

R2-R4年度 環境省 推進費2-2005

**気候政策とSDGs の同時達成における
水環境のシナジーとトレードオフ**

**Synergies and Trade-offs among Climate Policies and
Sustainable Development Goals in terms of Water Sector**

研究代表者・サブテーマ1 平林 由希子（芝浦工業大学）

サブテーマ2 沖大幹（東京大学）

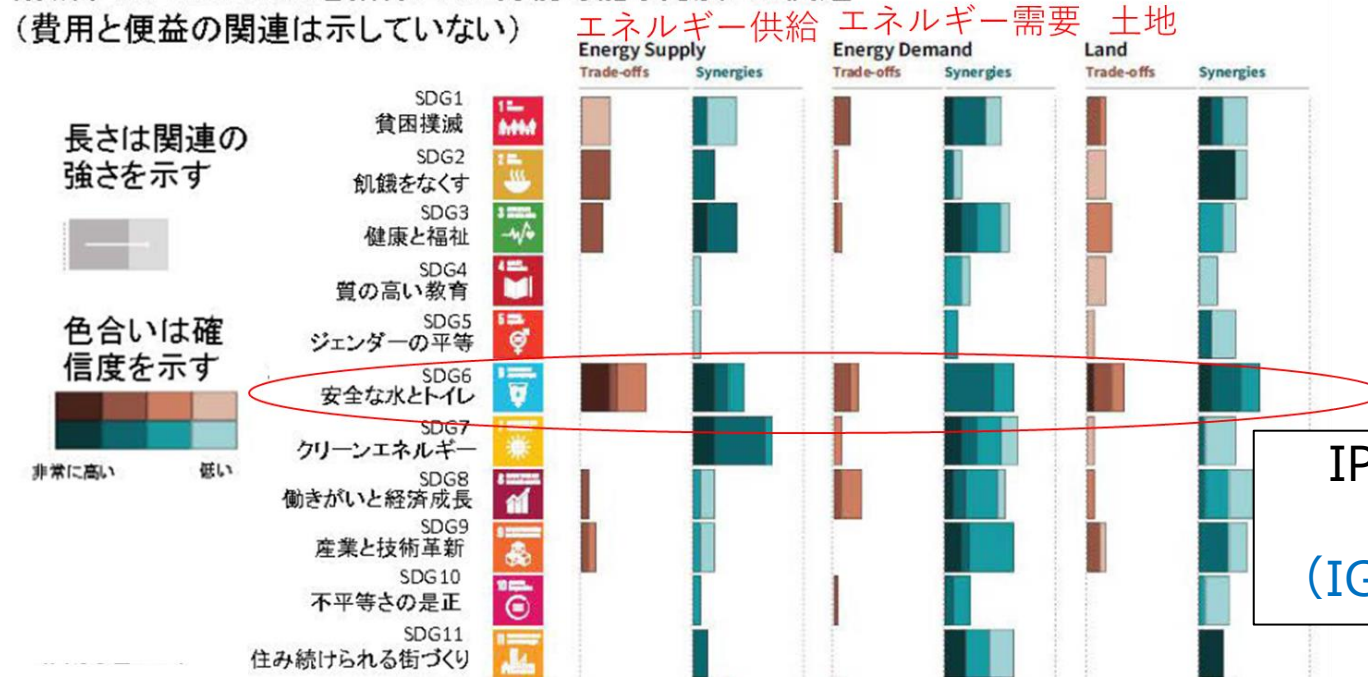
サブテーマ3 花崎直太（国立環境研究所）

サブテーマ4 飯泉 仁之直
（農業・食品産業技術総合研究機構農業環境研究センター）

1. 研究の背景

削減オプションとSDGsを指標とした持続可能な発展との関連

(費用と便益の関連は示していない)



IPCC 1.5度特別報告書
SPM Fig.4
(IGESハンドブック和訳)

- 気候変動の緩和策と適応策は、持続可能な開発目標(SDGs)達成に向けた取り組みとの間には**大きなシナジー**が期待されているが、**トレードオフ**も懸念されている
- SDG6(水) はエネルギー需要や土地利用を介して最もトレードオフが大きい
 - ✓ 論文のレビューに基づく概念的な評価 (IPCC SR1.5)
 - ✓ バイオ燃料の大量生産について定性的かつマクロな検討(IPCC SR Land)
 - ✓ 統合評価モデルでは水資源の制約や、干ばつや洪水の考慮が不足

2. 研究目的と体制

グローバルな数値モデル群を活用し、水環境に着目した定量的かつ地域詳細な気候政策とSDG目標のシナジーとトレードオフを検討

サブ1-b: 水環境に関する統合解析



気候目標

SDGs

- ・ 適応策・緩和策に伴うシナジーとトレードオフ
- ・ 同時達成の実現可能性



- ・ Future Earth
地球規模の持続可能な発展
ターゲット 1, 2, 4, 5, 6

- ・ UNFCCC グローバル・ストックテイク
- ・ IPCC レポートWGII, WGIII

サブ1-a 水災害のシナジーとトレードオフ



全球河川モデル CaMa-Flood

- ・ 洪水の将来変化
- ・ 水災害による影響
(財への被害・貧困等)

サブ2: 水熱質循環のシナジーとトレードオフ

全球水温モデルHEAT-LINK
全球窒素循環モデル TNCM

- ・ 生活用水と健康への影響



洪水の将来変化

洪水の将来変化

全球水資源モデル H08

- ・ 現実的な水力発電量
- ・ バイオ燃料増産の影響
- ・ 水利用の変化

土地利用変化シナリオ
灌漑シナリオ

化学肥料・農薬使用
シナリオ

播種・収穫面積モデルの構築

全球作物モデルCYGMA

- ・ 食料生産の将来変化



サブ3: 水資源のシナジーとトレードオフ



サブ4: 食糧生産のシナジーとトレードオフ

3. 研究目標

- 水環境に着目し、気候目標とSDGsを同時に達成する際に生じうるシナジーとトレードオフを明らかにし、想定される緩和策や適応策のもとで水に関連するSDGsの達成可能性を地域的に評価する
- 各サブテーマでは、全球数十kmの解像度での数値シミュレーションを実施し、国ごとまたは地域ごとに、気候目標（緩和策・適応策）と水環境に関連するSDGsとのシナジーとトレードオフを国ごと・地域ごとに分析する。
- 最終的には、気候目標やSDGsに掲げられた目標が、水環境の観点から実現可能なのか、どの地域に水環境への負荷が高く、シナジーやトレードオフが存在するか、そして同時達成が難しい課題や地域がどこにあるのかをケーススタディも含めて分析し、考えられる解決策オプションを提示する。

河川洪水に対する脆弱性の改善には、緩和策と適応策に大きいシナジーがある

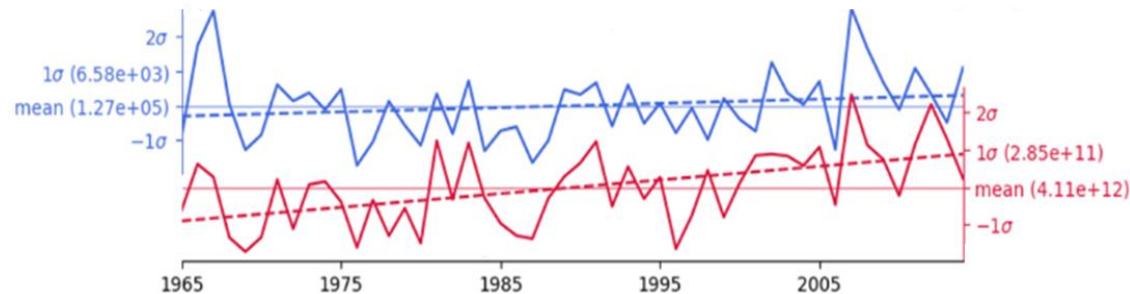
- 低排出シナリオは、高排出シナリオに比べて2100年までの指標の悪化を最大50%減らすことができ、SDG達成に緩和策が大きいシナジーを持つ
- 適応策は、指標の悪化を19%減らすことができる。
- 自国外からの金銭支援があれば、低所得国における洪水の曝露は現在のレベルよりも低減できる。
- 低所得国において洪水への曝露指標が先進国と同様のレベルにまで達成するためには、より野心的な洪水対策も重要である。

低所得国の平均の河川洪水に関するSDG1.5.1（貧困）およびSDG11.5(都市）の指標（10万人あたりの洪水曝露人口）の変化。標準適応は自国の洪水防護の総費用と便益の差が最小となるところまで防護するシナリオ、最大適応は適応の効果がある場合は適応するシナリオ

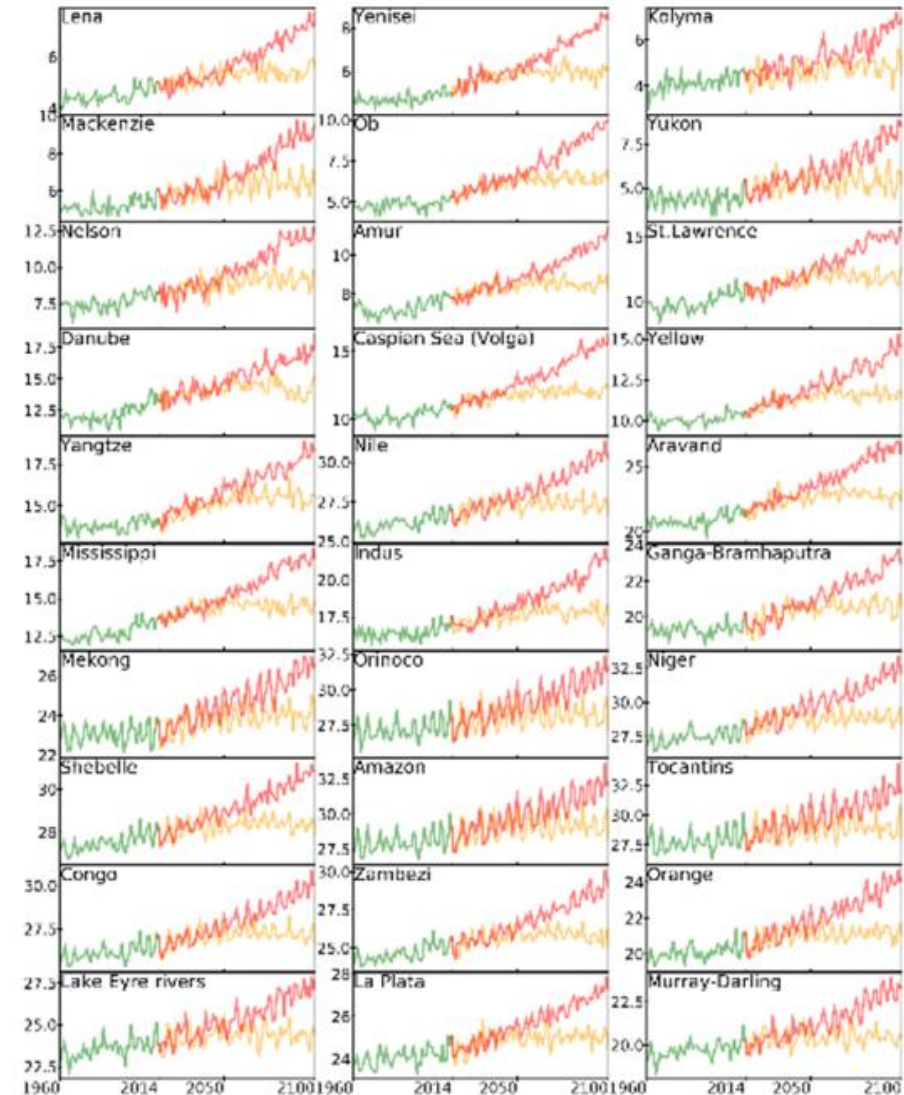
緩和策の効果	現在気候	2030	2050	2100
低排出シナリオ (ssp126)	4.55	5.56(+1.01)	5.85(+1.30)	5.55(+1.00)
高排出シナリオ (ssp585)	4.55	6.21(+1.66)	6.88(+2.33)	7.81(+3.26)
適応策の効果 (ssp585)				
低所得国平均	4.55	6.21 (+1.66)	5.33 (+0.78)	3.09 (-1.46)
先進国 (G7) 平均	1.01	1.48 (+0.47)	1.46 (+0.45)	1.11 (+0.10)

温暖化による水熱質予測を可能とする水熱動態モデルの開発

- 全球河川水温モデルHEAT-LINKを湖沼と結合した水熱動態モデルを開発し、温暖化に伴う水温変化を推計した。これまで簡略化されていた湖沼の熱動態を組み込み、特に大河川での誤差を解消することで、将来の河川水温推計を可能とした。
- 気候帯の差はあまり見られないものの、温暖化による北極圏への熱輸送増加や河川環境の変化を定量的に知ることができ、IPCC等の国際議論の場での科学的知見の蓄積に貢献した。



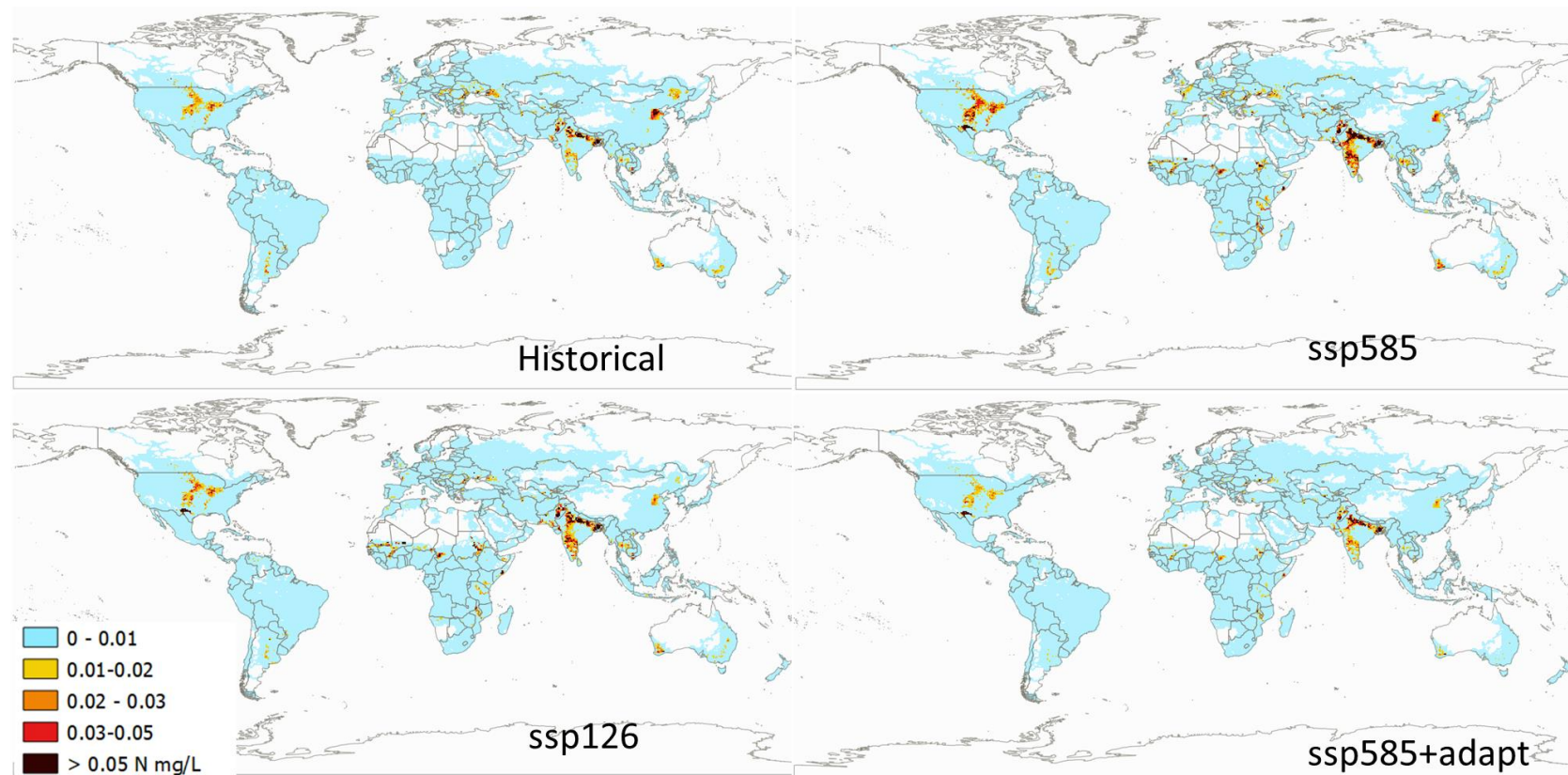
北極海に流入する50年間での流量（青線）と熱量（赤線）の増加分。



主要河川水温の将来変化。赤線がSSP126、橙線がSSP585。

全球窒素循環モデルの改良版を用いた窒素濃度の評価

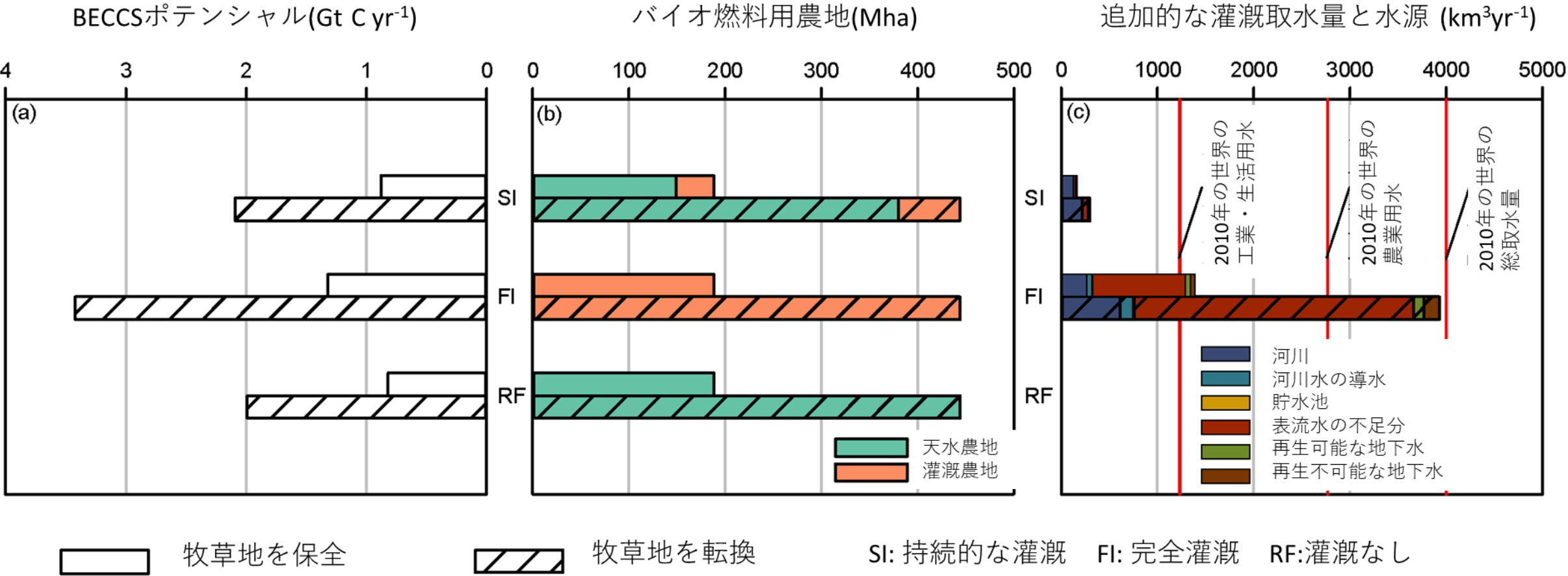
- 全球窒素循環モデルTNCMに全球河川水温モデルHEAT-LINK及び次世代河川モデルCaMa-Floodを統合することで、将来の河川水温推計を可能とした。
- 緩和策の効果は、アフリカや西アジアといった半乾燥地域～砂漠域でトレードオフとなる以外は、シナジーである。気候政策である緩和策は、多くの地域でSDG6.3.2の達成にも資する。



河川水の窒素濃度。月平均の最大値の平均を示す。

水利用の持続可能性を無視すれば、灌漑は今世紀末までに世界の BECCSポテンシャルを 60 ～ 71% 高めるものの、考慮すれば、5 ～ 6%しか高めない

持続可能な灌漑によるBECCS最大実施可能量

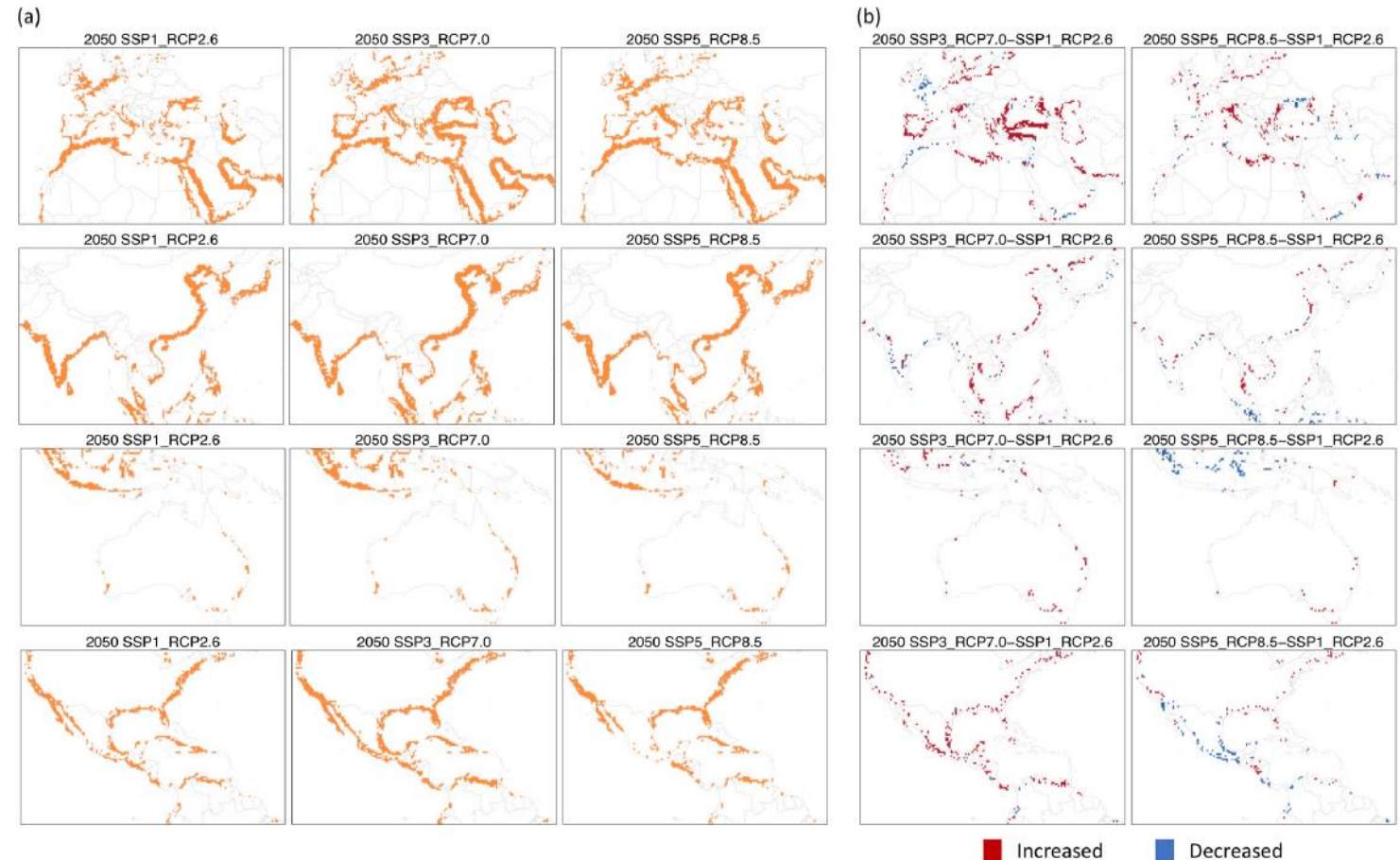


持続可能な灌漑はBECCS最大実施可能量を5-6%しか増やさない。
従来の灌漑による増産への楽観論を否定する結果

将来の海水淡水化施設の分布を推定する手法を開発

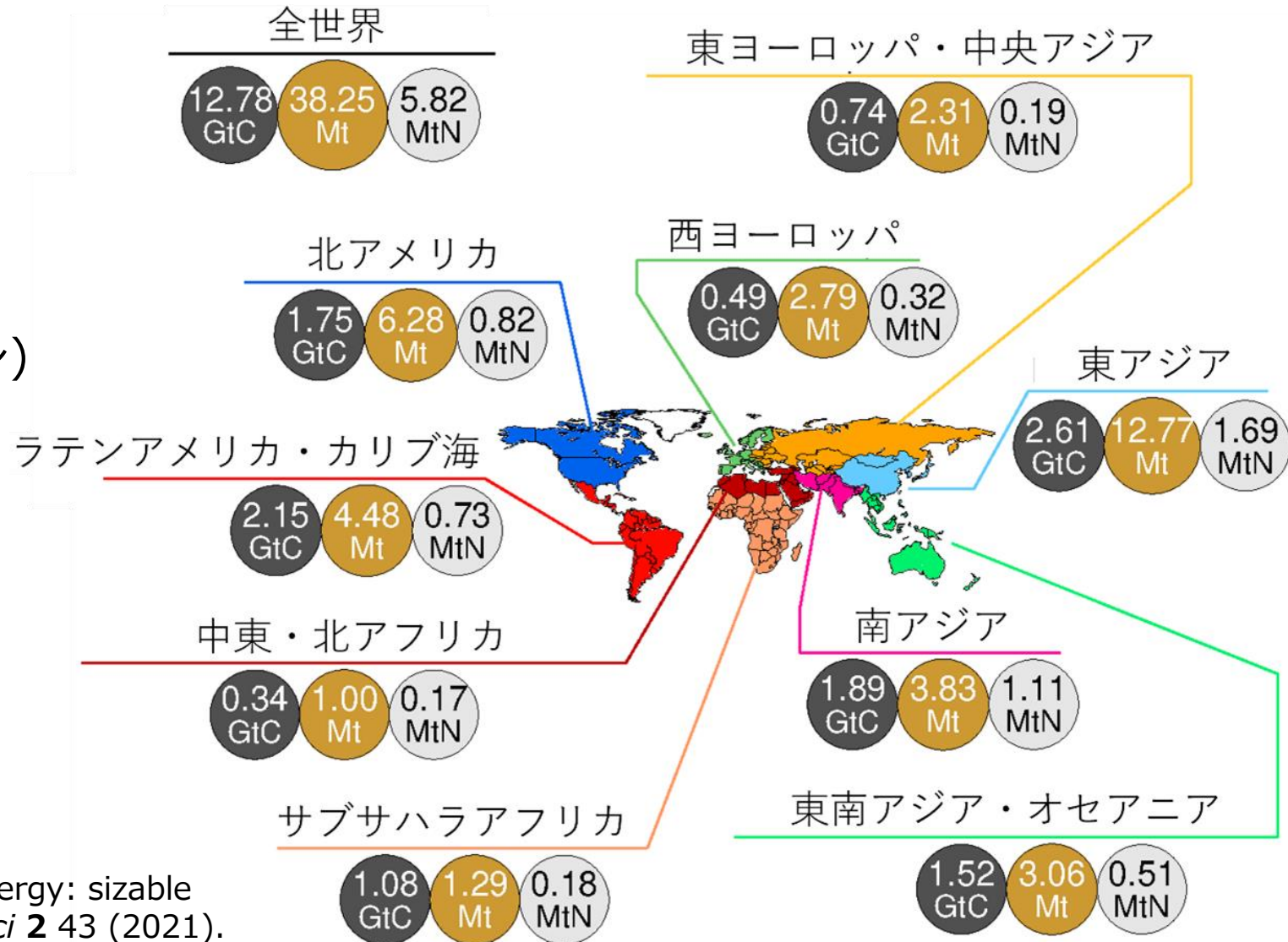
海水淡水化施設の分布可能性

- SDMに基づく、世界初のシナリオ別の淡水化プラントの分布予測に成功。
- シナリオ間の差は限定的であった。説明変数の一つに工業用水と家庭用水の取水量があり、人口の多い沿岸部において、どのシナリオにおいても増加したのが一つの要因か。
- 海水淡水化プラントの増加率は、主に家庭用と工業用の年間取水量の違いによって決まる
- 海水淡水化施設は、2014年と比較して、2030年、2050年、2070年、2090年にそれぞれ**31%、47%、55%、57%**増加する。



農地への炭素貯留は気候緩和に加えて、作物増収や水質改善などへのシナジーが期待される

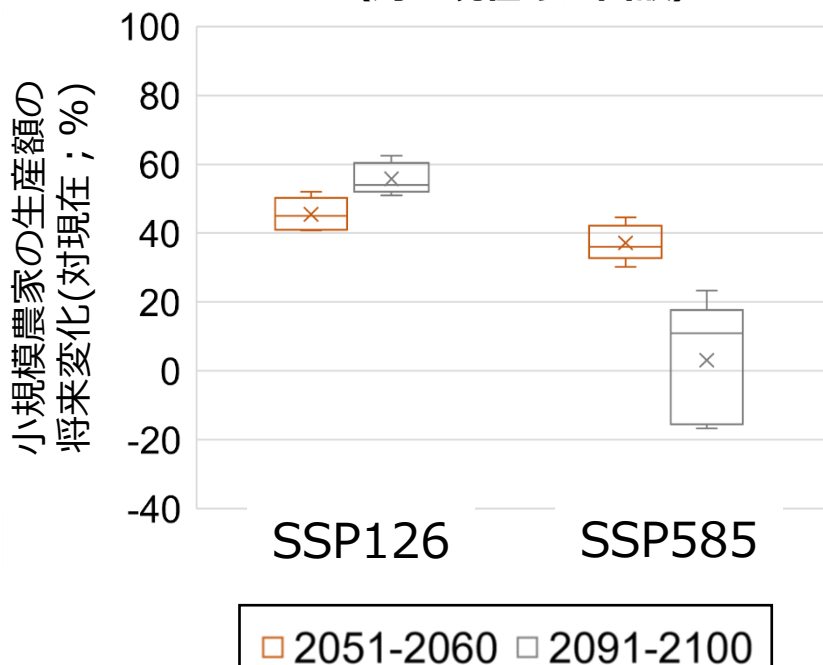
- 農地管理により世界の農地の土壌炭素量を**127.8億トンC**(115.5～140.5億トンC)増加できる。
- この量の炭素貯留により、作物生産を**3825万トン**(2288～5748万トン)増加、世界の平均気温上昇を**0.030℃**(0.019～0.041℃)抑制、窒素肥料の投入量を**582万トンN**(389～714万トンN)節減できる。



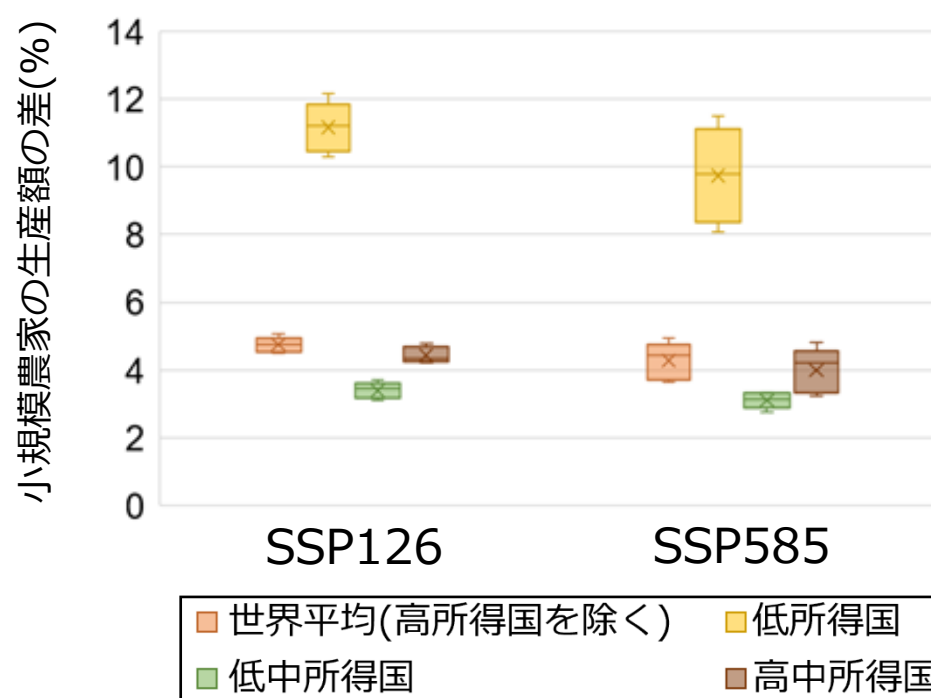
気候緩和は小規模農家の農業生産額(SDG2)に好影響を及ぼす

- 気候緩和が達成されるシナリオ(SSP126)での今世紀末の小規模農家の農業生産額は、気候変動が進行するシナリオ(SSP585)での値より52.7%高く、気候緩和がSDG2に寄与することを示す。
- 水欠乏地域の低所得国における灌漑導入率は小規模農家で37%、非小規模農家で42%。
- 灌漑導入率を現在より5%上昇させた場合、SSP585でも小規模農家の農業生産額は10%増加すると見込まれ、水欠乏地域の低所得国における灌漑導入率の格差縮小の重要性を改めて示した。

異なる気候緩和・年代での
世帯あたり年間農業生産額の変化
(対：現在の産出額)

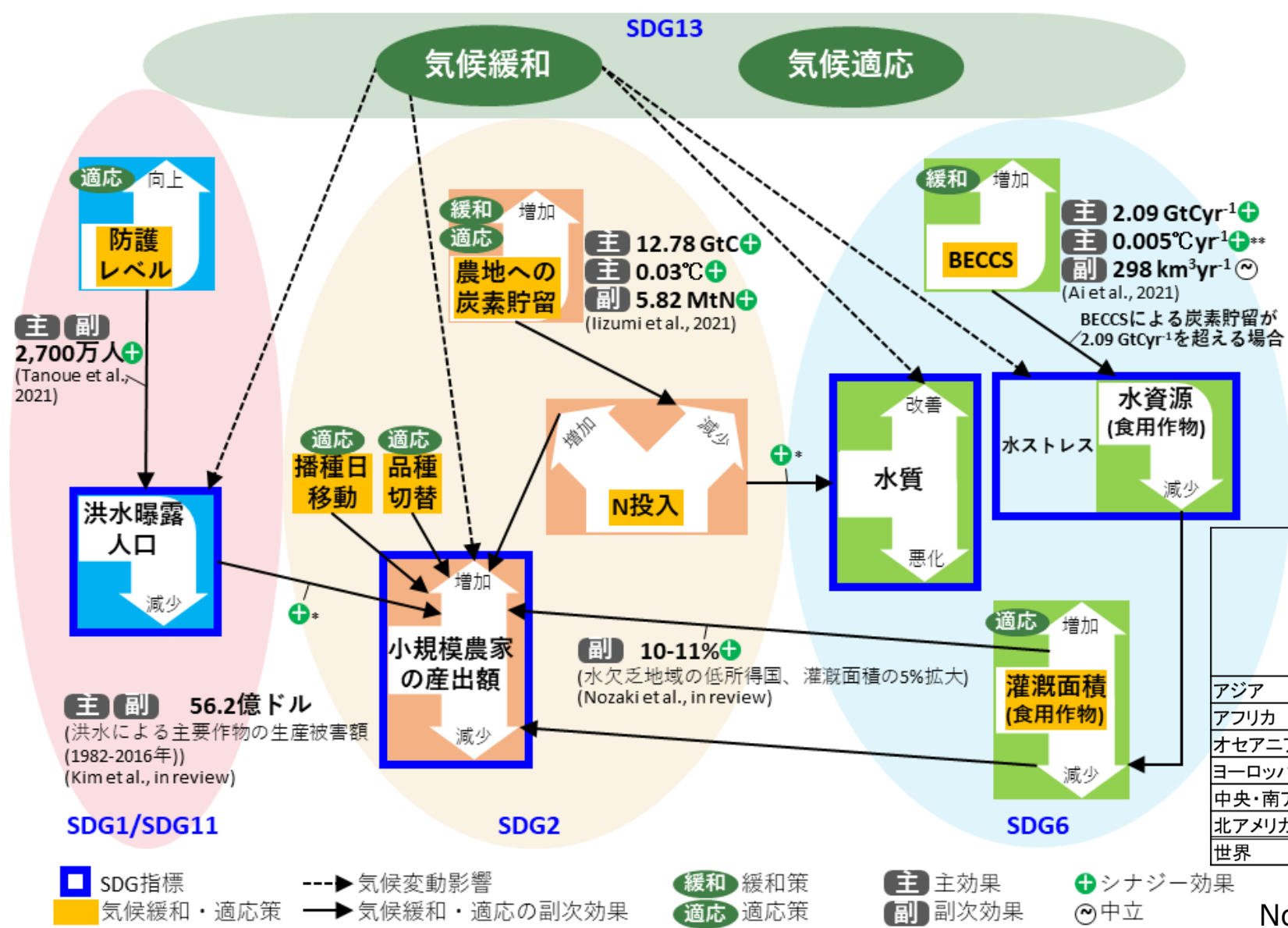


灌漑面積を+5%した場合の今世紀末の
世帯あたり年間農業生産額の変化
(対：現在の灌漑面積での産出額)



Nozaki N, Hosokawa N, Doi Y, Kim W, Iizumi T, Global modeling of SDG indicators related to small-scale farmers: testing in a changing climate *Environ Res Commun* **5** 031006 (2023).
<https://dx.doi.org/10.1088/2515-7620/acc3e2>

水利用が食料生産と競合するほどのBECCSの推進は小規模農家の灌漑導入率に見られる格差の縮小を妨げる恐れがある

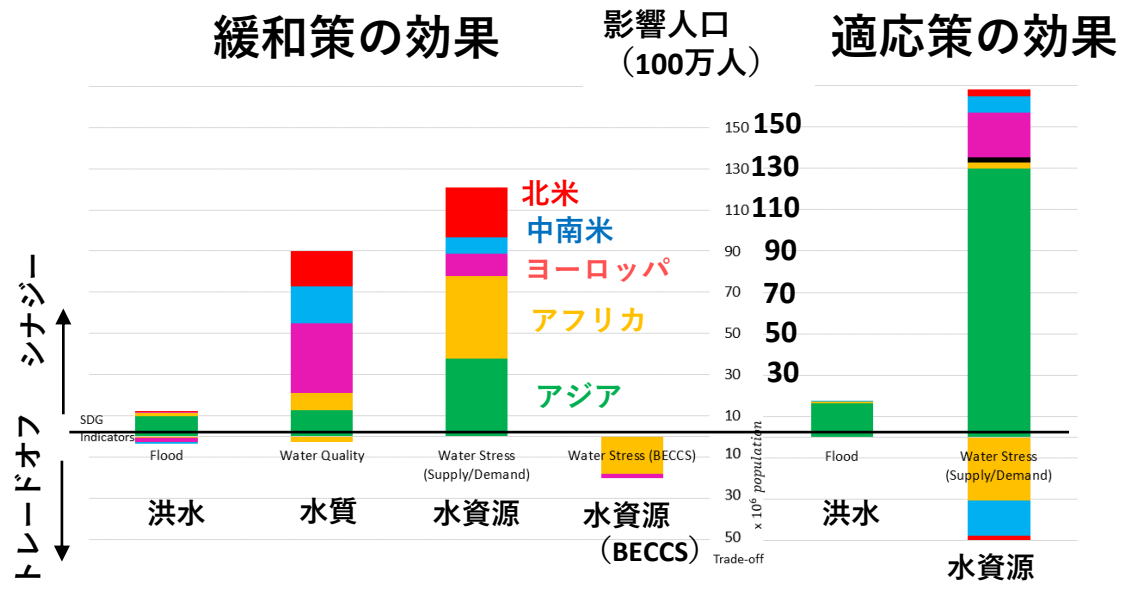
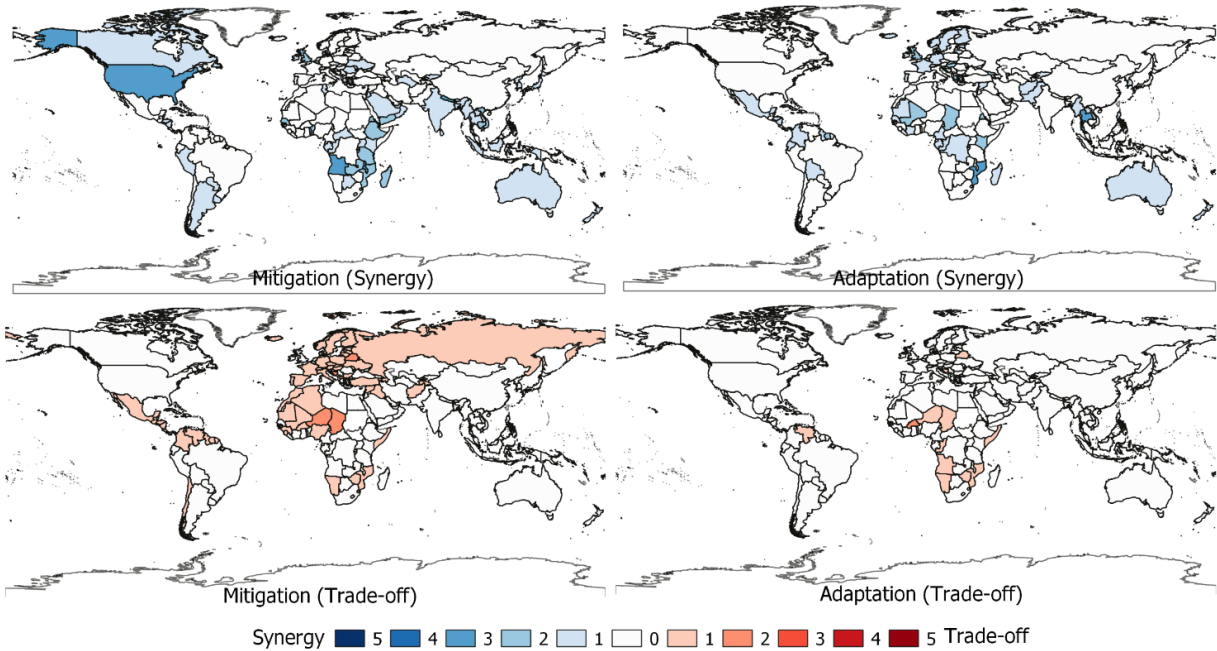


- サブテーマ3の知見より、エネルギー作物に十分に灌漑した場合、取水量の増加は年間3,929 km³に上る。この取水量の増加は2010年の世界の総取水量4,001 km³に匹敵する。
- アジアやアフリカでは、他の水利用との競合を避けた場合の取水量と比べて20～21倍の水が必要になるとの結果であり、小規模農家の灌漑導入率を上げる余地がないことは明らか。

	Goal 2 水欠乏地域の低所得国において灌漑面積を現在から5%拡大した場合に期待される小規模農家の農業生産額の増加(%)	Goal 6 BECCSによる取水量の増加(km³ yr ⁻¹)		
		A. 他の水利用と競合してもエネルギー作物が必要とする量を十分に灌漑	B. 他の水利用と競合しない範囲内でエネルギー作物に灌漑	A/B
アジア	13-17	784	40	20
アフリカ	4-11	1,089	52	21
オセアニア	-	100	2	50
ヨーロッパ	-	485	100	5
中央・南アメリカ	-	1,113	83	13
北アメリカ	-	306	19	16
世界	10-11	3,929	298	13

水に関するSDG目標は、アフリカおよびアジアの途上国で気候政策と高いシナジーがある。低炭素シナリオに伴うトレードオフに配慮しつつ積極的に進めていくことが期待される。

Rimba A et al. *Hydrological Res Lett*, 2024



- 水に関するSDG目標に対しては、気候政策によるシナジーがトレードオフを大きく上回ることから、トレードオフの懸念される地域・項目に関して配慮しつつ積極的に進めるべきである。
- 緩和策は、水に関するSDG指標とシナジーがある人は、トレードオフに直面する人に比べて多く、約5倍以上の違いがあった。
- シナジーもトレードオフも大きい国はアジアやアフリカの途上国が中心であることから、洪水防護への資金援助や水利用効率を上げるための技術援助など、適応策への国際的な支援が重要であることが示唆される。

研究成果のまとめ

- 全球数十kmの解像度での数値シミュレーションを実施し、国ごとおよび地域ごとの、気候目標（緩和策・適応策）と水に関連する6のSDGs目標（1.5.1/11.5.1, 6.3.2, 6.4.2, 7.2.1, 2.3.2）のシナジーとトレードオフを分析し、国ごと、地域ごとの地図情報としてまとめた。
- 地球温暖化の進行を抑制する緩和策は、多くのSDGsの指標に対して、多くの地域・国においてシナジーがあり、グローバルにはシナジーがトレードオフを上回る。特に、現在のSDG指標の達成度が低いアジアやアフリカでは、高いシナジーとなり、他の地域に比べ緩和策が効果的である。
- 海水淡水化やバイオ燃料作物の増産、土壌炭素貯留による緩和策と作物収量へのシナジーなど、個別の気候政策オプションの影響の評価も実施した。
- 緩和策に伴う降水量の増減傾向が、洪水ないし水資源の観点で悪影響を与える地域については、それらの影響を軽減するための追加的な適応策を考慮することで影響を低減する必要がある。
- シナジーもトレードオフも大きい国はアジアやアフリカの途上国が中心であることから、洪水防護への資金援助や水利用効率を上げるための技術援助など、適応策への国際的な支援が重要であることが判明した。

査読付き論文：31件（うち、IPCC第6次評価報告書への引用9編）
口頭発表：28件

全体目標の達成状況

本研究課題の全体目標に対して、**目標通りの成果**をあげた。

1) 水環境に着目し、気候目標とSDGsを同時に達成する際に生じうるシナジーとトレードオフを明らかにし、想定される緩和策や適応策のもとで水に関連する6つのSDGsの達成可能性を地域的に評価する。また、気候政策として緩和策を反映した気候シナリオごと、適応策の有無ごとに気候目標とSDGsの同時達成の可能性を地域別に評価する。

全球0.5度（50km）ごとのグローバルモデルを用いて、水災害、水質、水資源、農業に関する6つの水に関するSDGサブ目標を定量的に分析する手法を開発し、緩和策及び適応策の気候政策を進めた場合のSDG指標への正の影響（シナジー）と負の影響（トレードオフ）を国ごとおよび地域ごとに定量的に評価した。

2) 気候目標やSDGsに掲げられた目標が、水環境の観点から実現可能なのか、どの地域に水環境への負荷が高く、シナジーやトレードオフが存在するか、そして同時達成が難しい課題や地域がどこにあるのかをケーススタディも含めて分析し、考えられる解決策オプションを提示する。

シナジーが大きい国とトレードオフが懸念される国を具体的に特定し、緩和策ないしは適応策とセットで進めるべき政策オプションの検討に関連する、今後の気候政策に重要な科学的知見を取りまとめた。

気候政策に関する政策オプションとしては、途上国への資金援助による河川洪水への追加的な適応策の効果、土壌への炭素貯留による気候緩和効果ポテンシャルと作物収量低減効果および水質改善の効果、バイオ燃料の増産ポテンシャルとそれに伴う水資源への影響、海水淡水化による沿岸都市の水資源利用可能ポテンシャル、について、それぞれグローバルかつ定量的な分析を完了した。

国民との科学・技術対話

国民との科学・技術対話：下記3件他, 全24件

- 平林由希子、芝浦工業大学附属高校理系講座「温暖化対策とSDGsのシナジーとトレードオフ」(2020年9月12日、聴講者30名)にて研究紹介
- 平林由希子、沖大幹、IPCC報告書連携シンポジウムにて講演(2022年4月26日、オンライン、聴講者1176名)
- 沖大幹、SDGsシンポジウム2021: 学際的科学から解決策を考える食料、水、気候、生態系の持続可能な開発目標「データ分析と好奇心を原動力に地球システム科学からSDGsを考える」(主催: Springer-Nature・東京大学、2021年3月26日、オンライン)講演と対話

マスコミなどへの公表・報道等：全30件

◇平林由希子・芝浦工業大学大学院理工学研究科教授「グローバルな洪水リスク変動と山岳氷河融解の先駆的な予測」

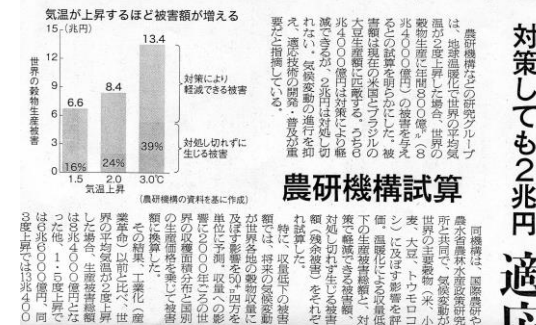
平林氏は、雨と気温に関する気象観測データと独自に開発した気象シミュレーターにより、広域かつ100年という長期間の高精度な気象データを復元することに成功した。この画期的なデータを世界最先端の陸域水循環モデル・河川モデルへ入力して解析し、温暖化実験に用いられるモデルが適切に過去の洪水や洪水を再現できていることを検証した上で、渇水と洪水の全球将来予測を行った。また、全球氷河モデルの開発を行い、地球温暖化時の氷河融解量と海面上昇への寄与を明らかにするとともに、洪水予測を政策立案に結びつける新たな手法を提案している。

渇水と洪水の全球将来予測

科学新聞2021年1月1日(6面)

本研究費の研究成果による受賞：4件

世界の気温2℃上昇で 穀物被害8.4兆円



日本農業新聞
2020年10月3日(1面)

対応しても2兆円 適応技術が鍵

農研機構は、国際機関の報告書に基づき、世界の平均気温が2℃上昇した場合、世界の穀物生産量は約8億トン減少し、被害額は約8.4兆円に達すると試算した。また、3.0℃上昇の場合は、被害額は約13.4兆円に達すると試算した。

環境政策への貢献

- 科学的意義（アウトプット）
 - ✓ 世界最高レベルのグリッドベースの水量(水災害と水資源)、水温・水質、食料生産性モデルを統合的に利用することで、水環境に関する気候変動対策と SDGs のシナジーやトレードオフを地域詳細かつ定量的に明らかにした
 - ✓ 気候政策とSDGsの同時達成が難しい課題や地域がどこにあるかを分析し、考えられる解決策オプションとその効果を定量的に提示した。
- 環境政策への貢献（アウトカム）
 - ✓ 気候変動対策における水・エネルギー・食糧の統合的管理を実施するための科学的知見の充実に貢献した
 - ✓ IPCC 第6次報告書に論文が多数引用された。第7次報告書の第2・第3作業部会への貢献も期待
- マネジメント・研究体制の妥当性
 - ✓ 水環境に関する世界最先端のツール・技術を持つグループであり、問題意識の共有や連絡体制が十分できた結果、河川洪水が作物収量へ与える影響（サブテーマ1と4）、将来の収量変化または土壌炭素貯留の緩和策オプションによる施肥量の変化と河川水質への影響（サブテーマ2と4）、バイオエネルギー燃料の増産に伴う水資源の制約と小規模農家の状況の分析（サブテーマ3とサブテーマ4）といった、複数サブテーマ間にまたがるSDGs目標と政策オプションについて定量的な評価をすることに成功した。

補足資料

研究目標の達成状況：サブテーマ1

サブテーマ1では以下の2つを目標とする。すべて**目標通りの成果**をあげた。

1) 河川氾濫モデルCaMa-Floodを用いて河川洪水の将来変化推計を行い、サブテーマ3およびサブテーマ4に知見を提供する。また、水災害について、貧困(SDG1)や防災(SDG11.5)についてのシナジーとトレードオフを検討し、地域ごとのSDGsの達成可能性を評価する。

CMIP6実験による全球河川氾濫シミュレーションを実施し、貧困（SDG1）と防災（SDG11.5）に共通のSDGs指標の1つである、洪水曝露人口の変化を算定し、低収入国における将来の洪水被害に見通しと、費用便益の観点から合理的な適応レベルだけでは残余被害が大きくなることを示した。

2) 水に関連する6つのSDGsの達成可能性を統合的に分析し、課題をとりまとめ、考えられる解決策オプションを提示する。

各サブテーマから提供を受けたSDG指標の将来推計を分析し、国ごとおよび地域ごとの緩和策・適応策とのシナジーとトレードオフの統合的な解析を行った。

また、シナジーを大きくしトレードオフを軽減するための政策オプションに資する定量的な評価を取りまとめた。今後の環境政策に重要な科学的知見の創出に大きく貢献した。

研究目標の達成状況：サブテーマ2

サブテーマ2では以下の4つを目標とする。すべて**目標通りの成果**をあげた。

1) 全球水温モデルHEAT-LINKを湖沼と結合した水熱動態モデルを開発し、温暖化に伴う水温変化を推計する。

全球水熱動態モデルを開発し（Tokuda et al., 2021）、現在気候及び将来気候での河川水温を推計し、温暖化に伴う河川水温の変化を示した。

2) 水温予測および全球窒素循環モデルTNCMから食糧に関するSDG2の達成可能性の評価を行う

サブテーマ4と協働し、農地への窒素投入量を節減する緩和策による水質向上が見込めるシナジーが多くの地域で見られたことから、SDG2の達成可能性が示された。

3) サブテーマ3と連携し、質と量の双方から生活用水の評価を行い、安全な水供給(SDG6)の達成評価を行う。

サブテーマ3と協働し、河川の水温質の評価を行った。河川水温の上昇が見られ、また河川水の窒素濃度も推計された。引き続き窒素濃度の高い地域においては、改善対策が求められることが示された。

4) 水温や水質に関する気候政策とSDGのシナジーとトレードオフの解析を行い、シナジーを多くしトレードオフを可能な限り小さくするような方策の検討を行う。

緩和策の一つである農地への炭素貯留によって窒素投入量が低減され、水質の改善が見込まれるシナジーが示された。

研究目標の達成状況：サブテーマ3

サブテーマ3では以下の3つを目標とする。すべて**目標通りの成果**をあげた。

1) 全球水資源モデルH08を用いることにより、低炭素シナリオとSDGs目標のうち、水力発電とバイオ燃料生産に着目したクリーンなエネルギー（SDG7）、および安全な水へのアクセスについて（SDG6）の水資源面でのシナジーやトレードオフを詳細に検討する。

水資源・クリーンなエネルギー・安全な水へのアクセスに関するシナジーとトレードオフの中心にあるエネルギー作物・食料生産用の灌漑を時空間詳細に扱うためのH08の改良を行い、世界のミスカンサス、スイッチグラス、トウモロコシ、コムギ、コメ、ダイズ生産における灌漑貢献度を国別に定量化することに成功した。これにより灌漑（水）と収量（エネルギー・食料）のシナジー・トレードオフについての詳細を明らかにした。

2) 2度（1.5度）目標の達成にあたり、世界全体の水力発電の大幅な増加や、バイオ燃料の増産が前提になっている研究が散見される。前者に関しては、非現実的な水力発電の開発が前提となっていないかという軸から検討を行う。後者については、バイオ燃料増産により水循環の変化や灌漑需要の増加につながることはないかという軸などから詳細な検討を行う。

水力発電については、達成可能な最大水力発電量を推計し、化石燃料に対する価格競争力が緩和策によって強化されるという以前の研究での知見（Zhou, Hanasaki et al. 2018）を確認した。バイオ燃料に関しては上述1)の通りバイオ燃料作物がH08で明示的に扱えるようにし、世界の二酸化炭素回収貯留付きバイオ燃料生産（BECCS）ポテンシャルに対する水資源の制約を明らかにし、持続可能な範囲の灌漑では大きなバイオ燃料増産が見込めないことを明らかにした。

3) SDGsが高度に達成できたとしても世界の水需要は急には減らせない。特定の地域や期間に表流水や地下水の過剰取水をもたらす水利用に主に注目し、水資源制約に関する指標や地図を提示する。

主要な7つの水源に関して水資源制約を考慮しつつ、水利用の評価を行い各種指標の地図を提示した。エネルギー面から見て持続可能性の乏しい海水淡水化に焦点を当て、今後のプラントの分布を推定するモデルを開発した。これまでの傾向を踏まえると、今後も海水淡水化プラントは世界的に増加することを明らかにした。

研究目標の達成状況：サブテーマ4

サブテーマ4では以下の3つを目標とする。

1) 播種前後および生育期間中の極端気象や水資源変動により播種・収穫面積が減少する効果をデータ解析により明らかにし、簡易モデルを提案する。

当初の目標を上回り、論文投稿に至った(2を参照)。

2) 全球作物モデル(Sultan et al. 2019)による全球の作物収量シミュレーションと上記の簡易モデルによる収穫面積影響、灌漑シナリオ(サブテーマ3)、土地利用変化シナリオ(サブテーマ1)を組み合わせで解析し、食糧生産の将来予測を行う。

概ね目標通りの成果を上げた。開発した面積と収量の気候応答モデルにより、面積と収量が相互補完的にアジアのコメ生産量に対する気候変動影響を軽減するとの将来見通しを示した。全球作物モデル出力を用いて、気候緩和が小規模農家の生産額の増加(SDG2)に寄与することを示した。また、サブテーマ3で得られた知見を踏まえて、BECCSを強力に推進した場合、水欠乏地域の低所得国では小規模農家と非小規模農家の間の灌漑導入率の格差縮小が困難になる恐れがあることを指摘した。作物収量と農地分布、サブテーマ1から提供を受けた河川洪水の氾濫原分布を組み合わせ、過去35年間の洪水による世界の作物生産被害額を推計した。

3) それにより、気候緩和を推進するうえで食糧生産(SDG2)にトレードオフが生じる地域を特定し、統合解析(サブテーマ1)に資する知見を提供する。

論文発表とプレスリリースを行うなど**当初の目標を上回る成果**を上げた。農地管理による土壌炭素貯留とそれにより期待できる気候緩和効果、作物増収効果、無機窒素肥料の節減効果をそれぞれ定量化した。