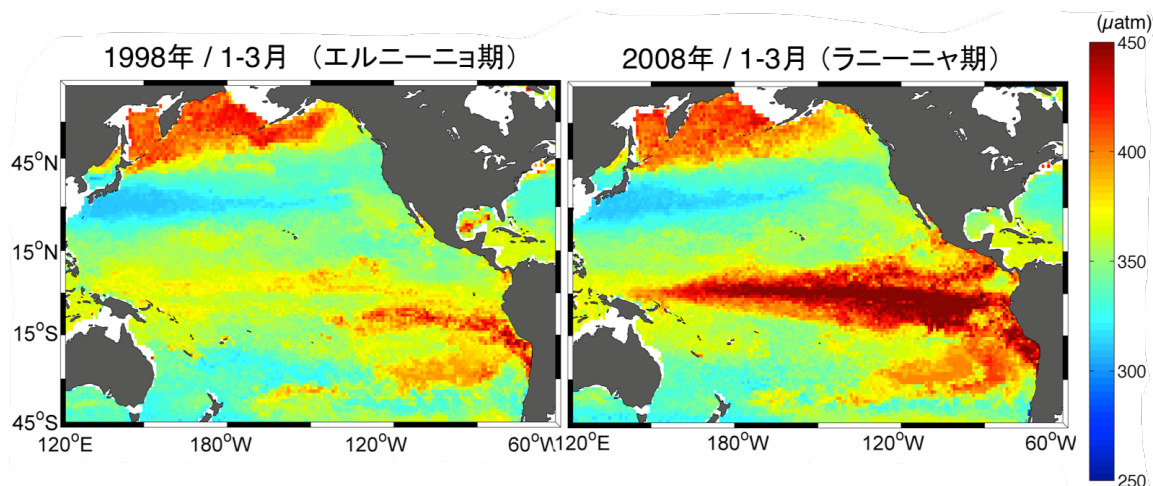


図 25 (左) エルニーニョ期 (1998 年 1-3 月) と (右) ラニーニャ期 (2008 年 1-3 月) の $p\text{CO}_2$ 分布

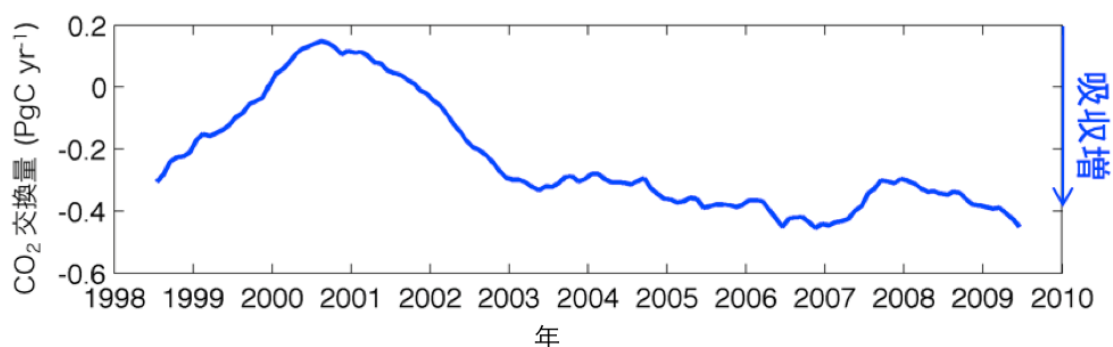


図 26 季節変化成分を除去した太平洋の大気海洋間 CO_2 交換量の年々変動。正の値は海洋から大気への CO_2 放出、負の値は海洋への CO_2 吸収を表している。

紀最大のエルニーニョ期であった 1998 年 1-3 月にはペルー沖の湧昇が抑制されて CO_2 の豊富な水塊が表層に供給されなくなるため、赤道域東部海域の CO_2 分圧は平年より低下する (図 25 左)。一方、ラニーニャ期である 2008 年 1-3 月には湧昇が促進されて貿易風によって高 CO_2 水塊が西方へと輸送されるので広範囲にわたって高い CO_2 分圧が見られる (図 25 右)。

次に、得られた CO_2 分布から大気海洋間 CO_2 フラックス分布を算出し、太平洋の交換量変動について調べた (図 26)。海洋 CO_2 交換量は期間平均で年間約 -0.3 PgC yr^{-1} であり、その年々変動の振幅は 0.3 PgC yr^{-1} と評価された。エルニーニョ期には、上記のプロセスから海洋からの CO_2 放出量が低下するため、結果として海洋による CO_2 吸収は増加した。一方、ラニーニャ期には、それとは逆のプロセスが促進されて CO_2 放出量が増加した。このように、エルニーニョ南方振動は太平洋域の炭素循環に与える影響が大きいことを本研究によって示した。

このように、人工知能タイプの CO_2 分布再現手法が開発されたことにより、海洋 CO_2 分圧と CO_2 フラックス分布の年々変動が近年評価できるようになった。今後は、気候変動による海洋炭素循環の応答についても詳細な解析が今後進むものと期待できる。

6) 二酸化炭素収支推定の詳細化に向けたモデル開発

6-1) 生態系モデル VISIT の高度化

陸域生態系の炭素収支を高精度でシミュレートし、特に GOSAT など大気観測を用いたインバージョンにそのデータを利用する場合、時間分解能を高めた陸域炭素循環モデルを開発し利用する必要がある。陸域生態系の CO_2 交換は、光合成による吸収が日射・温度・ CO_2 濃度・湿度・土壌水分によって日内で大幅に変動し、また植生と土壌の呼吸放出も温度や土壌水分に応じた変動を示す。これらの日内変動を取り入れた高時間分解能モデルを開発した。まず、既存モデルでは 1 日単位で計算していた植生キャノピー光合成スキームを更新し、1 時間単位での計算を行う de Pury & Farquhar スキームを

導入した。そこでは、大気からの直達光と散乱光の寄与を分離評価することができ、個葉ガス交換をより生化学的に計算できるため推定精度の向上が見込まれる。呼吸放出については、植生と土壌それぞれ計算方法は従前と同様だが、より時間分解能が高い温度データを用いることで精度向上が期待される。全球シミュレーションにおいては、公開されている最も時空間分解能が高い気象データである NCEP-CFSR 再解析データを用いた（空間分解能 T382、時間分解能 1 時間）。

光合成速度の推定精度を向上させるための独自の試みとして、植生キャノピー内の窒素分配に関するメタ分析ベースの更新を試みた。東北大学との共同研究により、植生内の光分布と窒素分配に関する観測データを収集し、温度・入射光の角度・植物タイプ・葉面積指数などとの要因と統計的な解析を行った⁷⁾。そして、一般化線型モデルについて AIC による選択を行い、そのキャノピー窒素分配モデルを陸域生態系モデルに導入した。これまでの共同研究で樹木の葉面積指数の最大値に関するメタ分析を実施していたが⁸⁾、構造的パラメータだけでなく新たに機能的パラメータを高度化することで、植物の生理生態学的な知見に基づくモデルの推定精度向上が図られた。

予備計算は 1979 年 1 月 1 日から 2010 年 12 月 31 日まで実施したが、その際には半解析的手法による初期化計算の時間短縮が行われた。図 27 に高度化されたキャノピー光合成スキームで計算された 2007–2010 年の総一次生産の結果を示す。平均的な年間総一次生産の全球合計値は 116 Pg C yr^{-1} となり、衛星観測および現地観測と比較して妥当な空間分布や季節変化を示していることが分かる。このようなモデル計算は、陸域炭素収支に関する地域・全球スケールでの評価に適用可能であり、大気輸送モデルのデータ同化やインバージョンによる地表 CO_2 フラックス推定の精度向上にも寄与することが期待される。一方、今後の課題としては、土壌水分が光合成速度に与える影響や攪乱影響（火災、土地利用など）の導入、土壌も含めた窒素循環とのフル結合が考えられる。

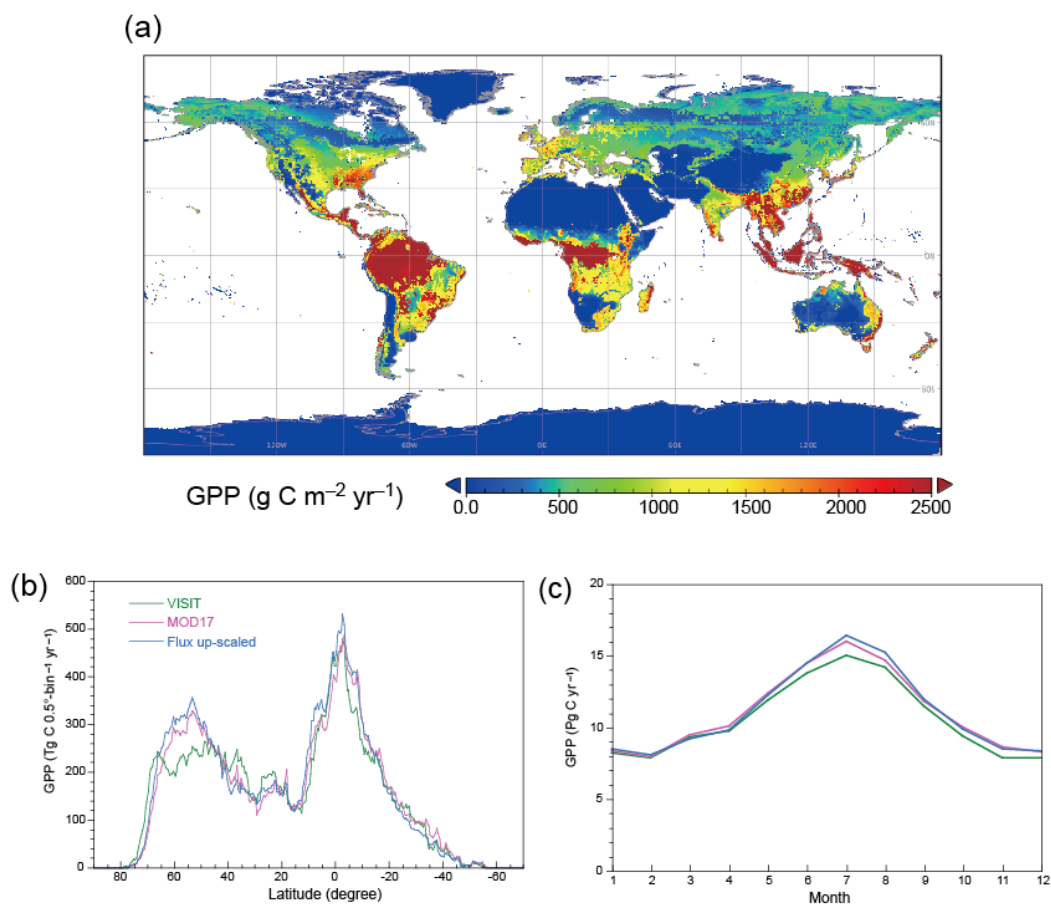


図 27 高度化された陸域生態系モデル VISIT により推定された総一次生産（光合成による CO_2 固定速度）。(a) 2007–2010 年における平均的な年間総一次生産分布。(b) 年間総一次生産の緯度分布。(c) 月別総一次生産の季節変化。緯度分布と季節変化は衛星観測（MOD17）および空間拡張されたフラックス観測（Flux up-scaled）との比較を示す。

6-2) 陸水からの二酸化炭素の放出について

全球の炭素循環モデルをさらに精緻化するために、ここでは既存の全球炭素循環研究ではほとんど考慮されてこなかった陸水（河川・湖沼・地下水など）を通した炭素循環を定量的に評価することを目的とし、統合型水文生態系モデル NICE と既存の複数の物質循環モデル（LPJ-WhyMe, SWAT, QUAL2Kw, RokGeM, CO₂SYS）を有機的に結合することで陸域－水域間での（有機態・無機態・溶存態・懸濁態）炭素動態及び栄養塩（窒素・リンなど）との相互作用を内包する改良型 NICE を新たに構築した（NICE-BGC）⁹⁾（図 28）。本モデルは表面流－地下水間での相互作用を含む水循環と炭素循環を含む物質循環を同時に計算できるという特徴を有しており、これまでの既存モデルに比べて詳細かつダイナミックなプロセススペースのモデルであり、より良いパラメータを推定することによってより現実に近い陸水を通した炭素循環を再現できると考えられる。結合した個々のモデルのパラメータや地表のデータは既存の様々な文献値やデータセットを参照することでモデルを最適化し、シベリア湿原やメコン川流域などの炭素循環におけるホットスポットで精度検証を行った後で、全球へと計算を展開した。NICE-BGC を用いた全球シミュレーション結果は、陸水界面を通した温室効果ガス交換、河床土砂への堆積、海域への流出など、表面流－地下水間での相互作用を含む水循環に大きく依存する炭素循環について既存研究及び簡易型モデルと定性的に一致するとともに、各流域及び各大陸ごとの地域的偏在性について新たな評価を行った（図 29）。同図より、アジア（メコン川・ガンジス川・長江流域など）・アフリカ（コンゴ川流域など）・南アメリカ（アマゾン川・オリノコ川流域など）などで比較的大きな炭素フラックスが発生していることがわかる。また、各項目ごとに別々に観測・評価されてきた既存データを網羅的に調べるとともに、プロセススペースのモデルを用いてデータ欠損域も含めて計算をすることによって、既存の全球炭素循環研究ではほとんど考慮されてこなかった陸水を通した炭素循環の全貌を明らかにした意義は大きい。また、農地への施肥や都市からの汚濁排出に伴う陸水中での炭素循環の変化やダムからの温室効果ガス放出など、人為活動に大きく依存する炭素循環の構造が明らかになるとともに、人為活動に伴う全球炭素循環の改変を明らかにするために今後更に詳細に検討する必要がある。さらに、今後、既存の観測ネットワークデータを用いての各項目に関する更なる高精度化、海域炭素循環モデルとの結合、大気インパースモデルとの結合、などを通して、陸水

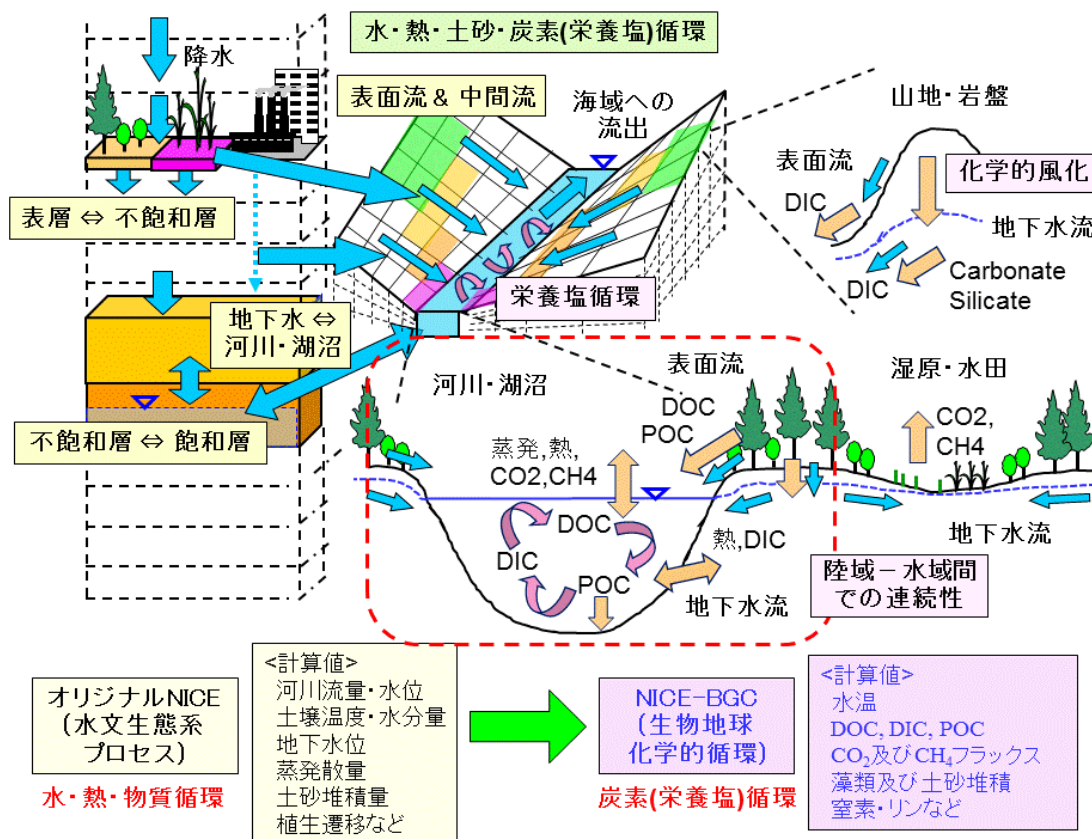


図 28 新たな統合型水文生態系－物質循環結合モデル NICE-BGC の開発

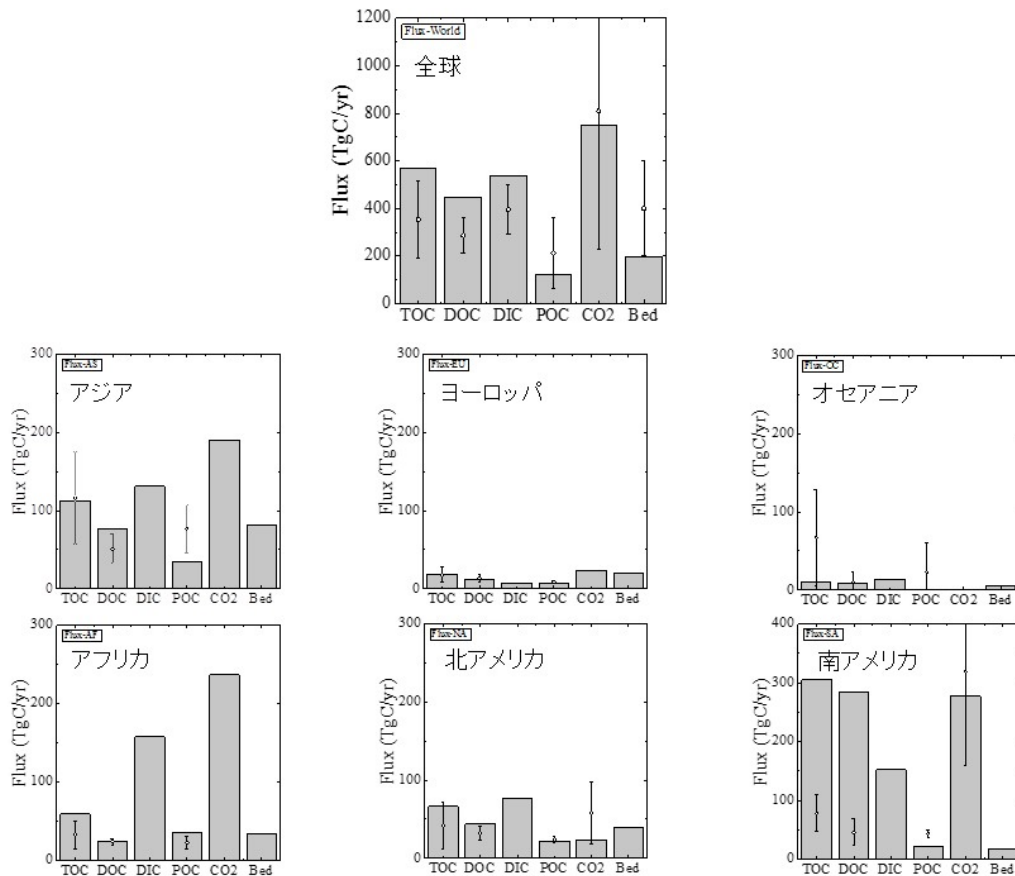


図 29 NICE-BGC によって計算された全球及び各大陸における陸水の炭素収支 (2000 年)。“TOC”, “DOC”, “DIC”, “POC” は海域への流出フラックス, “CO₂” は大気への放出フラックス, “Bed” は底泥への堆積フラックス、を示す。白丸及びエラーバーは様々な既存データの平均値及びデータ範囲を示す。

の影響を含む全球炭素循環の精緻化に大きく寄与する。これにより、特に、海洋を含めた水循環を通しての二酸化炭素の吸収量推定におけるモデルと観測との不整合や不確実性の再評価が期待できる。

6-3) インバースモデルによる二酸化炭素やメタン収支推定

グローバルなインバースモデル解析としては、温室効果ガス観測技術衛星 GOSAT から得られた XCO₂ と複数年の地上データを用いた炭素収支推定を行った。その結果、地上観測の空白域である北方ユーラシア、赤道アフリカ、南アメリカ等で、推定フラックスの不確実性が大幅に減少し、さらに推定フラックスも過去 10 年の炭素収支と異なる結果が得られることがわかった^{10, 11)}。また、南米およびアフリカ領域における逆解析手法により推定された CO₂ フラックス変動の特徴と妥当性を、降水量、短波放射量、地上気温、および Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) の変動との相互関係により解析検証した¹²⁾。国際的なインバースモデル比較実験にも積極的に参加しており、GOSAT データを用いると地上データのみで推定した結果と比べて CO₂ 吸収域が熱帯から北半球中緯度に移ることや¹³⁾、東アジアでは 2000 年代半ば以降 CO₂ の吸収量が増加しており、東南アジアでは大規模エルニーニョの年に CO₂ の大きな放出があること等の興味深い結果が得られた¹⁴⁾。

地域的には、将来的な人為起源 CO₂ 排出量の衛星観測を用いた監視へ向けて、火力発電所や大都市域等の大規模排出源における人為起源 CO₂ 排出に起因した大気 CO₂ 濃度上昇を GOSAT データから検出することが出来るか検討を行った。本研究では、排出インベントリと大気輸送モデルを用いて GOSAT データを人為起源 CO₂ 排出の影響の有無に準拠して分類し、人為起源 CO₂ 排出の影響を受けているデータから、その周辺の人為起源 CO₂ 排出の影響を受けていないデータの差を算出し、更に森林火災および陸域植生の影響を取り除くことで、GOSAT データから人為起源の大気 CO₂ 濃度上昇を推定

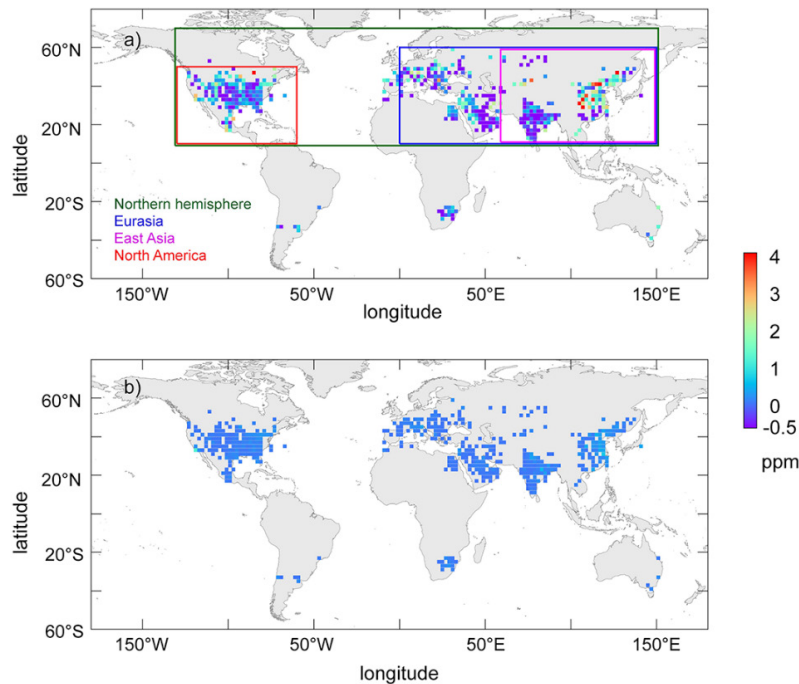


図 30 石燃料由来で増大した CO₂ 濃度 (ppm)。a) GOSAT 観測値。b) モデル計算値

した。その結果、世界の大都市においてその周辺よりも大気 CO₂ 濃度が高い傾向が見られた (図 30)。また、この濃度差と排出インベントリから算出した濃度差には正の相関が見られた。このことは、GOSAT が大規模排出源における人為起源大気 CO₂ 濃度上昇を捉えている可能性を示唆すると同時に、衛星観測による人為起源 CO₂ 排出量監視の可能性を示した。

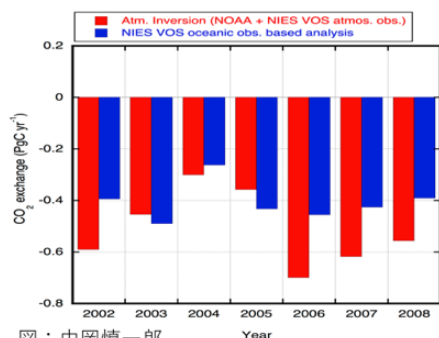
また、GOSAT によるカラム平均メタン濃度データと地上観測データを用いることで全球の月別・地域別の正味メタン収支推定を実施した。その結果、東南アジア域や南米及びアフリカの南亜熱帯地域のメタン放出が明らかになるとともに、より精度の高いメタン収支の推定が可能となった。これらの結果を応用することで、例えば 2010 年にアマゾン南域で発生した大旱魃によって、大規模な森林火災が発生し、その結果メタン放出量が例年に比べ増大したことなど、新たな現象が明らかになってきた。

7) ボトムアップ、トップダウン比較

全球およびアジア太平洋における CO₂ 収支の推定精度を向上するため、いわゆるトップダウン手法とボトムアップ手法により CO₂ 収支を広域推定し、地域ごとに両者を比較検証することにより、CO₂ 収支の評価における不確実性を明らかにすることを試みた。ここで、トップダウン手法とは大気中 CO₂ 濃度の多地点での観測データと大気輸送モデルを用い、インバージョン解析に基づいて地球表面での CO₂ 収支を推定する方法である。ボトムアップ手法とは、海上や陸上での多地点での CO₂ 収支の観測データに基づき、プロセスモデルや機械学習法によって CO₂ 収支を広域評価する方法である。

海洋においては、国際的な全球海洋表層 CO₂ 分圧観測データベース (SOCAT: Surface Ocean Carbon Atlas) に基づき、海面水温、クロロフィル濃度等のデータセットを利用して CO₂ 分圧と大気-海洋間 CO₂ 交換量の広域分布推定を行った。特に北太平洋においてトップダウン手法 (GOSAT によるインバージョン解析) とボトムアップ手法 (観測からの機械学習型法) の結果を比較したところ、両手法による CO₂ 収支の年々変動は北太平洋全体で整合的であることがわかった (図 31)。

陸域においては、AsiaFlux に代表される渦相関法による CO₂ 収支の観測ネットワークのデータと機械学習法に基づき、日射量、地表面温度、植生指数などの広域衛星観測データから観測空白域を補間することで、全球とユーラシアの陸面における CO₂ 収支を推定した。トップダウン法 (GOSAT データを用いたインバージョン解析) と CO₂ 収支の季節変化を地域別に比較したところ、ユーラシア大陸の中・高緯度で季節変化の振幅と位相は高い整合性を示したが、熱帯域では両者の間に系統的な差があることがわかった (図 32)。



図：中岡慎一郎

図 31 北太平洋におけるトップダウン法（赤）とボトムアップ法（青）による吸収量変動の比較

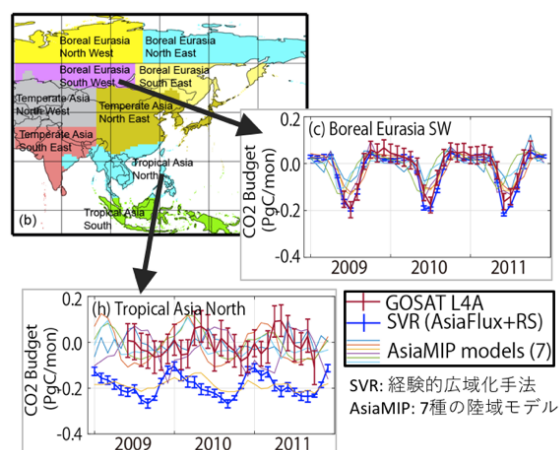


図 32 陸域における CO₂ 収支の広域評価、トップダウン・ボトムアップ手法の比較

海洋・陸域の双方においてアジア太平洋の CO₂ 収支をトップダウン・ボトムアップ手法により評価し、両手法の整合性について詳しく検討する段階に至ったのは当研究期間の大きな進展であった。今後はさらに両手法の差異の原因を明らかにし、手法の改良と精度向上をはかる予定である。

引用文献

- 1) 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*, 62B, 403-416
- 2) Sasakawa M., Ito A., Machida T., Tsuda N., Niwa Y., Davydov D., Fofonov A., Arshinov M. (2012) Annual variation of CH₄ emissions from the middle taiga in West Siberian Lowland (2005-2009): a case of high CH₄ flux and precipitation rate in the summer of 2007. *Tellus*, 64B, doi:10.3402/tellusb.v64i0.17514
- 3) Aramaki, T., Y. Nojiri, H. Mukai, S. Kushibashi, M. Uchida and Y. Shibata (2010) Preliminary results of radiocarbon monitoring in the surface waters of the North Pacific, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, B268, 1222-1225.
- 4) Östlund, H.G. and Stuiver, M (1980) GEOSECS Pacific radiocarbon, *RADIOCARBON*, 22, 25-53.
- 5) Levin, I., S. Hammer, B. Kromer and F. Meinhardt (2008) Radiocarbon observations in atmospheric CO₂: Determining fossil fuel CO₂ over Europe using Jungfraujoch observations as background, *Science of the Total Environment*, 391, 211-216.
- 6) Hayashi M., Saigusa N., Yamagata Y., Hirano T. (2015) Regional forest biomass resources estimation using ICESAT/GLAS spaceborne LiDAR over Borneo. *Carbon Management*, 6 (1-2), 19-33. DOI: 10.1080/17583004.2015.1066638
- 7) Hikosaka, K., Anten, N.P.R., Borjigidai, A., Kamiyama, C., Sakai, H., Hasegawa, T., Oikawa, S., Iio, A., Watanabe, M., Koike, T., Nishina, K., Ito, A., 2016. A meta-analysis of leaf nitrogen distribution within plant canopies. *Annals of Botany* 118, 239-247. doi: 10.1093/aob/mcw099
- 8) Iio A., Hikosaka K., Anten N.P.R., Nakagawa Y., Ito A. (2014) Global dependence of field-observed leaf area index on climate in woody species: Systematic review. *Global Ecology and Biogeography*, 23 (3), 274-285
- 9) Nakayama T. (2016) New perspective for eco-hydrology model to constrain missing role of inland waters on boundless biogeochemical cycle in terrestrial-aquatic continuum, *Ecohydrol. Hydrobiol.*, doi: 10.1016/j.ecohyd.2016.07.002.
- 10) Maksyutov, S., Takagi, H., Valsala, V. K., Saito, M., Oda, T., Saeki, T., Belikov, D. A., Saito, R., Ito, A., Yoshida, Y., Morino, I., Uchino, O., Andres, R. J., and Yokota, T. (2013) Regional CO₂ flux estimates for 2009–2010 based on GOSAT and ground-based CO₂ observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 9351-9373, doi:10.5194/acp-13-9351-2013.
- 11) Saeki T., Maksyutov S., Saito M., Valsala V., Oda T., Andres R. J., Belikov D., Tans P., Dlugokencky E., Yoshida Y., Morino

- I., Uchino O., Yokota T. (2013) Inverse modeling of CO₂ fluxes using GOSAT data and multi-year ground-based observations, SOLA, 9, 45-50, doi:10.2151/sola2013-011.12)
- 12) Mabuchi, K., Takagi H., and Maksyutov S. (2016) Relationships between CO₂ flux estimated by inverse analysis and land surface elements in South America and Africa, J. Meteor. Soc. Japan, 94, doi: 10.2151/jmsj.2016-021.13
 - 13) Houweling S., Baker D., Basu S., Boesch H., Butz A., Chevallier F., Deng F., Dlugokencky E. J., Feng L., Ganshin A., Hasekamp O., Jones D., Maksyutov S., Marshall J., Oda T., O'Dell C. W., Oshchepkov S., Palmer P.I., Peylin P., Poussi Z., Reum F., Takagi H., Yoshida Y. and Zhuravlev R (2015) An intercomparison of inverse models for estimating sources and sinks of CO₂ using GO-SAT measurements, J. Geophys. Res. Atmos., 120, 5253–5266.
 - 14) Thompson R. L., Patra P. K., Chevallier F., Maksyutov S., Law R. M., Ziehn T., van der Laan-Luijkx I. T., Peters W., Ganshin A., Zhuravlev R., Maki T., Nakamura T., Shirai T., Ishizawa M., Saeki T., Machida T., Poulter B., Canadell J. G., Ciais P. (2016) Top-down assessment of the Asian carbon budget since the mid 1990s, Nature Communications, 7, 10724, doi:10.1038/ncomms10724.

2.2 研究プロジェクト2：地球温暖化に関わる地球規模リスクに関する研究

本プロジェクトでは、地球規模の温暖化対策目標及び目標に至る道筋・方法についての議論を、リスクの管理に関する社会的な意思決定の問題として捉え、この意思決定を支援するため、地球規模の温暖化リスクに加え、水安全保障、生態系保全など関連する温暖化以外の地球規模リスク、及びリスク管理オプションについての検討を行い、リスクに対する社会の認知等も考慮した上で、リスク管理戦略の分析を行った。なお、H24年度から開始された環境省環境研究総合推進費S-10「地球規模の気候変動リスク管理戦略の構築に関する総合的研究」の研究体制の下に、リスク管理概念検討等についてS-10参画他機関と協力して進めた。

2.2.1 サブテーマ1：地球規模リスクに関わる将来予測の理解と翻訳

(1) 研究の目的と経緯

H23年度時点でIPCC第5次評価報告書（AR5）への貢献に向けた新実験結果（CMIP5）の解析を取りまとめる時期に入っていたため、アンサンブル実験（多数のモデルシミュレーションの集合）を用いた予測の不確実性評価を中心に解析を行い、AR5への重要な貢献になると思われるいくつかの成果を発表した。H24年度は、予測の不確実性評価のための新たなアンサンブル実験の準備を進めるとともに、CMIP5の影響評価研究への応用に向けた研究を行った。H25年度は、気候モデルMIROCを用いたアンサンブル実験およびCMIP5の複数モデルの解析を通じて、予測の不確実性に関する研究を行った。H26年度は、気候変動のメカニズムの理解を深めるためにアンサンブル実験の解析を進めるとともに、IPCC第6次評価報告書への貢献に向けて気候モデルの精緻化に関する研究を行った。H27年度は、アンサンブル実験の実施と解析を通して、将来予測の不確実性を評価すると共に、過去に起きた気候変化のメカニズムについて理解を深める研究を行った。

(2) 気候の将来予測ならびに予測に関する不確実性の理解

地球規模の温暖化リスクを適切に評価するためには、気候の将来予測シナリオの特徴を把握すると共に、温暖化の社会的影響評価を行う際になされる仮定がどれほど妥当なものか、検討することが重要である。

サブテーマ1ではIPCC AR5に向けて作成されたCMIP5気候シナリオの特徴を把握するため、年平均気温、年平均降水量、年平均日射の将来変化の分析を行った。その結果、2090年付近において日本域付近の気温は1990年付近に比べRCP8.5で4.9℃と最も大きく上昇、降水量はRCP4.5で9.2%増加、日射はRCP8.5で8.7 W/m²増加となることがわかった。CMIP3とCMIP5の特徴を比較した結果、気温変化に関しては、放射強制力が近いRCPシナリオとSRESシナリオの間では類似な気温上昇を示した。降水量に関しては、類似な排出シナリオの間でも違いがみられたがいずれの場合でも増加が予測されている。日射の場合、CMIP5気候シナリオでは増加するがCMIP3シナリオでは減少すると予測され、日射に感度が高い影響評価では注意が必要であることが分かった。

統合評価モデルでは、「大気中CO₂濃度が(a)1倍から2倍に増える時と(b)2倍から4倍に増える時で気温の上昇幅は同じ」と言うことがしばしば仮定される。この仮定の妥当性を検討するため、複数の気候モデルでシミュレーションを実施し、(a)と(b)で気温の変化幅を比較した。その結果、気温上昇は(a)より(b)の方が大きい傾向が陸上に見られ、モデル間のばらつきも(a)より(b)の方が大きいことが分かった。このことから、強力な緩和シナリオでも避け得ない気候変化と人類の対策次第では避け得る気候変化では性質が異なることが示唆された。

気候予測と社会経済排出シナリオの結果を結合する際に重要となるパターンスケールリングでは、排出シナリオ間でスケールリングパターンが共通であると仮定されている。この仮定の妥当性を検証するために、IPCC AR5で採用される代表的濃度シナリオ（RCP）における地上気温のスケールリングパターンについて調べた。その結果、中緯度では全球気温上昇量1度あたりの硫酸エアロゾルの排出量の違いが、高緯度では全球気温上昇量1度あたりの海水の減少率と北大西洋の熱塩海洋循環の変化の違いが、それぞれスケールリングパターンのシナリオ依存性をもたらしていることが示された。本研究の成果は、温暖化影響評価研究においてスケールリングパターンの排出シナリオ依存性を考慮する必要があることを示唆するものである。

数値シミュレーションによる気候予測にはある程度の不確実性が含まれており、そのことが温暖化の影響評価を難しく

している。サブテーマ1では、このような予測不確実性に関する理解を深め、低減の方策を探る研究を実施した。

大気海洋結合モデル MIROC5 で、物理スキーム内のパラメータ値を観測の不確実性範囲内で走査した場合に、気候感度（大気中 CO_2 濃度 2 倍増に対する全球平均地上気温上昇量）にどの程度の幅が出るかを調べるアンサンブル実験を行った。その結果、気候感度の幅は $2.2 - 3.4^\circ\text{C}$ であった。雲短波フィードバック（雲が日射を反射する効果）の差が、気候感度の幅の大部分をもたらしている。また、現在気候で赤道太平洋の南側で雄大積雲が発生しにくく降水量が少ないアンサンブルメンバーほど、温暖化時の雲短波フィードバックが大きくなることが分かった。この関係を用い、さらに観測データとモデルの現在気候実験を比較することで、標準設定のメンバーは他のメンバーよりも雲短波フィードバックの信頼性が高いことが分かった。

気候感度が気候モデルの物理スキームやスキーム内のパラメータにどのように依存するかを調べるために、新旧 2 バージョンの気候モデル間で雲、対流、境界層の物理スキームを入れ替えた 8 個のモデルを作り、さらにパラメータを走査して温暖化実験を行った（Multi-Parameter Multi-Physics Ensemble, MPMPE）。その結果、気候感度が 2°C から 10°C という広い幅をもった。この気候感度のばらつきは、雲短波フィードバックに関係することがわかった（図 33）。

大気中の CO_2 増加に伴う気候変化を気候モデルで計算する際、 CO_2 増加で生じる大気中の加熱によって対流圏の雲は地表面気温の上昇より速く変化すること（対流圏調節）が知られている。国環研が開発・運用に参加している気候モデル MIROC3 では対流圏調節によって対流圏下層の静力学的安定度が減少し、下層雲の減少に寄与していた。しかし、このような静力学的安定度の減少は IPCC 第 4 次評価報告書（AR4）で参照されたモデル群の中では特異な現象であった。その仕組みを調査した結果、安定度の減少は瞬時放射強制力を計算する際の誤差に起因することが示唆された。これにより、将来気候を予測する上で瞬時放射強制力の計算精度向上が重要であることが分かった。

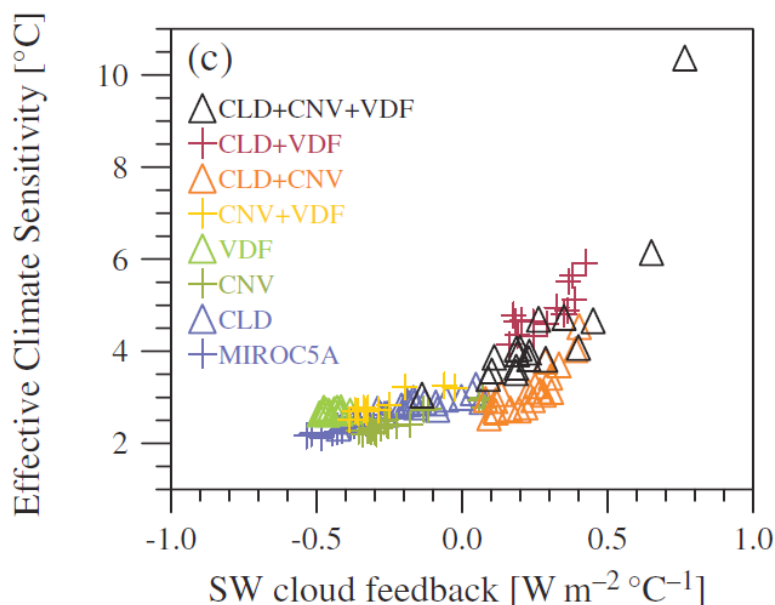


図 33 MPMPE 実験の各アンサンブルメンバーについて推定された気候感度（縦軸）と雲短波フィードバック（横軸）。

(3) 過去に発生した極端現象に対する人間活動の寄与評価

熱波や豪雨、早魃のような極端現象は世界各地で発生し、しばしば深刻な被害をもたらす。サブテーマ1では、こうした極端現象が、人間活動による気候変化とどのように関係するかについて研究を行った。

過去に実際に生じた極端現象について、人為起源の気候変動の影響を推定するため、気候モデル MIROC5 を用いて、いくつかの事例について「人為的な地球温暖化を考慮した気候再現アンサンブル実験」と「人為的な温暖化の影響を取り除いた気候アンサンブル実験」を実施した。そして、2 種類のアンサンブル実験を比較することにより、極端現象の発生確

率が人間活動の影響でどのように変わったかを検討した。(1) 2010 年に発生した南アマゾン旱魃を対象とした事例では、その年の海面水温の自然変動と人為起源外部強制力の両者が、旱魃の発生確率を高めていたことが示唆された。ただし、この要因推定の結果は、モデルの誤差補正手法に敏感であることも分かった。(2) 2013 年 7-8 月に日本で起こった記録的な猛暑を対象とした事例では、観測されたような猛暑の発生確率を人為的な温暖化が約 7 倍に増加させていたことが示唆された。また、(3) 2013 年 6-7 月に米国南西部を襲った激しい熱波を対象とした事例では、人為的な地球温暖化を考慮したアンサンブル実験のいくつかの標本で、観測されたような強度の熱波が現れた。一方、温暖化の影響を取り除いたアンサンブル実験では観測されたような強い熱波は発生しなかった。両者の比較から、人為的な温暖化が熱波の発生確率を増大させたことが評価された。

近年、海の表層の温暖化が抑えられ、世界的に平均した地上気温の上昇も緩やかな傾向であるにも関わらず、北半球陸上では猛暑の発生頻度が増え続けている。その理由を理解するため、気候モデル MIROC を用いてシミュレーションを実施した。その結果、海の表層の温暖化が緩やかであっても、大気中の CO₂ 濃度の上昇を始めとした人間活動の影響が亜熱帯から高緯度にかけて猛暑の発生頻度を増加させ得ることが分かった (図 34)。また、近年の中緯度での猛暑の頻発には海洋の数十年周期のゆらぎの影響も重要なことが示された。

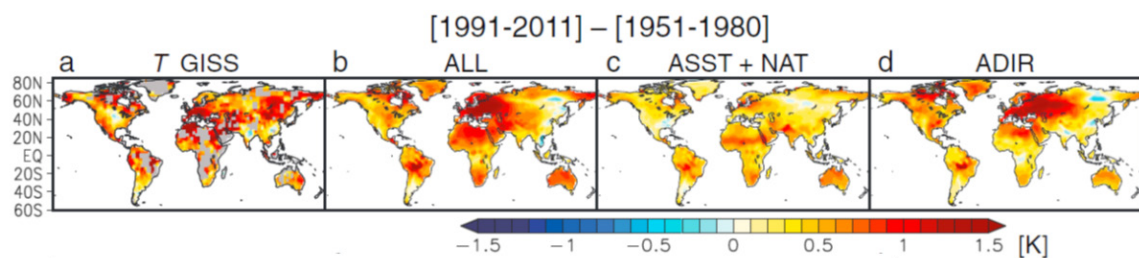


図 34 近年の陸上地表気温の上昇幅 (1951-1980 年平均に対する 1991-2011 年平均値)。(a) 観測、(b) モデルシミュレーション、(c) (b) と同様、但し海面水温、太陽活動、火山活動の変化がもたらす寄与、(d) (b) と同様、但し CO₂ の増加を含む人間活動の影響が陸上にもたらす寄与。

(4) 近年の気候変化に関する要因推定

近年観測された気候変化の中には、地表気温の上昇速度低下や寒冬の頻度増加のように、シミュレーションで予測された気候の温暖化と一見、整合的でない印象を与えるものも含まれる。サブテーマ 1 では、そのような現象について要因を推定し、温暖化に関する理解との整合性を点検する研究を実施した。

全球平均気温の上昇速度は 21 世紀に入ってから 10 年あたりわずか +0.03 度とほぼ横ばいの状態を示しており、こうした温暖化の停滞状態はハイエイタスと呼ばれて注目を集めている。気候モデル MIROC5 を用いたシミュレーションを実施したところハイエイタスの再現に成功したため、モデルの中で温暖化が停滞する仕組みを調査した。その結果、ハイエイタスは気候システムの内部変動に由来する現象であり、赤道太平洋の海洋熱吸収が強化されて起こることが示唆された。また、モデルが過去 10 年間の気温上昇を過大評価しがちなのは、内部変動に伴う海洋熱吸収効率の強化をモデルで再現できていないためであった。ただし、長期的な傾向として海洋熱吸収効率は弱化する傾向にあり、その傾向は地球温暖化に対する気候システムの応答として不可避である。従って、来る数十年のうちにハイエイタスは解消されるという示唆が得られた。

近年、熱帯上部対流圏では気温の上昇速度の低下が観測されているにも関わらず、大気海洋結合大循環モデルではこうした特徴が再現できていない。その理由を理解するため、気候モデル MIROC によるシミュレーションを実施した。その結果、気温の上昇速度低下は熱帯太平洋の水温の自然変動を反映したものであることが分かった。また、大気海洋結合大循環モデルでは、そうした自然変動のタイミングまでは再現できないシミュレーション設定であったため、モデルが観測と一致しなかったことが示唆された。

地球温暖化が進行中にも関わらず、ユーラシア大陸の中緯度域で寒冬になる頻度が近年増加している。その原因を理解するため、気候モデル MIROC を用いてシミュレーションを実施したところ、バレンツ・カラ海の水氷減少がユーラシア

大陸の中緯度域に寒冬をもたらし得ることが分かった。また、ユーラシア大陸の中緯度域で頻発している寒冬が、大気の内
部変動と海水の減少に対する応答との組み合わせによるものと推定し、近年の急速な海水の減少によって、寒冬になる
確率がユーラシア大陸の中央部で2倍以上高くなっていることを示した。

要因推定に関する研究では、「複数の外部強制力を個別に気候モデルに与えて気候変化を計算してから足し合わせた場
合」と「複数の外部強制力を同時に気候モデルに与えた場合の気候変化」が等しくなるという加法性がしばしば仮定される。
この仮定がどの程度成り立つかを調べるために、気候モデル MIROC3 に温室効果ガス、エアロゾル、太陽放射などの様々
な外部強制力を個別または同時に与えた実験を行った。その結果、20 世紀および 21 世紀の大陸平均・5 年平均の気温変化
に関しては加法性が成り立つことがわかった。一方、降水量変化に関しては、20 世紀では加法性が成り立つが、21 世紀で
は一部地域で加法性が成り立たないことがわかった。

(5) 気候モデルの性能評価と改良

気候変化の将来予測は気候モデルを用いた数値シミュレーションで実施される。その際に重要となるのは、気候モデル
が現実の気候を良く再現できるか性能を点検し、不十分な点があれば改良することである。サブテーマ 1 ではそのような、
モデルの性能評価と改良に関する研究を実施した。

大気海洋結合モデルを用いた現在気候再現シミュレーションにおいて、モデルがどの程度観測を再現できているか、新
たな手法を用いて評価した(図 35)。この手法は、現在気候を再現するアンサンブルシミュレーションの標本の中に現実(観
測値)が含まれると見なして良いかを統計的に評価するものであり、見なして良い場合はアンサンブルシミュレーション
の「信頼性が高い」と考える。この手法を、様々な種類のアンサンブルシミュレーションに適用した。その結果、単一の
モデルを利用して作成したアンサンブルの信頼性は低いことが多いが、複数のモデルを利用した場合の信頼性は高いこと
がわかった。近年の気候モデル研究の多くは、複数モデルによるアンサンブルのデータを利用しており、本研究の成果は、
これらの研究の信頼性に根拠を与えるものである。

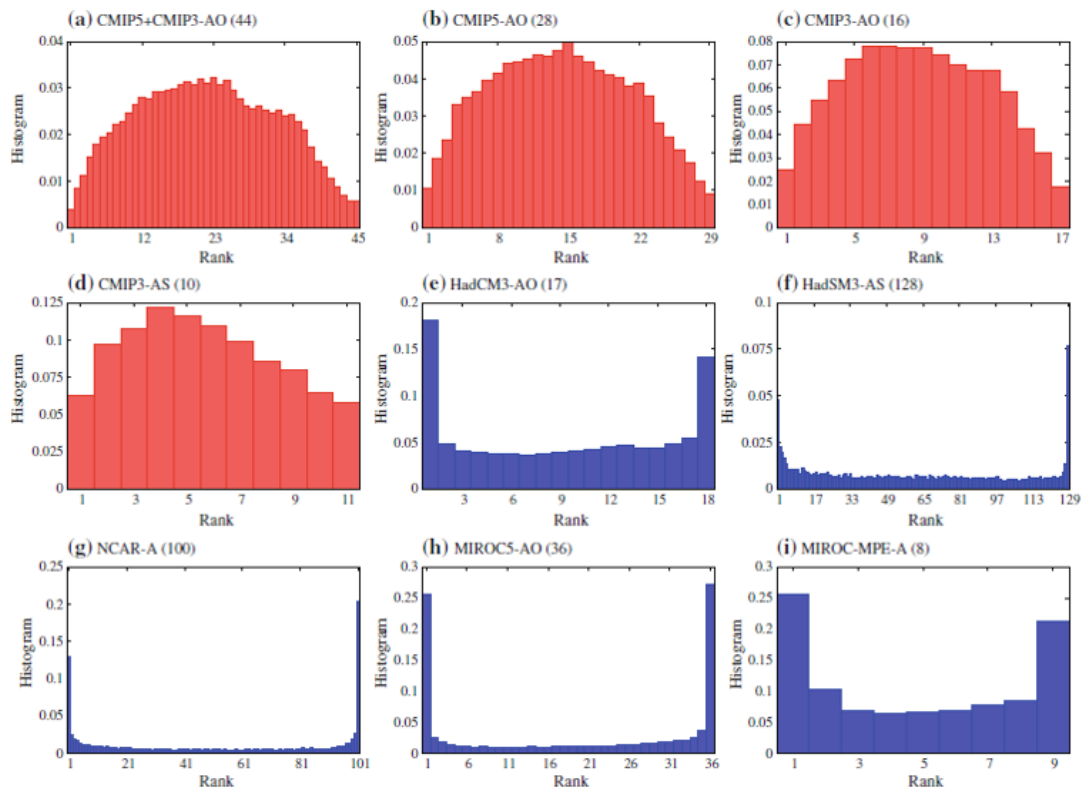


図 35 観測データを現在気候のアンサンブルシミュレーションと比較し、観測データがアンサンブルの標本の中
で何番目に大きいのかという順位を集計したヒストグラム。複数のモデルによるアンサンブルシミュレ
ーションを赤色、単一モデルによるものを青色で示す。ヒストグラムの形状は前者が山型に対して後者は U
字型であり、後者の信頼性が比較的低いことを示す。

気候変化の気候モデルによる将来予測の信頼性を向上させるためには、まず現在気候のシミュレーションにおいて系統誤差が生じる仕組みを理解し、誤差の低減につなげることが重要である。そこで、気候モデル MIROC5 でパラメータ設定に摂動を加えたアンサンブル実験を実施した。そして、各アンサンブルメンバーにおける大気上端放射および雲の分布を観測と比較することで、どの程度の系統誤差がパラメータ設定により生じているかを見積もった。その結果、パラメータ設定に由来する系統誤差は、北極域を例外とすれば誤差の符号を変えるほどの大きさを持たず、系統誤差の地理分布は主にモデルの構造に由来することが示唆された。

さらに、大気海洋結合モデルを用いた気候予測における不確実性を低減するため、特異値分解解析により複数のモデルによる現在気候再現実験と将来予測実験との間の相関関係を見出し、20 世紀後半の客観解析データを活用して将来の気温変化を統計的に推定した。その結果、北半球高緯度地域において、北極海の海水の大きな減少により、複数モデルの出力結果を単純平均した将来気温変化の予測よりも大きな気温上昇が起きる可能性が高いことを明らかにした。地球温暖化の影響評価研究では複数モデルの出力結果を単純平均した将来気温変化を用いることが多いが、本研究の成果は、これらの研究が北半球高緯度域においては温暖化影響を過小評価している可能性が高いことを示唆するものである。本成果については記者発表を行い、新聞に記事が掲載された。(http://www.nies.go.jp/whatsnew/2011/20110920/20110920.html)

熱帯下部対流圏における対流混合が気候感度へ及ぼす影響を調べるため、浅い対流のパラメタリゼーションを気候モデル MIROC5 へ試験的に導入し、同パラメタリゼーションが気候フィードバックへ及ぼす影響を確認した。その結果、パラメタリゼーションを導入し、さらにパラメータチューニングで大気上端の放射収支を均衡させたモデルでは、何もしないモデルと比べて雲フィードバックがより正に変化する様子が見られた。雲フィードバックの変化は、海面水温の上昇に伴う中層雲の増加が抑制されることを反映していた。以上のことから、熱帯下部対流圏における対流混合は、既往研究で指摘されている様な下層雲だけではなく、中層雲を介したフィードバックによっても気候感度を高める可能性が示唆された。

2.2.2 サブテーマ 2：地球規模リスクに関わる統合的空間分布モデリング

(1) 研究の目的と経緯

H23 年度は主として準備期間と位置付け、モデルの高度化・結合作業を進めた。また、生態系モデルによるメタン等放出の分析においては成果が得られた。H24 年度は、個々のモデルの開発が進み、初期的な実験、分析を行うとともに、国際モデル比較実験にも参加した。H25 年度は、個々のモデルによる実験、分析により国際モデル比較実験に貢献し、適応策に注目した研究も開始した。H26 年度は、モデルの統合を進めるとともに、個々のモデルによる実験、分析を行ったほか、社会経済シナリオのダウンスケーリングも実施した。H27 年度は、モデルの統合をさらに進め、統合モデルの検証に着手するとともに、社会経済シナリオのダウンスケーリングを高度化した。

(2) 陸域生態系モデルの改良と影響評価

陸域生態系モデルについては、大気中の温室効果ガス濃度上昇および気候変動による影響、森林減少とその防止・バイオ燃料栽培の拡大などの土地利用変化による影響を考慮できるようモデル改良を行う必要があった。また、生態系の変化に伴う構造・機能をより高精度で表現するための改良も必要であった。特に温室効果ガスの交換に関するモデル改良は、PJ1 と協同しつつ進めた。その中には農地における施肥量の変化に伴う放出量変化の評価も含まれていた。アジア地域の水田が主要な放出源の 1 つとなっているメタンガスに関しては、水田面積や家畜頭数の変化などを考慮した過去 110 年間の陸域収支変動をシミュレートした。その結果、陸域からのメタン放出量は継続的な増加傾向にあるが、大気中濃度に見られた十年規模の変動を説明することは難しいことが分かった。水田におけるイネ栽培形態の変化、家畜の飼料変化などのさらに詳細な人為影響を考慮するだけで無く、北極域の永久凍土から放出されるメタンについてもより観測データを収集してモデル改良を図る必要がある。現在までの知見を集約すると、融解する凍土自体からのメタン放出量は大きくないが、融解後に湿原化することで大量のメタンが放出される可能性がある。また、予備的なバイオ燃料栽培面積に関する将来シナリオを使用し、将来の栽培面積拡大が生態系の機能およびサービスに与える影響を評価した。必要なバイオ燃料生産を確保するため大幅な森林減少を許容するシナリオの場合、バイオ燃料栽培地の施肥に起因する一酸化二窒素の放出や、

植生の生産量の低下によって、バイオ燃料生産による温室効果ガス排出削減効果が大幅に相殺されることが示された。さらに生物多様性へのインパクトも考慮することで、バイオ燃料栽培による対策実施の影響評価の有用性を高めていく必要がある。同時に、施肥に関するより現実的なシナリオ作成の作業も進行させた。

気候変動の影響評価に関しては、国際モデル間相互比較プロジェクト（ISI-MIP）への参加を通じた複数シナリオに基づく影響評価と、日射量調節による気候工学的な対策実施に関する影響評価を行った。ISI-MIP では、4 種類の温室効果ガス濃度パス、5 種類の気候モデル予測を用いて、7 種類の陸域生態系モデルによる予測シミュレーションを実施した。陸域モデルの結果を比較解析することで、既存モデルの応答には定性的な整合性が見られる場合でも、定量的には大幅な不確実性が残されていることが明らかとなった。全球の温度上昇幅に対する植生バイオマスや土壌有機炭素量の変化応答に関しても、それぞれ増加および減少の傾向は概ね一致していたが、その応答幅には数倍の差が見られた。気候変動影響の地域的な特性を明らかにするため、温度上昇幅が大きい北極域と、人口稠密地帯を含むモンスーンアジア地域を対象にしてより詳細な解析を行った。例えば、多数のシミュレーション結果に共通するパターンを得るための一致度に関する解析を行うことで、低位の RCP2.6 シナリオでどの程度の影響が残るか、あるいは高位の RCP8.5 シナリオの場合でどの程度までの影響が発生しうるかを検討した。（図 36）

その他にも、近年注目されている日射量調節などの気候工学的な対策実施に伴う生態系影響の評価も行った。成層圏へのエアロゾル注入は地表に到達する日射量を減少させて温暖化を抑制すると考えられるが、同時に植生の光合成生産にも影響を与える。ここで行った陸域モデルを用いた分析では、日射量調節の有無による大気 CO₂ 濃度への影響は無いという仮定の下、植生の光合成を若干減少させるが、同時に温度上昇抑制による呼吸放出の抑制も起こることで炭素吸収をもたらす場合も見られた。現行は単純化された状況での評価に留まっており、より現実的なシナリオと各種改良を通じて信頼性を向上させたモデルによる評価を行っていく必要がある。

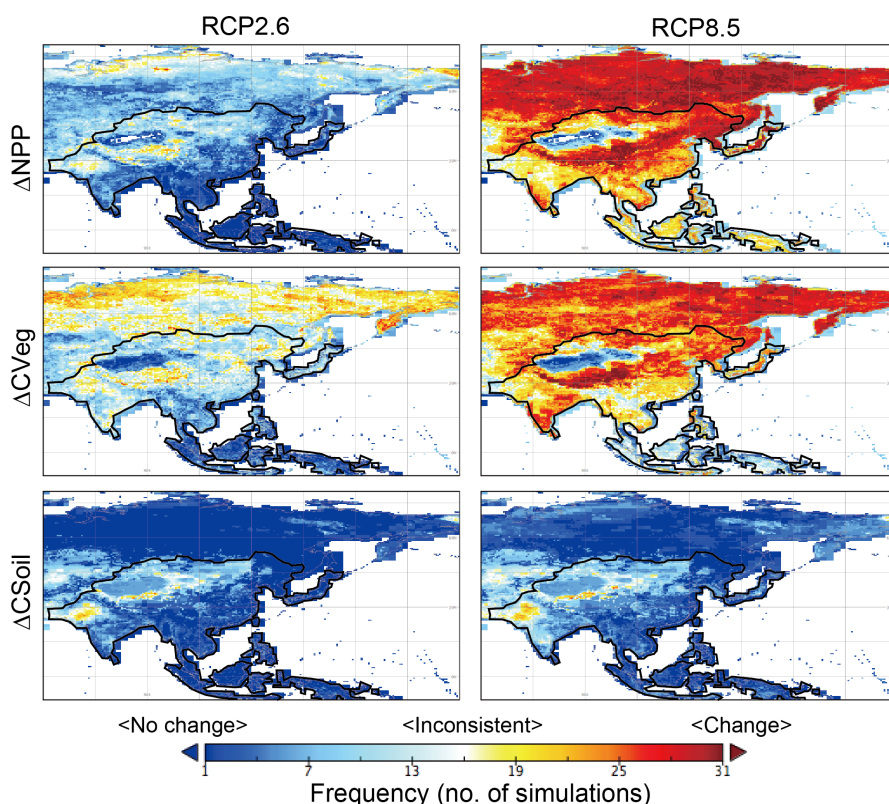


図 36 モンスーンアジア地域における陸域生態系影響の起こりやすさ。
左：RCP2.6 シナリオ、右：RCP8.5 シナリオを用いて各 31 通りのシミュレーションにおける影響（± 30% 以上）の一致度として示す。

(3) 全球水資源モデルの改良と影響評価

自然の水循環だけでなく、人間の水利利用を一体的にシミュレーションできる全球水資源モデルを開発・応用することにより、温暖化の地球規模の影響評価とその適応策に関する検討を実施した。今中期計画中に実施した事項は、主に IPCC の新シナリオに準拠した地球規模の水資源への影響評価、適応策の評価に関する予備的検討、適応策を含んだシミュレーション実施のための水資源モデルの改良の3つである。

まず、中期計画期間の序盤は IPCC の新シナリオに準拠した水資源への影響評価を実施した。新シナリオは社会経済シナリオ SSP と気候シナリオ RCP/CMIP5 からなる。SSP については、環境研の AIM の開発する人口・経済成長・土地利用シナリオを基本とし、灌漑設備や貯水池など、対応した水資源と水利利用に関する将来シナリオの作成を行った。また CMIP5 については、気候モデルの出力ファイルを多数取得し、データベースとして整備した。さらに、これまで水資源モデルに含まれていなかった工業用水・生活用水の将来の潜在需要を推定するモデルの開発を行った。次に新しい社会経済シナリオ SSP の描く5つの社会経済情勢に沿って水需要シナリオを作成し、それぞれの温暖化の進捗具合を考慮しつつ、水逼迫がどのように変化するかを見積もった(図37)。この研究は中期計画期間中に実施された国立環境研究所特別研究「全球水資源モデルとの統合を目的とした水需要モデル及び貿易モデルの開発と長期シナリオ分析への適用(代表:日引聡)」などの関連プロジェクトとも連携して作業を進めた。このほかに、国際的なモデル相互比較プロジェクト ISI-MIP に参加し、世界の研究者とともに21世紀中の全球水循環評価を実施した。新しい温室効果ガス排出シナリオ RCP の4つのシナリオに沿って実施された5つの気候モデルの将来気候予測のもとで、水循環がどのように変化するかを見積もった。成果論文は IPCC AR5(第2作業部会)において引用された。

その後、適応策に着目した研究を実施した。まず、温暖化に伴う水資源量の変動を緩和する効果がある貯水池に着目し、貯水池の追加的導入により、温暖化影響がどの程度低減するのかの基礎的な数値実験を実施した。また、社会経済変化に伴い増大する水需要にも着目し、水逼迫を現在の水準にとどめるためにはどの程度の追加的な節水が必要かの数値実験も実施した。これらの検討結果を2013年に開催された国際会議 Impacts World で発表した。その後もより具体的な適応策を提示するため、貯水池の建設コスト情報に関するデータを収集した。

適応策を検討するにあたって、水資源モデルは現実の様々な水源や水利利用を精度良く表現する必要がある。そこで、まず、人工的な水資源の一つである海水淡水化をモデルで考慮するため、アルゴリズムの開発を行った。海岸からの距離や気候・社会経済的な条件から、現在の海水淡水化プラントの分布を再現するモデルを開発した。このモデルに将来の気候・社会

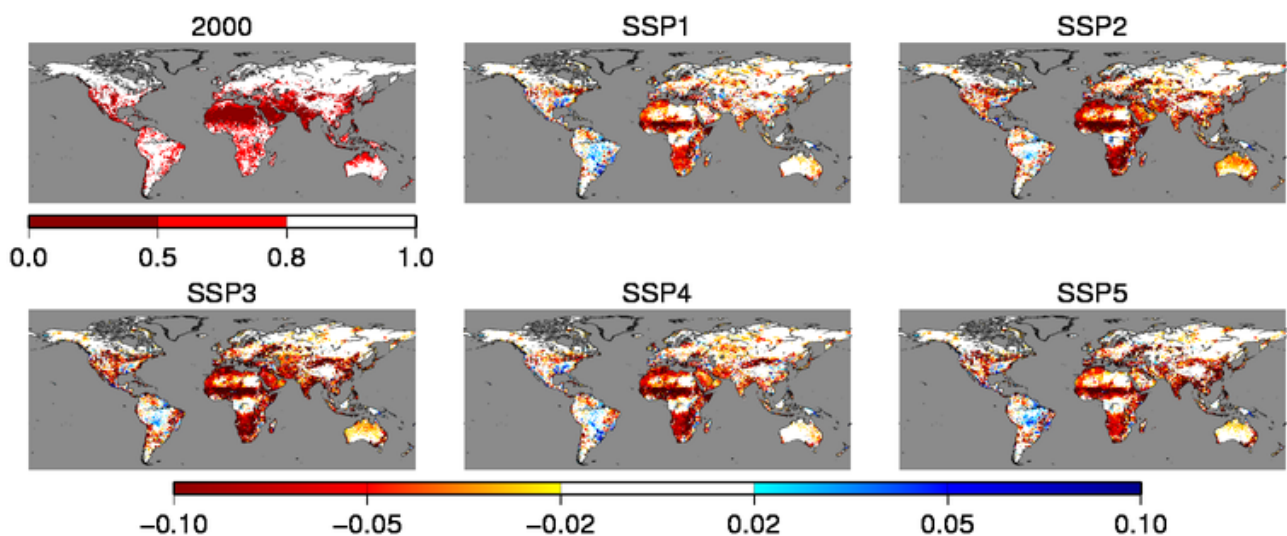


図 37 水逼迫に関する指標。指標は「必要な時に必要な量の水が得られるか」を0から1の間の値で示している。左上の1枚は2000年のときの指標。赤が濃い(値が小さい)ほど、水逼迫が大きいことを示す。残りの5枚は気候政策を取った場合の SSP1 ~ SSP5 の2050年頃の指標の値を2000年のときと比較したもの。赤(値が負)は水逼迫が悪化することを、青(値が正)は改善することを示す。白は水逼迫が現在と変わらないことを示す。

経済シナリオを与えることにより、将来の海水淡水化利用量とその分布を推定した。その結果、主に経済的な成長により、海水淡水化の利用地域は今後大幅に増える見通しが示された。また、地下水の汲み上げ、運河による導水、一度取水した水が河川等に再び戻る復帰水などが扱えるようにモデルの拡張を行った。また、中小規模の貯水池操作と水力発電量に関するシミュレーションの再現性を高めるため、モデルの改良を行った。これらの拡張・改良により、温暖化に対する適応策の具体的かつ定量的な評価が可能になり、将来的な経済的評価にもつながると考えられる。

(4) 土地利用モデルの改良と緩和策評価

将来の低炭素シナリオの実現可能性を評価するため、農作物モデルを利用して、低炭素シナリオにおける BECCS (Bio-Energy with Carbon Capture and Storage: バイオマス燃料を生産し、利用時に発生する二酸化炭素を回収・貯蔵する技術) の実現可能性を評価した。第二世代のバイオ燃料作物を考慮した場合、低炭素シナリオに必要な BECCS 量は、既存の技術では実現することが難しく、BECCS 量の増加のために、回収技術の高度化・肥料投入量の増加・土地利用の拡大などが必要となることが分かった (図 38)。また、将来のバイオエネルギーの導入が及ぼしうるリスクに関する解析を行った。その結果、バイオエネルギー導入のための土地利用変化によって、無視できない量の二酸化炭素が排出されうること、また気候安定化のためには、バイオ燃料作物のための耕作地として、これまでに社会経済モデルで想定されている以上の面積が必要である可能性が示唆された。

このほかに、社会経済活動が地球温暖化に及ぼす影響を空間詳細な単位毎に評価するために、国別の社会経済シナリオ (SSP1-3:2100 年まで 10 年おき) を 0.5 度グリッド毎にダウンスケール (DS) した (図 39)。この DS は都市人口、非都市人口、及び GDP についてそれぞれ実施した。都市人口の DS には、次の点を考慮した都市成長モデルを用いた: (i) 近接する都市からの影響; (ii) 経済的な結びつきの強い都市からの影響; (iii) 土地被覆や交通網などの都市自身の要因の影響。経済的な結びつき (ii) については、SSP1 では 2100 年までに現状の 2 倍、SSP2 では現状維持、SSP3 では 2100 年までに 0.5 倍となることを、それぞれ想定した。以上の仮定の下で、各 SSP 下での都市別人口シナリオ (～ 2100 年) を推計した。次に、それにより得られた都市別人口シナリオと土地被覆等その他の補助変数を考慮した複数の DS モデルを機械学習手法 (勾配ブースティング) を用いて平均化することで、0.5 度グリッド別の都市人口シナリオを推計した。非都市人口の DS は、都市化ポテンシャル (上述の都市別人口シナリオを元に評価) も考慮した同様のモデル平均化により実施した。最後に GDP の DS は、都市別人口シナリオ、非都市別人口シナリオ、及びその他の補助変数を考慮した平均化により実施した。

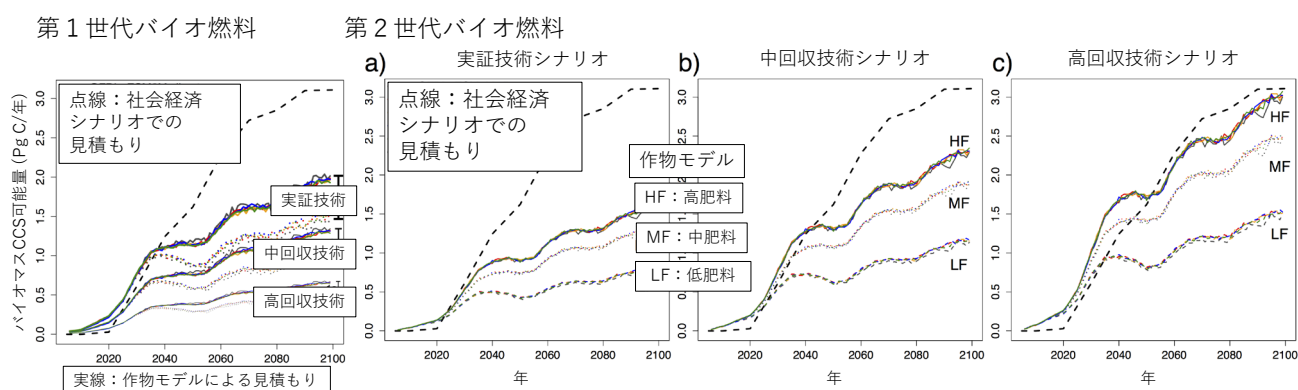


図 38 全球平均気温変化を 2 度に近い値に安定化する低炭素シナリオ (RCP2.6) において、社会経済モデルで求められた BECCS 量 (破線線: 低炭素シナリオのために必要な BECCS 量) と、作物モデルで推定された BECCS 可能量 (実線と点線)。左から、第一世代バイオマス燃料 (実証技術、中回収技術、高回収技術。実線は中肥料、点線は低肥料シナリオ。気候シナリオを変えて計算)、第二世代バイオ燃料、実証技術、中回収技術、高回収技術シナリオ (高肥料 = LF、中肥料 = MF、低肥料 = LF を仮定)。

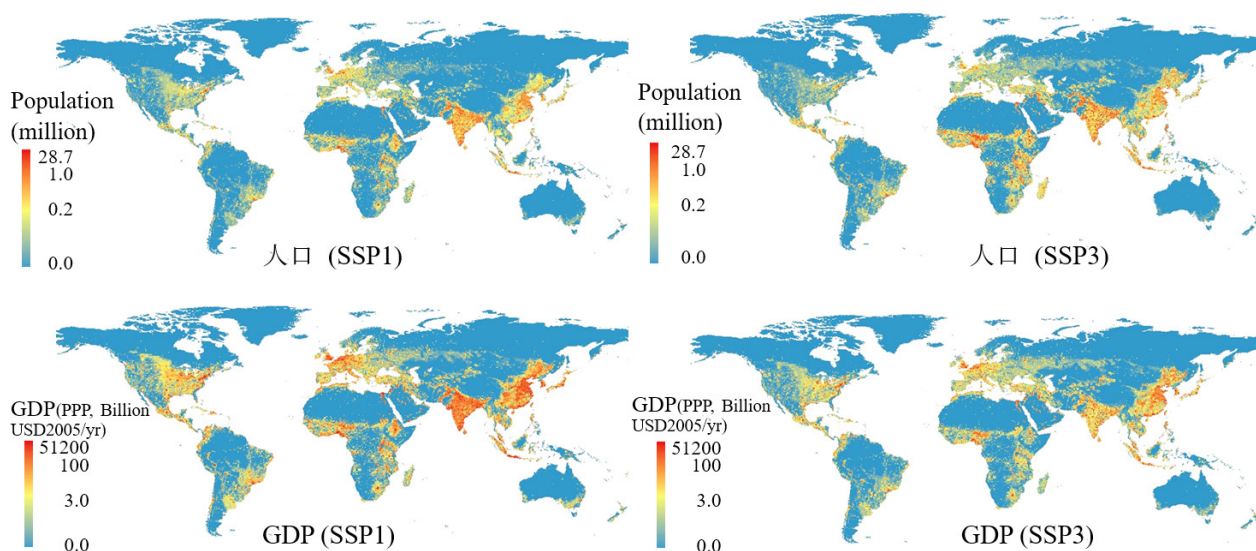


図 39 人口（都市＋非都市）と GDP の DS の結果（SSP1, 3；2080）。SSP1 の人口分布は全体として集約的であり、特に主要都市（例えばロンドンやニューヨーク）の周辺では顕著な人口集中がみられた。対照的に SSP3 の下での人口分布は拡散的であった。この拡散傾向は東ヨーロッパからロシアにかけての地域、及びアフリカ南部で特に顕著である。一方、SSP1 の下での GDP は、主要都市だけでなく、その周辺の広い範囲で高い値を示しており、SSP3 よりも広域な経済成長が見込まれる示唆が得られた。

(5) 陸域統合モデルの開発と総合的評価

多岐にわたる温暖化の影響を包括的に分析・評価するため、気候モデルをベースに陸域生態系モデル、水資源モデル、作物成長モデル、土地利用モデルを統合した陸域統合モデルの開発を行った。陸域統合モデルの概念図を図 40(a) に示す。ここでは、気候モデルの陸面物理過程を記述する MATSIRO を、単体で実行することのできるオフラインモデルを利用する。これに対して、水資源モデル H08 を組み込むことにより、灌漑などの、人間による水利用（ダム操作、農業用水、工業用水、家庭用水）を表現する。また、陸域生態系モデル VISIT を結合させることにより、自然植生や耕作地における温室効果ガス（二酸化炭素、メタンなど）の正味放出・吸収過程を計算する。さらに、H08 によって灌漑を考慮したうえで、作物モデル PRYSIBI2 を結合させることにより、穀物の単位面積当たりの収穫量を計算する。そして、PRYSIBI2 による穀物収穫量の計算結果と社会経済に関する入力情報をもとに、土地利用モデル TELMO によって、人間活動による耕作地面積の変化を計算する。土地利用変化の計算結果は、陸面物理・陸域生態系・水資源・穀物モデルにおいて、利用する。開発した陸域統合モデルに対し、社会経済や気候変動についての将来シナリオを与えることにより、気候変動が水資源、生態系、作物、土地利用に与える影響を定量的に評価する。モデル結合のための作業を行い、モデルによる過去の再現実験を行った。数値実験は、国立環境研究所のスーパーコンピュータを用いて行い、1 年あたりの計算時間は 25 分程度、水平方向の解像度は 1 度（陸域生態系モデルと土地利用モデルは 0.5 度）である。

統合陸域モデルによる計算例として、人間の水利用が河川流量に及ぼす影響を表す結果を図 40(b) に示す。人間活動を記述しない場合（青）は、流量の変動が大きいが、人間活動によってダムを操作することにより（赤）、流量が安定化され、観測された流量（黒）とより整合的である。河川流量以外の変数として、土壤水分・生態系生産量・穀物生産量・土地利用（耕作地/自然植生）に関して、過去再現実験で得られた結果と、観測されたデータを比較することにより、モデル結果が観測データと整合的であることを確認した。これにより、将来の気候変動が生態系・水資源・作物生産・土地利用変化に及ぼす影響と、これらの要素の間の相互作用を評価することにより、将来予測の不確実性を幅広く考慮しつつ、気候変動影響と気候変動対策の間の関係について議論するための準備ができた。

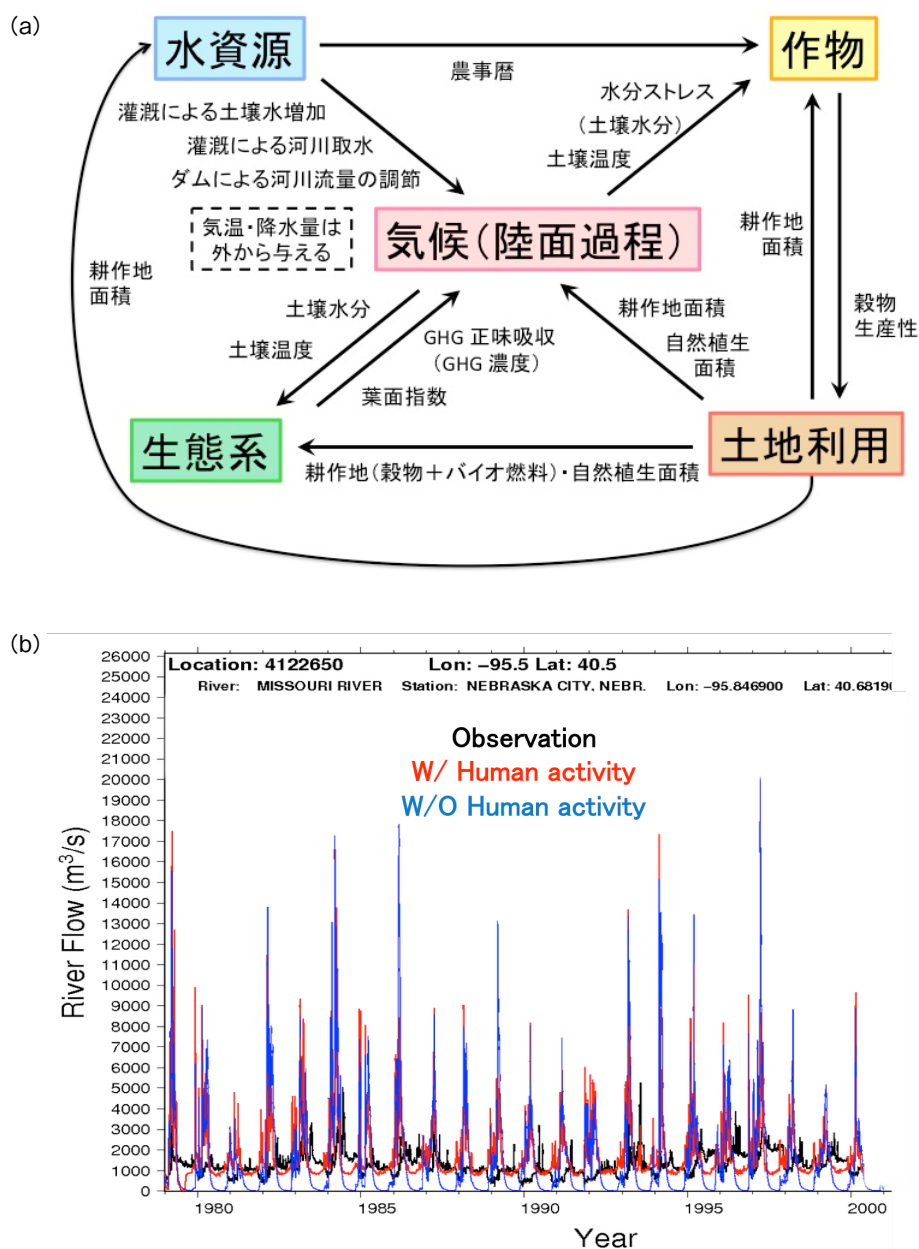


図 40 (a) 陸域統合モデルの概念図。ボックスは各サブモデル（気候、水資源、生態系、作物、土地利用）を表し、矢印で変数のやり取りを表現する。すべての変数をサブモデルの間でやり取りをしながら、時間発展をする。(b) 陸域統合モデルによる河川流量の結果。ダム操作などの人間活動をモデルで考慮した場合（赤）、考慮しない場合（青）の計算結果を、観測された流量（単位： m^3/s ）と比較した。1979 年から 2000 年までの過去再現実験のモデル結果に基づく。北米ミシシッピ川（西経 96 度、北緯 41 度）での結果。

2.2.3 サブテーマ 3：地球規模リスクの管理方策の検討

(1) 研究の目的と経緯

サブテーマ 2 と同様、H23 年度は主として準備期間と位置付け、リスク管理フレーミングの概念的な検討を進めた。ただし、統合評価モデルの不確実性評価においては成果が得られた。H24 年度は、リスク管理フレーミングの概念的な検討を進めるとともに、統合評価モデルの高度化とそれを用いた初期的な分析を行った。H25 年度、H26 年度は、リスク管理フレーミングの検討とリスクの網羅的整理を進めるとともに、統合評価モデルの高度化とそれを用いた分析を進めた。H26 年度は、前年度までの研究をさらに進めるとともに、一連の成果をもとにリスク管理戦略を提示した。

(2) 気候変動リスク管理の概念整理とその適用に向けた課題整理

IPCC 第4次評価報告書で温暖化問題に対するリスクアプローチの活用が強調されたものの、リスクアプローチ自体を論じた文献、あるいはリスクアプローチを明示的に適用して行われたリスク分析・対策評価等の文献数はそれ以降も限定的である。そのため、本研究では、学術論文・レビュー論文に限らず国際機関等報告書なども対象に含め、温暖化問題へのリスクアプローチの適用に関わる文献を幅広く対象として収集・整理した。さらに、収集・整理した上記文献のうち温暖化問題へのリスクアプローチの適用について特に積極的言及を行っているものを抽出し、(必ずしも温暖化分野に限定せず) 国立環境研究所の所内研究者らに参加を募り意見交換会を2011年度中に複数回実施して、各文献の論理・主張について共同で確認しつつ、文献の類型化や論点の把握を試みた。

意見交換会では、温暖化問題でのリスク管理フレーム全体について、全球規模と地域規模の気候リスク管理を混同しないことが重要であるとの見解が示された。また、他問題領域でのリスク管理の経験から何を学ぶかについての整理が必要であるとの指摘がなされた。温暖化のリスク判断に特徴的な諸要素としては、ある温度を超えると生じる氷床不安定化などのティッピング要素(地球システムの臨界現象)、徐々に増大する風水害リスクや海面上昇に加え、水・食料安全保障や難民・紛争の増加等、各々の問題がそれぞれに全球対応を必要とする問題が複合的に生じることが挙げられた。他方、温暖化影響の中には、好影響や適応可能な影響もある。科学的な予測には不確実性が伴い、どのリスクを避け、どのリスクを受け入れるかは、社会的価値判断を必要とする。そして、排出削減にかかるコストと温暖化影響との損得をすべてのケースについて考えることはできないため、まず、クリティカルなリスクを先に選び、それに必要な取り組みを行っていくことが重要であるとの見解が示された。

また、リスク管理に関する汎用的なフレームワーク(例: ISO31000 や IRGC 等)を活用し、それらに気候変動リスクやその対策を配置させることで、これまでの気候変動問題以外の分野におけるリスクアプローチに関する考察・実践の蓄積を活かし、またリスクの相対化や総合的な管理に関する検討を進めることが出来る可能性が指摘された。

(3) 気候変動リスクの網羅的整理と相互連関

環境省環境研究総合推進費 S-10 と連携し、専門家による文献調査に基づき、気候変動によって生じるリスク項目(130程度)と、リスク項目の間の因果関係(300程度)を抽出した。抽出されたリスク項目と因果関係を利用して、健康・災害・社会・水資源・エネルギー・産業・食料・生態系・地球科学的臨界現象に関連するリスク連鎖の「ネットワーク図」を作成した。これにより、専門的な知識を有しない人であっても比較的少ない労力で、気候リスクの全体像を把握できることが期待できる。

一例として、食料分野に関わるリスクのネットワーク図を示す(図41)。図ではリスク項目の間の因果関係が、矢印でつながれている。気候変動などの影響により、作物生産性が減少し、食料供給の不安定化と食料安全保障の悪化などが生じる可能性がある。また、食料安全保障の悪化はさまざまな健康への影響につながる。この一方で、場所によっては気候変動によって作物生産性が増加するなどの好影響もある。

(4) 気候変動リスク評価のための簡便な気候シナリオ開発に関する研究

温暖化の影響評価や適応策を考える際には幅広い範囲の排出シナリオの結果が必要となる。大気大循環モデルはある排出シナリオにおける気候変化を予測する際に非常に有益なツールとなるが、様々な排出シナリオの条件下で予測を行うには膨大な計算機資源が必要となる。パターンスケーリングは、このような幅広い排出シナリオに基づいた将来予測を行うために非常に有益なツールである。パターンスケーリングでは、まず、簡易気候モデルを用い、様々な排出シナリオにおける全球平均気温の上昇量を求める。その後、温室効果ガス排出・濃度シナリオの結果を用いた大気大循環モデルの結果から全球平均気温の上昇量で規格化された空間パターンを作成し、簡易気候モデルから求めた全球平均気温の上昇量を掛け合わせることで地域的な気候変化を求める。パターンスケーリングを用いた将来予測を行う際には、簡易気候モデルが大気大循環モデルの全球平均気温の上昇量を模倣する性能を持つことが求められる。

そこで、気候・影響シナリオと社会経済・対策シナリオを統合して分析する枠組みの構築の一環として、既存手法を基

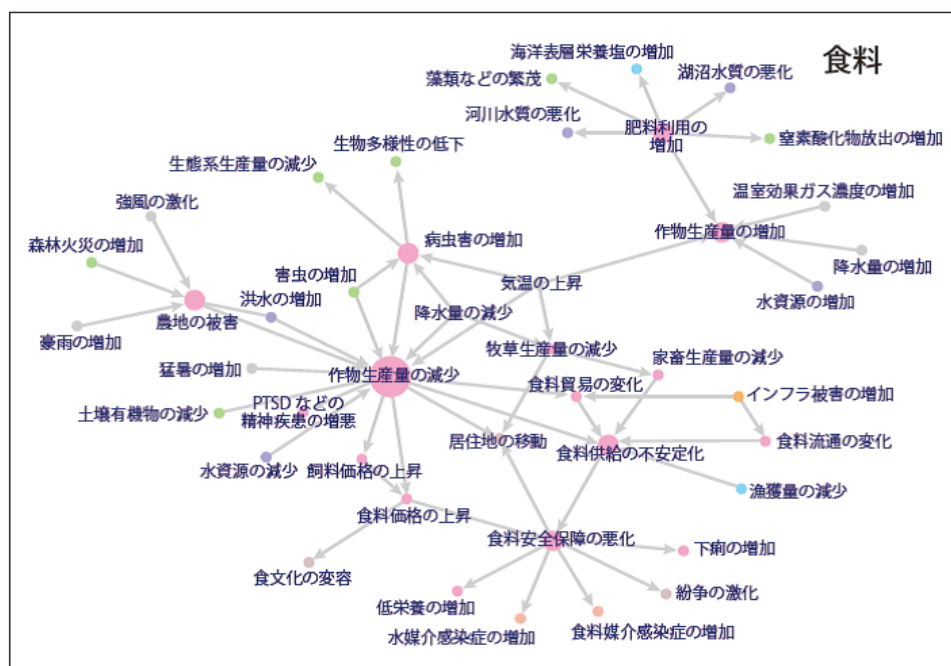


図 41 食料分野におけるリスク連鎖のネットワーク図¹⁾

にして簡易気候モデルを開発し、大気大循環モデルを模倣する際に重要となる気候感度、海洋の熱拡散係数、人為起源エアロゾルの放射強制力についてマルコフ連鎖モンテカルロ法を用いて推定した。さらに、開発した簡易気候モデルがどの程度大気大循環モデルの全球平均気温の上昇量を模倣できるかを調べた。

本研究では、MAGICC6 に基づき簡易気候モデルを開発した。また、大気大循環モデルの全球平均気温上昇量を模倣する際に重要となる平衡気候感度、海洋の熱拡散数、エアロゾルの放射強制力、全球平均フィードバックファクターの感度因子を 20 世紀については観測の全球平均気温の上昇量、2005 年における大気上端の放射強制力、700m 深まで積算した海洋の表層貯熱量の変化、21 世紀については MIROC5 の全球平均気温の上昇量を制約に与えてマルコフ連鎖モンテカルロ法で推定した（図 42）。その結果、RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 における MIROC5 の全球平均気温の上昇量を非常に良い精度で模倣することができた。また、推定されたパラメータの値を一つずつ変える感度実験の結果から、大気大循環モデルの全球平均気温上昇量を模倣する際には、平衡気候感度の推定が最も重要であることが示された。加えて、海洋の熱拡散係数やフィードバックファクターの感度因子についても重要であることが示された。

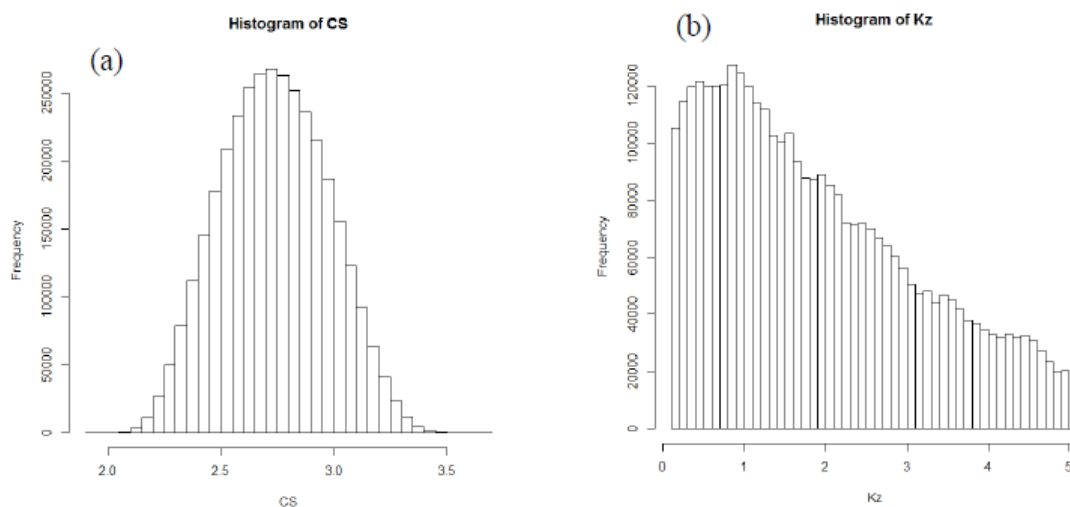


図 42 マルコフ連鎖モンテカルロ法により推定された (a) 平衡気候感度 (K) と (b) 海洋熱拡散係数 (cm^2/s)⁽²⁾

(5) 気候変動リスク評価で用いる気候予測情報の基礎解析

IPCC 第 5 次評価報告書に向けて開発された新しい代表的濃度シナリオ（RCP：Representative Concentration Pathways）を想定した CMIP5 気候シナリオが 2011 年より配布開始されたことから、これを用いた新たな気候変動リスク評価研究への期待が高まった。RCP は 2100 年に放射強制力が産業革命以前と比較して 2.6 W/m^2 、 4.5 W/m^2 、 6.0 W/m^2 、 8.5 W/m^2 増加した状態で長期安定化されるシナリオであり、RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5 と名付けられている。RCP 放射強制力安定化シナリオを想定した CMIP5 気候シナリオが公開され利用可能になったが、本研究プロジェクトの開始時点では、まだ十分な分析・性質把握が行われていなかった。気候変動リスク評価研究で CMIP5 気候シナリオを取り扱う前に、CMIP5 気候シナリオの性質を把握することの重要度は高く、具体的な方法としては既存の気候変動リスク評価研究で用いられてきた CMIP3 気候シナリオとの比較が挙げられた。特に各分野の気候変動リスク評価研究で良く用いられる気温、降水量、日射に関する CMIP5 気候シナリオの性質把握は重要であった。以上の背景を踏まえて本研究では特に日本域付近に焦点を当てし、気温、降水量、日射について CMIP5 気候シナリオの分析・性質把握を実施すると同時に、これまで気候変動リスク評価研究で使われてきた CMIP3 気候シナリオとの比較を行い CMIP5 気候シナリオの特徴を明らかにして、気候シナリオの適切な選択のための基礎的な情報を提供することを目的とした。

本研究では全球陸域については緯度経度 1° で、日本の陸域平均については 1 次メッシュで整理した CMIP3・CMIP5 両気候シナリオの気温、降水量、日射の将来変化について分析を行った。

2012 年時点までに入手した 44 の CMIP5 GCM 出力を RCP シナリオ別に分析した結果、日本陸域では気温変化については RCP2.6 シナリオで 21 世紀末に気温上昇が 2°C 以下に安定化しうることが示された。一方、RCP8.5 シナリオでは徐々に気温上昇が大きくなり、21 世紀末に 4°C 以上の昇温が予測された。降水量変化については RCP シナリオ別にマルチ GCM 平均した場合、増減を繰り返しながら時間の経過とともに次第に増加すると予測された。日射変化について RCP シナリオでは 21 世紀末まで増加すると予測されている。SRES シナリオでは近未来に日射が大きく減少し、その後増加していくが、RCP シナリオより全体的に小さくなる。また、CMIP3 と CMIP5 の GCM が同じ研究機関で開発されても予測される傾向が異なるケースがあるため取扱いに注意が必要であることが示された。

CMIP3 と CMIP5 の GCM に想定された 2 つの排出シナリオのセットである SRES と RCP について、その類似点・差異について評価・考察した（図 43）。RCP2.6 シナリオは厳しい緩和策を求めており放射強制力変化と二酸化炭素排出量変化について SRES シナリオの中では類似なシナリオがなかった。RCP4.5 シナリオは放射強制力変化と二酸化炭素排出量変化について SRES B1 シナリオと類似であると示されたが、気温変化については 21 世紀末に SRES A1B シナリオと SRES B1 シナリオの間になることが示された。RCP8.5 シナリオは気温変化に関して SRES A2 シナリオと類似することが示された。一方、日射変化について RCP シナリオでは日射が次第に増加する特徴があるが、SRES シナリオでは近未来で一旦大きく減少し、特に SRES A2 シナリオの場合、全体的に現在より日射が小さいと予測された。

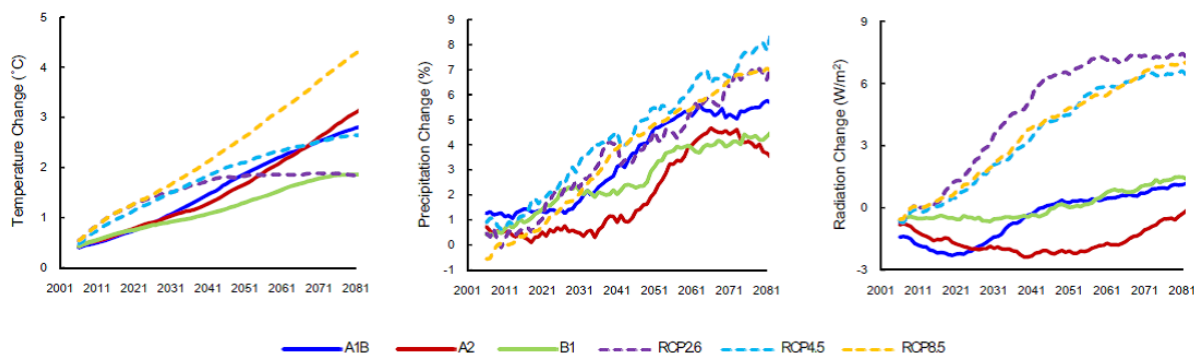


図 43 日本陸域における排出シナリオ別気候要素の将来変化³⁾

(6) 作物生産での必要適応量の時間変化に関する分析

緩和・適応によるリスク管理戦略検討の一つとして、作物生産の適応経路（必要な適応水準の時間変化）の分析を、コムギを事例に実施した⁴⁾。食料生産を維持するために、作物収量に対する将来の気候変化が及ぼす負の影響を軽減する方策（適応策）を実施することは重要であり、適応策の時系列を示す「適応経路」を描くことは、気候変化が進む中でいつ・どのような適応策が求められるのかを検討する上で有効な手段となる。

本研究では、世界の主要なコムギ生産国9か国について、2010–2090年代の10年代毎に、現在からの収量減少を防ぐために必要な適応策を逐次的に導入していくと仮定して、21世紀にわたり現在のコムギ収量を維持するための適応経路を導出することを試みた。適応策として、(1) 灌漑面積の拡大と(2) 品種の変更および新規の高温耐性品種の開発導入の2つを考慮して適応経路を評価した結果、適応導入のタイミングや強度が各国で大きく異なることが分かった（図44）。また、適応策導入の適切なタイミングを逃した場合と比べて、将来必要な適応策を予測し、着実に導入を進めることで、気候変化が及ぼす負の影響（本研究ではコムギ収量の減少）を軽減できることが示された。

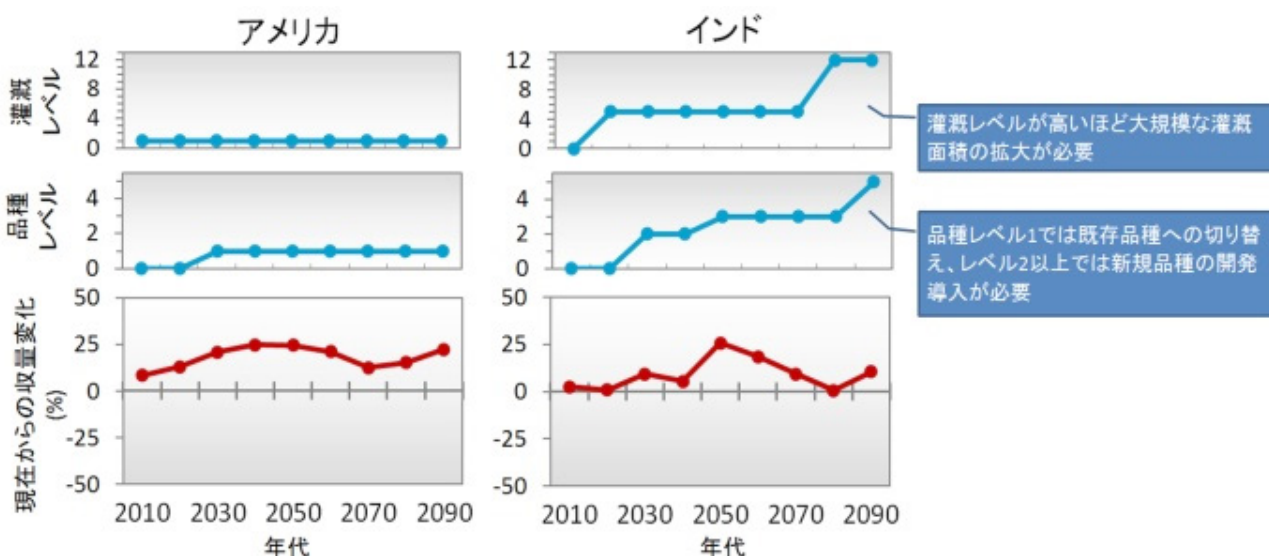


図44 アメリカとインドにおける、現在（1990年代）のコムギ収量を維持するための適応経路と収量変化率の推移の例（灌漑レベル、品種レベルは適応策の強度レベルで、値が大きいほど強い適応策が必要であることを示す。レベル0は適応策導入なしである。灌漑レベルの上昇は、より大規模な灌漑面積の拡大が求められることを示す。品種レベル1は品種変更（現在の植付品種を別の既存品種へ変更する）、品種レベル2以上は新規の高温耐性品種の開発導入が必要で、高レベルほど耐性強い品種が求められることを示す。）

(7) 新シナリオフレームワークを活用した食料消費・飢餓リスク分析

緩和・適応によるリスク管理戦略検討の一つとして、温暖化影響予測を組み入れた応用一般均衡モデルを用いた食料消費および栄養不足人口の分析を行った。農業は気候変化に対して敏感であり、温暖化により直接的な影響を受けると懸念されている。本研究では、国際的に新しく開発が進められているシナリオフレームワークを用いて、社会経済条件の将来シナリオと、気候変化に伴う世界各地の農作物収量変化が、国際貿易を通じて引き起こす各国・地域の食料生産・消費の変化ならびにその帰結として生ずる栄養不足人口の変化を見積もった。

新シナリオフレームワークは2つの要素、すなわち、社会経済条件（SSPsと呼ばれる5つの共通社会経済シナリオ、うち3つを本研究で用いた）と気候条件（RCPsと呼ばれる4つの代表濃度パス）から成り、多様な将来の社会を想定することができる。さらに、結果に相違をもたらす要因の一つである気候モデルとして、第5期結合モデル相互比較計画（CMIP5）に参加した8つの気候モデルによる最新の気候データを用いた。農業における適応策として作物品種の変更、植付日の変更を想定した。

その結果、将来の気候条件変化の想定よりも社会経済条件変化の想定の方が栄養不足人口や食料消費により強く作用す

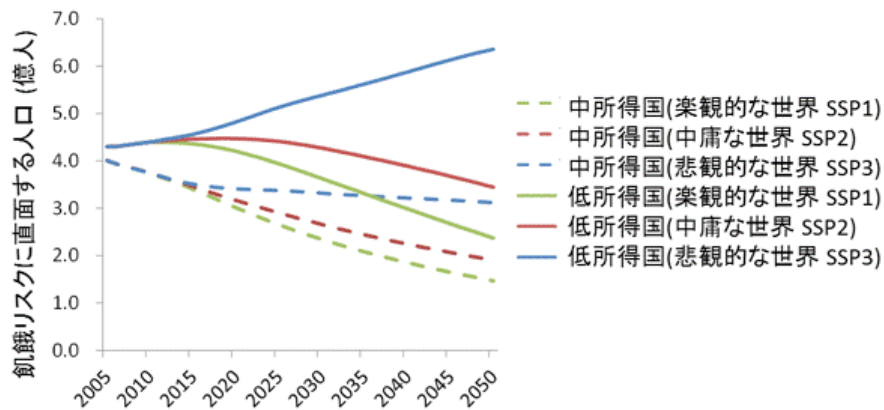


図 45 気候変化がない場合の飢餓リスクに直面する人口（人口増加や経済発展、技術進歩の違いにより楽観的世界（SSP1）で最も小さく、悲観的な世界（SSP3）で最も大きい。）⁵⁾

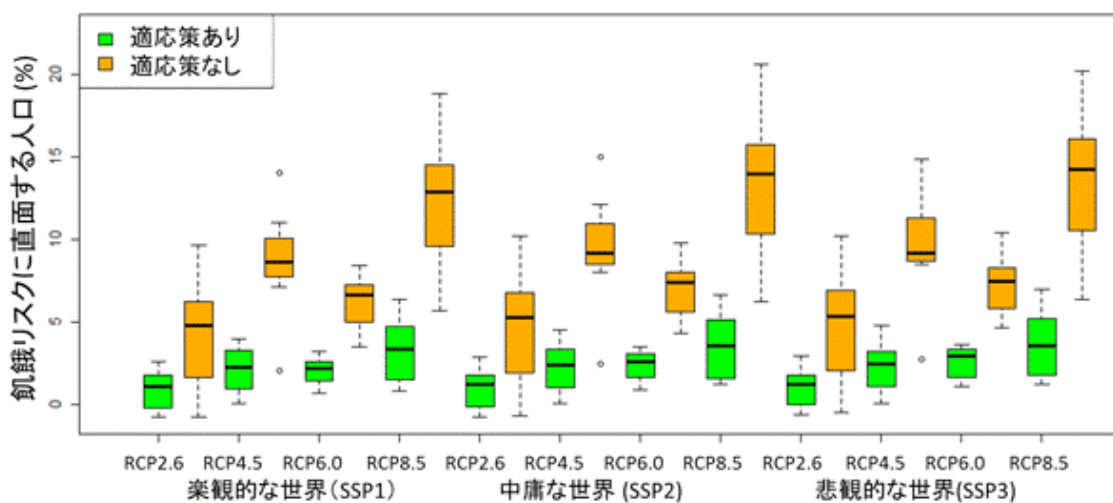


図 46 気候変化により追加的に生ずる 2050 年飢餓リスクに直面する人口（気候変化がない場合からの増加率）（いずれのシナリオにおいても適応策の効果（あり・なしの違い）が確認できる）

ること（図 45）、適応策を適切に実施する場合、気候変化は栄養不足人口に対して軽微な影響をもたらすが、適応策を適切に実施できない場合にはより大きな影響をもたらすこと（図 46）、作物収量変化による GDP 損失は比較的小さいこと、などが示された。

(8) 気候変化と緩和策実施により生じる食料消費・飢餓リスク分析

緩和・適応によるリスク管理戦略検討の一つとして、気候変化と気候変化に対する緩和策の実施により生じる食料消費への影響の分析を実施した（図 47）。気候変化と気候変化に対する緩和策の実施により生じる、食料消費への影響をもたらす可能性のある要因として次の 3 つが挙げられる。(1) 気候変化による作物収量の変化、(2) バイオエネルギーの導入による食料作物とエネルギー作物との土地の競合、(3) 緩和策の実施に伴うマクロ経済の変化、である。本研究では、この 3 要因の食料消費への影響を定量的に示した。さらに、これらの影響は、先進国から中・低所得国への資金移転により軽減することが可能かについても検討した⁵⁾。

分析の結果、次の 2 点が明らかとなった。(1) 2℃目標の達成に向けた強い緩和策を実施する場合、食料作物とエネルギー作物との土地の競合、マクロ経済の変化による食料消費への影響は、気候変化による影響と比べて決して無視できない程度である。(2) 2050 年、先進国から中・低所得国への 870 億ドル（2050 年世界 GDP の 0.06% 相当）の資金提供により、これらの国での緩和策による食料消費への負の影響は緩和策を実施しない場合の水準まで軽減できる。

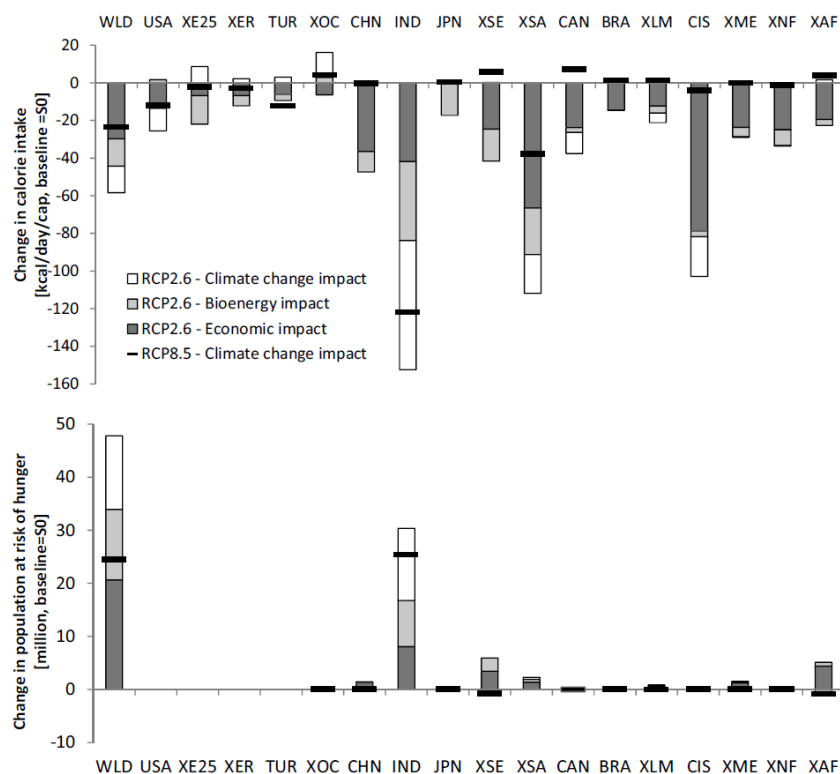


図 47 気候変化と気候緩和策に伴う要因別の食料消費（上）・栄養不足人口（下）の変化量（2050 年、SSP2、気候不変・緩和策無しを仮定したリファレンスケースとの比較）⁶⁾

引用文献

- 1) ICA-RUS プロジェクトチーム（2014）ICA-RUS レポート 2014. (<http://www.nies.go.jp/ica-rus/materials.html>)
- 2) 石崎安洋ら（2014）簡易気候モデルを用いた大気大循環モデルの模倣．土木学会論文集 B1(水工学), 70 (4), I307-I312.
- 3) 申龍熙, 高橋潔, 花崎直太, 脇岡靖明（2012）日本域付近の気候予測 - CMIP3 気候シナリオと CMIP5 気候シナリオの比較 - . 第 20 回地球環境シンポジウム, 土木学会論文集 G (環境), 68 (5), I_159-I_169
- 4) Tanaka A., Takahashi K., Masutomi Y., Hanasaki N., Hijioka Y., Shiogama H., Yamanaka Y. (2015) Adaptation pathways of global wheat production: Importance of strategic adaptation to climate change. Scientific Reports, 5 (14312)
- 5) Hasegawa T., Fujimori S., Shin Y., Tanaka A., Takahashi K., Masui T. (2015) Consequence of Climate Mitigation on the Risk of Hunger. Environmental Science & Technology, 49 (12), 7245-7253.
- 6) 長谷川知子, 藤森真一郎, 申龍熙, 高橋潔, 増井利彦 (2013) 気候緩和策による食料消費への影響分析．土木学会論文集 G (環境), 69 (5), I_1-I_12

2.3 研究プロジェクト3：低炭素社会に向けたビジョン・シナリオ構築と対策評価に関する統合研究

PJ3「低炭素社会に向けたビジョン・シナリオ構築と対策評価に関する統合研究」は、3つのサブテーマからなる。サブテーマ1「アジア低炭素社会シナリオ開発及び社会実装に関する研究」は、今後の経済発展とともに将来のGHG排出量が大幅に増加することが見込まれるアジアを対象に、低炭素社会の実現に向けたシナリオ開発と、開発したシナリオの社会実装を目指した課題である。サブテーマ2「日本及び世界の気候変動緩和策の定量的評価」は、統合評価モデルであるAIM（Asia-Pacific Integrated Model）の改良、拡張を通じて、世界及び日本を対象に気候変動緩和策に向けた取り組みを定量的に評価した課題である。サブテーマ3「低炭素社会構築のための国際制度及び国際交渉過程に関する研究」は、気候変動枠組条約締約国会議をはじめとする一連の会合をフォローし、定量的なシナリオを実現するために必要な国際制度や国際交渉過程を明らかにした課題である。以下では、各サブテーマごとに、研究の目的、5年間の成果について示す。

2.3.1 サブテーマ1：アジア低炭素社会シナリオ開発及び社会実装に関する研究

(1) 目的と経緯

アジアは今後も経済発展が見込まれ、温室効果ガス（GHG）排出量の増加が大幅に見込まれる地域である。本サブテーマでは、こうしたアジアの国や都市を対象に、低炭素社会シナリオの実現に向けて、世界全体のGHG排出量の大幅削減に対するアジアのGHG排出削減を分析したアジア低炭素社会シナリオを定量化し、それを実現するための方策やロードマップを提案するものである。また、都市レベルでの低炭素社会実現ロードマップの検討手法を確立し、具体的な地域に適用してその有用性を明らかにする。また、中国、インド等アジア主要国に対して、各国の低炭素目標立案への知見を提供する。これらを通じ、構築した低炭素社会シナリオを社会実装するための、政策・状況等をロードマップとして取りまとめるとともに、アジア各国において政策担当者等との議論を通じて、本サブテーマで得られた成果の普及に努めることも目的の1つとしている。

(2) 主な成果

1) アジア全域を対象とした分析

本サブテーマが中心となって実施した環境省環境研究総合推進費 S-6「アジア低炭素社会研究プロジェクト（2008-2012）」では、4つのテーマ（シナリオ、制度、資源、交通）の成果を統合し、2050年までに世界の温室効果ガスを半減することを所与とした時に、アジアが低炭素社会へ到達するための方向性を示したものである。アジアは、経済発展、文化、気候など多様な地域であるが、各国の共通する課題を10の方策として取りまとめるとともに、各方策のGHG排出量削減への貢献度と地域ごとの違いについて応用一般均衡モデルを用いて定量化した。図48に結果を示す。10の方策とその他（農業に起因しないメタン、亜酸化窒素）の全ての対策を適切に実施することができれば、アジア地域のGHG排出量はなりゆきシナリオと比較して2050年に22GtCO₂e（69%）削減できることを明らかにした。方策ごとの貢献度は、交通を対象とした方策1と2により5.2%、資源利用の低炭素化を目指す方策3に沿った対策を実施することで22%、建築物の省エ

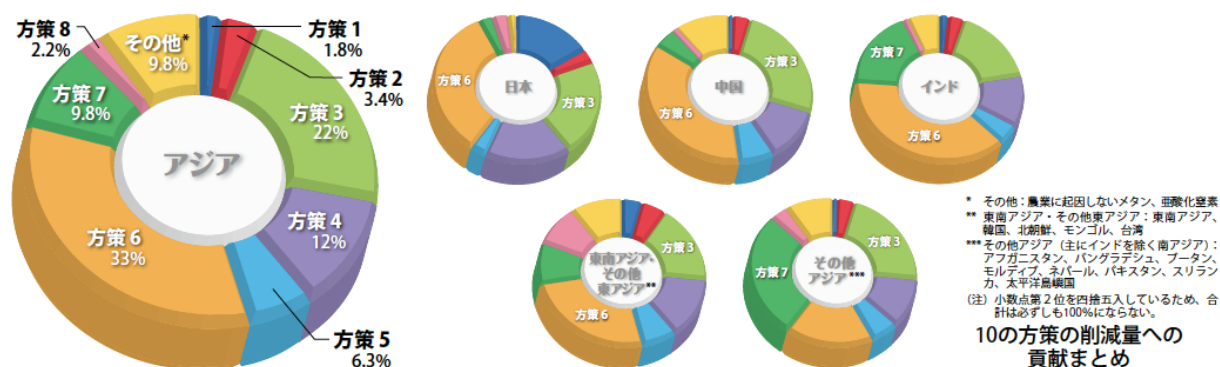


図 48 アジア低炭素社会に向けた 10 の方策の温室効果ガス削減量への貢献度まとめ

エネルギー化をすすめる方策4によって12%等と示された。バイオマスエネルギーの活用を目指した方策5による貢献度は6.3%、その他の再生可能エネルギー供給システムに関する方策6は33%である。農業、土地利用起源のGHG排出に対する対策である方策7と8の貢献度は、それぞれ9.8%、2.2%と、CO₂排出量削減を目指した方策群よりも貢献度は低いが、重要な位置づけを占めている。その他の削減量は9.8%を占めることがわかった。また、方策の効果は国や地域によっても異なり、方策3、方策4、方策6は多くの国や地域の温室効果ガス削減に貢献しているが、インドでは方策7の農業部門の貢献が方策6のエネルギー部門に続いて大きいことがわかった。また、その他アジア（主にインドを除く南アジア）においては、方策7の貢献度が最も高いことがわかった。本研究成果より、このような各国・各地域でのそれぞれの方策の有効性の違いも勘案しつつ、その地域に適した低炭素社会に向けた政策や対策を立案・実施することが必要であることが示された。本成果は、2013年10月17日に開催した国民対話シンポジウムにて公表した。また、COP19（2013年）にてマレーシア工科大学と共同で行ったサイドイベントや、UNFCCCの日本パビリオン等でも報告し、本研究成果とともにその他のアジア低炭素社会研究の成果をとりまとめた報告書を配布し、広く成果を報告した。

2) アジア主要国、主要都市を対象とした低炭素シナリオ開発

環境研究総合推進費S-6のもと、アジアの主要国や都市・地域を対象とした低炭素シナリオ開発を継続的に実施し、韓国・京畿道、中国・広州、タイ・コンケン（バンコク）の低炭素シナリオの研究結果を新たに出版した。このうち、タイ・コンケンにおいては、現地の行政・大学機関、民間企業と共にコンケン低炭素社会ワークショップを2013年6月18日に開催し、コンケン低炭素シナリオ開発の研究結果を披露した。また、カンボジアについては、カンボジアにおいて低炭素社会開発計画の策定に定量的な評価を加えた初めての調査となる「2050年までの低炭素開発戦略」をとりまとめ、2013年4月22日にカンボジア・プノンペンにてワークショップを開催し、現地政府機関、研究機関からフィードバックを得た。これを受けたGHG排出削減量の定量的な評価が現在も継続して実施されている。

このほか、ナレッジ・プラットフォームを通じて、アジア低炭素社会を実現するために、外務省主催の「東アジア低炭素成長パートナーシップ対話」のサイドイベントとして、NIES・JICA・IGESの共催で公開シンポジウム「東アジア低炭素成長ナレッジ・プラットフォーム」が2013年5月17日に開催された。同シンポジウムでは、カンボジア、タイ、ベトナム、マレーシア・イスカンダルからの登壇者より、本サブテーマのもとでとりまとめてきた研究成果や、今後の取り組みが報告された。また、2013年7月22-25日に横浜で開催されたLCS-RNet/LoCARNet/ISAPでは、アジアが2℃目標と一致する全球的な排出量の推移を達成するために必要なロードマップについて、インド、中国、タイ、マレーシア、カンボジア、ベトナム、ネパール、インドネシアの共同研究者からこれまで実施してきた低炭素シナリオ研究の成果を報告した。

「アジア低炭素社会実現のためのJCM大規模案件形成支援事業委託業務：国レベルNAMA策定支援事業」として、既存の低炭素社会シナリオ策定のための定量評価ツールやアジア諸国の研究者・行政官とのネットワークを活用して、各国の研究者に対するモデル分析・ロードマップ策定のためのキャパシティビルディングを実施し、各国研究者との協働によって各国の社会経済事情や発展段階に応じたビジョン・ロードマップの策定を行った。一例として、インドネシアを対象にしたシナリオ分析では、2050年のGHG排出量は、ベースラインシナリオで2,965 MtCO₂、対策ケースであるCM1シナリオで2,375 MtCO₂、CM2シナリオで1,941 MtCO₂となることを明らかにした。また、発電部門や高効率なエネルギー技術の利用増加による削減量が大きく期待できることが示された。

低炭素社会の実現に鍵となる再生可能エネルギー利用可能量の評価について、再生可能エネルギーの利用可能量（ポテンシャル）とエネルギー需要の空間分布の違いによる評価を実施した。世界全体を対象に、再生可能エネルギー設備立地地点と都市との距離を同定し、都市との距離を考慮することによる陸上風力発電のポテンシャル変化を分析した。また、経済性評価にあたって送電線のコストを加味した。図49は、送電線のコストを加味した陸上風力発電のコストを示したものである。

世界全体での評価に加え、都市スケールでの再生可能エネルギーポテンシャル評価と最適施設立地を分析できるモデルも開発し、マレーシア・イスカンダル地域を対象に適用、分析を行った。図50は、マレーシア・イスカンダル地域におけるいくつかの再生可能エネルギー導入目標達成のための設備導入地点の評価結果である。

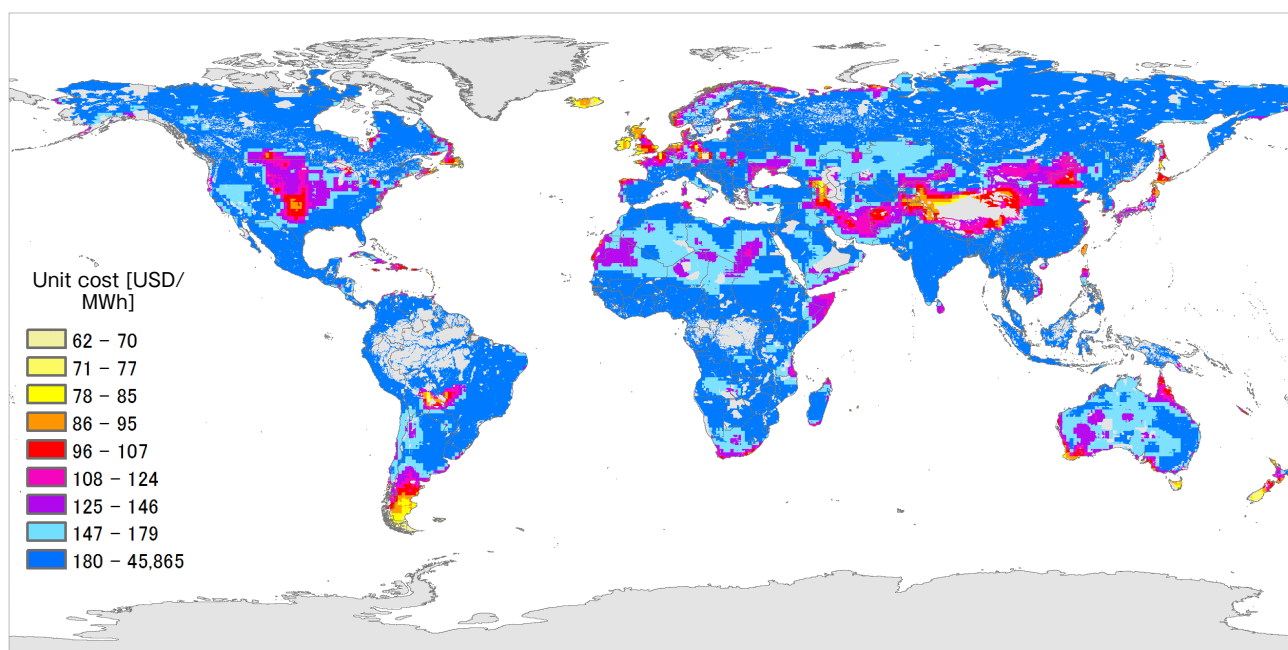


図 49 送電線と都市での距離を考慮した陸上風力発電のコスト評価結果

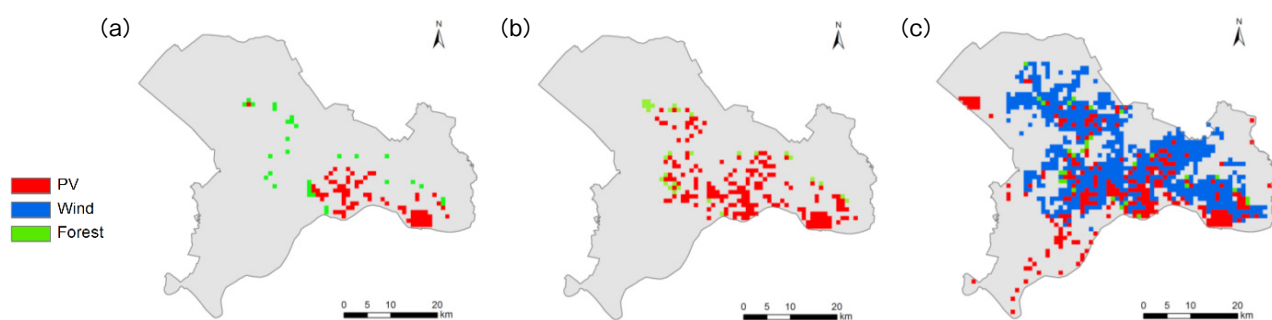


図 50 再生可能エネルギー導入目標：(a) 300 GWh/yr、(b) 500 GWh/yr、(c) 700 GWh/yr

環境研究総合推進費 S-6 にて得られた研究成果について、学会等での成果報告の他に、温暖化対策の実務を担当する政策決定者等や、今後低炭素社会シナリオを検討する途上国の研究者、政策担当者への成果のアウトリーチ活動を実施した。たとえば、2014 年 7 月 23 - 24 日に横浜で開催された ISAP にて、LoCARNet と共同して、これまで実施してきた低炭素シナリオ研究成果をもとに、アジア地域の諸国・諸機関が協力して、アジア地域の科学的低炭素発展政策形成のための知識創造・教育・伝達の一連のシステムを効果的に築き上げ、排出削減の野心向上を目指す国連気候変動枠組条約（UNFCCC）COP21 に向けた発信を行おうとしていることについて、インド、インドネシア、タイ、中国、ベトナム、マレーシアの研究者と共に研究成果を紹介した。また、2014 年 10 月 1 - 2 日には、低炭素社会研究ネットワーク（Low Carbon Society Research Network: LCS-RNet）年次会合に参加し、2050 年までの温室効果ガス排出量の大幅削減の技術的な可能性という観点から、COP21 へ「低炭素社会構築のための国際協力」に関する LCS-RNet 共同研究論文へのインプットを行った。

これらに加えて、これまで開発してきた国及び都市の低炭素シナリオ策定手法を、一連のマニュアル及びトレーニングコースとして整備し、タイのタイ温室効果ガス管理機構（TGO）気候変動国際研修センター（CITC）等で使用できるようにするとともに、実際に各国の研究者に対するモデル分析・ロードマップ策定のためのキャパシティビルディングを実施し、各国研究者との協働によって各国の社会経済事情や発展段階に応じたビジョン・ロードマップの策定を行った。一例として、ベトナムを対象にしたシナリオ分析の結果を示す。2030 年の CO₂ 排出量は、なりゆき（ベースライン）シナリオで 2005 年比 6.4 倍となる 521.9 MtCO₂、対策を取った場合のシナリオで 342.4 MtCO₂ となり、なりゆきより 30% 削減が可

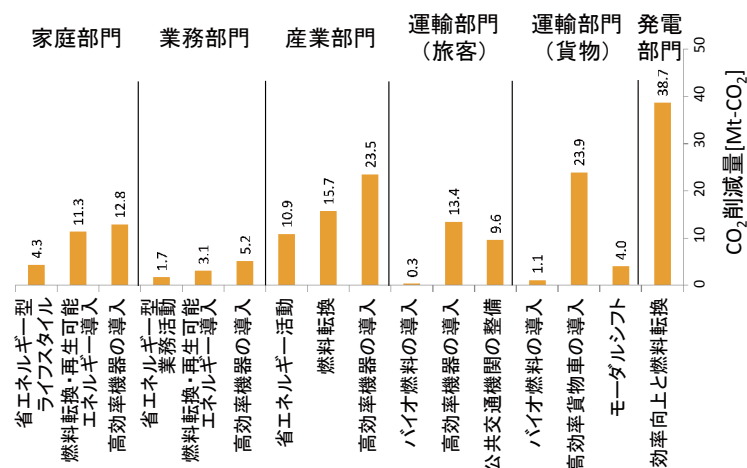


図 51 ベトナムにおける対策別の CO₂ 削減量

能となることを明らかにした。図 51 は各部門における主要な対策による CO₂ 削減量を示したものである。発電部門ではエネルギー効率の改善と石炭等から天然ガス等への燃料転換により 38.7 MtCO₂ の削減となった。このほか、農林業土地利用では、10 US\$/tCO₂eq 以下の低価格な対策で 42.7 MtCO₂ の削減が可能となることを提示した。2014 年 8 月 19 日に日本国環境省副大臣とベトナム天然資源環境副大臣との政策対話が開催され、本ベトナム低炭素社会シナリオ研究の成果を発信した。また、トレーニングマニュアル等は、COP20 にてマレーシア工科大学と共催する UNFCCC サイドイベントや展示ブースで成果を紹介し、広く報告した。

3) マレーシア・イスカンダル地方を対象とした低炭素社会計画策定支援

JST-JICA の SATREPS プロジェクトではマレーシアのイスカンダル地方を対象に日本の研究機関、マレーシアの研究機関や政府機関およびイスカンダル開発庁と共に、低炭素社会シナリオの開発とともにその実現に向けた計画策定の支援を行った。2012 年にとりまとめた Low Carbon Society Blue Print（低炭素社会ブループリント）に基づき、具体的な実現ロードマップの検討とシステム設計研究を実施した。本サブテーマでは、ロードマップのうちエネルギー・建築物分野と環境教育分野を担当し、図 52 に示すようにステークホルダーの同定と各年の実施・行動内容を分析して一連のガントチャートの形にとりまとめた。これらに加えて、工業地帯（Pasir Gudang 地域）と新規住宅開発地域（Bukit Batu 地域）において再生可能エネルギーと連携した低炭素型エネルギーシステムの具体設計を進めている。環境研究総合推進費 S-6 のもと開

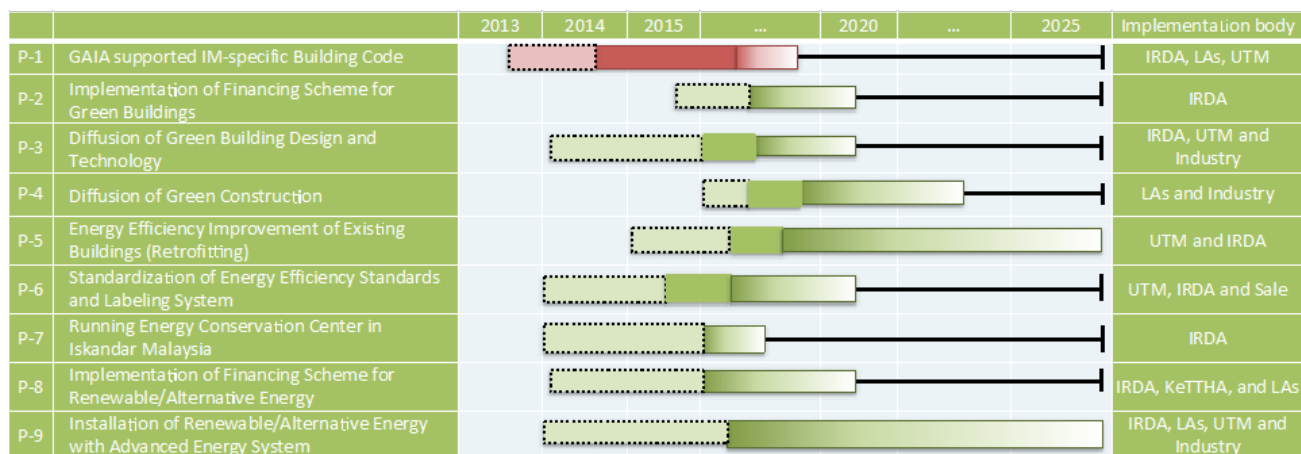


図 52 低炭素イスカンダルマレーシア実現ロードマップの例（エネルギー・建築物分野）

発したアジア各国・都市を対象とした低炭素シナリオや、JST-JICA の SATREPS プロジェクトのもと策定したマレーシア・イスカンダルの低炭素ロードマップについても、COP19 にてマレーシア工科大学と共催する UNFCCC 公式サイドイベントや展示ブース、日本パビリオンで成果を紹介し、広く報告した。

対策の実施にあたっては、イスカンダル開発庁だけではなく、イスカンダル地域内の 5 つの自治体によってそれぞれ施策が実施される必要がある。そこでこれらの自治体の職員と協力し、イスカンダル地域の低炭素社会シナリオを自治体毎に構築した。まず低炭素社会ビジョンをイスカンダル地域全体のビジョンと整合的に 5 つの自治体で構築しつつ、各地域の状況を反映するための手法・ツールを開発した。まず現在及び将来の社会経済指標をダウンスケーリングにより推計した。人口については 5 地域の人口を利用し（この合計はイスカンダル地域全体の人口と一致する）、産業別生産額については統計情報が十分でないため、得られた生産額の情報または就業者数等の指標から 5 地域への配分指標を産業別に推計し、これを利用してイスカンダル地域全体の生産額を配分した。こうして得られた人口・産業別生産額から旅客及び貨物の交通需要量、及び最終エネルギー需要量を各地域のパラメーターを乗じて推計する。低炭素対策については第一段階としてイスカンダル地域全体で導入を提案した低炭素対策をすべての自治体で一律に実施するものとして推計を行った。このようにすることで各自治体の社会経済状況にある程度反映しつつ、イスカンダル地域全体のビジョンと整合的な推計が可能となる。次に第二段階として各自治体において重点的に実施すべき低炭素対策やそれを実現するための施策・事業を検討するため、各自治体の職員等関係者とフォーカス・グループ・ディスカッションを行い、各自治体の状況や重要な政策課題との関連を検討して重点的に実施すべき施策やそうではない施策を抽出、これをツールの交通及びエネルギー需要関係のパラメーターに反映して将来のエネルギー需要量・二酸化炭素排出量等を再推計したのち、イスカンダル地域全体の目標と整合するように調整を施し、これをもとにアクション 5 つの自治体それぞれに適した低炭素社会ビジョンを構築した。

低炭素社会ブループリントの実施にあたり、アクション 6「低炭素社会ライフスタイル」の実現に向けて、日本で行われていた小学校向け低炭素社会プログラム（京都市のこどもエコライフチャレンジ）が、本サブテーマの文脈に即した形で、イスカンダル地域に導入展開され、2013 年には 23 校、2014 年には 80 校、2015 年には 223 校（全校）で実施された。これらの活動を支援するため、京都市のプログラム開発・実施の主体である気候ネットワークとイスカンダル地域で新たに設立された社会企業である IMKIKO の間で MoU が締結された。2015 年 2 月のイスカンダル地域関係者と京都市関係者等との協議で、対象範囲を高等教育、コミュニティに広げるほか、質の向上をはかり、継続的に実施できる体制を構築していく必要が指摘された。これらの要請を受けて、2016 年 1 月より、京都市および関連機関により JICA 草の根事業として当該地域の低炭素教育の拡充・向上が今後 3 年間のプログラムとして展開される。イスカンダル版エコライフチャレンジは、マレーシアで実際に実施されているという実績があるため、ベトナムやカンボジアはじめ、さまざまな国で関心を集めており、マレーシアの他の地域や ASEAN はじめ他の国々に普及展開する可能性がある。

また、本サブテーマでは、開発してきた一連の手法をマニュアルとして取りまとめ、2014 年 8 月にはマレーシア・ジョホールバル市、2014 年 9 月にはカンボジア・プノンペン市、2014 年 11 月にはベトナム・ハノイ市にて中央および地方の政策決定者や研究機関、ビジネスの関係者等を対象にトレーニング・ワークショップを開催した。これらの活動は、COP21 期間中の 2015 年 12 月 7 日に行われた UNFCCC 公式サイドイベント等で、広く報告した。

2.3.2 サブテーマ 2：日本及び世界の気候変動緩和策の定量的評価

(1) 目的と経緯

第 2 期中期計画において開発された日本モデル群、世界モデル群および要素モデル群で構成される統合評価モデル AIM を改良・拡充し、その適用を通じて気候変動緩和策の副次的な便益なども含め、世界および日本の低炭素社会実現にむけた排出経路や経済影響などを定量的に評価することを本サブテーマの目的としている。

日本における将来の温室効果ガスの削減目標については、2009 年 6 月の麻生総理大臣によって「2020 年までに 2005 年比 15% 削減（1990 年比 8% 削減に相当）」が、そして政権交代直後の 2009 年 9 月の鳩山総理大臣によって「2020 年までに 1990 年比 25% 削減」が発表された。それらの発表の背景にある中期目標検討委員会（2008 年－2009 年）や中期検討タスクフォース（2009 年）に第 2 期中期計画中の研究成果物を提出し、日本の削減目標の議論に貢献してきた。しかし、

2011年3月の東日本大震災と東京電力福島第一原子力発電所事故により、日本における安定的なエネルギー供給の議論が見直され、それに伴い、将来のGHG削減目標についても見直す必要があった。また、世界における温室効果ガスの将来削減目標については、2007年のIPCC第四次評価報告書第三作業部会において、将来排出シナリオの多様な分布が示され、カテゴリー1からカテゴリー6まで6つの温室効果ガス安定化濃度の分類と長期気温上昇予測などがまとめられた。特に、「産業革命以前と比べて世界の平均気温上昇が2℃以下」に相当する最も排出制約の厳しいカテゴリー1が政策立案者や研究者の注目を集めたが、そのシナリオ数が6つ（研究文献数としては3つ）と研究実績例が少なく、最も厳しい排出制約に関するさらなるシナリオ研究が指摘されていた。またIPCC第四次評価報告書の結果を受けて2009年のCOP15のコペンハーゲン合意にて、世界の長期的な平均気温上昇を産業革命以前と比べて2℃以内にする（以下、「2℃目標」と略）という認識が国際議論において留意された以降、2014年のIPCC第五次評価報告書に向けて、この「2℃目標シナリオ」の検討が求められていた。さらに、世界の長期シナリオ研究において、IPCC第四次評価報告書（2007）までは2000年に出版されたIPCC排出シナリオ特別報告書（SRES: Special Report on Emissions Scenarios）を基礎とした社会経済シナリオが用いられてきたが、その社会経済シナリオの将来の想定が現状の社会経済動向から外れているという指摘を受けて、新たな社会経済シナリオの作成が必要とされていた。

(2) 主な成果

第3期中期計画期間における本サブテーマでは、日本や世界を対象とした技術選択モデル（AIM/Enduse）、応用一般均衡モデル（AIM/CGE）等について改良を行い、新たな社会経済シナリオの作成や中長期の気候変動緩和策の定量的分析などを行った。5年間の研究成果を具体的に以下の5つに分類して整理する。

1) 日本における脱炭素化に向けた温室効果ガスの大幅削減シナリオに関する研究

環境研究総合推進費2A-1103および同2-1402を基礎として、日本を対象とした新しい社会経済シナリオの開発、社会構造変化も加味したわが国のマクロフレームの定量化、日本の2050年目標の実現にむけた2030年目標の評価、IPCC第五次評価報告書等の最新の知見を踏まえた世界の中長期の温室効果ガス排出経路におけるわが国への影響の評価などを実施した。日本技術選択モデル（AIM/Enduse [Japan] モデル）を用いた分析では、DDPP（Deep Decarbonization Pathways Project）に参画し、図53に示すようにわが国におけるGHG排出量の2050年大幅削減（2050年のGHG排出量を1990年比80%削減する）に向けた排出経路や技術別・部門別の要因分析等を行った。また、MILES（Modelling and Informing Low-emission Strategies）に参画し、図54に示すようにUNFCCC下において締約国が提出する「温室効果ガスの排出削減についての国別目標案（Intended Nationally Determined Contributions: INDC）」に向けた我が国の2030年の自主的な削減目標の達成、2050年のGHG大幅削減にむけた排出経路、エネルギーミックスおよび温室効果ガス排出削減目標の選択肢の議論に貢献した。

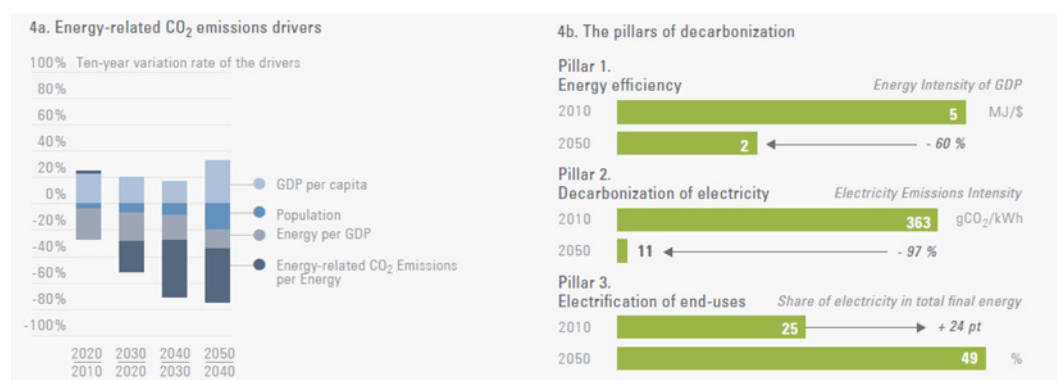


図53 DDPPにおける日本の2010年から2050年におけるエネルギー起因CO₂排出量の大幅削減シナリオの要因分析

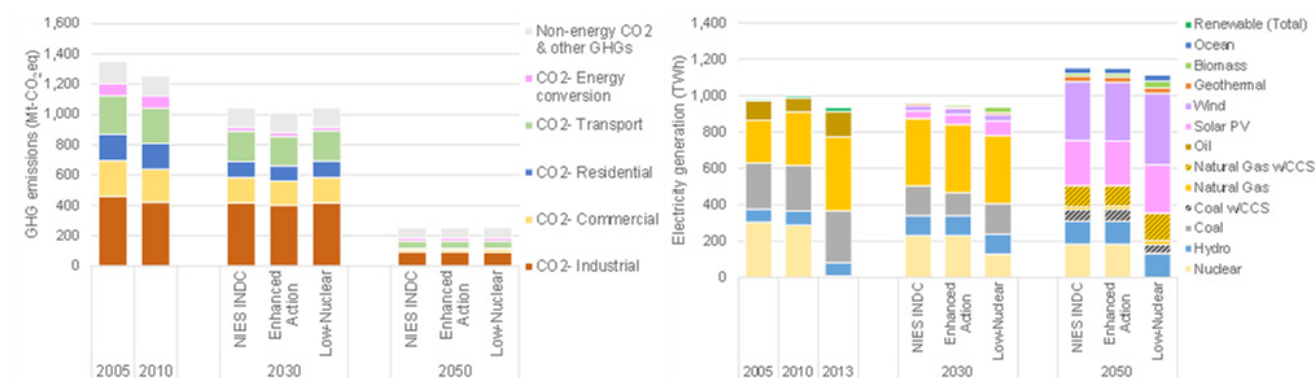


図 54 MILES における日本の大幅な GHG 排出削減に向けた 2030 年、2050 年の部門別削減量および電力構成

日本応用一般均衡モデル（AIM/CGE [Japan] モデル）を用いた分析では、これまでは個別に運用してきた技術選択モデルと応用一般均衡モデルについて、技術選択モデルを簡略化し、応用一般均衡モデルにおいても技術選択が可能となるようにモデルの改良を行い、さらに、東日本大震災後にみられた節電など需要側の行動変化についても加味して、2020 年におけるわが国の温室効果ガス削減の影響を評価した。以前の試算結果と比較して、現在から 2020 年までに対策にかけることのできる期間が短くなったことなどから、GDP への影響は大きくなるという結果が示された。また、東日本大震災後の電力需給の問題を詳細に取り扱うことを目的として電源開発モデルの開発を行い、短中期の原子力発電所の将来シナリオを折り込んだ電源構成や CO₂ 排出量変化の定量分析に着手した。

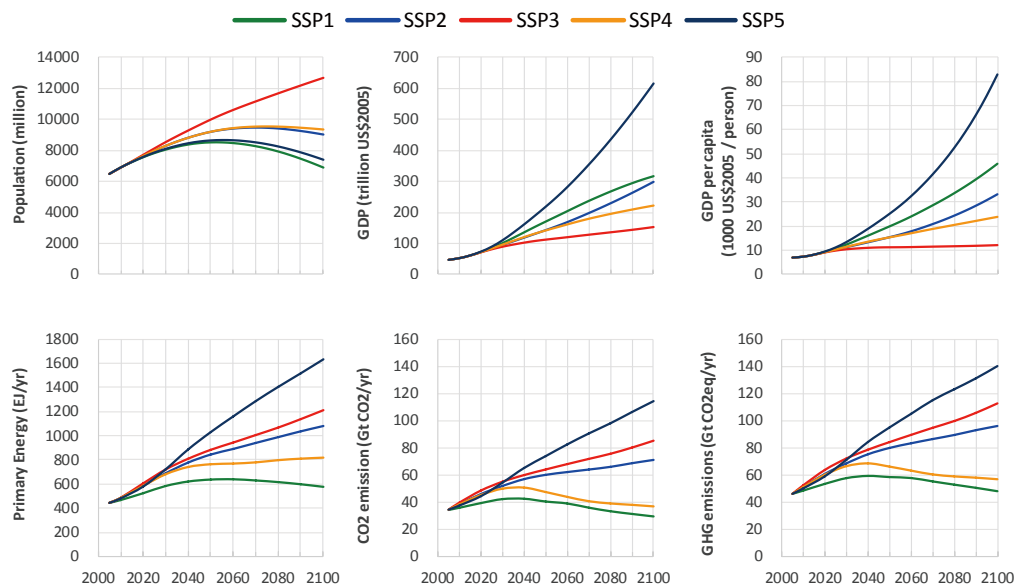
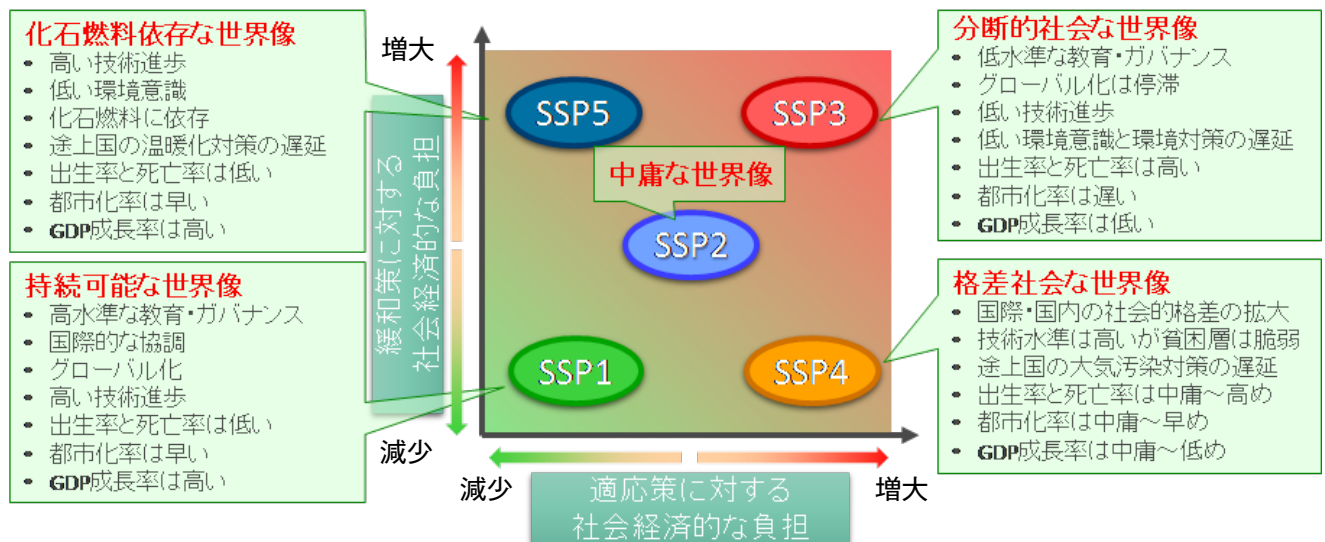
その他、国内における温暖化政策に対しては、環境省からの要請による国内排出量取引制度や温暖化対策税などこれまでも議論されてきた施策の効果についての試算（特に震災復興等も踏まえたもの）だけでなく、環境省中央環境審議会地球環境部会 2013 年以降の対策・施策に関する検討小委員会、経済産業省 総合資源エネルギー調査会 基本問題委員会、エネルギー・環境会議に対して、日本を対象とした技術選択モデルや応用一般均衡モデルを用いた試算結果を提供し、温暖化対策の側面を考慮したエネルギーの選択肢の議論に貢献した。

2) 世界における緩和策と適応策を考慮した新たな社会経済シナリオに関する研究

IPCC 第五次評価報告書に引用され、また従来の国際モデル比較研究で用いられてきた社会経済シナリオは 2000 年に出版された SRES シナリオを基礎としてきたが、出版年が古く社会経済の現状の動向とのズレが見られること、国際的な排出シナリオ研究コミュニティだけでなく気候変動問題に関する影響分野、適応分野の研究コミュニティも活用できるようなスケールのシナリオが必要となることなど、新たな社会経済シナリオの必要性が求められていた。そこで、IPCC 第五次評価報告書に向けて、統合評価モデルの国際的なコンソーシアム（IAMC: Integrated Assessment Modeling Consortium）を中心に、気候変動問題の影響についても評価するための新たな共通社会経済シナリオ（SSP: Shared Socio-economic Pathways）の検討が進められてきた（実際には作業が遅れ、第五次評価報告書には間に合わなかった）。本研究プロジェクトでは、世界応用一般均衡モデル（AIM/CGE [Global] モデル）を用いて、これらの国際的な各種会合に参加してシナリオの結果を提供するとともに、進捗を国内の影響分野の研究コミュニティに報告するなどの役割を担ってきた。世界応用一般均衡モデルによって、図 55 に示すような 5 つの社会経済像の定性的なシナリオの定量化を行い、また、緩和策と適応策を考慮したこれらの SSP シナリオをもとにした世界地域別の温室効果ガスの排出経路を図 56 のように定量化し、欧米の他の統合評価モデルとの計算結果の比較を行った。これらの新たな社会経済シナリオは、推進費 S-10、推進費 S-12、推進費 2-1402 等でも入力情報として使われ、世界モデルと同じ枠組みを用いて、アジア各国の個別施策の評価も併せて行った。

3) 世界における温室効果ガス安定化濃度の経路と 2℃目標シナリオに関する研究

環境研究総合推進費 2A-1103 および 2-1402 では、世界を対象とした新たな共通社会経済シナリオ SSPs で示された社会



経済像を基礎とし、IPCC 第五次評価報告書等の最新の知見を踏まえた世界の中長期の気候変動緩和策の定量的評価などを実施した。世界応用一般均衡モデル (AIM/CGE [Global] モデル) を用いた分析では、世界の GHG 排出量の中長期削減目標の実現にむけた各国の排出削減負担の評価について、各国に対する初期割当の違い (1 人あたり排出量均等化、GDP あたり均等化等) も考慮し、世界半減シナリオ達成時におけるアジアでの対策および排出量の内訳を示し、本研究プロジェクトのサブテーマ 1 に提供した。また、第 2 期中期計画で実施した気候モデルへの入力となる代表的濃度経路 (RCPs: Representative Concentration Pathways) を示した論文の記者発表 (<http://www.nies.go.jp/whatsnew/2011/20110926/20110926.html>) を 2011 年 9 月に行ったが、それら RCP シナリオと新たに作成した SSP シナリオを組み合わせ、世界の中長期の気候変動緩和策を評価した。特に、2℃ 目標シナリオに該当する代表的濃度経路 2.6 W/m² シナリオ (RCP2.6) においては、削減目標に到達しない (すなわち解が得られない) 社会像もあり、将来の社会経済の状況によっては産業革命以前と比べて世界の平均気温上昇を 2℃ 以下に抑えることができないことが明らかとなった。また、UNFCCC 締約各国が COP21 までに提出した INDCs を達成したときの 2030 年の世界の温室効果ガス排出量と 2℃ 目標を達成するような温室効果ガスの排

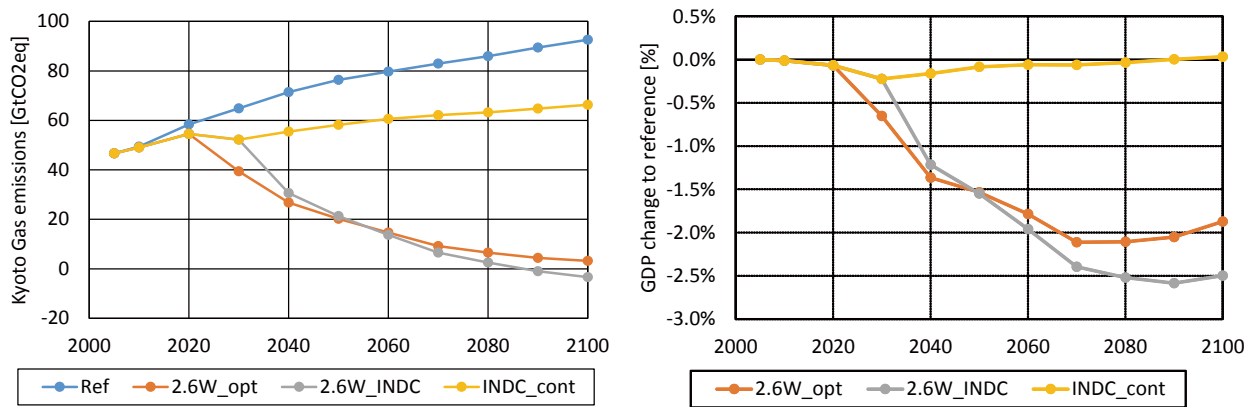


図 57 世界の温室効果ガス排出量経路と GDP 変化：なりゆきシナリオと 2℃目標シナリオ

出経路の比較分析を行った。図 57 にその結果を示す。INDCs は低炭素社会の実現に向けた第一歩として意味あるものがあるが、2℃目標の達成には不十分であり、2030 年以降大幅な削減が必要となる。一方、2030 年以降の取り組みを強化しない場合は、GHG 排出量は増加する結果となった。そのため、2℃目標の実現可能性は、INDCs の見直しや 2030 年以降の取り組み次第であり、特に排出量の増大が見込まれるアジアにおける取組が重要であることが分かった。

世界技術選択モデル（AIM/Enduse [Global] モデル）を用いた分析では、国際的なモデル比較研究である EMF27 用に参加し、世界の温室効果ガス濃度を CO₂ 換算で 450 ppm に安定化するシナリオ（2050 年世界半減シナリオに相当）について、各国の技術的な削減ポテンシャルを検討した。特に、発電部門における原子力や二酸化炭素隔離貯留技術（CCS: Carbon Dioxide Capture and Storage）に大きく依存しない 2050 年世界半減シナリオを検討したところ、高効率技術の導入促進および社会経済動態の変化によるエネルギーサービス需要量の低減効果などが見込まれる場合、技術的には達成は可能であるが費用が非常に高額となることを明らかになった。また、技術選択モデルを動学的最適化モデルに拡張したエネルギーシステムバックキャストモデルの改良を行い、技術選択を反映させた排出削減経路の計算も行った。

そのほか、世界モデル群については、国際モデル比較研究である EMF（Energy Modeling Forum）や AMPERE（Assessment of Climate Change Mitigation Pathways）等にも参画し、国際社会での低炭素社会に向けた世界の排出経路の議論に貢献した。

4) 世界における気候変動緩和策とその副次的な便益などの研究

環境研究総合推進費 S-12-2 を基礎として、気候変動緩和策に伴う副次的な便益の一つである大気汚染対策に関する定量的な評価を実施し、世界及びアジア主要国の大気汚染物質対策も評価できるように世界技術選択モデル（AIM/Enduse モデル）を改良するとともに、国別技術選択モデルについては地域分解能を省・州別とすることで地域特性も評価できるモデルの開発、長寿命温室効果ガス（LLGHGs: Long-lived Greenhouse Gases）と短寿命大気汚染物質（SLCPs: Short-lived Climate Pollutants）の削減効果を考慮した削減経路の評価などを検討した。世界技術選択モデル（AIM/Enduse [Global] モデル）を用いた分析では、まず SSP による社会経済シナリオを基礎として要素モデル群を用いて各種サービス需要量を推計し、地域別・部門別のエネルギーサービス需要量を満たしつつ、2℃目標シナリオを実現するように技術選択した場合の大気汚染物質（SO₂, NO_x, PM, CO など）や SLCP（CH₄, BC）の抑制効果について分析を行った。気候変動緩和策に伴う大気汚染物質、SLCP 削減については、図 58 に示すように特にアジア地域においてその効果が大きい。SSP3 シナリオでは、将来の SLCP 対策、大気汚染対策がうまく進まず、その導入レベルが現在の傾向程度で固定と想定したため、サービス需要量が増加するほど SO₂, PM_{2.5}, BC 等排出量は増加する。一方で SSP1 では 2030 年以降の温暖化対策・SLCP 対策・大気汚染対策の導入が現状よりも強化されていくと想定したため、SO₂, PM_{2.5}, BC 等排出量は削減傾向に向かう。しかし、CO₂ 排出量を見ると SSP1、SSP2、SSP3 のいずれも増加し、低炭素社会ではないため、SSP1 を基礎として 2050 年排出量が 2010 年比で半減程度となるように温暖化対策のみを強化したシナリオを検討すると、特に、大規模な燃料転換や省エネ技術の導入の促

— SSP3シナリオ(温暖化対策、大気汚染対策ともに対策停滞) — SSP1シナリオ(SSP2よりも対策を促進)
 — SSP2シナリオ(現在の傾向の延長上の中庸ななりゆき) — SSP1+GHG対策強化シナリオ(GHG対策の強化)

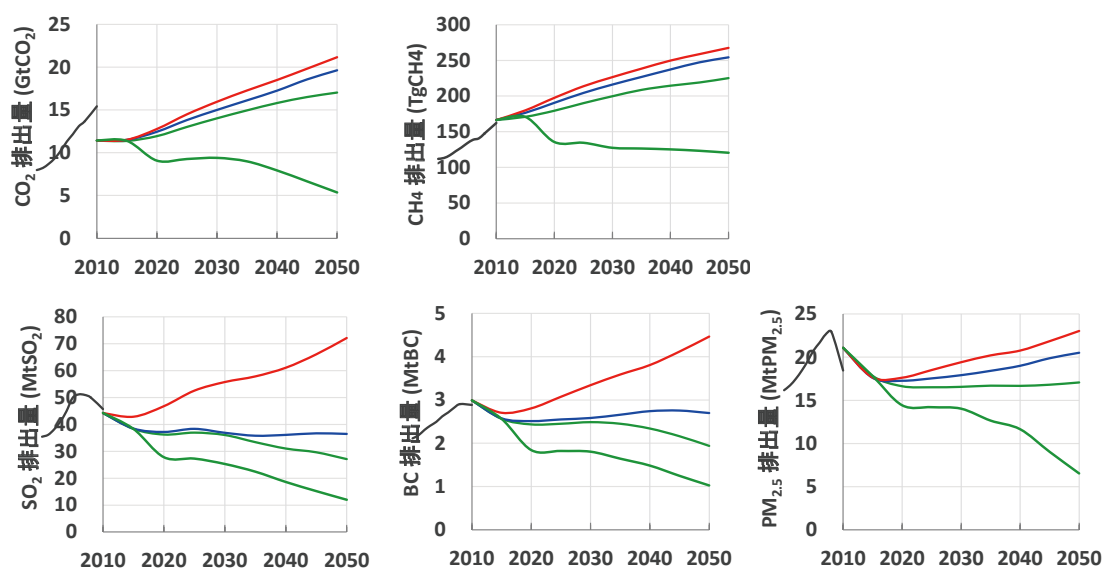


図 58 世界の中でのアジア地域における LLGHG、SLCP、大気汚染物質の排出量

進により、大気汚染物質や SLCP 排出量も同時に大幅に削減できることが示された。

その他、気候変動緩和策と適応策との関連については環境研究総合推進費 S-10-4、S-14-5 を中心に、本温暖化 PJ2 サブテーマ 3 と連携して、気候変動による農業生産性への影響を評価するためのモデルへの拡張や適応策も考慮した SSP シナリオの評価を実施している。

5) アジア途上国へのモデルの適用に向けた人材育成

モデルの開発と普及およびアジア主要国における若手研究者の人材育成を目的とし、本サブテーマで開発しているモデル群をアジア主要国に適用するためのトレーニングワークショップを毎年 1 回～2 回で開催してきた。第 3 期中期計画期間中に招聘した若手研究者の数は 75 名にのぼり、対象国は中国、インド、タイ、インドネシア、韓国、マレーシア、ベトナム、カンボジア、バングラディシュ、ネパール、台湾である。トレーニングを実施した若手研究者の協力を得て、アジア低炭素シナリオにおける各施策の定量的評価の結果は、本プロジェクトのサブテーマ 1 でも示されている。特に、タイでは、国としての適切な緩和行動（NAMA: Nationally Mitigation Actions）の評価に本モデル群が活用されており、また、インドネシアでも温室効果ガス排出削減目標の評価において本モデル群の使用が検討されており、人材育成を目的としたモデルトレーニングの実施は、研究のアウトリーチ活動としてもますます重要になっている。

2.3.3 サブテーマ 3：低炭素社会構築のための国際制度及び国際交渉過程に関する研究

(1) 目的と経緯

本研究プログラムが開始した 2011 年 4 月時点において、国際社会では、京都議定書第一約束期間が 2012 年に終了した後の国際制度に関して、京都議定書に代わる新たな国際制度の構築を模索していた。実際、同年秋に開催された気候変動枠組条約第 17 回会議（COP17）では、4 年間かけてすべての国が参加する新たな国際制度策定に向けて交渉を始め、2015 年の COP21 での合意を目指すという決定が採択された。そのため、本プログラムの実施期間が COP21 までの国際交渉の時期とほとんど重なることとなった。このような国際的な状況を踏まえ、本サブテーマでは、COP21 にてすべての国が合意できなおかつ実効性を伴う国際制度のあり方を検討し、最終的には合意文書案を提示することを目的とした。

(2) 主な成果

本サブテーマは、以下に示す3つの研究活動で構成される。第1は、アジア地域において低炭素社会を実現するために必要な政策パッケージに関する研究である。特に研究開始時点においては、次期国際枠組み交渉が2009年12月のコペンハーゲン会合（COP15）で決裂したことから、そもそも国連のもと200近い国で合意を目指すというプロセス自体に限界があるという意見があり、まずはアジア地域だけで自発的に低炭素社会に向かう方策を検討した。第2は、COP21のパリ会議を目指した国際制度に関する研究である。第3は、その中でも適応策に焦点をあてた研究である。気候変動に関しては排出削減（緩和策）が世間の注目を浴びるが、実際の国際交渉では、大半の途上国にとって緩和策より適応策が重要であり、緩和策と適応策のバランスが常に問われた。

1) アジア地域における低炭素社会作りに向けた政策パッケージに関する研究

2015年に採択されたパリ協定のような多国間合意が得られないと想定されていた時期に、アジア地域内で低炭素社会実現に有効な資金供給メカニズムを検討した。手順としては、資金の需要側と供給側を個別に分析し、両者が均衡しうるのかを検証した。

資金の需要側に関しては、アジア低炭素社会構築に必要な追加的投資額という観点から検討した。国際エネルギー機関（IEA）が毎年公表している Energy Technology Perspective（ETP）（2010）によると、世界全体の二酸化炭素排出量半減（2010年比）を目指す時、中国では2050年時点で、BaU比▲11.6 Gt_{CO₂}、インドではBaU比▲5.1 Gt_{CO₂}となる。そのような状態に至るために、2010～2050年の間に、両国で合計147,000米億ドルの追加投資が必要となるが、これらの対策により270,000億米ドルが省エネ等により節約となるという。長期的に累計して見れば支払い金額よりも節約分が多くなるが、通常、投資回収に40年もかけられないことから、投資は2010年から2040年までの間で終わらせることとし、他方で、節約分は2015年以降しか生じないと仮定した。2010年から2040年までの30年間の投資金額から節約分を差し引いた金額を期間内で均し、550億ドル／年と算出した。

資金の供給側に関しては、COP15でのコペンハーゲン合意の一部である「緑の気候基金」の長期資金について、資金調達方法やその運用に関して議論するために設立された「気候変動資金に関するハイレベル諮問グループ（AGF）」が公表した報告書に提示されていた資金調達方法をアジア地域で実施することを想定した。同報告書で提示された9種類の資金調達方法（排出許可枠のオークショニング、排出超過量のオフセットへの課金、国際バンカー燃料への課金、排出枠取引以外の炭素関連収入（炭素税等）、通貨取引課税、強制的拠出、開発銀行による活動、炭素市場オフセット、民間による投資）について、アジア地域で導入する場合のルールを独自に定め（アジアでは先進国が日本に限定されてしまうことから、先進国以外の国からの調達も一部で取り入れた）、期待される資金調達金額を試算した。また、表4に示すように、供給方法ごとに、主要な支払い者を推定することにより、制度の受け入れられやすさ等についても補足的に評価した。

表4の結果から、ここで挙げた資金供給のための制度をいくつか組み合わせることによって、資金需要量を満たす可能性を示すことができた。毎年550億ドルというのは極めて高額であるが、アジア地域内で合意しうる水準で複数の制度を組み合わせれば、不可能な数字ではない。また、先述の点を満たすためには、アジア地域のすべての国が、それぞれの経済水準に応じて資金供給に協力する必要があることも明らかとなった。現在の条約で規定されている附属書II国だけでは、少なくともアジア地域では最早、問題解決に必要な資金は供給できなくなっている。最後に、民間資金の規模が明らかに大きいことも示された。民間資金を効果的に引き出すために公的資金を用いる工夫が不可欠である。アジア地域内での低炭素社会構築に関するインフラ整備への民間投資を政府がバックアップする制度や、省エネ・代エネ製品が他の製品と比べて優遇される制度の構築等が有効である。

2) 2020年以降の新たな国際制度に関する研究

気候変動枠組条約の下での将来枠組みに関する国際交渉が難航する状況下において、国際合意達成が可能な制度案を提示するために、国外の専門家を対象としたウェブ上のアンケート調査を2013、2014、2015年と3年にわたり実施した。1回目のアンケート調査の結果を踏まえて2回目の調査票を作成し、同様に2回目の結果を3回目の基礎とすることで、大

表4 アジア地域における資金供給量の推定

資金調達方法	金額	政策導入の効果および国による受容性
(1) 排出許可枠のオークショニング	23～117億ドル	詳細ルール次第だが、これから排出量の増加が予想される中国やインド等にとって不利な制度であるため、受け入れられづらい。中印等にとって受け入れ可能とするためには、経済発展水準の低い国により多くの排出枠を無償配布するといった工夫が必要である。
(2) 排出超過量のオフセットへの課金	4～20億ドル	オフセット分に対してのみの課金（CDMのshare of proceedsに近い考え方）であるため、比較的受容されやすいが、多くの収入は見込めない。また、削減目標を決める時点で、厳しい排出量目標を掲げる意志を削ぐという課題がある。
(3) 国際バンカー燃料への課金	航空機燃料 4～12億ドル 船舶 75～150億ドル	先進国と途上国との格差を制度に反映させるのが困難な点が残されているが、現状では、欧米の旅客の比率が多く、アジアとしてのシェアは高くない。今後、アジアの割合は飛躍的に増えていくものの、世界合計と比べると資金量は多くない。
(4) 排出枠取引以外の炭素関連収入（炭素税等）	炭素税で 40億ドル、補助金削減で 12～32億ドル	税率が低い場合、収入自体はそれほど多くないが、排出行動を変えるインセンティブという別の効果がある。化石燃料への補助金の撤廃は、アジア地域制度とするよりも、各国内の国内政策として実施することが望ましい。
(5) 通貨取引課税	28～240億ドル	収入が確実に得られる制度としては期待できるが、気候変動とは直接関連性のない対象への課金となる。また、現在為替市場の参加者の多くが先進国の主体であるため、アジア地域に限定した場合の金額の大きさは未定。
(6) 強制的拠出	360億ドル	金額は多いが、先進国等拠出国がこの案をそのまま受け入れる可能性は低い。
(7) 開発銀行による活動	約10億ドル	拠出先の決定における手続き等で時間がかかるといった手続きコストが大きい割には金額が小さいことが難点といえる。
(8) 炭素市場オフセット	152～200億ドル	排出削減目標の提示と徹底的な目標達成が不可欠。現状を見る限り受容性は低いか。
(9) 民間による投資	2000～3000億ドル	他の方法と比べて金額が大幅に多い。今後とも多くの国の政府では厳しい財政事情が続くと予想される中で、民間の役割は増加し続けるだろう。

まかな構成のところからより具体的な内容へと段階的に踏み込んでいくことが可能となり、デルファイ法と類似の調査手法としての有用性を示すことができた。また、アンケート調査の結果を毎回英文レポートとして公表し、ホームページからダウンロード可能とするなど、アウトリーチに努めた。さらには、COP19期間中のサイドイベントや、国内での専門家意見交換会の開催により、専門家からの意見の集約にも努めた。

第1回目のアンケート調査を実施した2013年1月時点では、2012年末にCOP18がドーハで開催され、過去から続いていた交渉プロセスが一段落し、パリ合意に向けて本格的に交渉が始動するタイミングだった。したがって、各国ともおぼろげながらパリ合意に対する選好は持ちながら、国の公式見解としては表明していない段階である。回答者個人の意見ではなく、回答者が帰属する国の意見を推測ベースで構わないので回答してほしいという依頼で約100名の専門家から回答を得た。以下、その中からいくつか結果を示す。

新国際枠組みの法形式に関する選好としては、表5に示すように議定書を期待する声が多かったが、3割程は、COP決定や政治宣言等、一般的には「法的効力を有する」とは認識されない方形式が望ましいと考えていることが分かった。ただし、後者の法形式が選択された場合であっても必ずしも当該枠組みが法的効力を有さないわけではない。

表5 望まれる法形式（カッコ内は各グループ内での割合、%）

	全体	附属書I国	欧州	日・露	米国等	非附属書I国
A. 議定書	64	39 (60.9)	26	11	2	25 (69.4)
B. COP 決定	20	14 (21.9)	4	6	4	6 (16.7)
C. 政治宣言	12	8 (12.5)	1	0	7	4 (11.1)
D. その他	4	3 (4.7)	1	1	1	1 (2.8)

表6 新しい国際枠組み合意達成後の京都議定書（カッコ内は各グループ内での割合、%）

	全球	附属書 I 国	非附属書 I 国
A. 新しくできる枠組みと並行して存続し続ける	25	11 (17.2)	14 (38.9)
B. 京都議定書は終了し、新しい枠組みと統合される	50	41 (64.1)	9 (25.0)
C. 京都議定書は存続するが、実質的な機能は失われる	23	10 (15.6)	13 (36.1)
D. その他	2	2 (3.1)	0 (0.0)

表7 自国にとって好ましいと受け止められる排出削減／抑制目標

	全球	附属書 I 国	欧州	日・露	米国等	非附属書 I 国
A. 法的拘束力を持つ排出削減目標	60	40 (62.5)	29	8	3	20 (55.6)
B. 拘束力を伴わない自主的な削減目標	35	21 (32.8)	2	10	9	14 (38.9)
C. 削減目標について言及しない	3	3 (4.7)	1	0	2	0 (0.0)
D. その他	2	0 (0.0)	0	0	0	2 (5.6)

新枠組みが合意された場合の京都議定書に関して、表6に示すように回答者の半数が「京都議定書は終了し、新しい枠組みと統合される」と予想している。しかし、その多くは附属書I国であり、非附属書I国の7割以上は京都議定書の存続を期待していた。日本国内では当時、新枠組みが京都議定書と統合されるという認識が一部で見られていたが、それを当然かのように交渉すると非附属書I国を刺激すると懸念された。

自国の排出削減目標に関する選好としては、表7に示すように6割の回答者が「法的拘束力を持つ排出削減目標」を自国が新枠組みの中に含まれることを望んでいると答えた。その割合は附属書I国・非附属書I国間で大差はなかった。途上国に対しても緩やかな目標であればそれを辞さない途上国がいると解釈できた。途上国は自らに目標を課すことで、先進国に対してより厳しい削減目標へのコミットメントを求めるかも知れないとも予想された。

以上の結果を踏まえ、第2回調査を2014年1月に実施し、さらに2015年1月、日本国内の専門家意見交換会および3回目のウェブアンケート調査を実施した後、これまでの調査の結果から、COP21にて合意可能かつ気候変動抑制に実効性を持つ合意文書案として、表8に示す2種類（オプションA及びオプションB）提案した。

ここでは実際の交渉で主な争点となっていた点について解決策を見出している。例えば、(1) 枠組みの構成要素について、交渉では国際法としてのステータスが高い「議定書」とすべきだという主張とより敷居が低く多くの国が参加しやすい「COP決定」がよいという主張が拮抗していたが、オプションA、Bともに、簡潔な議定書と具体的な記述を含めたCOP決定のパッケージという体裁を提案している。両案が異なるのは、(2) 緩和に関する約束、つまり排出削減目標がこの文書の中でどのように位置づけられるかという点だった。京都議定書のように附属書に国の排出削減目標をリストとして示すと、目標値そのものに拘束力が生じるが、その分、一部の国では受け入れづらいことになる。逆に議定書の外に削減目標を設けると、目標自体に拘束力がなく、自主目標のように解釈されることになる。それぞれに書き込まれる内容が違ってくる。このようにBの方が目標が緩くなる分、事前協議や(7) 透明性、(6) 資金に関してより早い動員に向けた取り組み、等の工夫をしている。

実際の交渉の結果合意されたパリ協定は、オプションBに極めて近い構造になった。本研究の成果が実際にどれくらい多くの交渉担当者の眼に触れたのかは分からないが、予想としては近いところを示すことができたと評価できる。表8ではB案に関して、排出削減目標を今後も変更することが可能なため、発効が遅れることが懸念として指摘されているが、実際には、米国の大統領選のタイミング等政治的な理由から、COP21時点の予想をはるかに上回るスピードで発効する可能性が高まっている。他方で、各国とも一度提出した削減目標をさらに厳しいものに変更しようとする国がない中、今までに出された目標を合計しても長期的に目指すべき2℃目標達成には不十分である点は現実でも直面している課題として残っている。2016年以降、国の政策導入の進捗を定期的にチェックするプロセスが重要となる。

表 8 2つのオプション案の比較

枠組みの概要	オプション A	オプション B
(1) 枠組みの構成要素	コア文書（法的文書）+ COP21 での COP 決定（+ COP22 以降の COP 決定） コア文書は、本文と附属書に分かれる。	
(2) 国の緩和に関する約束	コア文書の本文にて、約束達成を目指した政策導入が義務付けられる。	数年後に確定する約束の達成を目指し、定期的な報告審査の実施が義務付けられる。
(3) 約束が書かれる文書	コア文書の附属書。	2016-17 年の COP 決定。
(4) 約束の事前協議	なし。ただし 2018 年に見直し。	2016-17 年に実施。必要に応じて目標を見直す。
(5) 炭素市場利用	重複などが回避されればフル活用が認められる。	絶対排出削減目標を提示した国のみ排出量取引可能。
(6) 資金	2019 年までに 2030 年に向けた資金動員総額を決定する。	2018 年までに先進国の資金動員の状況についてレビュー。
(7) MRV	カンクン合意のプロセス継続。	統一透明化システムの確立。
課題	約束草案の水準の妥当性や公平性を議論しないで確定してしまうため、長期目標達成が危ぶまれる。約束草案がコア文書の附属書に書かれると、目標見直しのたびに附属書改正の手続きが必要。コア文書の附属書の改正手続きの簡素化や、早期の目標見直しが必要。	発効のタイミングが遅れ、各国の政策実施のタイミングも遅れるおそれがある。また、事前協議しても国の目標が深掘される保証はない。目標が COP 決定に書かれるため、法的拘束力がない。2016 年以降の政策導入の進捗を定期的に報告する MRV 手続きが重要。

3) 国際枠組みにおける適応策のあり方に関する研究

京都議定書下の適応基金と気候変動影響への対応力強化のためのパイロット・プログラム（PPCR）の資金供与実績を比較した結果、適応基金の被支援プロジェクトのホスト国は、脆弱国への支援が謳われているにもかかわらず、各種指標で脆弱国リストの上位に入っていない国が多いことがわかった。適応基金及び PPCR には、それぞれ、資金配分の効率性や衡平性のいずれかを重点化する特徴があり、これら適応関連資金供与メカニズムの運用から学んだ教訓を緑の気候基金の制度設計に活かしていく必要があることを示した。

気候変動の悪影響に特別に脆弱な途上国における損失及び被害に対処する制度的取り決めに関する合意がなされることになっていた COP19（2013 年、ワルシャワ（ポーランド））では、「気候変動の悪影響に伴う損失・被害に関するワルシャワ国際メカニズム」が設置され、同メカニズムの運営組織、同メカニズムの機能の概要（データや優良事例等の知見の共有、国連を含む条約内外の関係機関との連携、資金・技術・能力構築含む活動と支援の強化）、COP22（2016 年）における同メカニズムの見直し等について合意がなされた。今後、長期目標のレビューの作業と損失と被害に関する作業がどのように連携するかに注目する必要があることを示した。

文献等調査を基に、適応関連資金供与において、衡平性への配慮がどのように行われてきたかを分析した。京都議定書下の適応基金については、適応基金理事会において、気候変動影響に対する脆弱性に応じた資金配分方法の採用が検討されたが、実務的に運用可能なガイドラインを採用することができなかったことが明らかになった。また、将来、適応資金へのニーズが増大し、資金源が不足することが見込まれるが、現在、適応基金下では、配分対象プロジェクトを先着順で検討し、決定している。様々な脆弱性を有する国々の様々な適応ニーズに応えるためには、ひとつの基金の中で、国のタイプやセクター別に予算を設定することが解決策のひとつと考えられることを指摘した。

[資 料]

1 研究の組織と研究課題の構成

1.1 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（平成 25 年 3 月まで）

向井人史（平成 25 年 4 月から）

副センター長

向井人史（平成 25 年 3 月まで）

三枝信子（平成 25 年 4 月から）

上席主席研究員

野尻幸宏

安中さやか

炭素循環研究室

室長（併任）

向井人史

梁 乃申

寺尾有希夫

奈良英樹

中岡慎一郎（平成 24 年 3 月まで）

藍川昌秀

後藤誠二郎

須永温子

野村渉平

地球大気化学研究室

室長

谷本浩志

杉田考史

近藤文義（平成 26 年 6 月まで）

大森裕子

池田恒平

岡本祥子

衛星観測研究室

室長

横田達也

森野 勇

吉田幸生

井上 誠

野田 響（平成 27 年 4 月から）

菊地信弘

山下洋介

中前久美

Eric Albert Dupuy

岡林裕介

物質循環モデリング・解析研究室

室長

Shamil Maksyutov

伊藤昭彦

	中山忠暢
	齊藤誠
	Belikov Dmitry
	Vinu Valsala
	金 憲淑
	佐伯田鶴
	石澤みさ
	横井孝暁
	Hayyan Alsibai
	Rajesh Janardanan
	高木宏志
	飯尾淳弘
	仁科一哉
	野田 響（平成 27 年 3 月まで）
	千田昌子
気候変動リスク評価研究室	
室長	江守正多
	花崎直太
	横畠徳太
	塩竈秀夫（平成 27 年 3 月まで）
	田中克政
	阿部 学
	石崎安洋
	Kuno Strassmann
	眞崎良光
気候モデリング・解析研究室	
室長	野沢 徹（平成 25 年 3 月まで）
	小倉知夫
	塩竈秀夫（平成 27 年 4 月から）
	川瀬宏明
	釜江陽一
（陸域モデリング担当）	
主席研究員	山形与志樹
	安立美奈子
	中道久美子
	庄山紀久子
	瀬谷 創
	加藤悦史
	村上大輔
大気・海洋モニタリング推進室	
室長	町田敏暢
	笹川基樹

	中岡慎一郎（平成 24 年 4 月から） 宮崎千尋
陸域モニタリング推進室	
室長	三枝信子 高橋善幸 平田竜一 高橋厚裕 Pingchun Habura
地球環境データベース推進室	
	白井知子
主席研究員	遠嶋康徳 近藤文義（平成 26 年 7 月から）
生物・生態系環境研究センター 環境ストレス機構解明研究室	
	唐 艶鴻 沈 妙根 富松 元
環境計測研究センター	
フェロー	横内陽子（平成 26 年 4 月から）
動態化学研究室	
室長	横内陽子（平成 26 年 3 月まで） 荒巻能史 斉藤拓也
環境情報解析研究室	
	小熊宏之
社会環境システム研究センター	
	センター長 原澤英夫 フェロー 甲斐沼美紀子
環境経済・政策研究室	
室長	日引 聡 久保田泉 岡川 梓
統合評価モデリング研究室	
室長	増井利彦 高橋 潔 花岡達也 金森有子 明石 修 藤森真一郎

持続可能社会システム研究室
室長

申 龍熙
長谷川知子
Su Xuanming
田中朱美
岩渕裕子
Dai Hancheng
Xing Rui
Park Chan
Mittal Shivika
Liu Jingyu

亀山康子
脇岡靖明（平成 26 年 3 月まで）
藤野純一
芦名秀一
五味馨
加用現空
森田香菜子
Diego Silva Herrán
須田真依子
朝山由美子
亀井未穂
白木裕斗
本城慶多
Tran Thanh Tu

環境都市システム研究室
室長

脇岡靖明（平成 26 年 4 月から）
Zhang Runsen

資源循環・廃棄物研究センター
国際資源循環研究室

南齋規介

[B 客員研究員]

野沢 徹（岡山大学）

（平成 25 年度～平成 27 年度）

1.2 研究課題と担当者

プログラム総括	江守正多
プロジェクト1	温室効果ガス等の濃度変動特性の解明とその将来予測に関する研究
プロジェクトリーダー	向井人史
サブテーマ1	大気観測によるグローバルな GHG 等の発生／吸収量分布評価に関する研究 向井人史・町田敏暢・野尻幸宏・寺尾有季夫・藍川昌秀・谷本浩志・杉田孝史・横田達也・森野 勇・吉田幸生・Shamil Maksyutov・伊藤昭彦・中山忠暢・齊藤 誠・笹川基樹・白井知子・遠嶋康徳・横内陽子・荒巻能史・斉藤拓也・奈良英樹・安中さやか・須永温子・野村渉平・近藤文義・大森裕子・池田恒平・岡本祥子・井上 誠・野田 響・菊地信弘・山下洋介・中前久美・Eric Albert Dupuy・岡林裕介・Belikov Dmitry・Vinu Valsala・金 憲淑・佐伯田鶴・石澤みさ・横井孝暁・Hayyan Alsibai・Rajesh Janardanan・高木宏志・飯尾淳弘・仁科一哉・千田昌子・
サブテーマ2	GHG 等フラックス及びその関連指標観測による海洋、陸域の発生 / 吸収量評価と将来予測に関する研究 三枝信子・梁 乃申・高橋善幸・Shamil Maksyutov・伊藤昭彦・平田竜一・中岡慎一郎・須藤誠二郎・宮崎千尋・高橋厚裕・Pingchun Habura・唐 艶鴻・沈 妙根・富松 元・小熊宏之
プロジェクト2	地球温暖化に関わる地球規模リスクに関する研究
プロジェクトリーダー	江守正多
サブテーマ1	地球規模リスクに関わる将来予測の理解と翻訳 江守正多・野沢徹*・小倉知夫・花崎直太・横畠徳太・塩竈秀夫・田中克政・阿部 学・石崎安洋・Kuno Strassmann・川瀬宏明・釜江陽一・眞崎良光
サブテーマ2	地球規模リスクに関わる統合的空間分布モデリング 山形与志樹・伊藤昭彦・安立美奈子・中道久美子・庄山紀久子・瀬谷創・加藤悦史・村上大輔
サブテーマ3	地球規模リスクの管理方策の検討 高橋潔・増井利彦・亀山康子・肱岡靖明・青柳みどり・久保田泉・藤森真一郎・申 龍熙・森田香菜子・長谷川知子・Su Xuanming・田中朱美・朝山慎一郎
プロジェクト3	低炭素社会に向けたビジョン・シナリオ構築と対策評価に関する統合研究
プロジェクトリーダー	増井利彦
サブテーマ1	アジア低炭素社会シナリオ開発及び社会実装に関する研究 藤野純一・芦名秀一・五味馨・Diego Silva Herrán・加用現空・須田真依子・朝山由美子・本城慶多・Tran Thanh Tu・亀井未穂・南齋規介
サブテーマ2	日本及び世界の気候変動緩和策の定量的評価 花岡達也・原澤英夫・甲斐沼美紀子・日引聡・肱岡靖明・高橋潔・金森有子・岡川梓・藤森真一郎・明石修・長谷川知子・Dai Hanchng・Park Chan・Shivika Mittal・白木裕斗・Xing Rui・Liu Jingyu・岩淵裕子
サブテーマ3	低炭素社会構築のための国際制度及び国際交渉過程に関する研究 亀山康子・久保田泉・森田香菜子

(注) *客員研究員

2 研究成果発表一覧

2.1 誌上発表

発表者・(刊年)・題目・掲載誌・巻(号)・頁

(1) プロジェクト1：温室効果ガス等の濃度変動特性の解明とその将来予測に関する研究

阿部有希子, 佐藤明, 菅原泉, 梁乃申, 寺本宗正 (2014) 多摩演習林におけるスギ人工林での伐採前後の土壌呼吸速度の変化. 関東森林研究, 65 (2), 293-296

安立美奈子, 伊藤昭彦 (2015) 熱帯林の土地利用変化に伴う生態系サービスの変化. 日本生態学会誌, 65, 135-143

Aguilos M., Takagi K., Liang N., Watanabe Y., Teramoto M., Goto S., Takahashi Y., Mukai H., Sasa K. (2013) Sustained large stimulation of soil heterotrophic respiration rate and its temperature sensitivity by soil warming in a cool-temperate forested peatland. *Tellus B*, 65, 20792, <http://dx.doi.org/10.3402/tellusb.v65i0.20792>

Aguilos M., Takagi K., Liang N., Ueyama M., Fukuzawa K., Nomura M., Kishida O., Fukazawa T., Takahashi H., Kotsuka C., Sakai R., Ito K., Watanabe Y., Fujinuma Y., Takahashi Y., Murayama T., Saigusa N., Sasa K. (2014) Dynamics of ecosystem carbon balance recovering from a clear-cutting in a cool-temperate forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 197, 26-39

Aikawa M., Hiraki T., Mukai H. (2014) Precipitation chemistry and ozone and sulfate concentrations in the ocean atmosphere observed by multi-year cruising in East Asia and West Oceania (35°N-35°S, 100°E-135°E) in August and September. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 71, 65-78, [Doi:10.1007/s10874-014-9281-1](https://doi.org/10.1007/s10874-014-9281-1)

Aikawa M., Kajino M., Hiraki T., Mukai H. (2014) The contribution of site to washout and rainout: Precipitation chemistry based on sample analysis from 0.5 mm precipitation increments and numerical simulation. *Atmospheric Environment*, 95, 165-174

Aramaki T., Tanaka S.S., Kushibashi S., Kim Y.-I., Kim C.-J., Hong G.-H., Senju T. (2013) Spatial distribution of radiocarbon in the southwestern Japan/East Sea immediately after bottom water renewal. *Radiocarbon*, 55 (2-3), 1675-1682

東健太, 平野高司, 寺本宗正, 梁乃申 (2013) 植生遷移が進む森林跡地の CO₂フラックスに与える環境要因の影響. 北海道の農業気象, 65, 23-31

Basu S., Krol M., Butz A., Clerbaux C., Sawa Y., Machida T., Matsueda H., Frankenberg C., Hasekamp O.P., Aben I. (2014) The seasonal variation of the CO₂ flux over Tropical Asia estimated from GOSAT, CONTRAIL, and IASI. *Geophysical Research Letters*, 41, 1809-1815, [doi:10.1002/2013GL059105](https://doi.org/10.1002/2013GL059105)

Belikov D.A., Maksyutov S., Krol M., Fraser A., Rigby M., Bian H., Agusti-Panareda A., Bergmann D., Bousquet P., Cameron-Smith P., Chipperfield M. P., Fortems-Cheiney A., Gloor E., Haynes K., Hess P., Houweling S., Kawa S. R., Law R. M., Loh Z., Meng L., Palmer P.I., Patra P. K., Prinn R. G., Saito R., Wilson C. (2013) Off-line algorithm for calculation of vertical tracer transport in the troposphere due to deep convection. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 13 (3), 1093-1114

Belikov D.A., Maksyutov S., Sherlock V., Aoki S., Deutscher N. M., Dohe S., Griffith D., Kyrö E., Morino I., Nakazawa T., Notholt J., Rettinger M., Schneider M., Sussmann R., Toon G. C., Wennberg P. O., Wunch D. (2013) Simulations of column-average CO₂ and CH₄ using the NIES TM with a hybrid sigma-isentropic ($\sigma - \theta$) vertical coordinate. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 12, 8053-8106, [doi:10.5194/acpd-12-8053-2013](https://doi.org/10.5194/acpd-12-8053-2013)

Belikov D.A., Maksyutov S., Yaremchuk A., Ganshin A., Kaminski T., Blessing S., Sasakawa M., Starchenko A. (2015) Adjoint of the Global Eulerian-Lagrangian Coupled Atmospheric transport model (A-GELCA v1.0): development and validation. *Geoscientific Model Development Discussions*, 8, 5983-6019

Berchet A., Pison I., Chevallier F., Paris J.-D., Bousquet P., Bonne J.-L., Arshinov M.Y., Belan B.D., Cressot C., Davydov D.K., Dlugokencky E.J., Fofonov A.V., Galanin A., Lavrič J., Machida T., Parker R., Sasakawa M., Spahni R., Stocker B.D., Winderlich J. (2014) Natural and anthropogenic methane fluxes in Eurasia: a meso-scale quantification by generalized atmospheric inversion. *Biogeosciences Discussions*, 11 (10), 14587-14637

Berchet A., Pison I., Chevallier F., Paris J.-D., Bousquet P., Bonne J.-L., Arshinov M.Y., Belan B.D., Cressot C., Davydov D.K., Dlugokencky E.J., Fofonov A. V., Galanin A., Lavric J., Machida T., Parker R., Sasakawa M., Spahni R., Stocker B.D., Winderlich J. (2015) Natural and anthropogenic methane fluxes in Eurasia: a mesoscale quantification by generalized atmospheric inversion. *Biogeosciences*, 12, 5393-5414

- Bohn T.J., Melton J.R., Ito A., Kleinen T., Spahn R., Stocker B.D., Zhang B., Zhu X., Schroeder R., Glagorev M.V., Maksyutov S., Brovkin V., Chen G., Denisov S.N., Eliseev A.V., Gallego-Sala A., McDonald K.C., Rawlins M.A., Riley W.J., Subin Z.M., Tian H., Zhuang Q., Kaplan J.O. (2015) WETCHIMP-WSL: Intercomparison of wetland methane emissions over West Siberia. *Biogeosciences*, 12, 3321–3349, DOI: 10.5194/bg-12-3321-2015
- Bruhwyler L., Dlugokencky E., Masarie K., Ishizawa M., Andrews A., Miller J., Sweeney C., Tans P., Worthy D. (2014) CarbonTracker-CH₄: an assimilation system for estimating emissions of atmospheric methane. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14 (16), 8269–8293
- Chen Z., Yu G., Ge J., Sun X., Hirano T., Saigusa N., Wang Q., Zhu X., Zhang Y., Zhang J., Yan J., Wang H., Zhao L., Wang Y., Peili S., Zhao F. (2013) Temperature and precipitation control of the spatial variation of terrestrial ecosystem carbon exchange in the Asian region. *Agricultural and Forest Meteorology*, 182–183, 266–276
- Crevoisier C., Nobileau D., Armante R., Crépeau L., Machida T., Sawa Y., Matsueda H., Schuck T., Thonat T., Pernin J., Scott N. A., Chédin A. (2012) The 2007–2011 evolution of tropical methane in the mid-troposphere as seen from space by MetOp-A/IASI. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 12, 23731–23757, doi:10.5194/acpd-12-23731-2012
- Crevoisier C., Nobileau D., Armante R., Crépeau L., Machida T., Sawa Y., Matsueda H., Schuck T., Thonat T., Pernin J., Scott N.A., Chédin A. (2013) The 2007–2011 evolution of tropical methane in the mid-troposphere as seen from space by MetOp-A/IASI. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 13, 4279–4289, doi:10.5194/acpd-13-4279-2013
- Crisp D., Fisher B.M., O'Dell C., Frankenberg C., Basilio R., Bosch H., Brown L.R., Castano R., Connor B., Morino I. et al. (2012) The ACOS CO₂ retrieval algorithm-PartII: Global X CO₂ data characterization. *Atmospheric Measurement techniques*, 5 (4), 687–707
- Cui Y., Suzuki S., Omori Y., Wong S.-K., Iichi M., Kaneko R., Kameyama S., Tanimoto H., Hamasaki K. (2015) Abundance and distribution of dimethylsulfoniopropionate degradation genes and the corresponding bacterial community structure at dimethyl sulfide hotspots in the tropical and subtropical Pacific Ocean. *Applied Environmental Microbiology*, 81 (12), 4184 – 4194, doi: 10.1128/AEM.03873-14, 2015
- Dolman A.J., Shvidenko A., Schepaschenko D., Ciais P., Tchepakova N., Chen T., van der Molen M.K., Beletti Marchesini L., Maximov T.C., Maksyutov S., Schulze, E.-D. (2012) An estimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory based, eddy covariance and inversion methods. *Biogeosciences Discussions*, 9, 6579–6626, doi:10.5194/bgd-9-6579-2012
- Fang J., Kato T., Guo Z., Yang Y., Hu H., Shen H., Zhao X., Kishimoto-Mo A.W., Tang Y., Houghton R.A. (2014) Evidence for environmentally enhanced forest growth. *PNAS: Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111 (26), 9527–9532
- Fang X., Thompson R.L., Saito T., Yokouchi Y., Kim J., Li S., Kim K.R., Park S., Graziosi F., Stohl A. (2013) Sulfur hexafluoride (SF₆) emissions in East Asia determined by inverse modeling. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 13, 21003–21040
- Fang X., Thompson R.L., Saito T., Yokouchi Y., Kim J., Li S., Kim K.R., Park S., Graziosi F., Stohl A. (2014) Sulfur hexafluoride (SF₆) emissions in East Asia determined by inverse modeling. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 4779–4791
- Fang X., Stohl A., Yokouchi Y., Kim J., Li S., Saito T., Park S., Hu J. (2015) Multiannual Top-Down Estimate of HFC-23 Emissions in East Asia. *Environmental Science & Technology*, 49 (7), 4345–4353
- Feng L., Palmer P.I., Parker R.J., Deutscher N.M., Feist D.G., Kivi R., Morino I., Sussmann R. (2015) Elevated uptake of CO₂ over Europe inferred from GOSAT X CO₂ retrievals: a real phenomenon or an artefact of the analysis? *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 1989–2011
- Fortems-Cheiney A., Chevallier F., Saunio M., Pison I., Bousquet P., Cressot C., Wang H.J., Yokouchi Y., Artuso F. (2013) HCFC-22 emissions at global and regional scales between 1995 and 2010: Trends and variability. *Journal of Geophysical Research*, 118, 7379–7388
- Frankenberg C., Fisher J.B., Worden J., Badgley G., Saatchi S.S., Lee J.-E., Toon G.C., Butz A., Jung M., Kuze A., Yokota T. (2011) New global observations of the terrestrial carbon cycle from GOSAT: Patterns of plant fluorescence with gross primary productivity. *Geophysical Research Letters*, 38 (17), L17706
- Friend A.D., Lucht W., Rademacher T.T., Keribina R., Betts R., Cadule P., Ciais P., Clark D.B., Dankers R., Falloon P.D., Ito A., Kahana R., Kleidon A., Lomas M.R., Nishina K., Ostberg S., Pavlick R., Peylin P., Schaphoff S., Vuichard N., Warszawski L., Wiltshire A., Woodward F.I. (2013) Carbon residence time dominates uncertainty in terrestrial vegetation responses to future climate and atmospheric CO₂. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111 (9), 3280–3285

- Ganshin A., Oda T., Saito M., Maksyutov S., Valsala V., Andres R. J., Fischer R., Lowry D., Lukyanov A., Matsueda H., Nisbet E. G., Rigby M., Sawa Y., Toumi R., Tsuboi K., Varlagin A., Zhuravlev R. (2011) A global coupled Eulerian-Lagrangian model and 1×1 km CO₂ surface flux dataset for high-resolution atmospheric CO₂ transport simulations. *Geoscientific Model Development Discussions*, 4, 2047–2080, doi:10.5194/gmdd-4-2047-2011
- Ganshin A., Oda T., Saito M., Maksyutov S., Valsala V., Andres R.J., Fisher R.E., Lowry D., Lukyanov A., Matsueda H., Nisbet E.G., Rigby M., Sawa Y., Toumi R., Tsuboi K., Varlagin A., Zhuravlev R. (2012) A global coupled Eulerian-Lagrangian model and 1×1 km CO₂ surface flux dataset for high-resolution atmospheric CO₂ transport simulations. *Geoscientific Model Development*, 5, 231–243, doi:10.5194/gmd-5-231-2012
- Ghosh A., Patra P.K., Ishijima K., Umezawa T., Ito A., Etheridge D.M., Sugawara S., Kawamura K., Miller J.B., Dlugokencky E.J., Krummel P.B., Fraser P.J., Steele L.P., Langenfelds R.L., Trudinger C.M., White J.W.C., Vaughn B., Saeki T., Aoki S., Nakazawa T. (2015) Variations in global methane sources and sinks during 1910–2010. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 2595–2612, DOI: 10.5194/acp-15-2595-2015
- Groisman P., Gulev S., Maksyutov S. (2014) Earth System Studies in Northern Eurasia. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 95(16), 133–140
- Guo X., Nakayama T., Yamada H., Inomata S., Tonokura K., Matsumi Y. (2014) Measurement of the light absorbing properties of diesel exhaust particles using a three-wavelength photoacoustic spectrometer. *Atmospheric Environment*, 94, 428–437
- Hajima T, Ito A, Tachiiri K, Kawamiya M (2014) Uncertainty of concentration – terrestrial carbon feedback in the Earth System Models. *Journal of Climate*, 27, 3425–3445, DOI: 10.1175/JCLI-D-13-00177.1
- Han D., Gao G., Guo X., Zhang F., Li Y., Lin L., Li J., Tang Y., Gu S. (2012) The potential of carbon sink in alpine meadow ecosystem on the Qinghai Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 7408–7417
- Hashimoto S., Carvalhais N., Ito A., Migliavacca M., Nishina K., Reichstein M. (2015) Global spatiotemporal distribution of soil respiration modeled using a global database. *Biogeosciences*, 12, 4331–4364
- Hayashi M., Saigusa N., Oguma H., Yamagata Y. (2013) Forest canopy height estimation using ICESat/GLAS data and error factor analysis in Hokkaido, Japan. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 81, 12–18
- Hayashi M., Yamagata Y., Borjigin H., Bagan H., Suzuki R., Saigusa N. (2014) Forest biomass mapping with airborne LiDAR in Yokohama City. *Journal of the Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, 52 (6), 306–315
- Hayashi M., Saigusa N., Oguma H., Yamagata Y., Takao G. (2014) Quantitative assessment of the impact of typhoon disturbance on a Japanese forest using satellite laser altimetry. *Remote Sensing of Environment*, 156, 216–225
- Hayashi M., Saigusa N., Yamagata Y., Hirano T. (2015) Regional forest biomass estimation using ICESat/GLAS spaceborne LiDAR over Borneo. *Carbon Management*, 6 (1–2), 19–33
- He M., Zhou Y., Ju W., Chen J., Zhang L., Wang S., Saigusa N., Hirata R., Murayama S., Liu Y. (2013) Evaluation and improvement of MODIS gross primary productivity in typical forest ecosystems of East Asia based on eddy covariance measurements. *Journal of Forest Research*, 18, 31–40
- Heymann J., Reuter M., Hilker M., Buchwitz M., Schneising O., Bovensmann H., Burrows J.P., Kuze A., Suto H., Deutscher N.M., Dubey M.K., Griffith D.W.T., Hase F., Kawakami S., Kivi R., Morino I., Petri C., Roehl C., Schneider M., Sherlock V., Sussmann R., Velasco V.A., Warneke T., Wunch D. (2015) Consistent satellite X CO₂ retrievals from SCIAMACHY and GOSAT using the BESD algorithm. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8, 1787–1832
- Hirao S., Hayashi R., Moriizumi J., Yamazawa H., Tohjima Y., Mukai H. (2015) Inverse estimation of radon flux distribution for East Asia using measured atmospheric radon concentration. *Radiation Protection Dosimetry*, 167 (1–3), 97–101, doi:10.1093/rpd/ncv211
- Hirata R., Takagi K., Ito A., Hirano T., Saigusa N. (2014) The impact of climate variation and disturbances on the carbon balance of forests in Hokkaido, Japan. *Biogeosciences*, 11 (18), 5139–5154
- Houweling S., Krol M., Bergamaschi P., Frankenberg C., Dlugokencky E. J., Morino I., Notholt J., Sherlock V., Wunch D., Beck V., Gerbig C., Chen H., Kort E. A., Röckmann T., Aben I. (2014) A multi-year methane inversion using SCIAMACHY, accounting for systematic errors using TCCON measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 3991–4012
- Houweling S., Baker D., Basu S., Boesch H., Butz A., Chevallier F., Deng F., Dlugokencky E.J., Feng L., Ganshin A., Hasekamp O., Jones D., Maksyutov S., Marshall J., Oda T., O'Dell C.W., Oshchepkov S., Palmer P.I., Peylin P., Poussi Z., Reum F., Takagi H., Yoshida Y., Zhuravlev R. (2015) An intercomparison of inverse models for estimating sources and sinks of CO₂ using GOSAT measurements. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 120, 5253–5266

- Huntzinger D.N., Schwalm C., Michalak A.M., Schaefer K., King A.W., Wei Y., Jacobson A., Liu S., Cook R.B., Post W.M., Berthier G., Hayes D., Huang M., Ito A., Lei H., Lu C., Mao J., Peng C.H., Peng S., Poulter B., Ricciuto D., Shi X., Tian H., Wang W., Zeng N., Zhao F., Zhu Q. (2013) The North American Carbon Program Multi-scale Synthesis and Terrestrial Model Intercomparison Project: Part 1: Overview and experimental design. *Geoscientific Model Development*, 6, 2121–2133. DOI: 10.5194/gmd-6-2121-2013
- Ichii K., Kondo M., Lee Y.-H., Wang S.-Q., Kim J., Ueyama M., Lim H.-J., Shi H., Suzuki T., Ito A., Kwon H., Ju W., Huang M., Sasai T., Asanuma J., Han S., Hirano T., Hirata R., Kato T., Li S.-G., Li Y.-N., Maeda T., Miyata A., Matsuura Y., Murayama S., Nakai Y., Ohta T., Saitoh T.M., Saigusa N., Takagi K., Tang Y.-H., Wang H.-M., Yu G.-R., Zhang Y.-P., Zhao F.-H. (2013) Site-level model–data synthesis of terrestrial carbon fluxes in the CarboEastAsia eddy-covariance observation network: toward future modeling efforts. *Journal of Forest Research*, 18 (1), 13–20, doi:10.1007/s10310-012-0367-9
- Ichii K., Kondo M., Okabe Y., Ueyama M., Kobayashi H., Lee S.J., Saigusa N., Zhu Z., Myneni R.B. (2013) Recent Changes in Terrestrial Gross Primary Productivity in Asia from 1982 to 2011. *Remote Sensing*, 5 (11), 6043–6062
- Iio A., Hikosaka K., Anten N.P.R., Nakagawa Y., Ito A. (2014) Global dependence of field-observed leaf area index on climate in woody species: Systematic review. *Global Ecology and Biogeography*, 23 (3), 274–285
- Inoue M., Morino I., Uchino O., Miyamoto Y., Yoshida Y., Yokota T., Machida T., Sawa Y., Matsueda H., Patra P.K. (2013) Validation of X CO₂ derived from SWIR spectra of GOSAT TANSO-FTS with aircraft measurement data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 9771–9788
- Inoue M., Morino I., Uchino O., Miyamoto Y., Saeki T., Yoshida Y., Yokota T., Sweeney C., Tans P.P., Biraud S.C., Machida T., Pittman J.V., Kort E.A., Tanaka T., Kawakami S., Sawa Y., Tsuboi K., Matsueda H. (2014) Validation of XCH₄ derived from SWIR spectra of GOSAT TANSO-FTS with aircraft measurement data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7 (9), 2987–3005
- Isidoya S., Murayama S., Kondo H., Saigusa N., Kishimoto-Mo A.W., Yamamoto S. (2015) Observation of O₂: CO₂ exchange ratio for net turbulent fluxes and its application to forest carbon cycles. *Ecological Research*, 30 (2), 225–234
- Ishii M., Feely R.A., Rodgers K.B., Park G.-H., Wanninkhof R., Sasano D., Sugimoto H., Cosca C.E., Nakaoka S., Telszewski M., Nojiri Y., Mikaloff Fletcher S.F., Niwa Y., Patra P.K., Valsala V., Nakano H., Lima I., Doney S.C., Buitenhuis E.T., Aumont O., Dunne J.P., Lenton A., Takahashi T. (2014) Air-sea CO₂ flux in the Pacific Ocean for the period 1990–2009. *Biogeosciences* 11, 709–734, doi:10.5194/bg-11-709-2014
- Isizawa M., Uchino O., Morino I., Inoue M., Yoshida Y., Mabuchi K., Shirai T., Tohjima Y., Maksyutov S., Ohyama H., Kawakami S., Takizawa A. (2015) Large XCH₄ anomaly in summer 2013 over Northeast Asia observed by GOSAT. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 15 (17), 24995–25020
- Ito A. (2012) Detection and attribution of global change and disturbance impacts on a tower-observed ecosystem carbon budget: a critical appraisal. *Environmental Research Letters*, 7 (1), 14013
- Ito A., Inatomi M. (2012) Use of a process-based model for assessing the methane budgets of global terrestrial ecosystems and evaluation of uncertainty. *Biogeosciences*, 9, 759–773
- Ito A., Inatomi M. (2012) Water-use efficiency of the terrestrial biosphere: a model analysis focusing on interactions between the global carbon and water cycles. *Journal of Hydrometeorology*, 13 (2), 681–694
- Ito A., Saitoh T.M., Sasai T. (2014) Synergies between observational and modeling studies at the Takayama site: towards a better understanding of processes in terrestrial ecosystems. *Ecological Research*, 30 (2), 201–210
- 伊藤昭彦, 山形与志樹 (2015) 生態系サービスの評価：気候変動対策と生物多様性保全のトレードオフ解消に向けて—趣旨説明—。日本生態学会誌, 65, 109–113
- Jiang F., Wang H.M., Chen J.M., Machida T., Zhou L.X., Ju W.M., Matsueda H., Sawa Y. (2014) Carbon balance of China constrained by CONTRAIL aircraft CO₂ measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 10133–10144, doi:10.5194/acp-14-10133-2014
- Joiner J., Yoshida Y., Vasilkov A.P., Middleton E.M., Campbell P.K.E., Yoshida Y., Kuze A., Corp L.A. (2012) Filling-in of near-infrared solar lines by terrestrial fluorescence and other geophysical effects: simulations and space-based observations from SCIAMACHY and GOSAT. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5, 809–829
- Kajino M., Aikawa M. (2015) A model validation study of the washout/rainout contribution of sulfate and nitrate in wet deposition compared with precipitation chemistry data in Japan. *Atmospheric Environment*, 117, 124–134
- Kameyama S., Yoshida S., Tanimoto H., Inomata S., Suzuki K., Yoshikawa-Inoue H. (2014) High-resolution observations of dissolved isoprene in surface seawater in the Southern Ocean during austral summer 2010–2011. *Journal of Oceanography*, 70, 225–239, doi: 10.1007/s10872-014-0

- Kato T., Yamada K., Tang Y., Yoshida N., Wada E. (2013) Stable carbon isotopic evidence of methane consumption and production in three alpine ecosystems on the Qinghaie Tibetan Plateau. *Atmospheric Environment*, 77, 338–347
- Kato T., Toyoda S., Yoshida N., Tang Y., Wada E. (2013) Isotopomer and isotopologue signatures of N₂O produced in alpine ecosystems on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 27, 1517–1526
- Kim H-S, Maksyutov S., Glagolev M. V., Machida T., Patra P. K., Sudo K., Inoue G. (2011) Evaluation of methane emissions from West Siberian wetlands based on inverse modeling. *Environmental Research Letters*, 6, 035201, doi:10.1088/1748-9326/6/3/035201
- Kondo M., Ichii K., Ueyama M., Mizoguchi Y., Hirata R., Saigusa N. (2013) The role of carbon flux and biometric observations in constraining a terrestrial ecosystem model: a case study in disturbed forests in East Asia. *Ecological Research*, 28, 893–905
- Kondo M., Ichii K., Takagi H., Sasakawa M. (2015) Comparison of the data-driven top-down and bottom-up global terrestrial CO₂ exchanges: GOSAT CO₂ inversion and empirical eddy flux upscaling. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 120, 1226–1245
- Koyama Y., Maksyutov S., Mukai H., Thoning K., Tans P. (2011) Simulation of atmospheric carbon dioxide variability with a global coupled Eulerian-Lagrangian transport model. *Geoscientific Model Development*, 4, 317–324
- Kulawik S.S., Wunch D., O'Dell C., Frankenberg C., Reuter M., Oda T., Chevallier F., Sherlock V., Buchwitz M., Osterman G., Miller C., Wennberg P., Griffith D.W.T., Morino I., Dubey M., Deutscher N.M., Notholt J., Hase F., Warneke T., Sussmann R., Robinson J., Strong K., Schneider M., Wolf J. (2015) Consistent evaluation of GOSAT, SCIAMACHY, CarbonTracker, and MACC through comparisons to TCCON. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 8 (6), 6217–6277
- Kuma K., Sasayama R., Hioki N., Morita Y., Isoda Y., Hirawake T., Imai K., Aramaki T., Nakamura T., Nishioka J., Ebuchi N. (2014) Chemical evidence for the origin of the cold water belt along the northeastern coast of Hokkaido. *Journal of Oceanography*, 70 (4), 377–387
- Li R., Luo T., Tang Y., Du M., Zhang X. (2013) The altitudinal distribution center of a widespread cushion species is related to an optimum combination of temperature and precipitation in the central Tibetan Plateau. *Journal of Arid Environments*, 88, 70–77
- Liang N., Wang Y., Zhang Y., He J., Li S., Piao S., Fang J., Hirano T., Takagi K., Fletcher C.D., Teramoto M., Tan Z-H. (2013) An Automated-Chamber Network for Evaluation of Carbon Budget of Asian Terrestrial Ecosystems. *AsiaFlux Newsletter*, 35, 3–12
- 梁乃申 (2013) 国立環境研究所における熱帯林研究の新しい取り組み. 地球環境研究センターニュース, 24 (4), 10–12
- Lunt M.F., Rigby M., Ganesan A.L., Manning A.J., Prinn R., O'Doherty S., Mühle J., Harth C.M., Salameh P.K., Arnold T., Weiss R.F., Saito T., Yokouchi Y., Krummel P.B., Steel L.P., Fraser P.J., Li S., Park S., Reimann S., Vollmer M.K., Lunder C., Hermansen O., Schmidbauer S., Maione M., Arduini J., Young D., Simmonds P.G. (2015) Reconciling reported and unreported HFC emissions with atmospheric observations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112 (19), 5927–5931
- Maksyutov S., Takagi H., Oda T., Saeki T., Belikov D., Ito A., Yoshida Y., Morino I., Uchino O., Yokota T. (2012) Regional CO₂ flux estimates for 2009–2010 based on GOSAT and ground-based CO₂ observations. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 12, 29235–29288
- Mao J., Fu W., Shi X., Ricciuto D.M., Fisher J.B., Wei Y., Shem W., Piao S., Wang K., Schwalm C.R., Tian H., Mu M., Parazoo N., Ciais P., Cook R., Dai Y., El-Masri B., Hayes D., Hoffman F.M., Huang M., Huntzinger D.N., Ito A., Jacobson A., Jain A., King A.W., Lei H., Lu C., Michalak A.M., Peng C., Peng S., Poulter B., Schaefer K., Thornton P.E., Wang W., Zeng N., Zhu Z. (2015) Disentangling climatic and anthropogenic controls on global terrestrial evapotranspiration trends. *Environmental Research Letters*, 10, 094008
- Matsueda H., Machida T., Sawa Y., Niwa Y. (2015) Long-term change of CO₂ latitudinal distribution in the upper troposphere. *Geophysical Research Letters*, 42 (7), 2508–2514
- Minejima C., Kubo M., Tohjima Y., Yamagishi H., Koyama Y., Maksyutov S., Kita K., Mukai H. (2011) Analysis of Δ O₂ / Δ CO₂ ratios for the pollution events observed at Hateruma Island, Japan. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 11, 15631–15657, doi:10.5194/acpd-11-15631-2011
- Miyamoto Y., Inoue M., Morino I., Uchino O., Yokota T., Machida T., Sawa Y., Matsueda H., Sweeney C., Tans P. P., Andrews A.E., Patra, P.K. (2013) Atmospheric column-averaged mole fractions of carbon dioxide at 53 aircraft measurement sites. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 5265–5275, doi:10.5194/acp-13-5265-2013

- Miyazaki S., Saito K., Mori J., Yamazaki T., Ise T., Arakida H., Hajima T., Iijima Y., Machiya H., Sueyoshi T., Yabuki H., Burke E.J., Hosaka M., Ichii K., Ikawa H., Ito A., Kotani A., Matsuura Y., Niwano M., Nitta T., Oishi R., Ohta T., Park H., Sasai T., Sato A., Sato H., Sugimoto A., Suzuki R., Tanaka K., Yamaguchi S., Yoshimura K. (2015) The GRENE-TEA Model Intercomparison Project (GTMIIP): overview and experiment protocol for Stage 1. *Geoscientific Model Development*, 8, 2841–2856. DOI: 10.5194/gmd-8-2841-2015
- 望月智貴, 谷晃, 安田倫己, 植山雅仁, 鰐谷憲, 高橋善幸, 米村正一郎, 奥村智憲, 東野達, 深山貴文, 小南裕志 (2011) 可搬型簡易渦集積採取装置の開発とカラマツ林のテルペン類フラックス測定への応用. *Eco-Engineering*, 23, 81–88
- Mochizuki T., Miyazaki Y., Ono K., Wada R., Takahashi Y., Saigusa N., Kawamura K., Tani A. (2015) Emissions of biogenic volatile organic compounds and subsequent formation of secondary organic aerosols in a *Larix* campfire forest. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 1–13
- 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., Rettinger M. (2011) Preliminary validation of column-averaged volume mixing ratios of carbon dioxide and methane retrieved from GOSAT short-wavelength infrared spectra. *Atmospheric Measurement Technologies*, 4, 1061–1076, doi:10.5194/amt-4-1061-2011
- Moriyama A., Yonemura S., Kawashima S., Du M., Tang Y. (2013) Environmental indicators for estimating the potential soil respiration rate in alpine zone. *Ecological Indicators*, 32, 245–252
- 向井人史 (2013) 地球温暖化－第1講 温室効果ガスの役割－. *大気環境学会誌*, 48 (3), A2-A9
- 向井人史 (2013) 「400ppm」の報道で考える 二酸化炭素の濃度の限界はいくらなのか?. *地球環境センターニュース*, 24(5), 4-6
- Nakaoka S., Telszewski M., Nojiri Y., Yasunaka S., Miyazaki C., Mukai H., Usui N. (2013) Estimating temporal and spatial variation of ocean surface p CO₂ in the North Pacific using a self-organizing map neural network technique. *Biogeosciences*, 10, 6093–6106
- Nakayama T. (2012) Feedback and regime shift of mire ecosystem in northern Japan. *Hydrological Processes*, 26 (16), 2455–2469
- Nakayama T. (2013) For improvement in understanding eco-hydrological processes in mire. *Ecohydrology and Hydrobiology*, 13, 62–72, doi:10.1016/j.ecohyd.2013.03.004
- Nakayama T., Shankman D. (2013) Evaluation of uneven water resource and relation between anthropogenic water withdrawal and ecosystem degradation in Changjiang and Yellow River basins. *Hydrological Processes*, 27(23), 3350–3362, doi:10.1002/hyp.9835
- Nakayama T., Maksyutov S. (2014) Surface-groundwater interaction and its effect on carbon cycle in terrestrial-aquatic continuum. In: P. Gastescu, W. Marszelewski, and P. Bretcaneds., *Proceeding of 2nd International Conference on Water Resources and Wetlands*, Transversal Publishing House, 44–50
- Nara H., Tanimoto H., Nojiri Y., Mukai H., Machida T., Tohjima Y. (2011) Onboard measurement system of atmospheric carbon monoxide over the Pacific Ocean by voluntary observing ships. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4 (11), 2495–2507
- Nara H., Tanimoto H., Tohjima Y., Mukai H., Nojiri Y., Katsumata K., Rella C. (2012) Effect of air composition (N₂, O₂, Ar and H₂O) on CO₂ and CH₄ measurement by wavelength-scanned cavity ring-down spectroscopy: calibration and measurement strategy. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5 (11), 2689–2701
- Nara H., Tanimoto H., Tohjima Y., Mukai H., Nojiri Y., Katsumata K., Rella C. (2012) Evaluation of factors affecting accurate measurements of atmospheric CO₂ and CH₄ by wavelength-scanned cavity ring-down spectroscopy. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5, 5009–5041
- Nara H., Tanimoto H., Tohjima Y., Mukai H., Nojiri Y., Machida T. (2014) Emissions of methane from offshore oil and gas platforms in Southeast Asia. *Scientific Reports*, 4, 6503
- Nishina K., Ito A., Falloon P., Friend A.D., Beerling D.J., Ciais P., Clark D.B., Kahana R., Kato E., Lucht W., Lomas M., Pavlick R., Schaphoff S., Warszawski L., Yokohata T. (2014) Decomposing uncertainties in the future terrestrial carbon budget associated with emission scenario, climate projection, and ecosystem simulation using the ISI-MIP result. *Earth System Dynamics Discussion*, 5, 1197–1219
- Niwa Y., Patra P. K., Sawa Y., Machida T., Matsueda H., Belikov D., Maki T., Ikegami M., Imasu R., Maksyutov S., Oda T., Satoh M., and Takigawa M. (2011) Three-dimensional variations of atmospheric CO₂: aircraft measurements and multi-transport model simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 11, 12805–12848
- Niwa Y., Machida T., Sawa Y., Matsueda H., Schuck T.J., Brenninkmeijer C.A.M., Imasu R., Satoh M. (2012) Imposing strong constraints on tropical terrestrial CO₂ fluxes using passenger aircraft based measurements. *Journal of Geophysical Research*, 117, D11303, doi:10.1029/2012JD017474

- Niwa Y., Tsuboi K., Matsueda H., Sawa Y., Machida T., Nakamura M., Kawasato T., Saito K., Takatsuji S., Tsuji K., Nishi H., Dehara K., Baba Y., Kuboike D., Iwatsubo S., Ohmori S., Hanamiya Y. (2014) Seasonal variations of CO₂, CH₄, N₂O and CO in the mid-troposphere over the western North Pacific observed using a C-130H cargo aircraft. *Journal of Meteorological Society of Japan*, 92 (1), 50–70, doi:10.2151/jmsj.2014-104
- Noda H., Muraoka H., Nasahara K. N., Saigusa N., Murayama S., Koizumi H. (2014) Phenology of leaf morphological, photosynthetic, and nitrogen use characteristics of canopy trees in a cool-temperate deciduous broadleaf forest at Takayama, central Japan. *Ecological Research*, 30 (2), 247–266
- Ohki S., Irie T., Inoue M., Shinmen K., Kawahata H., Nakamura T., Kato A., Nojiri Y., Suzuki A., Sakai K., Van Woesik R. (2013) Calcification responses of symbiotic and aposymbiotic corals to near-future levels of ocean acidification. *Biogeosciences*, 10, 6807–6814, doi:10.5194/bg-10-1-2013
- Omori Y., Tanimoto H., Inomata S., Wada S., Thume K., Pohnert G. (2015) Enhancement of dimethylsulfide production by anoxic stress in natural seawater. *Geophysical Research Letters*, 42, 4047 – 4053, doi:10.1002/2015GL063546
- Oshchepkov S., Bril A., Maksyutov S., Yokota T. (2011) Detection of optical path in spectroscopic space-based observations of greenhouse gases: Application to GOSAT data processing. *Journal of Geophysical Research*, 116, D14304, doi:10.1029/2010JD015352
- Parazoo N.C., Bowman K., Frankenberg C., Jones D.B., Berry J., Baker I.T., Osterman G., O'Dell C., Butz A., Yoshida Y. (2013) Interpreting seasonal changes in the carbon balance of southern Amazonia using measurements of X CO₂ and chlorophyll fluorescence from GOSAT. *Geophysical Research Letters*, 40, 2829–2833
- Parrish D.D., Law K.S., Staehelin J., Derwent R., Cooper O.R., Tanimoto H., Volz-Thomas A., Gilge S., Scheel H.-E., Steinbacher M., Chan E. (2013) Lower tropospheric ozone at northern mid-latitudes: Changing seasonal cycle. *Geophysical Research Letter*, 40, 1631–1636, doi: 10.1002/grl.50303
- Parrish D.D., Lamarque J.F., Naik V., Horowitz L., Shindell D.T., Staehelin J., Derwent R., Cooper O.R., Tanimoto H., Volz-Thomas A., Gilge S., Scheel H.-E., Steinbacher M., Fröhlich M. (2014) Long-term changes in lower tropospheric baseline ozone concentrations: Comparing chemistry-climate models and observations at northern midlatitudes. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 119 (9), 5719–5736, doi:10.1002/2013JD021435
- Patra P.K., Houweling S., Krol M., Bousquet P., Belikov D., Bergmann D., Bian H., Cameron-Smith P., Chipperfield M. P., Corbin K., Fortems-Cheiney A., 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. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 11, 18767–18821, doi:10.5194/acpd-11-18767-2011
- Patra P.K., et al. (2013) The carbon budget of South Asia. *Biogeosciences*, 10, 513–527, doi:10.5194/bg-10-513-2013
- Pfeil P., Olsen A., Bakker D.C.E., Hankin S., Koyuk H., Kozyr A., Malczyk J., Manke A., Metzl N., Sabine C.L., 他 Nojiri Y. を含む 70 名 (2013) A uniform, quality controlled Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT), *Earth System Science Data*, 5, 125–143
- Pickett-Heaps C. A., Rayner P. J., Law R. M., Ciais P., Patra P. K., Bousquet P., Peylin P., Maksyutov S., Marshall J., Rödenbeck C., Langenfelds R. L., Steele L. P., Francey R. J., Tans P., Sweeney C. (2011) Atmospheric CO₂ inversion validation using vertical profile measurements: Analysis of four independent inversion models. *Journal of Geophysical Research*, 116, D12305, doi:10.1029/2010JD014887
- Pisso I., Patra P., Takigawa M., Machida T., Matsueda H., Sawa Y. (2012) Anthropogenic CO₂ flux constraints in the Tokyo Bay Area from Lagrangian diffusive backward trajectories and high resolution in situ measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 12, 10623–10649, doi:10.5194/acpd-12-10623-2012
- Reuter M., Bosch H., Bril A., Butz A., O'Dell C.W., Kikuchi N., Oshchepkov S., Schneising O., Yokota T., Yoshida Y. (2013) A joint effort to deliver satellite retrieved atmospheric CO₂ concentrations for surface flux inversions: the ensemble median algorithm EMMA. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 1771–1780
- Reuter M., Buchwitz M., Hilker M., Heymann J., Schneising O., Pillai D., Bovensmann H., Burrows J.P., Boesch H., Parker R., Butz A., Hasekamp O., O'Dell C.W., Yoshida Y., Gerbig C., Nehr Korn T., Deutscher N.M., Warneke T., Notholt J., Hase F., Kivi R., Sussmann R., Machida T., Matsueda H., Sawa Y. (2014) Satellite-inferred European carbon sink larger than expected. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 13739–13753
- Sabine C.L., Hankin S., Koyuk H., Bakker D.C.E., Pfeil B., Olsen A., Metzl N., Kozyr A., Fassbender A., Manke A., Malczyk J., 他 Nojiri Y. を含む 65 名 (2013) Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT) gridded data products. *Earth System Science Data*, 5, 145–153

- Sabrekov A.F., Glagolev M.V., Fastovets I.A., Smolentsev B.A., Ilyasov D.V., Maksyutov S.S. (2015) Relationship of methane consumption with the respiration of soil and grass-moss layers in forest ecosystems of the southern taiga in Western Siberia. *Eurasian Soil Science*, 48, 8, 841–851
- Saeki T., Saito R., Belikov D., Maksyutov S. (2012) Global high-resolution simulations of CO₂ and CH₄ using a NIES transport model to produce a priori concentrations for use in satellite data retrievals. *Geoscientific Model Development Discussions*, 5, 2215–2258
- Saeki T., Maksyutov S., Saito M., Valsala V., Oda T., Belikov D., Yoshida Y., Morino I., Uchino O., Yokota T. (2013) Inverse Modeling of CO₂ Fluxes Using GOSAT Data and Multi-Year Ground-Based Observations. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, 9, 45–50
- Saeki T., Maksyutov S., Sasakawa M., Machida T., Arshinov M., Tans P., Conway T., Saito M., Valsala V., Oda T., Andres R., Belikov D. (2013) Carbon flux estimation for Siberia by inverse modeling constrained by aircraft and tower CO₂ measurements. *Journal of Geophysical Research*, 118 (2), 1100–1122, doi:10.1029/2012JD018462
- Saigusa N., Ichii K., Ogawa A. (2011) CarboEastAsia Workshop 2011 “Data-model synthesis for quantifying carbon budget in East Asia” February 22–23, 201 in Tokyo, Japan. *AsiaFlux Newsletter*, No.33, 4–5
- Saigusa N., Li S.G., Kwon H., Takagi K., Zhang L.M., Ide R., Ueyama M., Asanuma J., Choi Y.J., Chun J.H., Han S.J., Hirano T., Hirata R., Kang M., Kato T., Kim J., Li Y.N., Maeda T., Miyata A., Mizoguchi Y., Murayama S., Nakai Y., Ohta T., Saitoh T.M., Wang H.M., Yu G.R., Zhang Y.P., Zhao F.H. (2013) Dataset of CarboEastAsia and uncertainties in the CO₂ budget evaluation caused by different data processing. *Journal of Forest Research*, 18 (1), 41–48
- Saigusa N., Li S.-G., Kwon H., Takagi K., Zhang L.-M., Ide R., Ueyama M., Asanuma J., Choi Y.-J., Chun J.H., Han S.-J., Hirano T., Hirata R., Kang M., Kato T., Kim J., Li Y.-N., Maeda T., Miyata A., Mizoguchi Y., Murayama S., Nakai Y., Ohta T., Saitoh T.M., Wang H.-M., Yu G.-R., Zhang Y.-P. (2013) Dataset of CarboEastAsia and uncertainties in the CO₂ budget evaluation caused by different data processing. *Journal of Forest Research*, 18, 41–48
- 三枝信子, 林真智 (2015) 陸域生態系の地上観測ネットワークの相互連携に基づく生態系サービス評価研究の展開. *日本生態学会誌*, 65 (2), 115–124
- Saikawa E., Prinn R.G., Dlugokencky E., Ishijima K., Dutton G.S., Hall B.D., Langenfelds R., Tohjima Y., Machida T., Manizza M., Rigby M., O’Doherty S., Patra P.K., Harth C.M., Weiss R.F., Krummel P.B., van der Schoot M., Fraser P.B., Steele L.P., Aoki S., Nakazawa T., Elkins J.W. (2013) Global and regional emissions estimates for N₂O. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 13, 19471–19525, doi:10.5194/acpd-13-19471-2013
- Saikawa E., Prinn R.G., Dlugokencky E., Ishijima K., Dutton G.S., Hall B.D., Langenfelds R., Tohjima Y., Machida T., Manizza M., Rigby M., O’Doherty S., Patra P.K., Harth C.M., Weiss R.F., Krummel P.B., van der Schoot M., Fraser P.B., Steele L.P., Aoki S., Nakazawa T., Elkins J.W. (2013) Global and regional emissions estimates for N₂O. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 13, 19471–19525, doi:10.5194/acpd-13-19471-2013
- Saikawa E., Prinn R.G., Dlugokencky E., Ishijima K., Dutton G.S., Hall B.D., Langenfelds R., Tohjima Y., Machida T., Manizza M., Rigby M., O’Doherty S., Patra P.K., Harth C.M., Weiss R.F., Krummel P.B., van der Schoot M., Fraser P.B., Steele L.P., Aoki S., Nakazawa T., Elkins J.W. (2014) Global and regional emissions estimates for N₂O. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 4617–4641, doi:10.5194/acp-14-4617-2014
- Saito M., Ito A., Maksyutov S. (2011) Evaluation of Biases in JRA-25/JCDAS precipitation and their Impact on the Global Terrestrial Carbon Balance. *Journal of Climate*, 24, 4109–4125, doi:10.1175/2011JCLI3918.1
- Saito M., Luyssaert S., Poulter B., Williams M., Ciais P., Bellassen V., Ryan C.M., Yue C., Cadule P., Peylin P. (2014) Fire regimes and variability in aboveground woody biomass in miombo woodland. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 119 (5), 1014–1029
- Saito M., Ito A., Maksyutov S. (2014) Optimization of a prognostic biosphere model for terrestrial biomass and atmospheric CO₂ variability. *Geoscientific Model Development*, 7, 1829–1840, doi:10.5194/gmd-7-1829-2014
- Saitoh N., Touno M., Hayashida S., Imasu R., Shiomi K., Yokota T., Yoshida Y., Machida T., Matsueda H., Sawa Y. (2012) Comparisons between XCH₄ from GOSAT shortwave and thermal infrared spectra and aircraft CH₄ measurements over Guam. *SOLA*, 8, 145–149
- Saito R., Houweling S., Patra P. K., Belikov D., Lokupitiya R., Niwa Y., Chevallier F., Saeki T., Maksyutov S. (2011) TransCom satellite intercomparison experiment: Construction of a bias-corrected atmospheric CO₂ climatology. *Journal of Geophysical Research*, 116 (D21), D21208

- Saito R., Patra. P.K., Deutscher N., Wunch D., Ishijima K., Sherlock V., Blumenstock T., Dohe S., Griffith D., Morino I. et al. (2012) Latitude-time variations of atmospheric column-average dry air mole fractions of CO₂, CH₄ and N₂O. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 12 (2), 5679–5704
- Saito R., Patra P.K., Deutscher N., Wunch D., Ishijima K., Sherlock V., Blumenstock T., Dohe S., Griffith D., Morino I. (2012) Technical Note: Latitude-time variations of atmospheric column-average dry air mole fractions of CO₂, CH₄ and N₂O. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12, 7767–7777
- Saito R., Patra P., Sweeney C., Machida T., Krol M., Houweling S., Bousquet P., Agusti-Panareda A., Belikov D., Bergmann D., Bian H., Cameron-Smith P., Chipperfield M., Fortems-Cheiney A., Fraser A., Gatti L., Gloor E., Hess P., Kawa S., Law R., Locatelli R., Loh Z., Maksyutov S., Meng L., Miller J., Palmer P., Prinn R., Rigby M., Wilson C. (2013) TransCom model simulations of methane: comparison of vertical profiles with aircraft measurements. *Journal of Geophysical Research*, 118, 3891–3904, doi:10.1002/jgrd.50380
- Saito T., Fang X., Stohl A., Yokouchi Y., Zeng J., Fukuyama Y., Mukai H. (2015) Extraordinary halocarbon emissions initiated by the 2011 Tohoku earthquake. *Geophysical Research Letters*, 42 (7), 2500–2507
- Sakaizawa D., Kawakami S., Nakajima M., Tanaka T., Morino I., Uchino O. (2012) An airborne amplitude-modulated 1.57μm differential laser absorption spectrometry: simultaneous measurement of partial column-averaged dry air mixing ratio of CO₂ and target range. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 5, 4851–4880
- Sakaizawa D., Kawakami S., Nakajima M., Tanaka T., Morino I., Uchino O. (2013) An airborne amplitude-modulated 1.57 μm differential laser absorption spectrometer: simultaneous measurement of partial column-averaged dry air mixing ratio of CO₂ and target range. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6, 387–396
- 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 (7), 1758–1771
- Sasakawa M., Ito A., Machida T., Tsuda N., Niwa Y., Davydov D., Fofonov A., Arshinov M. (2012) Annual variation of CH₄ emissions from the middle taiga in West Siberian Lowland (2005–2009): a case of high CH₄ flux and precipitation rate in the summer of 2007. *Tellus B*, 64, 17514, doi:10.3402/tellusb. v64i0.17514
- Sasakawa M., Machida T., Tsuda N., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Krasnov O. (2013) Aircraft and tower measurements of CO₂ concentration in the planetary boundary layer and the lower free troposphere over southern taiga in West Siberia: Long-term records from 2002 to 2011. *Journal of Geophysical Research*, 118 (16), 9489–9498, doi:10.1002/jgrd.50755
- Sato H., Ito A., Ito A.N., Ise T., Kato E. (2015) Current status and future of land surface models. *Soil Science and Plant Nutrition*, 61 (1), 34–47
- Sawa Y., Machida T., Matsueda H., Niwa Y., Tsuboi K., Murayama S., Morimoto S., Aoki S. (2015) Seasonal changes of CO₂, CH₄, N₂O, and SF₆ in the upper troposphere/lower stratosphere over the Eurasian continent observed by commercial airliner. *Geophysical Research Letters*, 42 (6), 2001–2008
- Schepaschenko D., See L., Lesiv M., McCallum I., Fritz S., Salk C., Moltchanova E., Perger C., Shchepashchenko M., Shvidenko A., Kovalevskiy S., Gilitukha D., Albrecht F., Kraxner F., Bun A., Maksyutov S., Sokolov A., Dürauer M., Obersteiner M., Karminov V., Ontikov P. (2015) Development of a global hybrid forest mask through the synergy of remote sensing, crowd sourcing and FAO statistics. *Remote Sensing of Environment*, 162, 208–220
- Schepers D., Guerlet S., Butz A., Landgraf J., Frankenburg C., Hasekamp O., Blavier J-F., Deutscher N.M., Griffith D.W.T., Morino I. et al. (2012) Methane retrievals from Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT) shortwave infrared measurements: performance comparison of proxy and physics retrieval algorithms. *Journal of Geophysical Research*, 117, D10307
- Schuck T.J., Ishijima K., Patra P.K., Baker A.K., Machida T., Matsueda H., Sawa Y., Umezawa T., Brenninkmeijer C.A.M., Lelieveld J. (2012) Distribution of methane in the tropical upper troposphere measured by CARIBIC and CONTRAIL aircraft. *Journal of Geophysical Research*, 117, D19304, doi:10.1029/2012JD018199
- Schwalm C., Huntzinger D.N., Fisher J.B., Michalak A.M., Bowman K., Ciais P., Cook R., El-Masri B., Hayes D., Huang M., Ito A., Jain A., King A.W., Lei H., Liu J., Lu C., Mao J., Peng S., Poulter B., Ricciuto D., Schaefer K., Shi X., Tao B., Tian H., Wang W., Wei Y., Yang J., Zeng N. (2015) Toward “optimal” integration of terrestrial biosphere models. *Geophysical Research Letters*, 42 (11), 4418–4428
- Sharma S., Ishizawa M., Chan D., Lavoue D., Andrews E., Eleftheriadis K., Maksyutov S. (2013) 16-Year Simulation of Arctic Black Carbon: Transport, Source Contribution, and Sensitivity Analysis on Deposition. *Journal of Geophysical Research*, 118, 1–22

- Shen H., Wang S., Tang Y. (2013) Grazing alters warming effects on leaf photosynthesis and respiration in *Gentiana straminea*, an alpine forb species. *Journal of Plant Ecology*, 6, 418–427
- Shen M., Tang Y., Chen J., Yang W. (2012) Specification of thermal growing season in temperate China from 1960 to 2009. *Climatic Change*, 114 (3), 783–798
- Shen M., Tang Y., Chen J., Yang X., Wang C., Cui X., Yang Y., Han L., Li L., Du J., Zhang G., Cong N. (2014) Earlier-Season Vegetation Has Greater Temperature Sensitivity of Spring Phenology in Northern Hemisphere. *PLOS ONE*, 9 (2), e88178
- Shen M., Tang Y., Desai A.R., Gough C., Chen J. (2014) Can EVI-derived land-surface phenology be used as a surrogate for phenology of canopy photosynthesis? *International Journal of Remote Sensing*, 35 (3), 1162–1174
- Shirai T., Machida T., Matsueda H., Sawa Y., Niwa Y., Maksyutov S., Higuchi K. (2012) Relative contribution of transport/surface flux to the seasonal vertical synoptic CO₂ variability in the troposphere over Narita. *Tellus B*, 64, 19138
- 莊司堅也, 磯田豊, 久万健志, 荒巻能史 (2015) 日本海深層循環における底層水の形成. 北海道大学水産科学研究集報, 65 (1), 17–29
- Song C., Maksyutov S., Belikov D., Takagi H., Shu J. (2015) Simulating CO₂ profiles using NIES TM and comparison with HIAPER Pole-to-Pole Observations. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 15, 6745–6770
- Song Q., Tan Z., Zhang Y., Cao M., Sha L., Tang Y., Liang N., Schaefer D., Zhao J., Zhao J., Zhang X., Yu L., Deng X. (2013) Spatial heterogeneity of soil respiration in a seasonal rainforest with complex terrain. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 6, 65–72
- Suwa R., Nojiri Y., Ono T., Shirayama Y. (2013) Effects of low p CO₂ conditions on sea urchin larval size. *Marine Ecology*, 34 (4), 443–450, doi: 10.1111/maec.12044
- Taguchi S., Law R. M., Rödenbeck C., Patra P. K., Maksyutov S., Zahorowski W., Sartorius H., Levin I. (2011) TransCom continuous experiment: comparison of 222Rn transport at hourly time scales at three stations in Germany. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 10071–10084, doi:10.5194/acp-11-10071-2011
- Takagi H., Saeki T., Oda T., Saito M., Valsala V., Belikov D., Saito R., Yoshida Y., Morino I., Uchino O., Andres R. J., Yokota T., Maksyutov S. (2011) On the benefit of GOSAT observations to the estimation of regional CO₂ fluxes. *SOLA*, 7, 161–164
- Takagi H., Houweling S., Andres R.J., Belikov D., Bril A., Boesch H., Butz A., Guerlet S., Hasekamp O., Maksyutov S., Morino I., Oda T., O'Dell C.W., Oshchepkov S., Parker R., Saito M., Uchino O., Yokota T., Yoshida Y., Valsala V. (2014) Influence of differences in current GOSAT X CO₂ retrievals on surface flux estimation. *Geophysical Research Letters*, 41 (7), 2598–2605
- Takagi K., Hirata R., Ide R., Ueyama M., Ichii K., Saigusa N., Hirano T., Asanuma J., Li S.G., Machimura T., Nakai Y., Ohta T., Takahashi Y. (2015) Spatial and seasonal variations of CO₂ flux and photosynthetic and respiratory parameters of larch forests in East Asia. *Soil Science and Plant Nutrition*, 61, 61–75
- Takagi K., Yone Y., Takahashi H., Sakai R., Hojyo H., Kamiura T., Nomura M., Liang N., Miya H., Yoshida T., Sasa K., Fujinuma Y., Murayama T., Fukazawa T., Oguma H. (2015) Forest biomass and volume estimation using airborne LiDAR in a cool-temperate forest of northern Hokkaido, Japan. *Ecological Informatics*, 26, 54–60
- Takahashi A., Oguma H., Shimada M., Watanabe M., Yone Y., Saigusa N. (2011) Influence of forest disturbances on backscatter of the airborne L-band synthetic-aperture radar in a larch forest in northern Japan. *Hydrological Research Letters*, 5, 64–68
- Takahashi Y., Saigusa N., Hirata R., Ide R., Fujinuma Y., Okano T., Arase T. (2015) Characteristics of temporal variations in ecosystem CO₂ exchange in a temperate deciduous needle-leaf forest in the foothills of a high mountain. *Journal of Agricultural Meteorology*, 71 (4), 302–317
- 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 (8), 1548–1554
- Tan Z., Zhang Y., Liang N., Hsia Y., Zhang Y., Zhou G., Li Y., Juang J., Chu H., Yan J., Yu G., Sun S., Song Q., Cao K., Schaefer D.A., Liu Y. (2012) An observational study of the carbon-sink strength of East Asian Sub-tropical evergreen forests. *Environmental Research Letters*, 7(4), 044017
- Tan Z., Zhang Y., Liang N., Song Q., Liu Y., You G., Li L., Yu L., Wu C., Lu Z., Wen H., Zhao J., Gao F., Yang L., Song L., Zhang Y., Teramoto M., Sha L. (2013) Soil respiration in an old-growth subtropical forest: Patterns, components, and controls. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118 (7), 2981–2990

- Tanaka T., Miyamoto Y., Morino I., Machida T., Nagahama T., Sawa Y., Matsueda H., Wunch D., Kawakami S., Uchino O. (2012) Aircraft measurements of carbon dioxide and methane for the calibration of ground-based high-resolution Fourier Transform Spectrometers and a comparison to GOSAT data measured over Tsukuba and Moshiri. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5, 2003–2012
- 谷本浩志 (2014) 世界の空気を追って. 月刊みんぱく. 37 (11), 18–19
- Tanimoto H., Kameyama S., Iwata T., Inomata S., Omori Y. (2014) Measurement of air-sea exchange of dimethyl sulfide and acetone by PTR-MS coupled with gradient flux technique. *Environmental Science & Technology*, 48 (1), 526–533
- Tanimoto H., Ikeda K., Boersma K.F., van de A R.J., Garivait S. (2015) Interannual variability of nitrogen oxides emissions from boreal fires in Siberia and Alaska during 1996–2011 as observed from space. *Environmental Research Letters*, 10, 065004, doi:10.1088/1748-9326/10/6/065004, 2015
- Tanimoto H., Zbinden R.M., Thouret V., Nédélec P. (2015) Consistency of tropospheric ozone observations made by different platforms and techniques in the global databases. *Tellus B*, 67, 27073, doi: 10.3402/tellusb.v67.27073, 2015
- 寺本宗正 (2013) 地球温暖化と土と二酸化炭素－土壌からの二酸化炭素フラックス観測を支える箱－. 地球環境研究センターニュース Vol 24 (4), No 4–6
- 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. *Journal of Geophysical Research*, 116, D14303, doi:10.1029/2010JD015467
- Thompson R.L., Dlugokencky E., Chevallier F., Clais P., Dutton G., Elkins J.W., Langenfelds R.L., Prinn R.G., Weiss R.F., Tohjima Y., O'Doherty S., Krummel P.B., Fraser P., Steele L.P. (2013) Interannual variability in tropospheric nitrous oxide. *Geophysical Research Letters*, 40 (16), 4426–4431
- Thompson R.L., Chevallier F., Crotwell A.M., Dutton G., Langenfelds R., Prinn R. G., Weiss R.F., Tohjima Y., Nakazawa T., Krummel P.B., Steele L.P., Fraser P., O'Doherty S., Ishijima K., Aoki S. (2014) Nitrous oxide emissions 1999 to 2009 from a global atmospheric inversion. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 1801–1817, doi:10.5194/acp-14-1801-2014
- Thompson R.L., Ishijima K., Saikawa E., Corazza M., Karstens U., Patra P.K., Bergamaschi P., Chevallier F., Dlugokencky E., Prinn R.G., Weiss R.F., O'Doherty S., Fraser P.J., Steele L.P., Krummel P.B., Vermeulen A., Tohjima Y., Jordan A., Haszpra L., Steinbacher M., Van der Laan S., Aalto T., Meinhardt F., Popa M.E., Moncrieff J., Bousquet P. (2014) TransCom N₂O model inter-comparison, Part II, Atmospheric inversion estimates of N₂O emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 6177–6194, doi:10.5194/acp-14-6177-2014
- Thompson R.L., Stohl A., Zhou L.X., Dlugokencky E., Fukuyama Y., Tohjima Y., Kim S-Y., Lee H.E. Nisbet G., Fisher R.E., Lowry D., Weiss R.F., Prinn R.G., O'Doherty S., Young D., White J.W.C. (2015) Methane emission in East Asia for 2000–2011 estimated using an atmospheric Bayesian inversion. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 120, 4352–4369, doi:10.1002/2014JD022394
- Tian H., Lu C., Yang J., Banger K., Huntzinger D.N., Schwalm C.R., Schwalm C.R., Michalak A.M., Cook R., Ciais P., Hayes D., Huang M., Ito A., Jain A., Lei H., Mao J., Pan S., Post W.M., Peng S., Poulter B., Ren W., Ricciuto D., Schaefer K., Shi X., Tao B., Wang W., Wei Y., Yang Q., Zhang B., Zeng N. (2015) Global patterns and controls of soil organic carbon dynamics as simulated by multiple terrestrial biosphere models: current status and future directions. *Global Biogeochemical Cycles*, 29 (6), 775–792, DOI: 10.1002/2014GB005021
- Tohjima Y., Minejima C., Mukai H., Machida T., Yamagishi H., Nojiri Y. (2012) Analysis of seasonality and annual mean distribution of atmospheric potential oxygen (APO) in the Pacific region. *Global Biogeochemical Cycles*, 26 (4), doi:10.1029/2011GB004110
- Tohjima Y., Kubo M., Minejima C., Mukai H., Tanimoto H., Ganshin A., Maksyutov S., Katsumata K., Machida T., Kita K. (2013) Temporal changes in the emissions of CH₄ and CO from China estimated from CH₄ / CO₂ and CO / CO₂ correlations observed at Hateruma Island. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 13, 22893–22930, doi:10.5194/acpd-13-22893-2013
- Tohjima Y., Kubo M., Minejima C., Mukai H., Tanimoto H., Ganshin A., Maksyutov S., Katsumata K., Machida T., Kita K. (2013) Temporal changes in the emissions of CH₄ and CO from China estimated from CH₄ / CO₂ and CO / CO₂ correlations observed at Hateruma Island. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 13, 22893–22930, doi:10.5194/acpd-13-22893-2013
- Tohjima Y., Kubo M., Minejima C., Mukai H., Tanimoto H., Ganshin A., Maksyutov S., Katsumata K., Machida T., Kita K. (2014) Temporal changes in the emissions of CH₄ and CO from China estimated from CH₄ / CO₂ and CO / CO₂ correlations observed at Hateruma Island. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 1663–1677, doi:10.5194/acp-14-1663-2014
- Tohjima T., Terao Y., Mukai H., Machida T., Nojiri Y., Maksyutov S. (2015) ENSO-related variability in latitudinal distribution of annual mean atmospheric potential oxygen (APO) in the equatorial Western Pacific. *Tellus-B*, 67, 25869.

- Tomimatsu H., Tang Y. (2012) Elevated CO₂ differentially affects photosynthetic induction response in two *Populus* species with different stomatal behavior. *Oecologia*, 169 (4), 869–878
- Tomimatsu H., Iio A., Adachi M., Saw L-G., Tang Y. (2014) High CO₂ concentration increases relative leaf carbon gain under dynamic light in *Dipterocarpus sublamellatus* seedlings in a tropical rain forest, Malaysia. *Tree Physiology*, 34, 944–954
- Toyoda S., Kuroki N., Yoshida N., Ishijima K., Tohjima Y., Machida T. (2013) Decadal time series of tropospheric abundance of N₂O isotopomers and isotopologues in the Northern Hemisphere obtained by the long-term observation at Hateruma Island, Japan. *Journal of Geophysical Research*, 118 (8), 3369–3381, doi:10.1002/jgrd.50221
- Ueyama M., Takeuchi R., Takahashi Y., Ide R., Ataka M., Kosugi Y., Takahashi K., Saigusa N. (2015) Methane uptake in a temperate forest soil using continuous closed-chamber measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 213, 1–9
- Umezawa T., Machida T., Ishijima K., Matsueda H., Sawa Y., Patra P. K., Aoki S., Nakazawa T. (2012) Carbon and hydrogen isotopic ratios of atmospheric methane in the upper troposphere over the Western Pacific. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12, 8095–8113, doi:10.5194/acp-12-8095-2012
- Umezawa T., Machida T., Aoki S., Nakazawa T. (2012) Contributions of natural and anthropogenic sources to atmospheric methane variations over Western Siberia estimated from its carbon and hydrogen isotopes. *Global Biogeochemical Cycles*, 26 (4), doi:10.1029/2011GB004232
- Valsala V., Maksyutov S., Telszewski M., Nakaoka S.-I., 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, doi:10.5194/bgd-8-4239-2011
- Wang J., Dong J., Liu J., Huang M., Li G., Running S.W., Smith W.K., Harris W., Saigusa N., Kondo H., Liu Y., Hirano T., Xiao X. (2014) Comparison of gross primary productivity derived from GIMMS NDVI3g, GIMMS, and MODIS in Southeast Asia. *Remote Sensing*, 6 (3), 2108–2133
- Wang X., Nakatsubo T., Sasaki A., Yoshitake S., Liang N., Nakane K. (2013) Responses of microbial community to soil warming in warm-temperate evergreen broad-leaved forests. *森林立地*, 55 (2), 139–143
- Wang Y., Fang J.Y., Kato T., Guo Z.D., Zhu B., Mo W.H., Tang Y. (2011) Inventory-based estimation of aboveground net primary production in Japan's forests from 1980 to 2005. *Biogeosciences*, 8, 2099–2106
- Wang Z., Luo T., Li R., Tang Y., Du M. (2013) Causes for the unimodal pattern of biomass and productivity in alpine grasslands along a large altitudinal gradient in semiarid regions. *Journal of Vegetation Science* 24 (1), 189–201
- Wanninkhof R., Park G.-H., Takahashi T., Sweeney C., Feely R., Nojiri Y., Gruber N., Doney S.C., McKinley G.A., Lenton A., Le Quere C., Heinze C., Schwinger J., Graven H., Khattiwala S. (2013) Global Ocean Carbon Uptake: magnitude, variability and trends. *Biogeosciences*, 10, 1983–2000
- Wu C., Chen J.M., Pumpanen J., Cescatti A., Marcolla B., Blanken P.D., Ardo J., Tang Y., Magliulo V., Georgiadis T., Soegaard H., Cook D.R., Harding R.J., Harding R.J. (2012) An underestimated role of precipitation frequency in regulating summer soil moisture. *Environmental Research Letters*, 7, 024011, doi:10.1088/1748-9326/7/2/024011
- Wu Y., Deng Y., Zhang J., Wu J., Tang Y., Cao G., Zhang F., Cui X. (2013) Root size and soil environments determine root lifespan: evidence from an alpine meadow on the Tibetan Plateau. *Ecological Research*, 28 (3), 493–501
- Wu Y., Zhang J., Deng Y., Wu J., Wang S., Tang Y., Cui X. (2014) Effects of warming on root diameter, distribution, and longevity in an alpine meadow. *Plant Ecology*, 215, 1057–1066
- Wunch D., Wennberg P.O., Toon G.C., Connor B.J., Fisher B., Osterman G.B., Frankenberg C., Mandrake L., O, Ahonen P., Biraud S.C., Castano R., Cressie N., Crisp D., Deutscher N.M., Eldering A., Fisher M.L., Griffith D.W.T., Gunson M., Heikkinen P., Keppel-Aleks G., Kyro E., Lindenmaier R., Macatangay R., Mendonca J., Messerschmidt J., Miller C.E., Morino I., Notholt J., Oyafuso F.A., Rettinger M., Robinson J., Roehl C.M., Salawitch R.J., Sherlock V., Strong K., Sussmann R., Tanaka T., Thompson D.R., Uchino O., Warneke T., Wofsy S.C. (2011) A method for evaluating bias in global measurements of CO₂ total columns from space. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 11, 20899–20946
- Xia J., Liang S., Chen J., Yuan W., Liu S., Li L., Cai W., Zhang L., Fu Y., Zhao T., Feng J., Ma Z., Ma M., Liu S., Zhou G., Asanuma J., Chen S., Du M., Davaa G., Kato T., Liu Q., Liu S., Li S., Shao C., Tang Y., Zhao X. (2014) Satellite-Based Analysis of Evapotranspiration and Water Balance in the Grassland Ecosystems of Dryland East Asia. *PLoS ONE*, 9 (5), e97295
- Yamada T., Yoshioka A., Mazlan H., Liang N., Okuda T. (2014) Spatial and temporal variations in the light environment in a primary and selectively logged forest long after logging in Peninsular Malaysia. *Trees*, 28 (5), 1355–1365

- Yao Y., Zhang Y., Liang N., Tan Z., Yu G., Sha L., Song Q. (2012) Pooling of CO₂ in a Tropical Seasonal Rain Forest Located at a Small Valley. *Journal of Forest Research*, 17 (3), 241–252
- Yasunaka S., Nojiri Y., Nakaoka S., Ono T., Mukai H., Usui N. (2013) Monthly maps of sea surface dissolved inorganic carbon in the North Pacific: Basin-wide distribution and seasonal variation. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 118, 3843–3850
- Yasunaka S., Nojiri Y., Nakaoka S., Ono T., Whitney F.A., Telszewski M. (2014) Mapping of sea surface nutrients in the North Pacific: Basin-wide distribution and seasonal to interannual variability. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 119 (11), 7756–7771, DOI: 10.1002/2014JC010318
- 横田達也 (2015) Advances in Atmospheric Science and Applications (ATMOS 2015) ワークショップに参加して. *日本リモートセンシング学会誌*, 25 (4), 269–270
- Yoo S., Kwak D.-A., Cui G., Lee W.-K., Kwak H., Ito A., Son Y., Jeon S. (2013) Estimation of the ecosystem carbon budget in South Korea between 1999 and 2008. *Ecological Research*, 28 (6), 1045–1059, doi:10.1007/s11284-013-1085-2
- 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. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4, 717–734, doi:10.5194/amt-4-717-2011
- Zeng J., Nojiri Y., Landschützer P., Telszewski M., Nakaoka S. (2014) A Global Surface Ocean f CO₂ Climatology Based on a Feed-Forward Neural Network. *Journal of Atmospheric and Oceanic technology*, 31, 1838–1849, doi: 10.1175/JTECH-D-13-00137.1
- Zeng J., Nojiri Y., Nakaoka S., Nakajima H., Shirai T. (2015) Surface ocean CO₂ in 1990–2011 modelled using a feed-forward neural network. *Geoscience Data Journal*, 2, 47–51
- Zhang H.F., Chen B.Z., Machida T., Matsueda H., Sawa Y., Fukuyama Y., Langenfelds R., van der Schoot M., Xu G., Yan J.W., Cheng M.L., Zhou L.X., Tans P.P., Peters W. (2014) Estimating Asian terrestrial carbon fluxes from CONTRAIL aircraft and surface CO₂ observations for the period 2006–2010. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 5807–5824, doi:10.5194/acp-14-5807-2014
- Zhao J., Zhang Y., Tan Z., Song Q., Liang N., Yu L., Zhao J. (2012) Using digital cameras for comparative phenological monitoring in an evergreen broad-leaved forest and a seasonal rain forest. *Ecological Informatics*, 10, 65–72
- Zhu Q., Zhuang Q., Henze D., Bowman K., Chen M., Liu Y., He Y., Matsueda H., Machida T., Sawa Y., Oechel W. (2014) Constraining terrestrial ecosystem CO₂ fluxes by integrating models of biogeochemistry and atmospheric transport and data of surface carbon fluxes and atmospheric CO₂ concentrations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14 (16), 22587–22638
- Zhuravlev R., Khattatov B., Kiryushov B., Maksyutov S. (2011) Technical Note: A novel approach to estimation of time-variable surface sources and sinks of carbon dioxide using empirical orthogonal functions and the Kalman filter. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 10305–10315, doi:10.5194/acp-11-10305-2011
- Zscheischler J., Michalak A.M., Schwalm C., Mahecha M.D., Huntzinger D.N., Reichstein M., Berthier G., Ciais P., Cook R.B., El-Masri B., Huang M., Ito A., Jain A., King A., Lei H., Lu C., Mao J., Peng S., Poulter B., Ricciuto D., Shi X., Tao B., Tian H., Viovy N., Wang W., Wei Y., Yang J., Zeng N. (2014) Impact of large-scale climate extremes on biospheric carbon fluxes: An imtercomparison based on MsTMIP data. *Global Biogeochem Cycles*, 28, 585–600, DOI: 10.1002/2014GB004826

(2) プロジェクト 2: 地球温暖化に関わる地球規模リスクに関する研究

- Abe M., Shiogama H., Nozawa T., Emori S. (2011) Estimation of future surface temperature changes constrained using the future - present correlated modes in inter - model variability of CMIP3 multimodel simulations. *Journal of Geophysical Research -Atmosphere-*, 116, D18104
- Abe M., Shiogama H., Yokohata T., Emori S., Nozawa T. (2015) Asymmetric impact of the physiological effect of carbon dioxide on hydrological responses to instantaneous negative and positive CO₂ forcing. *Climate Dynamics*, 45 (7), 2181–2192
- Bagan H., Yamagata Y. (2012) Landsat analysis of urban growth: How Tokyo became the world's largest megacity during the last 40 years. *Remote Sensing of Environment*, 127, 210–222
- 安立美奈子, 伊藤昭彦 (2015) 熱帯林の土地利用変化に伴う生態系サービスの変化. *日本生態学会誌*, 65, 135–143
- Bodas-Salcedo A., Williams K.D., Ringer M.A., Cole J.N.S., Douville H., Dufresne J.L., Koshiro T., Stevens B., Yokohata T. (2014) Origins of the solar radiation biases over the Southern Ocean in CGMIP2 models. *Journal of Climate*, 27, 41–56

- Brovkin V., Boysen L., Arora V.K., Boisier J.P., Cadule P., Chini L., Claussen M., Friedlingstein P., Gayler V., van den Hurk B.J.J.M., Hurtt G.C., Jones C.D., Kato E., de Noblet-Ducoudré N., Pacifico F., Pongratz J., Weiss M. (2013) Effect of Anthropogenic Land-Use and Land-Cover Changes on Climate and Land Carbon Storage in CMIP5 Projections for the Twenty-First Century. *Journal of Climate*, 26, 6859–6881
- Chikamoto Y., Kimoto M., Ishii M., Mochizuki T., Sakamoto T.T., Tatebe H., Komuro Y., Watanabe M., Nozawa T., Shiogama H., Mori M., Yasunaka S., Imada Y. (2013) An overview of decadal climate predictability in a multi-model ensemble by climate model MIROC. *Climate Dynamics*, 40 (5), 1201–1222
- Chikamoto Y., Kimoto M., Ishii M., Mochizuki T., Sakamoto T.T., Tatebe H., Komuro Y., Watanabe M., Nozawa T., Shiogama H., Mori M., Yasunaka S., Imada Y. (2013) An overview of decadal climate predictability in a multi-model ensemble by climate model MIROC. *Climate Dynamics*, 40 (5–6), 1201–1222
- Christidis N., Stott P. A., Jones G. S., Shiogama H., Nozawa T., Luterbacher J. (2011) Human activity and anomalously warm seasons in Europe. *International Journal of Climatology*, 32 (2), 225–239
- Christidis N., Stott P.A., Zwiers F.W., Shiogama H., Nozawa T. (2012) The contribution of anthropogenic forcings to regional changes in temperature during the last decade. *Climate Dynamics*, 39 (6), 1259–1274
- Dal Gesso S., van der Dussen J.J., Siebesma A.P., de Roode S.R., Boutle I.A., Kamae Y., Roehrig R., Vial J. (2015) A Single-Column Model intercomparison on the stratocumulus representation in present-day and future climate. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 7(2), 617–647
- Dalin C., Qiu H., Hanasaki N., Mauzerall D.L., Rodriguez-Iturbe I. (2015) Balancing water resource conservation and food security in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112 (15), 4588–4593
- Dankers R., Arnell N.W., Clark D.B., Falloon P.D., Fekete B.M., Gosling S.N., Heinke J., Kim H., Masaki Y., Satoh Y., Stacke T., Wada Y., Wisser D. (2013) First look at changes in flood hazard in the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project ensemble. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111 (9), 3257–3261
- Das L., Annan J.D., Hargreaves J.C., Emori S. (2012) Improvements over three generations of climate model simulations for eastern India. *Climate Research*, 51, 201–216
- Davie J.C.S., Falloon P.D., Kahana R., Dankers R., Betts R., Portmann F.T., Wisser D., Clark D.B., Itoh A., Masaki Y., Nishina K., Fekete B., Tessler Z., Wada Y., Liu X., Tang Q., Hagemann S., Stacke T., Pavlick R., Schaphoff S., Gosling S.N., Franssen W., Arnell N. (2013) Comparing projections of future changes in runoff from hydrological and biome models in ISI-MIP. *Earth System Dynamics*, 4, 359–374
- Elliott J., Deryng D., Mueller C., Frieler K., Konzmann M., Gerten D., Glotter M., Floerke M., Wada Y., Best N., Eisner S., Fekete B.M., Folberth C., Foster I., Gosling S.N., Haddeland I., Khabarov N., Ludwig F., Masaki Y., Olin S., Rosenzweig C., Ruane A.C., Satoh Y., Schmid E., Stacke T., Tang Q., Wisser D. (2014) Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111 (9), 3239–3244
- 江守正多（2011）温暖化リスクコミュニケーション．科学技術社会論研究 第9号 地球温暖化問題，13–23
- 江守正多（2012）温暖化問題，討論のすす．いまさら温暖化論争？．物理科学雑誌パリティ，27（2），52–55
- 江守正多（2013）地球温暖化問題における専門家の責任と社会の責任：シンポジウム「地球温暖化問題と科学コミュニケーション：哲学者と科学者と社会学者が闘論」に「科学者」の立場から参加して．科学技術コミュニケーション，14，46–54
- 江守正多（2014）IPCC 第1作業部会 第5次評価報告書を読み解く．エネルギーレビュー，34（3），19–23
- 江守正多（2014）地球温暖化のリスクをどう受け止めるか．クリーピア（電力中央研究所 所内報），339，9
- 江守正多（2014）地球温暖化問題と社会の意思決定．科学，84（2），164–166
- 江守正多（2014）IPCC 第5次評価報告書を読み解く．JGL Japan Geoscience Letters，10（1），6–8
- 江守正多（2014）異常気象はいつまで続く．文藝春秋，299–300
- 江守正多（2014）今年の世界平均気温が観測史上最高となる見通し．Yahoo! ニュース 個人 IT・科学，Web 配信，<http://bylines.news.yahoo.co.jp/emoriseita/20141205-00041241/>
- 江守正多（2014）本音トーク：地球規模の気候変動リスク管理を，どう考えるか．Yahoo! ニュース 個人 IT・科学，Web 配信，<http://bylines.news.yahoo.co.jp/emoriseita/20141211-00041413/>
- 江守正多（2015）気候変動問題の価値依存性と専門家の役割．環境情報科学，一般社団法人環境情報科学センター，44（1），55–57

- 江守正多 (2015) 日経新聞論説「温暖化めぐる 2 つの裂け目『可能性の窓』開く対策を」を受けて. Yahoo! ニュース 個人, IT・科学, Web 配信, <http://bylines.news.yahoo.co.jp/emoriseita/20150120-00042383/>
- 江守正多 (2015) 地球温暖化影響の政府報告書, パプコメ始ま. -「適応計画」の策定に向けて. Yahoo! ニュース 個人, IT・科学, Web 配信, <http://bylines.news.yahoo.co.jp/emoriseita/20150126-00042558/>
- 江守正多 (2015) 米国のドキュメンタリー番組が描く気候変動と社会「危険な時代に生きる」(Years of Living Dangerously). 朝日新聞 WEB RONZA 科学・環境, Web 配信, <http://bylines.news.yahoo.co.jp/emoriseita/20150303-00043498/>
- 江守正多 (2015) 本音トーク: 地球規模の気候変動リスクと向き合う. Yahoo! ニュース 個人, IT・科学, Web 配信, <http://bylines.news.yahoo.co.jp/emoriseita/20150610-00046505/>
- 江守正多 (2015) 「脱化石燃料」は現実味を帯びるか 盛り上がるダイベストメント運動に一抹の危惧. 朝日新聞 WEB RONZA 科学・環境, Web 配信, <http://webronza.asahi.com/science/articles/2015060800001.html>
- 江守正多 (2015) 地球温暖化リターンズ 世界平均気温が再び顕著な上昇傾向に突入か. Yahoo! ニュース 個人, IT・科学, Web 配信, <http://bylines.news.yahoo.co.jp/emoriseita/20151012-00049923/>
- 江守正多 (2015) 世界平均気温が再び急上昇の兆し 英国気象局が自然変動モードの反転を示唆. 朝日新聞 WEB RONZA 科学・環境, Web 配信, <http://webronza.asahi.com/science/articles/2015100700001.html>
- 江守正多 (2016) パリ協定における 1.5℃ および 2℃ 目標の科学的・政策的含意—ICA-RUS プロジェクトの成果より—, 環境経済・政策研究, 9 (1), 75-78
- Frieler K., Levermann A., Elliott J., Heinke J., Arneth A., Bierkens M.F.P., Ciais P., Clark D.B., Deryng D., Doell P., Falloon P., Fekete B., Folberth C., Friend A.D., Gellhorn C., Gosling S.N., Haddeland I., Khabarov N., Lomas M., Masaki Y., Nishina K., Neumann K., Oki T., Pavlick R., Ruane A.C., Schmid E., Schmitz C., Stacke T., Stehfest E., Tang Q., Wisser D., Huber V., Piontek F., Warszawski L., Schewe J., Lotze-Campen H., Schellnhuber H.J. (2014) The relevance of uncertainty in future crop production for mitigation strategy planning. *Earth System Dynamics Discussions*, 5, 1075–1099
- Frieler K., Levermann A., Elliott J., Heinke J., Arneth A., Bierkens M.F.P., Ciais P., Clark D.B., Deryng D., Doll P., Falloon P., Fekete B., Folberth C., Friend A.D., Gellhorn C., Gosling S.N., Haddeland I., Khabarov N., Lomas M., Masaki Y., Nishina K., Neumann K., Oki T., Pavlick R., Ruane A.C., Schmid E., Schmitz C., Stacke T., Stehfest E., Tang Q., Wisser D., Huber V., Piontek F., Warszawski L., Schewe J., Lotze-Campen H., Schellnhuber H.J. (2015) A framework for the cross-sectoral integration of multi-model impact projections: land use decisions under climate impacts uncertainties. *Earth System Dynamics*, 6, 447–460
- Friend A.D., Lucht W., Rademacher T.T., Keribina R., Betts R., Cadule P., Ciais P., Clark D.B., Dankers R., Falloon P.D., Ito A., Kahana R., Kleidon A., Lomas M.R., Nishina K., Ostberg S., Pavlick R., Peylin P., Schaphoff S., Vuichard N., Warszawski L., Wiltshire A., Woodward F.I. (2013) Carbon residence time dominates uncertainty in terrestrial vegetation responses to future climate and atmospheric CO₂. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111 (9), 3280–3285
- 藤森真一郎, 長谷川知子, 増井利彦, 高橋潔 (2013) エネルギー・農業・土地利用の長期的 分析用の応用一般均衡モデル開発. 土木学会論文集 G (環境), 69 (6), II_35-II_46
- Fujimori S., Hasegawa T., Masui T., Takahashi K. (2014) Land use representation in a global CGE model for long-term simulation: CET vs. logit functions. *Food Security*, 6 (5), 685–699
- 藤森真一郎, 長谷川知子, 増井利彦, 高橋潔, シルバエランディエゴ, 戴瀚程, 脇岡靖明, 甲斐沼美紀子 (2015) AIM による新社会経済シナリオ SSP の定量化とそのシナリオの特徴. 土木学会論文集 G (環境), 71 (6), II_217-II_228
- Good P., Lowe J.A., Andrews T., Wiltshire A., Chadwick R., Ridley J. K., Menary M. B., Bouttes N., Dufresne J.L., Gregory J. M., Gregory J. M., Schaller N., Schaller N., Shiogama H. (2015) Nonlinear regional warming with increasing CO₂ concentrations. *Nature Climate Change*, 5, 138–142
- Haddeland I., Heinke J., Biemans H., Eisner S., Flörke M., Hanasaki N., Konzmann M., Ludwig F., Masaki Y., Schewe J., Stacke T., Tessler Z., Wada Y., Wisser D. (2013) A multi-model overview on global water resources affected by human interventions and climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111 (9), 3251–3256
- Hajima T., Ito A., Tachiiri K., Kawamiya M. (2014) Uncertainty of concentration – terrestrial carbon feedback in the Earth System Models. *Journal of Climate*, 27, 3425–3445, DOI: 10.1175/JCLI-D-13-00177.1
- 浜口耕平, 今田由紀子, 塩竈秀夫, 鼎信次郎 (2014) Event Attribution 実験を用いた 2010 年パキスタン豪雨の要因特定とプロセスの理解. 土木学会論文集 BI (水工学), 70 (4), I_565-I_570

- Hanasaki N., Fujimori S., Yamamoto T., Yoshikawa S., Masaki Y., Hijioka Y., Kainuma M., Kanamori Y., Masui T., Takahashi K., Kanae S. (2013) A global water scarcity assessment under Shared Socio-economic Pathways - Part 1: Water use. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17 (7), 2375–2391
- Hanasaki N., Fujimori S., Yamamoto T., Yoshikawa S., Masaki Y., Hijioka Y., Kainuma M., Kanamori Y., Masui T., Takahashi K., Kanae S. (2013) A global water scarcity assessment under Shared Socio-economic Pathways - Part 2: Water availability and scarcity. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17 (7), 2393–2413
- 長谷川知子, 藤森真一郎, 申龍熙, 高橋潔, 増井利彦 (2012) 気候変化が作物収量変化を通じて食料消費・経済に及ぼす影響のシナリオ分析. *土木学会論文集 G (環境)*, 68 (5), I_227-I_236
- Hasegawa T., Fujimori S., Shin Y., Takahashi K., Masui T., Tanaka A. (2014) Climate change impact and adaptation assessment on food consumption utilizing a new scenario framework. *Environmental Science and Technology*, 48, 438–445
- 長谷川知子, 藤森真一郎, 高橋潔, 増井利彦 (2014) 共通社会経済シナリオ SSP を用いた飢餓リスクに関する将来シナリオの開発. *土木学会論文集 G (環境)*, 70 (5), I_1-I_12
- 長谷川知子, 藤森真一郎, 横畠徳太, 高橋潔, 増井利彦 (2015) 気候変化による低栄養に起因する健康影響の経済評価. *土木学会論文集 G (環境)*, 71 (6), 23–34
- Hasegawa T., Fujimori S., Takahashi K., Masui T. (2015) Scenarios for the risk of hunger in the twenty-first century using Shared Socioeconomic Pathways. *Environmental Research Letters*, 10 (1), 014010–014017
- Hasegawa T., Fujimori S., Shin Y., Tanaka A., Takahashi K., Masui T. (2015) Consequence of Climate Mitigation on the Risk of Hunger. *Environmental Science & Technology*, 49 (12), 7245–7253
- Hasegawa T., Fujimori S., Takahashi K., Yokohata T., Masui T. (2016) Economic implications of climate change impacts on human health through undernourishment. *Climatic Change*, 136, 189–202
- Hashimoto S., Carvalhais N., Ito A., Migliavacca M., Nishina K., Reichstein M. (2015) Global spatiotemporal distribution of soil respiration modeled using a global database. *Biogeosciences*, 12, 4331–4364
- 脇岡靖明, 櫛田和秀, 岡和孝 (2014) 適応政策支援のための WebGIS を用いた温暖化影響評価配信方法に関する検討. *環境科学会誌*, 27 (5), 289–301
- 本田靖, 高橋潔 (2015) IPCC 第 5 次評価報告書を読み解く – WG2「影響・適応・脆弱性」を中心に –. *環境技術*, 44 (12), 642–647
- Iio A., Hikosaka K., Anten N.P.R., Nakagawa Y., Ito A. (2014) Global dependence of field-observed leaf area index on climate in woody species: Systematic review. *Global Ecology and Biogeography*, 23 (3), 274–285
- Imada Y., Watanabe M., Mori M., Kimoto M., Shiogama H., Ishii M. (2013) Contribution of Atmospheric Circulation Change to the 2012 Heavy Rainfall in Southwestern Japan in “Explaining extreme events of 2012 from a climate perspective”. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94 (9), S52–S54
- Ishida H., Kobayashi S., Kanae S., Hasegawa T., Fujimori S., Shin Y., Takahashi K., Masui T., Tanaka A., Honda Y. (2014) Global-scale projection and its sensitivity analysis of the health burden attributable to childhood undernutrition under the latest scenario framework for climate change research. *Environmental Research Letters*, 9 (6), 064014–064022
- 石田裕之, 小林翔太, 鼎信次郎, 長谷川知子, 藤森真一郎, 申龍熙, 高橋潔, 増井利彦, 田中朱美 (2014) 最新のシナリオフレームワークに基づいた将来の低栄養起因健康被害の推定. *土木学会論文集 B1 (水工学)*, 70 (4), 463–468
- Ishizaki N.N., Shiogama H., Takahashi K., Emori S., Dairaku K., Kusaka H., Nakaegawa T., Takayabu I. (2012) An attempt to estimate of probabilistic regional climate analogue in a warmer Japan. *Journal of Meteorological Society of Japan*, 90B, 65–74
- Ishizaki Y., Shiogama H., Emori S., Yokohata T., Nozawa T., Takahashi K., Ogura T., Yoshimori M., Nagashima T. (2013) Dependence of precipitation scaling patterns on emission scenarios for representative concentration pathways. *Journal of Climate*, 26 (22), 8868–8879
- Ishizaki Y., Yokohata T., Emori S., Shiogama H., Takahashi K., Nakaegawa T., Hanasaki N., Nozawa T., Ogura T., Yoshimori M. (2014) Validation of a Pattern Scaling Approach for Determining the Maximum Available Renewable Freshwater Resource. *Journal of Hydrometeorology*, 15 (1), 505–516
- 石崎安洋, 江守正多, 沖大幹, 塩竈秀夫, 横畠徳太, 吉森正和, 鼎信次郎, 仲江川敏之, 中河嘉明 (2014) 簡易気候モデルを用いた大気大循環モデルの模倣. *水工学論文集*, 58, I307–I312
- 伊藤昭彦, 野口航 (2014) 植物の呼吸と地球環境変動：モデルの観点から. *光合成研究*, 24 (1), 39–45

- 伊藤昭彦（2014）気候調節サービス. 天気, 61（9）, 803-805
- 伊藤昭彦, 山形与志樹（2015）生態系サービスの評価：気候変動対策と生物多様性保全のトレードオフ解消に向けて—趣旨説明—. 日本生態学会誌, 65, 109-113
- Jones C., Robertson E., Arora V., Friedlingstein P., Shevliakova E., Bopp L., Brovkin V., Hajima T., Kato E., Kawamiya M., Liddicoat S., Lindsay K., Reick C.H., Roelandt C., Segsneider J., Tjiputra J. (2013) Twenty-First-Century Compatible CO₂ Emissions and Airborne Fraction Simulated by CMIP5 Earth System Models under Four Representative Concentration Pathways. *Journal of Climate*, 26, 4398-4413
- 釜江陽一, 小玉知央, 武石あずさ（2013）EUCLIPSE 雲と気候に関するサマースクール参加報告. 天気, 60（10）, 17-22
- Kamae Y., Shiogama H., Watanabe M., Kimoto M. (2014) Attributing the increase in Northern Hemisphere hot summers since the late 20th century. *Geophysical Research Letters*, 41 (14), 5192-5199
- Kamae Y., Watanabe M., Kimoto M., Shiogama H. (2014) Summertime land-sea thermal contrast and atmospheric circulation over East Asia in a warming climate - Part I: Past changes and future projections. *Climate Dynamics*, 43 (9), 2553-2568
- Kamae Y., Watanabe M., Kimoto M., Shiogama H. (2014) Summertime land-sea thermal contrast and atmospheric circulation over East Asia in a warming climate - Part II: Importance of CO₂-induced continental warming. *Climate*, 43 (9), 2569-2583
- 釜江陽一, 吉森正和（2014）制要素の efficacy（エフィカシー）. 天気, 61（12）, 1023-1025
- 釜江陽一, 小倉知夫, 神代剛, 小玉知央, 野田暁, 清木達也, Ying-Wen Chen, 塩竈秀夫, 川合秀明, 渡部雅浩（2014）雲フィードバックに関するモデル相互比較プロジェクト（CFMIP）会議 2014 参加報告. 天気, 61（12）, 23-30
- Kamae Y., Watanabe M., Ogura T., Yoshimori M., Shiogama H. (2015) Rapid adjustments of cloud and hydrological cycle to increasing CO₂: a review. *Current Climate Change Reports*, 1 (2), 103-113
- Kamae Y., Shiogama H., Watanabe M., Ishii M., Ueda H., Kimoto M. (2015) Recent slowdown of tropical upper tropospheric warming associated with Pacific climate variability. *Geophysical Research Letters*, 42 (8), 2995-3003
- Kamae Y., Ogura T., Watanabe M., Xie S.-P., Ueda H. (2016) Robust cloud feedback over tropical land in a warming climate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121, 2593-2609, doi:10.1002/2015JD024525
- 亀山康子（2013）ドーハ会合を経て：国際社会での気候変動対策の動きと日本. 環境と文明, 21（1）, 6-7
- 亀山康子（2014）欧州連合（EU）の気候変動問題への対応. 環境管理, 50（7）, 68-69
- 亀山康子（2014）国際社会の動きと私たちの日常生活をつなげる. ECO ネット東京 62 エコアカデミー, <http://all62.jp/ecoacademy/29/01.html>
- 亀山康子（2015）排出枠の取引：炭素市場の現状. 環境管理, 51（1）, 52-53
- 亀山康子（2015）COP20 の概要と今後の展望. 環境管理, 51（2）, 74-75
- 亀山康子（2015）パリ会合（COP21）およびその後に向けた展望. 環境管理, 51（3）, 62-63
- Kameyama Y., Morita K., Kubota I. (2015) Finance for achieving low-carbon development in Asia: the past, present, and prospects for the future. *Journal of Cleaner Production*, 128, 201-208, doi:10.1016/j.jclepro.2014.12.089
- Kawase H., Takemura T., Nozawa T. (2011) Impact of carbonaceous aerosols on precipitation in tropical Africa during the austral summer in the twentieth century. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, 116, D18116
- Kim H.-J., Takata K., Wang B., Watanabe M., Kimoto M., Yokohata T., Yasunari T. (2011) Global monsoon, El Nino, and their interannual linkage simulated by MIROC5 and the CMIP3 CGCMs. *Journal of Climate*, 24, 5604-5618, doi: 10.1175/2011JCLI4132.1
- 木村富士男, 塩竈秀夫, 森正人, 今田由紀子, 木本昌秀, 水田亮, 村田昭彦, 金田幸恵, 高藪出（2014）「これは温暖化のせいですか？」異常気象の要因に迫る. *Sousei News Letter* NO.2, 2, 3-4
- 小玉知央, 釜江陽一, 小倉知夫, 神代剛, 川合秀明, 野田暁, 渡部雅浩（2013）雲フィードバックに関するモデル相互比較プロジェクト（CFMIP）会議 2013 参加報告. 天気, 60, 1029-1035
- Komuro Y., Suzuki T., Sakamoto T., Hasumi H., Ishii M., Watanabe M., Nozawa T., Yokohata T., Nishimura T., Ogochi K., Emori S., Kimoto M. (2012) Sea-Ice in Twentieth-Century Simulations by New MIROC Coupled Models: A Comparison between Models with High Resolution and with Ice Thickness Distribution. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 90A, 213-232
- Konar M., Dalin C., Hanasaki N., Rinaldo A., Rodriguez-Iturbe I. (2012) Temporal dynamics of blue and green virtual water trade networks. *Water Resources Research*, 48, W07509, doi:10.1029/2012WR011959

- Konar M., Hussein Z., Hanasaki N., Mauzerall D.L., Rodriguez-Iturbe I. (2013) Virtual water trade flows and savings under climate change. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17 (8), 3219–3234
- 久保田泉（2014）気候変動ワルシャワ会合の成果. *Law & Technology*, 63, 144–145
- Kundzewicz Z.W., Kanae S., Seneviratne S.I., Handmer J., Nicholls N., Peduzzi P., Mechler R., Bouwer L.M., Arnell N., Mach K., Muir-Wood R., Brakenridge G.R., Kron W., Benito G., Honda Y., Takahashi K., Sherstyukov B. (2013) Flood risk and climate change – global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, 59 (1), 1–28
- Lambert F.H., Webb M.J., Yoshimori M., Yokohata T. (2014) The cloud radiative effect on the atmospheric energy budget and global mean precipitation. *Climate Dynamics*, 44(7), 2301–2325
- Le Quéré C., Andres R.J., Boden T., Conway T., Houghton R.A., House J.I., Marland G., Peters G.P., van der Werf G.R., Ahlström A., Andrew R.M., Bopp L., Canadell J.G., Ciais P., Doney S.C., Enright C., Friedlingstein P., Huntingford C., Jain A.K., Jourdain C., Kato E., Keeling R.F., Klein Goldewijk K., Levis S., Lomas M., Poulter B., Raupach M.R., Schwinger J., Sitch S., Stocker B.D., Viovy N., Zaehle S., Zeng N. (2013) The global carbon budget 1959–2011. *Earth System Science Data*, 5, 165–185
- Le Quere C., Peters G.P., Andres R.J., Andrew R.M., Boden T.A., Ciais P., Friedlingstein P., Houghton R.A., Marland G., Moriarty R., Sitch S., Tans P., Arneeth A., Arvanitis A., Bakker D.C.E., Bopp L., Canadell J.G., Chini L.P., Doney S.C., Harper A., Harris I., House J.I., Jain A.K., Jones S.D., Kato E., Keeling R.F., Klein Goldewijk K., Kortzinger A., Koven C., Lefevre N., Maignan F., Omar A., Ono T., Park G.-H., Pfeil B., Poulter B., Raupach M.R., Regnier P., Rodenbeck C., Saito S., Schwinger J., Segschneider J., Stocker B.D., Takahashi T., Tilbrook B., van Heuven S., Viovy N., Wanninkhof R., Wiltshire A., Zaehle S. (2014) Global carbon budget 2013. *Earth System Science Data*, 6, 235–263
- Lestari R.K., Watanabe M., Imada Y., Shiogama H., Field R.D., Takemura T., Kimoto M. (2014) Increasing potential of biomass burning over Sumatra, Indonesia induced by anthropogenic tropical warming. *Environmental Research Letters*, 9 (10), 104010
- Lotze-Campen H., von Lampe M., Kyle P., Fujimori S., Havlik P., van Meijl H., Hasegawa T., Popp A., Schmitz C., Tabeau A., Valin H., Willenbockel D., Wise M. (2014) Impacts of increased bioenergy demand on global food markets: an AgMIP economic model intercomparison. *Agricultural Economics*, 45 (1), 103–116
- Masaki Y., Hanasaki N. (2013) Adaptation measures for the impact of climate change on global water resources - Option 1: Reducing water use. *Impacts World 2013, International Conference on Climate Change Effects*, 1–6
- 眞崎良光, 花崎直太, 高橋潔, 肱岡靖明 (2013) 全球気候モデル出力のバイアス補正手法の違いによる水文解析への影響. *土木学会論文集 B1 (水工学)*, 69 (4), I_1813-I_1818
- Masaki Y., Hanasaki N., Takahashi K., Hijioka Y. (2014) Global-scale analysis on future changes in flow regimes using Gini and Lorenz asymmetry coefficients. *Water Resources Research*, 50 (5), 4054–4078
- 眞崎良光, 花崎直太, 高橋潔, 肱岡靖明 (2014) 地球規模の灌漑用水要求量とその水源に対する気候変化の影響. *土木学会論文集 B1 (水工学)*, 70 (4), I_289-I_294
- 眞崎良光, 花崎直太, 高橋潔, 肱岡靖明 (2014) 気候変動にともなう理論包蔵水力と流況に基づく水力発電量の将来変化. *土木学会論文集 G (環境)*, 70 (5), I_111-I_120
- Masaki Y., Hanasaki N., Takahashi K., Hijioka Y. (2015) Propagation of biases in humidity in the estimation of global irrigation water. *Earth System Dynamics*, 6, 461–484
- Masutomi Y., Iizumi T., Takahashi K., Yokozawa M. (2012) Estimation of the damage area due to tropical cyclones using fragility curves for paddy rice in Japan. *Environmental Research Letters*, 7 (1), 14020
- Matsui K., Ochiai H., Yamagata Y. (2014) Feedback on electricity usage for home energy management: A social experiment in a local village of cold region. *Applied Energy*, 120, 159–168
- Min S.-K., Zhang X., Zwiers F., Shiogama H., Tung Y.-S., Wehner M. (2013) Multi-Model Detection and Attribution of Extreme Temperature Changes. *Journal of Climate*, 26, 7430–7451
- Mori M., Watanabe M., Shiogama H., Inoue J., Kimoto M. (2014) Robust Arctic sea-ice influence to frequent Eurasian cold winters in the recent past. *Nature Geoscience*, 7, 869–873
- 中道久美子, 村尾俊道, 義浦慶子 (2011) 転居前後の自動車利用変化とそれによる CO₂ 排出量削減のための意識啓発を考慮した都市コンパクト化施策の検討. *土木学会論文集*, 67 (3), 300–310

- Nelson G.C., van der Mensbrugghe D., Blanc E., Calvin K., Hasegawa T., Havlik P., Kyle P., Lotze-Campen H., von Lampe M., Mason d' Croz D., van Meijl H., Muller C., Reilly J., Robertson R., Sands R.D., Schmitz C., Tabeau A., Takahashi K., Valin H. (2013) Agriculture and Climate Change in Global Scenarios: Why Don't the Models Agree. *Agricultural economics*, 45 (1), 85–101
- Nelson G.C., Valin H., Sands R.D., Havlik P., Ahammad H., Deryng D., Elliott J., Fujimori S., Hasegawa T., Heyhoe E., Kyle P., Von Lampe M., Lotze-Campen H., Mason d' Croz D., van Meijl H., van der Mensbrugghe D., Muller C., Popp A., Robertson R., Robinson S., Schmid E., Schmitz C., Tabeau A., Willenbockel D. (2013) Climate change effects on agriculture: Economic responses to biophysical shocks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111 (9), 3274–3279
- Nishina K., Ito A., Beerling D.J., Cadule P., Ciais P., Clark D.B., Falloon P., Friend A.D., Kahana R., Kato E., Keribin R., Lucht W., Lomas M., Rademacher T.T., Pavlick R., Schaphoff S., Vuichard N., Warszawski L., Yokohata T. (2013) Global soil organic carbon stock projection uncertainties relevant to sensitivity of global mean temperature and precipitation changes. *Earth System Dynamics Discussion*, 4 (2), 1035–1064
- Nishina K., Ito A., Beerling D.J., Cadule P., Ciais P., Clark D.B., Falloon P., Friend A.D., Kahana R., Kato E., Keribin R., Lucht W., Lomas M., Rademacher T.T., Pavlick R., Schaphoff S., Vuichard N., Warszawski L., Yokohata T. (2014) Quantifying uncertainties in soil carbon responses to changes in global mean temperature and precipitation. *Earth System Dynamics*, 5, 197–209
- Nishina K., Ito A., Falloon P., Friend A.D., Beerling D.J., Ciais P., Clark D.B., Kahana R., Kato E., Lucht W., Lomas M., Pavlick R., Schaphoff S., Warszawski L., Yokohata T. (2014) Decomposing uncertainties in the future terrestrial carbon budget associated with emission scenario, climate projection, and ecosystem simulation using the ISI-MIP result. *Earth System Dynamics Discussion*, 5, 1197–1219
- Nishina K., Ito A., Falloon P., Friend A.D., Beerling D.J., Ciais P., Clark D.B., Kahana R., Kato E., Lucht W., Lomas M., Pavlick R., Schaphoff S., Warszawski L., Yokohata T. (2015) Decomposing uncertainties in the future terrestrial carbon budget associated with emission scenarios, climate projections, and ecosystem simulations using the ISI-MIP results. *Earth System Dynamics*, 6, 435–445, DOI: 10.5194/esd-6-435-2015
- Ogura T., Webb M.J., Watanabe M., Lambert F.H., Tsushima Y., Sekiguchi M. (2013) Importance of instantaneous radiative forcing for rapid tropospheric adjustment. *Climate Dynamics*, 43 (5–6), 1409–1421
- 小倉知夫 (2013) 入門講座 地球温暖化 – 第2講 気候モデルによる地球温暖化のシミュレーション –. *大気環境学会誌*, 48 (5), A11–A18
- 小倉知夫, 神代剛, 鈴木健太郎, 清木達也, 川合秀明, 野田暁, 釜江陽一, 渡部雅浩 (2016) 雲フィードバックに関するモデル相互比較プロジェクト (CFMIP) 会議 2015 参加報告. *天気*, 63 (2), 105–112
- Ohba M., Shiogama H., Yokohata T., Watanabe M. (2013) Impact of Strong Tropical Volcanic Eruptions on ENSO Simulated in a Coupled GCM. *Journal of Climate*, 26 (14), 5169–5182
- Piontek F., Mueller C., Pugh T.A.M., Clark D., Deryng D., Elliott J., Coloén-Gonzalez F., Floerke M., Folberth C., Franssen W., Frieler K., Friend A., Gosling S.N., Hemming D., Khabarov N., Kim H., Lomas M., Masaki Y., Mengel M., Morse A., Neumann K., Nishina K., Ostberg S., Pavlick R., Ruane A.C., Schewe J., Schmid E., Stacke T., Tang Q., Tessler Z., Tompkins A., Warszawski L., Wisser D., Schellnhuber H.J. (2014) Multisectoral climate impact hotspots in a warming world. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111 (9), 3233–3238
- Prudhomme C., Giuntoli I., Robinson E.L., Clark D.B., Arnell N.W., Dankers R., Fekete B., Franssen W., Gerten D., Gosling S.N., Hagemann S., Hannah D.M., Kim H., Masaki Y., Satoh Y., Stacke T., Wada Y., Wisser D. (2014) Hydrological droughts in the 21st century: hotspots and uncertainties from a global multi-model ensemble experiment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111 (9), 3262–3267
- Robinson S., van Meijl H., van der Mensbrugghe D., Fujimori S., Masui T., Sands R.D., Wise M., Calvin K., Valin H., Havlik P., Mason d' Croz D., Tabeau A., Kavallani A., Schmitz C., Dietrich J. (2013) Comparing supply-side specifications in models of global agriculture and the food system. *Agricultural Economics*, 45 (1), 21–35
- Sakamoto T.T., Komuro Y., Nishimura T., Ishii M., Tatebe H., Shiogama H., Hasegawa A., Toyoda T., Mori M., Suzuki T., Imada Y., Nozawa T., Takata K., Mochizuki T., Ogochi K., Emori S., Hasumi H., Kimoto M. (2012) MIROC4h-A New High-Resolution Atmosphere-Ocean Coupled General Circulation Model. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 90 (3), 325–359
- 三瓶由紀, 江守正多, 青柳みどり, 松本安生, 朝倉暁生, 高橋潔, 福士謙介, 住明正 (2011) 研究者・メディア間の温暖化リスクコミュニケーション促進に向けた対話型フォーラムの可能性. *科学技術社会論研究 第9号 地球温暖化問題*, 54–69
- Sato H., Ito A., Ito A.N., Ise T., Kato E. (2015) Current status and future of land surface models. *Soil Science and Plant Nutrition*, 61 (1), 34–47

- Schewe J., Heinke J., Gerten D., Haddeland I., Arnell N.W., Clark D.B., Dankers R., Eisner S., Fekete B., Colón-González F.J., Gosling S.N., Kim H., Liu X., Masaki Y., Portmann F.T., Satoh Y., Stacke T., Tang Q., Wada Y., Wisser D., Albrecht T., Frieler K., Piontek F., Warszawski L., Kabat P. (2013) Multi-model assessment of water scarcity under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111 (9), 3245–3250
- Schmitz C., van Meijl H., Kyle P., Fujimori S., Gurgel A., Havlik P., Heyhoe E., Mason d' Croz D., Popp A., Sands R., Tabeau A., van der Mensbrugghe D., von Lampe M., Wise M., Blanc E., Hasegawa T., Valin H. (2013) Land-use change trajectories up to 2050 - Insights from a global agro-economic model comparison. *Agricultural economics*, 45 (1), 69–84
- 申龍熙, 高橋潔, 肱岡靖明, 花崎直太, 山本隆弘, 増富祐司 (2011) 気候予測の不確実性を考慮した世界のトウモロコシ生産性の温暖化影響評価. *土木学会論文集 G (環境)*, 67 (5), I_61-I_70
- 申龍熙, 高橋潔, 花崎直太, 肱岡靖明 (2012) 日本域付近の気候予 - CMIP3 気候シナリオと CMIP5 気候シナリオの比較 -. *土木学会論文集 G (環境)*, 68 (5), I_159-I_169
- Shiogama H., Watanabe M., Yoshimori M., Yokohata T., Ogura T., Annan J.D., Hargreaves J.C., Abe M., Kamae Y., Oishi R., Nobui R., Emori S., Nozawa T., Abe-Ouchi A., Kimoto M. (2012) Perturbed physics ensemble using the MIROC5 coupled atmosphere-ocean GCM without flux corrections: experimental design and results. *Climate Dynamics*, 39 (12), 3041–3056
- Shiogama H., Stone D.A., Nagashima T., Nozawa T., Emori S. (2013) On the linear additivity of climate forcing-response relationships at global and continental scales. *International Journal of Climatology*, 33 (11), 2542–2550
- Shiogama H., Watanabe M., Imada Y., Mori M., Ishii M., Kimoto M. (2013) An event attribution of the 2010 drought in the South Amazon region using the MIROC5 model. *Atmospheric Science Letters*, 14, 170–175
- Shiogama H., Watanabe M., Ogura T., Yokohata T., Kimoto M. (2013) Multi-Parameter Multi-Physics Ensemble (MPMPE): A new approach exploring the uncertainties of climate sensitivity. *Atmospheric Science Letters*, 15 (2), 97–102
- 塩竈秀夫 (2013) 人間活動が世界の気候に与える影響 - 温室効果ガスとエアロゾルの変化の影響 -. *安全工学*, 52 (6), 371–375
- Shiogama H., Watanabe M., Imada Y., Mori M., Kamae Y., Ishii M., Kimoto M. (2014) Attribution of the June-July 2013 heat wave in the southwestern United States. *SOLA*, 10, 122–126
- Shiogama H., Ogura T. (2014) Clouds of uncertainty. *Nature*, 505, 34–35
- 塩竈秀夫 (2015) 専門家コメント「極端な高温や豪雨に温暖化が与える影響について」. 一般社団法人サイエンス・メディア・センター SMC 発サイエンス・アラート, Web 配信, <http://smc-japan.org/?p=3899>
- 塩竈秀夫 (2015) 「地球温暖化は停滞」に異議. SMC 発サイエンス・アラート, Web 配信, <http://smc-japan.org/?p=4024>
- Shiogama H., Stone D., Emori S., Takahashi K., Mori S., Maeda A., Ishizaki Y., Allen MR (2016) Predicting future uncertainty constraints on global warming projections. *Scientific Reports*, 6, 18903
- Stott P.A., Jones G.S., Christidis N., Zwiers F.W., Hegerl G., Shiogama H. (2011) Single-step attribution of increasing frequencies of very warm regional temperatures to human influence. *Atmospheric Science Letters*, 12 (2), 220–227
- Su X., Takahashi K., Fujimori S., Hasegawa S., Emori S., Hijioka Y., Masui T. (2015) Assessment of greenhouse gas emission pathways by considering a possible climate sensitivity range under different socio-economic scenarios. *土木学会論文集 G (環境)*, 71 (6), II_205-II_216
- Suzuki K., Stephens G., Bodas-Salcedo A., Wang M., Golaz J.C., Yokohata T., Koshiro T. (2015) Evaluation of the warm rain formation process in global models with satellite observations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 72, 3996–4014
- Suzuki-Parker A., Kusaka H., Yamagata Y. (2015) Assessment of the Impact of Metropolitan-Scale Urban Planning Scenarios on the Moist Thermal Environment under Global Warming: A Study of the Tokyo Metropolitan Area Using Regional Climate Modeling. *Advances in Meteorology*, 2015, 693754
- Tachiiri K., Ito A., Hajima T., Hargreaves J.C., Annan J.D., Kawamiya M. (2012) Nonlinearity of land carbon sensitivities in climate change simulations. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 90A, 259–274
- 高橋潔, 杉山昌広, 江守正多, 沖大幹, 長谷川利祐, 住明正, 福士謙介, 青柳みどり, 朝倉暁生, 松本安生 (2011) 地球温暖化リスクの伝達の実践の試み - メディア関係者との意見交換と市民対象の双方向型シンポジウム -. *科学技術社会論研究*, 9, 40–53
- 高橋潔, 高薮出, 石崎紀子, 塩竈秀夫, 松井哲哉, 田中信行, 江守正多 (2013) 3 種の力学的ダウンスケーリングシナリオを用いた我が国のブナ林分布適域の変化予測. *土木学会論文集 G (環境)*, 69 (5), I_161-I_170

- 高橋潔 (2013) 地球温暖化が引き起こす影響－最近の科学的知見－. 日本エネルギー学会誌, 92 (3), 216-223
- 高橋潔 (2013) 地球温暖化－第3講 地球温暖化による環境, 社会への影響評価－. 大気環境学会誌, 48 (6), A19
- 高橋潔 (2014) 地球温暖化の現状. 公衆衛生, 78 (1), 51-55
- 高橋潔 (2014) IPCC 第5次報告: 気候変動影響. 環境と公害, 44 (1), 61-65
- 高橋潔 (2014) 気候変動の影響と脆弱性に関する最新知見について. 環境情報科学, 43 (3), 21-27
- 高橋潔 (2015) 特別企画セッション1「再認識, 温暖化リスク! : リスク的視点から温暖化, 気候変動問題を語る」. 日本リスク研究学会誌, 24 (4), 245-248
- 高橋潔 (2015) 気候変動影響に関する科学的知見－IPCC 評価報告書の経緯を辿る－. 港湾, 92, 8-11
- 高橋潔, 三枝信子, 及川武久, 河宮未知生, 羽島知洋, 山中康裕, 平田貴文, 阿部彩子 (2015) 物理・生態システムさらには人間システムのつながりをモデルで描く. 地球環境, 20 (2), 135-142
- Takayabu I., Hibino K., Sasaki H., Shiogama H., Mori N., Shibutani Y., Takemi T. (2015) Climate change effects on the worst-case storm surge: a case study of Typhoon Haiyan. *Environmental Research Letters*, 10 (6), 064011
- 田上雅浩, 渡部哲史, 恒川貴弘, 花崎直太, 平林由希子 (2015) 山岳からの氷河融解を考慮した全球水資源評価. 土木学会論文集, 71 (4), 451-456
- 田中朱美, 高橋潔, 申龍熙, 増富祐司, 山中康裕, 佐藤友徳 (2012) 潜在作物生産性モデル GAEZ の北海道での適用可能性の検討と改良. 土木学会論文集 G (環境), 68 (5), I_237-I_248
- 田中朱美, 高橋潔, 増富祐司, 花崎直太, 脇岡靖明, SU Xuanming, 長谷川知子, 藤森真一郎, 増井利彦 (2014) 温暖化政策支援モデルのための全球作物収量影響関数の開発. 生物と気象, 14, 41-56
- Tanaka A., Takahashi K., Masutomi Y., Hanasaki N., Hijioka Y., Shiogama H., Yamanaka Y. (2015) Adaptation pathways of global wheat production: Importance of strategic adaptation to climate change. *Scientific Reports*, 5, 14312
- Tanaka K., Kim H.J., Saito K., Takahashi H.G., Watanabe M., Yokohata T., Kimoto M., Takata K., Yasunari T. (2012) How have both cultivation and warming influenced annual global isoprene and monoterpene emissions since the preindustrial era? *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12, 9703-9718
- Tanaka K. (2015) Interactive comment on Metrics for linking emissions of gases and aerosols to global precipitation changes by K. P. Shine et al. *Earth System Dynamics Discussions*, 6, C334-C338
- Tsushima Y., Ringer M.A., Koshiro T., Kawai H., Roehrig R., Cole J., Watanabe M., Yokohata T., Bodas-Salcedo A., Williams K.D., Webb M.J. (2015) Robustness, uncertainties, and emergent constraints in the radiative responses of stratocumulus cloud regimes to future warming. *Climate Dynamics*, 46 (9), 3025-3039
- Valin H., Sands R.D., van der Mensbrugghe D., Ahammad H., Bodirsky B., Hasegawa T., Havlik P., Kyle P., Mason d'Croz D., Paltsev S., Tabeau A., Blanc E., Fujimori S., Heyhoe E., van Meijl H., Rolinski S., Willenbockel D., von Lampe M. (2014) The Future of Food Demand: Understanding Differences in Global Economic Models. *Agricultural Economics*, 45 (1), 51-67
- von Lampe M., Willenbockel D., Blanc E., Cai Y., Calvin K., Fujimori S., Hasegawa T., Havlik P., Kyle P., Lotze-Campen H., Mason d'Croz D., Nelson G.D., Sands R.D., Schmitz C., Tabeau A., Valin H., van der Mensbrugghe D., van Meijl H. (2014) Why Do Global Long-term Scenarios for Agriculture Differ? An overview of the AgMIP Global Economic Model Intercomparison. *Agricultural economics*, 45 (1), 3-20
- Wada Y., Wissler D., Eisner S., Flörke M., Gerten D., Haddeland I., Hanasaki N., Masaki Y., Portmann F.T., Stacke T., Tessler Z., Schewe J. (2013) Multimodel projections and uncertainties of irrigation water demand under climate change. *Geophysical Research Letters*, 40 (17), 4626-4632
- Wan H., Zhang X., Zwiers F.W., Shiogama H. (2013) Effect of data coverage on the estimation of mean and variability of precipitation at global and regional scales. *Journal of Geophysical Research*, 118 (2), 534-546
- Warszawski L., Friend A., Ostberg S., Frieler L., Lucht W., Schaphoff S., Beerling D., Cadule P., Ciais P., Clark D.B., Kahana R., Ito A., Keribin R., Kleidon A., Lomas M., Nishina K., Pavlick R., Rademacher T.T., Buechner M., Piontek F., Schewe J., Serdeczny O., Schellnhuber H.J. (2013) A multi-model analysis of risk of ecosystem shifts under climate change. *Environmental Research Letters*, 8 (4), 044018
- Watanabe M., Shiogama H., Yokohata T., Ogura T., Yoshimori M., Emori S., Kimoto M. (2011) Constraints to the tropical low-cloud trends in historical climate simulations. *Atmospheric Science Letters*, 12 (3), 288-293

- Watanabe M., Shiogama H., Yoshimori M., Ogura T., Yokohata T., Okamoto H., Emori S., Kimoto M. (2011) Fast and slow timescales in the tropical low-cloud response to increasing CO₂ in two climate models. *Climate Dynamics*, 39 (7), 1627–1641, doi: 10.1007/s00382-011-1178-y
- Watanabe M., Shiogama H., Yokohata T., Kamae Y., Yoshimori M., Ogura T., Annan J.D., Hargreaves J.C., Emori S., Kimoto M. (2012) Using a multiphysics ensemble for exploring diversity in cloud-shortwave feedback in GCMs. *Journal of Climate*, 25, 5416–5430
- Watanabe M., Shiogama H., Imada Y., Mori M., Ishii M., Kimoto M. (2013) Event Attribution of the August 2010 Russian Heat Wave. *SOLA*, 9, 65–68
- Watanabe M., Kamae Y., Yoshimori M., Oka A., Sato M., Ishii M., Mochizuki T., Kimoto M. (2013) Strengthening of ocean heat uptake efficiency associated with the recent climate hiatus. *Geophysical Research Letters*, 40, 3175–3179, doi:10.1002/grl.50541
- Watanabe M., Shiogama H., Tatabe H., Hayashi M., Ishii M., Kimoto M. (2014) Contribution of natural decadal variability to global warming acceleration and hiatus. *Nature Climate Change*, 4, 893–897
- Watanabe M., Kamae Y., Kimoto M. (2014) Robust increase of the equatorial Pacific rainfall and its variability in a warmed climate. *Geophysical Research Letters*, 41 (9), 3227–3232
- Watanabe S., Sudo K., Nagashima T., Takemura T., Kawase H., Nozawa T. (2011) Future projections of surface UV-B in a changing climate. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, 116, D16118
- Watanabe S., Hajima T., Sudo K., Nagashima T., Takemura T., Okajima H., Nozawa T., Kawase H., Abe M., Yokohata T., Ise T., Sato H., Kato E., Takata K., Emori S., Kawamiya M. (2011) MIROC-ESM; model description and basic results of CMIP5–20c3m experiments. *Geoscientific Model Development Discussions*, 4, 1063–1128
- Watanabe S., Yokohata T. (2012) Future Increase in the All-sky UV-B Radiation over Asia Projected by an Earth System Model. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 90A, 295–305
- Watanabe S., Takemura T., Sudo K., Yokohata T., Kawase H. (2012) Anthropogenic changes in the surface all-sky UV-B radiation through 1850–2005 simulated by an Earth system model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12, 5249–5257
- 渡部哲史, 高橋潔, 脇岡靖明, 河宮未知生, 沖大幹, 鬼頭昭雄 (2016) IPCC 地域気候予測とその影響評価・リスク解析への利用に関するワークショップ参加報告. *水文・水資源学会誌*, 29 (1), 79-84
- Webb M. J., Lock A. P., Bretherton C. S., Bony S., Cole J. N. S., Idelkadi A., Kang S. M., Koshiro T., Kawai H., Ogura T., Roebrig R., Shin Y., Mauritsen T., Sherwood S. C., Vial J., Watanabe M., Woelfle M. D., Zhao M. (2015) The impact of parametrized convection on cloud feedback. *Philosophical transactions of the royal society*, A373, 20140414
- 山形与志樹, 瀬谷創, 中道久美子 (2011) 土地利用モデルを用いた東京都市圏の土地利用シナリオ分析. *環境科学会誌*, 24 (3), 169-179
- Yasunaka S., Ishii M., Kimoto M., Mochizuki T., Shiogama H. (2011) Influence of XBT temperature bias on decadal climate prediction with a coupled climate model. *Journal of Climate*, 24, 5303–5308, doi: 10.1175/2011JCLI4230.1
- Yokohata T., Annan J.D., Collins M., Jackson C. S., Tobis M., Webb M. J., Hargreaves J. C. (2012) Reliability of multi-model and structurally different single-model ensembles. *Climate Dynamics*, 39, 599–616
- 横畠徳太 (2012) 食料生産と気候変動の将来予測にむけて. *地球環境研究センターニュース*, 23 (1), 2-4
- 横畠徳太 (2012) 夏の大公開 〜 楽しく学んでエコカ (りょく) アップ〜「地球温暖化の気になる疑問, 研究者に聞きにいこう!」開催しました. *地球環境研究センターニュース*, 23 (6), 201209-262004
- Yokohata T., Annan J.D., Collins M., Jackson C.S., Shiogama H., Watanabe M., Emori S., Yoshimori M., Abe M., Webb M.J., Hargreaves J.C (2013) Reliability and importance of structural diversity of climate model ensembles. *Climate Dynamics*, 41 (9), 2745–2763
- Yoshida M., Haywood J.M., Yokohata T., Murakami H., Nakajima T. (2013) Spatial distribution of dust's optical properties over the Sahara and Asia inferred from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. *Atmosphere Chemistry and Physics*, 13, 10827–10845
- Yoshikane T., Kimura F., Kawase H., Nozawa T. (2012) Verification of the performance of the pseudo-global-warming method for future climate changes during June in East Asia. *SOLA*, 8, 133–136
- Yoshimori M., Hargreaves J. C., Annan J. D., Yokohata T., Abe-Ouchi A. (2011) Dependency of feedback on forcing and climate states in perturbed parameter ensembles. *Journal of Climate*, 24, 6440–6455, doi:10.1175/2011JCLI3954.1

吉森正和, 横畠徳太, 小倉知夫, 大石龍太, 河宮未知生, 塩竈秀夫, 對馬洋子, 小玉知央, 野田暁, 千喜良稔, 竹村俊彦, 佐藤正樹, 阿部彩子, 渡部雅浩, 木本昌秀 (2012) 気候感度 Part1: 気候フィードバックの概念と理解の現状. 天気, 59 (1), 5-22

吉森正和, 横畠徳太, 小倉知夫, 大石龍太, 河宮未知生, 塩竈秀夫, 對馬洋子, 小玉知央, 野田暁, 千喜良稔, 竹村俊彦, 佐藤正樹, 阿部彩子, 渡部雅浩, 木本昌秀 (2012) 気候感度 Part2: 不確実性の低減への努力. 天気, 59 (2), 91-109

吉森正和, 横畠徳太, 小倉知夫, 大石龍太, 河宮未知生, 塩竈秀夫, 對馬洋子, 小玉知央, 野田暁, 千喜良稔, 竹村俊彦, 佐藤正樹, 阿部彩子, 渡部雅浩, 木本昌秀 (2012) 気候感度 Part 3: 古環境からの検証. 天気, 59 (3), 143-150

Yoshimori M., Watanabe M., Abe-Ouchi A., Shiogama H., Ogura T. (2013) Relative contribution of feedback processes to Arctic amplification of temperature change in MIROC GCM. *Climate Dynamics*, 42 (5), 1613-1630, doi:10.1007/s00382-013-1875-9

(3) プロジェクト3: 低炭素社会に向けたビジョン・シナリオ構築と対策評価に関する統合研究

Akashi O., Hanaoka T. (2012) Technological feasibility and costs of achieving a 50 % reduction of global GHG emissions by 2050: mid- and long-term perspectives. *Sustainability Science*, 7 (2), 139-156

Akashi O., Hijioka Y., Masui T., Hanaoka T., Kainuma M. (2012) GHG emission scenarios in Asia and the world: The key technologies for significant reduction. *Energy Economics*, 34 (Supplement 3), S346-S358

Akashi O., Hanaoka T., Masui T., Kainuma M. (2013) Halving global GHG emissions by 2050 without depending on nuclear and CCS. *Climatic Change*, 123 (3), 611-622

Asayama Y., Limmeechokchai B. (2014) Policies and measures to remove energy efficiency barriers in Thai buildings toward nationally appropriate mitigation actions (NAMAs). *Proceedings of International Conference and Utility Exhibition on: Green Energy for Sustainable Development (ICUE 2014)*, 1-13

Asayama Y. (2014) Toward the pledge and sustainable implementation of Thailand NAMAs: Analysis of barriers to energy efficiency in designated buildings. *Proceedings 42th Environmental Systems Research*, 281-292

朝山由美子 (2014) Toward the pledge and sustainable implementation of Thailand NAMAs: Analysis of barriers to energy efficiency in designated buildings. 第42回環境システム研究発表会講演集, 281-292

Ashina S., Fujino J., Masui T., Ehara T., Hibino G. (2012) A roadmap towards a low-carbon society in Japan using backcasting methodology: Feasible pathways for achieving an 80% reduction in CO₂ emissions by 2050. *Energy Policy*, 41, 584-598

Berkhout F., Marcotullio P., Hanaoka T. (2012) Understanding energy transitions. *Sustainability Science*, 7 (2), 109-111

Chaturvedi V., Waldhoff S., Clarke L., Fujimori S. (2012) What are the starting points? Evaluating base-year assumptions in the Asian Modeling Exercise. *Energy Economics*, 34 (3), S261-S271

Cheng B., Dai H., Wang P., Zhao D., Masui T. (2015) Impacts of carbon trading scheme on air pollutant emissions in Guangdong Province of China. *Energy for Sustainable Development*, 27, 174-185

Chunark P., Promjiraprawat K., Winyuchakrit P., Limmeechokchai B., Masui T., Hanaoka T., Matsuoka Y. (2014) Quantitative Analysis of CO₂ Mitigation in Thai Low Carbon Power Sector towards 2050. *Energy Procedia*, 52, 77-84

Dai H., Masui T., Matsuoka Y., Fujimori S. (2011) Assessment of China's climate commitment and non-fossil energy plan towards 2020 using hybrid AIM/CGE model. *Energy Policy*, 39 (5), 2875-2887

Dai H., Masui T., Matsuoka Y., Fujimori S. (2012) The impacts of China's household consumption expenditure patterns on energy demand and carbon emissions towards 2050. *Energy Policy*, 50, 736-750

Dai H., Mischke P. (2014) Future Energy Consumption and Emissions in East-, Central- and West-China: Insights from Soft-linking Two Global Models. *Energy Procedia*, 61, 2584-2587

Dai H., Silva D., Fujimori S., Masui T. (2015) Key factors affecting long-term penetration of global onshore wind energy integrating top-down and bottom-up approaches. *Renewable Energy*, 85, 19-30

Dai H., Mischke P., Xie X., Xie Y., Masui T. (2015) Closing the gap? Top-down versus bottom-up projections of China's regional energy use and CO₂ emissions. *Applied Energy*, 162, 1355-1373, doi:10.1016/j.apenergy.2015.06.069

Dong H., Dai H., Dong L., Fujita T., Geng Y., Klimont Z., Inoue T., Bunya S., Fujii M., Masui T. (2015) Pursuing air pollutant co-benefits of CO₂ mitigation in China: A provincial leveled analysis. *Applied Energy*, 144, 165-174

- Frankenberg C., Fisher J.B., Worden J., Badgley G., Saatchi S.S., Lee Jung-Eun, Toon G.C., Butz A., Jung M., Kuze A., Yokota T. (2011) New global observations of the terrestrial carbon cycle from GOSAT: Patterns of plant fluorescence with gross primary productivity. *Geophysical Research Letters*, 38 (17), L17706
- Fujimori S., Masui T. (2011) How dematerialization contributes to a low carbon society? *Ecology and the Environment*, 143, 315–326
- 藤森真一郎, 増井利彦, 松岡譲 (2011) 世界温室効果ガス排出量の半減シナリオとその含意. 環境システム研究論文集, 39 (II), 243-254
- Fujimori S., Masui T., Matsuoka Y. (2013) Global low carbon society scenario analysis based on two representative socioeconomic scenarios. *Global Environmental Research*, 17 (1), 79–87
- 藤森真一郎, 増井利彦 (2013) 将来の気候変化を評価するための温室効果ガス排出経路と社会経済シナリオ. 日本エネルギー学会誌, 92 (3), 196-203
- 藤森真一郎, 増井利彦, 松岡譲 (2013) エネルギー機器情報を用いた応用一般均衡モデルの開発と緩和策の分析. 土木学会論文集 G (環境), 69 (5), I_227-I_238
- 藤森真一郎, 長谷川知子, 増井利彦, 高橋潔 (2013) エネルギー・農業・土地利用の長期的分析用の応用一般均衡モデル開発. 土木学会論文集 G (環境), 69 (6), II_35-II_46
- Fujimori S., Hasegawa T., Masui T., Takahashi K. (2014) Land use representation in a global CGE model for long-term simulation: CET vs. logit functions. *Food Security*, 6 (5), 685–699
- Fujimori S., Kainuma M., Masui T., Hasegawa T., Dai H. (2014) The effectiveness of energy service demand reduction: A scenario analysis of global climate change mitigation. *Energy policy*, 75, 379–391
- Fujimori S., Masui T., Matsuoka Y. (2014) Development of a global computable general equilibrium model coupled with detailed energy end-use technology. *Applied Energy*, 128 (1), 296–306
- 藤森真一郎, 甲斐沼美紀子, 増井利彦, 長谷川知子, 戴瀚程 (2014) エネルギーサービス需要低減の価値：統合評価モデルを用いた気候緩和シナリオによる定量化. 土木学会論文集 G (環境), 70 (5), I_137-I_146
- Fujimori S., Masui T., Matsuoka Y. (2015) Gains from emission trading under multiple stabilization targets and technological constraints. *Energy Economics*, 48, 306–315
- 藤森真一郎, 増井利彦, 松岡譲, 戴瀚程 (2015) 統合評価モデル AIM/CGE を用いた過去のエネルギー消費量の推計とモデル検証. 土木学会論文集 G (環境), 71 (5), I_153-I_164
- 藤森真一郎, 長谷川知子, 増井利彦, 高橋潔, シルバエランディエゴ, 戴瀚程, 脇岡靖明, 甲斐沼美紀子 (2015) AIM による新社会経済シナリオ SSP の定量化とそのシナリオの特徴. 土木学会論文集 G (環境), 71 (6), II_217-II_228
- 藤野純一 (2012) 持続可能なアジア低炭素開発に向けて－アジア低炭素社会研究プロジェクト－. 産業と環境, 41 (2), 31–34
- 藤野純一 (2013) 風を吹かして地元の桶屋を儲けさせよう－見えない価値を可視化してお金を回すのが金融の役割－. 環境と文明, 21 (2), 9–10
- 藤野純一 (2013) アジア太平洋統合評価モデルを用いた定量的な温暖化対策立案支援. 環境技術, 42 (3), 137–142
- 藤野純一 (2015) 震災後に考えること：飯館村の現場から. THE CLIMATE EDGE「クライメート・エッジ」, (23), 7
- Hanaoka T., Kainuma M. (2012) Low-carbon transitions in world regions: comparison of technological mitigation potential and costs in 2020 and 2030 through bottom-up analyses. *Sustainability Science*, 7 (2), 117–137
- Hanaoka T., Fujiwara K., Motoki Y., Hibino G., Akashi O. (2013) Cobenefits of reducing non- CO₂ emissions by achieving a 50% global GHG emissions reduction target by 2050. The 8th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, 0412-1-0412-15
- 花岡達也, 亀山康子, 久保田泉 (2013) 世界のフロン類の中長期排出量予測と国際制度の評価. 第 29 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, 31–34
- Hanaoka T., Akashi O., Fujiwara K., Motoki Y., Hibino G. (2014) Potential for reducing air-pollutants while achieving 2 °C global temperature change limit target. *Environmental Pollution*, 195, 336–343
- 花崎直太, 高橋潔, 脇岡靖明 (2012) 本の温暖化影響・適応策評価のための気候・社会経済シナリオ. 環境科学会誌, 25 (3), 223–236

- Hasegawa T., Matsuoka Y. (2012) Greenhouse gas emissions and mitigation potentials in agriculture, forestry and other land use in Southeast Asia. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 9, 1-18
- 長谷川知子, 藤森真一郎, 申龍熙, 高橋潔, 増井利彦 (2012) 気候変化が作物収量変化を通じて食料消費・経済に及ぼす影響のシナリオ分析. *土木学会論文集 G (環境)*, 68 (5), I_227-I_236
- 長谷川知子, 松岡譲 (2012) インドネシアにおける農畜産業・森林・土地利用変化に由来する温室効果ガス排出緩和に関する研究. *土木学会論文集 G (環境)*, 68 (5), I_211-I_220
- 長谷川知子, 松岡譲 (2012) 農畜産業における技術積み上げ型温室効果ガス排出削減評価モデルの開発. *土木学会論文集 G (環境)*, 68 (6), II_255-II_264
- 長谷川知子, 藤森真一郎, 高橋潔, 増井利彦 (2014) 共通社会経済シナリオ SSP を用いた飢餓リスクに関する将来シナリオの開発. *土木学会論文集 G (環境)*, 70 (5), I_1-I_12
- 長谷川知子, 大沢遼平, 五味馨, 松岡譲 (2014) インドネシア温室効果ガス排出削減目標の達成可能性に関する検討: 農業・土地利用変化部門. *土木学会論文集 G (環境)*, 70 (5), I_189-I_199
- 長谷川知子, 藤森真一郎, 横島徳太, 高橋潔, 増井利彦 (2015) 気候変化による低栄養に起因する健康影響の経済評価. *土木学会論文集 G (環境)*, 71 (6), 23-34
- Hasegawa T., Fujimori S., Takahashi K., Masui T. (2015) Scenarios for the risk of hunger in the twenty-first century using Shared Socioeconomic Pathways. *Environmental Research Letters*, 10 (1), 014010-014017
- Hasegawa T., Fujimori S., Shin Y., Tanaka A., Takahashi K., Masui T. (2015) Consequence of Climate Mitigation on the Risk of Hunger. *Environmental Science & Technology*, 49 (12), 7245-7253
- 脇岡靖明, 櫛田和秀, 岡和孝 (2014) 適応政策支援のための WebGIS を用いた温暖化影響評価配信方法に関する検討. *環境科学会誌*, 27 (5), 289-301
- 石田裕之, 小林翔太, 鼎信次郎, 長谷川知子, 藤森真一郎, 申龍熙, 高橋潔, 増井利彦, 田中朱美 (2014) 最新のシナリオフレームワークに基づいた将来の低栄養起因健康被害の推定. *土木学会論文集 B1 (水工学)*, 70 (4), 463-468
- Kainuma M., Shukla P.R., Jiang K. (2012) Framing and modeling of a low carbon society: An overview, *Energy Economics*, 34(3), S316-S324
- Kainuma M., Asayama Y., Miwa K., Ehara T., Akashi O. (2013) A low-carbon society: global vision, pathways, and challenges. *Climate Policy*, 13 (supplement01), 5-21
- 亀山康子 (2011) 序論 環境とグローバル・ポリティクス. *国際政治*, 166, 1-11
- 亀山康子 (2012) 地球温暖化問題と対策 - COP17/CMP7 - 果たして COP では温暖化を防げるのか?. *資源環境対策*, 48 (2), 45-50
- 亀山康子 (2012) 持続可能な開発のための制度的枠組み - 効果的な国際制度の実現に向けて -. *環境経済・政策研究*, 5 (1), 77-80
- 亀山康子 (2012) 地球温暖化問題と対策 - COP17/CMP7 - 果たして COP では温暖化を防げるのか?. *資源環境対策*, 48 (2), 45-50
- 亀山康子 (2013) ドーハ会合を経て: 国際社会での気候変動対策の動きと日本. *環境と文明*, 21 (1), 6-7
- 亀山康子 (2013) 地球温暖化 - COP18/CMP8 の成果と今後の方向性. *日中環境産業*, 49 (2), 64-68
- 亀山康子 (2014) 国際社会の動きと私たちの日常生活をつなげる. *ECO ネット東京 62 エコアカデミー*, <http://all62.jp/ecoacademy/29/01.html>
- 亀山康子 (2014) 史料を読み解く: 環境保全のための国際秩序を模索する条約「京都議定書」. *週刊朝日百科 新発見! 日本の歴史*, 48, 28-29
- 亀山康子 (2014) 気候変動枠組条約第 19 回締約国会議 (COP19) の概要. *環境管理*, 50 (4), 38-39
- 亀山康子 (2014) 地球温暖化問題はなぜ大変な問題なのか?. *環境管理*, 50 (5), 40-41
- 亀山康子 (2014) 地球温暖化対策はどれくらい必要なのか?. *環境管理*, 50 (6), 64-65
- 亀山康子 (2014) 欧州連合 (EU) の気候変動問題への対応. *環境管理*, 50 (7), 68-69
- 亀山康子 (2014) 中国の気候変動問題への対応. *環境管理*, 50 (8), 64-65

- 亀山康子（2014）長期目標としての2℃の意味. 環境管理, 50（9）, 48-49
- 亀山康子（2014）米国の気候変動問題への対応. 環境管理, 50（10）, 50-51
- 亀山康子（2014）COP20 で期待されること. 環境管理, 50（11）, 40-41
- 亀山康子（2014）クライメイト・ファイナンスー気候変動に係る資金の話. 環境管理, 50（12）, 52-53
- 亀山康子（2014）パリで開催の COP21 実効性なき合意の可能性大. 週刊ダイヤモンド特集総予測 2015, 103（1）, 79
- 亀山康子（2015）排出枠の取引：炭素市場の現状. 環境管理, 51（1）, 52-53
- 亀山康子（2015）COP20 の概要と今後の展望. 環境管理, 51（2）, 74-75
- 亀山康子（2015）パリ会合（COP21）およびその後に向けた展望. 環境管理, 51（3）, 62-63
- Kameyama Y., Morita K., Kubota I. (2015) Finance for achieving low-carbon development in Asia: the past, present, and prospects for the future. *Journal of Cleaner Production*, 128, 201-208, doi:10.1016/j.jclepro.2014.12.089
- 金森有子, 松岡譲（2011）エネルギーサービスの需給バランスを考慮した業務部門のエネルギー消費量推計について. 土木学会論文集 G（環境）, 67（6）, II_363-II_374
- Kanamori Y. (2013) Estimation on residential energy consumption in Japan and China based on energy service supply-demand structure. *Proceedings of 16th conference of ERSCP and 7th conference of EMSU*
- 金森有子（2014）家庭でできる温暖化対策. 生活と環境, 59（6）, 37-40
- 久保田泉, 亀山康子（2012）国際レベルにおけるフロンガスの生産・消費・排出規制に関する課題と今後の展望. 季刊環境研究,（168）, 70-82
- 久保田泉（2013）気候変動ドーハ会合の成果. *Law & Technology*, 59, 120-121
- 久保田泉（2013）気候変動影響への適応支援のための資金供与制度の現状と課題. 季刊環境研究,（171）, 96-102
- 久保田泉（2013）適応関連資金供与における異なるスキームの定性的比較分析. 環境情報科学学術研究論文集,（27）, 243-246
- 久保田泉（2014）気候変動ワルシャワ会合の成果. *Law & Technology*, 63, 144-145
- 久保田泉（2014）サブナショナルレベルにおける気候変動適応の取組みと日本の地方公共団体が学べること. かながわ政策研究・大学連携ジャーナル, 6, 163-168
- 久保田泉（2014）海外における適応策の取組状況. 生活と環境, 6, 15-18
- 久保田泉（2015）気候変動リマ会合の成果. *L&T*,（67）, 64-65
- 李炫俦, 来栖聖, 脇岡靖明（2012）適応策関連情報に対する人々の認知と影響因子の評価. 土木学会論文集 G（環境）, 68（6）, 301-308
- Lotze-Campen H., von Lampe M., Kyle P., Fujimori S., Havlik P., van Meijl H., Hasegawa T., Popp A., Schmitz C., Tabeau A., Valin H., Willenbockel D., Wise M. (2013) Impacts of increased bioenergy demand on global food markets: an AgMIP economic model intercomparison. *Agricultural economics*, 45（1）, 103-116
- Masui T., Matsumoto K., Hijioka Y., Kinoshita T., Nozawa T., Ishiwatari S., Kato E., Shukla P.R., Yamagata Y., Kainuma M. (2011) An emission pathway for stabilization at 6 Wm⁻² radiative forcing. *Climatic Change*, 109（1-2）, 59-76
- 増井利彦（2013）経済モデル AIM/CGE による評価報告. 環境技術, 2013 年 4 月号
- 増井利彦（2013）モデル合成による社会課題解決の展望. 2012 年度システム科学技術俯瞰ワークショップ報告書, CRDS-FY2012-WR-08, 独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター, <http://crds.jst.go.jp/singh/wp-content/uploads/12wr08.pdf>
- 増井利彦, 日比野剛, 大城賢（2014）技術選択を考慮した応用一般均衡モデルによるわが国の温室効果ガス排出削減目標の評価. 土木学会論文集 G（環境）, 70（5）, I_43-I_51
- 増井利彦（2014）低炭素社会シナリオ. 日本 LCA 学会誌, 10（3）, 270-278
- 増井利彦（2014）低炭素化への道. グローバルネット,（289）, 6-7
- 増井利彦, 大城賢, 甲斐沼美紀子, 日比野剛（2015）日本における 2050 年温室効果ガス排出量の 80% 削減に向けた道筋 - DDPP（Deep Decarbonization Pathways Project）での結果を踏まえて -. 季刊環境研究,（178）, 89-95
- 増井利彦（2015）日本の低炭素化政策課題と提案：ロードマップ作成から実行へ. クライメイト・エッジ, 23, 3-3

- 松橋啓介, 白木裕斗, 芦名秀一, 有賀敏典 (2014) 再生可能エネルギーを活用する再開発等に対する容積率緩和制度の提案. 土木学会論文集 G, 70 (6), II_81-II_86
- Mittal S., Dai H., Shukla P.R. (2015) Low carbon urban transport scenarios for China and India: A comparative assessment. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 44, 266–276, doi:10.1016/j.trd.2015.04.002
- Mittal S., Hanaoka T., Masui T., Priyadarshi R Shukla (2015) Air pollution co-benefits of low carbon policies in road transport: a sub-national assessment for India. *Environmental Research Letters*, 10 (8), 085006
- Morita K. (2012) Financing Systems for Adaptation: Comparison of South Pacific Island States. *環境科学会誌 (Environmental Science)*, 25 (5), 347–366
- Munesue Y., Masui T., Fushima T. (2014) The effects of reducing food losses and food waste on global food insecurity, natural resources, and greenhouse gas emissions. *Environmental Economics and Policy Studies*, 17 (1), 43–77
- 生津路子, 藤森真一郎, 松岡譲 (2011) 日本における温室効果ガス削減対策の評価：応用一般均衡モデルを用いた分析. *環境衛生工学研究*, 25 (3), 88-91
- 生津路子, 藤森真一郎, 松岡譲 (2011) 応用一般均衡モデルを用いた日本における温室効果ガス削減目標の分析. *環境システム研究論文集*, 39 (II), 255-266
- 生津路子, 藤森真一郎, 松岡譲 (2012) 中国における長期的な温室効果ガス削減可能性の検討. *京都衛生工学研究会*, 26 (3), 33-36
- 生津路子, 藤森真一郎, 松岡譲 (2012) 世界温室効果ガス排出量半減に向けた中国における削減方策の定量的解析. *土木学会論文集 G (環境)*, 68 (6), II_155-II_164
- 生津路子, 藤森真一郎, 松岡譲 (2012) 世界温室効果ガス排出量半減に向けた中国における削減方策の定量的解析. *土木学会論文集 G (環境)*, 68 (6), II_155-II_164
- 生津路子, 藤森真一郎, 松岡譲 (2013) 世界温室効果ガス排出量半減に向けて－東南アジアにおける排出量削減策の分析－. *土木学会論文集 G (環境)*, 69 (5), I_85-I_95
- 生津路子, 藤森真一郎, 松岡譲 (2013) 応用一般均衡モデルを用いたアジア地域における温室効果ガス排出量削減策の分析. *土木学会論文集 G (環境)*, 69 (6), II_359-II_370
- Namazu M., Fujimori S., Jiang K., Matsuoka Y. (2013) Feasibility of Low-Carbon Development in China. *Global Environmental Research*, 17 (1), 109–118
- Namazu M., Fujimori S., Shukula P.R., Matsuoka Y. (2013) Two Low-Carbon Development Pathways in India. *Global Environmental Research*, 17 (1), 119–128
- 行木美弥, 森口祐一, 亀山康子 (2014) 炭素集約度の高い財の需給に着目した温室効果ガス排出削減策の比較分析. *土木学会論文集 G (環境)*, 70 (6), II_227-II_238
- Nelson G.C., van der Mensbrugghe D., Blanc E., Calvin K., Hasegawa T., Havlik P., Kyle P., Lotze-Campen H., von Lampe M., Mason d' Croz D., van Meijl H., Muller C., Reilly J., Robertson R., Sands R.D., Schmitz C., Tabeau A., Takahashi K., Valin H. (2013) Agriculture and Climate Change in Global Scenarios: Why Don't the Models Agree. *Agricultural economics*, 45 (1), 85–101
- Nelson G.C., Valin H., Sands R.D., Havlik P., Ahammad H., Deryng D., Elliott J., Fujimori S., Hasegawa T., Heyhoe E., Kyle P., Von Lampe M., Lotze-Campen H., Mason d' Croz D., van Meijl H., van der Mensbrugghe D., Muller C., Popp A., Robertson R., Robinson S., Schmid E., Schmitz C., Tabeau A., Willenbockel D. (2013) Climate change effects on agriculture: Economic responses to biophysical shocks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111 (9), 3274–3279
- Okagawa A., Masui T., Akashi O., Hijioka Y., Matsumoto K., Kainuma M. (2012) Assessment of GHG emission reduction pathways in a society without carbon capture and nuclear technologies, *Energy Economics*, 34(3), S391-S398
- 大城賢, 増井利彦 (2014) わが国を対象とした多地域エネルギー技術選択モデルによる 2050 年までの温室効果ガス削減シナリオ分析. *エネルギー・資源*, 35 (4), 31-39
- Oshiro K., Masui T. (2015) Diffusion of low emission vehicles and their impact on CO₂ emission reduction in Japan. *Energy Policy*, 81, 215–225
- Pattanapongchai A., Limmeechokchai B., Matsuoka Y., Kainuma M., Fujino J., Akashi O., Motoki Y. (2011) Subsidy for Clean Power Generation and CO₂ Mitigation in Thailand: The AIM/Enduse Modeling. *GMSARN International Journal*, 5 (3), 189–194

- Promjiraprawat K., Winyuchakrit P., Limmeechokchai B., Masui T., Hanaoka T., Matsuoka Y. (2014) CO₂ mitigation potential and marginal abatement costs in Thai residential and building sectors. *Energy and Buildings*, 80, 631–639
- Ren S., Dai H., Wang P., Dai-qing Zhao, Masui T. (2015) Economic Impacts of Carbon Emission Trading: Case Study on Guangdong Province. *Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis*, 11 (1), 61–67 <In Chinese>
- Robinson S., van Meijl H., van der Mensbrugghe D., Fujimori S., Masui T., Sands R.D., Wise M., Calvin K., Valin H., Havlik P., Mason d' Croz D., Tabeau A., Kavallani A., Schmitz C., Dietrich J. (2013) Comparing supply-side specifications in models of global agriculture and the food system. *Agricultural Economics*, 45 (1), 21–35
- Schmitz C., van Meijl H., Kyle P., Fujimori S., Gurgel A., Havlik P., Heyhoe E., Mason d' Croz D., Popp A., Sands R., Tabeau A., van der Mensbrugghe D., von Lampe M., Wise M., Blanc E., Hasegawa T., Valin H. (2013) Land-use change trajectories up to 2050 - Insights from a global agro-economic model comparison. *Agricultural economics*, 45 (1), 69–84
- Selvakkumaran S., Limmeechokchai B., Masui T., Hanaoka T., Matsuoka Y. (2014) Low carbon society scenario 2050 in Thai industrial sector. *Energy Conversion and Management*, 85, 663–674
- Selvakkumaran S., Limmeechokchai B., Masui T., Hanaoka T., Matsuoka Y. (2014) An explorative analysis of CO₂ emissions in Thai Industry sector under Low Carbon Scenario towards 2050. *Energy Procedia*, 52, 260–270
- Selvakkumaran S., Limmeechokchai B., Masui T., Hanaoka T., Matsuoka Y. (2014) A Quantitative Analysis of Low Carbon Society (LCS) Measures in Thai Industrial Sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 178–195
- 白木裕斗, 芦名秀一, 亀山康子, 森口祐一, 橋本征二 (2012) 多地域電源計画モデルを用いた 2020 年の日本電力部門における再生可能エネルギー導入シナリオの検討. *エネルギー・資源学会論文誌*, 33 (1), 1–10
- Shiraki H., Ashina S., Kameyama Y., Hashimoto S., Fujita T. (2015) Analysis of optimal locations for power stations and their impact on industrial symbiosis planning under transition toward low-carbon power sector in Japan. *Journal of Cleaner Production*, 114, 81–94
- Smith S., Clarke L., Edmonds J., Kejun J., Krieglner E., Masui T., Riahi K., Shukla P., Tavoni M., Vuuren D., Weyant J. (2015) Long history of IAM comparisons. *Nature Climate Change*, 5, 391–391
- 高橋潔 (2013) 地球温暖化が引き起こす影響－最近の科学的知見－. *日本エネルギー学会誌*, 92 (3), 216–223
- Thepkhun P., Fujimori S., Masui T., Limmeechokchai B. (2011) Analyses of Climate Change Mitigation Measures to GHG Mitigation and Energy Consumption in Thailand towards 2030 using AIM/CGE Model. *Climate Thailand Conference 2011*, 358–367
- Thepkhun P., Limmeechokchai B., Fujimori S., Masui T., Shrestha R.M. (2013) Thailand's Low-Carbon Scenario 2050: The AIM/CGE analyses of CO₂ mitigation measures. *Energy Policy*, 62, 561–572
- トラン・タン・トゥ, 藤森真一郎, 松岡譲 (2011) ベトナムにおける温室効果ガス排出削減の可能性とその含意. *地球環境研究論文集*, 67 (5), 161–170
- Valin H., Sands R.D., van der Mensbrugghe D., Nelson G.C., Ahammad H., Blanc E., Bodirsky, B., Fujimori S., Hasegawa T., Havlik P., Heyhoe E., Kyle P., Mason D., Paltsev S., Rolinski S., Tabeau A., van Meijl H., von Lampe M., Willenbockel D. (2014) The future of food demand: understanding differences in global economic models. *Agricultural Economics*, 45 (1), 51–67
- Von Lampe M., Willenbockel D., Ahammad H., Blanc E., Cai Y., Calvin K., Fujimori S., Hasegawa T., Havlik P., Heyhoe E., Kyle P., Lotze-Campen H., Mason d' Croz D., Nelson G.C., Sands R.D., Schmitz C., Tabeau A., Valin H., van der Mensbrugghe D., van Meijl H. (2014) Why do global long-term scenarios for agriculture differ? An overview of the AgMIP Global Economic Model Intercomparison. *Agricultural Economics*, 45 (1), 3–20
- Wang P., Dai H., Ren S.Y., Zhao D.Q., Masui T. (2015) Achieving Copenhagen target through carbon emission trading: Economic impacts assessment in Guangdong Province of China. *Energy*, 79, 212–227
- Xing R., Ikaga T. (2013) Assessment of low-carbon policy implications in China's urban residential sector. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 4 (3), 229–242
- Xing R., Hanaoka T., Kanamori Y., Dai H., Masui T. (2015) An impact assessment of sustainable technologies for the Chinese urban residential sector at provincial level. *Environmental Research Letters*, 10 (6), 065001

2.2 書籍

発表者・(刊年)・題目・編著者名・書名・出版社・頁

(1) プロジェクト1：温室効果ガス等の濃度変動特性の解明とその将来予測に関する研究

Abdullaev I., Amin R., Asayama Y., Bengtsson M., Elder M., Bengtsson M., Dobias R., Elder M., Fuentes R., Ganguly A., Jiang G., Kainuma M., Kataoka Y., Olsen S. H. (GEO Fellow), Suhardiman D. (2012) Chapter 10 Asia and the Pacific. In: UNEP 著, The Fifth Global Environment Outlook (GEO-5), United Nations Environment Programme, 259-289

伊藤昭彦 (2014) 4.3 地球システムモデル. 国立環境研究所地球環境研究センター編著, 地球温暖化の事典, 丸善出版株式会社, 168-173

伊藤昭彦 (2014) 12 森林破壊と地球環境変化. 地球環境変動の生態学, 日本生態学会編, 共立出版, 232-247.

伊藤昭彦 (2014) 6.4 呼吸とバイオマス. 国立環境研究所地球環境研究センター編著, 地球温暖化の事典, 丸善出版株式会社, 244-249

伊藤昭彦 (2014) 6.5 陸上生物. 国立環境研究所地球環境研究センター編著, 地球温暖化の事典, 丸善出版株式会社, 249-253

伊藤昭彦 (2014) 炭素循環. 土の百科事典, 土の百科事典編集委員会編, 丸善出版株式会社

熊本雄一郎, 荒巻能史 (2015) 第3巻 採水分析 (溶存態) 9章 炭素同位体比 ($\Delta^{14}\text{C}$, $\delta^{13}\text{C}$). 熊本雄一郎, 荒巻能史, 海洋研究開発機構) 著, 海洋観測ガイドライン, 日本海洋学会

町田敏暢 (2012) 二酸化炭素, 「地球と宇宙の化学事典」, 日本地球化学会編, 朝倉書店

町田敏暢 (2014) 2.1 二酸化炭素. 国立環境研究所地球環境研究センター編著, 地球温暖化の事典, 丸善出版株式会社, 55-61

向井人史 (2014) 1.1 地球温暖化と気候変動. (独)国立環境研究所地球環境研究センター編著, 地球温暖化の事典, 丸善出版株式会社, 1-7

向井人史 (2014) 1.2 温室効果ガス. (独)国立環境研究所地球環境研究センター編著, 地球温暖化の事典, 丸善出版株式会社, 7-12

向井人史, 須永温子, 野尻幸宏 (2012) 第2部第2章 自由対流圏の二酸化炭素の通年観測, 「よみがえる富士山測候所 2005 ~ 2011」, 土器屋由紀子, 佐々木一哉編著, 成山堂書店

Nakayama T. (2013) Improvement in process-based eco-hydrology model toward evaluation of boundless biogeochemical cycles in global scale. In: Proceedings of 3rd Biennial ISRS Symposium – Achieving Healthy and Viable Rivers –, ISRS, 257-262

Nakayama T. (2014) Hydrology-ecology interactions. In Handbook of Engineering Hydrology - Vol. 1: Fundamentals and Applications, Saeid Eslamian (ed), Taylor and Francis, pp.329-344 (Chapter 16)

Nakayama T. (2014) Nakayama T.ed., Development of process-based NICE model and simulation of ecosystem dynamics in the catchment of East Asia (Part IV), Center for Global Environmental Research (CGER), National Institute for Environmental Studies (NIES), 102p

Nakayama T. (2015) Integrated assessment system using process-based eco-hydrology model for adaptation strategy and effective water resources management. In Remote Sensing of the Terrestrial Water Cycle (Geophysical Monograph Series 206), Venkat Lakshmi (ed), pp.521-535 (Chapter 33), AGU

日本リモートセンシング学会編 (2011) 基礎からわかるリモートセンシング. 理工図書 (分担執筆)

三枝信子 (2013) 第2章 II 渦相関法によるフラックス測定と解析 および第3章 II-1 温帯林における大気と森林間の CO_2 の交換量. 及川武久 山本晋 (編), 陸域生態系の炭素動態-地球環境へのシステムアプローチ, 京都大学学術出版会, 70-90 および 188-198

三枝信子 (2014) 6.1 生態系. 国立環境研究所地球環境研究センター編著, 地球温暖化の事典, 丸善出版株式会社, 231-235

三枝信子 (2014) 6.3 光合成. 国立環境研究所地球環境研究センター編著, 地球温暖化の事典, 丸善出版株式会社, 240-244

斉藤拓也 (2014) 2.4 ハロカーボン. 国立環境研究所地球環境研究センター編著, 地球温暖化の事典, 丸善出版株式会社, 71-78

Shimizu M., Hatano R., Arita T., Kouda Y., Mori A., Matsuura S., Niimi M., Mano M., Hirata R., Jin T., Limin A., Saigusa T., Kawamura O., Hojito M., Miyata A. (2014) Chapter 7. Farmyard manure application mitigates greenhouse gas emissions from managed grasslands in Japan. In: Maren Oelbermann ed., Sustainable Agroecosystems in Climate Change Mitigation, Wageningen Academic Publishers, 115-132

Shimizu M., Hatano R., Arita T., Kouda Y., Mori A., Matsuura S., Niimi M., Mano M., Hirata R., Jin T., Limin A., Saigusa T., Kawamura O., Hojito M., Miyata A. (2014) Chapter33 Mitigation Effect of Farmyard Manure Application on Greenhouse Gas Emissions from Managed Grasslands in Japan. In: A.E. Hartemink and K. McSweeneyeds., Soil Carbon, Springer International Publishing, 313-325

唐艶鴻 (2013) 高山草原の炭素収支－青海・チベット草原. 及川武久, 山本晋編, 陸域生態系の炭素動態, 京都大学学術出版会, 229-250

唐艶鴻 (2014) 5.5 高山帯. (独) 国立環境研究所地球環境研究センター編著, 地球温暖化の事典, 丸善出版株式会社, 207-213

唐艶鴻, 富松元, 深山浩 (2014) 植物の高 CO₂ 応答: 光合成誘導反応. 科学と生物 総説集, 71-77

谷本浩志 (2013) 4.6 対流圏オゾンと光化学大気汚染, 4.10 短寿命大気汚染ガス「図説 地球環境の事典」(吉崎正憲他編), 朝倉書店, ISBN: 978-4-254-16059-8

谷本浩志 (2014) 第2章温室効果ガス, 2.5 対流圏オゾンと反応性ガス. 国立環境研究所地球環境研究センター編著, 地球温暖化の事典, 丸善出版株式会社, 78-82

Tanimoto H., Kameyama S., Omori Y., Inomata S., Tsunogai U. (2014) High-resolution measurement of volatile organic compounds dissolved in seawater using equilibrator inlet-proton transfer reaction-mass spectrometry (EI-PTR-MS). 89-115, in Western Pacific Air-Sea Interaction Study, Eds. Uematsu M., Yokouchi Y., Watanabe Y.W., Takeda S., Yamanaka Y. (2014) TERRAPUB, Tokyo, pp. 284, doi:10.5047/w-pass.a02.001, ISBN: 978-4-88704-165-3 (<http://www.terrapub.co.jp/e-library/w-pass/index.html>)

寺尾有希夫 (2014) 2.2 メタン. 国立環境研究所地球環境研究センター編著, 地球温暖化の事典, 丸善出版株式会社, 61-65

遠嶋康徳 (2014) 2.3 亜酸化窒素. 国立環境研究所地球環境研究センター編著, 地球温暖化の事典, 丸善出版株式会社, 66-70

Yamagata Y., Hayashi M., Pingchun (2015) Satellite laser altimetry: a powerful tool to enhance the capability of global forest inventory. In: United Nations Convention to Combat Desertification 監修, LIVING LAND, Tudor Rose, 131-133

(2) プロジェクト2: 地球温暖化に関わる地球規模リスクに関する研究

江守正多 (2011) 第2章 IPCC 第5次レポートの準備状況と地域気候変化予測, 山本良一/高岡美佳編著, 地球温暖化への3つの選択 低炭素化・適応・気候改変のどれを選ぶか. 生産性出版, 21-36

江守正多+気候シナリオ「実感」プロジェクト影響未来像班 (2012) 江守正多+気候シナリオ「実感」プロジェクト影響未来像班編著, 地球温暖化はどれくらい「怖い」か? 温暖化リスクの全体像を探る, 技術評論社

江守正多 (2012) コラム1 地球温暖化問題のリスク認知. 中谷内一也編, リスクの社会心理学－人間の理解と信頼の構築に向けて. 有斐閣, 22-23

江守正多 (2013) 異常気象と人類の選択. 角川マガジズ, 215p

江守正多 (2014) 1.7 気候変化の将来予測. 国立環境研究所地球環境研究センター編著, 地球温暖化の事典, 丸善出版株式会社, 32-35

江守正多 (2014) 4.2 大気海洋結合気候モデル. 国立環境研究所地球環境研究センター編著, 地球温暖化の事典, 丸善出版株式会社, 163-168

江守正多 (2014) 4.4 予測される気温変化. 国立環境研究所地球環境研究センター編著, 地球温暖化の事典, 丸善出版株式会社, 173-177

江守正多 (2014) 「研究最前線 地球温暖化のリスクに人類はどう対処するか」, 週刊「地球46億年の旅」第46号, 朝日新聞出版

江守正多, 肱岡靖明, 甲斐沼美紀子 (2015) -. 江守正多, 肱岡靖明, 甲斐沼美紀子監修, IPCC report communicator ガイドブック～基礎知識編～ 統合報告書 基礎知識編, IPCC リポートコミュニケーター・プロジェクト, 38p

江守正多 (2015) 第1講 気候変動リスクと人類の選択～ IPCC の最新報告から～. 東京都市大学環境学部編, BLUE EARTH COLLEGE ようこそ, 「地球経済大学」へ. 株式会社東急エージェンシー, 13-44

花崎徳太 (2014) 7.1 水資源・水利用. 国立環境研究所地球環境研究センター編著, 地球温暖化の事典, 丸善出版株式会社, 181-185

Handmer J., Honda Y., Kundzewicz Z.W., Arnell N., Benito G., Hatfield J., Mohamed I.F., Peduzzi P., Wu S., Takahashi K. et al. (2012) Changes in impacts of climate extremes: human systems and ecosystems. In: Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgleyeds., Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, Cambridge University Press

Kameyama Y. (2014) Environmental and social policies in Japan. In: Tony Fitzpatrick 編著, International Handbook on Social Policy and the Environment, Edward Elgar, 228-248

中島映至, 時岡達志, 江守正多 (2014) 1. はじめに: 問題の背景と本書の目的. 公益社団法人日本気象学会・地球環境問題委員会編著「地球温暖化—そのメカニズムと不確実性—」, 浅倉書店, 1-3

Oppenheimer M., Campos M., Warren R., Birkmann J., Luber G., Oneill B., Takahashi K. (2014) Emergent Risks and Key Vulnerabilities. In: Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. Whiteeds., Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 1039-1099

塩竈秀夫 (2014) 4.6 不確実性の評価と低減. 国立環境研究所地球環境研究センター編著, 地球温暖化の事典, 丸善出版株式会社, 181-185

塩竈秀夫 (2014) 5.4 極端現象. 国立環境研究所地球環境研究センター編著, 地球温暖化の事典, 丸善出版株式会社, 203-206

塩竈秀夫, 江守正多, 鬼頭昭雄 (2014) 4. 産業革命以降の気候変動の検出と要因分析. 公益社団法人日本気象学会・地球環境問題委員会編著「地球温暖化—そのメカニズムと不確実性—」, 浅倉書店, 37-48

塩竈秀夫, 江守正多, 鬼頭昭雄 (2014) 全球気候モデル, 日本気象学会・地球環境問題委員会編著「地球温暖化—そのメカニズムと不確実性—」, 浅倉書店, コラム3, 47-48

杉山昌広, 江守正多 (2011) 識者の声. 杉山昌広著, 気候工学入門—新たな温暖化対策ジオエンジニアリング—. 日刊工業新聞社, 172-173

高橋潔 (2014) 気候変動リスク管理・リスク分析. 西岡秀三・植田和弘・森杉壽芳監修, 気候変動リスクとどう向き合うか, 一般財団法人金融財政事情研究会, 36-44

高橋潔 (2014) 1.8 気候変動の影響・脆弱性. 国立環境研究所地球環境研究センター編著, 地球温暖化の事典, 丸善出版株式会社, 35-39

高橋潔 (2014) 1.9 緩和策と適応策. 国立環境研究所地球環境研究センター編著, 地球温暖化の事典, 丸善出版株式会社, 39-43

高橋潔 (2014) 7.2 農業. 国立環境研究所地球環境研究センター編著, 地球温暖化の事典, 丸善出版株式会社, 276-280

高橋潔 (2015) リスク・ハザード・曝露・脆弱性と将来の社会経済条件. 影響評価に必要な社会経済シナリオの変数. トップダウンアプローチとボトムアップアプローチ. 三村信男監修, 気候変動適応策のデザイン. クロスメディア・マーケティング, 14 59 60

高橋潔, 増井利彦, 花崎直太, 藤森真一郎 (2015) 影響評価の前提となるシナリオ. 三村信男監修, 気候変動適応策のデザイン. クロスメディア・マーケティング, 54-60

竹村真一, 江守正多 (2011) 第7講 地球の未来を可視化する—温暖化懐疑論への回答. 竹村真一+丸の内地球環境倶楽部編著, 地球大学講義. 3・11 後のソーシャルデザイン. 日本経済新聞出版社, 104-116

渡部雅浩, 江守正多 (2014) 5. 予測とその不確実性. 公益社団法人日本気象学会・地球環境問題委員会編著「地球温暖化—そのメカニズムと不確実性—」, 浅倉書店, 49-61

Yamagata Y., Kraxner F., Aoki K. (2011) Forest biomass for regional energy supply in Austria. In: Yoshiki Yamagata, Florian kraxner, Kentaro Aoki, Designing Our Future: Local Perspectives on Bioproduction, Ecosystems and Humanity, United Nations University Press, 220-233

Yamagata Y., Hayashi M., Pingchun (2015) Satellite laser altimetry: a powerful tool to enhance the capability of global forest inventory. In: United Nations Convention to Combat Desertification 監修, LIVING LAND, Tudor Rose, 131-133

横島徳太 (2013) 2.3 フィードバック気候, 2.4 雲と気候, 雲の全球分布. 図説 地球環境の事典, 朝倉書店, 38-41p

横島徳太 (2014) 3.4 地球の熱収支. 国立環境研究所地球環境研究センター編著, 地球温暖化の事典, 丸善出版株式会社, 271-275

(3) プロジェクト3: 低炭素社会に向けたビジョン・シナリオ構築と対策評価に関する統合研究

江守正多, 脇岡靖明, 甲斐沼美紀子 (2015) - 江守正多, 脇岡靖明, 甲斐沼美紀子監修, IPCC report communicator ガイドブック〜基礎知識編〜 統合報告書 基礎知識編, IPCC リポートコミュニケーター・プロジェクト, 38p

Fujino J. (2012) Asian Low-carbon society Scenario development and policy implementation. In: Ryo Fujikura and Tomoyo Toyotaed., Climate Change Mitigation and International Development Cooperation, Routledge, 227-240

Fujino J. (2012) The potential for low carbon climate resilient economy (LCS) in Japan. In: Ancha Srinivasan, Frank Hiroshi Ling, Hideyuki Mori 編著, Climate Smart Development in Asia, Routledge, 21-40

花岡達也, 長谷川知子 (2014) 8.6 非 CO₂ 対策. 独立行政法人国立環境研究所 地球環境研究センター編著, 地球温暖化の事典, 丸善出版, 325-329

Heath L., Salinger M.J., Falkland T., Hansen J., Jiang K., Kameyama Y., Kishi M., Lebel L., Meinke H., Morton K., Nikitina E., Shukla P.R., White I. (2014) Climate and Security in Asia and the Pacific (Food, Water and Energy). In: MANTON M., STEVENSON, Linda A.eds., Climate in Asia and the Pacific, Springer, 129-198

脇岡靖明 (2014) 7.4 健康影響. 国立環境研究所地球環境研究センター編著, 地球温暖化の事典, 丸善出版株式会社, 284-288

脇岡靖明 (2014) 7.5 沿岸域, 小島嶼の社会システム. 国立環境研究所地球環境研究センター編著, 地球温暖化の事典, 丸善出版株式会社, 288-291

岩淵裕子, 藤野純一 (2014) 8.7 部門横断的対策「見える化」. 独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター編著, 地球温暖化の事典, 丸善出版株式会社, 329-336

亀山康子 (2011) 低炭素社会の実現と国際協調. 東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学研究系編, 環境システム学の創る世界, 朝倉書店, 107-117

亀山康子 (2013) 「第9章 気候変動問題」上垣彰・田畑伸一郎編『ユーラシア地域大国の持続的経済発展』, ミネルヴァ書房, 214-234

亀山康子 (2013) 第9章 気候変動問題 上垣彰・田畑伸一郎編著, ユーラシア地域大国の持続的経済発展, ミネルヴァ書房, 214-234

亀山康子 (2013) COP3. IPCC. WEO. 金森久雄・荒憲治郎・森口親司編, 経済辞典第5版, 有斐閣, 1358 1387 1429

亀山康子 (2013) COP3. IPCC. WEO. 金森久雄・荒憲治郎・森口親司編, 経済辞典第5版, 有斐閣, 1358 1387 1429

Kameyama Y., Jiang K., Shukla P.R. (2013) "Energy and Climate Change" in Manton M. and Stevenson L.A. eds., Climate in Asia and the Pacific: Security, Society and Sustainability, Springer (in press)

Kameyama Y. (2013) "Chapter 8: Climate Change Policy-Making in Major Economies" in Niizawa H. eds., Policy process for the transition to a low carbon society, Tokyo: UNU Press (in press)

Kameyama Y., Jiang K., Shukla P.R. (2013) "Energy and Climate Change" in Manton M. and Stevenson L.A. eds., Climate in Asia and the Pacific: Security, Society and Sustainability, Springer (in press)

Kameyama Y. (2013) "Chapter 8: Climate Change Policy-Making in Major Economies" in Niizawa H. eds., Policy process for the transition to a low carbon society, Tokyo: UNU Press (in press)

Kameyama Y. (2014) The future of multilateral agreements and institutions in climate change policy. In: Hidenori Niizawa and Toru Morotomi 編著, Governing Low-Carbon Development and the Economy, United Nations University Press, 149-167

Kameyama Y. (2014) Environmental and social policies in Japan. In: Tony Fitzpatrick 編著, International Handbook on Social Policy and the Environment, Edward Elgar, 228-248

亀山康子 (2014) 9.1 気候変動枠組条約・締約国会議. 9.2 京都議定書・締約国会合. 9.9 国際機関. 10.1 持続可能な発展の概念. 独立行政法人国立環境研究所編著, 地球温暖化の事典, 丸善出版, 357-362 362-367 396-400 401-406

亀山康子 (2014) 国際社会の動きと私たちの日常生活をつなげる.. ECO ネット東京 62 エコアカデミー,

金森有子, 藤原和也 (2014) 8.4 需要側対策 民生部門. 独立行政法人国立環境研究所 地球環境研究センター編著, 地球温暖化の事典, 丸善出版, 310-314

久保田泉 (2013) 地球温暖化をどうやって抑制するか. 大塚直編著, 18歳からはじめる環境法, 法律文化社, 88-93

久保田泉 (2014) 適応策に関する国際交渉の動向. 損害保険ジャパン, 損保ジャパン環境財団, 損保ジャパン日本興亜リスクマネジメント編著, 気候変動リスクとどう向き合うか—企業・行政・市民の賢い適応, 一般社団法人金融財政事情研究会, 26-33

Lasco R., Kameyama Y., Jiang K., Penalba L., Pulhin J., Shukla P.R., Subramanian S.M. (2014) Climate Change and Sustainability. In: Manton M., Stevenson L. A.eds., Climate in Asia and the Pacific, Springer, 253-288

Luderer G., Rogelj J., Schaeffer R., Dellink R., Hanaoka T., Jiang K., Lowe J., Schaeffer M., Riahi K., Sha F., van Vuuren D.P. (2013) Chapter 3 The emissions gap and its implications. In: UNEP ed., The Emissions Gap Report 2013, the United Nations Environment Programme (UNEP), 13-22

馬奈木俊介, 亀山康子 (2015) 資源の持続的な利用. 亀山康子・馬奈木俊介編, 資源を未来につなぐ. 岩波書店, 1-10

松本健一, 明石修, 花岡達也, 増井利彦 (2014) 8.2 温暖化対策モデル. 独立行政法人国立環境研究所 地球環境研究センター編著, 地球温暖化の事典, 丸善出版, 298-302

森晶寿, 亀山康子 (2015) 序論 グローバル社会と持続可能な発展. 亀山康子・森晶寿編, グローバル社会は持続可能か. 岩波書店, 1-10

高橋潔 (2015) リスク・ハザード・曝露・脆弱性と将来の社会経済条件. 影響評価に必要な社会経済シナリオの変数. トップダウンアプローチとボトムアップアプローチ. 三村信男監修, 気候変動適応策のデザイン. クロスメディア・マーケティング, 14 59 60

高橋潔, 増井利彦, 花崎直太, 藤森真一郎 (2015) 影響評価の前提となるシナリオ. 三村信男監修, 気候変動適応策のデザイン. クロスメディア・マーケティング, 54-60

国立環境研究所研究プロジェクト報告 第 112 号
NIES Research Project Report, No.112

(SR - 112 - 2016)

地球温暖化研究プログラム
(重点研究プログラム)

平成 23 ～ 27 年度
Climate Change Research Program

FY2011 ～ 2015

平成 29 年 1 月 31 日発行

編 集 国立環境研究所 編集分科会

発 行 国立研究開発法人 国立環境研究所

〒 305-8506 茨城県つくば市小野川 16 番 2

E-mail : pub@nies.go.jp

Published by the National Institute for Environmental Studies

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

January 2017

組 版 朝日印刷株式会社

〒 308-0005 茨城県筑西市巾館 185-6

無断転載を禁じます

国立環境研究所の刊行物は以下の URL からご覧いただけます。

<http://www.nies.go.jp/kanko/index.html>