Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費　終了研究成果報告書

２－２００２　世界を対象としたネットゼロ排出達成のための気候緩和策及び持続可能な開発
(JPMEERF20202002)

令和２年度～令和４年度

Global Analyses of Climate Mitigation for Achieving Net-zero Emissions and Sustainable Development

〈研究代表機関〉
国立研究開発法人国立環境研究所

〈研究分担機関〉
京都大学
立命館大学
国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所

〈研究協力機関〉
国立研究開発法人国際農林水産業研究センター

令和５年５月

目次

Ⅰ．成果の概要　・・・・・・・・　１
１．はじめに（研究背景等）
２．研究開発目的
３．研究目標
４．研究開発内容
５．研究成果
５－１．成果の概要
５－２．環境政策等への貢献
５－３．研究目標の達成状況
６．研究成果の発表状況
６－１．査読付き論文
６－２．知的財産権
６－３．その他発表件数
７．国際共同研究等の状況
８．研究者略歴

Ⅱ．成果の詳細
Ⅱ－１　気候緩和目標に対応する排出経路分析及び気候影響総合評価　・・・・・・・・　２０
（国立研究開発法人国立環境研究所）
要旨
１．研究開発目的
２．研究目標
３．研究開発内容
４．結果及び考察
５．研究目標の達成状況
６．引用文献

Ⅱ－２　持続可能性を考慮した気候緩和策の戦略検討　・・・・・・・・　３４
（京都大学、立命館大学、国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所、国立研究開発法人国立環境研究所）
要旨
１．研究開発目的
２．研究目標
３．研究開発内容
４．結果及び考察
５．研究目標の達成状況
６．引用文献

Ⅲ．研究成果の発表状況の詳細　・・・・・・・・　４９

Ⅳ．英文Abstract　・・・・・・・・　６５

Ⅰ．成果の概要

課題名　　2-2002　世界を対象としたネットゼロ排出達成のための気候緩和策及び持続可能な開発

課題代表者名 高橋　潔　（国立研究開発法人国立環境研究所社会システム領域　副領域長）

重点課題　　主：【重点課題９】地球温暖化現象の解明・予測・対策評価

副：無し

行政要請研究テーマ（行政ニーズ）　非該当

研究実施期間　令和２年度～令和４年度

研究経費
112,000千円（合計額）
（各年度の内訳：令和２年度：40,000千円、令和３年度：36,000千円、令和４年度：36,000千円）

研究体制
（サブテーマ１）気候緩和目標に対応する排出経路分析及び気候影響総合評価（国立研究開発法人国立環境研究所）
（サブテーマ２）持続可能性を考慮した気候緩和策の戦略検討（京都大学、立命館大学、国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所、国立研究開発法人国立環境研究所）

研究協力機関
国立研究開発法人国際農林水産業研究センター

本研究のキーワード　脱炭素、持続可能な開発目標、パリ協定、統合評価モデル、緩和

１．はじめに（研究背景等）

2015年、パリ協定において世界の国々は、長期気候目標としていわゆる2℃目標に合意した。その後、Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)1.5℃特別報告書が1.5℃と2.0℃で生じる気候影響に有意な差があるとの結論を示したことを受け、全球平均気温上昇を工業化前比1.5℃以下に抑える目標を支持する声も強まりつつある。一方で、それらの長期気候目標の実現のために、21世紀後半には温室効果ガスのネットゼロ排出あるいは21世紀前半の排出量によっては大規模なバイオエネルギー作物や植林等を用いたマイナス排出（吸収・隔離）が必須であることも、専門家の間だけでなく政策決定者・市民の理解を得つつある。

しかし、そのネットゼロ・マイナス排出は具体的にいつ頃にどんな対策・政策を打つことで実現できるのか、それらの対策・政策に整合的な社会発展や変革の経路はいかなるものか、対策・政策の実施が気候影響以外の形で人間社会・生態系の持続可能性にもたらす深刻な波及影響はないのか、またそれらの波及影響への対処のために必要な追加的対策は何かといった問いに対して、科学的な見解を十分に示せていない。また、仮にネットゼロ排出に至る気候政策が実現できた場合にも、その後に生じる炭素循環・気候システムの変化の見通しには不確実性幅が大きく、各部門での気候影響についても、その地域差、時間経路、不確実性の描出と伝達は不足している。

言い換えると、様々な社会・物理・生物的な制約は考慮されずに1.5℃／2℃、あるいはゼロ排出社会といった分かりやすい気候目標だけが独り歩きし、エネルギー・土地利用システムの抜本的転換を伴

う今世紀後半の社会の実現性を、人間社会・生態系の持続可能性に照らして多面的に検討できていない。そのことは長期気候目標についての国際合意・協調努力の無力化や、わが国の短中期目標の深堀りに関する議論の低迷をも引き起こし得る。

２．研究開発目的

以上の研究背景をふまえ、本研究では「人間社会・生態系の持続可能性を損ねない形でネットゼロ排出を達成するということは、どのような社会を作り、受け入れていくということなのか？」という問いへの答えを、気候政策、気候影響、持続可能性の相互依存関係を考慮した地球規模の持続可能性シナリオの構築を通じて描くことを全体目標として設定する。

そのためにサブテーマ1では二つの研究に取り組む。第一に、最新の気候科学（例：炭素循環、気候感度等）ならびに対策研究（ガス別限界削減費用等）を反映した排出経路モデルの改良を行い、気候目標及び社会経済発展経路に対応した排出経路を分析し、後述の気候影響予測ならびにサブテーマ2が取り組む気候政策による持続可能性への波及影響の分析に提供する。

第二に、緩和政策が実施された場合の気候影響について、社会変化・気候変化の不確実性を定量的に考慮した統合影響評価を実施し、複数の評価指標（金銭、人命・健康、公平性等）を用いてその将来像を描出する。そのために、柔軟なシナリオ想定が可能な軽量気候影響予測手法（影響エミュレータ）を開発し、それを一般均衡モデルベースの経済分析枠組みや障害調整生命年Disability-adjusted Life Years（DALY）等の人命・健康の統合分析枠組みに組み込み、気候影響統合分析モデルを構築する。さらに、排出経路モデルと連動して気候影響予測を行う。また、気候影響の経済分析の空間詳細化を通じて地域間公平性の定量分析を行う。なお、開発した評価手法は、社会的炭素費用の推計にも活用する。

サブテーマ2では、CO2ネットゼロ排出において重要な役割を担う植林と炭素回収貯留付きバイオ燃料Bioenergy with Carbon Capture and Storage（BECCS）に関する諸問題へ答えを出す。植林に関しては、これまでの陸域生物圏モデルが土地利用管理を明示的に扱ってこなかったことから、土地利用管理を明示的に考慮した森林吸収量の推計ができるようなモデル開発を行う。BECCSに関しては、生物多様性保護、農業技術開発、水資源利用可能性などの観点から持続可能性を考慮しつつバイオエネルギー作物の大規模展開の可能性について論じ、食料・水安全保障や生物多様性を脅かさない範囲でネットゼロ排出を実現するために必要な政策・施策を同定する。

３．研究目標

全体目標	気候政策、気候影響、持続可能性の相互依存関係を考慮した地球規模の持続可能性シナリオの構築を通じて、「人間社会・生態系の持続可能性を損ねない形でネットゼロ排出を達成するということは、どのような社会を作り、受け入れていくということなのか？」という問いへの答えを示すこと。

サブテーマ１	気候緩和目標に対応する排出経路分析及び気候影響総合評価
サブテーマリーダー/所属機関	高橋　潔／国立研究開発法人国立環境研究所
目標	第一に、最新の気候科学（例：炭素循環、気候感度等）ならびに対策研究（ガス別限界削減費用等）を反映した排出経路モデルの改良を行い、気候目標及び社会経済発展経路に対応した排出経路を分析し、後述の気候影響予測ならびにサブテーマ2が取り組む気候政策による持続可能性への波及影響の分析に提供する。 第二に、緩和政策が実施された場合の気候影響について、社会変化・気候変化の不確実性を定量的に考慮した統合影響評価を実施し、複数の評価指標（金銭、人命・健康、公平性等）を用いてその将来像を描出する。そのために、柔

	軟なシナリオ想定が可能な軽量気候影響予測手法（影響エミュレータ）を開発し、それを一般均衡モデル（CGE）ベースの経済分析枠組みやDALY等の人命・健康の統合分析枠組みに組み込み、気候影響統合評価モデルを構築する。さらに、排出経路モデルと連動して気候影響予測を行う。また、気候影響の経済分析の空間詳細化を通じて地域間公平性の定量分析を行う。なお、開発した評価手法は、社会的炭素費用の推計にも活用する。また、影響エミュレータについては、サブテーマ2のネットゼロ排出が食料安全保障や生物多様性等に及ぼす波及影響の分析にも活用される。

サブテーマ２	持続可能性を考慮した気候緩和策の戦略検討
サブテーマリーダー/所属機関	藤森　真一郎／京都大学
目標	持続可能性統合評価モデルの開発・利用により、CO2ネットゼロ排出において重要な役割を担う植林とBECCSに関する諸問題へ答えを出す。植林に関しては、これまでの陸域生態系モデルが土地利用管理を明示的に扱ってこなかったことから、土地利用管理を明示的に考慮した森林吸収量の推計に注力する。BECCSに関しては、生物多様性保護、農業技術開発、水資源利用可能性などの観点から持続可能性を考慮しつつバイオエネルギー作物の大規模展開の可能性について論じ、前述の森林吸収量推計もふまえながら、食料・水安全保障や生物多様性を脅かさない範囲でネットゼロ排出を実現するために必要な政策・施策を同定する。例えば、従来考えられてきた単純な炭素税等の経済メカニズムのみを用いた気候緩和政策に加えて、食肉嗜好の変化、食料廃棄物対策、途上国への経済支援、土地利用規制の強化など、社会システム全体を変革していくような施策を検討する。また、ネットゼロ排出に向けた緩和政策の分析手法・結果について、研究期間後期にサブテーマ１の排出経路モデルにも反映し、課題全体の整合性の確保に努める。

４．研究開発内容

本節では冒頭で「３．研究目標」の記載に対応させる形で研究開発内容を項目立てして整理したうえで、各項目についてその概要を報告する。紙幅の都合、本概要様式では研究結果の図を含めずに文章のみで研究開発内容を報告する。詳細様式では各研究項目の結果について図も含めて報告している。

サブテーマ１について、最新の気候科学と対策研究を反映した排出経路モデルの改良、ならびに気候目標と社会経済発展経路に対応した排出経路の分析に関して、[研究 1-1]では非 CO2 温室効果ガスや短寿命気候汚染物質の排出量の CO2 排出量への換算係数（排出指標）に注目し、パリ協定達成に向けた削減努力及び排出経路への含意について検討した。さらに[研究 1-2]では排出シナリオ推計に用いられる AIM/Hub モデルを用いた感度分析出力を利用して共通社会経済経路 Shared Socio-economic Pathways（SSP）別・ガス種別の限界削減費用 Marginal Abatement Cost（MAC）曲線を作成し、最適化型統合評価モデル SCM4OPT に実装し、排出経路ならびに社会的炭素費用を試算した。

緩和政策が実施された場合の、社会変化・気候変化の不確実性を定量的に考慮した統合影響評価に関しては、[研究 1-3]で極端な気象現象の変化に関する世代間・地域間不公平性の検討を、[研究 1-4]で気候変化及び人間活動が野外火災ならびに関連の炭素排出に及ぼす影響の評価を、さらに[研究 1-5]では食事構成において赤身肉を小型浮魚類に置き換えた場合の環境・健康影響評価を行い、緩和政策ならびに気候変化の影響の評価の包括性を高め、複数の評価指標での将来像の描出に取り組んだ。また、柔軟なシナリオ想定が可能な軽量気候影響予測手法（影響エミュレータ）の開発については、[研究 1-

6]として一般均衡モデル Computable General Equilibrium model（CGE）ベースの経済影響分析ならびに統計的生命価値ベースの超過死亡経済影響分析に基づくエミュレータの開発と検証を論文化したうえで、[研究 1-7]ではさらに影響エミュレータと気候予測不確実性低減手法 Emergent Constraint（EC 手法）を連結して気候影響経済評価の不確実性低減に取り組んだ。また上述のように[研究 1-2]では社会的炭素費用の推計にも活用した。なお、開発した影響エミュレータは、研究データレポジトリ ZENODO を用いて無償公開することで、より幅広に国内外の気候影響統合評価、ならびにネットゼロ排出に向けた気候政策の波及影響の分析での利用が見込まれる。

サブテーマ 2 では、CO2 ネットゼロ排出において重要な役割を担う植林と BECCS に関する諸問題への回答に関して、[研究 2-1]として、気候変動緩和下における持続可能な農業・土地利用戦略の提示に向けて、CO2 除去技術に依存しない排出シナリオについてモデル比較分析を実施した。また、[研究 2-2]として、気候緩和策の戦略による生態系への影響の違いを明らかにすべく BECCS と植林による生物多様性への影響評価を、さらに [研究 2-3]として、将来の社会経済状況の変化が生態系に及ぼす影響明らかにすべく社会変革による生物多様性への影響の分析を、それぞれ実施した。また、[研究 2-4]として極端気象の不確実性を考慮した食料安全保障に関する分析を、 [研究 2-5]として、ネットゼロ排出緩和シナリオ定量化のモデル入力値とすべく、土地利用モデルを用いたバイオエネルギーポテンシャルの推計を実施した。さらに、[研究 2-6]として、緩和策と貧困の関係をモデル化し、炭素税の貧困撲滅への貢献の可能性について検討した。緩和政策の分析手法・結果のサブテーマ 1 の排出経路モデルへの反映については、AIM/Hub モデルの提供と感度実験を通じて、サブテーマ 1 の研究項目[研究 1-2]に共同で取り組んだ。

さらに、サブテーマ 1 とサブテーマ 2 が連携して取り組む課題全体の目標として設定した、気候政策、気候影響、持続可能性の相互依存関係を考慮した地球規模の持続可能性シナリオの構築、に関して、両サブテーマで連携し、[研究 1-8]では土地関連の GHG 排出削減策が食料安全保障（SDG2）に及ぼす影響の要因分析を、[研究 1-9]では[研究 1-4]において予測した野外火災が大気汚染物質放出を通じて人間健康（SDG3）に及ぼす影響の検討を、[研究 1-10]では緩和政策下での複数 SDG 指標の定量化を、それぞれ実施した。

[研究 1-1: 最適排出経路と排出指標について]

気候目標及び社会経済発展経路に対応した排出経路の分析に関して、非 CO2 温室効果ガスや短寿命気候汚染物質の排出量の CO2 排出量への換算係数（排出指標）の選択の、パリ協定達成に向けた削減努力及び排出経路への含意について検討した。京都議定書ならびにパリ協定を含む政策検討・交渉の場では長年ほぼ一貫して 100-year Global Warming Potential（GWP100; 排出後 100 年間の放射強制力の積算を基準に CO2 排出量に換算する）が排出指標として用いられてきた。一方で、GWP100 と政策目標との整合性については、物理的・経済的観点から問題点も指摘され、時間範囲を 100 年より短く設定し短寿命気候汚染物質の寄与をより重視する GWP50・GWP20 などの排出指標も検討されてきた。物理気候、炭素循環、大気化学、社会経済システムを簡略化して統合的に表現する簡易統合評価モデル ACC2 を用いて、温度目標を一時超過（オーバーシュート）する場合を含む幅広い排出経路を導出し、どのような排出指標が経済効率性の観点から整合するかを検討した。

分析の結果、いずれの排出経路でも、今後数十年に関しては、パリ協定で事実上合意された GWP100 が経済最適な排出指標に最も近いことが明らかになった。一方で、より長期、例えば今世紀後半まで見通した場合、GWP100 以外の排出指標（特に GWP50・GWP20）を将来各国で選択することが経済最適となりうることがいずれの排出経路でも見いだされた。全世界の費用効率性を重視するならば、GWP100 にのみ固執せず、例えば 5 年毎のグローバルストックテイクの機会を活用し、各国の削減目標の見直しと併せて、より柔軟に排出指標の選択の確認・見直しを行う必要がある。

[研究1-2: CO2と非CO2排出の限界削減費用曲線の推計]

温室効果ガスを追加的に 1 単位量削減するために必要な費用は限界削減費用 Marginal Abatement

Cost（MAC）と呼ばれ、この削減と費用の関係を連続的に表現したものは限界削減費用曲線（MAC 曲線）と呼ばれる。一般的に MAC 曲線は各種の削減技術や政策の実施に要する費用とそれによる温室効果ガス削減量を積み上げて作成されるが、詳細分析型統合評価モデルの出力情報から炭素価格と排出量の関係を抽出して推計される場合もある。MAC 曲線は CO2 ならびにメタンや亜酸化窒素などの温室効果ガスについて開発・利用される。一方で、一酸化炭素（CO）、窒素酸化物（NOx）、揮発性有機化合物（VOC）、硫酸塩（SOx）、ブラックカーボン（BC）、有機炭素（OC）、アンモニア（NH3）のようなエアロゾルと汚染物質の排出についても、統合評価モデルのシミュレーション出力に関して炭素価格との間に相関を見出すことができれば、簡易気候モデルを連結した最適化型統合評価モデルを用いた気候目標に整合的な気候政策と排出経路の分析への応用が期待できる。本研究では、最新版の詳細分析型統合評価モデル AIM/Hub モデルを用いて、温室効果ガスだけでなく、エアロゾルや汚染物質の排出についても MAC 曲線を推定するための感度解析データセットを作成した。また、推定した MAC 曲線を最適化型統合評価モデル SCM4OPT に実装し、最適排出経路ならびに炭素排出の社会的費用の試算を実施した。

本研究では SSP1～SSP5 の 5 つの社会経済シナリオについて、それぞれ感度解析データセットを作成したうえで、MAC 曲線を推定した。温室効果ガス排出量については、土地利用排出量は炭素価格に直接関係しないため、MAC 曲線を推計する際に総排出量から除外している。エアロゾル排出量のうち、炭素価格の影響を受けにくいセクター（土地利用、商業、住宅、産業プロセス、廃棄物など）を除外して MAC 曲線を作成することになった。CO2 排出量については、大きな削減費用の下では削減率が 1 よりも大きくなり、CO2 排出についてネガティブエミッション（負の排出）になる挙動を AIM/Hub が示した。一方、メタンや亜酸化窒素の排出量については、同じ削減費用での抑制率が CO2 に比べて小さく、農業、航空などのメタンや亜酸化窒素の主排出源となる部門での削減の困難性に由来した挙動と推察できる。

[研究1-3: 極端な気象現象の変化に関する世代間不公平性とその地域間不公平性の検討]

緩和政策が実施された場合の気候影響の評価に関連し、特に世代間公平性ならびに地域間公平性の観点からの新たな評価の視座ならびに気候リスクのコミュニケーション方法を提案するために、IPCC第6次評価報告書に向け実施された気候予測情報群（CMIP6データ）を取得・解析し、祖父母世代が経験しない暑い日および強い雨（1960～2040年で最大の日最高気温および日降水量を超えるもの）をその孫世代が生涯（2020～2100年）で経験する回数について推計し、排出シナリオ別・地域別にその比較を行うとともに、さらに、現状の一人当たりGDPや一人当たりCO2排出量と異常気象経験回数の対比を行った。

解析の結果、緩和がうまく進まないRCP8.5の排出経路下で予測される気候変化条件下において、熱帯の一部地域では、祖父母世代が生涯に経験しないような暑い日を1000回以上、強い雨の日を5回以上、それぞれ経験しうることが示された。また、RCP8.5下で高温・大雨をより多く経験する傾向は、特に現状の一人当たり収入や一人当たりCO2排出が小さな国々で良く見られ、気候影響への適応力の欠如の点からも、あるいはこれまでの気候変化への寄与・責任の小ささの点からも、高温・大雨に曝される気候影響が不公平性をより強化するものであることが示された。一方で、仮にパリ協定の2℃目標に整合的なRCP2.6の排出経路を実現できた場合、この地域間不公平性の強化についても軽減可能であることが示された。すなわち、パリ協定の長期目標達成に向けた気候緩和努力を通じて、孫世代が面する異常気象影響の軽減（世代間公平性の改善）だけでなく、国間の不公平性の強化の軽減（地域間公平性の改善）も併せて期待できることが示された。

[研究1-4: 気候変化及び人間活動が野外火災ならびに関連の炭素排出に及ぼす影響の評価]

野外火災とそれに関連する炭素および大気汚染物質の排出は、人間の健康への悪影響、陸上生態系への損害、気候変動を促進する間接的な影響など、幅広い環境および社会的影響をもたらすことから、野外火災の生起や規模に影響する5つの因子（気象、バイオマス量、土地利用、人口密度、1人あたりGDP)の将来変化を考慮し、21 世紀を通じての野外火災による炭素排出量を将来予測した。野外火災の

予測には、既存の陸面モデルCommunity Land Model（CLM)の火災モデルを、気候関連予測に加えて人間活動関連要素も考慮できるように拡張したうえでそれを用いた。将来予測にあたっては、3つの社会経済シナリオ（SSP1・SSP2・SSP3）と3つの温室効果ガス排出想定（RCP2.6・RCP6.0・RCP8.5）での気候シナリオを前提条件として用いた。

過去期間（2006～2015年）と比較すると、主として、火災管理の改善をもたらす1人あたりGDP増加の影響を受けて、世界の野外火災による炭素排出量は減少すると予測された。気象因子は、より大きく温暖化が進むケースにおいて、大きな寄与を持つことがわかった。また、燃料となるバイオマスの乾燥度が増すことを受けて、寒帯林での火災が特に大きく増加すると予測された。

[研究1-5：赤身肉を小型浮魚類に置き換えた場合の環境・健康影響評価]

持続可能で健康的な食事の実現に対する世界的な関心が高まる中、代替タンパク質が注目されている。シーフード、特に小型浮魚類（イワシ類、サバ類等）は赤身肉に比べて環境負荷が低く、栄養価も高いことが指摘されてきた。そこで、小型浮魚類は代替タンパク質の一つとなる可能性を秘めている。しかし、赤身肉の代替タンパク質として、その環境及び健康への影響は不明である。本研究では、まず水産資源の最大持続生産量の推定モデル（Catch-MSY）と一般均衡型経済モデル（AIM/Hub）を用いて、2050年での小型浮魚類の潜在的供給量及び世界の地域別の赤身肉摂取量をそれぞれ予測した。次に、2050年に向けた三つの肉代替シナリオを作成し、小型浮魚類の生態学的供給限界を超えることなく赤身肉を代替した場合に、世界の温室効果ガス排出量、栄養摂取と疾病予防への影響を定量的に評価した。

解析の結果、2050年には、基準シナリオ（BAU）と比較して、いずれの肉代替シナリオ（Min.GHG：GHGの排出量を最小化するシナリオ；Adeq.Fish：一人当たりの魚消費量が低い国で魚消費を増やすシナリオ；Min.Meat：一人当たりの赤身肉消費量が高い国で赤身肉消費を減らすシナリオ）でも、赤身肉生産によるGHG排出量が8％以上削減でき、オメガ3（DHA+EPA）、ビタミンB12、カルシウム等の必須栄養素の摂取量が大幅に増加し、非感染疾患虚血性心疾患や脳卒中などによる死亡と障害調整生存年数（DALY）が減少することが示された。これらの結果は、小型浮魚類が持続的に、かつ適切に利用されていることを前提としている。乱獲や小型浮魚類の不合理な利用に直面する中、小型浮魚類のポテンシャル発揮を実現するためには、水産資源の管理強化と魚食普及の推進に取り組む必要がある。

[研究1-6: 軽量気候影響予測手法（影響エミュレータ）の開発]

社会変化・気候変化の不確実性を定量的に考慮した統合影響評価を実施しその将来像を描出するために、柔軟なシナリオ想定が可能な軽量気候影響予測手法（影響エミュレータ）の開発に取り組んだ。具体的には、先行研究（環境研究総合推進費S-14）で創出された、新シナリオ（SSP×RCP×CMIP5）枠組でのプロセスベースモデルを用いた分野別経済影響評価の出力データベースを活用し、プロセスベースモデルでの経済影響のシミュレーション結果を，少ない計算負荷で統計的に再現する手法の開発に取り組んだ。プロセスベースの生物・物理的影響モデルや社会経済モデルは、精緻な計算が可能である一方、計算負荷が大きく、限られた数の将来シナリオの下でしかシミュレーションを実施することができないことが応用上の制約となりうる。本研究では、開発した影響エミュレータについて、分野別・地域別に、プロセスベースモデルでの影響予測結果の再現性について評価した。

影響エミュレータの詳細モデル出力の再現性能について、部門別・地域別に、全球平均気温変化を説明変数とした場合と地域別平均気温変化・降水量変化を説明変数とした場合、社会経済関連の説明変数を加えた場合と加えない場合、挙動の非線形性や説明変数間の相互作用を考慮しうるエミュレート手法を用いた場合と用いない場合などの比較評価を行った。全球規模での経済的影響の推計においては、比較的単純な手法（例えば全球平均気温を説明変数とする2次式）であっても、全体的な傾向を再現可能であった。一方、地域別・部門別の影響の差異等の詳細について再現するには、より詳細な情報（地域別の気候や社会経済状況）を説明変数として用いると共に、統計的にもより高度な手法を用いることが有効であることが分かった。なお、本研究で開発した影響エミュレータのソースコードはZENODOレポジトリで公開配布しており今後研究コミュニティでの活用が期待できる。

[研究1-7: 気候変動による経済影響評価の不確実性の低減]

気候変動予測の分野では、過去の観測データと気候モデルシミュレーションの比較に基づいて将来予測の不確実性を低減するEmergent Constraint（EC）と呼ばれる研究が、この10年ほど活発に行われてきた。気候変動の影響評価モデルにおいて入力データとして用いられる気候モデルの不確実性を減少させることができれば、影響評価の不確実性も低減できると期待される。しかし、気候予測の不確実性低減に関する情報を影響評価に活用する手順はこれまで確立されておらず、気温や降水量の将来変化予測の信頼性が低いと考えられる気候モデルも含んだ影響評価の幅をそのまま示す研究が多いため、活用手順の改善が求められている。本研究では、気候変動予測の分野で開発された最新のEC手法を応用することで、気候変動の経済影響評価（被害額の評価）の不確実性を低減することを目的とした。EC研究では、多くの気候モデルを統計的に分析することで不確実性を低減するが、5つ程度のデータ数では統計的な関係を議論することができない。本研究では影響エミュレータ（[研究1-6]）を用いることでこの制約を克服した。本研究では、農業生産性・飢餓・暑さによる死亡・冷暖房需要・労働生産性・水力発電・火力発電・河川洪水・海面上昇の9分野の影響を被害額へ換算したものを扱った。この影響エミュレータに、IPCC第5次報告書に貢献した気候モデル群(CMIP5)と第6次報告書に貢献した気候モデル群（CMIP6）の中から67の気候モデルの気温変化、降水量変化予測データを与えることで、67の気候モデルに対する9分野の経済影響を計算した。このように計算コストの低い影響エミュレータを用いることで得られた多数の経済影響評価のデータに、これまで開発されてきたEC手法を適用することで不確実性を低減できるかを調べた。

複数の気候モデルが過去の気温トレンドを過大評価しているが、それらの気候モデルでは将来の気温上昇と降水量増加も過大評価しているものと考えられる。この予測の信頼性に関する情報を加味すると、予測の不確実性幅（5-95%幅）を低減することができ、特に上限（95%値）を顕著に引き下げることができた。このECによって、気温変化予測と降水量変化予測の分散をそれぞれ41%と28%削減することができた。さらに、影響エミュレータにより求めた世界の気候変動経済影響（金銭換算した被害額が2080年から2099年のGDPの何％に相当するかを9分野で総計）について、EC適用前の不確実性幅は0.8%から2.9%だが、ECによって低減された不確実性幅は0.8%から2.5%になる。上限が2.9%から2.5％へと顕著に低下し、分散も31%削減することができた。

[研究 1-8: 土地関連の GHG 排出削減策が食料安全保障に及ぼす影響の要因分析]

農業・林業・その他土地利用 Agriculture, Forestry and Other Land Use（AFOLU）は、長期の GHG 排出削減の取組において重要な役割を持つと想定されており、特に非 CO2 の GHG 排出、バイオエネルギー供給、植林による炭素貯留に関して重要性が大きい。一方で、これらの土地関連の排出削減策は食料安全保障に悪影響を及ぼす可能性も指摘されてきた。しかし、この悪影響の対策別の内訳については検討が不足している。本研究では、2℃目標に整合的な排出シナリオ下において、非 CO2 の GHG 排出への課税、バイオエネルギー生産、植林の 3 種の土地関連の排出削減策が一人当たりカロリー摂取量、飢餓リスク人口、農作物価格に及ぼす影響の大きさを、国際モデル比較評価 AGMIP に参加する 6 つの農業経済モデルを用いて定量評価した。なお、本研究はサブ 2 が開発・改良する土地関連気候対策の食料安全保障への波及影響の評価手法を活用し、サブ 1・サブ 2 の連携研究として実施した。

モデル内で陸地に固定される炭素の価格として表現される植林、それに続き、モデル内で排出税として表現される非 CO2 の GHG 削減が、食料・飢餓影響への寄与が大きいことが分かった。2℃目標に整合的な気候政策（炭素価格）の導入により 2050 年時点で、植林について 4190 万人、非 CO2 の GHG 排出への課税について 2670 万人の飢餓リスク人口の増加が懸念される。本研究から、排出削減・気候政策と農業市場の管理政策の連携の必要性が示唆される。

[研究 1-9： 気候変化及び人間活動が野外火災PM2.5濃度変化を通じて引き起こす健康影響の評価]

山火事等の野外火災によってバイオマス燃焼が生じると、人間健康へ悪影響を及ぼす微小粒子状物質

（PM2.5）を含む大気汚染物質が放出される。本研究では、野外火災起源 PM2.5 に起因する死亡率（総人口あたり死亡数）を、野外火災 PM2.5 濃度、ハザード比、ベースライン死亡率、年齢および疾患別人口の組み合わせで推計した。ハザード比については、2019 年の GBD（世界疾病負荷）研究による 5 つの疾患（慢性閉塞性肺疾患、肺がん、虚血性心疾患、脳卒中、下気道感染症）の調査結果を用いた。野外火災 PM2.5 濃度の予測には、CLM に実装された野外火災モジュールによる PM2.5 排出予測と大気化学輸送モデル GEOS-CHEM による移流拡散予測を組み合わせて用いた。

現状では（2006～2015 年）、野外火災が全球陸域の総 PM2.5 濃度の 10%に寄与し、野外火災 PM2.5 による全世界の死亡者数は約 9 万人と推計された。野外火災 PM2.5 による死亡率は熱帯地域で最も高かった。一方、将来期間（2015～2100 年）については、気候変化シナリオや社会経済シナリオを想定したうえで、野外火災による死亡率変化を予測した。その結果、21 世紀半ばの野外火災死亡率は、一部のシナリオを除いて、大多数のシナリオと地域で減少が予測された。21 世紀後半には、高緯度地域での野外火災死亡率の増加が予測された。特に、想定した中で昇温が最大の気候変化シナリオ（RCP6.0)では、燃料となるバイオマスの乾燥による北極圏での野外火災排出増加が死亡率増の主因となった。RCP6.0 を発展途上国の開発の遅れと格差拡大の特徴を持つ社会経済シナリオ SSP3 および SSP4 と組み合わせると、高齢者人口の増加により、世界全体の野外火災死亡率の増加となった。高緯度地域の高所得国にとっては、野外火災による健康リスク増加を軽減すべく、より積極的に気候変動緩和に取り組むインセンティブを与えうる予測結果といえる。

[研究1-10: 緩和政策下でのSDG指標の定量化]

AIM モデル枠組で複数のモデル・ツールを連結し、気候変動の緩和やその他の社会・環境変化が SDGs 達成に及ぼす影響を評価した。指標定量化のために、一般均衡型経済モデル（AIM/Hub）に、グリッド化土地利用配分モデル（AIM/PLUM）、生物多様性モデル（AIM/BIO）、水不足評価ツール、排出量ダウンスケーリングツール、飢餓推定ツール、簡易気候モデル、大気化学輸送モデル（GEOS-Chem）および健康評価ツールを連結した。また本研究では CO2 削減 1%に波及して生ずる各 SDG 指標の変化を限界 SDG 指標変化 Marginal SDGs indicators Variation（MSV）と定義・推計した。

大気質、再生可能エネルギーシェア、エネルギー強度、失業率、森林面積について副次的便益がみられ、ベースラインシナリオと比較して 1%の CO2 排出削減で 0.58%、0.23%、2.6%、0.02%、0.34%の改善となる。一方、飢餓、農業価格、GDP、および生物多様性のリスクは、それぞれ 0.94%、0.26%、0.034%、および 0.026%のトレードオフとなる。食品廃棄物の傾きは統計的に有意ではなく、CO2 排出量とのその関係性を特定できなかった。

多くの指標で線形回帰により有意性のある MSV が求められたが、一部の国で CO2 削減が 80%削減を超えると緩和に対して強い非線形の応答を生じることも分かった。例えばインドの飢餓リスクは、主にバイオ燃料生産強化に伴う地代上昇により高い CO2 削減率で強い応答が生じる。線形応答を想定した MSV が、中程度の削減（80%未満）で適用可能であるが、80%を超える削減域では適用に注意が必要である。

【サブテーマ２】持続可能性を考慮した気候緩和策の戦略検討

[研究 2-1: 負の排出に依存しない早期排出削減による食料・土地利用システムへの影響評価]

これまで統合評価モデルで推計されてきた地球の平均気温上昇の低位安定化シナリオ群(地球の平均気温上昇を産業革命前から 1.5℃あるいは 2℃に抑える、いわゆる、1.5℃・2℃目標に相当するシナリオ群)には、シミュレーションにおいて今世紀末での気温上昇レベルについてのみ言及することから、気候緩和の遅れや気温目標の一時的な超過（オーバーシュート）などが含まれている。しかし、これらのシナリオは今世紀後半での大規模な負の二酸化炭素排出に強く依存しており、土地、食料、生態系に悪影響を与える可能性がある。一方、これらの影響を回避するために正味の負の CO2 排出に依存することなく気候目標を達成するには、早期の迅速な排出削減対策の実施が必要であり、これは短期的に影響をもたらすことが懸念される。本研究では、正味の負の炭素排出量に依存せず早期の排出削減対策の実施へ移行することによる土地利用と食料システムに対する影響を分析した。

その結果、早期の排出削減を行い、負の排出をしないシナリオ（ネットゼロ排出を長期間維持）では、今世紀後半の CO2 除去を回避し、温室効果ガス排出削減によって引き起こされる劇的な土地利用変化を回避できることが示された。さらに、それにより今世紀末頃には食料価格の低下、飢餓のリスクの低減、灌漑用水の需要の低下などの便益が示された。しかし同時に、今世紀半ばには大幅な排出削減が必要になり、エネルギー作物に必要な土地面積が増加し、食料安全保障のさらなるリスクをもたらす副次的な影響の可能性も明らかになった。これは、CO2 除去に依存せず気候目標を達成するには、必然的に早期かつ迅速な排出削減対策が求められるが、これも中期的には課題をもたらすため、これらの問題に対処する方策を検討する必要性を示唆している。

[研究 2-2: BECCS と植林による生物多様性への影響評価]

マイナス排出を達成するためのBECCSや植林の大規模展開が生物多様性に与える影響を解明するため、エネルギー経済システム、土地利用および生物多様性に関して一貫した評価が可能なAIMモデルの枠組みを用いて、気候変動と緩和策による土地利用改変が生物多様性に与える影響を定量的に評価した。パリ協定では、長期気温目標達成のための努力は「公平性に基づき」、「持続可能な開発と貧困撲滅の努力との関連で」行われなければならないとされている。しかし、BECCSや植林などの大規模な土地利用改変を伴う緩和策は、それらが導入される地域の生物多様性に過度の負担を与える可能性がある。そこで本研究では、これら緩和策の影響について、地域的な公平性も同時に評価した。

評価にあたっては、BECCSと植林の導入強度を変えた4つの将来シナリオ（温室効果ガス排出削減を行わない「なりゆきシナリオ」、BECCSを重視した「BECCSシナリオ」、植林を重視した「植林シナリオ」、BECCSと植林の最適利用を目指した「植林＋BECCSシナリオ」）を設定した。これらのシナリオのもとでの気候変動および土地利用改変が生物多様性（生物種の出現種数と種構成）に与える影響を地球規模及び地域規模で評価した。

BECCSや植林による緩和策の導入は、地球規模でみると、気候変動による生物多様性の損失や種構成が変化するリスクを低減する可能性が示された。なりゆきシナリオでは、気候変動により生物の出現種数が減少し、種構成も変化することが予測されたが、緩和策の導入によりその減少・変化の傾向は抑制された。一方、地域規模でみると、緩和策が生物多様性に与える影響は地域によって異なった。土地利用改変や炭素隔離により緩和に貢献した地域ほど、生物多様性の損失が大きくなることが予測された。なりゆきシナリオ、緩和シナリオともに、土地利用改変の強度が大きい地域ほど出現種数が減少する傾向がみられた。また、BECCSシナリオ、植林シナリオともに、炭素隔離に貢献した地域ほど出現種数が減少する傾向があった。

本研究の結果は、BECCSや植林の導入に伴う土地利用改変の影響を考慮しても、土地利用ベースの緩和策による気候変動の緩和は、地球規模での生物多様性の損失を抑える可能性があることを示した。一方で、緩和策の影響は地域によって異なる可能性も示された。土地利用改変や炭素隔離によって緩和に貢献した地域ほど、生物多様性の損失が大きくなる傾向があった。このような緩和策の影響の地域間格差を減らすためには、既存の森林の適切な利用や管理、地域の生態系の特性に合った自然再生などを通じた炭素固定の増強など、気候変動緩和と地域規模の生物多様性保全を両立可能な緩和策について検討していく必要がある。

[研究 2-3: 社会変革による生物多様性への影響]

生物多様性の損失を食い止めるため，2010 年に開催された生物多様性条約第 10 回締約国会議において，生物多様性に関する新たな世界目標である「戦略計画 2011－2020（愛知目標）」が採択されたものの，その達成は困難であることが既に明らかになっている。これらの政治的枠組みは近い将来を見据えたものであるが，長期的な世界の持続可能な発展を展望するためには，これらの政策的枠組みとともに，より長期的な視点に立つことも重要である。今後の人口増加，食の多様化，食肉需要の増加に伴いより急激な生物多様性の損失が懸念される。加えて，気候変動も生物多様性にとっての脅威となるおそれがあることが指摘されている。そこで当該研究グループは二つの研究を実施した。

その第一は国際共同研究で、複数の生態系モデル、複数の統合評価モデルを用いて、生産側と消費側、さらには生態系保護のための土地利用管理を変えることで，過去から続く生物多様性の減少を食い止められるかどうかを検討する。この研究は複数の農業・土地利用モデル（もしくは統合評価モデル）、複数の生態系モデルを組み合わせて実施し、最終的には Nature で出版され当該分野のみならず複数の研究コミュニティをブリッジする非常に重要な研究であった。シナリオには、3 つの施策を考慮して、それぞれ個別にそれらを入れたものと、すべてを入れたものを定量化した。その 3 つとは食料生産側への対策、食料消費側への対策、土地利用管理への対策である。食料生産は収量の向上、食料消費側では畜産の削減や食料廃棄物の削減などを考慮した。

その第二は、自然環境の保護・再生と食料システムの変革に向けた取り組みを地域毎に想定し、生態系保全を行う上で有効な対策，有効な地域の同定を目的としてシナリオ分析を行うことである。この研究は AIM モデルフレークワークのみを用い、上述の 3 つのモデルを組み合わせた。基本的な研究のアイデアは第一の研究と類似であるが、世界全体のものに加えて、地域別での対策を考慮した。

世界全体へ社会変革を行った国際共同研究については、将来シミュレーションの結果、これまでの社会システムの延長線上の「成り行きシナリオ」では、生物多様性の損失は続き、2010-2050 年における損失は 1970-2010 年における損失と同等かそれ以上になることが予測された。一方、自然保護・再生と食料システムの変革に向けた取り組みを最大限に実施する「社会変革実施シナリオ」では、生物多様性の損失が抑制され、2050 年以降に回復に向かう可能性があることが示された。これは、統合評価モデルと生物多様性指標のほぼすべての組み合わせで示されている。この成果は、自然保護・再生と食料システムにおける大胆な社会変革が 2020 年以降の生物多様性保全戦略にとって鍵となることを示している。

次に、地域別の対策を導入した時の生態系の影響についてみてみる。潜在生息域の変化を地域別需要側対策シナリオごとにみると、中南米ではブラジルで対策を実施する効果が最も大きく、次いで米国での対策の効果が大きい。中国などそれ以外の地域における対策の効果はほとんど見られない。アジアでは中国で対策を実施する効果が最も大きい。日本の対策は基本的に影響が小さいこともわかる。期間別の推移についてみると、全体としては期間前半に大きな変化がみられる。これは食料廃棄物削減が 2030 年までに進むことや肉食制限が 2050 年までで完了することに由来すると考えられる。期間後半はそれと比べるとなだらかな変化で、人口や GDP の変化等のベースラインで想定される変化は上記のようなラディカルな変化と比べると生態系に対しても限られた影響しか与えないことに起因すると考えられる。

[研究 2-4: 極端現象を考慮した食料安全保障]

気候変動の影響は既に洪水、熱波、森林火災など各方面で顕著に表れており、人為起源の温室効果ガスの排出がこれらの事象に大きく寄与しているとされている。また、日本をはじめ、各国が政策目標として炭素中立を掲げており、温暖化対策は喫緊の社会的課題となっている。農業の温暖化影響について見ると、これまでの研究では緩やかな気候の変化の平均的な姿についての解析が主としてされてきた。すなわち、例えば 2050 年では温暖化によりどの程度の作物生産量減少が見込まれるといった形だった。しかし、年々変化する気象条件とそれによる作物生産への影響は大きな振れ幅を持っており、本来の農業影響は極端な気象現象の発生頻度がどのように変わっていくのかを考慮しなくては、将来の気候変化にどのように対応すべきかがわからず、当該研究分野の重要な課題として長く残されていた。

そこで本研究では、将来の極端な気象現象がどのように変わっていくのか、またそれにより食料安全保障、具体的には飢餓に直面する飢餓リスク人口がどのように変わるのかということを複数のモデルを組み合わせて予測し、それに対応するための気候変動適応策を論じた。本研究では、AIM/Hub と PRYSBI2 と呼ばれる作物モデルを用いた。AIM/Hub は将来の人口と GDP を入力して、気候、エネルギー、経済システム、食料需給、土地利用、温室効果ガス排出量、温室効果ガス排出削減量などを出力するモデルである。PRYSBI2 は気候条件や経済条件などを入力し潜在的作物収量を計算するモデルである。飢餓リスク人口は、作物収量の変化を通じて起こる価格変化、さらにその価格変化に対する消費者の応答から計算される食料消費量から計算した。

結果として、社会経済的な変化のみを考慮し気候が現状不変と仮定したベースラインシナリオでは飢

餓リスク人口は 2050 年に 3 億 6000 万人と推計された。そこから「温暖化対策を行わなかったケース」、温室効果ガス削減を実施し「温暖化対策を最大限行ったケース（最大限対策ケース）」（いわゆるパリ協定の 2℃目標相当）について飢餓リスク人口を推計した。この時、作物モデルや気候の不確実性を考慮に入れると以下のことがわかった。まず、温暖化対策なしケースと最大限対策ケースでの飢餓リスク人口の中位値は、それぞれ 4 億 4000 万人、4 億人と推計された。また、2050 年時点で 100 年に 1 度程度の頻度の稀ではあるが非常に強い不作が発生すると、飢餓リスク人口は温暖化対策なしケースと最大限対策ケースでそれぞれ 6 億人、5 億 3000 万人となった。気候や気候への作物の応答に由来する飢餓リスク人口の不確実性は、温暖化対策なしケースでは最大限対策ケースに比較して、大きくなった。

さらに、これらの 100 年に 1 度の頻度で発生する不作により発生する追加的な飢餓リスク人口の増加を回避するために、追加的に食料備蓄がどの程度必要になるかを推計した。その結果、温暖化対策なしケースでは 1 億 8000 万トンの穀類、金額にすると 330 億米ドル（日本円で約 3 兆 8000 億円）に達し、これは現在の世界全体の穀類の備蓄の約 1/4 に相当する。また、南アジアでは現在の備蓄の 3 倍に相当することがわかった。

[研究 2-5: 土地利用モデルを用いたバイオエネルギーポテンシャルの推計]

今世紀末までにいわゆる 2℃目標を達成する場合、世界の総エネルギー供給量の約 20～30%をバイオマスエネルギーで賄う必要があるとされてきた。一方、気候変動緩和対策の一つとして考えられている食肉消費の低減などの食内容の変化は農地や牧草地の利用を変え、バイオエネルギーポテンシャルを変えうる。そこで、本研究では将来の食内容の変化がバイオマスエネルギーポテンシャル量に与える影響を明らかにした。将来の食内容、食品ロスを考慮し、バイオマスエネルギーポテンシャル量とバイオマス作物生産費用を算出し、その供給曲線を算定した。算出された結果をシナリオ・地域別に比較し、将来の技術的及び経済的なバイオマスエネルギーポテンシャル量の可能性を評価した。

分析の結果、第一に、消費側の取り組み(食肉制限)により、多くのバイオマスエネルギーポテンシャル量が得られることが示された。第二に、2℃目標達成に必要なバイオマスエネルギー量(150～250EJ に相当)は全世界食肉制限シナリオ(261EJ/年)、先進国食肉制限シナリオ(173EJ/年)、先進国以外食肉制限シナリオ(234EJ/年)において供給可能であることが示された。ベースラインシナリオと比べ、全世界で食肉制限したシナリオでは、食肉制限を行い牧草地や家畜の飼料の生産に要する農耕地の土地の需要が減少し、バイオマス作物作付け地(未利用地)が増加し、より生産性の高い地域を確保することで、バイオマスエネルギーポテンシャル量が増加したためである。特に先進国以外の地域で食肉制限を行うことでバイオマス生産費用が低く、多くのバイオマスエネルギーポテンシャル量が得られることが示された。第三に、地域別にみると、南米地域はどのシナリオにおいても最も高いバイオマスエネルギー量が供給可能で、世界の約半分を占めることが示された。一方、中東/アフリカ地域では食肉制限シナリオにおいてバイオマスエネルギーポテンシャルが大幅に増加した。以上から、消費側の取り組み(食肉制限)を行うことによるバイオマスエネルギーポテンシャルの増加が期待でき、特に中東/アフリカ地域で最も高いポテンシャル量の増加が見込まれた。

[研究 2-6: 炭素税税収の貧困解決への活用の潜在的可能性]

貧困撲滅は SDGs の筆頭目標であり、また多様な開発・環境問題との相互作用が指摘されるが、従来の統合評価モデルでは貧困人口や貧困ギャップ（貧困線以下の人口の不足額の平均）などの貧困関連指標は定量化されてこなかった。本研究では、新規に AIM/PHI（貧困、家計、所得分布モデル）を開発し、既存の AIM モデルと連結し、炭素税税収の貧困解決への活用の潜在的可能性の分析を行った。

AIM/PHI は所得分布モデルと支出モデルから構成され、所得分布モデルは AIM/Hub が将来の社会経済・気候政策シナリオに基づき出力する地域別のマクロ経済指標・価格変動を入力として受け取り国内の所得分布を計算し、続けて所得分布を渡された支出モデルが家計消費の分布と貧困者数・貧困率・貧困ギャップを計算する。なお本研究では、貧困判定に 1 日 1.90 米ドル（2011 年 PPP）の閾値を使用し、気候緩和政策の異なる 4 シナリオを対象に分析を実施した。また、気候変動影響の効果は考慮していない。

2030 年における 2℃目標相当のシナリオでの炭素税収入を絶対的貧困ギャップの世界総和と比較したところ、前者の値は後者の 15 倍であることがわかった。炭素税収入と絶対的貧困ギャップの差を国別に見た場合、炭素税収入の不足がナイジェリアや中央アフリカ共和国などの一部のアフリカ諸国で生じることが示された。炭素税収入のポテンシャルは、先進国や中国・インド等の 2030 年時点で中間所得国かつ人口が多い国では大きくなる。これらの国々で期待される炭素税収入に比して、アフリカ諸国に残る貧困ギャップの総和は小さく、例えば先進国（現在の OECD + EU）の炭素税収入の 20%（GDP の約 0.1%）で、アフリカで見られる貧困ギャップを補うことが出来る。炭素税収入を国間で移転・再配分する想定の実現可能性に注意が必要だが、世界的な社会目標の達成へのヒントを与えるものである。

５．研究成果

５－１．成果の概要

以下では、「４．研究開発内容」で述べた各研究（[研究1-1]～[研究2-6]）について、その成果の概要を報告する。なお、これらの研究で得られた科学的知見を活用して政策的含意を検討し、「人間社会・生態系の持続可能性を損ねない形でネットゼロ排出を達成するということは、どのような社会を作り、受け入れていくということなのか？」という問いへの答えを示すという、本研究課題の全体目標の達成に取り組んだ。その結果、例えば「1.5/2℃目標のための緩和政策（ネットゼロ排出）は他SDGsに負の波及影響をもたらす場合があり、その軽減のための追加政策や対策が必要で、国際協力、包括的土地管理、食料システム変革などがその実現のカギとなる」こと、「1.5/2℃目標の堅持に加えて、それでも残る極端気象による気候影響に対応するための適応策が必要である」こと、などを主張することができた。

[研究1-1]では、非CO2温室効果ガスや短寿命気候汚染物質の排出量のCO2排出量への換算係数（排出指標）に注目し、パリ協定達成に向けた削減努力と排出経路への含意を検討した。全世界の費用効率性を重視するならば、GWP100にのみ固執せず、例えば5年毎のグローバルストックテイクの機会を活用し、各国の削減目標見直しと併せ、より柔軟に排出指標の選択の確認・見直しを行う必要があることを定量的に示した。成果はScience Advances誌で公表した。報道発表を実施した。

[研究1-2]では、排出シナリオ推計に用いられるAIM/Hubモデルを用いた感度分析出力を利用してSSP別・ガス種別の限界削減費用曲線を作成し、最適化型統合評価モデルSCM4OPTに実装し、排出経路ならびに社会的炭素費用を試算した。複数の社会経済想定の下での最適排出経路とその下での炭素価格の簡易推計が可能な手法を開発できた。学術誌での公表に向けて準備中である。

[研究1-3]では、極端な気象現象の変化に関する世代間不公平性とその地域間不公平性の検討を実施した。パリ協定の長期目標達成に向けた気候緩和努力を通じて、孫世代が面する異常気象影響の軽減（世代間公平性の改善）だけでなく、国間の不公平性の強化の軽減（地域間公平性の改善）も併せて期待できることを定量的に示した。成果はEnvironmental Research Communications誌で公表した。報道発表を実施した。

[研究1-4]では、気候変化及び人間活動が野外火災ならびに関連の炭素排出に及ぼす影響の評価を実施した。将来的に、火災管理改善をもたらす1人あたりGDP増加の影響を受けて、世界の野外火災による炭素排出量が減少するとの予測を示した。一方で、気候変化が大きいケースでは、燃料となるバイオマスの乾燥度が増すことを受けて、北方林での火災が特に大きく増加するとの予測を示した。成果はGlobal Environmental Change誌で公表した。

[研究1-5]では、食事構成において赤身肉を小型浮魚類に置き換えた場合の環境・健康影響評価を行った。2050年には、基準シナリオBusiness As Usual（BAU）と比較して、いずれの肉代替シナリオでも、赤身肉生産によるGHG排出量が8%以上削減でき、オメガ3（DHA+EPA）、ビタミンB12、カルシウム等の必須栄養素の摂取量が大幅に増加し、非感染疾患虚血性心疾患や脳卒中などによる死亡と障害調整生存年数（DALY）が減少することが示された。成果は学術誌の掲載審査中である。

[研究1-6]では、一般均衡モデルベースの経済影響分析ならびに統計的生命価値ベースの超過死亡経

済影響分析に基づく軽量気候影響予測手法（影響エミュレータ）の開発と検証を実施した。成果はGeoscientific Model Development誌で公表した。また、開発した影響エミュレータは、研究データレポジトリZENODOを用いて無償公開することで、より幅広に国内外の気候影響統合評価、ならびにネットゼロ排出に向けた気候政策の波及影響の分析での利用が見込まれる。

［研究1-7］では、前項で開発した影響エミュレータと気候予測不確実性低減手法Emergent Constraint（EC）とを連結して気候影響経済評価の不確実性低減に取り組んだ。EC手法を用いて気候モデルによる気温上昇と降水量増加の将来予測の信頼性に関する情報を加味すると、気候変動経済影響の予測の不確実性幅（5-95%幅）を低減することができ、特に上限（95%値）を顕著に引き下げることができた。成果はEnvironmental Research Letters誌で公表した。報道発表を実施した。

［研究1-8］では、土地関連のGHG排出削減策が食料安全保障（SDG2）に及ぼす影響の要因分析を実施した。モデル内で陸地に固定される炭素の価格として表現される植林、続いて、モデル内で排出税として表現される非CO2のGHG削減が、食料・飢餓影響への寄与が大きいことが分かり、気候政策と農業市場の管理政策の連携の必要性を示唆した。成果はNature Food誌で公表した。報道発表を実施した。

［研究1-9］では、野外火災が大気汚染物質放出を通じて人間健康（SDG3）に及ぼす影響の検討を実施した。現状（2006～2015年）では、野外火災が全球陸域の総PM2.5濃度の10%に寄与し、野外火災PM2.5による全世界の死亡者数は約9万人と推計された。一方、将来期間（2015～2100年）について、21世紀半ばの野外火災死亡率は大多数のシナリオと地域で減少が予測された。21世紀後半には、高緯度地域での野外火災死亡率の増加が予測された。成果は学術誌の掲載審査中である。

［研究1-10］では、AIMモデル枠組で複数のモデル・ツールを連結し、気候変動の緩和やその他の社会・環境変化がSDGs達成に及ぼす影響を評価した。評価にあたっては、CO2削減1%に波及して生ずる各SDG指標の変化を限界SDG指標変化と定義・推計した。その結果、大気質、再生可能エネルギーシェア、エネルギー強度、失業率、森林面積について副次的便益がみられる一方で、飢餓、農業価格、GDP、および生物多様性のリスクについては副次的損益となることを定量的に示すことができた。成果はEnvironmental Research Letters誌で公表した。

［研究2-1］では、気候変動緩和下における持続可能な農業・土地利用戦略の提示に向けて、CO2除去技術に依存しない排出シナリオについてモデル比較分析を実施した。その結果、早期の排出削減を行い、負の排出をしないシナリオでは、今世紀後半のCO2除去を回避し、温室効果ガス排出削減によって引き起こされる劇的な土地利用変化を回避できることが示された。さらに、それにより今世紀末頃には食料価格の低下、飢餓のリスクの低減、灌漑用水の需要の低下などの便益が示された。しかし同時に、今世紀半ばには大幅な排出削減が必要になり、エネルギー作物に必要な土地面積が増加し、食料安全保障のさらなるリスクをもたらす副次的な影響の可能性も明らかになった。成果はNature Sustainability誌で公表した。報道発表を実施した。

［研究2-2］では、気候緩和策の戦略による生態系への影響の違いを明らかにすべくBECCSと植林による生物多様性への影響評価を実施した。BECCSや植林の導入に伴う土地利用改変の影響を考慮しても、土地利用ベースの緩和策による気候変動の緩和は、生物多様性の損失を抑える可能性があることを示した。一方で緩和策の影響は地域により異なる可能性も示された。土地利用改変や炭素隔離によって緩和に貢献した地域ほど生物多様性の損失が大きくなる傾向があった。成果は学術誌の掲載審査中である。

［研究2-3］では、将来の社会経済状況の変化が生態系に及ぼす影響を明らかにすべく社会変革による生物多様性への影響の分析を実施した。世界全体での社会変革を想定した国際共同研究では、将来シミュレーションの結果、これまでの社会システムの延長線上の「成り行きシナリオ」では、生物多様性の損失は続き、2010-2050 年における損失は1970-2010 年における損失と同等かそれ以上になることが予測された。一方、自然保護・再生と食料システムの変革に向けた取り組みを最大限に実施する「社会変革実施シナリオ」では、生物多様性の損失が抑制され、2050 年以降に回復に向かう可能性があることが示された。成果はNature誌で国際共著論文として公表した。報道発表を実施した。

［研究2-4］では、極端気象の不確実性を考慮した食料安全保障に関する分析を実施した。2050年時点で100年に1度程度の頻度の稀ではあるが非常に強い不作が発生すると、飢餓リスク人口は温暖化対策な

しケースで6億人となること、さらにこの100年に1度の頻度で発生する不作によって発生する追加的な飢餓リスク人口の増加を回避するために追加的に必要な食料備蓄は、温暖化対策なしケースでは1億8000万トンの穀類、金額にすると330億米ドルに達し、これは現在の世界全体の穀類の備蓄の約1/4に相当することを示した。成果はNature Food誌で公表した。報道発表を実施した。

[研究2-5]では、ネットゼロ排出緩和シナリオ定量化のモデル入力値とすべく、土地利用モデルを用いたバイオエネルギーポテンシャルの推計を実施した。分析の結果、消費側の取り組み(食肉制限)により、多くのバイオマスエネルギーポテンシャル量が得られることが示された。特に中東/アフリカ地域で最も高いポテンシャル量の増加が見込まれた。また、2℃目標達成に必要なバイオマスエネルギー量(150～250EJに相当)は全世界食肉制限シナリオ(261EJ/年)、先進国食肉制限シナリオ(173EJ/年)、先進国以外食肉制限シナリオ(234EJ/年)において供給可能であることが示された。成果は土木学会論文集で公表した。

[研究2-6]では、緩和策と貧困の関係をモデル化し、炭素税の貧困撲滅への貢献の可能性について検討した。2030年における2℃目標相当のシナリオでの炭素税収入を絶対的貧困ギャップの世界総和と比較したところ、前者は後者の約15倍と推計された。炭素税収入と絶対的貧困ギャップの差を国別に見た場合、炭素税収入の不足がナイジェリアや中央アフリカ共和国などの一部のアフリカ諸国で生じることが示された。炭素税収入を国間で移転・再配分する想定の実現可能性に注意が必要だが、世界的な社会目標達成へのヒントを与えるものである。成果はEnvironmental Research Letters誌で公表した。

５－２．環境政策等への貢献

＜行政等が既に活用した成果＞

国連持続可能な開発に関するハイレベル政策フォーラム（2022年7月/ニューヨーク国連本部）に研究分担者の長谷川知子准教授が参加の要請を受け、現地会合において本研究プロジェクトによる研究成果をまじえ、飢餓問題関連の研究知見を報告した。

＜行政等が活用することが見込まれる成果＞

IPCC（気候変動に関する政府間パネル）は近年、気候問題と持続可能性の関係の評価を重視する傾向にある。本研究課題では、気候問題と持続可能性の関わりを扱う多数の研究論文を、投稿期限・掲載受理期限に間に合う形で影響力の大きな学術誌において公表でき、結果的にIPCC第6次評価報告書（特に第3作業部会報告書）での成果引用につながった。IPCC評価報告書は、国連気候変動枠組条約パリ協定の下で2023年に行われる第1回グローバルストックテイクにも当然参照されることから、国際環境行政への潜在的貢献として強調したい。

５－３．研究目標の達成状況

全体目標	目標の達成状況
気候政策、気候影響、持続可能性の相互依存関係を考慮した地球規模の持続可能性シナリオの構築を通じて、「人間社会・生態系の持続可能性を損ねない形	目標を大きく上回る成果をあげた。 ネットゼロ排出の目標達成について、サブテーマ1は当該目標に至る排出経路ならびに当該目標の達成の可否による気候影響の描出に焦点を当てて多面的な分析を実施した（[研究1-1]～[研究1-7]）。サブテーマ2は、ネットゼロ排出の鍵となる緩和策である植林とBECCSに注目し、その地球の持続可能性への含意も含め、政策分析を多面的に実施した（[研究2-1]～[研究2-6]）。さらに両サブテーマで連携し、気候政策、気候影響、持続可能性の相互依存関係を考慮した地球規模の持続可能性シナリオの構築について、[研究1-8]～[研究1-10]を実施した。加えて、これらの個別研究で得られた知見を活用して政策的含意を検討し、「人間社会・生態系の持続可能性を損ねない形でネットゼロ排出を達成するということは、どのような社会を作

でネットゼロ排出を達成するということは、どのような社会を作り、受け入れていくということなのか？」という問いへの答えを示すこと。	り、受け入れていくということなのか？」という問いへの答えを示すことにも取り組めた。以上の研究の実施により、全体目標を十分達成できたものと考えている。国民対話や政策貢献も積極的に実施できた。 なお、研究提案に際して、国際誌での積極的な論文公表、さらにIPCC第6次評価報告書への貢献を目標に掲げた。受理・掲載済の査読論文数は英文47編・和文15編であり、Nature及びその姉妹誌等の学界・社会への影響力の強い雑誌での掲載も多数含まれている。本課題のように国際政策検討への貢献を目指す研究では、国際誌で発表して認知されることがその貢献への必須要件であり、その点から論文公表成果の質と数を強調したうえで「目標を大きく上回る成果をあげた」と自己評価する。

サブテーマ１目標	目標の達成状況
第一に、最新の気候科学（例：炭素循環、気候感度等）ならびに対策研究（ガス別限界削減費用等）を反映した排出経路モデルの改良を行い、気候目標及び社会経済発展経路に対応した排出経路を分析し、後述の気候影響予測ならびにサブテーマ２が取り組む気候政策による持続可能性への波及影響の分析に提供する。 第二に、緩和政策が実施された場合の気候影響について、社会変化・気候変化の不確実性を定量的に考慮した統合影響評価を実施し、複数の評価指標（金銭、人命・健康、公平性等）を用いてその将来像を描出する。そのために、柔軟なシナリオ想定が可能な軽量気候影響予測手法（影響エミュレータ）を開発し、それを一般均衡モデル（CGE）ベースの経済分析枠組みやDALY等の人命・健康の統合分析枠組みに組み込み、気候影響統合評価モデルを構築する。さらに、排出経路モデルと連動して気候影響予測を行う。また、気候影響の経済分析の空間詳細化を通じて地域間公平性の定量分析を行う。なお、開発した評価手法は、社会的炭素費用の推計にも活用する。また、影響エミュレータについては、サブテーマ２のネットゼロ排出が食料安全保障や生物多様性等に及ぼす波及影響の分析にも活用される。	目標を上回る成果をあげた。 「４．研究開発内容」の冒頭で記したように、左記の当初目標に対応した研究成果をもれなく上げることができた。さらに研究成果の多くについて、学界・社会への影響力の強い学術誌での公表が出来ている。また、学術誌での適時の成果公表が功を奏し、IPCC第6次評価報告書への引用の目標も達成された。論文公表に際しての報道発表も複数実施できた。 加えて、[研究1-6]で開発した影響エミュレータについては、本研究課題内での利用に閉じず、研究データレポジトリを用いて無償公開することで、幅広に国内外の気候影響統合評価、ならびにネットゼロ排出に向けた気候政策の波及影響の分析での利用が見込まれる。例えば、エミュレータ提供により国際モデル比較評価に貢献し、Nature Climate Change誌（Drouet et al.(2021)）での共著論文を研究実施期間内に追加成果として公表できた。 サブテーマ間連携での成果も創出できており（[研究1-8]～[研究1-10]）、複数研究機関での共同研究プロジェクト実施のメリットを多いに活用できたことも強調したい。

サブテーマ２目標	目標の達成状況
持続可能性統合評価モデルの開発・利用により、CO2ネットゼロ排出において重要な役割を担う植林とBECCSに関する諸問題へ答えを出す。植林に関しては、これま	目標を大きく上回る成果をあげた。 人口増加、経済成長といった社会経済と気候変動影響、気候変動緩和という多くの要素が複合的に絡み合う土地利用という接合点を中心にした統合評価モデリングの深化が当課題では行われ、

での陸域生態系モデルが土地利用管理を明示的に扱ってこなかったことから、土地利用管理を明示的に考慮した森林吸収量の推計に注力する。BECCSに関しては、生物多様性保護、農業技術開発、水資源利用可能性などの観点から持続可能性を考慮しつつバイオエネルギー作物の大規模展開の可能性について論じ、前述の森林吸収量推計もふまえながら、食料・水安全保障や生物多様性を脅かさない範囲でネットゼロ排出を実現するために必要な政策・施策を同定する。例えば、従来考えられてきた単純な炭素税等の経済メカニズムのみを用いた気候緩和政策に加えて、食肉嗜好の変化、食料廃棄物対策、途上国への経済支援、土地利用規制の強化など、社会システム全体を変革していくような施策を検討する。また、ネットゼロ排出に向けた緩和政策の分析手法・結果について、研究期間後期にサブテーマ１の排出経路モデルにも反映し、課題全体の整合性の確保に努める。	「CO2ネットゼロ排出において重要な役割を担う植林とBECCSに関する諸問題へ答えを出す」という当初目標はサブテーマ1とサブテーマ2の研究成果を組み合わせることで明確に達成された。その根拠は、以下に要約される。 第一に、植林やBECCS等の土地利用ベースの負の排出を実現する対策はネットゼロ排出において極めて重要な役割を果たし、世界全体のネットゼロ達成のためにはほぼ必須と考えられる。これは当該研究グループが開発してきたAIMモデルだけでなく、国際的なモデル比較研究でも明らかとなった。第二に、上記の植林とBECCSには様々な副作用の懸念があることも明らかとなった。バイオマスの食料安全保障への懸念は既往研究で指摘されてきたが、従来研究で指摘のなかった植林についてもその懸念があることが明らかとなった。第三に生態系から見た場合、植林の面積当たりの炭素吸収量がバイオマスと比べて高くないため、場合によっては植林のほうがBECCS以上に悪影響の懸念があるということもわかった。こういった懸念に対して気候緩和策側の施策をよりきめ細やかに検討することの重要性が明らかとなった。また、社会システム全体をより抜本的に変えていく食料嗜好の変化や食料廃棄物削減等は生態系保全に明らかに効果があることも明らかにできた。 　また、数多くのNatureやNature姉妹紙での成果発表ができ、それらはIPCCの第6次評価報告書で引用されたこと、研究成果の発信にも努めプレスリリースも積極的に行ったことから、国内外の気候政策にも貢献できたと考える。 　以上のように、世界最先端となるモデル開発を通じて、当初の研究の問いに答え、さらに追加的に付随する関連研究も実施し、国内外で影響力のある成果を出したことから、当課題は当初計画以上の大きな成果が上がったと自己評価する。

６．研究成果の発表状況

６－１．査読付き論文

＜件数＞

62件

＜主な査読付き論文＞

1) Fujimori, S., Hasegawa, T., Takahashi, K., Dai, H., Liu, J.-Y., Ohashi, H., Xie, Y., Zhang, Y., 博士（農学）, T., Hijioka, Y.: Environmental Research Letters, 15, 085004 (2020) Measuring the sustainable development implications of climate change mitigation. (IF: 6.947) [研究1-10]
2) Fujimori, S., Wu, W., Doelman, J., Frank, S., Hristov, J., Kyle, p., Sands, R., van Zeist, W-J., Havlik, P., Domínguez, I ,P., Sahoo, A., Stehfest, E., Tabeau, A., Valin, H., van Meijl, H., Hasegawa, T., Takahashi, K.: Nature Food, 3, 101-121 (2022) Land-based climate change mitigation measures can affect agricultural markets and

food security. (IF: 20.961) [研究1-8]

3) Hasegawa, T., Sakurai, G., Fujimori, S., Takahashi, K., Hijioka, Y., Masui, T.: Nature Food, 2, 587-595 (2021) Extreme climate events increase risk of global food insecurity and adaptation needs. (IF:20.961) [研究2-4]

4) Hasegawa, T., Fujimori, S., Frank, S., Humpenöder, F., Bertram C., Després, J., Drouet, L., Emmerling, J., Gusti, M., Harmsen, M., Keramidas, K., Ochi, Y., Oshiro, K., Rochedo, P., van Ruijven, B., Cabardos, A., Deppermann, A., Fosse, F., Havlik, P., Krey, V., Popp, A., Schaeffer, R., van Vuuren, D., Riahi, K.: Nature Sustainability, 4, 1052-1059 (2021) Land-based implications of early climate actions without global net-negative emissions. (IF:27.157) [研究2-1]

5) Leclère, D., Obersteiner, M., Barrett, M., Butchart, S.H.M., Chaudhary, A., De Palma, A., DeClerck, F.A.J., Di Marco, M., Doelman, J.C., Dürauer, M., Freeman, R., Harfoot, M., Hasegawa, T., Hellweg, S., Hilbers, J.P., Hill, S.L.L., Humpenöder, F., Jennings, N., Krisztin, T., Mace, G.M., Ohashi, H., Popp, A., Purvis, A., Schipper, A.M., Tabeau, A., Valin, H., van Meijl, H., van Zeist, W.-J., Visconti, P., Alkemade, R., Almond, R., Bunting, G., Burgess, N.D., Cornell, S.E., Di Fulvio, F., Ferrier, S., Fritz, S., Fujimori, S., Grooten, M., Harwood, T., Havlík, P., Herrero, M., Hoskins, A.J., Jung, M., Kram, T., Lotze-Campen, H., Matsui, T., Meyer, C., Nel, D., Newbold, T., Schmidt-Traub, G., Stehfest, E., Strassburg, B.B.N., van Vuuren, D.P., Ware, C., Watson, J.E.M., Wu, W., Young, L.: Nature, 585(7826), 551-556 (2020) Bending the curve of terrestrial biodiversity needs an integrated strategy. (IF:69.504) [研究2-3]

6) Park, C., Takahashi, K., Takakura, J., Li, F., Fujimori, S., Hasegawa, T., Ito, A., Lee, D.K.: Earth's Future, 9, e2020EF001786 (2021) How will deforestation and vegetation degradation affect global fire activity? (IF:7.27) [研究1-4]

7) Park, C., Takahashi, K., Li F., Takakura, J., Fujimori, S., Hasegawa, T., Ito, A., Lee, D.K., Thiery, W.: Global Environmental Change, 80, 102667 (2023) Impact of climate and socioeconomic changes on fire carbon emissions in the future: Sustainable economic development might decrease future emissions. (IF:11.160) [研究1-4]

8) Shiogama, H., Takakura J., Takahashi K.: Environmental Research Letters, 17, 124028 (2022) Uncertainty constraints on economic impact assessments of climate change simulated by an impact emulator. (IF:6.947) [研究1-7]

9) Takakura, J., Fujimori, S., Takahashi, K., Hanasaki, N., Hasegawa, T., Hirabayashi, Y., Honda, Y., Iizumi, T., Park, C., Tamura, M., Hijioka, Y.: Geoscientific Model Development, 14, 3121-3140 (2021) Reproducing complex simulations of economic impacts of climate change with lower-cost emulators. (IF:6.892) [研究1-6]

10) Tanaka, K., Boucher, O., Ciais, P., Johansson, D.J.A., Morfeldt, J.: Science Advances, https://doi.org/10.1002/essoar.10505031.3 (2021) Cost-effective implementation of the Paris Agreement using flexible greenhouse gas metrics. (IF:14.980) [研究1-1]

６－２．知的財産権

特に記載すべき事項はない。

６－３．その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	0件
その他誌上発表（査読なし）	21件
口頭発表（学会等）	92件
「国民との科学・技術対話」の実施	6件
マスコミ等への公表・報道等	24件
本研究費の研究成果による受賞	3件
その他の成果発表	11件

７．国際共同研究等の状況

研究提案時点で、二件の海外研究機関との研究連携を計画・記載していた。そのうち一件目の仏政府による「Make our planet great again」研究プログラムのPRATOプロジェクト（代表者田中克政博士；パリ協定の温度目標のオーバーシュートに関する研究）とのゼロ・マイナス排出の評価に関わるモデル手法・データの相互提供に関しては、[研究1-1]（最適排出経路と排出指標について）の実施にあたり当該研究連携を活用し、共同研究成果の公表ができた（Tanaka et al., 2020）。二件目のEU-Horizon2020/ENGAGEプロジェクトを通じた、気候政策の地球の持続可能性への波及影響の分析に関する国際応用システム分析研究所（IIASA）との連携については、[研究2-1]（負の排出に依存しない早期排出削減による食料・土地利用システムへの影響評価）の実施にあたり当該研究連携を活用し、共同研究成果をNature Sustainability誌に主著公表できた(Hasegawa et al., 2021)。また、本課題で開発した影響エミュレータの提供を通じて当該国際プロジェクトに貢献し、共著での成果論文公表(Drouet et al., 2021)ができた。

加えて、課題推進の過程で追加的に取り組めた国際共同研究として、[研究1-6]（軽量気候影響予測手法の開発）については、フィンランド環境研究所が開発する簡易影響予測手法である影響応答曲面手法との連携により、確率的影響予測への簡易影響予測手法の応用に関する論文の公表ができた(Fronzek et al., 2022)。また、[研究1-8]（土地関連のGHG排出削減策が食料安全保障に及ぼす影響の要因分析）では国際農業モデル比較評価プロジェクトAGMIPに参加し、複数海外研究機関による共通想定条件でのモデル実験出力を取得し、本研究での分析対象として扱った。共同研究成果について、藤森とWuが共同筆頭著者の論文をNature Food誌で公表できた(Fujimori et al., 2022)。さらに[研究2-3]（土地利用変化に伴う生物多様性影響のモデル比較評価）については、IIASAが主導する国際共同研究Bending the Curveへの貢献により得られた共同研究成果であり、共著論文をNature誌で公表できた(Leclere et al., 2021)。

以上のように、国際モデル比較評価プロジェクトについては、参加モデルチームの一つとしてモデル出力提供するだけではなく、集積されたモデル出力の解析と論文化を主導したり、さらにモデル比較プロジェクトの構想時点から議論に参加したりすることで、共著論文だけでなく主著論文の多数公表につなげられた。これは本研究課題の支援の下で最先端のモデル開発に取り組めたことで、国際的なプレゼンスを獲得できたことに由来する。この場を借りて環境研究総合推進費制度に謝意を示したい。

８．研究者略歴

研究代表者

高橋　潔

京都大学工学部卒業、博士（工学）、国立環境研究所社会環境システム研究センター広域影響・対策モデル研究室室長等を経て、現在、国立環境研究所社会システム領域副領域長

研究分担者

1）藤森　真一郎

京都大学大学院工学研究科博士課程修了、博士（工学）、国立環境研究所社会環境システム研究センター主任研究員等を経て、現在、京都大学大学院工学研究科准教授

2）長谷川　知子

京都大学大学院工学研究科博士課程修了、博士（工学）、国立環境研究所社会環境システム研究センター研究員等を経て、現在、立命館大学理工学部准教授

3）松井　哲哉

オタゴ大学大学院生態学専攻修士課程修了、博士（農学）、森林研究・整備機構森林総合研究所国際連携・気候変動研究拠点気候変動研究室室長等を経て、現在、森林研究・整備機構森林総合研究所生物多様性・気候変動研究拠点拠点長

Ⅱ．成果の詳細

Ⅱ－１　気候緩和目標に対応する排出経路分析及び気候影響総合評価

国立研究開発法人国立環境研究所
　社会システム領域　　高橋　潔
　社会システム領域　　地球持続性統合評価研究室　　高倉　潤也
　社会システム領域　　脱炭素対策評価研究室　　スィルバエラン　ディエゴ
　地球システム領域　　地球システムリスク解析研究室　　塩竈　秀夫
東京大学未来ビジョン研究センター・国立環境研究所地球システム領域　江守　正多

＜研究協力者＞
国立研究開発法人国立環境研究所　社会システム領域　　SU Xuangming
国立研究開発法人国際農林水産業研究センター　社会科学領域　　WU Wenchao
国立研究開発法人産業技術総合研究所　環境動態評価研究グループ　　PARK Chaeyeon

［要旨］
「人間社会・生態系の持続可能性を損ねない形でネットゼロ排出を達成するということは、どのような社会を作り、受け入れていくということなのか？」という問いへの答えを、気候政策、気候影響、持続可能性の相互依存関係を考慮した地球規模の持続可能性シナリオの構築を通じて描くという本課題の全体目標に向けて、最新の気候科学ならびに対策研究を反映した排出経路モデルの改良を行い、気候目標及び社会経済発展経路に対応した排出経路を分析した。また、緩和政策が実施された場合の気候影響について、社会変化・気候変化の不確実性を定量的に考慮した統合影響評価を実施し、複数の評価指標（金銭、人命・健康、公平性等）を用いてその将来像を描出した。

１．研究開発目的

2015年、パリ協定において世界の国々は、長期気候目標としていわゆる2℃目標に合意した。その後、IPCC1.5℃特別報告書が1.5℃と2.0℃で生じる気候影響に有意な差があるとの結論を示したことを受け、全球平均気温上昇を工業化前比1.5℃以下に抑える目標を支持する声も強まりつつある。一方で、それらの長期気候目標の実現のために、21世紀後半には温室効果ガスのネットゼロ排出あるいは21世紀前半の排出量によっては大規模なバイオエネルギー作物や植林等を用いたマイナス排出（吸収・隔離）が必須であることも、専門家の間だけでなく政策決定者・市民の理解を得つつある。

しかし、そのネットゼロ・マイナス排出は具体的にいつ頃にどんな対策・政策を打つことで実現できるのか、それらの対策・政策に整合的な社会発展や変革の経路はいかなるものか、対策・政策の実施が気候影響以外の形で人間社会・生態系の持続可能性にもたらす深刻な波及影響はないのか、またそれらの波及影響への対処のために必要な追加的対策は何かといった問いに対して、科学的な見解を十分に示せていない。また、仮にネットゼロ排出に至る気候政策が実現できた場合にも、その後に生じる炭素循環・気候システムの変化の見通しには不確実性幅が大きく、各部門での気候影響についても、その地域差、時間経路、不確実性の描出と伝達は不足している。

以上の研究背景をふまえ、本研究では「人間社会・生態系の持続可能性を損ねない形でネットゼロ排出を達成するということは、どのような社会を作り、受け入れていくということなのか？」という問いへの答えを、気候政策、気候影響、持続可能性の相互依存関係を考慮した地球規模の持続可能性シナリオの構築を通じて描くことを全体目標として設定する。

そのためにサブテーマ1では二つの研究に取り組む。第一に、最新の気候科学（例：炭素循環、気候感度等）ならびに対策研究（ガス別限界削減費用等）を反映した排出経路モデルの改良を行い、気候目標及び社会経済発展経路に対応した排出経路を分析し、後述の気候影響予測ならびにサブテーマ2が取

り組む気候政策による持続可能性への波及影響の分析に提供する。

第二に、緩和政策が実施された場合の気候影響について、社会変化・気候変化の不確実性を定量的に考慮した統合影響評価を実施し、複数の評価指標（金銭、人命・健康、公平性等）を用いてその将来像を描出する。そのために、柔軟なシナリオ想定が可能な軽量気候影響予測手法（影響エミュレータ）を開発し、それを一般均衡モデルベースの経済分析枠組みや障害調整生命年Disability-Adjusted Life Year（DALY）等の人命・健康の統合分析枠組みに組み込み、気候影響統合分析モデルを構築する。さらに、排出経路モデルと連動して気候影響予測を行う。また、気候影響の経済分析の空間詳細化を通じて地域間公平性の定量分析を行う。なお、開発した評価手法は、社会的炭素費用の推計にも活用する。

２．研究目標

第一に、最新の気候科学（例：炭素循環、気候感度等）ならびに対策研究（ガス別限界削減費用等）を反映した排出経路モデルの改良を行い、気候目標及び社会経済発展経路に対応した排出経路を分析し、後述の気候影響予測ならびにサブテーマ2が取り組む気候政策による持続可能性への波及影響の分析に提供する。

第二に、緩和政策が実施された場合の気候影響について、社会変化・気候変化の不確実性を定量的に考慮した統合影響評価を実施し、複数の評価指標（金銭、人命・健康、公平性等）を用いてその将来像を描出する。そのために、柔軟なシナリオ想定が可能な軽量気候影響予測手法（影響エミュレータ）を開発し、それを一般均衡モデルComputable General Equilibrium model（CGE）ベースの経済分析枠組みやDALY等の人命・健康の統合分析枠組みに組み込み、気候影響統合評価モデルを構築する。さらに、排出経路モデルと連動して気候影響予測を行う。また、気候影響の経済分析の空間詳細化を通じて地域間公平性の定量分析を行う。なお、開発した評価手法は、社会的炭素費用の推計にも活用する。また、影響エミュレータについては、サブテーマ2のネットゼロ排出が食料安全保障や生物多様性等に及ぼす波及影響の分析にも活用される。

３．研究開発内容

最新の気候科学と対策研究を反映した排出経路モデルの改良、ならびに気候目標と社会経済発展経路に対応した排出経路の分析に関して、[研究1-1]では非CO2温室効果ガスや短寿命気候汚染物質の排出量のCO2排出量への換算係数（排出指標）に注目し、パリ協定達成に向けた削減努力及び排出経路への含意について検討した。さらに[研究1-2]では排出シナリオ推計に用いられるAIM/Hubモデルを用いた感度分析出力を利用して共通社会経済経路Shared Socio-economic Pathways（SSP）別・ガス種別の限界削減費用Marginal Abatement Cost（MAC）曲線を作成し、簡易気候モデルを実装した最適化型統合評価モデルSCM4OPTに実装し、社会的炭素費用の試算を実施した。

緩和政策が実施された場合の、社会変化・気候変化の不確実性を定量的に考慮した統合影響評価に関しては、[研究1-3]で極端な気象現象の変化に関する世代間・地域間不公平性の検討を、[研究1-4]で気候変化及び人間活動が野外火災に及ぼす影響の評価を、さらに[研究1-5]では食事構成において赤身肉を小型浮魚類に置き換えた場合の環境・健康影響評価を行い、緩和政策ならびに気候変化の影響の評価の包括性を高め、複数の評価指標での将来像の描出に取り組んだ。また、柔軟なシナリオ想定が可能な軽量気候影響予測手法（影響エミュレータ）の開発については、[研究1-6]としてCGEベースの経済影響分析ならびに統計的生命価値ベースの超過死亡経済影響分析に基づくエミュレータの開発と検証を論文化したうえで、[研究1-7]ではさらに影響エミュレータと気候予測不確実性低減手法Emergent Constraints（EC手法）を連結して気候影響経済評価の不確実性低減に取り組んだ。また、［研究1-2］における社会的炭素費用の推計にもこの影響エミュレータを活用した。なお、開発した影響エミュレータは、研究データレポジトリZENODOを用いて無償公開することで、より幅広に国内外の気候影響統合評価、ならびにネットゼロ排出に向けた気候政策の波及影響の分析での利用が見込まれる。

さらに、サブテーマ1とサブテーマ2が連携して取り組む課題全体の目標として設定した、気候政策、気候影響、持続可能性の相互依存関係を考慮した地球規模の持続可能性シナリオの構築、に関し

て、[研究1-8]では土地関連のGHG排出削減策が食料安全保障（SDG2）に及ぼす影響の要因分析を、[研究1-9]では[研究1-4]において予測した野外火災が大気汚染物質放出を通じて人間健康（SDG3）に及ぼす影響の検討を、さらに[研究1-10]では緩和政策下での複数SDG指標の定量化を、それぞれ実施した。いずれもサブテーマ1とサブテーマ2で連携して実施した研究になるが、重複を避けるためにここで報告する。

[研究1-1: 最適排出経路と排出指標について]

気候目標及び社会経済発展経路に対応した排出経路の分析に関して、非CO2温室効果ガスや短寿命気候汚染物質の排出量のCO2排出量への換算係数（排出指標）の選択の、パリ協定達成に向けた削減努力及び排出経路への含意について検討した。京都議定書ならびにパリ協定を含む政策検討・交渉の場では長年ほぼ一貫して100-year Global Warming Potential（GWP100; 排出後100年間の放射強制力の積算を基準にCO2排出量に換算する）が排出指標として用いられてきた。一方で、GWP100と政策目標との整合性については、物理的・経済的観点から問題点も指摘され、時間範囲を100年より短く設定し短寿命気候汚染物質の寄与をより重視するGWP50・GWP20などの排出指標も検討されてきた。物理気候、炭素循環、大気化学、社会経済システムを簡略化して統合的に表現する簡易統合評価モデルACC2を用いて、温度目標を一時超過（オーバーシュート）する場合を含む幅広い排出経路を導出し、どのような排出指標が経済効率性の観点から整合するかを検討した。

[研究1-2: CO2と非CO2排出の限界削減費用曲線の推計]

温室効果ガスを追加的に1単位量削減するために必要な費用は限界削減費用Marginal Abatement Cost（MAC）と呼ばれ、この削減と費用の関係を連続的に表現したものは限界削減費用曲線（MAC曲線）と呼ばれる。一般的にMAC曲線は各種の削減技術や政策の実施に要する費用とそれによる温室効果ガス削減量を積み上げて作成されるが、詳細分析型統合評価モデルの出力情報から炭素価格と排出量の関係を抽出して推計される場合もある。MAC曲線はCO2ならびにメタンや亜酸化窒素などの温室効果ガスについて開発・利用される。一方で、一酸化炭素（CO）、窒素酸化物（NOx）、揮発性有機化合物（VOC）、硫酸塩（SOx）、ブラックカーボン（BC）、有機炭素（OC）、アンモニア（NH3）のようなエアロゾルと汚染物質の排出についても、もし統合評価モデルのシミュレーション出力に関して炭素価格との間に一定の相関を見出すことができれば、簡易気候モデルを連結した最適化型統合評価モデルを用いた1.5℃/2℃の気候目標に整合的な気候政策と排出経路の分析への応用が期待できる。本研究では、詳細分析型統合評価モデルAIM/Hubモデルを用いて、温室効果ガスだけでなく、エアロゾルや汚染物質の排出についてもMAC曲線を推定するための感度解析データセットを作成した。また、推定したMAC曲線を最適化型統合評価モデルSCM4OPTに実装し、最適排出経路ならびに炭素排出の社会的費用の試算を実施した。

[研究1-3: 極端な気象現象の変化に関する世代間不公平性とその地域間不公平性の検討]

緩和政策が実施された場合の気候影響の評価に関連し、特に世代間公平性ならびに地域間公平性の観点からの新たな評価の視座ならびに気候リスクのコミュニケーション方法を提案するために、IPCC第6次評価報告書に向けて実施された気候予測情報群（CMIP6データ）を取得・解析し、祖父母世代が経験しない暑い日および強い雨（1960～2040年で最大の日最高気温および日降水量を超えるもの）をその孫世代が生涯（2020～2100年）で経験する回数について推計し、排出シナリオ別・地域別にその比較を行うとともに、さらに、現状の一人当たりGDPや一人当たりCO2排出量と異常気象経験回数の対比を行った。

[研究1-4: 気候変化及び人間活動が野外火災ならびに関連の炭素排出に及ぼす影響の評価]

野外火災とそれに関連する炭素および大気汚染物質の排出は、人間の健康への悪影響、陸上生態系への損害、気候変動を促進する間接的な影響など、幅広い環境および社会的影響をもたらすことから、野外火災の生起や規模に影響する5つの因子（気象、バイオマス量、土地利用、人口密度、1 人あたり

GDP)の将来変化を考慮し、21 世紀を通じての野外火災による炭素排出量を将来予測した。野外火災の予測には、既存の陸面モデルCommunity Land Model (CLM)の火災モデルを、気候関連要素に加えて人間活動関連要素も考慮できるように拡張したうえでそれを用いた。将来予測にあたっては、3つの社会経済シナリオ（SSP1・SSP2・SSP3）と3つの温室効果ガス排出想定（RCP2.6・RCP6.0・RCP8.5）での気候シナリオを前提条件として用いた。

[研究1-5：赤身肉を小型浮魚類に置き換えた場合の環境・健康影響評価]

持続可能で健康的な食事の実現に対する世界的な関心が高まる中、代替タンパク質が注目されている。シーフード、特に小型浮魚類（イワシ類、サバ類等）は赤身肉に比べて環境負荷がかなり低く、栄養価も高いことが指摘されてきた。そこで、小型浮魚類は代替タンパク質の一つとなる可能性を秘めている。しかし、赤身肉の代替タンパク質として、その環境及び健康への影響は不明である。本研究では、まず水産資源の最大持続生産量の推定モデル（Catch-MSY）と一般均衡型経済モデル（AIM/Hub）を用いて、2050年における小型浮魚類の潜在的供給量及び世界の地域別の赤身肉の摂取量をそれぞれ予測した。次に、2050年に向けた三つの肉代替シナリオを作成し、小型浮魚類の生態学的供給限界を超えることなく、赤身肉を代替した場合に、世界の温室効果ガス（GHG）排出量、栄養摂取と疾病予防への影響を定量的に評価した。

[研究1-6: 軽量気候影響予測手法（影響エミュレータ）の開発]

社会変化・気候変化の不確実性を定量的に考慮した統合影響評価を実施しその将来像を描出するために、柔軟なシナリオ想定が可能な軽量気候影響予測手法（影響エミュレータ）の開発に取り組んだ。具体的には、先行研究（環境研究総合推進費S-14（2015～2019年度））で創出された、新シナリオ（SSP×RCP×CMIP5）枠組でのプロセスベースモデルを用いた分野別経済影響評価の出力データベースを活用し、プロセスベースモデルでの経済影響のシミュレーション結果を、少ない計算負荷で統計的に再現（エミュレーション）する手法の開発に取り組んだ。プロセスベースの生物・物理的影響モデルや社会経済モデルは、精緻な計算が可能である一方、計算負荷が大きく、限られた数の将来シナリオの下でしかシミュレーションを実施することができないことが応用上の制約となりうる。本研究では、開発した影響エミュレータについて、分野別・地域別に、プロセスペースモデルでの影響予測結果の再現性について評価を実施した。

[研究1-7 気候変動による経済影響評価の不確実性の低減]

気候変動予測の分野では、過去の観測データと気候モデルシミュレーションの比較に基づいて将来予測の不確実性を低減するEmergent Constraint（EC）と呼ばれる研究が、この10年ほど活発に行われてきた。気候変動の影響評価モデルにおいて入力データとして用いられる気候モデルの不確実性を減少させることができれば、影響評価の不確実性も低減できると期待される。しかし、気候予測の不確実性低減に関する情報を影響評価に活用する手順はこれまで確立されておらず、気温や降水量の将来変化予測の信頼性が低いと考えられる気候モデルも含んだ影響評価の幅をそのまま示す研究が多いため、活用手順の改善が求められている。本研究では、気候変動予測の分野で開発された最新のEC手法を応用することで、気候変動の経済影響評価（被害額の評価）の不確実性を低減することを目的とした。EC研究では、多くの気候モデルを統計的に分析することで不確実性を低減するが、5つ程度のデータ数では統計的な関係を議論することができない。本研究では影響エミュレータ（[研究1-6]）を用いることでこの制約を克服した。本研究では、農業生産性・飢餓・暑さによる死亡・冷暖房需要・労働生産性・水力発電・火力発電・河川洪水・海面上昇の9分野の影響を被害額へ換算したものを扱った。この影響エミュレータに、IPCC第5次報告書に貢献した気候モデル群(CMIP5)と第6次報告書に貢献した気候モデル群（CMIP6）の中から67の気候モデルの気温変化、降水量変化予測データを与えることで、67の気候モデルに対する9分野の経済影響を計算した。このように計算コストの低い影響エミュレータを用いることで得られた多数の経済影響評価のデータに、これまで開発されてきたEC手法を適用することで不確実性

を低減できるかを調べた。

[研究1-8 土地関連のGHG排出削減策が食料安全保障に及ぼす影響の要因分析]

農業・林業・その他土地利用Agriculture, Forestry and Other Land Use（AFOLU）は、長期のGHG排出削減の取組において重要な役割を持つと想定されており、特に非CO2のGHG排出、バイオエネルギー供給、植林による炭素貯留に関して重要性が大きい。一方で、これらの土地関連の排出削減策は食料安全保障に悪影響を及ぼす可能性も指摘されてきた。しかし、この悪影響の対策別の内訳については検討が不足している。本研究では、2℃目標に整合的な排出シナリオ下において、非CO2のGHG排出への課税、バイオエネルギー生産、植林の3種の土地関連の排出削減策が一人当たりカロリー摂取量、飢餓リスク人口、農作物価格に及ぼす影響の大きさを、国際モデル比較評価AGMIPに参加する6つの農業経済モデルを用いて定量評価した。なお、本研究はサブ2が開発・改良する土地関連気候対策の食料安全保障への波及影響の評価手法を活用し、サブ1・サブ2の連携研究として実施した。

[研究1-9 気候変化及び人間活動が野外火災PM2.5濃度変化を通じて引き起こす健康影響の評価]

山火事等の野外火災によってバイオマス燃焼が生じると、人間健康へ悪影響を及ぼす微小粒子状物質（PM2.5）を含む大気汚染物質が放出される。本研究では、野外火災起源PM2.5 に起因する死亡率（総人口あたり死亡数）を、野外火災PM2.5濃度、ハザード比、ベースライン死亡率、年齢および疾患別人口の組み合わせで推計した。ハザード比については、2019年のGBD（世界疾病負荷）研究による5つの疾患（慢性閉塞性肺疾患、肺がん、虚血性心疾患、脳卒中、下気道感染症）の調査結果を用いた。野外火災 PM2.5 濃度の予測には、CLMに実装された野外火災モジュールによるPM2.5排出予測と大気化学輸送モデルGEOS-CHEMによる移流拡散予測を組み合わせて用いた。

[研究 1-10 緩和政策下での SDG 指標の定量化]

AIM モデル枠組で複数のモデル・ツールを連結し、気候変動の緩和やその他の社会・環境変化が SDGs 達成に及ぼす影響を評価した。 指標定量化のために、一般均衡型経済モデル（AIM/Hub）に、グリッド化土地利用配分モデル（AIM/PLUM）、生物多様性モデル（AIM/BIO）、水不足評価ツール、排出量ダウンスケーリングツール、飢餓推定ツール、簡易気候モデル、大気化学輸送モデル（GEOS-Chem）および健康評価ツールを連結した。各モデル・ツールの特徴を表-1.1 に記す。また本研究では CO2 削減 1%に波及して生ずる各 SDG 指標の変化を限界 SDG 指標変化 Marginal SDGs indicators Variation（MSV）と定義・推計した。

表-1.1　SDGs 指標評価のために連結した各モデル・ツールの特徴

Model 名	モデルタイプ	解像度	主要出力	主要入力
AIM/BIO	統計モデル	世界 0.5° グリッド	種別潜在的生息域	土地利用・気候
AIM/Hub	経済モデル	世界 17 地域	経済、エネルギー、土地利用、水、農業等	GDP、人口、技術や選好等の社会経済見通し
AIM/PLUM	土地利用分配モデル	世界 0.5° グリッド	土地利用	集約的な土地利用と価格
GEOS-Chem	大気化学輸送モデル	世界 2*2.5° グリッド	大気汚染物質濃度	気象、大気汚染物質排出
Health tool	簡易計算モデル	世界 0.5° グリッド	大気汚染由来健康影響	大気汚染物質濃度
Hunger tool	簡易計算モデル	世界 106 地域	食料分配・飢餓リスク人口	平均食料消費量、GDP/cap
Water tool	簡易計算モデル	世界 0.5° グリッド	水ストレス人口	水需要・気候

４．結果及び考察

[研究1-1: 最適排出経路と排出指標について]

分析の結果、いずれの排出経路でも、今後数十年に関しては、パリ協定で事実上合意されたGWP100が経済最適な排出指標に最も近いことが明らかになった。一方で、より長期、例えば今世紀後半まで見通した場合、GWP100以外の排出指標（特にGWP50・GWP20）を将来各国で選択することが経済最適となりうることがいずれの排出経路でも見いだされた（図-1.1(b)）。全世界の費用効率性を重視するならば、GWP100にのみ固執せず、例えば5年毎のグローバルストックテイクの機会を活用し、各国の削減目標の見直しと併せて、より柔軟に排出指標の選択の確認・見直しを行う必要がある。

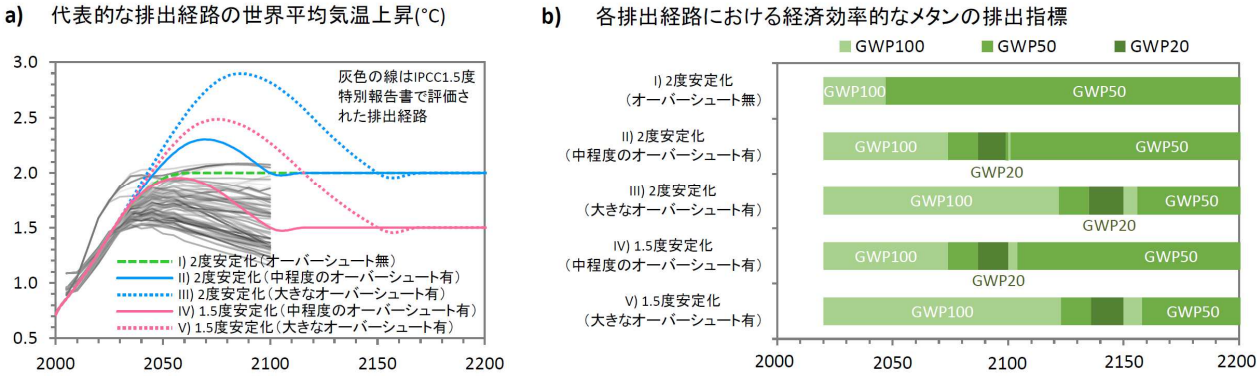

図-1.1　(a)代表的な排出経路の世界平均気温上昇（産業革命前比）と（b)各排出経路における経済効率的なメタンの排出指標（GWP100・GWP50・GWP20）の時間的推移

[研究1-2: CO2と非CO2排出の限界削減費用(MAC)曲線の推計]

図-1.2に示すように、本研究ではSSP1～SSP5の5つの社会経済シナリオについて、それぞれ感度解析データセットを作成したうえで、MAC曲線を推定した。温室効果ガス排出量については、土地利用排出量は炭素価格に直接関係しないため、限界削減費用曲線を推計する際に総排出量から除外している。エアロゾル排出量のうち、炭素価格の影響を受けにくいセクター（土地利用、商業、住宅、産業プロセス、廃棄物など）を除外して限界削減費用曲線を作成することになった。図-1.2については排出抑制率と炭素価格の関係を適切に表現していることが示された。CO2排出量については、大きな削減費用の下では削減率が1よりも大きくなり、CO2排出についてネガティブエミッション（負の排出）になる挙動をAIM/Hubが示していることが分かる。一方、メタンや亜酸化窒素の排出量については、同じ削減費用での抑制率がCO2に比べて小さく、農業、航空などのメタンや亜酸化窒素の主排出源となる部門での削減の困難性に由来した挙動であると推察できる。

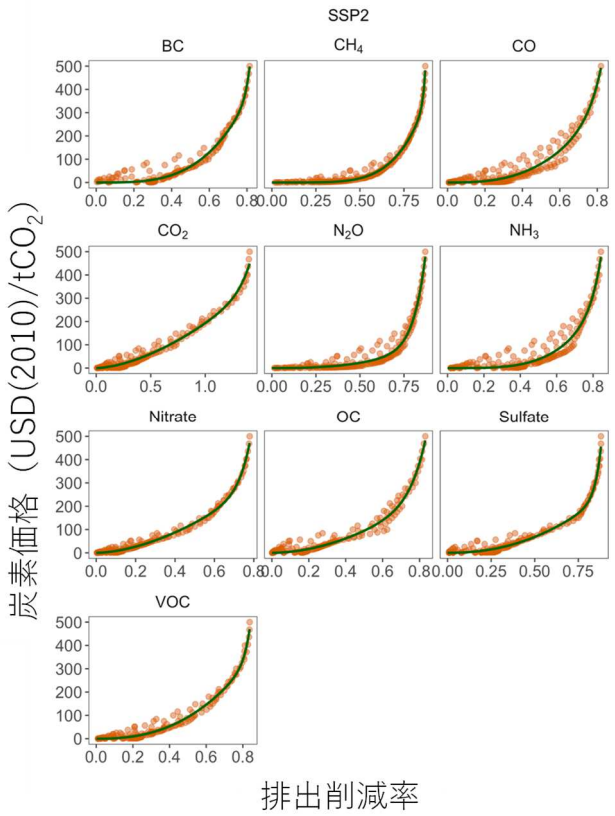

図-1.2　SSP2シナリオのMAC曲線。橙色の点は土地利用関連排出を除いた排出の抑制率と炭素価格との関係を示す感度解析データ。緑線は本研究で作成したMAC曲線。

[研究1-3: 極端な気象現象の変化に関する世代間不公平性とその地域間不公平性の検討]

解析の結果、緩和がうまく進まないRCP8.5の排出経路下で予測される気候変化条件下において、熱帯の一部地域では、祖父母世代が生涯に経験しないような暑い日を1000回以上、強い雨の日を5回以上、それぞれ経験しうることが示された。また、RCP8.5下で高温・大雨をより多く経験する傾向は、特に現状の一人当たり収入や一人当たりCO2排出が小さな国々で良く見られ、気候影響への適応力の欠如の点からも、あるいはこれまでの気候変化への寄与・責任の小ささの点からも、高温・大雨に曝される気候影響が不公平性をより強化するものであることが示された。一方で、仮にパリ協定の2℃目標に整合的なRCP2.6の排出経路を実現できた場合、この地域間不公平性の強化についても軽減可能であることが示された。すなわち、パリ協定の長期目標達成に向けた気候緩和努力を通じて、孫世代が面する異常気象影響の軽減（世代間公平性の改善）だけでなく、国間の不公平性の強化の軽減（地域間公平性の改善）も併せて期待できることが示された（図-1.3）。

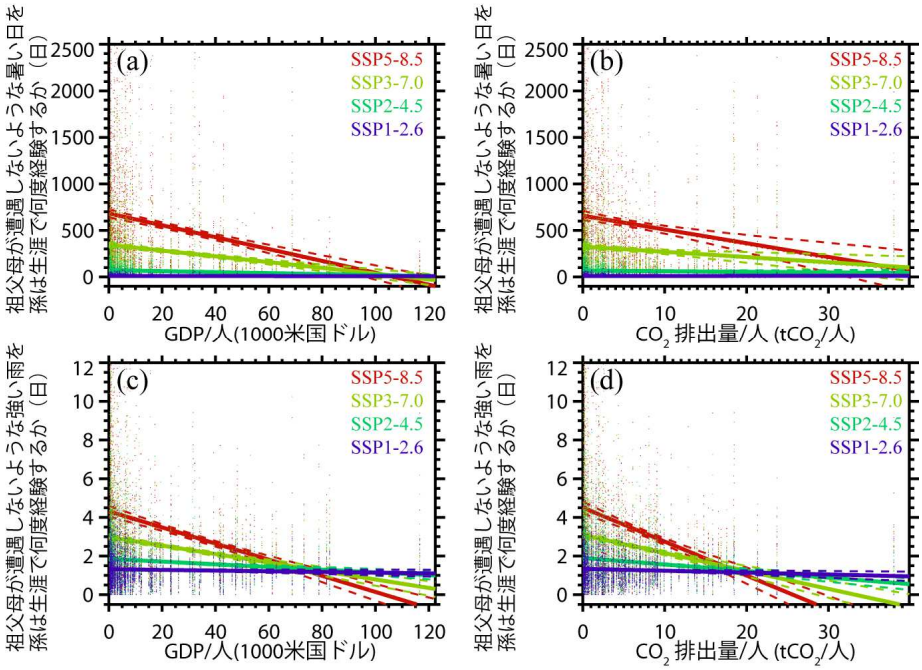

図-1.3　縦軸は祖父母が経験しない暑い日（上図）と大雨（下図）を孫が生涯で経験する日数を各国で平均したもの。左図横軸は一人当たりGDP（2010-2018；世銀推計）、右図横軸は一人当たりCO2排出（2018年；GCP）。点は各国の平均値で、実線は回帰直線、破線は回帰直線の95%信頼区間。

[研究1-4: 気候変化及び人間活動が野外火災ならびに関連の炭素排出に及ぼす影響の評価]

過去期間（2006 ～ 2015 年）と比較すると、主として、火災管理の改善をもたらす1人あたりGDP増加の影響を受けて、世界の野外火災による炭素排出量は減少すると予測された。気象因子は、より大きく温暖化が進むケースにおいて、大きな寄与を持つことがわかった。

また、燃料となるバイオマスの乾燥度が増すことを受けて、北方林での火災が特に大きく増加すると予測された。本研究で得られた知見は、多様なシナリオ下での気候と社会経済の将来変化を空間的に考慮したうえでの野外火災とその炭素循環への影響の分析であり、各国の緩和および適応計画の策定にも寄与することが期待される。

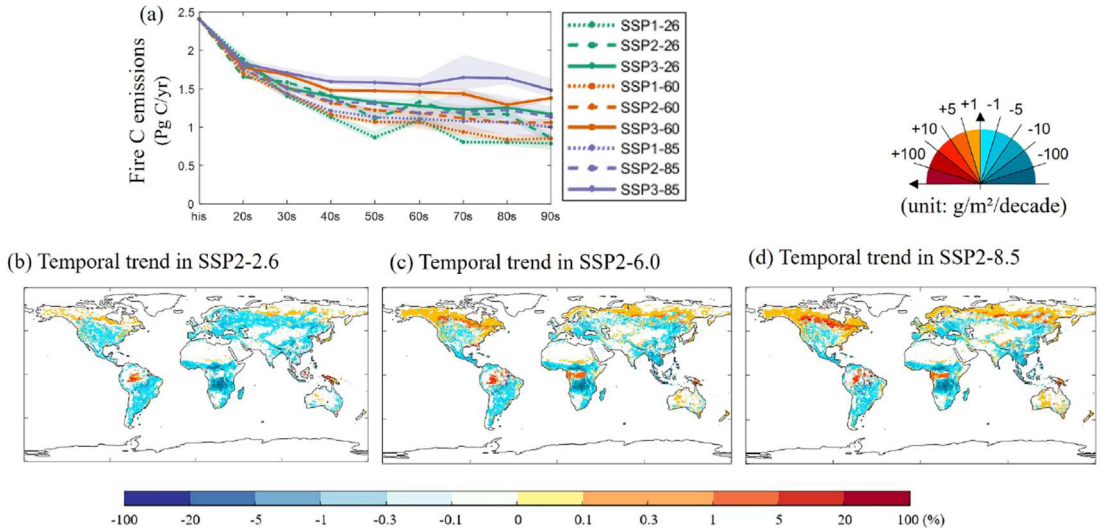

図-1.4　(a)3つの社会経済シナリオ（SSP1・SSP2・SSP3）と3つの温室効果ガス排出想定（RCP2.6・RCP6.0・RCP8.5）での気候シナリオを前提として予測された野外火災による炭素排出量の時間変化。(b)～(d)はそれぞれ社会経済シナリオSSP2と温室効果ガス排出想定RCP2.6・RCP6.0・RCP8.5での気候シナリオを前提として予測された野外火災排出の過去期間（2006～2015年）からの変化量の空間分布（赤が排出増・青が排出減）。

[研究1-5：赤身肉を小型浮魚類に置き換えた場合の環境・健康影響評価]

解析の結果、2050年には、基準シナリオBusiness As Usual（BAU）と比較して、いずれの肉代替シナリオ（Min.GHG：GHGの排出量を最小化するシナリオ；Adeq.Fish：一人当たりの魚消費量が低い国で魚消費を増やすシナリオ；Min.Meat：一人当たりの赤身肉消費量が高い国で赤身肉消費を減らすシナリオ）でも、赤身肉生産によるGHG排出量が8%以上削減でき、オメガ3（DHA+EPA）、ビタミンB12、カルシウム等の必須栄養素の摂取量が大幅に増加し、非感染疾患虚血性心疾患や脳卒中などによる死亡とDALYが減少することが示された（図-1.5）。これらの結果は、小型浮魚類が持続的に、かつ適切に利用されていることを前提としている。乱獲や小型浮魚類の不合理な利用に直面する中、小型浮魚類のポテンシャル発揮を実現するためには、水産資源の管理強化と魚食普及の推進に取り組む必要がある。

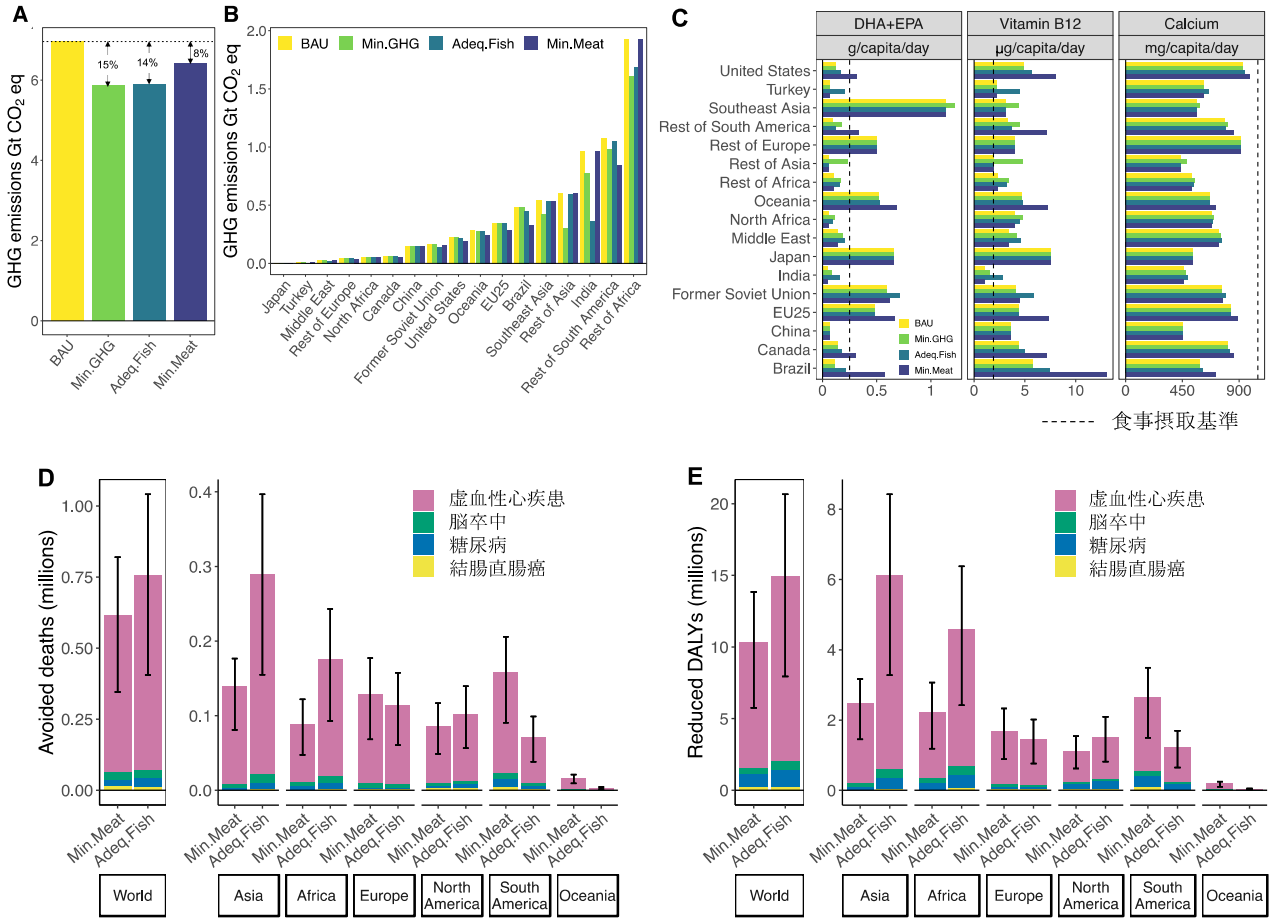

図-1.5　2050年各肉代替シナリオにおける（A）世界及び（B）地域別の赤身肉生産によるGHG排出量、（C）一人当たりの必須栄養素の摂取量、（D）回避された非感染疾患による死亡数と（E）障害調整生存年数（DALY）

[研究1-6：軽量気候影響予測手法（影響エミュレータ）の開発]

影響エミュレータの詳細モデル出力の再現性能について、部門別・地域別に、全球平均気温変化を説明変数とした場合と地域別平均気温変化・降水量変化を説明変数とした場合（図-1.6左）、社会経済関連の説明変数を加えた場合と加えない場合（図-1.6右）、挙動の非線形性や説明変数間の相互作用を考慮しうるエミュレート手法を用いた場合と用いない場合（図省略）などの比較評価を行った。全球規模での経済的影響の推計においては、比較的単純な手法（例えば全球平均気温を説明変数とする2次式）であっても、全体的な傾向を再現可能であった。一方、地域別・部門別の影響の差異等の詳細について再現するには、より詳細な情報（地域別の気候や社会経済状況）を説明変

数として用いると共に、統計的にもより高度な手法を用いることが有効であることが分かった。本研究で開発した影響エミュレータのソースコードは研究データレポジトリZENODO（https://zenodo.org/record/4692496#.YJHSpaFUs_Y）で公開配布しており、今後研究コミュニティでの活用が期待できる。

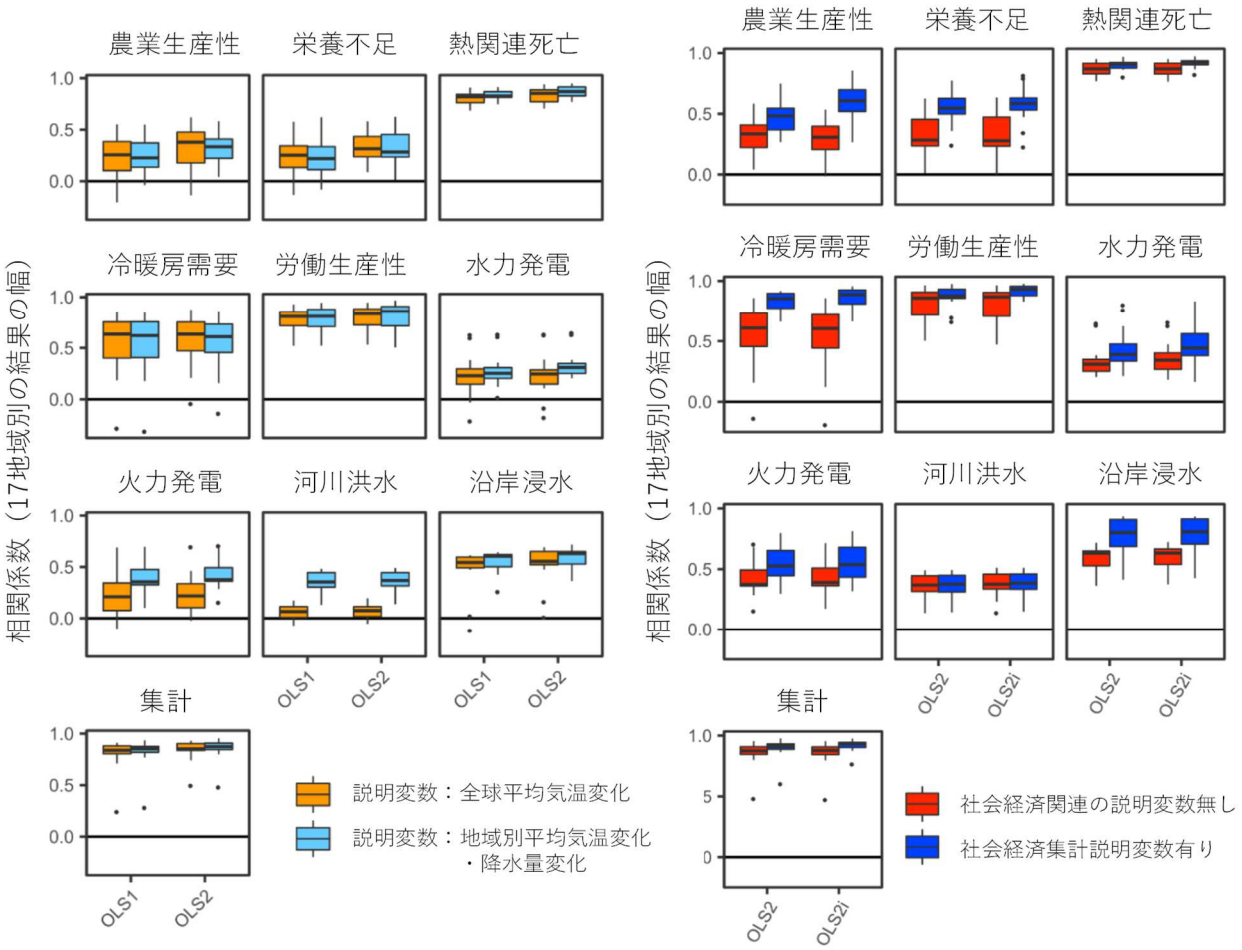

図-1.6　全球平均気温のみを説明変数とした場合と地域平均気温・降水量を説明変数とした場合（左図）ならびに社会経済因子を説明変数に加えた場合と加えない場合（右図）の影響エミュレータの再現性の比較。横線と箱の上下端は17地域の推計結果の中央値と25・75%値をそれぞれ示している。また縦線の上下端は17地域別の値の幅を示している（外れ値のみ点で記した）

[研究1-7: 気候変動による経済影響評価の不確実性の低減]

図-1.7a・bの横軸は、1980年から2021年の世界平均気温トレンド（長期変化傾向）を示している。縦軸は、温室効果ガスの濃度増加が中程度の場合（RCP4.5とSSP2-4.5）の67の気候モデルの世界平均気温と世界平均降水量の将来変化予測である。世界平均気温変化と世界平均降水量変化は、過去の世界平均気温トレンドと良い相関を持っており、過去の気温トレンドの大きい気候モデルほど将来の気温変化と降水量変化が大きい傾向がある。図-1.7a・ｂ下部の青い横棒は、観測された過去の気温トレンドに、気候システム内の自然の揺らぎ（エルニーニョ等）によって偶然生じえる幅を加えたものである。複数の気候モデルが過去の気温トレンドを過大評価しているが、それらの気候モデルでは将来の気温上昇と降水量増加も過大評価しているものと考えられる。この予測の信頼性に関する情報を加味すると、予測の不確実性幅（5-95%幅）を元々の黒い箱ひげ図から青い箱ひげ図の幅へと低減することができ、特に上限（95%値）を顕著に引き下げることができた。このECによって、気温変化予測と降水量変化予測の分散をそれぞれ41%と28%削減することができた(図-1.7d)。

将来の気温変化と降水量変化が大きいほど気候変動影響が強くなるため、過去の気温トレンドの大きい気候モデルを入力データにした場合に将来の経済影響も大きくなる傾向があることが新たにわかった（図-1.7c）。図-1.7cの縦軸は、影響エミュレータによって求めた世界の気候変動経済影響（金銭換算した被害額が2080年から2099年のGDPの何％に相当するかを9分野で総計）である。元々の不確実性幅は0.8%から2.9%だが、ECによって低減された不確実性幅は0.8%から2.5%になる。上限が2.9%から2.5％へと顕著に低下し、分散も31%削減することができた。

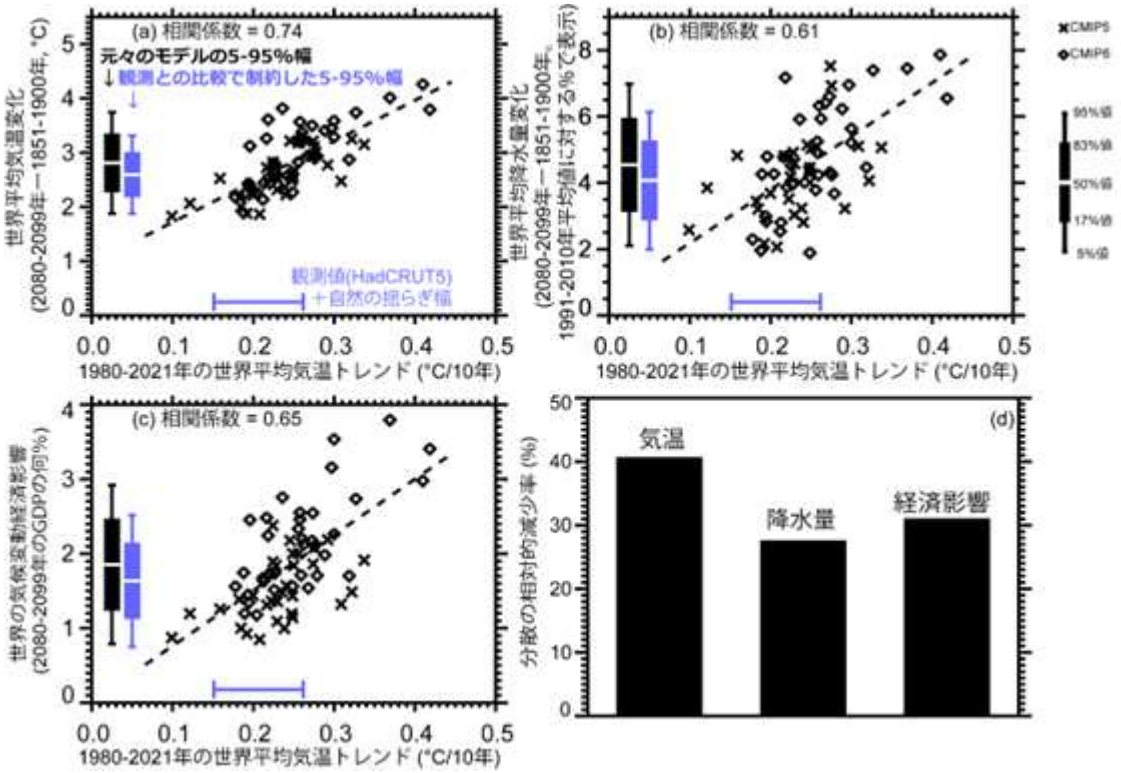

図-1.7 世界平均気温変化、降水量変化、世界の経済影響の不確実性低減

[研究1-8: 土地関連のGHG排出削減策が食料安全保障に及ぼす影響の要因分析]

モデル内で陸地に固定される炭素の価格として表現される植林、それに続き、モデル内で排出税として表現される非CO2のGHG削減が、食料・飢餓影響への寄与が大きいことが分かった。2℃目標に整合的な気候政策（炭素価格）の導入により2050年時点で、植林について4190万人、非CO2のGHG排出への課税について2670万人の飢餓リスク人口の増加が懸念される（図-1.8）。本研究から、排出削減・気候政策と農業市場の管理政策の連携の必要性が示唆される。

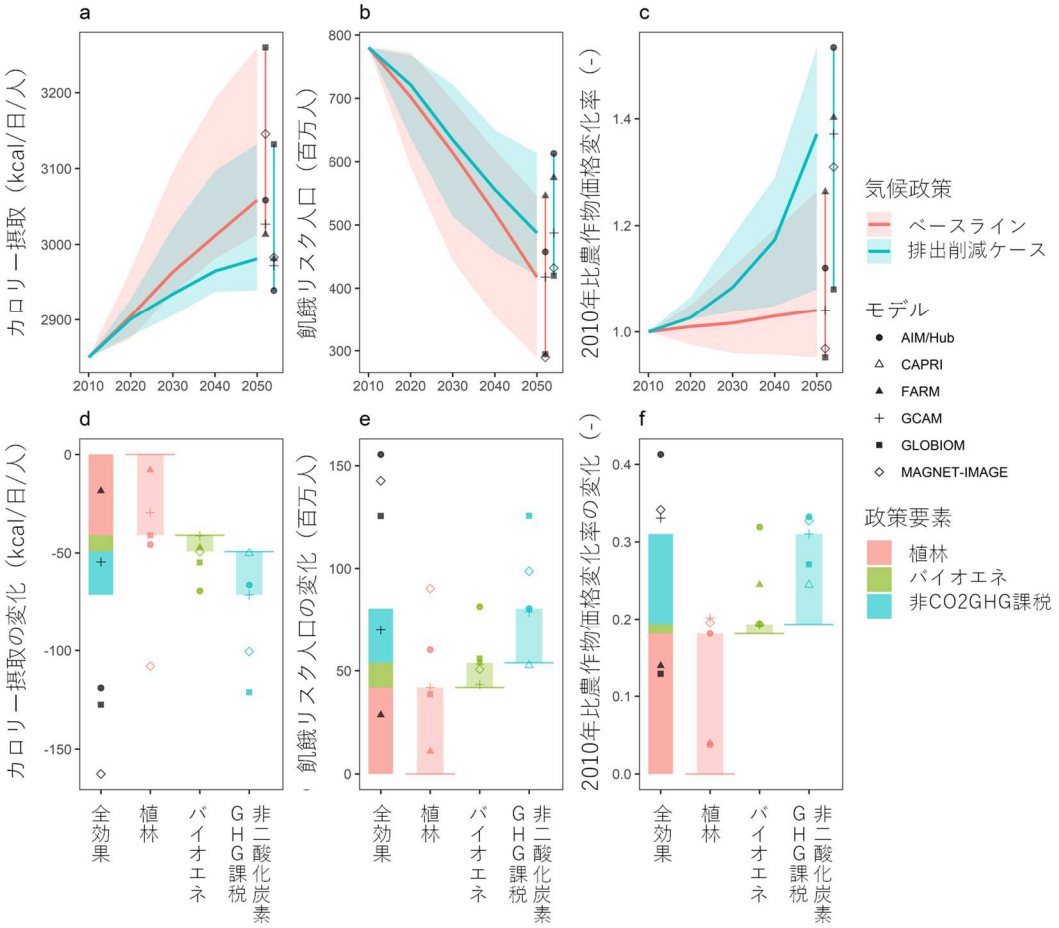

図-1.8　SSP2シナリオでの2℃目標に整合的な気候政策無し（ベースライン）ならびに有り（排出削減ケース）での(a)一人当たりカロリー摂取、(b)飢餓リスク人口、(c)対2010年比の農作物価格変化率、ならびに2050年時点での各指標のベースラインと排出削減ケースの差についての植林、バイオエネルギー、非CO2のGHG排出課税の寄与((d)一人当たりカロリー摂取、(e)飢餓リスク人口、(f)対2010年比の農作物価格変化率)

[研究 1-9 気候変化及び人間活動が野外火災PM2.5濃度変化を通じて引き起こす健康影響の評価]

現状では（2006～2015年）、野外火災が全球陸域の総PM2.5濃度の10%に寄与し、野外火災PM2.5による全世界の死亡者数は約9万人と推計された。野外火災PM2.5による死亡率は熱帯地域で最も高かった。一方、将来期間（2015～2100年）については、気候変化シナリオや社会経済シナリオを想定したうえで、野外火災による死亡率変化を予測した。その結果、21世紀半ばの野外火災死亡率は、一部のシナリオを除いて、大多数のシナリオと地域で減少が予測された。21世紀後半には、高緯度地域での野外火災死亡率の増加が予測された。特に、想定した中で昇温が最大の気候変化シナリオ（RCP6.0)では、燃料となるバイオマスの乾燥による北極圏での野外火災排出増加が死亡率増の主因となった。RCP6.0を発展途上国の開発の遅れや格差拡大を想定する社会経済シナリオSSP3およびSSP4と組み合わせると、高齢者人口の増加により、世界全体の野外火災死亡率の増加となった。高緯度地域の高所得国にとっては、野外火災による健康リスク増加を軽減すべく、より積極的に気候変動緩和に取り組むインセンティブを与えうる予測結果といえる。

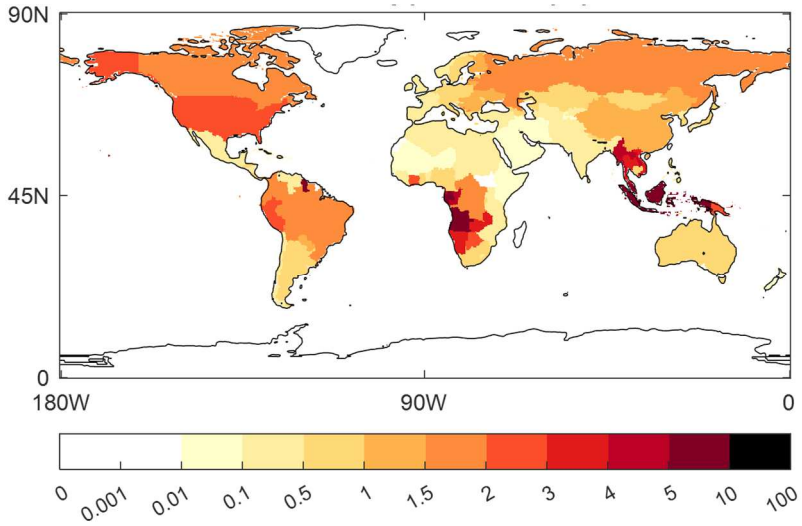

図-1.9　現在(2006～2015年)の国別の野外火災PM2.5死亡率（人口100,000あたり死亡数）

[研究1-10: 緩和政策下でのSDG指標の定量化]

図-1.10は、緩和無し想定（ベースラインシナリオ）と比較したCO2排出削減率（横軸）とSDG指標変化（縦軸）との関係を示している。図中の直線（線形回帰）の傾きがMSVとなる。また、信号機の緑、赤、黄はMSVに基づく、副次的便益、トレードオフ、統計的な有意性無し（5%信頼水準）を示している。副次的便益・トレードオフの関係は地域間差が小さいことも読み取れる。

大気質、再生可能エネルギーシェア、エネルギー強度、失業率、森林面積について副次的便益がみられ、ベースラインシナリオと比較して1%のCO2排出削減で0.58%、0.23%、2.6%、0.02%、0.34%の改善となる。一方、飢餓、農業価格、GDP、および生物多様性のリスクは、それぞれ0.94%、0.26%、0.034%、および0.026%のトレードオフとなる。食品廃棄物の傾きは統計的に有意ではなく、CO2排出量とのその関係性を特定できなかった。

多くの指標で線形回帰により有意性のあるMSVが求められたが、一部の国でCO2削減が80%削減を超えると緩和に対して強い非線形の応答を生じることも分かった。例えばインドの飢餓リスクは、主にバイオ燃料生産強化に伴う地代上昇により高いCO2削減率で強い応答が生じる。線形応答を想定したMSVが、中程度の削減（80%未満）で適用可能であるが、80%を超える削減域では適用に注意が必要である。

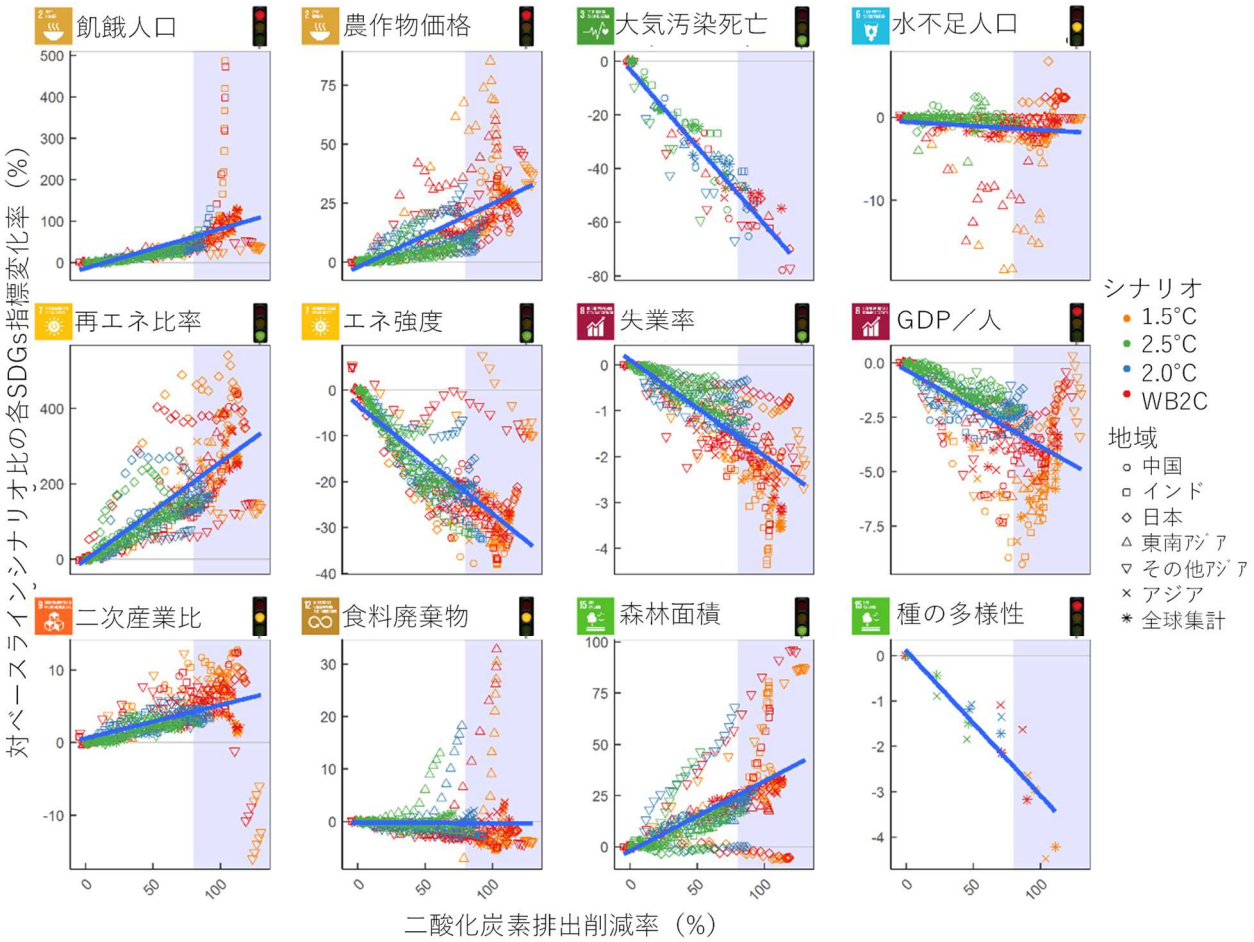

図-1.10　SDG指標とCO2削減率の関係（色はシナリオ、マーカーの形は地域を表している）

５．研究目標の達成状況

「３．研究開発内容」の冒頭で明記したように、当初目標に対応した研究成果をもれなく得ることができた。

さらに研究成果の多くについて、学界・社会への影響力の強い学術誌（Nature Food誌、Global Environmental Change誌等）での公表が出来ている。また、学術誌での適時の成果公表が功を奏し、IPCC第6次評価報告書への引用の目標も達成された。論文公表に際しての報道発表も複数実施できた。

加えて、[研究1-6]で開発した影響エミュレータについては、本研究課題の中にその利用は閉じず、研究データレポジトリZENODOを用いて無償公開することで、国内外の気候影響統合評価、ならびにネットゼロ排出に向けた気候政策の波及影響の分析での利用が見込まれる。例えば、エミュレータ提供により国際モデル比較評価に貢献でき、Nature Climate Change誌での共著論文を研究実施期間内に追加成果として公表できた。サブテーマ間連携での成果も創出できており（[研究1-8]～[研究1-10]）、複数研究機関での共同研究プロジェクト実施のメリットを多いに活用できたことも強調したい。

以上をふまえ「目標を上回る成果をあげた。」との自己評価を提示する。

６．引用文献

特に記載すべき事項はない。

Ⅱ－２　持続可能性を考慮した気候緩和策の戦略検討

京都大学
大学院工学研究科　藤森　真一郎
大学院工学研究科　大城　賢
立命館大学
理工学部　長谷川　知子
理工学部　橋本　征二（令和３年度）
国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所　松井　哲哉
国立研究開発法人国立環境研究所
地球システム領域　物質循環モデリング・解析研究室　伊藤　昭彦
気候変動適応センター　気候変動影響評価研究室　岡田　将誌

［要旨］

当課題では持続可能性統合評価モデルの開発・適用を行い、CO2ネットゼロ排出において重要な役割を担う植林とBECCSに関する諸問題へ答えを出す。より具体的には、CO2ネットゼロ排出における土地利用ベースの排出削減策の貢献度、大規模な植林やBECCSの生物多様性への影響、将来の不確実性を考慮した食料安全保障の変化とそれに対する適応策の必要量、を明らかにすることである。本課題で開発した統合評価モデルは、経済モデル、土地利用モデル、生物多様性モデルの3つであり、これらが情報を受け渡すことで、ネットゼロ排出という制約条件の中でエネルギーや食料需給が整合的なシナリオ下で様々な土地利用に関連する重要事象について解析することが可能となった。本研究で得た主要な結果は、大規模植林やBECCSの全温室効果ガス削減量への貢献は大きく、現状ではほぼ必要不可欠といってもいいものである。一方、それらは生物多様性に対して悪影響を及ぼす可能性があり、特にBECCSを使わず植林に強く依存することになると、必要となる植林面積が広大になることから生態系の影響がますます懸念される。ただし、気候自体が変わっていくことを考慮に入れると、植林やBECCSなどによる土地利用ベースによる緩和策の影響よりも、気温上昇等による生態系への負荷のほうが大きかった。また、気候変化が食料安全保障の不確実性に与える影響も明らかとなり、その大きさも含めて、生態系や社会全体への波及効果等を総合的に考えた場合、気候緩和策は実施したほうが良いと結論づけられた。

1.　研究開発目的

研究計画時当初のサブテーマ2における研究目的は、CO2ネットゼロ排出において重要な役割を担う植林と炭素回収貯留付きバイオ燃料Bioenergy with Carbon Capture and Storage（BECCS）に関する諸問題へ答えを出す、ことであった。この問いに答えつつ当初計画にはなかったが、社会の取り巻く気候関連政策の状況、IPCCの報告書の内容や当該研究分野における最先端研究の方向性等を総合的に考慮して、本研究課題と関連の深い以下の課題を研究として追加し、全体としては以下のような研究目的として研究作業を実施した。具体的には、(1)ネットゼロ排出目標における農業土地利用分野のインプリケーションとは何かを明らかにする、(2)気候変動影響の不確実性を考慮した食料安全保障への影響を明らかにする、(3) 将来の社会経済状況の変化が生態系へ及ぼす影響を明らかにする、(4)気候緩和策の戦略による生態系への影響の違いを明らかにする、(5)将来の社会経済状況によるバイオマスポテンシャルの変化を明らかにし、ネットゼロ排出緩和シナリオ定量化のモデル入力値とする、(6)緩和策と貧困の関係をモデル化し、炭素税の貧困撲滅へ貢献の可能性について検討する。これらの個別研究課題を通じて、全体としては環境政策に役立つ、有意義な研究を実施した。

2.　研究目標

持続可能性統合評価モデルの開発・利用により、CO2ネットゼロ排出において重要な役割を担う植林とBECCSに関する諸問題へ答えを出す。植林に関しては、これまでの陸域生態系モデルが土地利用管理を明示的に扱ってこなかったことから、土地利用管理を明示的に考慮した森林吸収量の推計に注力する。BECCSに関しては、生物多様性保護、農業技術開発、水資源利用可能性などの観点から持続可能性

を考慮しつつバイオエネルギー作物の大規模展開の可能性について論じ、前述の森林吸収量推計もふまえながら、食料・水安全保障や生物多様性を脅かさない範囲でネットゼロ排出を実現するために必要な政策・施策を同定する。例えば、従来考えられてきた単純な炭素税等の経済メカニズムのみを用いた気候緩和政策に加えて、食肉嗜好の変化、食料廃棄物対策、途上国への経済支援、土地利用規制の強化など、社会システム全体を変革していくような施策を検討する。また、ネットゼロ排出に向けた緩和政策の分析手法・結果について、研究期間後期にサブテーマ１の排出経路モデルにも反映し、課題全体の整合性の確保に努める。

3. 研究開発内容

サブテーマ2では、CO2ネットゼロ排出において重要な役割を担う植林とBECCSに関する諸問題への回答に関して、[研究2-1]として、気候変動緩和下における持続可能な農業・土地利用戦略の提示に向けて、CO2除去技術に依存しない排出シナリオについてモデル比較分析を実施した。また、[研究2-2]として、気候緩和策の戦略による生態系への影響の違いを明らかにすべくBECCSと植林による生物多様性への影響評価を、さらに［研究2-3]として、将来の社会経済状況の変化が生態系に及ぼす影響明らかにすべく社会変革による生物多様性への影響の分析を、それぞれ実施した。また、[研究2-4]として極端気象の不確実性を考慮した食料安全保障に関する分析を、［研究2-5]として、ネットゼロ排出緩和シナリオ定量化のモデル入力値とすべく、土地利用モデルを用いたバイオエネルギーポテンシャルの推計を実施した。さらに、[研究2-6]として、緩和策と貧困の関係をモデル化し、炭素税の貧困撲滅へ貢献の可能性について検討した。なお、緩和政策の分析手法・結果のサブテーマ１の排出経路モデルへの反映については、AIM/Hubモデルの提供と感度実験を通じて、サブテーマ１の研究項目[研究1-2]に共同で取り組んだ。

本研究課題では研究目的を達成するために統合評価モデルを用いた。その主要な構成は以下の図-2.1に示しているように、AIM/Hub、AIM/PLUM、AIM/Biodiversity（AIM/BIO）、AIM/PHIの4つのモデルを用いたものである。まず、AIM/Hubにより、経済状況、エネルギー食料各財の消費生産量・価格、土地利用、各種GHG、大気汚染物質等の排出量等が計算される。次にAIM/Hubから出力された17地域別の土地利用シナリオを、空間解像度0.5°×0.5°の空間情報に詳細化した。そして、AIM/Hub及びAIM/PLUMから計算された土地利用条件及び気候条件をもとに、AIM/Biodiversityを用いて生物種ごとの潜在生息域の変化を世界規模で推定した。AIM/PHIでは家計消費を所得階層別でモデル化し、各種財価格の変化や所得変化によって家計が受ける影響を定量化し、それにより貧困人口の変化を示す。

AIM/Hubにより、将来の世界的な人口増加に伴い増加する食料需要と、その生産のために必要な農地などの土地の需要が推計される。例えば食肉消費を抑制する対策を設定すると、畜産動物の飼料を生産するための土地の需要が抑制され、対策を実施しないシナリオに比べ森林面積が増加する。
AIM/Biodiversityでは、AIM/PLUMにより細分化された土地利用の推計結果に基づき生物群の将来の潜在生息域が推定される。対策を実施するシナリオでは森林面積が増加するため、潜在生息域も拡大する。
AIM/PHIはAIM/Hubから所得、財価格、炭素価格を受け取り、貧困人口を推計する。

全体のモデル構成は上述のような形であるが、各論文の研究課題では必ずしもこれらすべてのモデルを用いたわけではなく、AIM/Hubのみを用いたり、AIM/HubとAIM/PLUMのみを用いたりしたものも存在する。以下では各モデルの概要について説明する。

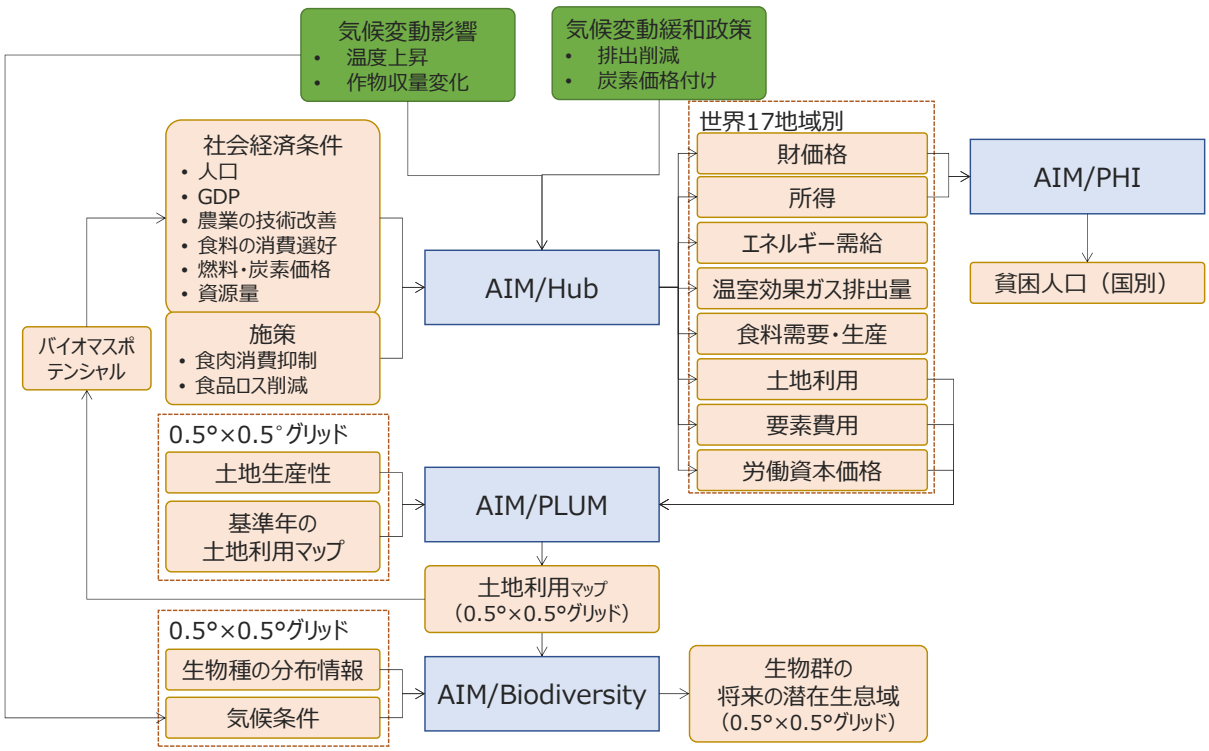

図-2.1 モデルフレームワーク

・ AIM/Hub

AIM/Hubは、将来の人口やGDP、エネルギー技術の進展度合い、再生可能エネルギーの費用、食料の選好、土地利用政策など様々な温室効果ガス排出に関連する社会経済条件を入力として、エネルギー消費量、二酸化炭素排出量、土地利用、大気汚染物質排出量、温室効果ガス排出削減に伴う経済損失などの指標の将来推計を世界17地域別に行う社会経済モデルである。

AIM/Hubでは、各種生産要素、財などの価格を所与とした関数を用いて、生産、消費、投資、貿易活動が記述されている。生産活動は利潤最大化を前提としており、中間財、生産要素を投入する。生産活動により発生する所得は代表的家計（家計消費と政府消費を集約したもの）が受け取る。家計は所得の一部を貯蓄に回し、所得から貯蓄を除いた可処分所得を所与として消費を行う。消費財の支出割合は効用最大化のもと決定される。次に、最終消費は家計消費と資本形成で構成される。資本形成は固定係数の消費として扱い、財間の消費割合は変化しないとする。また、貯蓄と投資がバランスするために、貯蓄性向は資本形成に応じて内生的に決定するものとする。ここで、新たに蓄積される資本は次の年の新規資本として稼働し、生産要素の一つとなる。本モデルは1年単位の逐次型動学モデルである。旧資本と新規資本が区別されており、資本の情報が次年へ更新される。

AIM/Hubでは気候変動政策を導入し、それによる経済、エネルギー、農業・土地市場などへの影響を定量化することも可能である。その際よく取るアプローチは排出量制約を与え、その相補性条件としての炭素価格を同定し、それに応じて各種部門が反応して脱炭素化をしていくというものである。

一方、気候変動影響も分析することが可能であり、例えば農業収量が気候変動によって影響を受けるがその収量情報を入力することで、農業収量変化が食料市場、飢餓などへ及ぼす影響を推計する。

・ AIM/PLUM

AIM/PLUMは、AIM/Hubで計算される世界17地域別の土地面積を入力として、その土地を0.5°×0.5°グリッドに分配する。人間の生産活動すなわち農林産財の生産に要する土地の面積を外生的に与え、その面積を満たすように土地利用の分布を探索する。分配の手順は3ステップに分けられる。第一に、農地、定住地、ツンドラ、水面、その他の分配を決定する。第二に、その他のうち、牧草地を決定する。

最後に、その他の土地から牧草地を除いた残りを森林と草地に分配する。

農地の分配については、土地所有者が土地生産性に基づき生産により最大の収益を得られるグリッドを選択するよう、最適化により決定する。AIM/Hubと整合的な地域区分を取り、単一の国・地域ごとに最適化問題を解く。地域を越えた配分は考えない。毎年逐次的に計算され、毎期の土地利用分布の結果が次期の入力として渡される。各グリッドにおける潜在的生産性（単位面積当たりの潜在的生産量）は、生物物理的条件を考慮して算定される。作物収量の気候影響は、各作物モデル内で気温や降水量、CO_2濃度に対する変化として表現され、その収量の地理的情報が使用される。

また同モデルはバイオマスエネルギーのポテンシャル計算を生物物理的な条件から計算する。

・ AIM/Biodiversity（AIM/BIO）

AIM/Biodiversityは、生態ニッチモデルと呼ばれる統計学的な手法を用いて、世界の陸域生物のうち、5つの主要な生物群（植物、両生類、爬虫類、鳥類、哺乳類）にまたがる8,428種類について、各生物種の分布情報と、複数の気候条件や土地利用条件との関係性から、それぞれの生物が潜在的に生息可能な地域（潜在生息域）を推定する生物多様性モデルである。各生物種の分布情報についてはGBIF.orgのデータベースを用いる。このモデルにAIM/Hub及びAIM/PLUMから計算された現在及び将来の土地利用条件、現在及び将来の気候条件を当てはめることで、環境条件からみた生物種ごとの潜在生息域の変化を世界規模で推定する。またこのモデルでは、環境条件による潜在生息域の変化に加え、各生物種の生態的な特性を考慮して分布拡大速度を推定することにより、生物の分散能力を考慮した将来の潜在生息域を推定することができる。

・ AIM/PHI

AIM/PHIは所得分布モデルと支出モデルから構成され、所得分布モデルはAIM/Hubが将来の社会経済・気候政策シナリオに基づき出力する地域別のマクロ経済指標・価格変動を入力として受け取り国内の所得分布を計算し、続けて所得分布を渡された支出モデルが家計消費の分布ならびに貧困者数・貧困率・貧困ギャップを計算する。なお本研究では、貧困判定に1日1.90米ドル（2011年PPP）の閾値を使用し、気候緩和政策の異なる4シナリオを対象に分析を実施した。また、気候変動影響の効果は考慮していない。

[研究 2-1: 負の排出に依存しない早期排出削減による食料・土地利用システムへの影響評価]

気候変動に関する政府間パネルの1.5℃特別報告書で用いられたシナリオには、目標とする気温を一時的に超過するオーバーシュート、CO2回収貯留付きバイオエネルギーや植林等による今世紀末での大規模なCO2除去を必要とするシナリオを含んでおり、これらを推奨するリスクを残していた。そこで複数の統合評価モデルを用いてCO2除去技術に依存しない排出シナリオのモデル比較分析を実施した。

[研究2-2: BECCSと植林による生物多様性への影響評価]

マイナス排出を達成するためのBECCSや植林の大規模展開が生物多様性に与える影響を解明するため、エネルギー経済システム、土地利用および生物多様性に関して一貫した評価が可能な統合モデルの枠組みを用いて、気候変動と緩和策による土地利用改変が生物多様性に与える影響を定量的に評価した。パリ協定では、長期気温目標達成のための努力は「公平性に基づき」、「持続可能な開発と貧困撲滅の努力との関連で」行われなければならないとされている。しかし、BECCSや植林などの大規模土地利用改変を伴う緩和策は、それらが導入される地域の生物多様性に過度の負担を与える可能性がある。そこで、本研究では、これら緩和策の影響について、社会的・地域的な公平性も同時に評価した。

気候変動と緩和策による土地利用改変が生物多様性に与える影響評価については、前述の3つのAIMモデル（AIM/Hub・AIM/PLUM・AIM/BIO）を用いた。BECCSと植林の導入強度を変えた4つの将来シナリオ（1.温室効果ガス（GHG）排出削減を行わない「なりゆきシナリオ」、2.BECCSを重視した「BECCSシナリオ」、3.植林を重視した「植林シナリオ」、そして4.BECCSと植林の最適利用を目指した「植林＋

BECCSシナリオ」）を設定し、これらのシナリオのもとで、気候変動および緩和策が生物多様性に与える影響を地球規模及び地域規模で評価した。

土地利用については各シナリオ下で想定される地域別（世界17地域）の土地利用配分を、AIM/Hubモデルを用いて予測した。さらに、この17地域別の土地利用配分を、土地利用と環境モデリングのための統合プラットフォーム（AIM/PLUM）を用いて0.5度グリッドにダウンスケールした。土地利用区分は12種類に分類し、2005年および2010年から2100年までの10年単位で、各グリッドにおける土地利用区分の比率として算出した。

生物多様性については、世界の陸域に生息する5つの分類群（維管束植物、両生類、爬虫類、鳥類、哺乳類）から全8,428種を対象として解析した。緩和策の生物多様性への影響は、AIM/BIOモデルを用いて予測した。AIM/BIOモデルは8,428種について、環境条件（土地利用、気候条件など）と移動分散可能距離から種ごとの潜在的な生息域を推定することが可能な、Maxentアルゴリズムを用いた分布予測モデル群のことである。先行研究（Ohashi et al 2019）で構築された種ごとの分布予測モデルに、4つのシナリオ（3つの緩和シナリオと1つのなりゆきシナリオ）で想定される土地利用条件や気候条件を当てはめて、8,428種の１種類ごとに、現在と将来（2030、2050、2070、2090）の潜在生息域を推定した。

土地利用条件については、上記のAIM/PLUMで予測された12の土地利用区分からなるデータを、AIM/BIOで用いられている5つの区分（耕作地、森林、牧草地、その他の自然地、定住地）に統合して使用した。現在の土地利用状況として2005年（AIM/Hubの開始年）のデータを用い、将来の土地利用として2030年、2050年、2070年、2090年のデータを使用した。温室効果ガス削減のためのバイオエネルギー作物栽培地と植林地は、現在の土地利用データには存在しない、もしくは明確に区分されていないため、Ohashi et al.(2019)を踏襲し、バイオエネルギー作物栽培地は「農地」に再分類し、植林地は「森林」に再分類した。

気候条件については、WorldClim ver.2で提供されている月別最高気温、最低気温、降水量のデータセットから、19種類の生物気候変数を0.5度グリッドで算出して使用した。現在の気候条件として1970年-2000年の気候データを使用し、将来の気候条件として2030年代（2021-2040）、2050年代（2041-2060）、2070年代（2061-2080）、2090年代（2081-2100）のデータを使用した。なりゆきシナリオの気候条件に対応する気候シナリオにはSSP3-7.0を、3つの緩和シナリオに対応する気候シナリオにはSSP1-2.6を選択した。将来の気候条件の不確実性を評価するために、CMIP6に含まれる3つの全球気候モデル（GCM）、GFDL-ESM4、IPSL-CM6A-LR、MRI-ESM2-0の気候データを準備し、それぞれについてモデル予測を行った。

Maxentアルゴリズムによって予測された各生物種の現在の潜在生息域は、特定の土地利用条件と気候条件の下で分布する可能性のある全範囲を表している。しかし、過去の地理的な変遷や気候の変化など、様々な理由により実際の生息域はより限定される。そこで、本研究ではOhashi et al (2019)に倣い、各生物種の自生地域（現在、実際に分布することが確認されている地域）の内側に存在する潜在生息域のみを現在の潜在生息域として評価した。自生地域の決定には、世界自然保護連合International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN) のデータベース情報を用いた。また、将来の潜在生息域の変化は、現在の潜在生息域から各生物種が移動分散可能な距離を考慮して推定した。

緩和策の生物多様性への影響は、1.出現種数の変化率と2.種構成の変化（Jaccard類似度指数）の2つの指標を用いて評価した。出現種数の変化率は[（将来の種数－現在の種数）/現在の種数]で計算される指標で、0より大きい値は現在より将来で出現種数が増える事を示し、0より小さい値は出現種数が減ることを示す。Jaccard類似度指数（J）は、J = c/(a+b+c)で計算される。aは現在にのみ出現する種の数、bは将来にのみに出現する種の数、cは現在と将来の両方に出現する種の数である。類似度指数が低いほど、現在と将来の間で種構成の変化が大きいことを示す。8428種の潜在生息域の推定結果をもとに、出現種数の変化率とJaccard類似度指数を、2030年、2050年、2070年、2090年の4つの年代についてグリッドごとに算出し、世界全体および世界17地域間で比較した。

緩和策の社会的・地域的公平性を評価するため、AIM/Hubが定義する世界17の地域ごとに、緩和策に

伴う土地利用改変の強度や炭素隔離量、経済状況と出現種数の変化率との関係を調べた。土地利用改変の強度は、各グリッドにおける５つの土地利用区分の現在と2090年の占有率の差を用いて評価した。差分値が最も大きかった区分の値を、そのグリッドの土地利用改変の強度とした。炭素隔離量については、各シナリオ下でAIM/Hubにより算出される値を使用した。BECCSシナリオでは、バイオエネルギー利用により回収され、地中や深海に貯留されるCO_2の総量を炭素隔離量とみなした。植林シナリオでは、植林により吸収されたCO_2の総量を炭素隔離量とした。経済状況の指標にはAIM/Hubで予測された2090年のGDPを用いた。

[研究2-3: 社会変革による生物多様性への影響]

生物多様性の損失を食い止めるため，2010年に開催された生物多様性条約第10回締約国会議において，生物多様性に関する新たな世界目標である「戦略計画2011－2020（愛知目標）」が採択されたものの，その達成は困難であることが既に明らかになっている。これらの政治的枠組みは近い将来を見据えたものであるが，長期的な世界の持続可能な発展を展望するためには，これらの政策的枠組みとともに，より長期的な視点に立つことも重要である。今後の人口増加，食の多様化，食肉需要の増加に伴いより急激な生物多様性の損失が懸念される。加えて，気候変動も生物多様性にとっての脅威となるおそれがあることが指摘されている。そこで当該研究グループは二つの研究を実施した。

その第一は国際共同研究で、複数の生態系モデル、複数の統合評価モデルを用いて、生産側と消費側、さらには生態系保護のための土地利用管理を変えることで、過去から続く生物多様性の減少を食い止められるかどうかを検討する。この研究は複数の農業・土地利用モデル（もしくは統合評価モデル）、複数の生態系モデルを組み合わせて実施し、最終的にはNatureで出版され当該分野のみならず複数の研究コミュニティをブリッジする非常に重要な研究であった。基本的な手法は、前述のAIMのみを用いた枠組みとほぼ同様であるが、いくつかの農業・土地利用モデルはエネルギー市場などを明示的に扱わない、いわゆる部分均衡モデルとして知られているものであり、若干そのモデル枠組みが異なる。例えば、国際応用システム分析研究所International Institute for Applied Systems Analyses（IIASA）が所有するGLOBIOMというモデルは農業・土地利用市場のみを扱う。また、生態系モデル側もそのモデルタイプは非常に多様であり、結果でも示すが、モデルによって出力可能な指標が異なる。これはモデル相互の整合性などのチェックをやりにくくしているというデメリットもあるが、一方で、様々な側面から生態系を表現し、ロバストな結果を検出することが可能であるというメリットもある。シナリオには、3つの施策を考慮して、それぞれ個別にそれらを入れたものと、すべてを入れたものを定量化した。その3つとは食料生産側への対策、食料消費側への対策、土地利用管理への対策である。食料生産は収量の向上、食料消費側では畜産の削減や食料廃棄物の削減などを考慮した。

その第二は、自然環境の保護・再生と食料システムの変革に向けた取り組みを地域毎に想定し、生態系保全を行う上で有効な対策，有効な地域の同定を目的としてシナリオ分析を行うことである。この研究はAIMモデルフレークワークのみを用い、上述の3つのモデルを組み合わせた。基本的な研究のアイデアは第一の研究と類似であるが、世界全体のものに加えて、地域別での対策を考慮した。具体的には以下の表のようなシナリオを定量化した。

表-2.1 推計を行うシナリオ

シナリオ名	シナリオの特徴
Baseline	生物多様性保全のための対策を実施しないシナリオ。世界の人口の増加により食料需要が高まり、農地や牧草地への土地利用の転換が進む。
DEMFWR	肉食の抑制や食料廃棄物の削減などの需要側の対策を世界全体で実施するシナリオ。人口増加に伴う食料需要の増加が緩和され、生物の生息地である土地の農地や牧草地への転換が抑制される。
DEMFWR_OECD	肉食抑制や食料廃棄物削減などの食料需要側対策を、先進国（OECD加盟国）のみが実施するシナリオ
DEMFWR_NonOECD	肉食抑制や食料廃棄物削減などの食料需要側対策を、途上国（非OECD加盟国）のみが実施するシナリオ
DEMFWR_*****	肉食抑制や食料廃棄物削減などの食料需要側対策を、特定の国・地域のみが実施するシナリオ
DEM	需要側対策のうち、食料廃棄物削減に向けた対策は実施せず、世界全体で肉食抑制に向けた対策のみ実

	施するシナリオ
SUP	土地の生産性向上などの食料供給側の対策を世界全体で実施するシナリオ。同じ量の食料を生産するために必要な土地面積が小さくなり、生物の生息地である土地の農地や牧草地への転換が抑制される。
SUP_OECD	土地の生産性向上などの食料供給側の対策を、先進国（OECD加盟国）のみが実施するシナリオ
SUP_NonOECD	土地の生産性向上などの食料供給側の対策を、途上国（非OECD加盟国）のみが実施するシナリオ
SUP_*****	土地の生産性向上などの食料供給側の対策を、特定の国・地域のみが実施するシナリオ
All	食料需要側と供給側の両方の対策を世界全体で実施するシナリオ

（「*****」には地域コードが入る。）

[研究2-4: 極端現象を考慮した食料安全保障]

現在気候変動の影響は洪水、熱波、森林火災など各方面で顕著に表れており、人為起源の温室効果ガスの排出がこれらの事象に大きく寄与しているとされている。また、日本をはじめ、各国が政策目標としてカーボンニュートラルを掲げており、温暖化対策は喫緊の社会的課題となっている。

農業の温暖化影響について見ると、これまでの研究では緩やかな気候の変化の平均的な姿についての解析が主としてされてきた。すなわち、例えば2050年では温暖化によりどの程度の作物生産量減少が見込まれるといった形だった。しかし、年々変化する気象条件とそれによる作物生産への影響は大きな振れ幅を持っており、本来の農業の影響は極端な気象現象の発生頻度がどのように変わっていくのかということを考慮しなくては、将来の気候変化にどのように対応していくかがわからず、当該分野の重要な研究課題として長く残されていた。

そこで本研究では、将来の極端な気象現象がどのように変わっていくのか、またそれにより食料安全保障、具体的には飢餓に直面する飢餓リスク人口がどのように変わるのかということを複数のモデルを組み合わせて予測し、それに対応するための気候変動適応策を論じた。本研究では、AIM /Hub とPRYSBI2 と呼ばれる作物モデルを用いた。AIM は前述のように将来の人口と GDP を入力して、気候、エネルギー、経済システム、食料需給、土地利用、温室効果ガス排出量、温室効果ガス排出削減量などを出力（将来推計）するモデルである。PRYSBI2 は気候条件や経済条件などを入力し潜在的作物収量を計算するモデルである。飢餓リスク人口は、作物収量の変化を通じて起こる価格変化、さらにその価格変化に対する消費者の応答から計算される食料消費量から計算した。

[研究 2-5: 土地利用モデルを用いたバイオエネルギーポテンシャルの推計]

今世紀末までに産業革命前からの地球の平均気温上昇を 2℃未満に抑える、いわゆる 2℃目標を達成する場合、世界の総エネルギー供給量の約 20～30%をバイオマスエネルギーで賄う必要があるとされてきた。一方、気候変動緩和対策の一つとして考えられている食肉消費の低減などの食内容の変化は農地や牧草地の利用を変え、バイオエネルギーポテンシャルを変えうる。そこで、本研究では将来の食内容の変化がバイオマスエネルギーポテンシャル量に与える影響を明らかにした。将来の食内容、食品ロスを考慮し、バイオマスエネルギーポテンシャル量とバイオマス作物生産費用を算出し、その供給曲線を算定した。算出された結果をシナリオ・地域別で比較し、将来の技術的及び経済的なバイオマスエネルギーポテンシャル量の可能性を評価した。

[研究 2-6: 炭素税税収の貧困解決への活用の潜在的可能性]

貧困撲滅は SDGs の筆頭目標であり、また多様な開発・環境問題との相互作用が指摘されるが、従来の統合評価モデルでは貧困人口や貧困ギャップ（貧困線以下の人口の不足額の平均）などの貧困関連指標は定量化されてこなかった。本研究では、新規に AIM/PHI（貧困、家計、所得分布モデル）を開発し、既存の AIM モデルと連結し、炭素税税収の貧困解決への活用の潜在的可能性の分析を行った。

AIM/PHI は所得分布モデルと支出モデルから構成され、所得分布モデルは AIM/Hub が将来の社会経済・気候政策シナリオに基づき出力する地域別のマクロ経済指標・価格変動を入力として受け取り国内の所得分布を計算し、続けて所得分布を渡された支出モデルが家計消費の分布ならびに貧困者数・貧困率・貧困ギャップを計算する。なお本研究では、貧困判定に 1 日 1.90 米ドル（2011 年 PPP）の閾値を

使用し、気候緩和政策の異なる 4 シナリオを対象に分析を実施した。また、気候変動影響の効果は考慮していない。

4. 結果及び考察

［研究 2-1：負の排出に依存しない早期排出削減による食料・土地利用システムへの影響評価］

分析の結果、早期の排出削減を行い、負の排出をしないシナリオ（ネットゼロ排出を長期間維持）では、今世紀後半の CO2 除去を回避し、温室効果ガス排出削減によって引き起こされる劇的な土地利用変化を回避できることが示された。さらに、それにより今世紀末頃には食料価格の低下、飢餓のリスクの低減、灌漑用水の需要の低下などの便益が示された。しかし同時に、今世紀半ばには大幅な排出削減が必要になり、エネルギー作物に必要な土地面積が増加し、食料安全保障のさらなるリスクをもたらす副次的な影響の可能性も明らかになった。これは、CO2 除去に依存せず気候目標を達成するには、必然的に早期かつ迅速な排出削減対策が求められるが、これも中期的には課題をもたらすため、これらの問題に対処する方策を検討する必要性を示唆している。

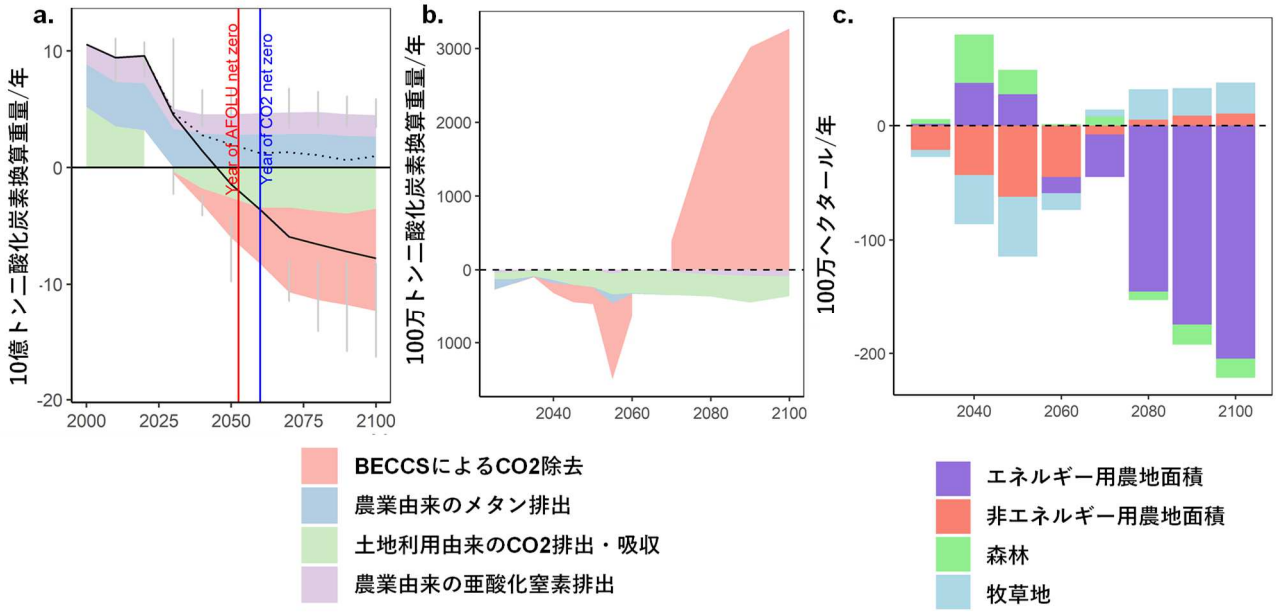

図-2.2　a は大規模な二酸化炭素(CO2)除去に依存しないケースの世界全体の農業・土地利用変化由来の温室効果ガス排出経路。 b,c は大規模な CO2 除去技術に依存しないことによる世界全体の農業・土地利用変化由来の温室効果ガス排出と土地利用への影響（大規模な CO2 除去に依存するケースとしないケースの差分を表す）。

［研究 2-2：BECCS と植林による生物多様性への影響評価］

BECCSや植林による緩和策の導入は、地球規模での気候変動による将来の生物多様性の損失や種構成が変化するリスクを低減する可能性が示された。なりゆきシナリオでは、気候変動により出現種数が時間とともに減少すると予測された（図-2.3a）。出現種数の変化率は、2030年に0.015、2090年に0.069と予測された。一方、緩和策の導入により出現種数の減少傾向は抑制された。出現種数の変化率は、BECCSシナリオと植林シナリオでそれぞれ2030年に0.014と0.020、2090年には0.033と0.047であった。なりゆきシナリオと3つの緩和シナリオの差は、今世紀後半になるにつれより明瞭になった。また、なりゆきシナリオと緩和シナリオのいずれにおいても、時間の経過とともに不確実性の幅が大きくなった。緩和シナリオのうち、BECCSシナリオは、植林シナリオよりも出現種数の減少が抑えられる傾向があったが、その差はなりゆきシナリオと緩和シナリオとの差と比べるとわずかであった（図-2.3a）。

気候変動により、種構成も時間とともに変化することが予測された（図-2.3b）。類似度指数はなり

ゆきシナリオ下では時間とともに急減し、2070年に0.692、2090年に0.630となった（図-2.3b）。一方、BECCSシナリオと植林シナリオ下では、2070年に0.762と0.741までそれぞれ減少し、その後は減少ペースが緩やかになった（2090年にそれぞれ0.759と0.735）。出現種数と同様に、BECCSシナリオでは植林シナリオよりも類似度指数の低下が抑えられる傾向があったが、その差は大きくなかった（図-2.3b）。

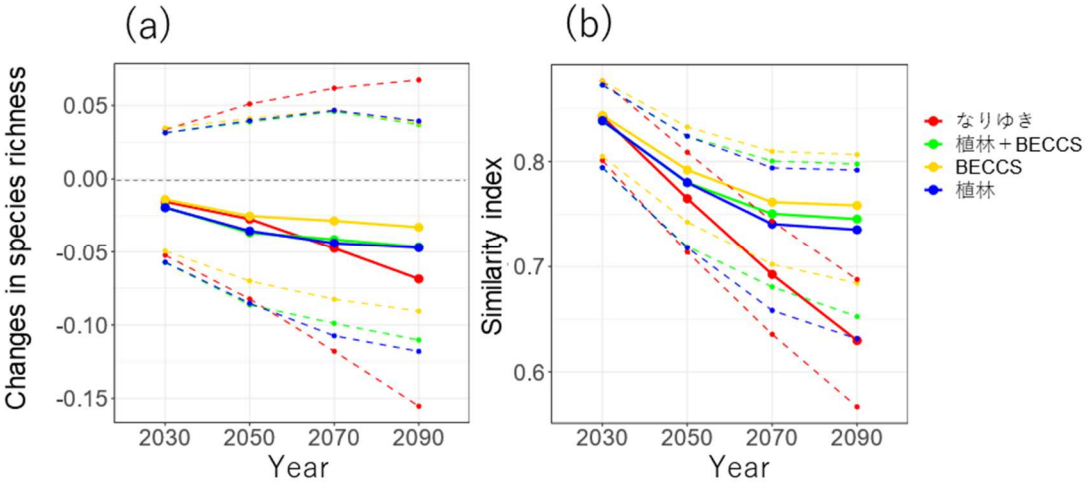

図-2.3 各グリッドにおける(a)出現種数の変化率と(b)Jaccard 類似度指数の時間変化。 (a)、(b)ともに、実線はグリッドごとに算出した指標値の中央値を示す。上下の破線はそれぞれ 75 パーセンタイル値と 25 パーセンタイル値を示す。

緩和策が生物多様性指標に与える影響は地域によって異なった（図-2.4）。多くの地域では、いずれのシナリオでも現在に比べて将来で出現種数が減少する傾向があり、特になりゆきシナリオで出現種数の減少率が最も大きかった（図-2.4a）。一方で、北半球の高緯度に位置する旧ソ連（地域9）やカナダ（地域11）では、いずれのシナリオでも種数が増加する傾向があった。これらの地域では、緩和策により出現種数の増加が抑えられる傾向があった。中国（地域2）、東南アジア（地域4）、その他ヨーロッパ（地域8）などでは、なりゆきシナリオと緩和シナリオの間で出現種数の変化率に顕著な差は見られなかった。類似度指数については、ほとんどの地域でなりゆきシナリオの中央値が緩和シナリオの中央値より低く、なりゆきシナリオでは地域の種構成が時間とともに大きく変化することが示された（図-2.4b）。なりゆきシナリオで出現種数が増加すると予測された旧ソ連とカナダでも、種構成は大きく変化することが予測された。

土地利用改変や炭素隔離により緩和に貢献した地域ほど、生物多様性の損失が大きくなることが予測された（図-2.5）。なりゆきシナリオ、緩和シナリオともに、土地利用改変の強度が大きい地域ほど出現種数が減少する傾向がみられた（図-2.5a）。また、BECCSシナリオ、植林シナリオともに、炭素隔離に貢献した地域ほど出現種数が減少する傾向があった（図-2.5b）。さらに、なりゆきシナリオではGDPが低い地域ほど出現種数が減少する傾向がみられたが、緩和策の実施により、地域間の差が小さくなる傾向があった（図-2.5c）。

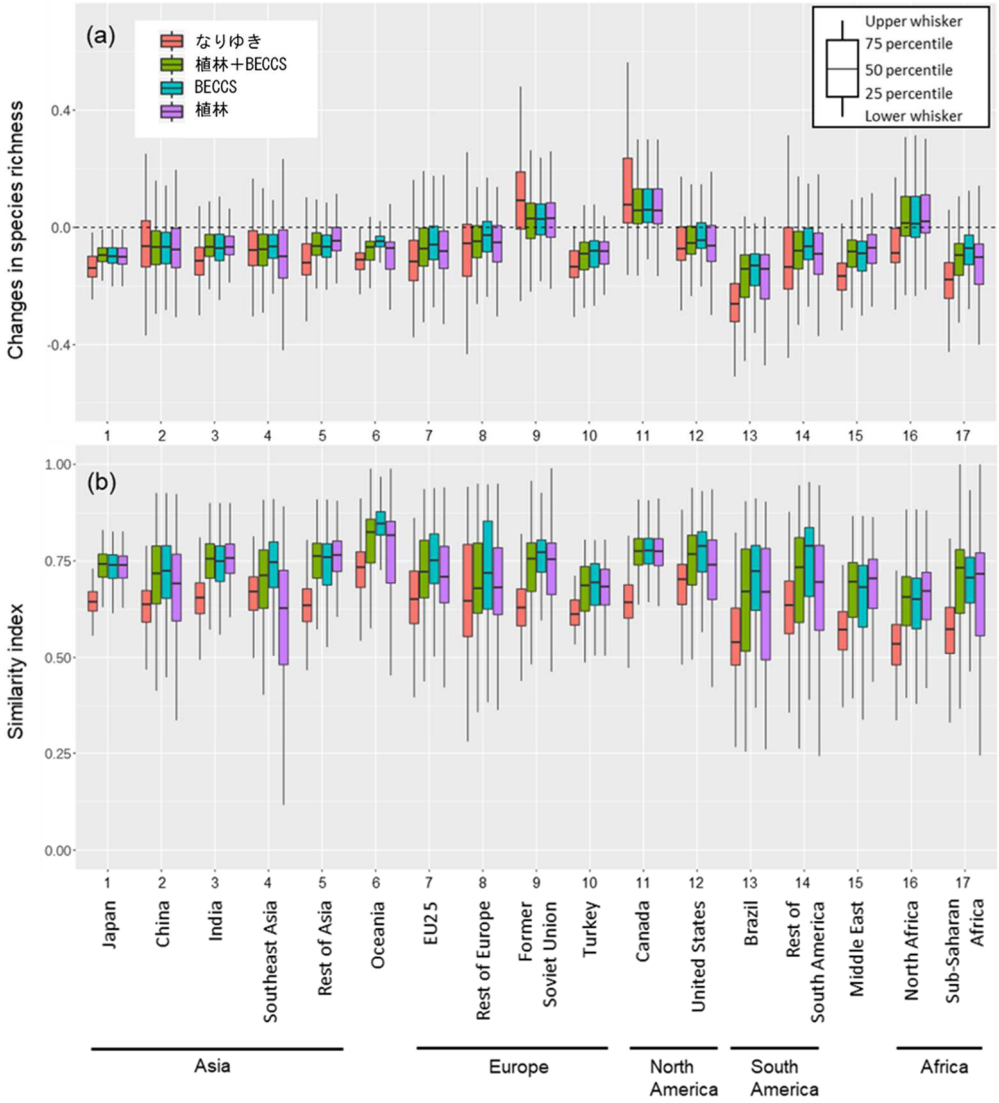

図-2.4 各将来シナリオにおける 2090 年の（a）出現種数の変化率と（b）Jaccard 類似度指数の地域差

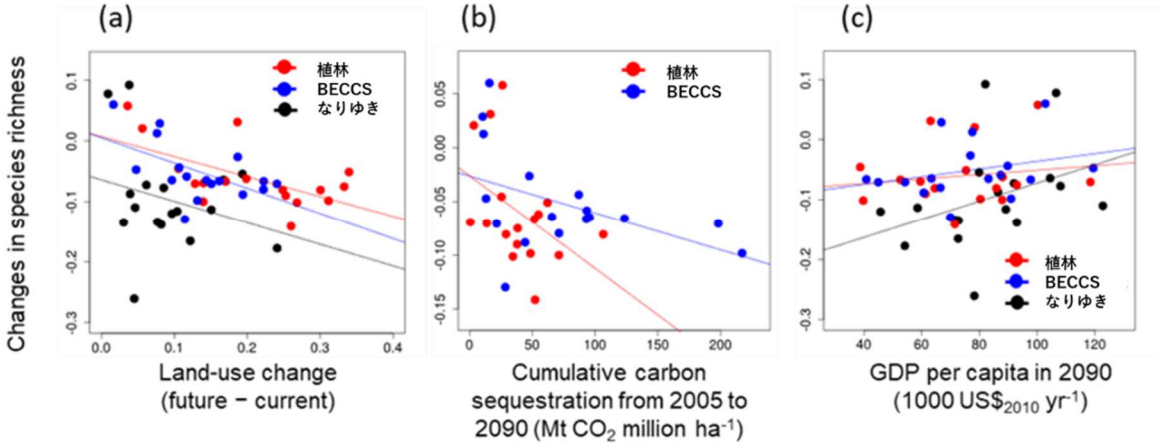

図-2.5 (a)2090 年の土地利用改変の強度と出現種数の変化率の関係、(b)2005 年から 2090 年の累積炭素隔離量と出現種数の変化率との関係、(c)2090 年の一人当たり GDP と出現種数の変化率との関係

本研究の結果は、BECCSや植林の導入に伴う土地利用改変の影響を考慮しても、土地利用ベースの緩和策による気候変動の緩和は、生物多様性の損失を抑える可能性があることを示した。一方で、緩和策

の影響は地域によって異なる可能性も示された。土地利用改変や炭素隔離によって緩和に貢献した地域ほど、生物多様性の損失が大きくなる傾向があった。このような緩和策の影響の地域間格差を減らすためには、既存の森林の適切な利用や管理、地域の生態系の特性に合った自然再生などを通じた炭素固定の増強など、気候変動緩和と生物多様性保全を両立可能な緩和策について検討していく必要がある。また、BECCSや新規植林等の土地利用ベースの気候変動緩和策に過度に依存せず、人為的な温室効果ガスの排出削減を着実に実行していくことも重要である。

[研究 2-3: 社会変革による生物多様性への影響]

研究方法で述べたように、世界全体へ社会変革を行った国際共同研究については、将来シミュレーションの結果、これまでの社会システムの延長線上の「成り行きシナリオ」では、生物多様性の損失は続き、2010-2050 年における損失は1970-2010 年における損失と同等かそれ以上になることが予測された。一方、自然保護・再生と食料システムの変革に向けた取り組みを最大限に実施する「社会変革実施シナリオ」では、生物多様性の損失が抑制され、2050 年以降に回復に向かう可能性があることが示された（図-2.6）。これは、統合評価モデルと生物多様性指標のほぼすべての組み合わせで示されている。この成果は、自然保護・再生と食料システムにおける大胆な社会変革が2020 年以降の生物多様性保全戦略にとって鍵となることを示している。

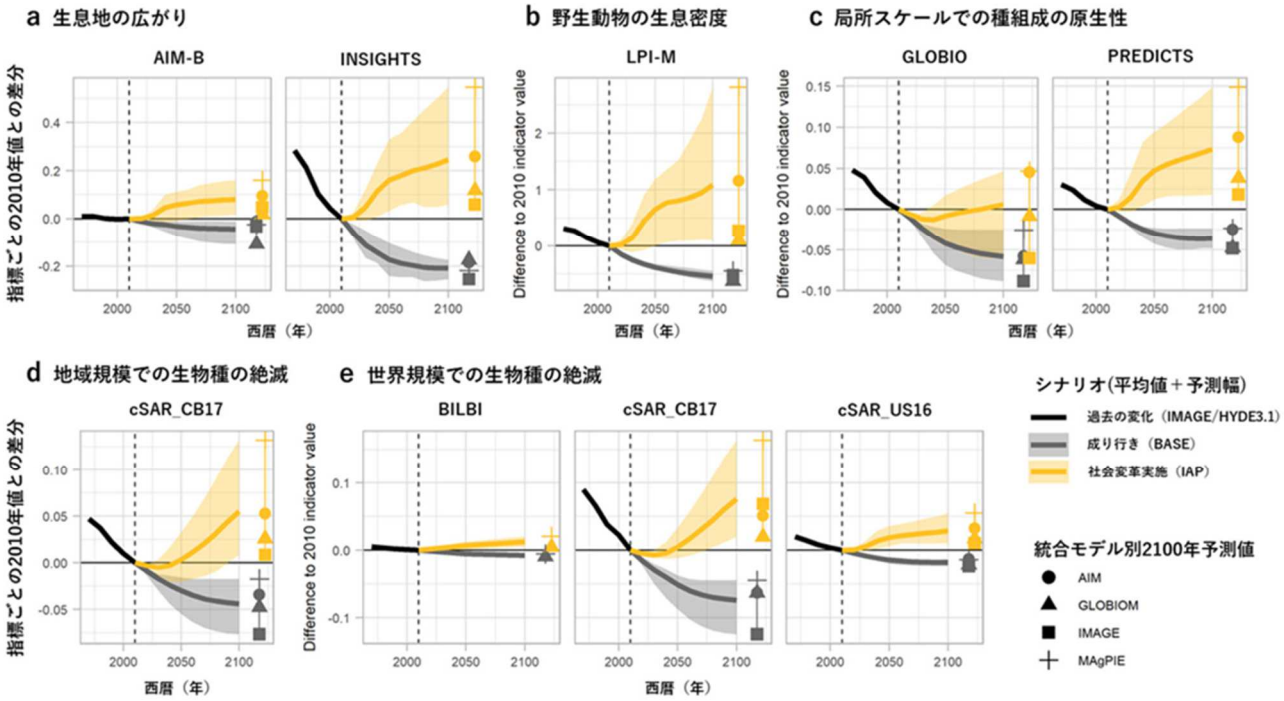

図-2.6 生物多様性への影響予測結果：これまでの社会システムの延長線上の「成り行きシナリオ(Base：灰色)」と自然保護・再生と食料システムの変革に向けた取り組みを最大限に実施する「社会変革実施シナリオ(IAP：オレンジ色)」について、9 つの生物多様性評価指標の変化(2000 年比)を予測した。これらの指標は（a)地球規模での生物の生息地の広がり（AIM-B、INSIGHTS）や、(b)野生動物の生息密度（LPI-M）、（c）局所スケールでの種組成の原生性（GLOBIO、PREDICTS）、（d）地域規模で生物種が絶滅せずに残存する割合（cSAR_CB17）、（e）世界規模で生物種が絶滅せずに残存する割合（BILBI、cSAR_CB17、cSAR_US16）など、生物多様性の様々な側面を表している。成り行きシナリオでは生物多様性は 2100 年まで損失傾向が続くのに対して、社会変革実施シナリオでは 2050 年頃までに生物多様性の損失を抑制し、それ以降は回復に向かうことが予測された。

次に、地域別の対策を導入した時の生態系の影響についてみてみる。潜在生息域の変化を地域別需要側対策シナリオごとにみると（図-2.7）、中南米ではブラジルで対策を実施する効果が最も大きく，次いで米国での対策の効果が大きい。中国などそれ以外の地域における対策の効果はほとんど見られな

い。アジアでは中国で対策を実施する効果が最も大きい。日本の対策は基本的に影響が小さいこともわかる。期間別の推移についてみると，全体としては期間前半に大きな変化がみられる。これは食料廃棄物削減が2030年までに進むことや肉食制限が2050年までで完了することに由来すると考えられる。期間後半はそれと比べるとなだらかな変化で、人口やGDPの変化等Baselineで想定される変化は上記のようなラディカルな変化と比べると生態系に対しても限られた影響しか与えないことに起因すると考えられる。鳥類及び哺乳類の潜在生息域の変化の推計結果を以下の図-2.8に示す。All シナリオにおける潜在生息域の変化率は，植物で6.3%，両生類で20.6%，爬虫類で-6.0%，鳥類で13.2%，哺乳類で5.4%となった。

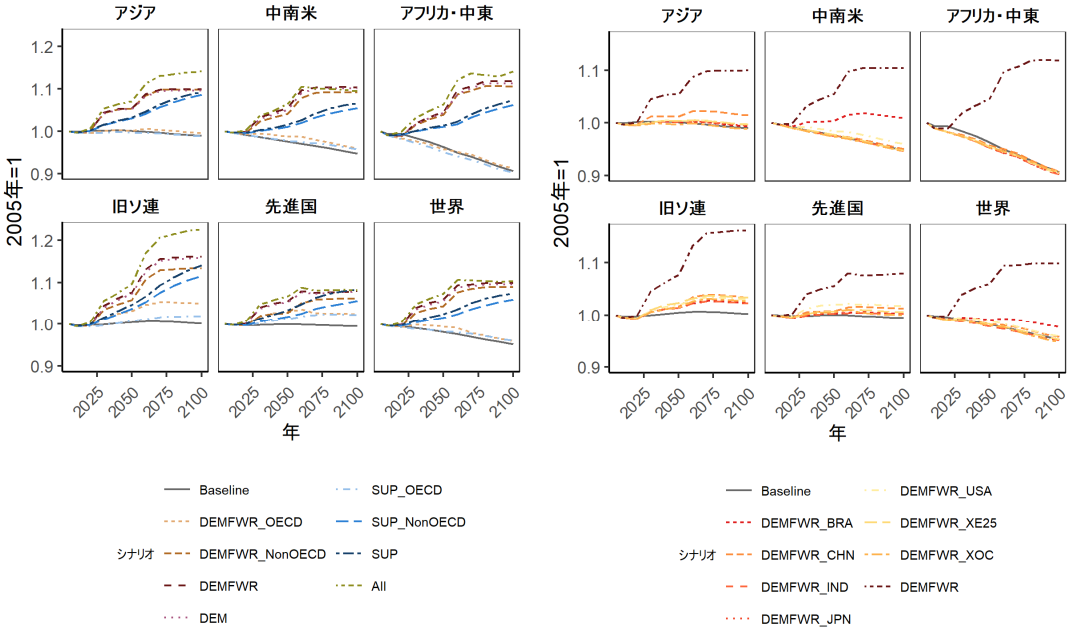

図-2.7　生産・需要側対策による生物の潜在生息域の変化（左）、需要側対策の地域別対策による生物の潜在生息域の変化（右）

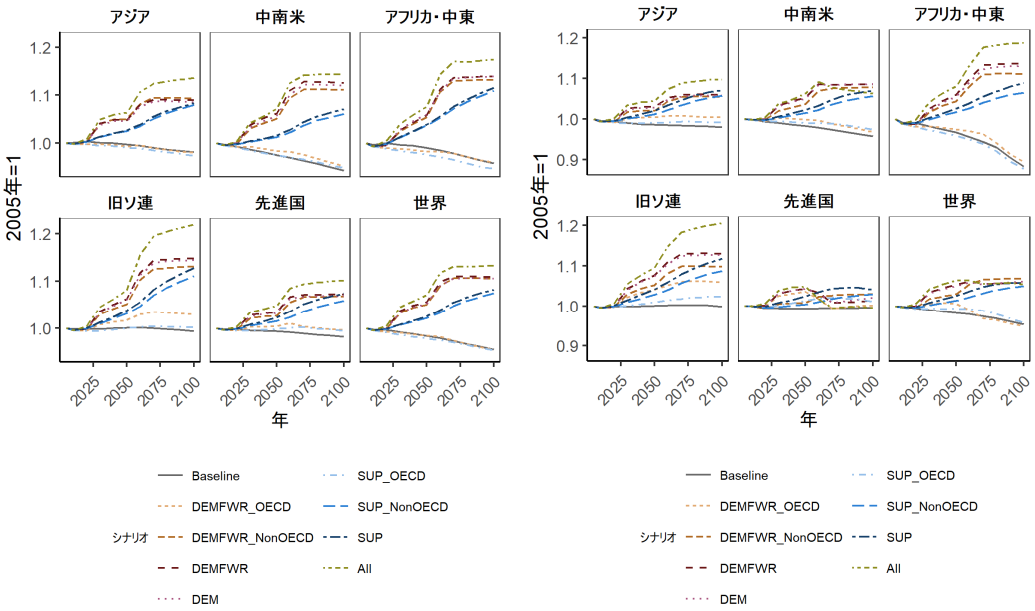

図-2.8　鳥類（左）、哺乳類（右）の潜在生息域の変化の推計結果

[研究 2-4: 極端現象を考慮した食料安全保障]

社会経済的な変化のみを考慮し、気候が現状のままだと仮定したベースラインシナリオでは飢餓リスク人口は 2050 年に 3 億 6000 万人と推計された。そこから「温暖化対策を行わなかったケース」、温室効果ガス削減を実施し「温暖化対策を最大限行ったケース」（いわゆるパリ協定の 2℃目標相当）について飢餓リスク人口を推計した。この時、作物モデルや気候の不確実性を考慮に入れると以下のことが示された。まず、温暖化対策なしケースと最大限対策を行ったケースでの飢餓リスク人口の中位値は、それぞれ 4 億 4000 万人、4 億人と推計された。一方で、2050 年時点で 100 年に 1 度程度の頻度の稀ではあるが非常に強い不作が発生すると、飢餓リスク人口は温暖化対策なしケースと温暖化対策を最大限行ったケースでそれぞれ 6 億人、5 億 3000 万人となった。気候や気候への作物の応答に由来する飢餓リスク人口の不確実性は、温暖化対策なしケースでは温暖化対策を最大限実施したケースに比較して、大きくなった。

さらに、これらの 100 年に 1 度の頻度で発生する不作によって発生する追加的な飢餓リスク人口の増加を回避するために、追加的に食料備蓄がどの程度必要になるかを推計した。その結果、温暖化対策なしケースでは 1 億 8000 万トンの穀類、金額にすると 330 億米ドル（日本円で約 3 兆 8000 億円相当）に達し、これは現在の世界全体の穀類の備蓄の約 1/4 に相当する。また、南アジアでは現在の備蓄の 3 倍に相当することがわかった。（図省略）

これらの結果は、温暖化の抑制に成功しない場合、貧困層に大きな被害が発生しうること、また飢餓リスクを抑えるために相応の追加的な適応策が必要であることを意味している。すなわち、温室効果ガス排出量を削減する緩和の努力はもちろんだが、今後顕在化してくる温暖化に備えて、国際協調等で温暖化に適応していくことの重要性を示唆している。

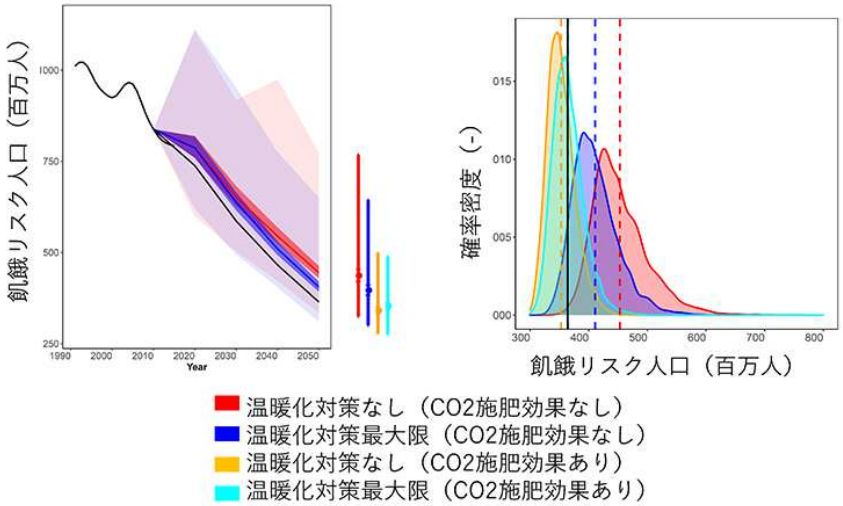

図-2.9 左は世界の飢餓リスク人口の推計。黒はベースラインシナリオ、赤、青はそれぞれ温暖化対策なしケースと温暖化対策を最大限実施したケースで CO2 施肥効果を考慮しない場合。黄、水色はそれぞれのケースに対して CO2 施肥効果を考慮した場合を表す（面グラフが重複するため 2050 年値のみグラフの右側に記載している）。また、濃い部分の幅は 65%タイルを表している。右図は 2050 年の頻度分布を表していて、黒はベースライン、破線は中位値を表す。色は左図と同様のシナリオを表す。

[研究 2-5: 土地利用モデルを用いたバイオエネルギーポテンシャルの推計]

分析の結果、第一に、消費側の取り組み(食肉制限)により、多くのバイオマスエネルギーポテンシャル量が得られることが示された。第二に、2℃目標達成に必要なバイオマスエネルギー量(150～250EJ に相当)は全世界食肉制限シナリオ(261EJ/年)、先進国食肉制限シナリオ(173EJ/年)、先進国以外食肉制限シナリオ(234EJ/年)において供給可能であることが示された。ベースラインシナリオと比べ、全世界で食肉制限したシナリオでは、食肉制限を行い牧草地や家畜の飼料の生産に要する農耕地の

土地の需要が減少し、バイオマス作物作付け地(未利用地)が増加し、より生産性の高い地域を確保することで、バイオマスエネルギーポテンシャル量が増加したためである。特に先進国以外の地域で食肉制限を行うことでバイオマス生産費用が低く、多くのバイオマスエネルギーポテンシャル量が得られることが示された（図-2.10）。第三に、地域別にみると、南米地域はどのシナリオにおいても最も高いバイオマスエネルギー量が供給可能で、世界の約半分を占めることが示された（図-2.11）。一方、中東/アフリカ地域では食肉制限シナリオにおいてバイオマスエネルギーポテンシャルが大幅に増加した。以上から、消費側の取り組み(食肉制限)を行うことによるバイオマスエネルギーポテンシャルの増加が期待でき、特に中東/アフリカ地域で最も高いポテンシャル量の増加が見込まれた。

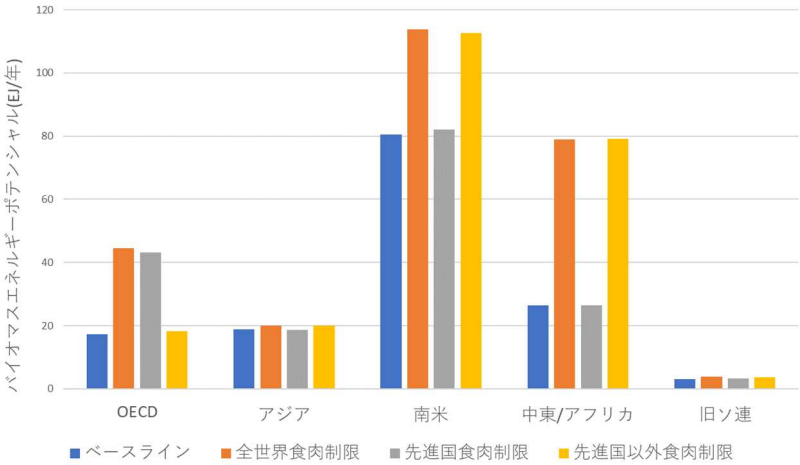

図-2.10　2050 年，各シナリオにおける地域別のバイオマスエネルギーポテンシャル（EJ/年）

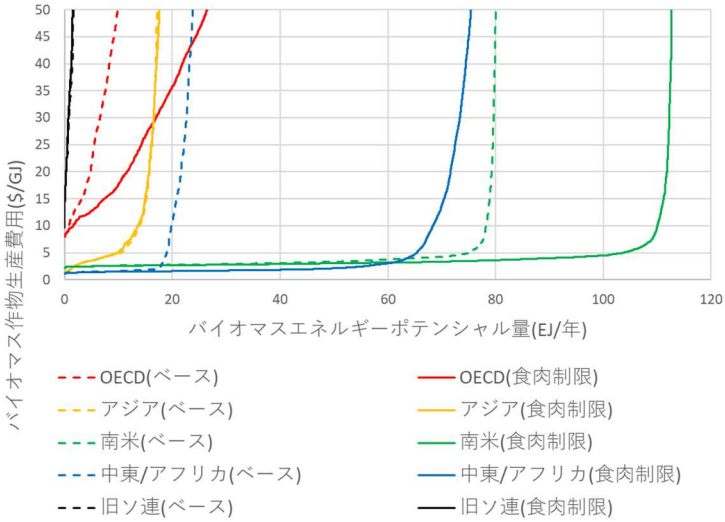

図-2.11　2050 年，各シナリオにおける地域別のバイオマスエネルギー供給曲線

[研究 2-6：炭素税税収の貧困解決への活用の潜在的可能性]

2030年における2℃目標相当のシナリオでの炭素税収入を絶対的貧困ギャップの世界総和と比較したところ、前者の値は後者の15倍であることがわかった（図-2.12右）。炭素税収入と絶対的貧困ギャップの差を国別に見た場合、炭素税収入の不足がナイジェリアや中央アフリカ共和国などの一部のアフリカ諸国で生じることが示された（図-2.12左）。炭素税収入のポテンシャルは、先進国や中国・インド等の2030年時点で中間所得国かつ人口が多い国では大きくなる。これらの国々で期待される炭素税収入に比して、アフリカ諸国に残る貧困ギャップの総和は小さく、例えば先進国（現在のOECD + EU）の炭素税収入の20%（GDPの約0.1%）で、アフリカで見られる貧困ギャップを補うことが出来る。炭素税収

入を国間で移転・再配分する想定の実現可能性に注意が必要だが、世界的な社会目標の達成へのヒントを与えるものである。

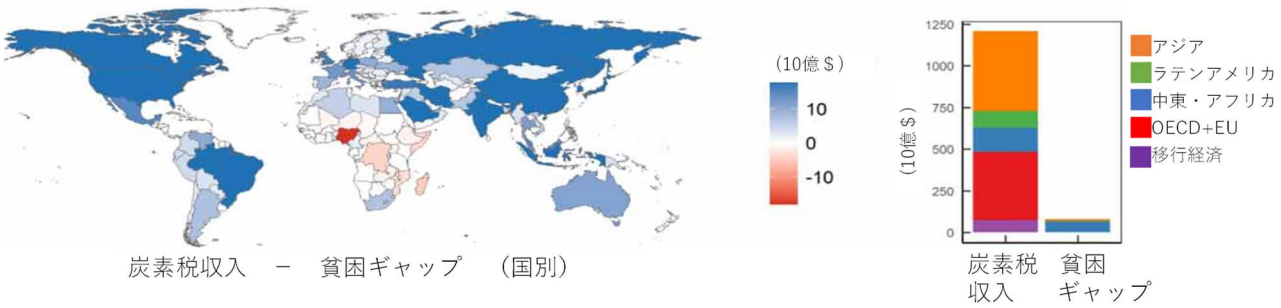

図-2.12 左：炭素税収入と貧困ギャップの差を取ったもので、青が濃いほど炭素税収が大きく、赤が濃いほど貧困ギャップが大きい国。右：炭素税と貧困ギャップの総量を 5 つの主要地域別で比較。

５．研究目標の達成状況

人口増加、経済成長といった社会経済と気候変動影響、気候変動緩和という多くの要素が複合的に絡み合う土地利用という接合点を中心にした統合評価モデリングの深化が当課題では行われ、「CO2ネットゼロ排出において重要な役割を担う植林とBECCSに関する諸問題へ答えを出す」という当初目標はサブテーマ1とサブテーマ2の研究成果を組み合わせることで明確に達成され、その答えは、以下の三点に要約される。第一に、植林やBECCS等の土地利用ベースの負の排出を実現する対策はネットゼロ排出において極めて重要な役割を果たし、世界全体のネットゼロ達成のためにはほぼ必須と考えられる。これは当該研究グループが開発してきたAIMモデルだけでなく、国際的なモデル比較研究でも明らかとなった。第二に、上記の植林とBECCSには様々な副作用の懸念があることも明らかとなった。バイオマスの食料安全保障への懸念は既往研究で指摘されてきたが、従来研究で指摘のなかった植林についてもその懸念があることが明らかとなった。第三に生態系から見た場合には、植林の面積当たりの炭素吸収量がバイオマスと比べて高くないことから、場合によっては植林のほうが BECCS以上に悪影響の懸念があるということもわかった。こういった懸念に対して、気候緩和策側の施策をよりきめ細やかに検討することの重要性が明らかとなった。そして、社会システム全体をより抜本的に変えていく食料嗜好の変化や食料廃棄物削減等は生態系保全に効果があることも明らかとなった。さらに食料安全保障は気候変動自体の影響も受け、それらに対する対応策も必要となる。また、数多くのNatureやNature姉妹紙での成果発表ができ、それらはIPCCの第6次評価報告書で引用されたこと、研究成果の発信にも努めプレスリリースも積極的に行ったことから、国内外の気候政策にも少なからず貢献してきたと考える。

以上のように、世界最先端となるモデル開発を通じて、当初の研究の問いに答え、さらに追加的に付随する関連研究も実施し、国内外で影響力のある成果を出したことから、当課題は当初計画以上の大きな成果が上がったと自己評価する。

６．引用文献

Ohashi H., Hasegawa T., Hirata A., Fujimori S., Takahashi K., Tsuyama I., Nakao K., Kominami Y., Tanaka N., Hijioka Y., Matsui T.: Nature Communications, 10, 5240 (2019) Biodiversity can benefit from climate stabilization despite adverse side effects of land based mitigation.

Ⅲ．研究成果の発表状況の詳細

（1）誌上発表

＜査読付き論文＞

【サブテーマ１】

1) Drouet, L., Bosetti, V., Padoan, S.A., Reis, L.A., Bertram, C., Longa, F.D., Després, J., Emmerling, J., Fosse, F., Fragkiadakis, K., Frank, S., Fricko, O., Fujimori, S., Harmsen, M., Krey, V., Oshiro, K., Nogueira, L.P., Paroussos, L., Piontek, F., Riahi, K., Rochedo, P.R.R., Schaeffer, R., Takakura, J., van der Wijst, K., van der Zwaan, B., van Vuuren, D., Vrontisi.Z, Weitzel.M, Zakeri.B, Tavoni.M：*Nature climate change*, 11, 1070-1076 (2021) Net zero-emission pathways reduce the physical and economic risks of climate change. (IF:28.862)

2) Fronzek, S., Honda, Y., Ito, A., Nunes, J.P., Pirttioja, N., Raisanen, J., Takahashi, K., Terama, E., Yoshikawa, M., Carter, T.R.：*Climate Risk Management* 38, 100466 (2022) Estimating impact likelihoods from probabilistic projections of climate and socio-economic change using impact response surfaces. (IF:5.266)

3) Fujimori, S., Wu, W., Doelman, J., Frank, S., Hristov, J., Kyle, p., Sands, R., van Zeist, W-J., Havlik, P., Domínguez, I ,P., Sahoo, A., Stehfest, E., Tabeau, A., Valin, H., van Meijl, H., Hasegawa, T., Takahashi, K.：*Nature Food*, 3, 101-121 (2022) Land-based climate change mitigation measures can affect agricultural markets and food security. (IF: 20.961)

4) Liu, J.Y., Fujimori, S., Takahashi, K., Hasegawa, T., Wu, W., Geng, Y., Takakura, J., Masui, T.：*Environmental Research Letters*, 16, 014010 (2020) The importance of socioeconomic conditions in mitigating climate change impacts and achieving Sustainable Development Goals. (IF:6.947)

5) Oda, T., Takakura, J., Tang, L., Iizumi, T., Itsubo, N., Ohashi, H., Kiguchi, M., Kumano, N., Takahashi, K., Tanoue, M., Tamura, M., Zhou, Q., Hanasaki, N., Hasegawa, T., Park, C., Hijioka, Y., Hirabayashi, Y., Fujimori, S., Honda, Y., Matsui, T., Matsuda, H., Yokoki, H., Oki, T.：*Environmental Research Letters* (in press) Total economic costs of climate change at different discount rates for market and non-market values. (IF: 6.947)

6) Park, C., Takahashi, K., Takakura, J., Li, F., Fujimori, S., Hasegawa, T., Ito, A., Lee, D.K.：*Earths Future*, 9, e2020EF001786 (2021) How will deforestation and vegetation degradation affect global fire activity? (IF:8.852)

7) Park, C., Takahashi, K., Li F., Takakura, J., Fujimori, S., Hasegawa, T., Ito, A., Lee, D.K., Thiery, W.：*Global Environmental Change*, 80, 102667 (2023) Impact of climate and socioeconomic changes on fire carbon emissions in the future: Sustainable economic development might decrease future emissions. (IF:11.160)

8) Shiogama, H., Fujimori, S., Hasegawa, T., Takahashi, K., Kameyama, Y., Emori, S.：*Environmental Research Communications*, 3, 061002 (2021) How many hot days and heavy precipitation days will grandchildren experience that break the records set in their grandparents' lives? (IF:3.237)

9) Shiogama, H., Watanabe, M., Kim, H., Hirota, N.：*Nature*, 602, 612-616 (2022) Emergent constraints on future precipitation changes. (IF:69.504)

10) Shiogama, H., Takakura J., Takahashi K.：*Environmental Research Letters*, 17, 124028 (2022) Uncertainty constraints on economic impact assessments of climate change simulated by an impact emulator. (IF:6.947)

11) Su, X., Tachiiri K., Tanaka, K., Watanabe M., Kawamiya M.：*One Earth*, 5(12), 1-13 (2022)

Identifying crucial emission sources under low forcing scenarios by a comprehensive attribution analysis. (IF:14.944)

12) Takakura, J., Fujimori, S., Takahashi, K., Hanasaki, N., Hasegawa, T., Hirabayashi, Y., Honda, Y., Iizumi, T., Park, C., Tamura, M., Hijioka, Y.: *Geoscientific Model Development*, **14**, 3121-3140 (2021) Reproducing complex simulations of economic impacts of climate change with lower-cost emulators. (IF:6.892)

13) Tanaka, K., Boucher, O., Ciais, P., Johansson, D.J.A., Morfeldt, J.: *Science Advances*, https://doi.org/10.1002/essoar.10505031.3 (2021) Cost-effective implementation of the Paris Agreement using flexible greenhouse gas metrics. (IF:14.980)

14) Tanaka, K., Azar, C., Boucher, O., Ciais, P., Gaucher, Y., Johansson, D.J.A.: *Climatic Change* **172**, 1, (2022) Paris Agreement requires substantial, broad, and sustained policy efforts beyond COVID19 public stimulus packages. (IF:5.174)

15) Wu, W., Hasegawa, T., Fujimori, S., Takahashi, K., Oshiro, K.: *Renewable Energy*, **162**, 308-321 (2020) Assessment of bioenergy potential and associated costs in Japan for the 21st century. (IF:8.634)

16) Wu, W., Takahashi, K., Zhou, L., Jin, S.: *Journal of Cleaner Production*, **265**, 121606 (2020) Income inequality and the distributional effects of elevated carbon dioxide on dietary nutrient deficiency. (IF:11.072)

17) 高橋潔: *地球環境*, **27(2)**, 161-168 (2022) 気候変動影響からみた日本の脱炭素社会構築：相互作用に注目して.

18) 増井利彦、高橋潔: *環境科学会誌*, **36(2)**, 83-93(2023) 脱炭素社会の実現に向けたモデル研究の状況と展望-アジア太平洋統合評価モデルAIMを通じた考察-.

【サブテーマ２】

1) Daioglou, V., Rose, S.K., Bauer, N., Kitous, A., Muratori, M., Sano, F., Fujimori, S., Gidden, M.J., Kato, E., Keramidas, K., Klein, D., Leblanc, F., Tsutsui, J., Wise, M., van Vuuren, D.P.: *Climatic Change*, **163**, 1603-1620 (2020) Bioenergy technologies in long-run climate change mitigation: results from the EMF-33 study. (IF:5.174)

2) Duan, H., Zhou, S., Jiang, K., Bertram, C., Harmsen, M., Kriegler, E., van Vuuren, D., Wang, S., Fujimori, S., Tavoni, M., Ming, X., Keramidas, K., Iyer, G., Edmonds, J. : *Science*, **372**, 378-385 (2021) Assessing China's efforts to pursue the 1.5℃ warming limit. (IF:63.832)

3) Fujimori, S., Hasegawa, T., Takahashi, K., Dai, H., Liu, J.-Y., Ohashi, H., Xie, Y., Zhang, Y., Matsui, T., Hijioka, Y.: *Environmental Research Letters*, **15**, 085004 (2020) Measuring the sustainable development implications of climate change mitigation. (IF: 6.947)

4) Fujimori, S., Hasegawa, T., Oshiro, K.: *Environmental Research Letters,* **15**, 114063 (2020) An assessment of the potential of using carbon tax revenue to tackle poverty. (IF:6.947)

5) Grassi, G., Stehfest, E., Rogelj, J., van Vuuren, D., Cescatti, A., House, J., Nabuurs, G.J., Rossi, S., Alkama, R., Abad Viñas, R., Calvin, K., Ceccherini, G., Federici, S., Fujimori, S., Gusti, M., Hasegawa, T., Havlik, P., Humpenöder, F., Korosuo, A., Perugini, L., Francesco N. T., Popp, A. : *Nature Climate Change*, **11**, 425-434 (2021) Critical adjustment of land mitigation pathways for assessing countries' climate progress. (IF:28.862)

6) Harmsen, M., Kriegler, E., van Vuuren, D., van der Wijst, K., Luderer, G., Cui, R., Dessens, O., Drouet, L., Emmerling, J., Faye Morris, J.: *Environmental Research Letters*, **16**, 054046 (2021) Integrated assessment model diagnostics: key indicators and model evolution.

(IF:6.947)

7) Hasegawa, T., Fujimori, S., Frank, S., Humpenöder, F., Bertram C., Després, J., Drouet, L., Emmerling, J., Gusti, M., Harmsen, M., Keramidas, K., Ochi, Y., Oshiro, K., Rochedo, P., van Ruijven, B., Cabardos, A., Deppermann, A., Fosse, F., Havlik, P., Krey, V., Popp, A., Schaeffer, R., van Vuuren, D., Riahi, K.: *Nature Sustainability,* **4**, 1052-1059 (2021) Land-based implications of early climate actions without global net-negative emissions. (IF:27.157)

8) Hasegawa, T., Sakurai, G., Fujimori, S., Takahashi, K., Hijioka, Y., Masui, T.: *Nature Food*, **2**, 587-595 (2021) Extreme climate events increase risk of global food insecurity and adaptation needs. (IF:20.961)

9) Hasegawa, T., Fujimori, S., Havlík, P., Valin, H., Bodirsky, B.L., Doelman, J.C., Fellmann, T., Kyle, P., Koopman, J.F.L., Lotze-Campen, H., Mason-D'Croz, D., Müller, C., Ochi, Y., Pérez Domínguez, I., Stehfest, E., Sulser, T.B., Tabeau, A., Takahashi, K., Takakura, J., van Meijl, H., van Zeist, W.-J., Wiebe, K., Witzke, P.: *Nature climate change,* **10**, 420-421 (2020) Reply to: An appeal to cost undermines food security risks of delayed mitigation. (IF:28.862)

10) Hasegawa, T., Sands, R.D., Brunelle, T., Cui, Y., Frank, S., Fujimori, S., Popp, A.: *Climatic Change,* **163**, 1587-1601 (2020) Food security under high bioenergy demand toward long-term climate goals. (IF:5.174)

11) Herrando-Moraira, S., Nualart, N., Galbany-Casals, M., Garcia-Jacas, N., Ohashi, H., Matsui, T., Susanna, A., Tang, C, Q., López-Pujol, J.: *Scientific Data*, **9**, 48 (2022) Climate Stability Index maps, a global high resolution cartography of climate stability from Pliocene to 2100. (IF:8.501)

12) Hirata, A., Kominami, Y., Ohashi, H., Tsuyama, I., Tanaka, N., Nakao, K., Hijioka, Y., Matsui, T.: *Science of the Total Environment*, 827 (2022) Global estimates of stress-reflecting indices reveal key climatic drivers of climate-induced forest range shifts. (IF:10.754)

13) Hoang, N, T., Taherzadeh, O., Ohashi, H., Yonekura, Y., Nishijima, S., Matsui, T., Matsuda, H., Moran, D., Kanemoto, K.: *The Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, **120(23)**, e2208376120 (2023) Mapping potential conflicts between global agriculture and terrestrial conservation. (IF:12.779)

14) Hurtt, G.C., Chini, L., Sahajpal, R., Frolking, S., Bodirsky, B.L., Calvin, K., Doelman, J.C., Fisk, J., Fujimori, S., Klein Goldewijk, K., Hasegawa, T., Havlik, P., Heinimann, A., Humpenöder, F., Jungclaus, J., Kaplan, J.O., Kennedy, J., Krisztin, T., Lawrence, D., Lawrence, P., Ma, L., Mertz, O., Pongratz, J., Popp, A., Poulter, B., Riahi, K., Shevliakova, E., Stehfest, E., Thornton, P., Tubiello, F.N., van Vuuren, D.P., Zhang, X.: *Geoscientific Model Development,* **13**, 5425-5464 (2020) Harmonization of global land use change and management for the period 850-2100 (LUH2) for CMIP6. (IF:6.892)

15) Kitazawa, M., Yamaura, Y., Senzaki, M., Hanioka, M., Ohashi, H., Oguro, M., Matsui, T., Nakamura, F.: *Proceedings of the Royal society B: Biological Sciences* **289** 20220338 (2022) Quantifying the impacts of 166 years of land cover change on lowland bird communities. (IF:5.531)

16) Leclère, D., Obersteiner, M., Barrett, M., Butchart, S.H.M., Chaudhary, A., De Palma, A., DeClerck, F.A.J., Di Marco, M., Doelman, J.C., Dürauer, M., Freeman, R., Harfoot, M., Hasegawa, T., Hellweg, S., Hilbers, J.P., Hill, S.L.L., Humpenöder, F., Jennings, N., Krisztin, T., Mace, G.M., Ohashi, H., Popp, A., Purvis, A., Schipper, A.M., Tabeau, A.,

Valin, H., van Meijl, H., van Zeist, W.-J., Visconti, P., Alkemade, R., Almond, R., Bunting, G., Burgess, N.D., Cornell, S.E., Di Fulvio, F., Ferrier, S., Fritz, S., Fujimori, S., Grooten, M., Harwood, T., Havlík, P., Herrero, M., Hoskins, A.J., Jung, M., Kram, T., Lotze-Campen, H., Matsui, T., Meyer, C., Nel, D., Newbold, T., Schmidt-Traub, G., Stehfest, E., Strassburg, B.B.N., van Vuuren, D.P., Ware, C., Watson, J.E.M., Wu, W., Young, L.: *Nature,* 585(7826), 551-556 (2020) Bending the curve of terrestrial biodiversity needs an integrated strategy. (IF:69.504)

17) Mori, A., Dee, E.L., Gonzalez, A., Cowles, J., Wright, J.A., Loreau, M., Hautier, Y., Newbold, T., Reich, B.P., Matsui, T., Ohashi, H., Okada, K., Seidl, R., Isbell, F.: *Nature Climate Change*. https://doi.org/10.1038/s41558-021-01062-1 (2021) Biodiversity-productivity relationships are key to nature-based climate solutions. (IF:28.862)

18) Nyairo R., Hasegawa, T., Fujimori, S., Wu, W., Takahashi, K.: *Biomass and Bioenergy*, 159, 106426 (2022) Socio-economic trajectories, urban area expansion and ecosystem conservation affect global potential supply of bioenergy. (IF:5.774)

19) Nishiura, O., Tamura, M., Fujimori, S., Takahashi, K., Takakura, J., Hijioka, Y.: *Sustainability,* 12, 3737 (2020) An Assessment of Global Macroeconomic Impacts Caused by Sea Level Rise Using the Framework of Shared Socioeconomic Pathways and Representative Concentration Pathways. (IF:3.889)

20) O'Neill, B.C., Carter, T.R., Ebi, K, Harrison, P.A., Kemp-Benedict, E., Kok, K., Kriegler, E., Preston, B.L., Riahi, K., Sillmann, J., van Ruijven, B.J., van Vuuren, D., Carlisle, D., Conde, C., Fuglestvedt, J., Green, C., Hasegawa T., Leiniger, J., Monteith, S., Pichs-Madruga, R.: *Nature Climate Change,* 10(12), 1074-1084 (2021) Achievements and needs for the climate change scenario framework. (IF:28.862)

21) Oshiro, K., Fujimori, S.: *Applied Energy*, 313, 118803 (2022) Role of hydrogen-based energy carriers as an alternative option to reduce residual emissions associated with mid-century decarbonization goals. (IF:11.446)

22) Prasetyo, E., Setiawan, F., WIDIYATNO, N, M., Ohashi, H., Tsumura, Y., Tsuyama, I., Matsui, T.: *Japan Agricultural Research Quarterly* 56(3) 269-281 (2022) Predicting *Tectona grandis* Suitability to Evaluate Potential Plantation Areas under Future Climate on Java, Indonesia. (IF:0.451)

23) Pueyo-Herrera, P., Tang, C. Q., Matsui, T., Ohashi, H., Qian, S., Yang, Y., Herrando-Moraira, S., Nualart N., López-Pujol J.: New Forests (2022) https://doi.org/10.1007/s11056-022-09960-8. Ecological niche modeling applied to the conservation of the East Asian relict endemism Glyptostrobus pensilis (Cupressaceae). (IF:2.697)

24) Rafaj, P., Kiesewetter, G., Krey, V., Schoepp, W., Bertram, C., Drouet, L., Fricko, O., Fujimori, S., Harmsen, M., Hilaire, J., Huppmann, D., Klimont, Z., Kolp, P., Reis, L.A., van Vuuren, D.: *Environmental Research Letters*, 16, 045005 (2021) Air quality and health implications of 1.5 ◦C-2 ◦C climate pathways under considerations of ageing population: a multi-model. (IF:6.947)

25) Riahi, K., Bertram, C., Huppmann, D., Rogelj, J., Bosetti, V., Cabardos, A., Deppermann, A., Drouet, L., Frank, S., Fricko, O., Fujimori, S., Harmsen, M., Hasegawa, T., Krey, V., Luderer, G., Paroussos, L., Schaeffer, R., Weitzel, M., van der Zwaan, B., Vrontisi, Z., Longa, F.D., Despres, J., Fosse, F., Fragkiadakis, K., Gusti, M., Humpenoder, F., Keramidas, K., Kishimoto, P., Kriegler, E., Meinshausen, M., Nogueira, L.P., Oshiro, K., Popp, A., Rochedo, P.R.R., Unlu, G., van Ruijven, B., Takakura, J., Tavoni, M., van Vuuren, D.,

Zakeri, B.: *Nature Climate Change*, **11**, 1063-1069 (2021) Cost and attainability of meeting stringent climate targets without overshoot. (IF:28.862)

26) Rose, S.K., Bauer, N., Popp, A., Weyant, J., Fujimori, S., Havlik, P., Wise, M., van Vuuren, D.: *Climatic Change*, **163**, 1539-1551 (2020) An overview of the Energy Modeling Forum 33rd study: assessing large-scale global bioenergy deployment for managing climate change. (IF:5.174)

27) Rose, S.K., Popp, A., Fujimori, S., Havlik, P., Weyant, J., Wise, M., van Vuuren, D., Brunelle, T., Cui, R.Y., Daioglou, V., Frank, S., Hasegawa, T., Humpenöder, F., Kato, E., Sands, R.D., Sano, F., Tsutsui, J., Doelman, J., Muratori, M., Prudhomme, R., Wada, K., Yamamoto, H.: *Climatic Change*, **172**, Article3 (2022) Global biomass supply modeling for long-run management of the climate system. (IF:5.174)

28) Tang, C, Q., Matsui, T., Ohashi, H., Nualart, N., Herrando-Moraira, S., Dong, Y-F., Grote, P, J., Van, N,N., Sam, H,V., Li, S., Han, P-B., Shen L-Q., Huang, D-S., Peng M-C., Wang, C-Y., Li, X-S., Yan, H-Z., Zhu, M-Y., Lu, X., Wen, J-R., Yao, S-Q., Du M-R., Shi, Y-C., Xiao, S-L., Zeng, J-L., Wang, H-C., López-Pujol, J.: *Biological Conservation*, 273 109663 (2022) Identifying long-term stable refugia for dominant *Castanopsis* species of evergreen broad-leaved forests in East Asia: a tool for ensuring their conservation. (IF:7.499)

29) Yalew, S.G., van Vliet, M.T.H., Gernaat, D.E.H.J., Ludwig, F., Miara, A., Park, C., Byers, E., De Cian, E., Piontek, F., Iyer, G., Mouratiadou, I., Glynn, J., Hejazi, M., Dessens, O., Rochedo, P., Pietzcker, R., Schaeffer, R., Fujimori, S., Dasgupta, S., Mima, S., da Silva, S.R.S., Chaturvedi, V., Vautard, R., van Vuuren, D.P.: *Nature Energy*, **5**, 794-802 (2020) Impacts of climate change on energy systems in global and regional scenarios. (IF:67.439)

30) van Zeist, W.-J., Stehfest, E., Doelman, J.C., Valin, H., Calvin, K., Fujimori, S., Hasegawa, T., Havlik, P., Humpenöder, F., Kyle, P., Lotze-Campen, H., Mason-D'Croz, D., van Meijl, H., Popp, A., Sulser, T.B., Tabeau, A., Verhagen, W., Wiebe, K.: *Global Environmental Change*, **64**, 102120 (2020) Are scenario projections overly optimistic about future yield progress? (IF:11.160)

31) Zhao, S., Fujimori, S., Hasegawa, T., Oshiro, K., Sasaki, K.: *Sustainability Science*, **17**, 2513-2528, doi:10.1007/s11625-022-01206-y (2022) Poverty and inequality implications of carbon pricing under the long-term climate target. (IF:7.196)

32) 伊藤涼太朗、長谷川知子、藤森真一郎、花崎直太: *土木学会論文集G（環境）*, **77(5)**, I_191-I_196 (2021) 世界を対象とした第二世代バイオマスエネルギーポテンシャル量の推計とそれに伴う水消費量・窒素肥料必要量の環境影響.

33) 伊藤涼太朗、長谷川知子、藤森真一郎：*土木学会論文集G（環境）*, **78(5)**, I_79-I_85 (2022) 食内容を考慮したバイオマスエネルギーポテンシャル量の推計.

34) 井上笑瑠、長谷川知子、渡邉諒一、藤森真一郎: *土木学会論文集G（環境）*, **77(5)**, I_167-I_176 (2021) 気候変動およびその対策に伴う対流圏オゾン軽減がもたらす食料消費および飢餓リスク人口への影響評価.

35) 大城賢、藤森真一郎、長谷川知子、明石修: *土木学会論文集G（環境）*, **76(5)**, I_243-I_252 (2020) アジアにおける温室効果ガス短期削減目標が2050年までのエネルギー投資に及ぼす影響.

36) 太畑祐輔、長谷川知子、越智雄輝、高橋潔: *土木学会論文集G(環境)*、**76(5)**, I_433-I_439 (2020) 気候変動対策による低栄養に起因する健康被害評価.

37) 桑葉祐斗、長谷川知子、藤森真一郎、スィルバ　エラン　ディエゴ: *土木学会論文集G(環境)* **77(5)**, I_183-I_190 (2021) 世界における将来の土地利用変化を考慮した風力・太陽光エネルギーポテンシ

ャル推計.

38) 関沢賢、渡邉諒一、藤森真一郎、大城賢、上田佳代: *土木学会論文集G（環境）*, 78(5), I_239-I_250 (2022) 全世界を対象とした異なるPM2.5由来の健康影響評価関数に関する研究.

39) 関祐哉、長谷川知子、藤森真一郎: *土木学会論文集G（環境）*, 76(5), I_89-I_95 (2020) 世界を対象にした洪水による作物収量変化を通じた食料消費と飢餓リスクへの影響評価.

40) 西浦理、藤森真一郎、大城賢: *土木学会論文集G（環境）*, 76(5), I_97-I_107 (2020) アジア各国における温室効果ガス大幅削減に必要な対策とその経済的影響の要因分析.

41) 西浦理、藤森真一郎、大城賢: *土木学会論文集G（環境）*, 78(5), I_417-I_427 (2022) 二酸化炭素直接回収技術を考慮した応用一般 均衡モデルの開発および気候変動緩和策の評価.

42) 藤森真一郎、大橋春香、越智雄輝、長谷川知子、ニャイロリスパーブヤキ、松井哲哉、平田晶子、高橋潔、土屋一彬：*土木学会論文集G（環境）*78(5), 39-50 (2022) 生態系保全のための農業・食料消費・土地利用管理システムの変革.

43) 渡邉諒一、藤森真一郎、長谷川知子、大城賢: *土木学会論文集G（環境）*, 76(5), I_129-I_140 (2020) 世界を対象とした対流圏オゾンの作物収量に対する影響と気候政策の副次的便益に関する研究.

44) 渡邉諒一、上谷明生、関沢賢、藤森真一郎、長谷川知子、大城賢: *土木学会論文集G（環境）*, 78(5), I_251-I_262 (2022) 世界全域を対象とした水平解像度を用いた大気汚染の影響評価.

＜その他誌上発表（査読なし）＞

【サブテーマ１】

1) 塩竈秀夫: *CROSS T&T*, 71, 19-22 (2022) 降水量の将来変化予測の不確実性低減.

2) 高倉潤也: *リスク学研究*, 32(2), 91-95 (2023) 気候変動に関する地球規模でのリスク評価.

3) 増井利彦、亀山康子、高橋潔: *地球環境*, 27(2), 71-75 (2022) 序論：ネットゼロに向けた世界の中での日本.

【サブテーマ２】

1) Jansakoo, T., Fujimori, S.: *Environmental & Sanitary Engineering Research*, 36-3, 44-47 (2022) The influence of agricultural ammonia emissions reduction on air pollution and human health.

2) Rose, S.K., Bauer, N., Popp, A., Weyant, J., Fujimori, S., Havlik, P., Wise, M., van Vuuren, D.: *Climatic Change*, 163, 1539-1551 (2020) An overview of the Energy Modeling Forum 33rd study: assessing large-scale global bioenergy deployment for managing climate change. (IF:5.174)

3) Zhao, S., Fujimori, S., Oshiro, K., Hasegawa, T.: *Environmental & Sanitary Engineering Research*, 35-3, 135-137(2021) Poverty and inequality implications of carbon pricing under the long-term climate target.

4) Zhao, S., Fujimori, S., Oshiro, K., Sasaki, K., Hasegawa, T.: *Proceedings of the 30th Symposium on Global Environment*, 83-88 (2022) Household energy security under stringent climate change mitigation goals of the Paris Agreement.

5) ZHAO, S., Fujimori, S., Oshiro, K., Sasaki, K., Hasegawa, T.: *Environmental & Sanitary Engineering Research*, 36-3, 60-62 (2022) Household energy security under stringent climate change mitigation.

6) 市森将貴、長谷川知子、藤森真一郎: *第29回地球環境シンポジウム講演集* 29, 29-36 (2021) 将来の社会経済状況の不確実性を考慮した洪水による食料消費と飢餓リスク人口への影響評価.

7) 上谷明生、関沢賢、藤森真一郎、大城賢、長谷川知子、渡邉諒一: *環境衛生工学研究*36-3, 51-53 (2022) 世界全域を対象とした異なる水平解像度を用いた大気汚染の影響評価.

8) 大橋春香、長谷川知子、平田晶子、藤森真一郎、高橋潔、津山幾太郎、中尾勝洋、小南裕志、田中

信行、肱岡靖明、松井哲哉: *JATAFF ジャーナル*, 8(7), 30-34 (2020) 生物多様性の保全と温室効果ガス排出削減策の両立可能性を評価する.

9) 佐々木克哉、藤森真一郎、大城賢、長谷川知子: *環境衛生工学研究*, 35-3, 141-143 (2021) 家計の消費行動変化を考慮した日本における炭素税の異なる所得階層への影響.

10) 佐々木克哉、藤森真一郎、大城賢、長谷川知子、趙詩雅: *第30回地球環境シンポジウム講演集*, 77-82 (2022) 異なる所得階層を考慮した家計の食料需要モデルの開発

11) 関沢賢、藤森真一郎、大城賢、渡邉諒一、上田佳代: *環境衛生工学研究*, 36-3, 48-50 (2022) 全世界を対象としたPM2.5由来の健康影響推計手法に関する検討.

12) 西浦理、藤森真一郎、大城賢: *環境衛生工学研究*, 34(3), 4-6 (2020) アジア各国における温室効果ガスの大幅な削減に必要な対策とその経済的な影響の要因分析.

13) 西浦理、藤森真一郎、大城賢: *環境衛生工学研究*, 35-3, 144-146 (2021) 世界およびアジアにおける炭素地下貯留技術の物理的制約を考慮した気候変動緩和策の評価.

14) 松井そら、藤森真一郎、大城賢、西浦理: *環境衛生工学研究* 35-3, 124-126 (2021) 交通部門の社会変革が気候変動政策へ及ぼす影響.

15) 松井哲哉、平田晶子、中尾勝洋、堀田昌伸、津山幾太郎、松橋彩衣子、高野(竹中)宏平、尾関雅章: *気候変動適応技術の社会実装ガイドブック*, 178-182 (2020) 森林生態系への影響評価.

16) 松井哲哉: *環境情報科学*, 50(1), 12-18 (2021) 気候変動による森林生態系への影響評価：最近の研究事例紹介.

17) 松井哲哉: *森林学の百科事典 日本森林学会編*, 602-605 (2021) 天然林への影響と適応策.

18) 松井哲哉: *愛しの生態系　研究者とまもる「陸の豊かさ」 前迫ゆり責任編集*, 202-207 (2023) 日本の植生の過去，現在，未来.

（２）口頭発表（学会等）

【サブテーマ１】

1) Bossy, T., Gasser, T., Ciais, P., Tanaka, K., Lecocq, F.: 2nd International Conference on Negative CO2 Emissions, Gothenburg, Sweden (2022) Negative CO2 emissions to keep the Paris Agreement reachable.

2) Bossy, T., Gasser, T., Ciais, P., Tanaka, K., Lecocq, F.: European Geosciences Union General Assembly 2022, Vienna, Austria (2022) Points of no return to respect the Paris Agreement.

3) Gaucher, Y., Ciais, P., Boucher, O., Tanaka, K.: American Geophysical Union Fall Meeting 2021 (Online) (2021) The limited impact of green recovery packages on CO2 emission pathways.

4) Gaucher, Y., Tanaka, K., Ciais, P., Goll, D., Johansson, D.J.A.: Fifteenth Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) Annual Meeting 2022, College Park, USA (2022) Exploring the role of enhanced weathering under stabilization and overshoot scenarios.

5) Goll, D., Ciais, P., Tanaka, K., Amann, T., Hartmann, J., Vicca, S., Janssens, I., Penuelas, J., Obersteiner, M., Chang, J., Li, W., Elker, S., Buermann, W.: 2nd International Conference on Negative CO2 Emissions, Gothenburg, Sweden (2022) Carbon dioxide removal from enhanced weathering by ecosystem responses to powdered rock.

6) Gurriaran, L., Tanaka, K., Ciais, P.: 7 eme edition du colloque "Climat et Impacts", Paris France (2022) Climate change impacts on CO2 emissions from electricity production.

7) Jagermeyr, J., Muller, C., Ruane, A.C., Elliott, J., Faye, B., Foster, I., Franke, J.A., Folberth, C., Guarin, J.R., Heinke, J., Hoogenboom, G., Iizumi, T., Jain, A.K., Khabarov, N., Lange, S., Liu, W., Minoli, S., Okada, M., Phillips, M., Porter, C., Balkovic, J., Castillo, O., Fuchs, K., Kelly, D., Lin, T., Mialyk, O., Stalky, R., Smerald, A., Stella, T., Scheer, C., Moyer, E.J., Rabin, S.S., Schneider, J.M., Schyns, J.F., Stephens, H.,

Webber, H., Zabel, F., Rosenzweig, C.: American Geophysical Union Fall Meeting 2021 (Online) (2021) Climate change signal in global agriculture emerges earlier in new generation of climate and crop models.

8) Mastropierro, M., Tanaka, K., Melnikova, I., Ciais, P.: Fifteenth Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) Annual Meeting 2022, College Park, USA (2022) Testing GWP* in the carbon budget framework under overshoot scenarios.

9) Melnikova, I., Boucher, O., Cadule, P., Tanaka, K., Gasser, T., Hajima, T., Quilcaille, Y., Shiogama, H., Seferian, R., Tachiiri, K., Vuichard, N., Yokohata, T., Ciais, P.: 2nd International Conference on Negative CO2 Emissions, Göteborg, Sweden (2022) Impact of bioenergy crops expansion on climate-carbon cycle feedbacks.

10) Melnikova, I., Boucher, O., Tanaka, K., Vuichard, N., Ciais, P.: C4 Workshop Climate Change and Carbon Cycle. (2022) Impacts of afforestation and bioenergy crops on the global land carbon sink.

11) Park, C., Takahashi, K., Takakura, J., Li, F., Fujimori, S., Hasegawa, T., Ito, A., Lee, D.K.: Fourteen Integrated Assessment Modeling Consortium Annual Meeting 2021 (Online) (2021) The impact of future climate and socioeconomic change on fire carbon emissions.

12) Park, C., Takahashi, K.: The 4th International Conference of Women Scientists and Engineering (Online) (2021) The impact of fire under future changes.

13) Park, C., Takahashi, K., Fujimori, S., Li, F., Phung, V., Takakura, J., Hasegawa, T., Ito, A.: EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria (2022) Future fire impact on PM2.5 pollution and attributable mortality.

14) Park, C., Takahashi, K., Li, F., Takakura, J., Fujimori, S., Hasegawa, T., Ito, A., Lee, D.K.: Scenario Forum 2022 (Forum on Scenarios for Climate and Societal Futures), Laxenburg, Austria (2022) Future Anthropogenic Impact on Fire Carbon Emissions.

15) Shiogama, H., Watanabe, M., Kim, H., Hirota, N.: EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria (2022) Observational constraints on the uncertainties of the future precipitation change projections.

16) Su, X.: Scenarios Forum 2022, Laxenburg, Austria (2022) Development of the Simple Climate Model for Optimization version 3.2 (SCM4OPT v3.2).

17) Takahashi, K., Hanasaki, N., Ito, A., Okada, M., Takakura, J., Masago, Y.: Adapt-FIRST Virtual kick-off meeting (Online) (2021) Overview of climate impact analyses conducted in NIES with relevance to the IRS concept.

18) Takahashi, K.: 7th International Forum on Sustainable Future in Asia (Online) (2022) Expanding Scope of Integrated Assessment Models for Climate Policy Analyses.

19) Takakura J., Takahashi K., Fujimori S.: Fourteenth IAMC Annual Meeting 2021 (Online) (2021) Economic impact projections by growth, level, and bottom-up models.

20) Tanaka, K., Boucher, O., Ciais, P., Johansson, D.J.A, Morfeldt, J.: American Geophysical Union Fall Meeting (online) (2020) Cost-effective implementation of the Paris Agreement using flexible greenhouse gas metrics.

21) Tanaka, K.: Joint French-German Scientific Programme (2021) Overshooting the temperature targets of the Paris Agreement. Scientific mid-term conference. Make Our Planet Great Again Programme.

22) Tanaka, K., Goll D., Gaucher Y., Ciais P.: 2nd International Conference on Negative CO2 Emissions, Gothenburg, Sweden, (2022) Exploring the role of enhanced weathering in overshoot scenarios.

23) Tanaka, K.: Make Our Planet Great Again (MOPGA) Final Joint conference (2022) Overshooting

the temperature targets of the Paris Agreement.

24) Tsuchiya, K., Ohashi, H., Hasegawa, T., Wu, W., Fujimori, S., Matsui, T., Takahashi, K.: Scenarios Forum 2022, Laxenburg, Austria (2022) Towards the development of integrated scenarios for biodiversity and climate change: exploring uncertainties in global protected area expansion and land use change.

25) Wu, W., Hasegawa, T., Fujimori, S., Takahashi, K., Takakura, J.: Thirteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC 2020) (Online) (2020) Modeling the health implications and economic costs of the double burden of malnutrition in IAM.

26) Xia, S., Takakura, J., Wu W, Hasegawa, T., Vishwanathan, S., Fujimori, S., Takahashi, K.: Scenarios Forum 2022|Forum on Scenarios for Climate and Societal Futures, Laxenburg, Austria (2022) Benefits of moving to diets with more fish.

27) Xia, S., Takakura, J., Wu, W., Blanchard, J.L., Heneghan, R.F., Tsuchiya, K., Hasegawa, T., Fujimori, S., Takahashi, K.: Fifteenth IAMC Annual Meeting 2022, College Park, USA (2022) Potential environmental and nutritional benefits of replacing ruminant meat with forage fish.

28) Xiong, W., Tanaka, K.: American Geophysical Union Fall Meeting 2021, New Orleans, USA (2021) Temperature outcome of net zero emissions scenarios and China's role.

29) Xiong, W., Tanaka, K., Ciais, P.: Fifteenth Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) Annual Meeting 2022, College Park, USA (2022) Regional and temporal disparities in cost-effective climate mitigation strategies: China's distinct roles.

30) Xiong, W., Tanaka, K., Johansson, D.J.A., Ciais, P.: Fifteenth Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) Annual Meeting 2022, Abstracts, College Park, USA (2022) emIAMv1.0: an emulator for Integrated Assessment Models using marginal abatement cost curves.

31) 塩竈秀夫、渡部雅浩、Hyungjun Kim、廣田渚郎: Japan Geoscience Union Meeting 2022, 千葉市 (2022) 21世紀後半までの降水量変化予測のEmergent Constraints.

32) 塩竈秀夫、渡部雅浩、Hyungjun Kim、廣田渚郎: 日本気象学会2022年度春季大会 (Online) (2022) 21世紀後半までの降水量変化予測の不確実性低減.

33) 高倉潤也: 日本リスク学会2022年度年次春季シンポジウム (Online) (2022) 気候変動に関する地球規模でのリスク評価.

34) 高橋潔, 高倉潤也, Silva Herran Diego: 第20回SATテクノロジーショーケース, つくば市 (2021) ネットゼロ排出達成に向けた気候政策と持続可能性の同時分析.

35) 高橋潔: FF会第36回総会 (Online) (2022) 地球規模の脱炭素と持続可能性の同時達成について.

36) 高橋潔: 人新世の国際政治研究会 (Online) (2022) 気候変動が社会・環境に及ぼす影響とその対策.

37) 高橋潔: 国立環境研究所気候危機対応研究イニシアティブウェビナー「気候変動シナリオについて世界では今何が議論されているか？Scenarios Forum 2022 報告」(Online) (2022) Scenarios Forum2022の背景と概要.

38) 増井利彦、高橋潔: 環境科学会2021年会 (Online) (2021) 脱炭素にむけたモデル研究の状況と研究展望

【サブテーマ２】

1) Fujimori, S., Hasegawa, T., Oshiro, K.: Thirteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2020 (Online) (2020) An assessment of the potential of using carbon tax revenue to tackle poverty.

2) Fujimori, S.: ASIA PACIFIC ENERGY RESEARCH CENTRE(APERC) Annual Conference, Advisory

Board Meeting and Joint Symposium with IEEJ, (Online, invited lecture) (2020) Pathways to limit global-mean temperature rise to 1.5℃.

3) Fujimori, S., Hasegawa, T.: NARO-FFTC International Symposium "Climate Change and Food System - synergies of adaptation and mitigation, and advanced utilization of climate information for sustainable and climate-resilient agriculture", Tsukuba (2022) Food security implications of climate change mitigation.
4) Fujimori, S.: AP/IIASA International Webinar (Online) (2022) Accounting co-benefits of climate change mitigation actions: AIM approach.
5) Fujimori, S., Oshiro, K., Hasegawa, T., Shiraki, H., Takakura, J., Takahashi, K.: Fourteenth IAMC Annual Meeting 2022 (Online) (2022) Climate change cost decomposition.
6) Grassi, G., Popp, A., Rogelj, J., Stehfest, E., van Vuuren, D., Cescatti, A., House, J., Nabuurs, G.J. Rossi, S., Alkama, R., Viñas, R.A., Calvin, K., Ceccherini, G., Federici, S., Fujimori, S., Gusti, M., Hasegawa, T., Havlik, P., Humpenöder, F., Korosuo, A.: Thirteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2020 (Online) (2020) Rosetta stone method translates land-use mitigation pathways to estimates compatible with countries' GHG inventories.
7) Hasegawa, T.: SDGs Symposium 2021: Interdisciplinary science solutions for food, water, climate and ecosystems Sustainable Development Goals (Online) (2021) How do we reconcile a long-term climate goal and sustainable development?
8) Hasegawa, T.: The 28th AIM International Workshop (Online) (2022) Extreme climate events increase risk of global food insecurity and adaptation needs.
9) Hasegawa, T.: 2022 ECOSOC High-level Segment, New York, USA (2022) How do we reconcile a long-term climate goal and sustainable development?
10) Hirata, A., Ohashi, H., Hasegawa, T., Fujimori, S., Takahashi, K., Matsui, T.: The 28th AIM International Workshop (Online) (2022) Biodiversity implications of large-scale bioenergy and afforestation implementation.
11) Hirata, A., Ohashi, H., Hasegawa, T., Fujimori, S., Takahashi, K., Matsui, T.: International AIM-Workshop, Session4, No3 (Online) (2022) , Biodiversity implications of large-scale bioenergy and afforestation implementation.
12) Jansakoo, T., Fujimori, S.: Forty-fourth Symposium of the Environmental & Sanitary Engineering Research, Kyoto (2022) The influence of agricultural ammonia emissions reduction on air pollution and human health.
13) Kikstra, J., Krey, V., Riahi, K., Fujimori, S.: Thirteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2020 (Online) (2020) Regional sustainable development implications of ambitious climate mitigation.
14) Leclere, D., Obersteiner, M., Barrett, M., Butchart, S. H. M., Chaudhary, A., De Palma, A., DeClerck, F. A. J., Di Marco, M., Doelman, J. C., Drauer, M., Freeman, R., Harfoot, M., Hasegawa, T., Hellweg, S., Hilbers, J. P., Hill, S. L. L., Humpender, F., Jennings, N., Krisztin, T., Mace, G. M., Ohashi, H., Popp, A., Purvis, A., Schipper, A. M., Tabeau, A., Valin, H., van Meijl, H., van Zeist, W.-J., Visconti, P., Alkemade, R., Almond, R., Bunting, G., Burgess, N. D., Cornell, S. E., Di Fulvio, F., Ferrier, S., Fritz, S., Fujimori, S., Grooten, M., Harwood, T., Hav-k, P., Herrero, M., Hoskins, A., Jung, M., Kram, T., Lotze-Campen, H., Matsui, T., Meyer, C., Nel, D., Newbold, T., Schmidt-Traub, G., Stehfest, E., Strassburg, B., van Vuuren, D., Ware, C., Watson, J., Wu, W., Young, L.: Fourteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2021 (Online) (2021) Towards land-use pathways for ambitious climate and biodiversity

targets.

15) Liu, R., Ohashi, H., Matsui, T., Hirata, A., Itsubo, N.: 第16回日本LCA学会研究発表会 (Online) (2020) The environmental impact assessment of desertification considering land use and climate change -Development of characterization factors for desertification-.

16) Liu, R., Ohashi, H., Matsui, T., Hirata, A., Itsubo, N.: EcoBalance 2020 (Online) (2021) The Evaluation of Biodiversity Impacts Due to Desertification.

17) Liu, R., Ohashi, H., Matsui, T., Hirata, A., Itsubo, N.: SETAC Europe 31st Annual Meeting (Online) (2021) The Development of Environmental Impact Method for Desertification in Framework of LCIA.

18) Liu, R., Ohashi, H., Hirata, A., Matsui, T., Itsubo, N.: EcoBalance 2022 (The 15th Biennial International Conference on EcoBalance), Fukuoka, Japan (2022) The development of LCIA methodology and damage factors for biodiversity loss with extended impact categories (ID: 134).

19) Liu, R., Ohashi, H., Hirata, A., Matsui, T., Itsubo, N.: 第18回日本LCA学会研究発表会 (Online) (2023) 環境システム・生態系 LCAの手法開発.

20) Wu, W., Fujimori, S., Doelman, J., Frank, S., Hristov, J., Kyle, P., Sands, R., van Zeist, W.-J., Havlik, P., Pérez-Dominguez, I., Sahoo, A., Stehfest, E., Tabeau, A., Valin, H., van Meijl, H., Hasegawa, T., Takahashi, K.: Fourteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2021 (Online) (2021) Potential impacts of GHG emissions abatement measures on agricultural markets and food security.

21) Zhao, S., Fujimori, S.: Forty-fourth Symposium of the Environmental & Sanitary Engineering Research, Kyoto (2022) Household energy security under stringent climate change mitigation.

22) Zhao, S., Fujimori, S., Oshiro, K., Hasegawa, T., Sasaki, K.: IAMC 15th annual meeting, College Park, USA (2022) Household energy security under stringent climate change mitigation to achieve the long-term temperature goal of the PA.

23) Zhao, S., Fujimori, S., Oshiro, O., Hasegawa, T.: Forty-third Symposium of Environmental & Sanitary Engineering Research (Online) (2022) Poverty and inequality implications of carbon pricing under the long-term climate target.

24) 市森将貴、長谷川知子、藤森真一郎: 第29回地球環境シンポジウム (Online) (2021)将来の社会経済状況の不確実性を考慮した洪水による食料消費と飢餓リスク人口への影響評価.

25) 伊藤涼太朗、長谷川知子、藤森真一郎、花崎直太: 第29回地球環境シンポジウム (Online) (2021) 世界を対象とした第二世代バイオマスエネルギーポテンシャル量の推計とそれに伴う水消費量・窒素肥料必要量の環境影響.

26) 伊藤涼太朗、藤森真一郎、長谷川知子：第30回地球環境シンポジウム, 北海道 (2022) 食内容を考慮したバイオマスエネルギーポテンシャル量の推計.

27) 井上笑瑠、長谷川知子、渡邉諒一、藤森真一郎: 第29回地球環境シンポジウム (Online) (2021) 気候変動およびその対策に伴う対流圏オゾン軽減がもたらす食料消費および飢餓リスク人口への影響評価.

28) 上谷明生、関沢賢、藤森真一郎、大城賢、長谷川知子、渡邉諒一: 京都大学環境衛生工学研究会 第44回シンポジウム, 京都 (2022) 世界全域を対象とした異なる水平解像度を用いた大染の影響評価.

29) 大城賢、藤森真一郎、長谷川知子、明石修: 第28回地球環境シンポジウム (Online) (2020) アジアにおける温室効果ガス短期削減目標が2050年までのエネルギー投資に及ぼす影響.

30) 太畑祐輔、長谷川知子、越智雄輝、高橋潔: 第28 地球環境シンポジウム (Online) (2020) 気候変動対策による低栄養に起因する健康被害評価.

31) 桑葉裕斗、長谷川知子、藤森真一郎、スィルバエランディエゴ: 第29回地球環境シンポジウム (Online) (2021) 世界における将来の土地利用変化を考慮した風力・太陽光エネルギーポテンシャル推計.
32) 小南裕志、 大橋春香、松井哲哉：災害・復興科学研究所＆森林総合研究所連携協定締結記念シンポジウム「山地の自然災害と森林科学 ～最新研究の動向～」, 新潟市 (2020) ニホンジカの拡大予測と低密度管理にむけた高分解能積雪分布予測の取り組み.
33) 関祐哉、長谷川知子、藤森真一郎: 第 28 回地球環境シンポジウム (Online) (2020) 世界を対象にした洪水による作物収量変化を通じた食料消費と飢餓リスクへの影響評価.
34) 佐々木克哉、藤森真一郎、大城賢、長谷川知子: 43回京都大学環境衛生工学研究会シンポジウム (Online) (2021) 家計の消費行動変化を考慮した日本における炭素税の異なる所得階層への影響.
35) 関沢賢、渡邉諒一、藤森真一郎、大城賢、上田佳代: 第30回地球環境シンポジウム, 北海道 (2022) 全世界を対象とした異なる PM2.5 由来の健康影響評価関数に関する研究.
36) 関沢賢、藤森真一郎、大城賢、渡邉諒一、上田佳代: 京都大学環境衛生工学研究会　第44回シンポジウム, 京都 (2022) 全世界を対象としたPM2.5由来の健康影響推計手法に関する検討.
37) 高野（竹中）宏平、日比野研志、小黒芳生、高薮出、中静透、尾関雅章、松井哲哉: 第 35 回日本雑草学会シンポジウム (Online) (2020) 産業管理外来種であるモウソウチクとマダケの潜在生育適域は気候変動で拡大する.
38) 西浦理、藤森真一郎、大城賢: 第 28 回地球環境シンポジウム (Online) (2020) アジア各国における温室効果ガス大幅削減に必要な対策とその経済的影響の要因分析.
39) 西浦理、藤森真一郎、大城賢: 第43回京都大学環境衛生工学研究会シンポジウム (Online) (2021) 世界およびアジアにおける炭素地下貯留技術の物理的制約を考慮した気候変動緩和策の評価.
40) 西浦理、藤森真一郎、大城賢: 第30回地球環境シンポジウム, 北海道 (2022) 二酸化炭素直接回収技術を考慮した応用一般均衡モデルの開発および気候変動緩和策の評価.
41) 平田晶子、小南裕志、大橋春香、津山幾太郎、田中信行、中尾勝洋、肱岡靖明、松井哲哉：日本森林学会大会 (Online) (2022) 気候ストレス指数の全球推定により森林の気候変動への応答を予測する.
42) 平田晶子、大橋春香、長谷川知子、藤森真一郎、高橋潔、松井哲哉: 日本生態学会第69回全国大会 (Online) (2022) BECCSとafforestationによるネットゼロ排出の達成は全球の生物多様性保全と両立するか.
43) 藤森真一郎: 京都大学カーボン・ニュートラル推進フォーラム　キックオフ・シンポジウム―地球社会の調和ある共存に向けて―　キーノートスピーチ (Online) (2021)　なぜカーボン・ニュートラルなのか.
44) 藤森真一郎: ムーンショット型農林水産研究開発事業『サイバーフィジカルシステムを利用した作物強靭化による食料リスクゼロの実現』シンポジウム～ 2050年、食料リスクのない豊かな社会を目指して ～ (Online) (2021) 気候変動と食糧安全保障の関係について.
45) 藤森真一郎: 日本学術会議近畿地区会議学術講演会「2050年までに何をすべきか　カーボンニュートラル」講演　話題提供2 (Online) (2021) 長期気候緩和シナリオ研究とカーボンニュートラル.
46) 藤森真一郎: グリーンエネルギーファーム産学共創パートナーシップ　2021年度第3 回研究会 (Online) (2021)　脱炭素社会に向けた農業土地利用の課題.
47) 藤森真一郎: 東京大学気候と社会連携研究機構発足記念シンポジウム「気候・生態系と社会の共進化を探る」, 東京 (2022) 統合評価モデル研究の最前線.
48) 藤森真一郎: 国立環境研究所　気候危機対応研究イニシアティブウェビナー「気候変動シナリオについて世界では今何が議論されているか？―Scenarios Forum 2022報告」 (Online) (2022) 統合評価モデル及び緩和分析とシナリオ研究.
49) 藤森真一郎: 日立返仁会関西地区2022年度第2回オンライン講演会 (Online) (2022) カーボンニ

ュートラルの絵姿　ー長期的な見通しと課題ー.

50) 藤森真一郎、大橋春香、越智雄輝、長谷川知子、Nyairo Risper B.、松井哲哉、平田晶子、高橋潔、土屋一彬: 第30回地球環境シンポジウム、北海道 (2022) 生態系保全のための農業・食料消費・土地利用管理システムの変革.

51) 松井そら、藤森真一郎、大城賢、西浦理: 第43回京都大学環境衛生工学研究会シンポジウム (Online) (2021) 交通部門の社会変革が気候変動政策へ及ぼす影響.

52) 松井哲哉、Prasetyo, E., Setiawan, F., Mohammad Na'iem ,W., 大橋春香、津山幾太郎、津村義彦: 第69回日本生態学会大会 (Online) (2022) Climate change impact assessment of teak plantation sites in Java, Indonesia.

53) 渡邉諒一、藤森真一郎、長谷川知子、大城賢: 第 28 回地球環境シンポジウム (Online) (2020) 世界を対象とした対流圏オゾンの作物収量に対する影響と気候政策の副次的便益に関する研究.

54) 渡邉諒一、上谷明生、関沢賢、藤森真一郎、長谷川知子、大城賢: 第30回地球環境シンポジウム, 北海道 (2022) 世界全域を対象とした異なる水平解像度を用いた大気汚染の影響評価.

（３）「国民との科学・技術対話」の実施

【サブテーマ１】

1) Fridays For Future Japan (FFFJ) ウェビナー「[若者が聞く！] 気候変動は「どのくらい」「どう」ヤバイのか？(①生物多様性)」(https://www.youtube.com/watch?v=WsprloRX0Jo)(2021/01/08 ライブ配信、11,000 回視聴)

2) Fridays For Future Japan (FFFJ) ウェビナー「[若者が聞く！] 気候変動は「どのくらい」「どう」ヤバイのか？ (②食と農) 」 (https://www.youtube.com/watch?v=i9GdKNIOv6w) (2021/03/05 ライブ配信、3,867 回視聴)

3) ウェビナー共催 (気候危機イニシアティブ・推進費 2-2101) 「気候変動シナリオについて世界では今何が議論されているか？ ― Scenarios Forum 2022 報告」 (https://www.youtube.com/watch?v=FHC8SCQqufE) (2022/9/12 ライブ配信、2,911 回視聴)

4) シンポジウム共催 (推進費 S-18・2-2002・2-2005) 「気候変動の影響はどうなる？どう対応する？ IPCC 第６次報告書と日本の研究報告」 (2022/4/26 ライブ配信)

【サブテーマ２】

1) SPEED 研究会 (エコイノベーションとエコビジネスに関する研究会) 「生物多様性・森林生態系と気候変動」 (2020/10/30 オンライン講演、参加者約 50 名)

2) Peaceful Climate Strike YouTube チャンネル Chapter#3『どうぶつと気候危機』～私たちの知らないその密接な関係性～ #気候危機を止めよう(https://youtu.be/hPCs3Auk_IQ) (2021/04/19 ライブ配信、11,000 回視聴)

（４）マスコミ等への公表・報道等

【サブテーマ１】

1) 成果の記者発表 (2021 年 5 月 29 日、於国立環境研究所、「将来シナリオに応じた温室効果ガス排出指標の柔軟な選択」、研究 1-1 の成果)

2) The Conversation 誌 (2021 年 6 月 2 日、ウェブ版、「A new way of comparing greenhouse gases could help us meet Paris Agreement goals」)

3) 成果の記者発表 (2021 年 6 月 11 日、於国立環境研究所・京都大学・立命館大学、「孫は祖父母が遭遇しないような暑い日と大雨を何度経験するのか？ ―極端な気象現象の変化に関する世代間不公平性とその地域間不公平性の評価」、研究 1-3 の成果)

4) 成果の記者発表 (2022 年 2 月 24 日、於国立環境研究所・東京大学大気海洋研究所・韓国科学技術

院・東京大学生産技術研究所、「21 世紀後半までの降水量変化予測の不確実性を低減することに初めて成功しました」、研究 1-7 の成果）

5) 成果の記者発表（2022 年 2 月 25 日、於京都大学・国際農林水産業研究センター・立命館大学・国立環境研究所、「世界全域 の 2050 年脱炭素シナリオの飢餓リスクの要因分解　―森林が貯蔵する炭素に対する価格付けが食料安全保障のリスクになりうる―」、研究 1-8 の成果）
6) 成果の記者発表（2022 年 12 月 15 日、於国立環境研究所・海洋研究開発機構、「パリ協定の目標を達成する際に重要となる温室効果ガス排出源（地域・セクターなど）を特定」、研究 1-2 の成果）
7) 成果の記者発表（2022 年 12 月 16 日、於国立環境研究所、「気候変動による経済影響評価の不確実性を低減することに成功」、研究 1-7 の成果）

【サブテーマ２】

1) 成果の記者発表（2020 年 9 月 10 日、於立命館大学・森林総合研究所・京都大学・国立環境研究所、「生物多様性の損失を食い止め回復させるための道筋　－自然保護・再生への取り組みと食料システムの変革が鍵－」、研究 2-6 の成果）
2) 取材協力（2021 年 4 月 18 日放映、BS1 スペシャル-NHK　シリーズ“2030 未来への分岐点”「暴走する温暖化地球の危機」）
3) 取材協力（2021 年 4 月 25 日放映、BS1 スペシャル-NHK　シリーズ“2030 未来への分岐点”第 2 回「飽食の悪夢～水・食料クライシス～」）
4) 成果の記者発表（2021 年 6 月 10 日、於横浜国立大学・森林総合研究所・東京大学生産技術研究所、「生物多様性が気候変動問題の解決の鍵となる」、研究 2-5 関連成果）
5) 農林ニュース（2021 年 6 月 14 日、全国版、8 頁、「回転椅子：気候変動問題解決の鍵」）
6) 成果の記者発表（2021 年 8 月 10 日、於立命館大学・農業食品産業技術総合研究機構・京都大学・国立環境研究所、「将来の不確実性を考慮に入れた飢餓リスクとその対応策の算定」、研究 2-3 の成果）
7) 環境展望台（2021 年 8 月 10 日、「京大と立命大など、不確実性下における飢餓リスクの大きさを算定」）
8) 財経新聞（2021 年 8 月 11 日、ＩＴ・サイエンス、「温暖化に伴う極端な気象現象が飢餓人口に与える影響　京大らが推計」）
9) 日本農業新聞（2021 年 8 月 12 日、総合 1 面 12 版 P1、「温暖化加速で飢餓リスク増　穀物備蓄の追加必要　京大など算出」）
10) 農業協同組合新聞（2021年8月17日、「将来の不確実性を考慮　飢餓リスクと対応策を算定　京大、農研機構など」）
11) 日経産業新聞（2021 年 8 月 27 日、P7、「温暖化で不作、6 億人が飢餓も」）
12) 成果の記者発表（2021 年 10 月 8 日、於立命館大学・京都大学、「大規模な二酸化炭素除去技術に依存しない温室効果ガス排出削減と それが土地利用と食料システムへ与える影響」、研究 2-1 の成果）
13) マイナビニュース（2021 年 10 月 11 日、「早期の温室効果ガス排出削減による土地利用と食料システムへの影響、立命館大が調査」）
14) 成果の記者発表（2022 年 3 月 2 日、於京都大学、「世界の脱炭素社会実現に向けた水素エネルギーの役割 ―電化・バイオマスも組み合わせた包括的なエネルギー政策が重要―」）
15) 日刊工業新聞（2022 年 3 月 8 日、23 面（科学技術・大学）、「電化・バイオマス重要　水素、製造コスト面に課題　京大、50 年脱炭素シナリオ予測」）
16) 成果の記者発表（2022 年 4 月 21 日、於森林総合研究所・国立環境研究所、「気候変動により森林が拡大する地域、縮小する地域を高解像度で推定－気候ストレスの影響を地球規模で評価するモデルを開発－」、研究 2-3 の成果）
17) 毎日新聞（2022 年 9 月 21 日、全国版、12-13 頁、「気候変動　危機の連鎖　農業と食　守るため

に」）

（５）本研究費の研究成果による受賞

【サブテーマ１】

該当なし

【サブテーマ２】

1) 研究奨励賞、京都大学環境衛生工学研究会、2020 年 7 月 30 日、（西浦理、藤森真一郎、大城賢: 環境衛生工学研究, 34(3), 4-6 (2020) アジア各国における温室効果ガスの大幅な削減に必要な対策とその経済的な影響の要因分析）.
2) 令和3年度文部科学大臣表彰若手科学者賞（科学技術分野）、2021年 4月　長谷川知子
3) 令和5年度地球環境論文奨励賞、土木学会地球環境委員会、2023年3月（伊藤涼太朗、長谷川知子、藤森真一郎：土木学会論文集G（環境）, 78(5), I_79-I_85 (2022) 食内容を考慮したバイオマスエネルギーポテンシャル量の推計）.

（６）その他の成果発表

＜ポスター発表＞

【サブテーマ１】

1) Park, C.Y., Takahashi, K., Takakura, J., Li, F., Fujimori, S., Hasegawa, T., Ito, A., Lee, D.K.: Fourteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2021 (2021) The impact of future climate and socioeconomic change on fire carbon emissions.
2) Silva Herran Diego: 26th AIM International Workshop (Online) (2020) Enhancing mitigation targets with good practice policies: a global assessment.
3) Takakura, J., Takahashi, K., Fujimori, S.: Fourteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2021 (2021) Economic impact projections by growth, level, and bottom-up models.
4) Xia, S., Takakura, J., Wu, W., Blanchard, J.L., Heneghan, R.F., Tsuchiya, K., Hasegawa, T., Fujimori, S., Takahashi, K.: IAMC 15th annual meeting, College Park, MD, USA (2022) Potential environmental and nutritional benefits of replacing ruminant meat with forage fish.
5) 高橋潔、 高倉潤也、 Silva Herran Diego ： 第 20 回 SAT テクノロジーショーケース（オンライン開催） (2021) ネットゼロ排出達成に向けた気候政策と持続可能性の同時分析.

【サブテーマ２】

1) Hasegawa, T., Fujimori, S., Ito, A., Takahashi, K.: IAMC 15th annual meeting, College Park, MD, USA (2022) Carbon Sequestration Potential of Afforestation ensuring Ecosystem Conservation and Food Security.
2) Jansakoo, T., Watanabe, R., Uetani, A., Sekizawa, S., Fujimori, S., Hasegawa, T., Oshiro, K.: Fifteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2022, College Park, MD, USA (2022) Comparison of global air pollution impacts across horizontal resolutions.
3) Nishiura, O., Fujimori, S., Oshiro, K.: Fifteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2022, College Park, MD, USA (2022) An assessment of direct air capture to meet the long-term climate target of the Paris Agreement using a computable general equilibrium model.
4) Zhao, S., Fujimori, S., Hasegawa, T., Oshiro, K., Sasaki, K.: The 30th Global Environment Symposium, Hokkaido (2022) Household Energy Security under Stringent

Climate Change Mitigation.
5) 市森将貴、長谷川知子、藤森真一郎: 第30回地球環境シンポジウム,北海道 (2022) 世界を対象とした作物収量の向上が食料安全保障と環境にもたらす影響評価.
6) 佐々木克哉、藤森真一郎、大城賢、長谷川知子、趙詩雅: 第30回地球環境シンポジウム, 北海道 (2022) 異なる所得階層を考慮した家計の食料需要モデルの開発.

Ⅳ. 英文Abstract

Global Analyses of Climate Mitigation for Achieving Net-zero Emissions and Sustainable Development

Principal Investigator: Kiyoshi TAKAHASHI
Institution: National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Ibaraki, 305-8506, JAPAN
Tel: +81-29-850-2543 / Fax: +81-29-850-2960
E-mail: ktakaha@nies.go.jp
Cooperated by: Kyoto University, Ritsumeikan University, Forestry and Forest Products Research Institute

[Abstract]

Key Words: Decarbonization, SDGs, Paris Agreement, IAM, Mitigation

In 2015, the countries of the world agreed on the so-called 2° C target as a long-term climate goal in the Paris Agreement. After that, the IPCC Special Report on Global Warming of 1.5° C concluded that there would be a significant difference in climate impacts between 1.5° C and 2.0° C. On the other hand, to achieve these long-term climate goals, net zero emissions of greenhouse gases in the latter half of the 21st century or negative emissions through large-scale bioenergy crops and afforestation are expected to be necessary.
This research sought to answer the question, "What kind of society should we create and accept to achieve net-zero emissions without compromising the sustainability of human society and ecosystems?" For the research purpose, we examined global sustainability scenarios considering interrelationships among climate policy, climate impacts, and sustainability.
Subtheme 1 tackled two research issues. First, we improved emissions pathway models reflecting the latest climate science and mitigation research and analyzed emission pathways for meeting climate targets under different socioeconomic development assumptions. Second, regarding the climate impacts under the implemented mitigation policies, we conducted an integrated impact assessment that quantitatively considered uncertainties of socioeconomic and climate change. For the purpose, we developed simplified climate impact projection methods (impact emulators) that could consider flexible scenario assumptions based on existing simulation outputs of complex full-scale climate impact models. The developed impact emulators were used to estimate social costs of carbon under emission pathways. We also conducted a quantitative analysis of inter-regional/generational equity in climate impacts.
Subtheme 2 tried to answer questions related to afforestation and bioenergy with carbon capture and storage (BECCS), which would play an important role in net-zero CO2 emissions. We discussed the possibility of large-scale deployment of afforestation and bioenergy crops while considering sustainability from the perspectives of biodiversity conservation, agricultural technology development, and water resource availability for identifying the policies and measures necessary to achieve net zero emissions without jeopardizing human rights.