課題番号：2-2002

課題名：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

体系的番号：JPMEERF20202002

重点課題：⑨地球温暖化現象の解明・予測・対策評価

研究代表機関：　国立研究開発法人　国立環境研究所

研究代表者：　高橋　潔

研究実施期間：　2020～2022年度

研究分担機関：　国立大学法人　京都大学

学校法人　立命館　立命館大学

国立研究開発法人　森林研究・整備機構

1. はじめに（研究開発背景等）
2. 研究開発目的

- パリ協定/2℃・1.5℃目標→ネットゼロ排出
  - パリ協定で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。IPCC1.5℃特別報告書を受けて1.5℃目標を支持する声の高まり。
  - いずれの目標の実現にも、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世紀前半の排出量次第で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。
- ネットゼロ排出の実現性・困難性の精査が必要
  - ネットゼロ排出の実現に必要な対策・政策は？また、それらの対策・政策の実施の前提となる社会発展や変革の経路は？
  - 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？
  - ネットゼロ排出状況下での、炭素循環・気候システムの変化、各部門の気候影響はどのようなものか？

研究の目的

- 気候目標達成に必要な排出経路の提示、その排出経路下で生ずる気候影響の評価、持続可能性を考慮した気候緩和策の戦略検討を通じて、「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、市民や政策決定者に伝わる形で描き出すこと

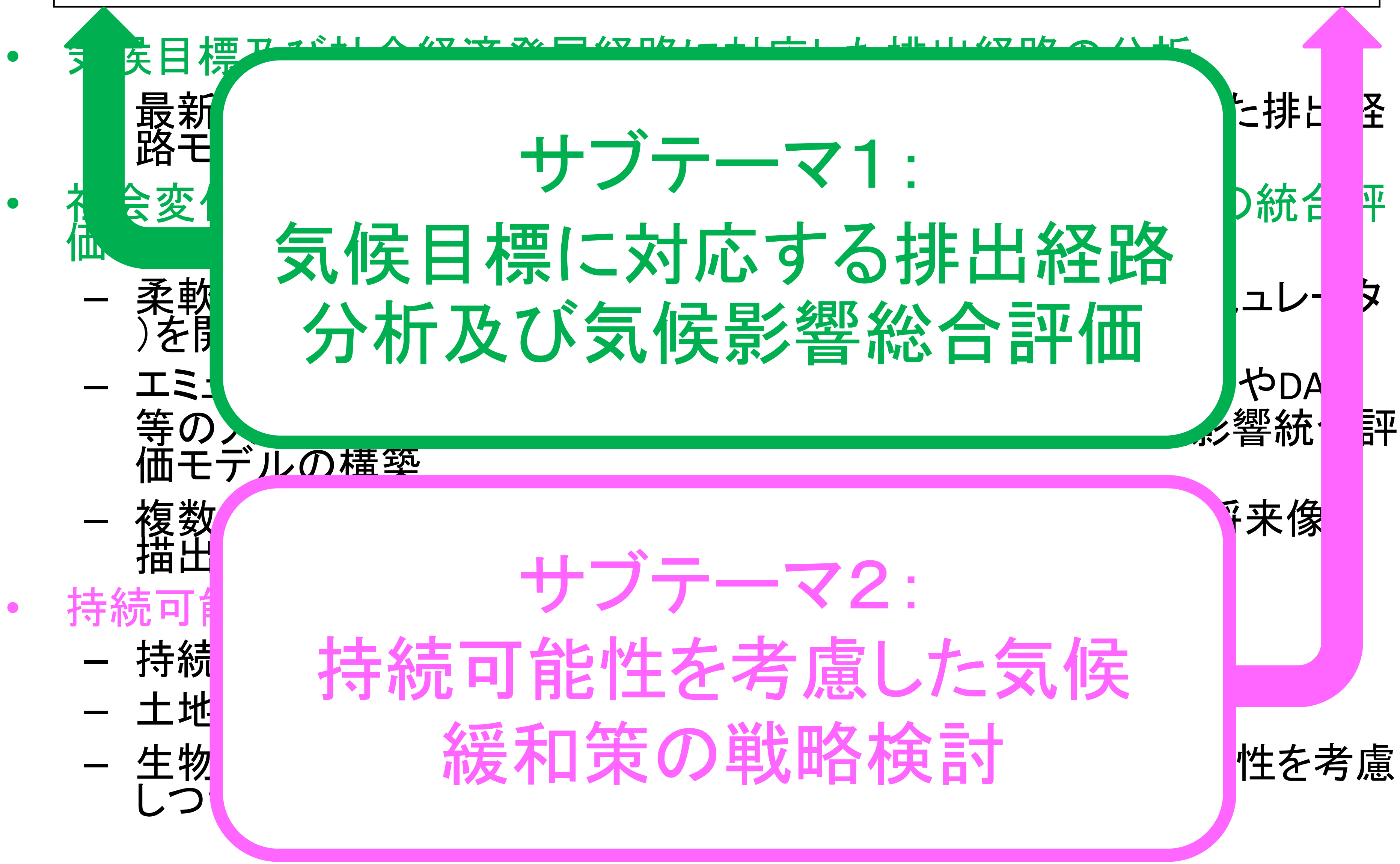
3. 研究目標

研究目的:「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

- 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
  - 最新の気候科学・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
- 社会変化・気候変化の不確実性を定量的に考慮した気候影響の統合評価
  - 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
  - エミュレータの一般均衡モデル（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への組み込みによる気候影響統合評価モデルの構築
  - 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
- 持続可能性を考慮した気候緩和策の戦略検討
  - 持続可能性統合評価モデルの開発
  - 土地利用管理を明示的に考慮した森林吸収量の推計
  - 生物多様性保護、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を検討

3. 研究目標

研究目的：「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



4. 研究開発内容

●サブ1が担当
●サブ2が担当
●●/●●両サブ連携

- 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
  - 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
    - ●1-1:最適排出経路と排出指標について
    - ●● 1-2:CO2と非CO2排出の限界削減費用(MAC)曲線の推計
  - 社会変化・気候変化の不確実性を定量的に考慮した気候影響の統合評価
    - ● 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
    - ● 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
    - ● 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
    - ● 1-6:軽量気候影響予測手法（影響エミュレータ）の開発
    - ● 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（サブ1・サブ2連携実施）
    - ●● 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
    - ●● 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
    - ●● 1-10:緩和政策下でのSDG指標の定量化
- 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
  - 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（BECCS）に関する諸問題への回答
    - ● 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
    - ● 2-2:BECCSと植林による生物多様性への影響評価
    - ● 2-3:社会変革による生物多様性への影響
    - ● 2-4:極端現象を考慮した食料安全保障
    - ● 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
    - ● 2-6:炭素税税収の貧困解決への活用の潜在的可能性

5-1. 成果の概要：

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

- [研究1-1]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。
  - 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]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（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
  - 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。

5-1. 成果の概要：

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

- [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] 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、火災管理の改善と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]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（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。

5-1. 成果の概要：
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

- [研究1-6]一般均衡モデル（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。
  - 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] 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（EC：Emergent Constraint）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。

5-1. 成果の概要：

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（BECCS）に関する諸問題への回答

- [研究2-1] 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。
  - 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]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

5-1. 成果の概要：

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（BECCS）に関する諸問題への回答

- [研究2-3] 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。
  - 成果はNature誌で国際共著論文として公表した。
- [研究2-4] 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。

5-1. 成果の概要：

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（BECCS）に関する諸問題への回答

- [研究2-5] 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。
  - 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Biomass and Bioenergy誌で公表した。
- [研究2-6] 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。

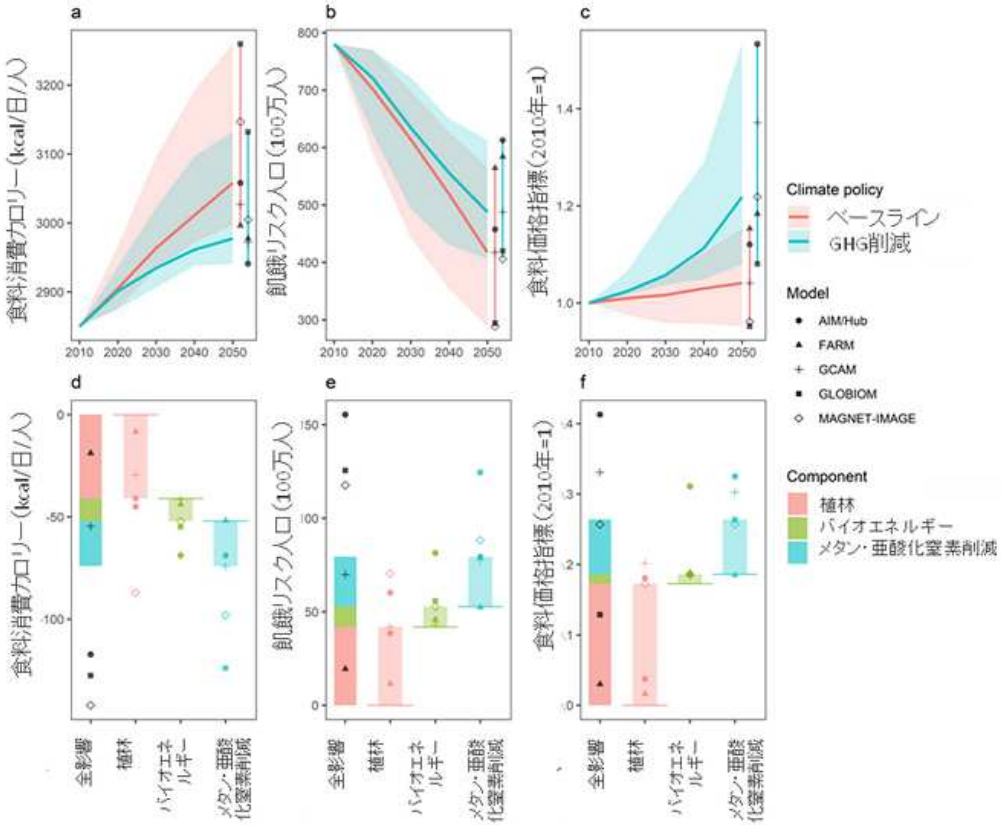
5-1. 成果の概要：

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

- [研究1-8]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]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、高緯度の温帯および寒帯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] 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MSV（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。

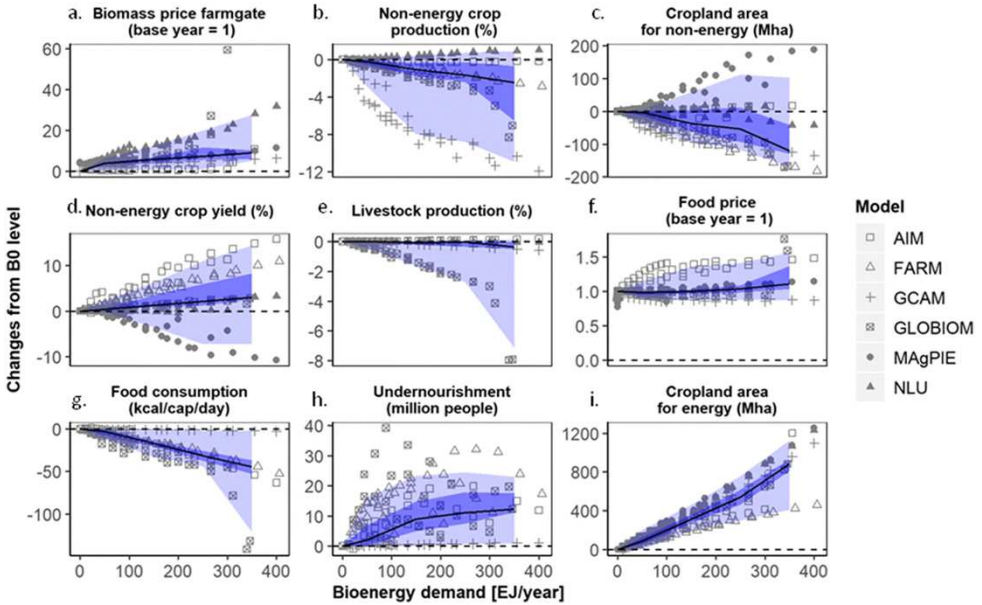
成果概要：国際連携研究

- EMF、AGMIP、ENGAGE等の国際モデル比較プロジェクトへの参加



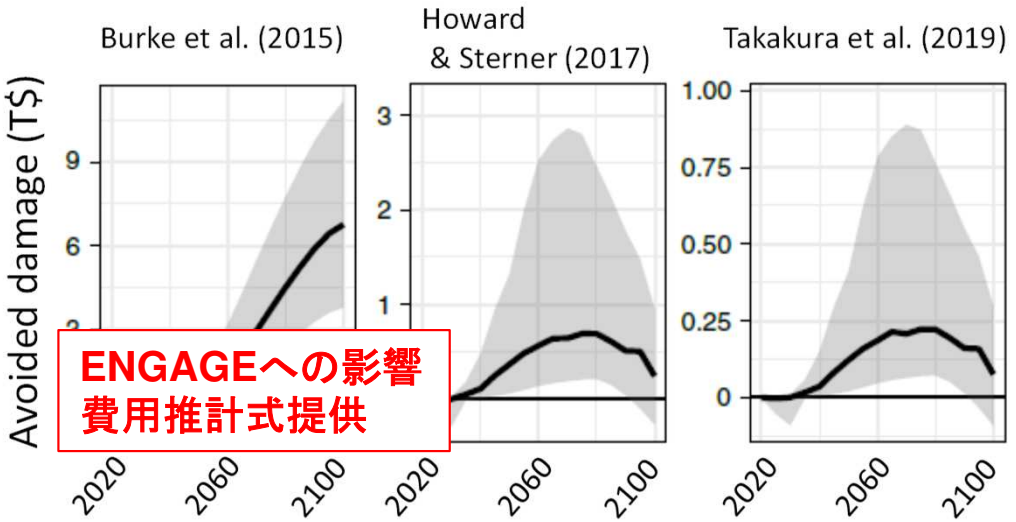
世界全域の2050年脱炭素シナリオの飢餓リスクの要因分解．Fujimori, Wu, et al. (2022) Nature Food

AGMIP-GlobalEcon



長期気候目標実現に向けたバイオエネルギー需要増シナリオでの食料安全保障
Hasegawa et al. (2020) Climatic Change

EMF33



ENGAGEへの影響費用推計式提供

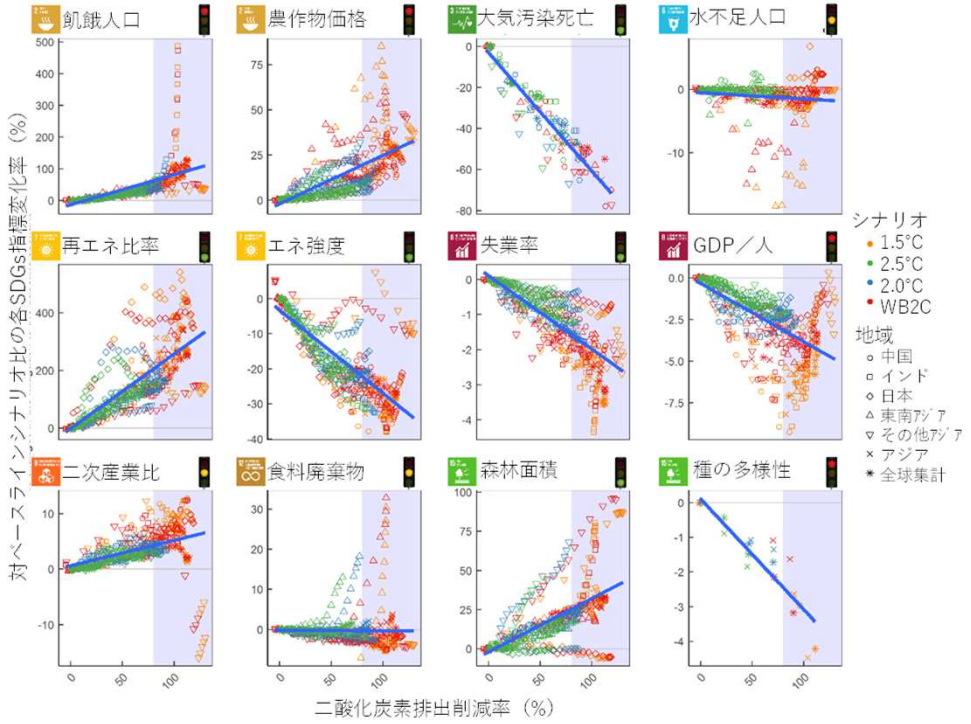
気温オーバーシュート回避による影響被害軽減の推計
Drouet et al. (2022) Nature Climate Change

５－２．環境政策等への貢献

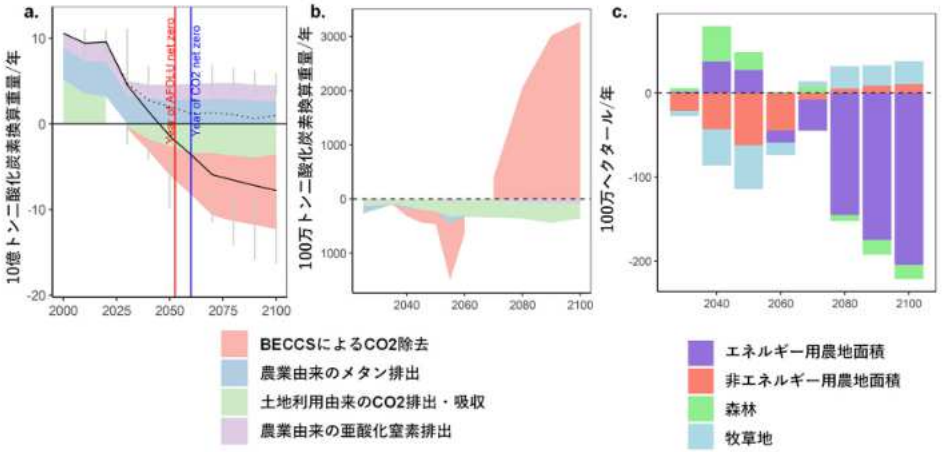
- ＜行政等 が既に活用した成果＞
  - 国連持続可能な開発に関するハイレベル政策フォーラム（2022年7月/ニューヨーク国連本部）に研究分担者の長谷川知子准教授が参加要請され、現地会合において本研究プロジェクトによる研究成果をまじえ、飢餓問題関連の研究知見を報告した。
- ＜行政等 が活用することが見込まれる成果＞
  - 気候問題と持続可能性の関わりを扱う多数の研究論文を、投稿期限・掲載受理期限に間に合う形で影響力の大きな学術誌において公表でき、結果的にIPCC第6次評価報告書（特に第3作業部会報告書）での成果引用につながった。IPCC評価報告書は、国連気候変動枠組条約パリ協定の下で2023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。

環境政策への貢献： IPCC-AR6での引用

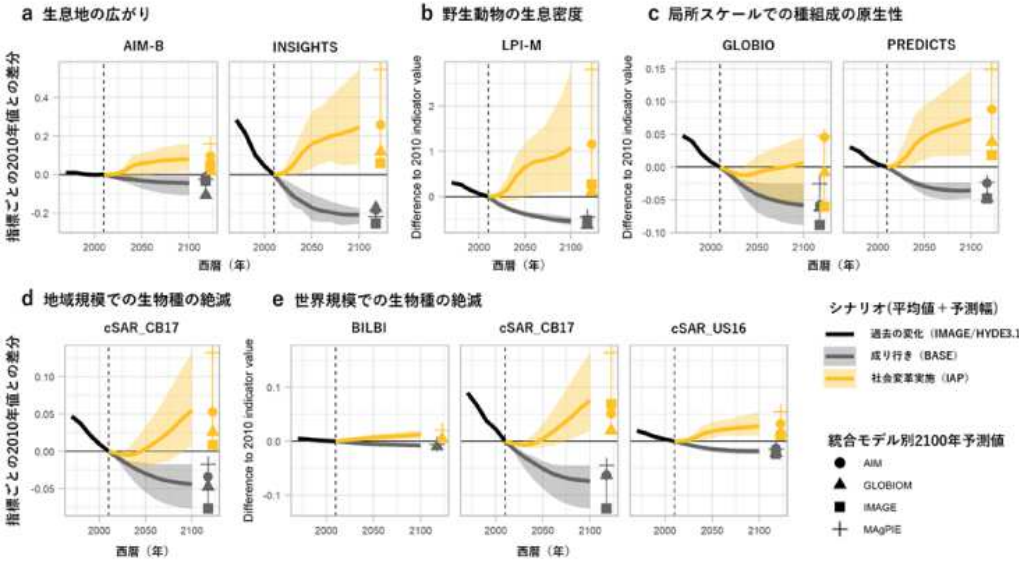
- 2022.2にWG2、2022.4にWG3がそれぞれ報告書公表
- WG3第3章を中心に多数論文が引用された。
- IPCC関連のアウトリーチ貢献



緩和政策下でのSDG指標の定量化
Fujimori et al. (2020) ERL【研究1-10】



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
Hasegawa et al. (2021) Nature Sustainability【研究2-1】



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－ Lecrere et al. (2020) Nature【研究2-3】

国民対話や政策貢献の事例

ウェビナー共催（気候危機イニシアチブ・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」（2022.9）

FFFJ（Fridays for Future Japan）とのウェビナーシリーズ共催
「[シリーズ若者が聞く！] 気候変動は「どのくらい」「どう」ヤバいのか？」（生物多様性2021.1 / 食と農2021.3）

国連SDハイレベル政策フォーラムでの飢餓問題
関連の知見報告　　長谷川（2022.7/国連本部）

シンポジウム共催（推進費S-18・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）

政策決定者向け要約のコンテンツ

研究目的：「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。

- ネットゼロ排出に向けた気候緩和策と持続可能開発目標
  - 気候緩和策とSDGs指標の統合評価および限界SDG排出削減指標の提案
    - Liu et al. (2020) on ERL ; Fujimori et al. (2020) on ERL
  - 気候緩和策の生物多様性への影響
    - Hirata et al. (under review)
  - 自然保護・再生と食料システム変革による生物多様性の保全
    - Lecrere et al. (2021) on Nature
  - 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
    - Fujimori et al. (2022) on Nature Food
  - 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
    - Hasegawa et al. (2021) on Nature Sustainability
  - 炭素税収入を用いた貧困解決政策
    - Fujimori et al. (2021) on ERL; Zhao et al. (2022) on Sustainability Science
  - 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
    - Xia et al. (under review)
- 気候緩和策と気候影響
  - 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
    - Hasegawa et al. (2021) on Nature Food
  - 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
    - Park et al. (2021) on Earth's Future; Park et al. (2023) on GEC ; Park et al. (under review)

・ 1.5/2℃目標のための緩和は他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が必要

・土地利用改変を伴う緩和策は生物多様性に悪影響。
・気候管理と生物多様性保護の両面からの包括的土地管理が必要。
・食料システムの変革がカギ

・SDGsと気候目標の同時達成における国際協力の重要性

1.5/2℃目標の堅持に加え追加的適応策の必要性を強調

５－３．研究目標の達成状況（全体）

- 全体目標：「目標を大きく上回る成果をあげた」
  - 両サブ課題とも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。（次スライドのサブ別報告を参照）
  - さらにサブ課題で連携し、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。
  - 【特記】査読論文数は英文47編・和文15編であり、Science、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。
  - 国民対話や政策貢献も積極的に実施できた。
  - 論文公表成果の量と質をふまえ「目標を大きく上回る成果をあげた」と自己評価する。

５－３．研究目標の達成状況（サブ別）

- サブ１：「目標を上回る成果をあげた」
  - 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。
    - ネットゼロ排出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]）。
    - サブテーマ間連携での成果も創出した（[研究1-8]～[研究1-10]）。
  - 【特記】学界・社会への影響力の強い学術誌での成果公表
    - 英文16編、和文2編の査読論文公表。（Nature誌、Nature Food誌、Science Advances誌、Global Environmental Change誌での主著論文発表を含む）
  - 【特記】[研究1-6]の影響エミュレータについては、レポジトリで無償公開することで、国内外の気候研究での利用が見込まれる。実例として、国際モデル比較研究に貢献し、Nature Climate Change誌での共著論文を追加的成果として得ることができた。
- サブ２：「目標を大きく上回る成果をあげた」
  - 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。
    - 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]）。「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」という当初目標を十分に達成できている。
  - 【特記】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。
    - 英文31編、和文13編の査読論文公表（Nature Food誌、Nature Sustainability誌での主著論文、Science誌、Nature誌、Nature Energy誌、Nature Climate Change誌での共著論文を含む）
  - 【特記】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せた。本研究活動を通じて国際モデル比較研究で存在感を高め、結果的に国際共同研究でも主著論文の執筆公表が複数できた。

6. 研究成果の発表状況

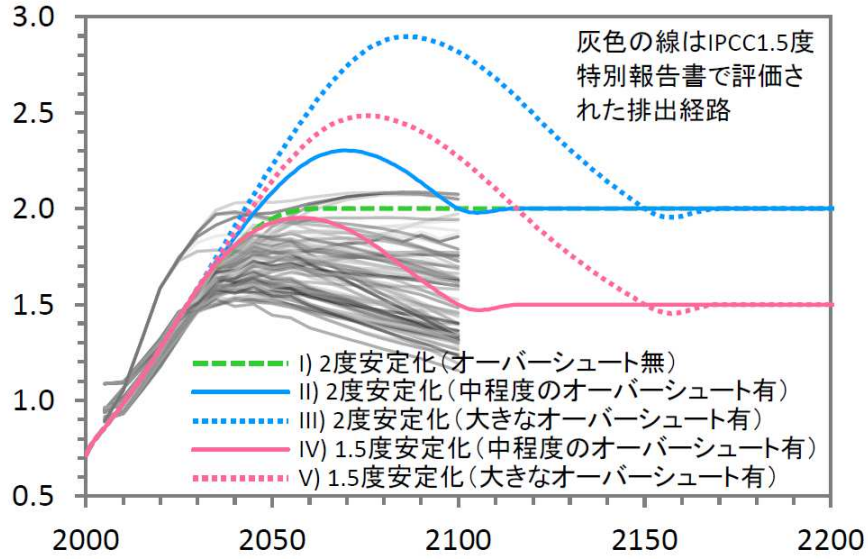
- 査読付き論文：62件
  - Nature誌1件、Nature Sustainability誌1件、Nature Food誌2件、Global Environmental Change誌1件、Science Advances誌1件など、参画者/協力者が主著の英文誌論文が計20件
  - Nature誌1件、Science誌1件、Nature Energy誌1件、Nature Climate Change誌5件、PNAS誌1件など、共著英文誌論文が計27件
- 査読付き論文に準ずる成果発表：該当なし
- その他誌上発表（査読無し）：21件
- 「国民との科学・技術対話」の実施：6件
- マスコミ等への公表・報道等：24件
  - 12件の論文公表時プレスリリースを含む
- 本研究費の研究成果による受賞：3件
- その他の成果発表（ポスター発表）：11件

【補足資料】 研究項目別の概要説明スライド

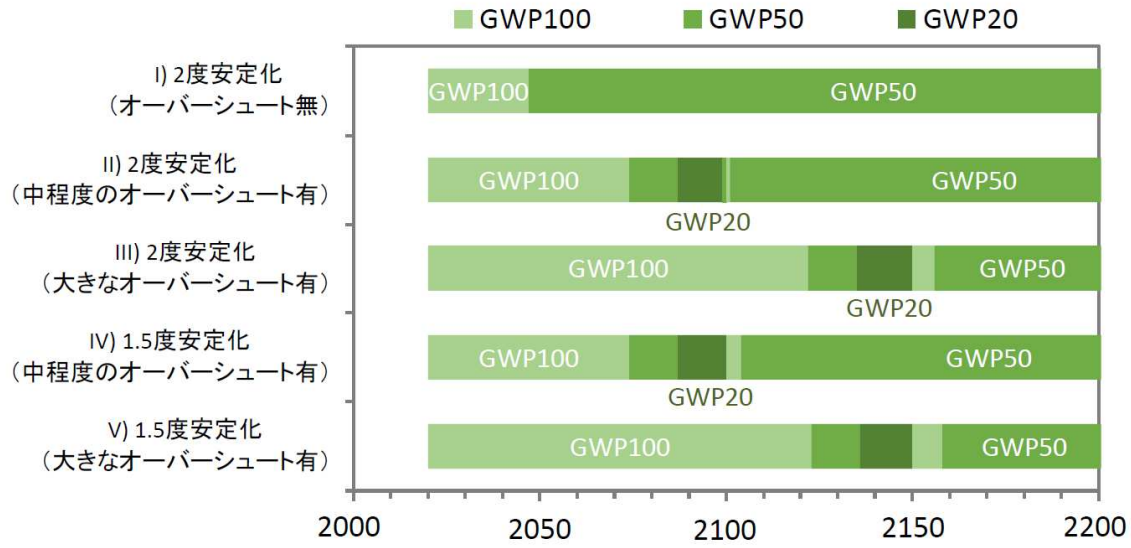
研究1-1:気候緩和目標に対応する排出経路分析

- 簡易統合評価モデルACC2を用いたパリ協定2℃目標を超過(オーバーシュート)する場合を含む最小費用経路分析(上図)
- IPCC AR5で扱われている温室効果ガス排出指標(GWP100※等)の中で、最小費用経路に対応する排出指標を選択(下図)
- パリ協定ではGWP100を利用することが事実上合意されており、この選択は今世紀中盤までは費用効果が見込まれる。
- 長期的には実際の排出経路に沿う排出指標に変更した方が費用効果が高い。
- 排出指標を見直す機会を5年毎のグローバルストックテイクに取り入れることを提言

a) 代表的な排出経路の世界平均気温上昇(°C)



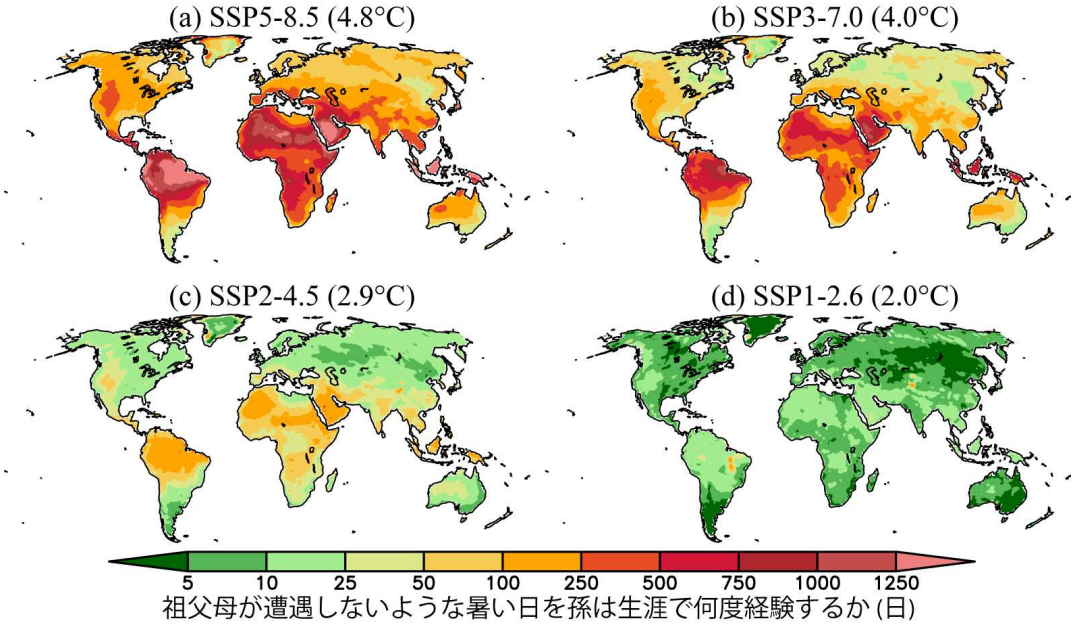
b) 各排出経路における経済効率的なメタンの排出指標



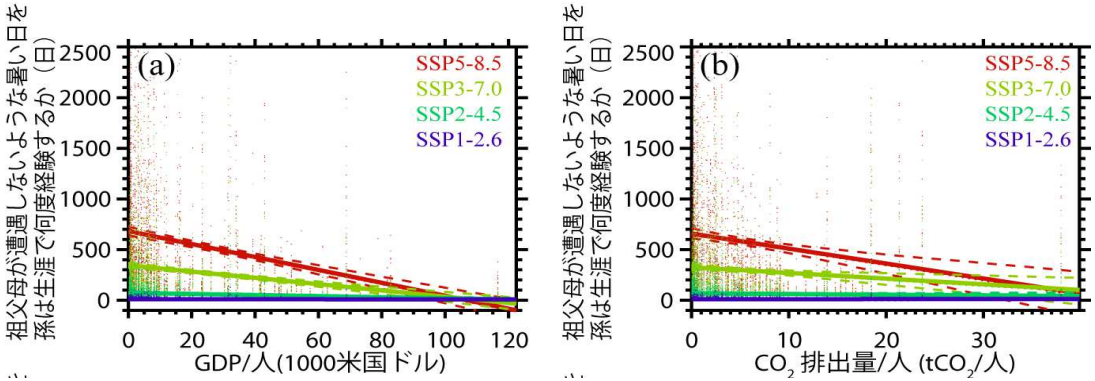
※排出指標:非CO2温室効果ガスや短寿命気候汚染物質の排出量をCO_2排出量へ換算するための係数
(例) GWP100: 100-year Global Warming Potential

Tanaka et al. (2021) Cost-effective implementation of the Paris Agreement using flexible greenhouse gas metrics. *Science Advances*, **7**, eabf9020
2021年5月29日報道発表「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　パリ協定温度目標へ向かうための排出削減費用の観点から」

- 「祖父母がその人生の間に遭遇しないような暑い日や大雨を孫は何度経験するか」という指標を提案・推計
  - 気候変動の緩和がうまく進まないシナリオ（SSP5-8.5）では、熱帯の一部で、祖父母世代が生涯に経験したことのないような暑い日を孫世代は一生涯に 1000回以上（日本では400回程度）、大雨の日を5回以上（日本では3回程度）、それぞれ経験しうる。
- 現状の一人当たりGDPやCO_2排出と極端気象の経験回数を比較
  - 貧しくCO_2排出量の少ない国ほど、未経験の暑い日の発生頻度に関する世代間不公平性が大きい。
  - 2℃目標を満たす緩和策（SSP1-2.6）は、世代間不公平性の地域格差を狭めることにも効果がある。



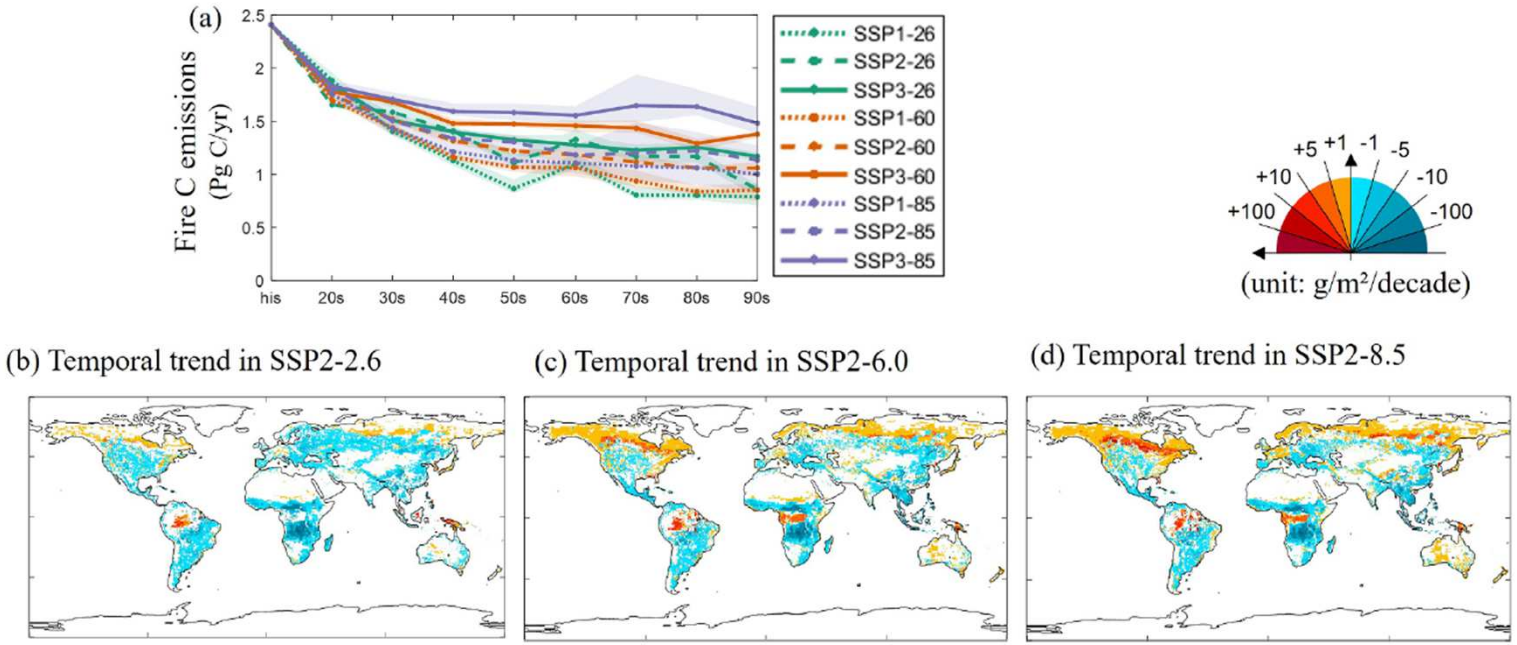
2020年に60歳だった祖父母の元に孫が生まれ、その孫が80歳まで生きると仮定した場合、祖父母が遭遇しないような暑い日を孫は生涯で何度経験するのかの予測。モデル群の中央値を示す。カッコ内の数字は1851-1900年から2080-2100年までのモデル平均した世界平均気温上昇量。



縦軸は祖父母が経験しない暑い日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CO_2排出（2018年；Global Carbon Project）。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。

Shiogama et al. (2021) How many hot days and heavy precipitation days will grandchildren experience that break the records set in their grandparents' lives? *Environmental Research Communications*, **3**, 061002. ； 2021年6月11日報道発表「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？」

研究1-4:気候および社会経済の変化が野外火災による炭素排出に及ぼす影響



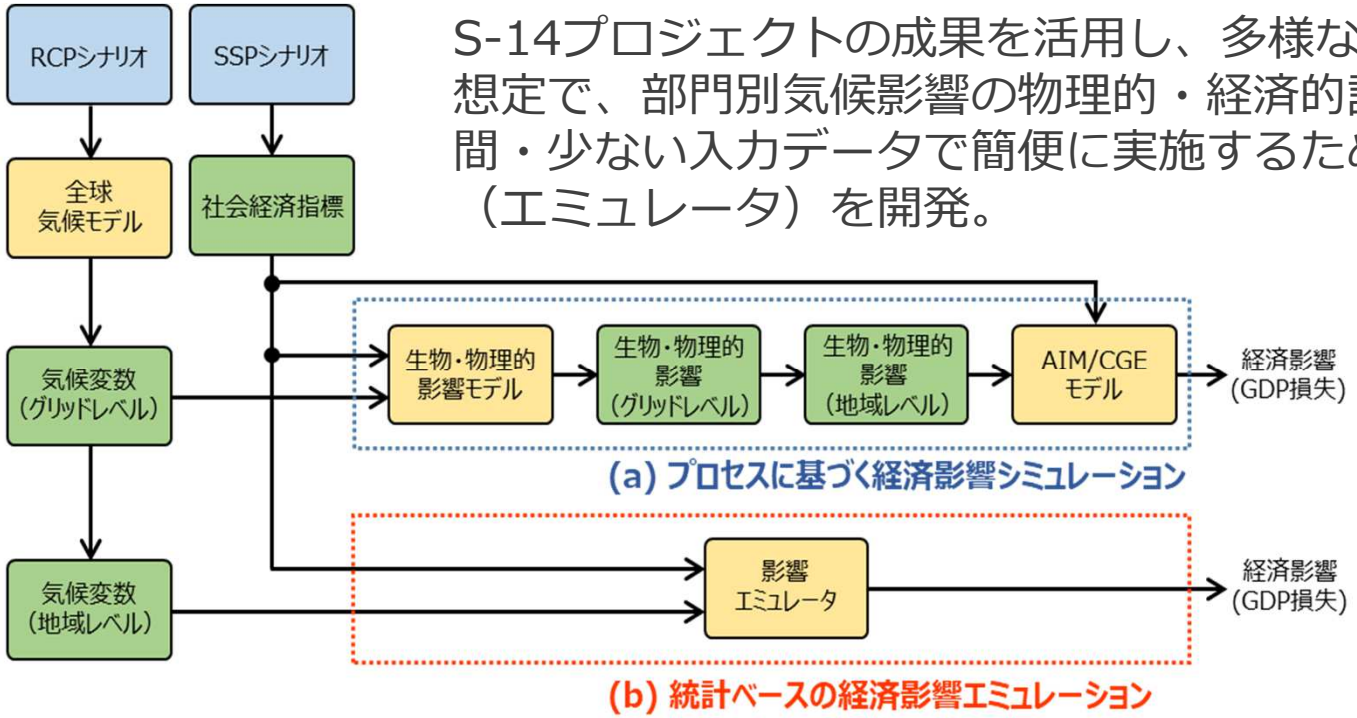
(a)3つの社会経済シナリオ（SSP1・SSP2・SSP3）と3つの温室効果ガス排出想定（RCP2.6・RCP6.0・RCP8.5）での気候シナリオを前提として予測された野外火災による炭素排出量の時間変化。(b)～(d)はそれぞれ社会経済シナリオSSP2と温室効果ガス排出想定RCP2.6・RCP6.0・RCP8.5での気候シナリオを前提として予測された野外火災排出の過去期間（2006～2015年）からの変化量の空間分布（赤が排出増・青が排出減）。

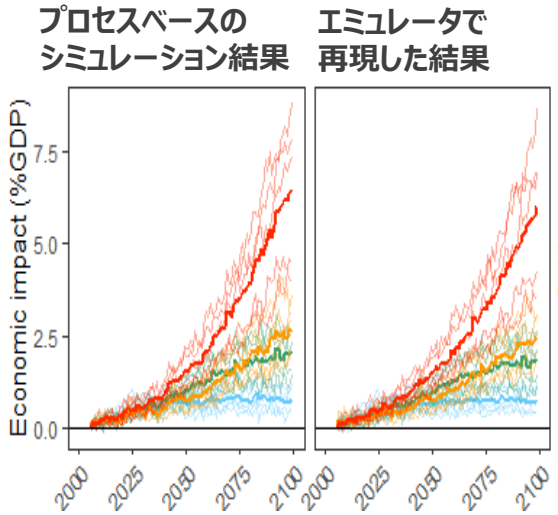
- 野外火災の生起や規模に影響する5 つの因子 (気象、バイオマス量、土地利用、人口密度、1人あたりGDP)の将来変化を考慮し、21 世紀を通じての野外火災による炭素排出量を将来予測した。
- 過去期間 (2006 ～ 2015 年) と比較すると、主として一人当たりGDP増加に伴う火災管理改善の影響で、世界の野外火災による炭素排出量は減少すると予測された。
  - 気象因子は、より大きく温暖化が進むケースで大きな寄与を持つことが示された。
  - 一方で、気候変化が大きいケースでは、燃料となるバイオマスの乾燥度が増すことを受けて、北方林での火災が特に大きく増加すると予測された。

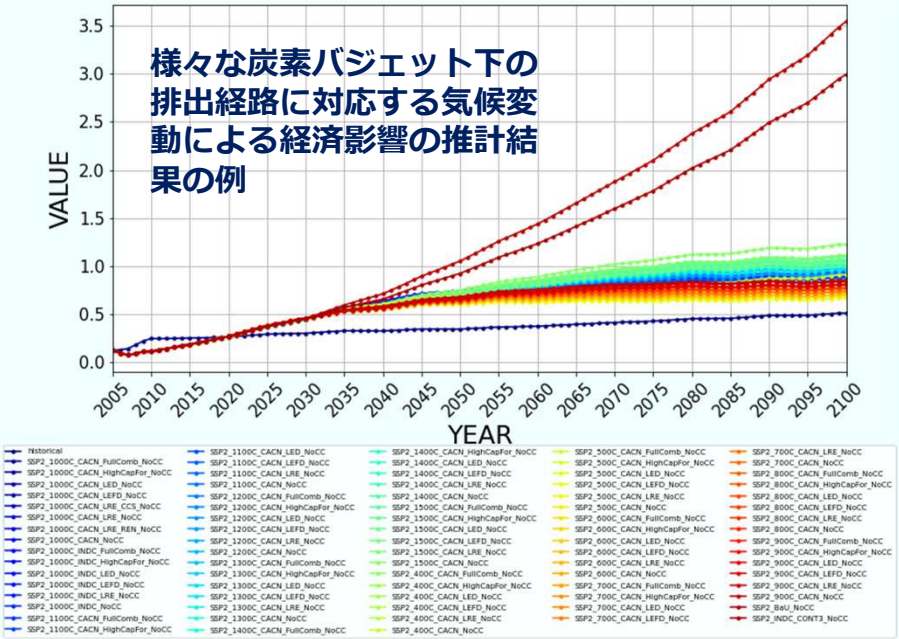
Park et al. (2023) Impact of climate and socioeconomic changes on fire carbon emissions in the future: Sustainable economic development might decrease future emissions。*Global Environmental Change*, **80**, 102667.

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・応用

S-14プロジェクトの成果を活用し、多様な気候目標・排出経路の想定で、部門別気候影響の物理的・経済的評価を、短い計算時間・少ない入力データで簡便に実施するための統計モデルツール（エミュレータ）を開発。







SSP×RCPの組合せ以外の将来シナリオやISIMIPで採用された以外の気候モデルの結果を用いて、将来の気候変動による経済影響の推計を実現。

活用例

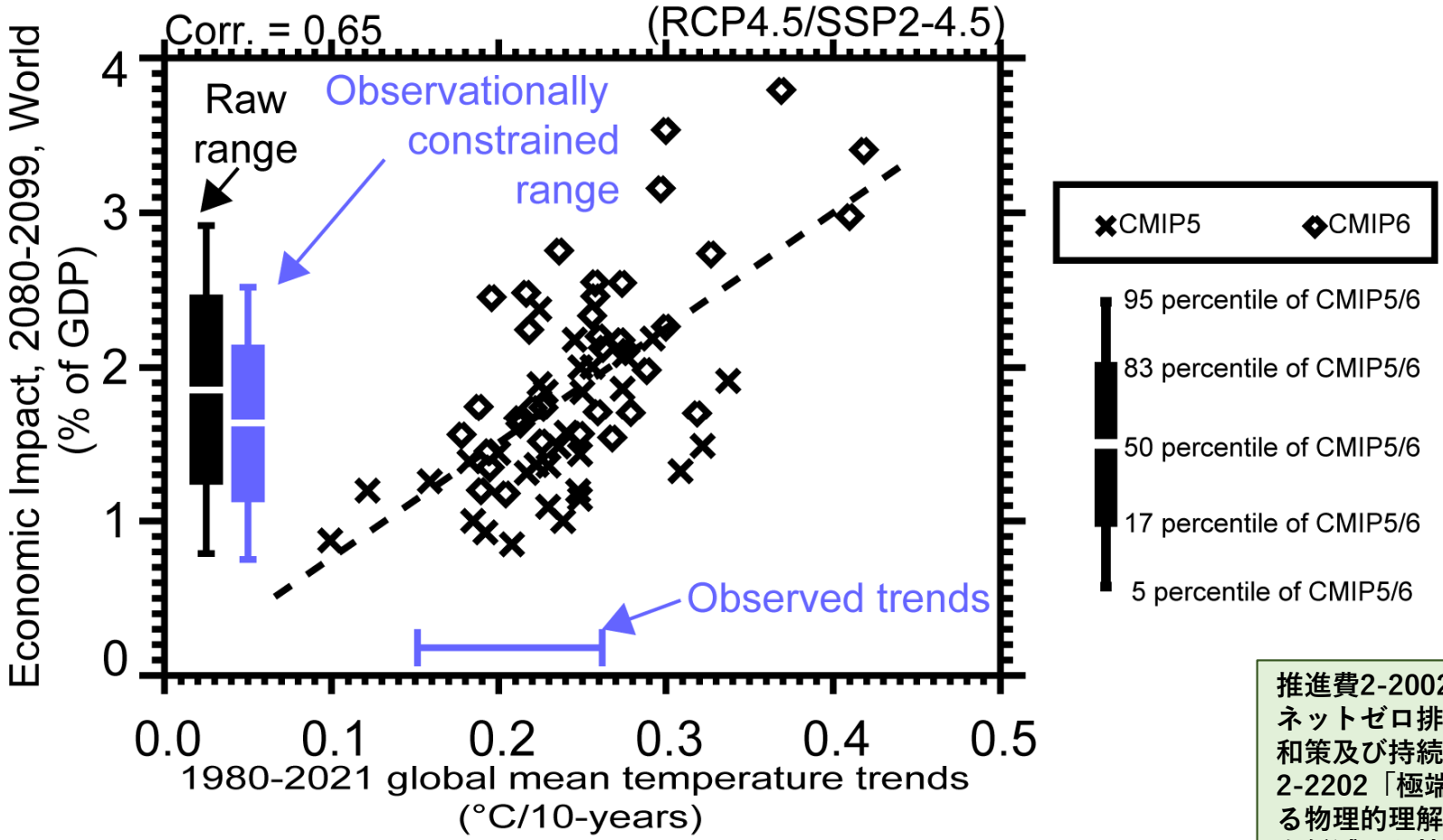
CMIP5/6の全気候モデルの結果による経済影響の推計
→ ECによる経済影響不確実性低減

AIM/HubとMAGICCの出力による経済影響の推計
→ 緩和と影響の双方を考慮したシナリオ評価

SCM4OPTの出力による経済影響の推計
→ 排出経路に対応するSCCの推計

Takakura et al. (2021) Reproducing complex simulations of economic impacts of climate change with lower-cost emulators. *Geoscientific Model Development*, **14**, 3121-3140

研究1-7:気候変動経済影響の気候モデル間不確実性の低減



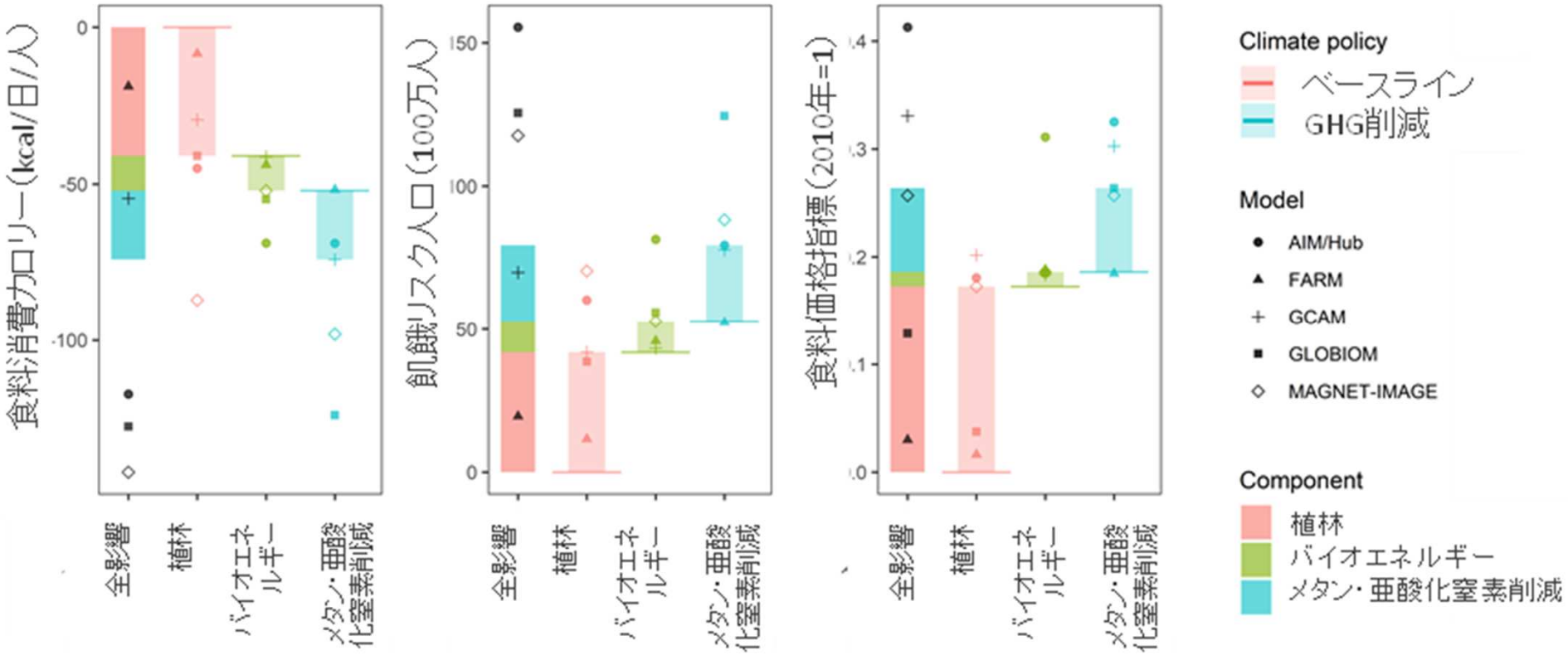
1980-2021世界平均気温トレンド (°C/10年)

推進費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」と推進費2-2202「極端気象の将来変化に関する物理的理解に基づく予測不確実性を低減した情報伝達」の連携研究

- 過去(1980-2021)の気温トレンドが過大な気候モデル(Hot model)は、将来の気温上昇や降水量増加も過大評価しており、その信頼性を評価することで不確実性幅の上限は下げられる(Emergent Constrain)。
- それにも関わらず、影響評価研究ではHot modelsの予測をそのまま使うことが多く、影響を過大評価している可能性がある(Hot model issue)。
- CMIP5,6気候モデルの気温・降水量予測を用いて気候変動影響をエミュレートした場合、世界の気候変動経済影響の気候モデル間不確実性の上限を2.9%から2.5%へ下げられ, 分散を３１%低減できる。
- ISIMIP3bの５つの代表気候モデルのうち２つが'Hot model'で影響の過大評価が懸念されるが、エミュレータとEmergent Constrainを組み合わせれば上限を下げられる可能性がある。

Shiogama et al. (2022) Uncertainty constraints on economic impact assessments of climate change simulated by an impact emulator. ERL, doi:10.1088/1748-9326/aca68d
2022年12月16日報道発表「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」

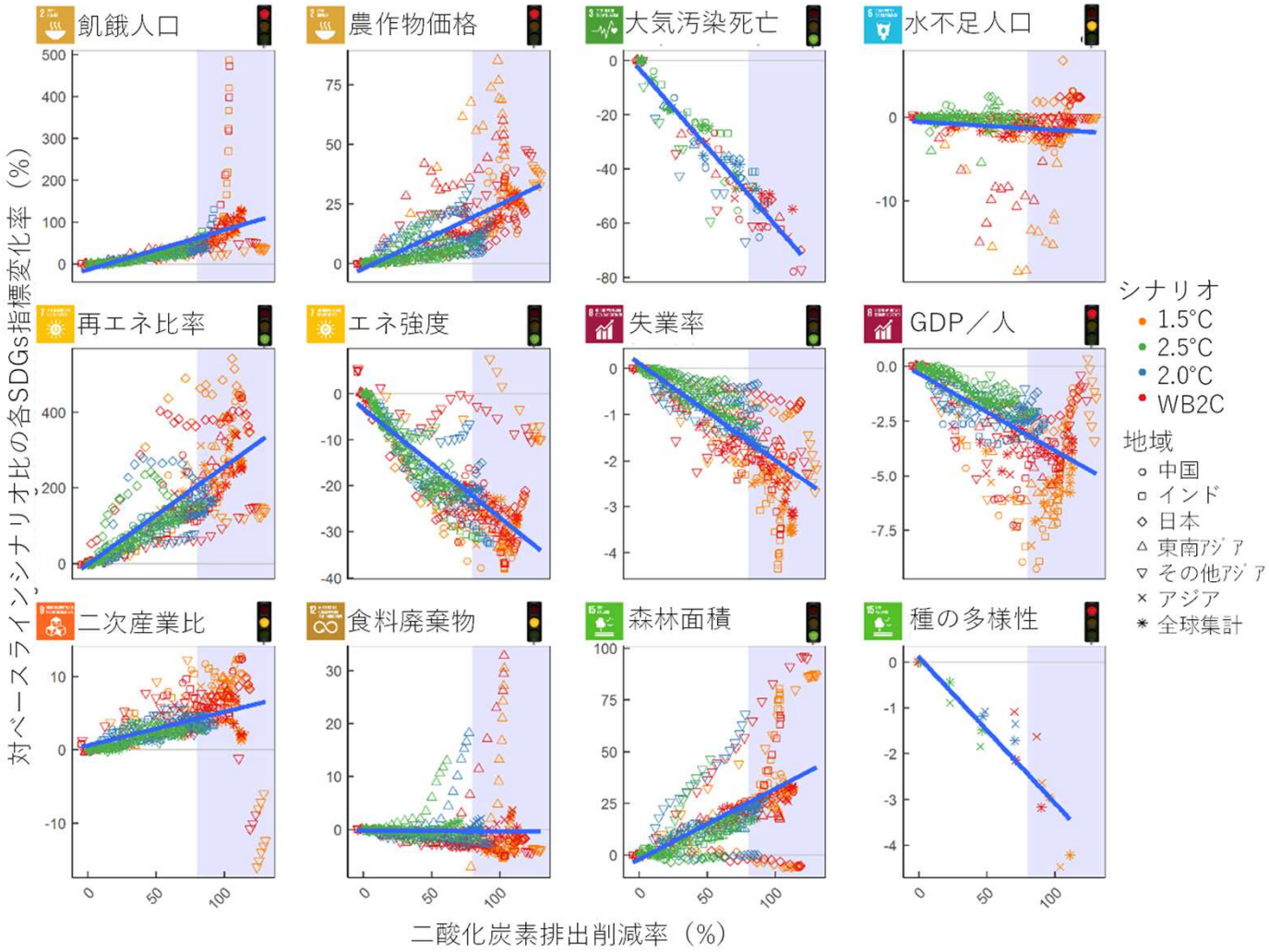
農業・土地利用分野の脱炭素戦略（2℃目標相当）による世界の飢餓リスク等への影響について、①メタン・亜酸化窒素削減費用の増加、②バイオエネルギー作物の生産拡大、③大規模植林、の寄与を評価。
2050年では、全体でベースラインから国際食料価格は27%増加し、飢餓リスクに直面する人口も1億1000万人増える可能性を示唆。
3つの要因のうち、大規模植林が最も大きな影響を与える可能性。



Fujimori S., Wu W., ..., Takahashi K.(2022) Land-based climate change mitigation measures can affect agricultural markets and food security. *Nature Food*, **3**, 110–121.
2022年2月25日報道発表「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1-10:緩和政策下でのSDG指標の定量化

- 気候緩和政策とSDGs指標には、正の波及影響(相乗効果)と負の波及影響(トレードオフ)が存在。
- CO_2排出削減によりSDGs指標が受ける影響について、複数指標を対象に多様なCO_2排出削減強度について定量評価を実施。
- 排出削減の強度とSDGs指標の関係を描出するために、新たに「限界SDG排出削減指標(MSV:単位CO_2排出量を削減することによって各SDG関連指標が受ける波及影響)」を提案・評価した。
- CO_2排出削減率と多くのSDGs指標との間に明確な関係があることが示された。
  - 例:CO_2を1%削減すると、大気汚染に関連する早期死亡(SDG3)の0.57%を回避できる。

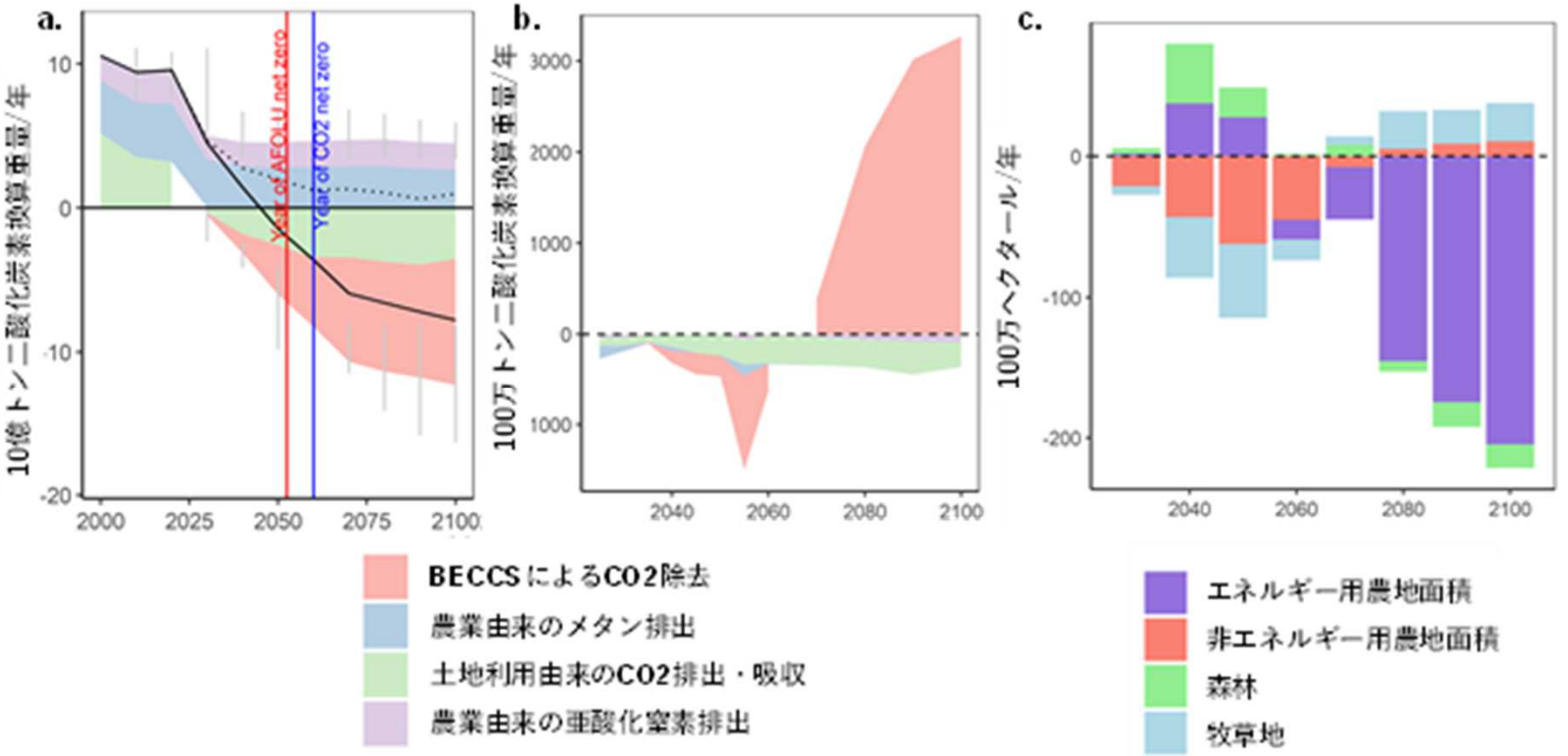


CO_2排出量削率とSDGs指標との関係。色はシナリオ、マーカーは地域を表している

Fujimori et al. (2020) Measuring the sustainable development implications of climate change mitigation. *Environmental Research Letter*, **15**, 085004

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

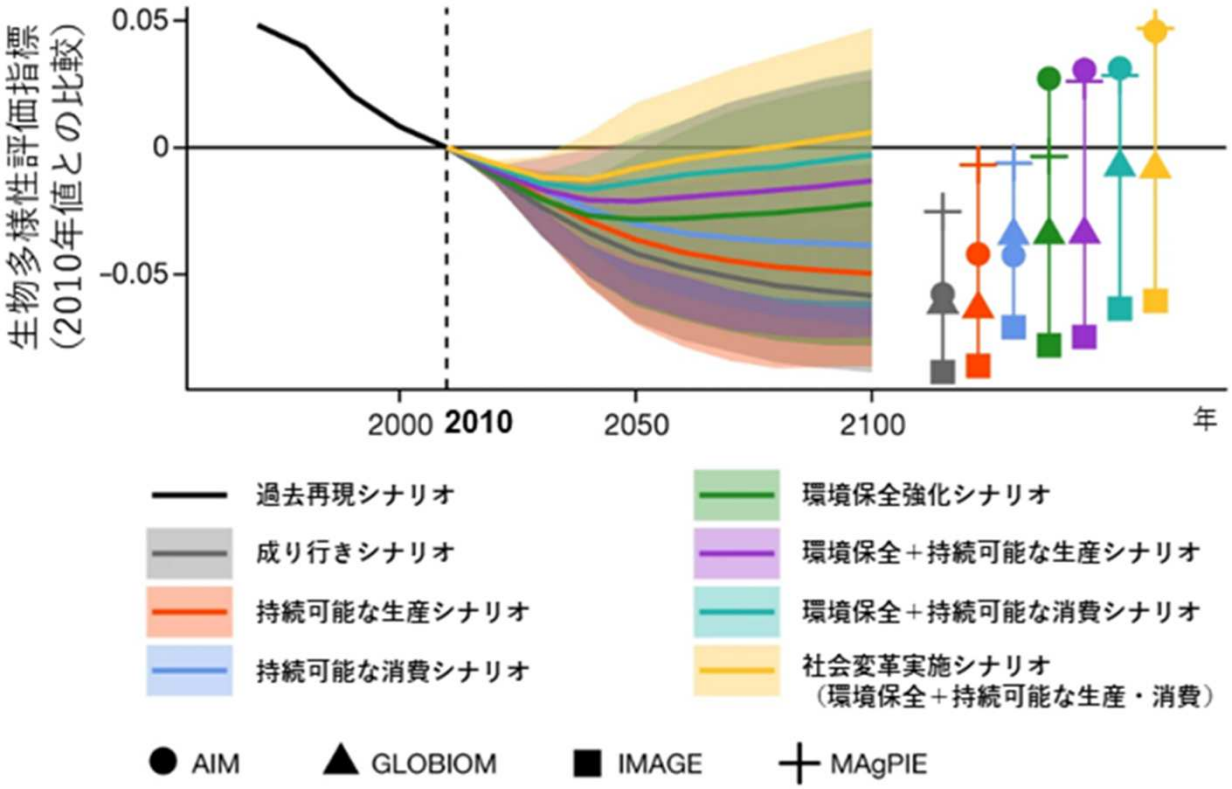
- 国際モデル比較プロジェクトENGAGEに参加し、6モデルの共通想定実験の結果を用いて実施
- 負の排出に依存せず1.5℃・2℃目標を達成するための早期の気候変動対策（NZシナリオ）について、今世紀後半に負の排出を想定する従来の緩和シナリオ（EOCシナリオ）との対比で、土地利用と食料システムへの含意を評価
- [NZ:長所]長期的には、気候緩和のためのバイオエネルギー生産による大規模な土地利用変化を回避できる。また、食料価格の低下、飢餓リスク低減、水資源不足軽減が期待できる
- [NZ:短所]短期的には排出削減のためにエネルギー作物の土地需要が増加し、食料価格が上昇、飢餓リスクが上昇
- 政策的含意：早期排出削減にあたり、短期的には、食料安全保障に関わる補完的対策を併せて実施する必要



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）。aの黒の実線（破線）はBECCS由来のCO2除去を含む（含まない）農業・土地利用由来のGHG純排出量を示す。青と赤の縦線は世界全体の二酸化炭素排出と農業・土地利用由来のGHG排出が実質ゼロに到達する年を示す。土地利用由来のCO2排出・吸収には土地利用変化によるCO2排出と植林による吸収を含む。

Hasegawa et al. (2021) Land-based implications of early climate actions without global net-negative emissions. *Nature Sustainability,* **4**, 1052-1059
2021年10月8日報道発表「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2-3:社会変革による生物多様性への影響（AIM-BIOによる国際共同研究Bending the Curveへの貢献）



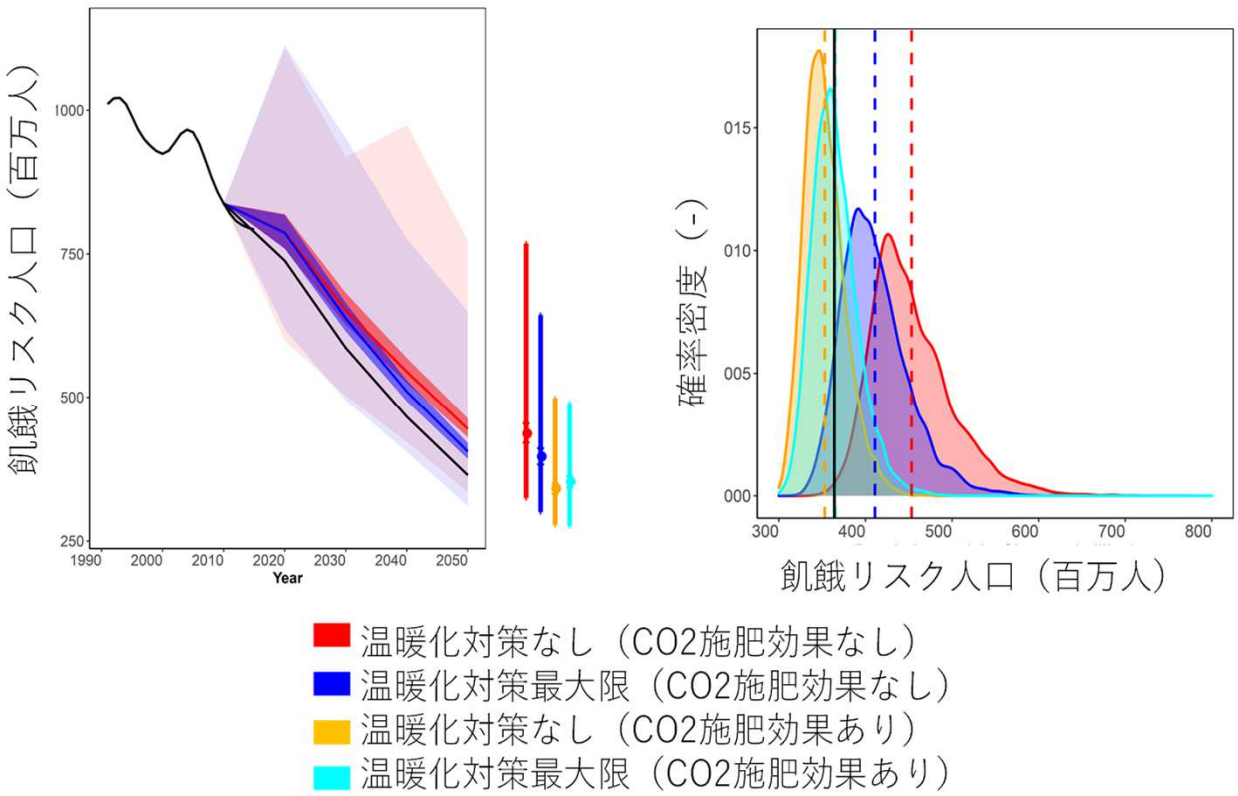
生物多様性への影響予測結果：これまでの社会システムの延長線上の「成り行きシナリオ(Base：灰色)」と自然保護・再生と食料システムの変革に向けた取り組みを最大限に実施する「社会変革実施シナリオ(IAP：黄色)」を含む7つのシナリオについて、生物多様性評価指標の変化(2010年比)を予測した。記号は統合評価モデルごとの2100年までの推定結果。

- 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想定した4つの統合評価モデルと8つの生物多様性モデルを用いて将来の生物多様性の変化を予測し、その損失を食い止めることが可能なシナリオの検討を行った。
- 「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。
- 一方で「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今後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。

Leclére et al. (2020) Bending the curve of terrestrial biodiversity needs an integrated strategy. *Nature*, **585**, 551-556
2020年9月10日報道発表「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2-4:極端現象を考慮した食料安全保障
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

- 作物モデルと将来の気候の不確実性を考慮に入れて、極端な気象現象が将来の食料安全保障に与える影響を推定した。
- 100年に1回程度しか起こらない稀な不作について解析すると、世界全体の飢餓リスクは、2050年において気候が現状と変わらないと仮に想定した場合に比べて、気候緩和策なしケース、最大限対策を最大限行い全球平均気温を2℃以下に抑えたケースで、それぞれ20～36%、11～33%程度増加する可能性があることがわかった。
- 南アジアなどの所得が低く、気候変化に脆弱な地域では、上記のような影響に備えるために必要な食料備蓄量は、現在の食料備蓄の3倍にも上る。

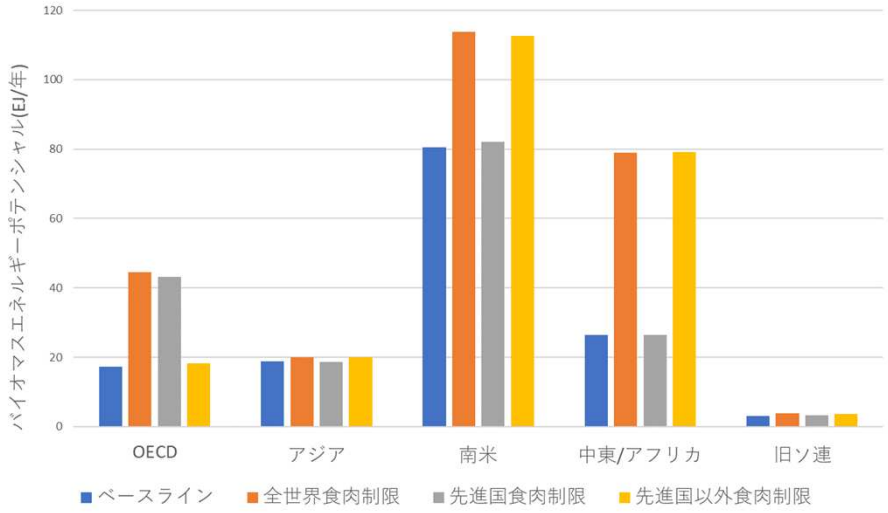


左は世界の飢餓リスク人口の推計。黒はベースラインシナリオ（現状気候を想定しており、不確実性幅はない）、赤、青はそれぞれ気候緩和策なしケースと2℃目標相当の気候緩和策実施ケースでCO2施肥効果を考慮しない場合。黄、水色はそれぞれのケースに対してCO2施肥効果を考慮した場合を表す（面グラフが重複するため2050年値のみグラフの右側に記載している）。また、濃い部分の幅は65%タイルを表している。右図は2050年の頻度分布を表していて、黒はベースライン、破線は中位値を表す。色は左図と同様のシナリオを表す。

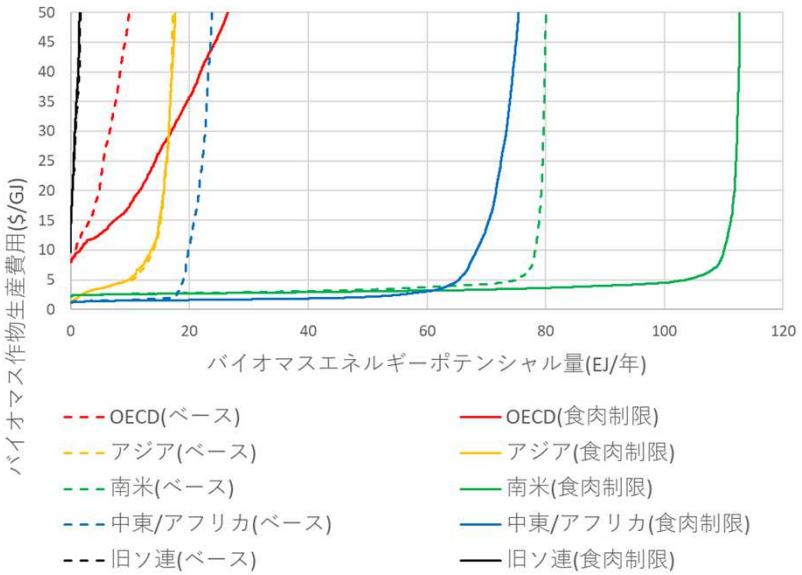
Hasegawa et al. (2021) Extreme climate events increase risk of global food insecurity and adaptation needs. *Nature Food*, **2**, 587-595.
2021年8月6日報道発表「将来の不確実性を考慮に入れた飢餓リスクとその対応策の算定」

研究2-5: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

- 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。



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）

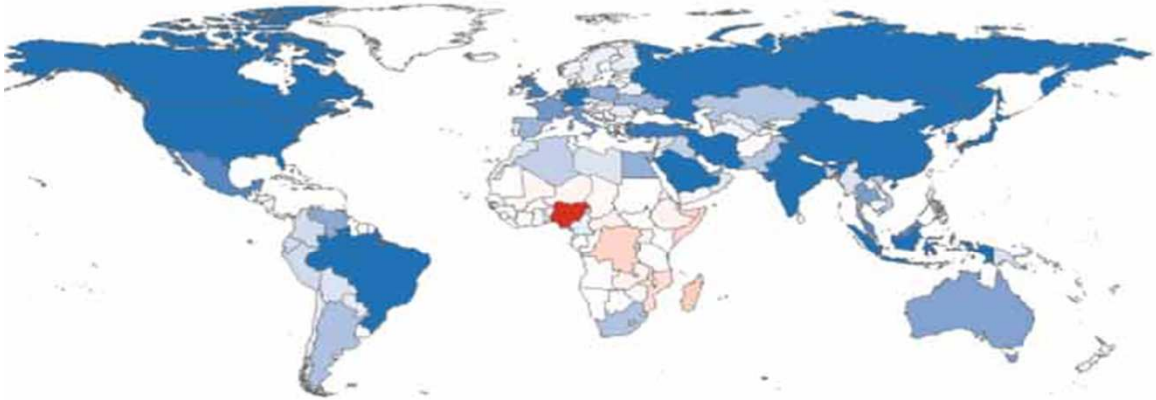


2050 年，各シナリオにおける地域別のバイオマスエネルギー供給曲線

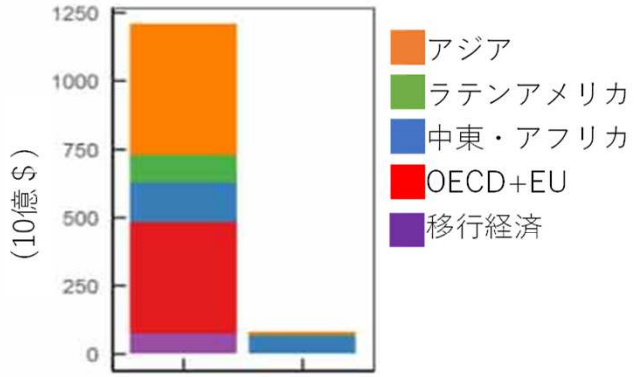
伊藤涼太朗、長谷川知子、藤森真一郎：土木学会論文集G（環境），78(5), I_79-I_85 (2022)
食内容を考慮したバイオマスエネルギーポテンシャル量の推計.

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

- 貧困と気候変動緩和政策の関係をよりよく理解するために、従来の統合評価モデルを拡張し、貧困指標の推計モジュールを開発・実装した。
- 貧困撲滅に要する費用(貧困ギャップ)を推計したうえで、2℃目標を十分に満たすレベルでの排出削減を行うための炭素税収入を計算し、その時の炭素税収入が、貧困撲滅にどの程度役立つ可能性があるか評価した。
- 2030年において、貧困ライン(一人一日当たり1.9米ドルを想定)に対する所得の不足として計算される貧困ギャップは840億米ドルと見積もられた。一方、2° C気候変動緩和のための炭素税収入の規模は2030年に16000億米ドルと見積もられた。
- アフリカ大陸の低所得国では、自国の炭素税収入のみで貧困ギャップを埋めることはできないが、この不足分は、高所得国の収入の一部を使用することで補うことができることが示された。



炭素税収入　－　貧困ギャップ　(国別)



左：炭素税-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地域別で比較したもの。炭素税が貧困ギャップを大きく上回っていることがわかる。

Fujimori et al. (2020) An assessment of the potential of using carbon tax revenue to tackle poverty. *Environmental Research Letter*, **15**, 114063