

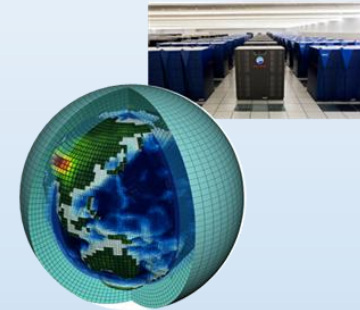
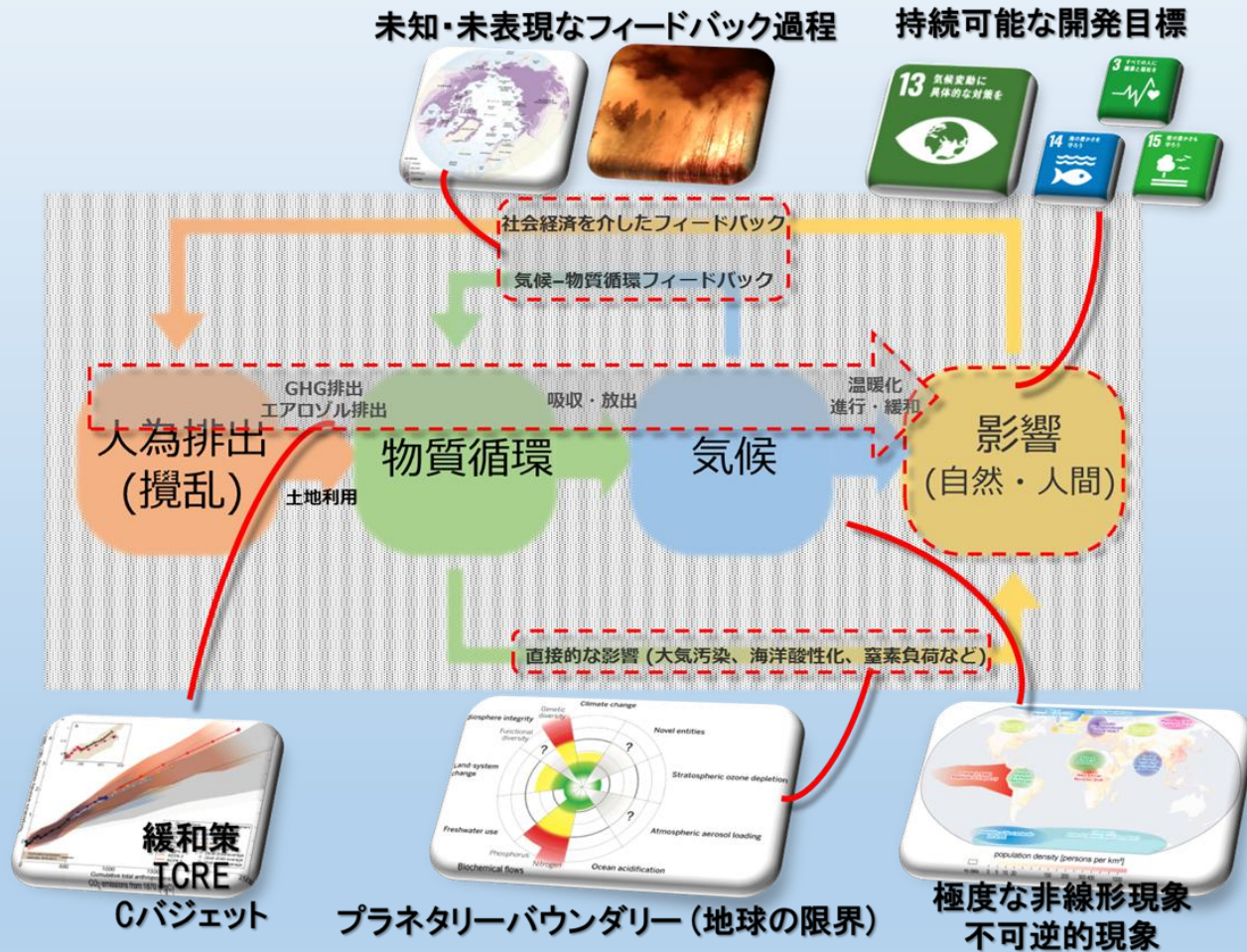


# 気候変動予測先端研究プログラム領域課題 2 「カーボンバジェット評価に向けた気候予測 シミュレーション技術の研究開発（物質循環モデル）」 成果報告

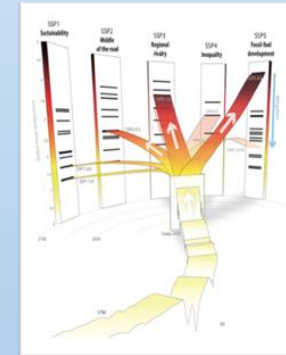
海洋研究開発機構  
地球環境部門  
環境変動予測研究センター  
センター長 河宮未知生



# 先端プロ・課題2 概要



モデル開発と予測



全貌の解明と  
将来選択肢の提示

地球システムモデルの  
開発・応用を通して：

- 必要な**排出削減量**の  
評価
- **緩和シナリオ**に対す  
る地球環境の応答  
など、（主には）**緩和  
策立案に資する科学的  
知見を創出**



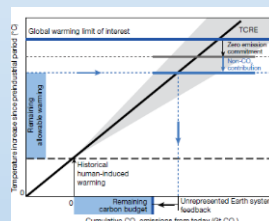
## 課題 2 の構成

- ・ 領域課題 2 (JAMSTEC, PI:河宮)
- ・ サブ課題 (担当機関)
  - ・ サブ課題(i) 地球システムモデリング
    - ・ i-a 地球システムモデル開発・応用 (JAMSTEC, PI: 羽島)
    - ・ i-b エミュレータ開発 (電中研, PI: 筒井)
  - ・ サブ課題(ii) 基盤構築 (JAMSTEC, PI: 建部)
    - ・ 課題 1 との連携
  - ・ サブ課題(iii) 気候変動一社会経済
    - ・ iii-a 社会経済過程からのフィードバック (JAMSTEC, PI: 立入)
    - ・ iii-b 将来シナリオ分析 (国立環境研, PI: 横畠)
  - ・ サブ課題(iv) 領域課題間連携のための技術・事務支援 (JAMSTEC, PI: 河宮)
    - ・ CMIP7 データ取り扱い情報収集、アウトリーチ
    - ・ 先端プログラム課題間連携



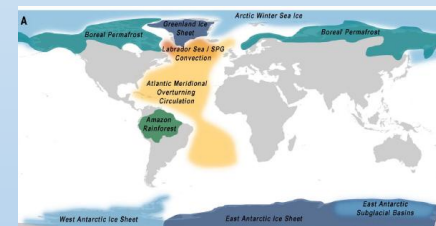
# 課題2の活動： 緩和策と将来シナリオに関する科学的知見

- シミュレーションデータ発信（含：CMIP7 Fast Track 対応）
- 温室効果ガス、SLCF(短寿命気候強制力因子)の収支理解
  - ESM開発・応用
    - 炭素、非CO2温室効果ガスの循環理解
    - 林野火災等、新たな生態系プロセスの導入
  - 残余カーボンバジェット
    - 必要な排出削減量の算定

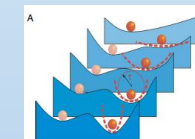


Rogelij (2019)

- ティッピングエレメント
  - 緩和目標の設定、対応の緊急度
    - 南極氷床・棚氷、永久凍土、アマゾン枯死・・・

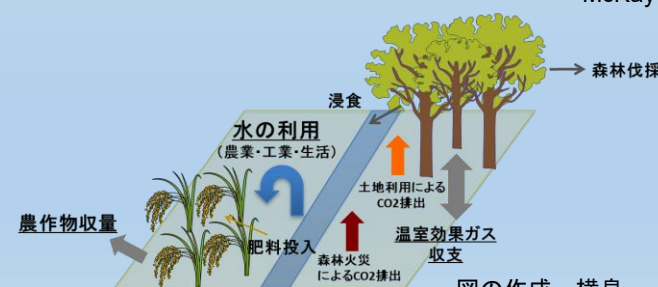


McKay et al. (2022)

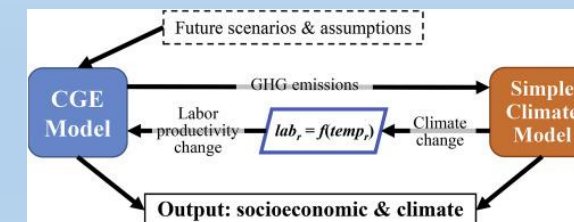


Lenton (2007)

- 新規モデル開発
  - 「エミュレータ」開発
  - 気候変動と社会経済活動の相互作用
  - NICAM 地球システムモデル化



図の作成：横島



Matsumoto (2019)

- 技術・事務支援、国際貢献

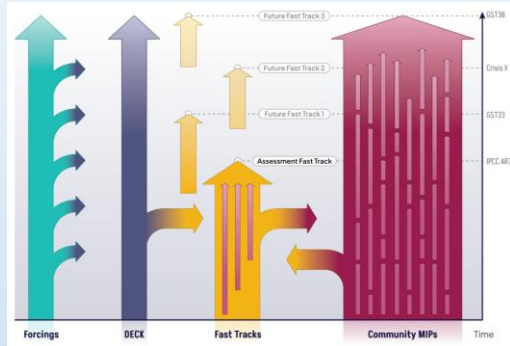


- ・ シミュレーションデータ発信
- ・ 温室効果ガス、SLCF(短寿命気候強制力因子)の収支理解
- ・ ティッピングエレメント
- ・ 新規モデル開発
- ・ 国際貢献、技術・事務支援





# CMIP7向けESM開発



	MIROC-ES2L	MIROC-ES2L -CHEM	雛形モデル (梅コース)	雛形モデル (竹コース)	理想的到達点 (松コース)
物理コア	MIROC5.2	MIROC5.2	MIROC5.2	MIROC6相当	MIROC6??? 7???
大気解像度	T42-L40	T42-L40	T85-L40	T85-L40	T42-L80? T85-L40?
大気化学	無し	有り	有り	有り	有り
海洋BGC	OECov2	OECov2	OECov2mod	OECov2mod	FlexPFT
陸域BGC	VISIT-e	VISIT-e	VISIT-e mod	VISIT-e mod	VISIT-e2
その他新規要素	-	-	-	-	火災
並列	フラットMPI	フラットMPI	MPI+スレッド	MPI+スレッド	MPI+スレッド
実行速度(ES4)	45-48年/日	20-21年/日	13年/日 <small>まだ遅い</small>	12年/日 <small>げっ</small>	???

- 基盤としての気候モデルの刷新も視野に入れ、コンポーネントモデル導入やコード最適化に漸進的に取り組む中。
- 現状、「竹」はFast Track にほぼ適用可能な状態。「松」に向け、2026年内データ提出のスケジュール内で可能な限り改善を試みる方針。

- ✓ ソースコード・動作
- ✓ PIコントロール調整
- ✓ スピンアップ
- Hist確認 & 調整

- ✓ ソースコード・動作
- PIコントロール調整
- スピンアップ
- Hist確認 & 調整

サブ課題ia成果



# 近未来気候・炭素予測と過去再現に向けた 初期値化システムの開発



炭素循環変動と人間活動による炭素排出量の定量化及びこれらの要因特定を目的として設立された国際プロジェクト GCPの活動の一環

**Global Carbon Budget** : 二酸化炭素収支の年次評価プロダクト。 **先端プロは2023から継続貢献**

第1回GST決定文章採択時の判断材料

「1.5度目標達成には、GHGを2019年水準比で2030年までに43%、2035年までに60%の大幅削減が必要」

2025年の各国温室効果ガスの排出削減目標(NDC)へも反映

**GCB2025** (under review; preprintは公開中)

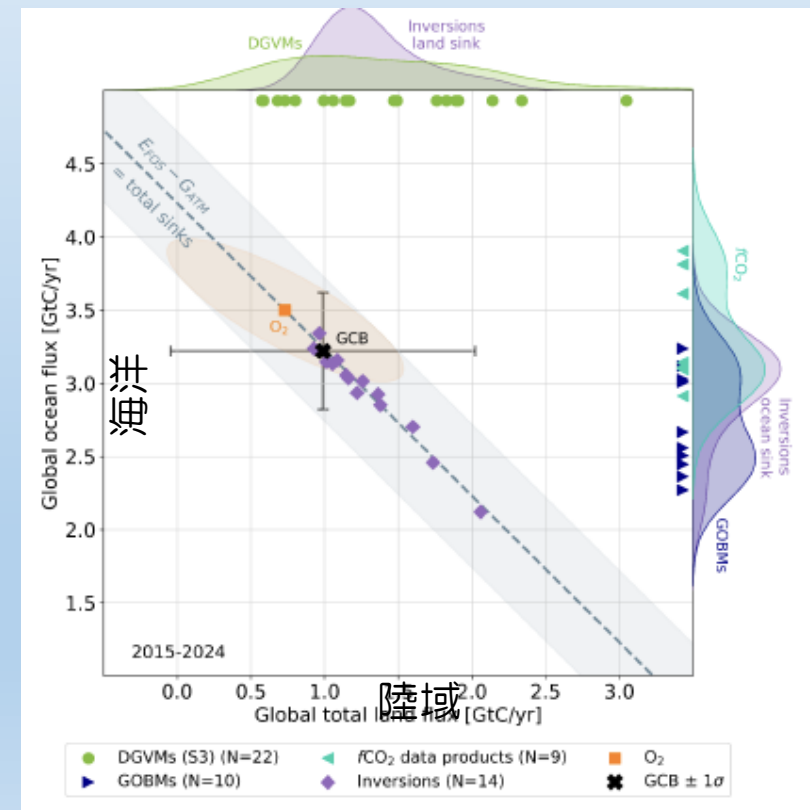


<https://doi.org/10.5194/essd-2025-659>  
Preprint. Discussion started: 13 November 2025

観測・データプロダクト・要素モデル・**ESM**の複数根拠から炭素収支を推定

- 人為CO<sub>2</sub>排出は、2025年に前年比1.1%増 > 直近10年平均0.8%
- 2023-24年のエルニーニョ現象の終息後、陸域炭素吸収は回復傾向
- が、気候変動は地球表面のCO<sub>2</sub>吸収能力を全体的に弱めつつある

直近10年間の全球積算炭素フラックス



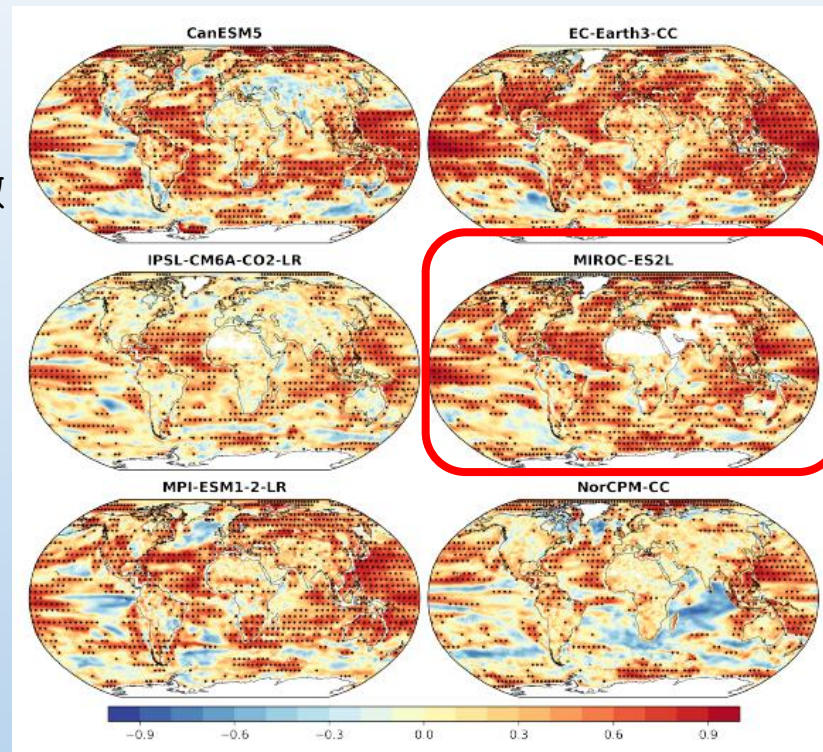
サブ課題ii成果



# 国際連携研究：炭素循環10年規模予測



モデルCO<sub>2</sub>フラックス vs  
データプロダクト間相関係数



- 定性的：長期トレンド込みの全球過去再現性
- △ 定性的：陸域の内部変動 (特に熱帯雨林＋半乾燥地帯)
- △ 定量的：南大洋・中緯度陸域での吸収トレンド

(Li et al., submitted to BAMS; 欧州4、カナダ1、日本1)

今後、WMO事業へも貢献可能性：準リアルタイム気候変動予測プロジェクト



これまでは物理変数の予測情報のみだったが、2026年度から炭素予測も付加情報として掲載予定  
現状：物理予測MIROC6、炭素予測 MIROC-ES2L ⇒ 2027年からは、上記システムで統合的に実施予定

サブ課題ii成果



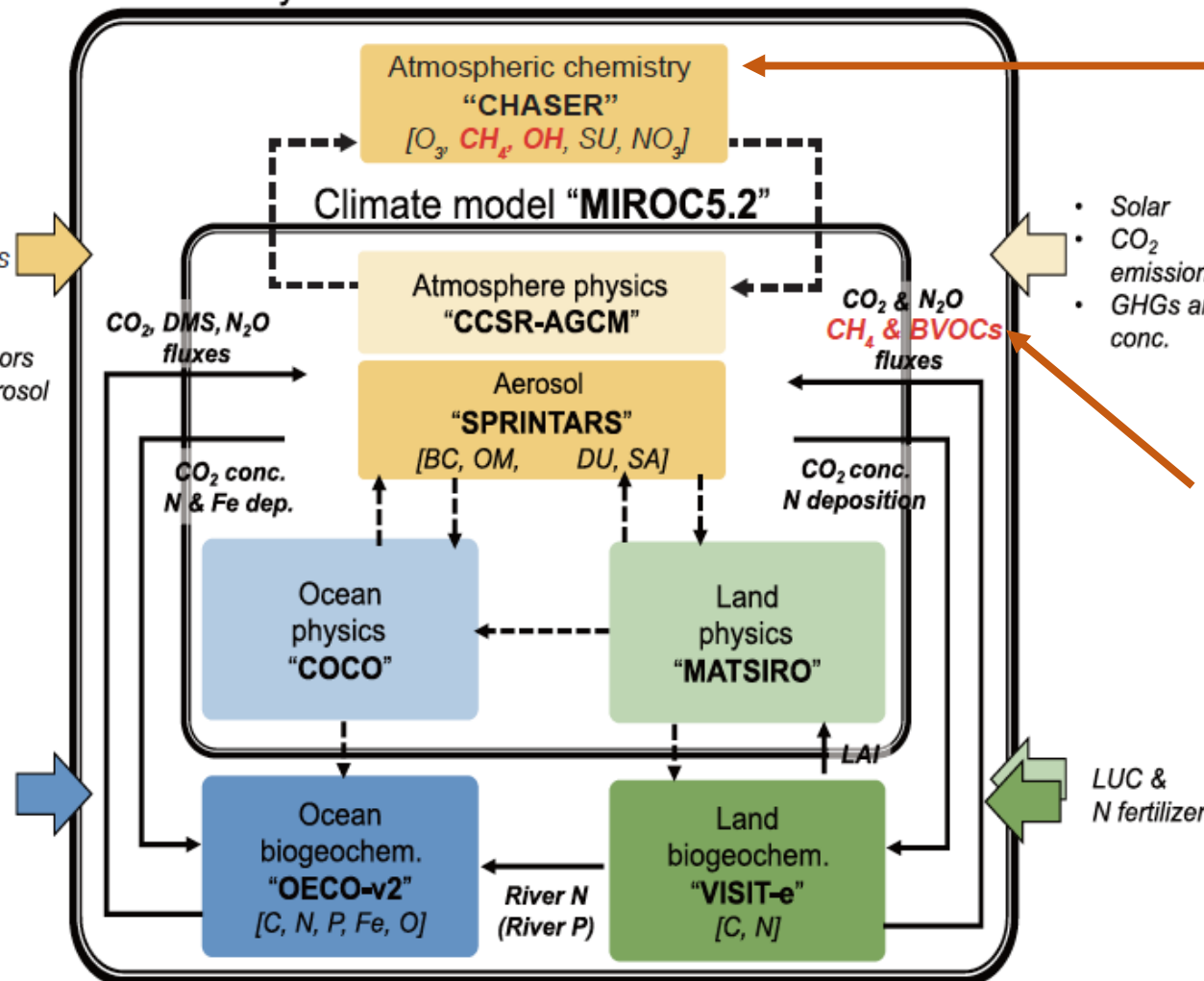


- ・ シミュレーションデータ発信
- ・ 温室効果ガス、SLCF(短寿命気候強制力因子)の収支理解
- ・ ティッピングエレメント
- ・ 新規モデル開発
- ・ 国際貢献、技術・事務支援



# 自然起源の放出過程・消失過程のフィードバックを含めたメタン排出削減効果を評価可能なモデル

Earth system model "MIROC-ES2L-CHEM"



Modified from Hajima et al. (2020)

- 大気化学モジュール CHASER (Sudo et al., 2002)
  - ✓ 排出駆動CH<sub>4</sub>シミュレーション
  - ✓ O<sub>3</sub>-HO<sub>x</sub>-NO<sub>x</sub>-VOCs 化学
  - ✓ C<sub>5</sub>H<sub>8</sub> 酸化反応過程の改良
  - ✓ 99 化学種, 269 化学反応
- 陸域生態系モジュール VISIT-e (Ito, 2019)
  - ✓ 湿地CH<sub>4</sub>放出:  
Walter and Heinmann (2000)
  - ✓ 土壌CH<sub>4</sub>酸化:  
Curry (2007)
  - ✓ 植生起源VOCs放出:  
Guenther (1997)



# 人為メタン排出に対し、

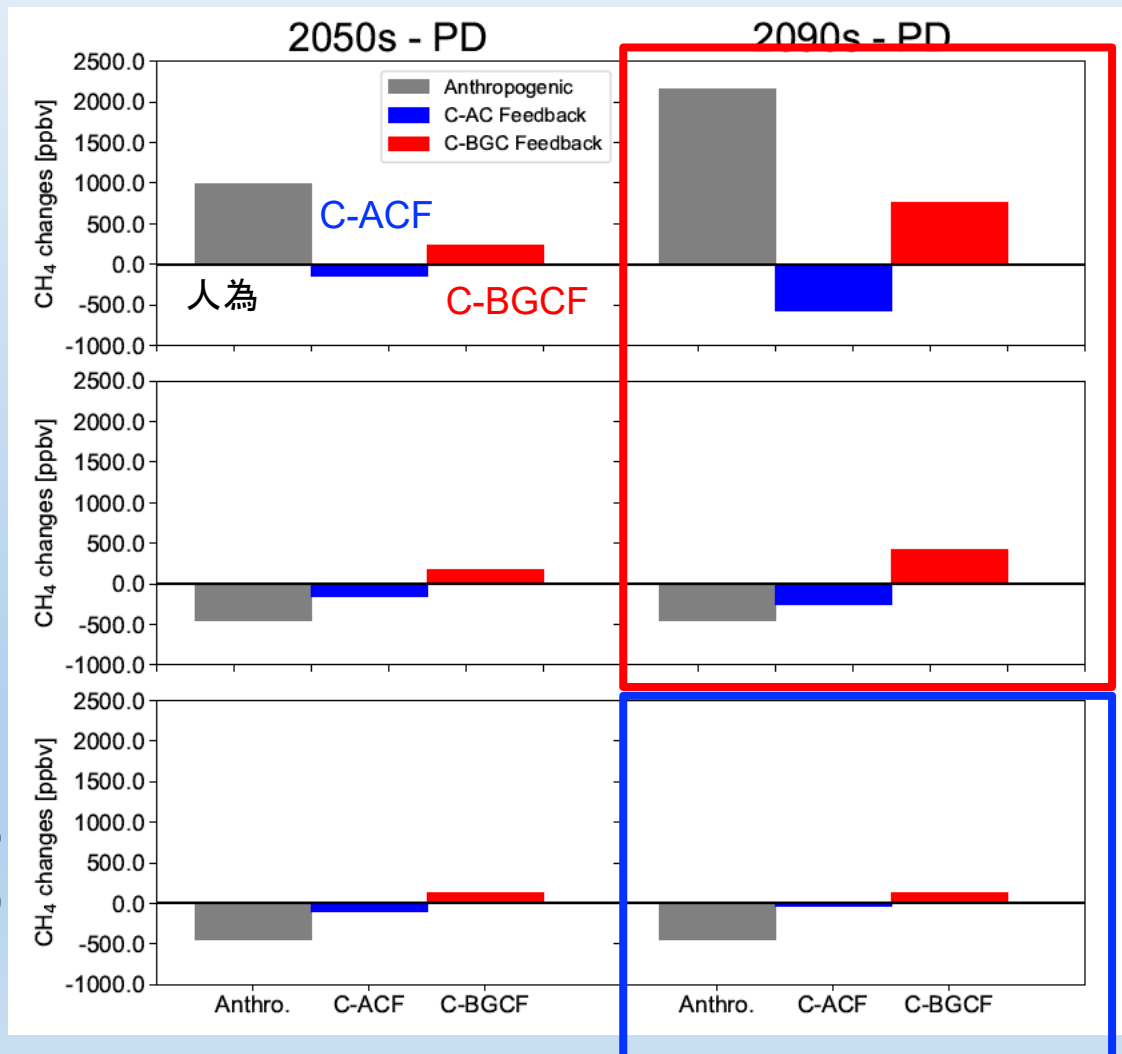
## フィードバック過程が2050年代で14~38%の寄与

将来CH<sub>4</sub>濃度変化に対する人為排出量・C-ACF・C-BGCFの寄与

No mitigation scenario  
(CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>: ssp370)

CH<sub>4</sub> mitigation scenario  
(CH<sub>4</sub>: ssp370-lowNTCF)

CH<sub>4</sub>+CO<sub>2</sub> mitigation scenario  
(CO<sub>2</sub>: ssp119)



C-ACF: 水蒸気-OH等を介した負のフィードバック

C-BGCF: 陸域生態系を介した正のフィードバック

正・負のフィードバックプロセス導入はモデル依存性大。偏った導入の危険性を示唆。



# 観測による残余炭素予算の予測不確実性低減

Melnikova et al. 2025, One Earth

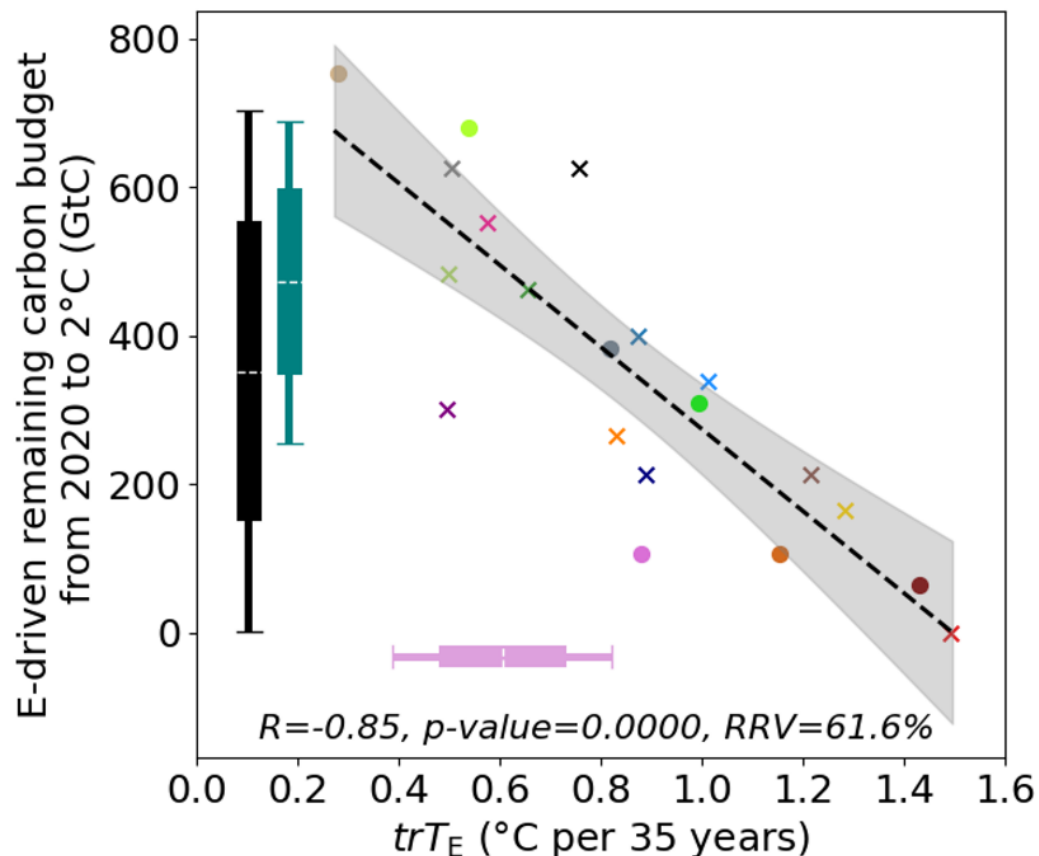
2°C目標までの  
残余炭素予算 [GtC]  
@CO<sub>2</sub> 排出駆動実験

予測に大きなばらつき  
(黒)

観測可能な量と  
将来予測の間に相関

観測に整合しないモデル  
を除外することが可能

= 観測による制約  
(青)



CO<sub>2</sub>排出駆動実験により  
気候フィードバックと  
炭素循環フィードバックの  
不確実性に制約を与える

2°C目標達成までに  
排出できる CO<sub>2</sub>量

**473 [256–689] GtC**

cf. 年間排出量 11 GtC

過去の気温上昇 [°C / 35 yrs] @ 排出駆動実験

= 観測可能：将来予測に制約を与えることが可能



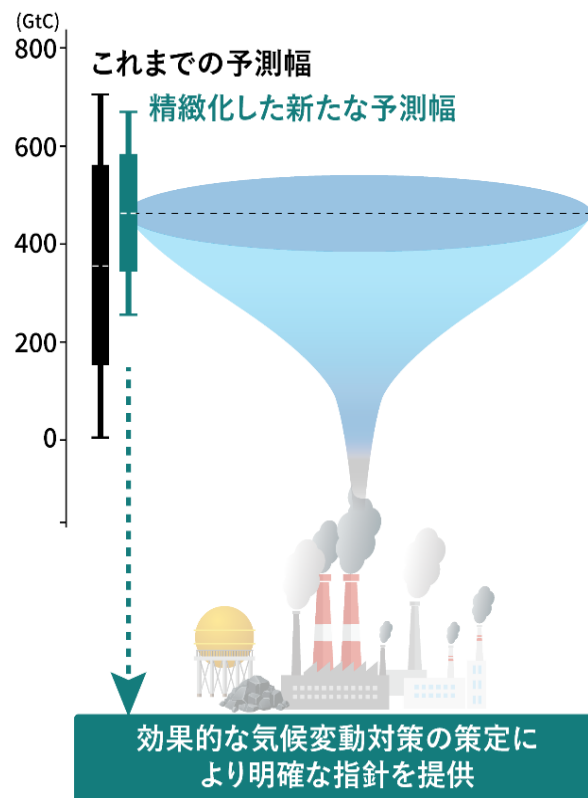
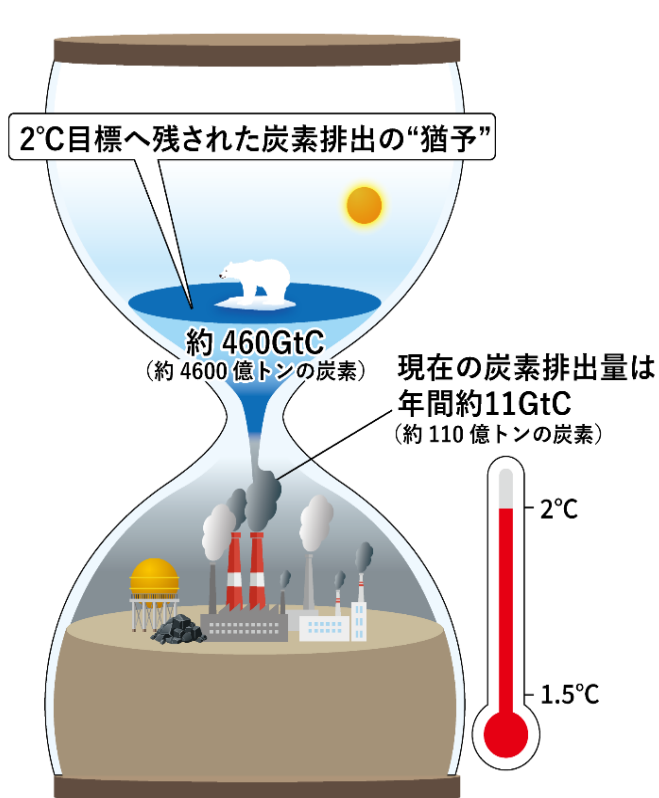
# 排出できる二酸化炭素量の評価信頼性向上



国立環境研究所  
National Institute for Environmental Studies

2025年12月6日

気候変動の抑制に向けて：将来の温暖化とこれから排出できる二酸化炭素量の予測信頼性を高める



Melnikova et al. 2025, One Earth

日本経済新聞

温暖化2度未満へのCO2排出余地、計算精度高める 国立環境研究所



国立環境研究所の研究グループは、産業革命前からの気温上昇を2度未満に抑えるために残された排出可能な二酸化炭素（CO2）の総量を求める計算精度を向上した。気候モデルの予測と観測事実を組み合わせた。排出削減の目標設定や気候変動対策の計画策定のための指針にな

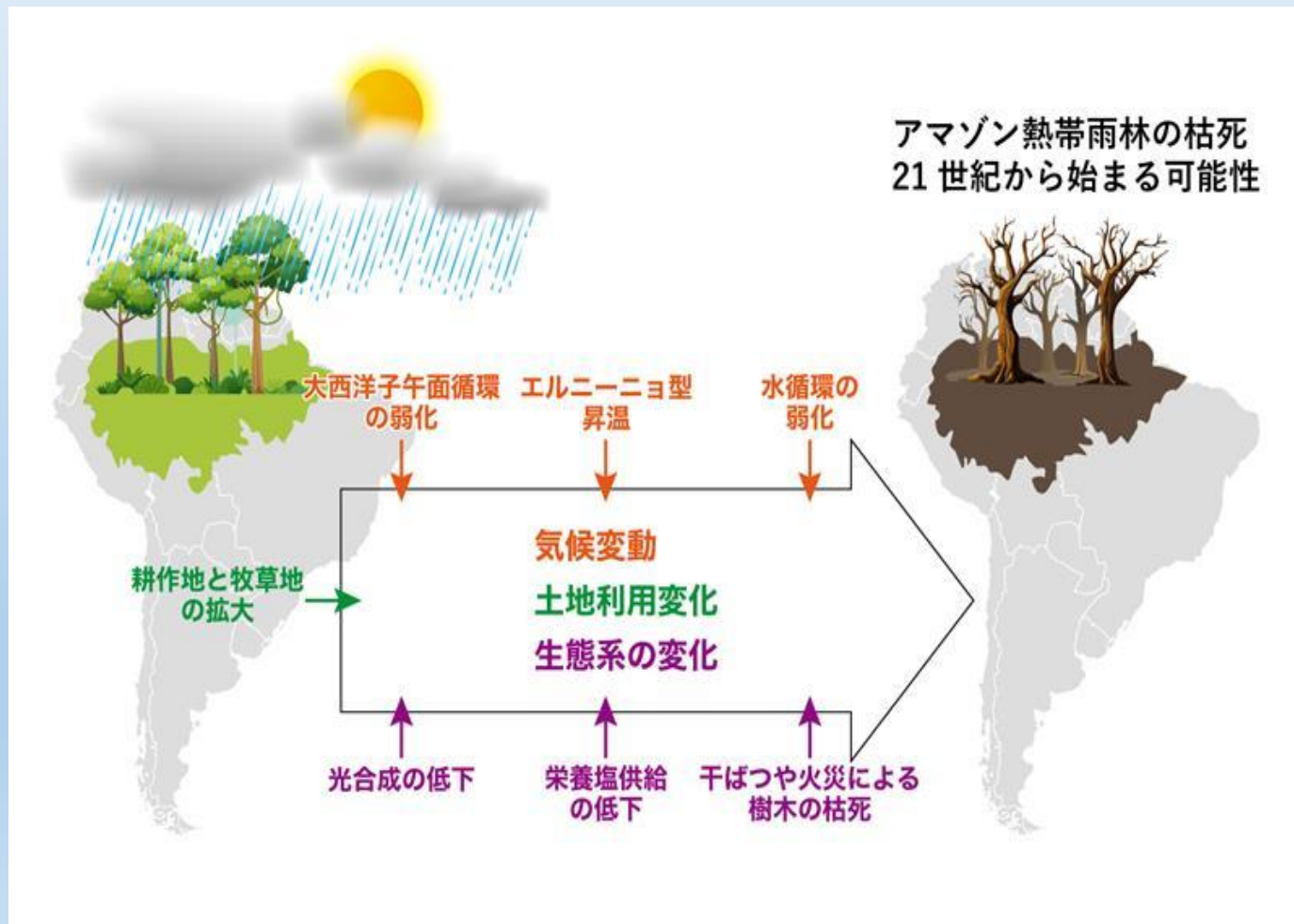
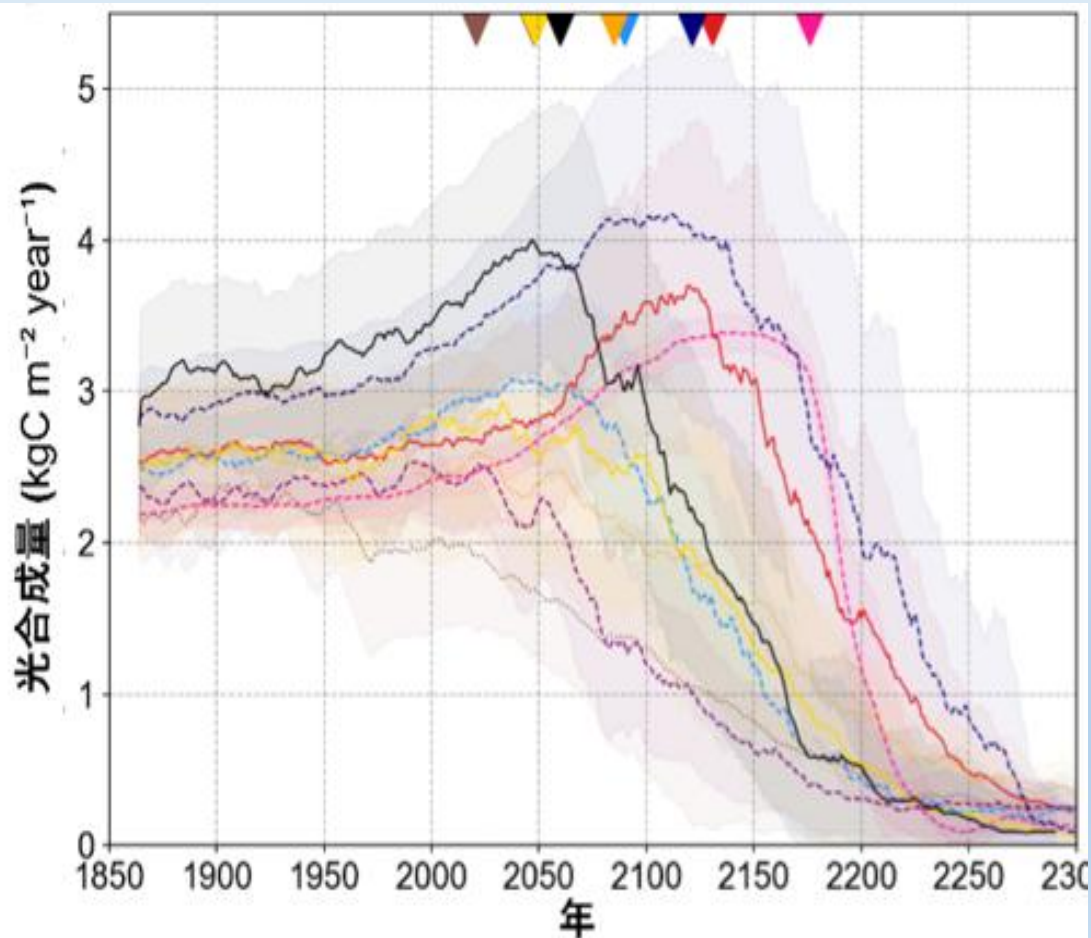


- ・ シミュレーションデータ発信
- ・ 温室効果ガス、SLCF(短寿命気候強制力因子)の収支理解
- ・ ティッピングエレメント
- ・ 新規モデル開発
- ・ 国際貢献、技術・事務支援



# 地球温暖化が進むとアマゾン熱帯雨林の枯死が 21世紀中に始まることを最先端モデルが高排 出シナリオで予測

Melnikova et al.2025, Comm.  
Earth & Environ.  
CMIP5/6 モデル解析







# アマゾン枯死報道状況

サブ課題iiib成果



朝日新聞

高市政権 パレスチナ情勢 速報 朝刊 夕刊 連載

トップ 社会 経済 政治 国際 スポーツ オピニオン IT・科学 文化・芸能

朝日新聞 > 連載 > 学びの扉 > 記事

## (扉) アマゾン、森林減でサバンナへ 違法伐採や火災続く、維持面積に応じ給付金



2025年12月19日 朝日新聞  
2025年11月3日 読売新聞 などに掲載



読売新聞 オンライン

朝刊記事

紙面ビューア

社説

English

すべて | トップ 速報 朝刊記事 紙面ビューアー 社説 社会 政治 経済 スポーツ

## 「地球の肺」アマゾン、9月の乾期終盤に火災急増...雨季に違法伐採→乾期に火を放ち農地化

森林が失われ続けると、アマゾンはどうなるのか。最悪の場合は元に戻せなくなる「転換点」を迎え、サバンナのような乾燥地域になると懸念されている。

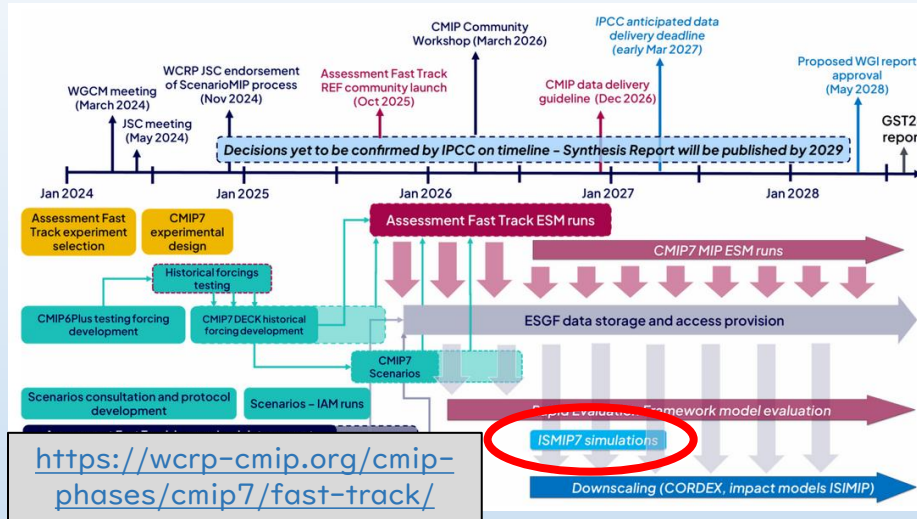
国立環境研究所の横畠徳太・主幹研究員（地球システム学）らは、複数の予測モデルを使った研究を実施。気候変動対策が不十分で、気温上昇と降雨量の大幅な減少などが起これば、21世紀中にアマゾンの森林が転換点を迎える可能性があると結論づけた。

横畠さんは「アマゾンはもともと多くの雨が降って森林や生態系が成り立っている。だからこそ、気候変動による雨の減少や乾燥化の影響を受けやすい」と指摘。転換点を迎えると、地球温暖化を加速させると考えられるという。





# 氷床将来予測 (ISMIP7) ・ 気候フィードバック 1/12



<https://wcrp-cmip.org/cmip-phases/cmip7/fast-track/>



**Participants**

ISMIP7 is a collaborative community of scientists, educators, and groups dedicated to studying the polar regions. Our participants work in a range of fields, including ice sheet modeling (sea level and more) and remote sensing. Together, we explore critical information about Earth's ice sheets and their role in the climate system.

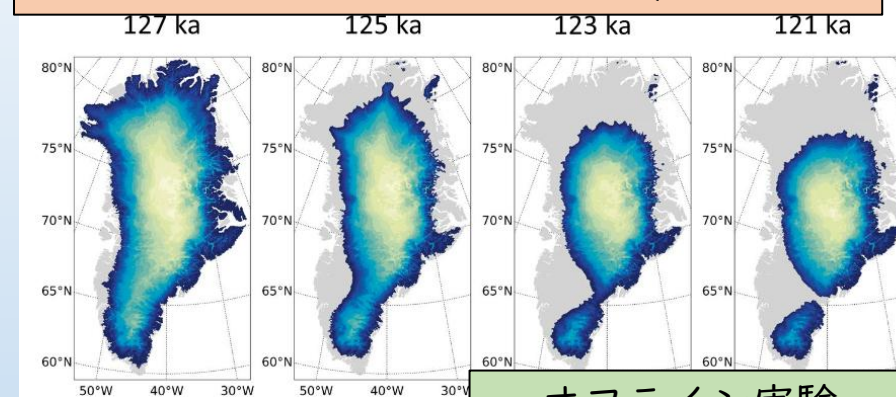
Our membership consists of

- Steering Committee
- Focus Groups
- Contributors
- Sponsors

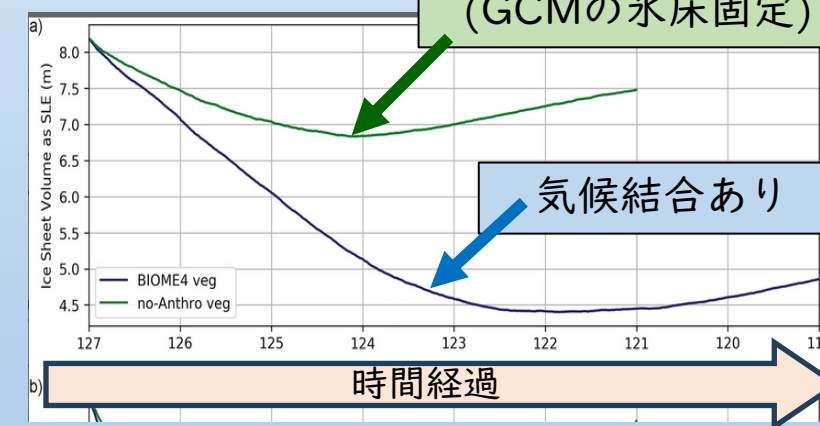
We have positions available for new team members. See <https://www.ismip.org/>

<https://www.ismip.org/>

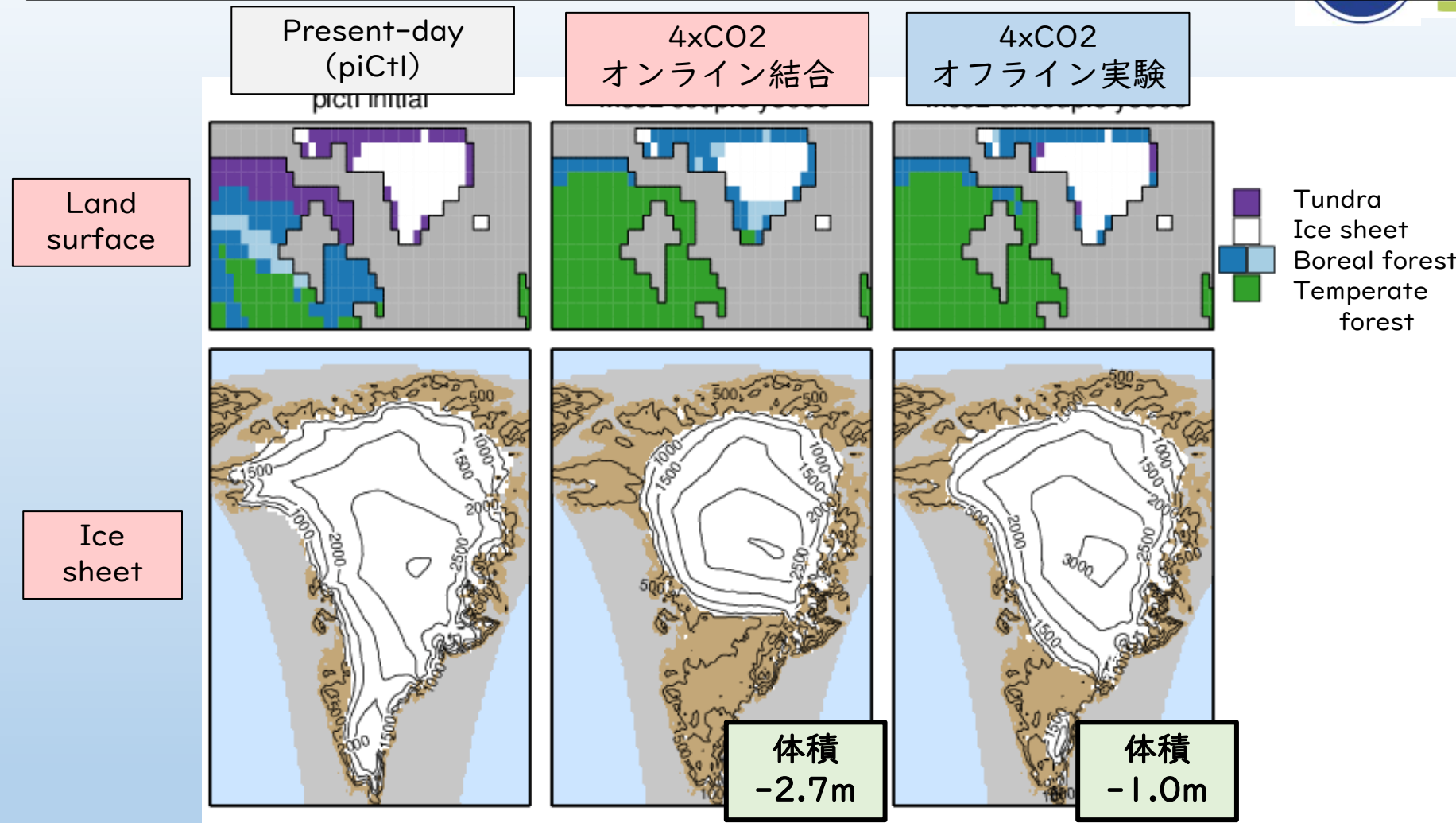
## 最終間氷期の気候氷床結合系実験 CESM2-CISM2, Sommers+(2022)



オフライン実験  
(GCMの氷床固定)



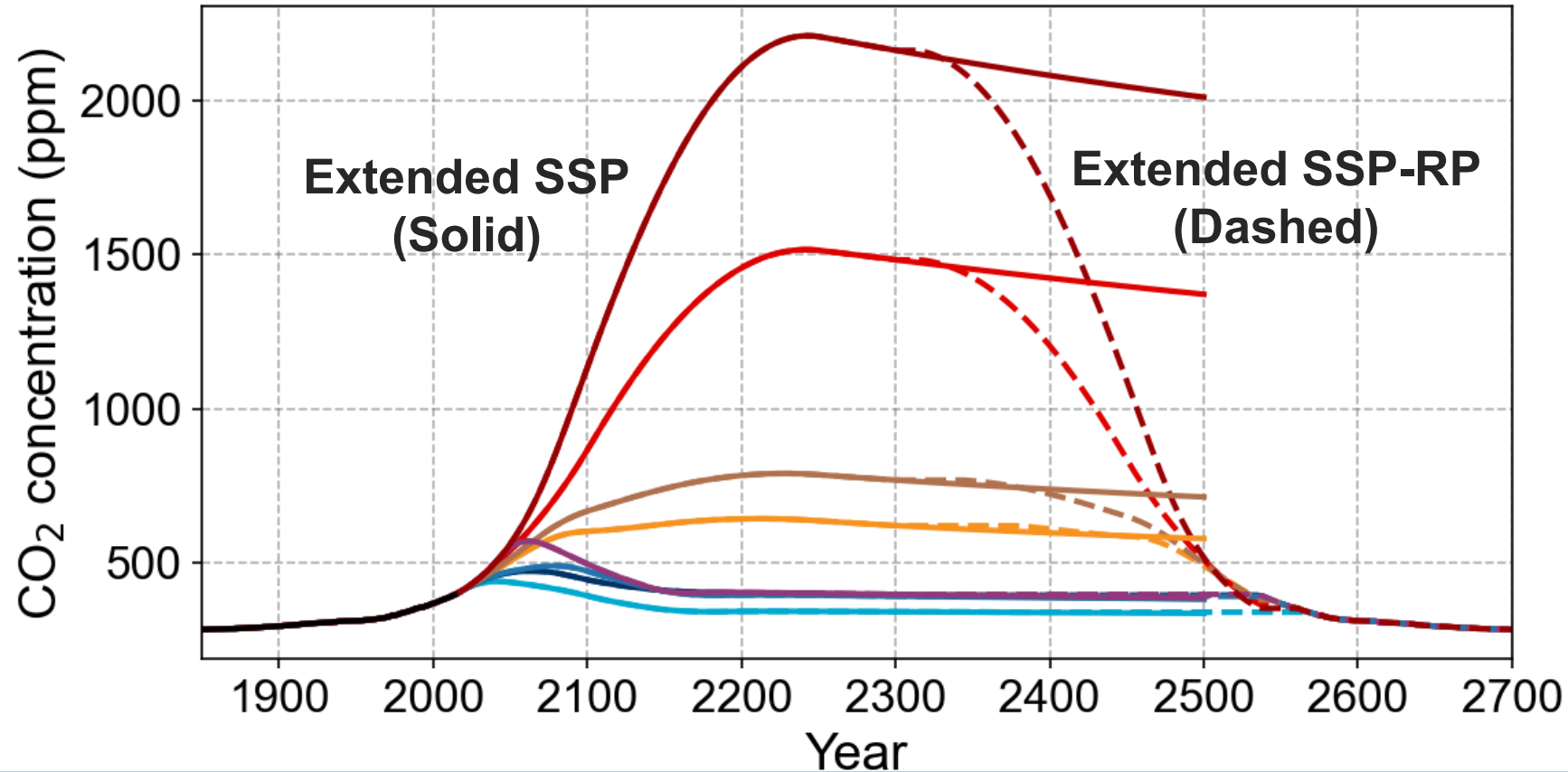
- ・ 氷床将来予測 CMIP7-ISMIP7 (AR7 fast track, オフライン実験)
- ・ 古気候情報を通したモデルの検証。  
長期応答では、氷床後退が気候にフィードバックすることが重要



- ・ 長期積分から, 4xCO<sub>2</sub>気候の準定常状態を求めた\*
- ・ 氷床分布のフィードバックが氷床分布の長期応答に影響



# SSP延長に続く排出反転シナリオ実験 (AMOC等の不可逆性検討)



Historical  
SSP1-1.9  
SSP1-2.6  
SSP4-3.4  
SSP5-3.40S  
SSP4-4.5  
SSP4-6.0  
SSP3-7.0  
SSP5-8.5

Yokohata et al.  
in prep

- CO<sub>2</sub> 排出量は 2250 年にゼロになる (延長 SSP, Meinshausen et al. 2020)
- 50 年間の気候安定化時期 (CO<sub>2</sub> 排出ゼロ), 2250–2300
- CO<sub>2</sub> 濃度を 2300 年から減少させる (反転シナリオ, Yokohata et al. in prep)

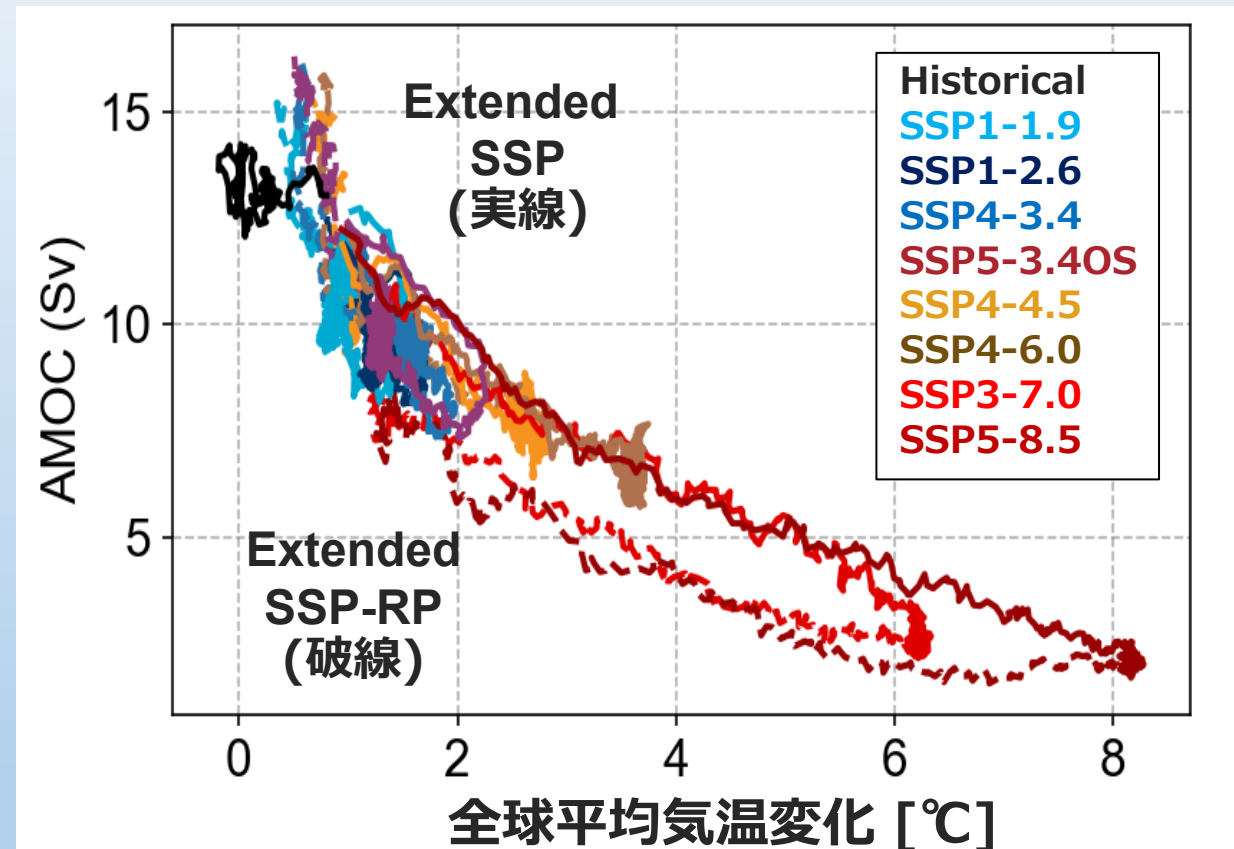
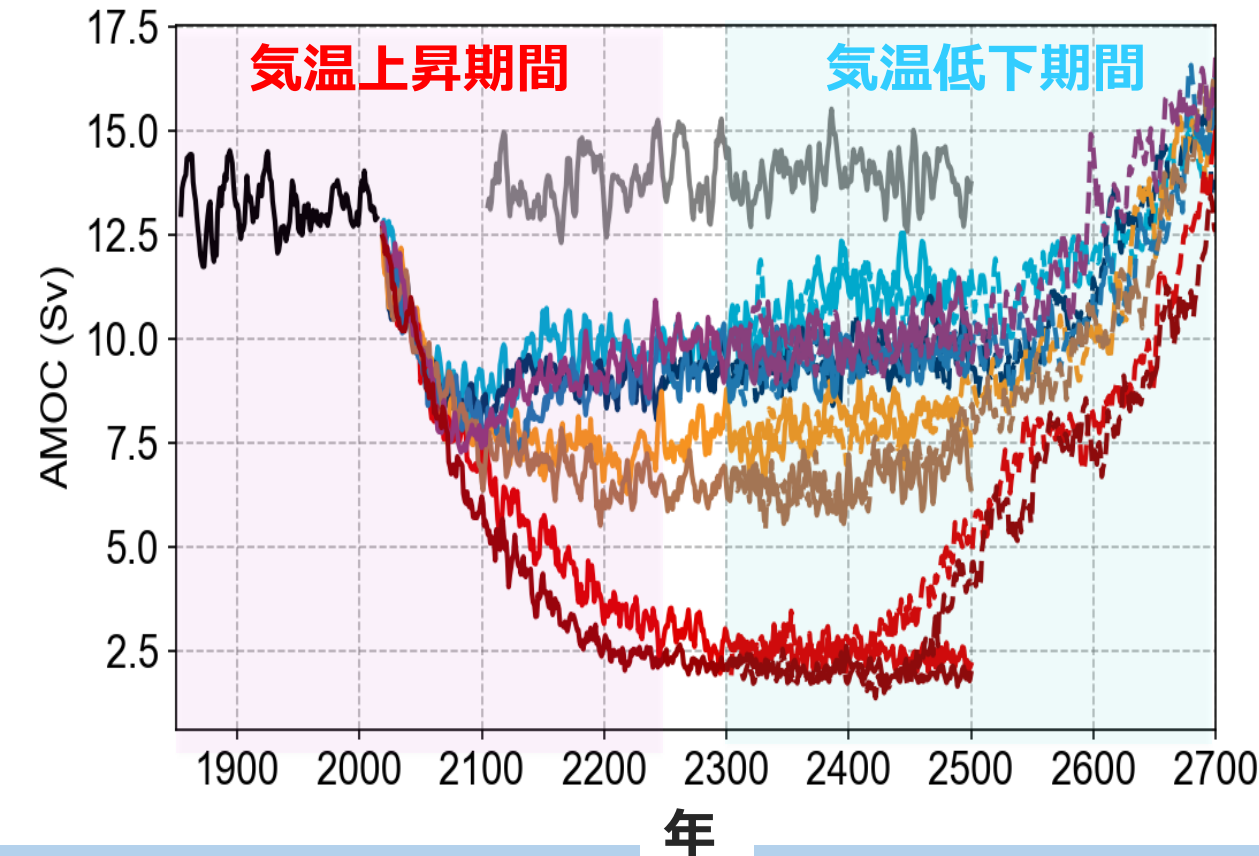




# 北大西洋海洋深層循環

(Atlantic Meridional Overturning Circulation at 26.5 N)

サブ課題ii成果



- 21世紀の間は、AMOC はシナリオによらず弱化する。
- 気温上昇期間で AMOC は弱化し、気温低下期間で遅れて回復する: 可逆的！
- CO2濃度1500ppm以上に達するシナリオでヒステリシス出現。TIPMIP参加の他モデルとの比較も進めたい。





- ・ シミュレーションデータ発信
- ・ 温室効果ガス、SLCF(短寿命気候強制力因子)の収支理解
- ・ ティッピングエレメント
- ・ **新規モデル開発**
- ・ 国際貢献、技術・事務支援



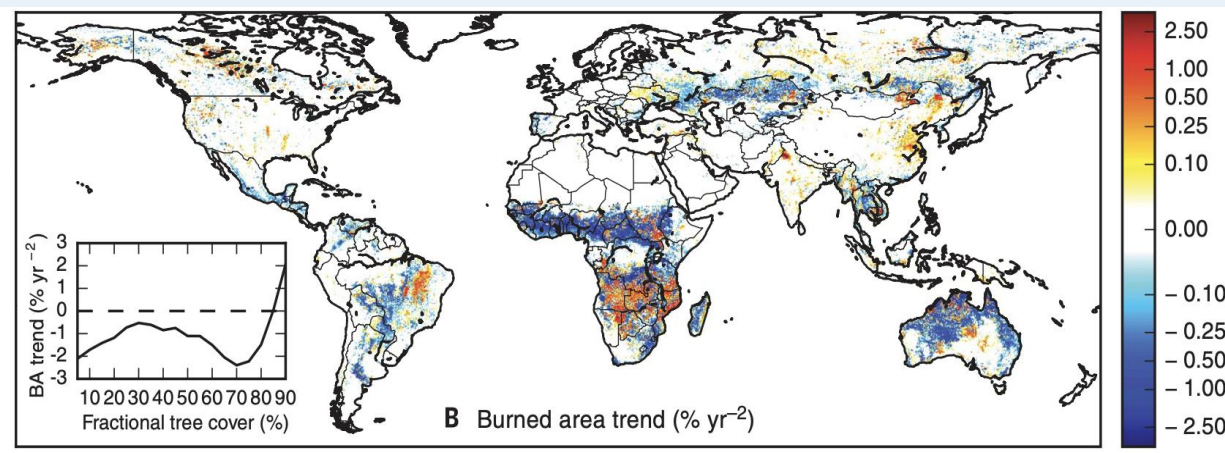
# 火災モデリング：d4PDFを適用した気候変動影響評価



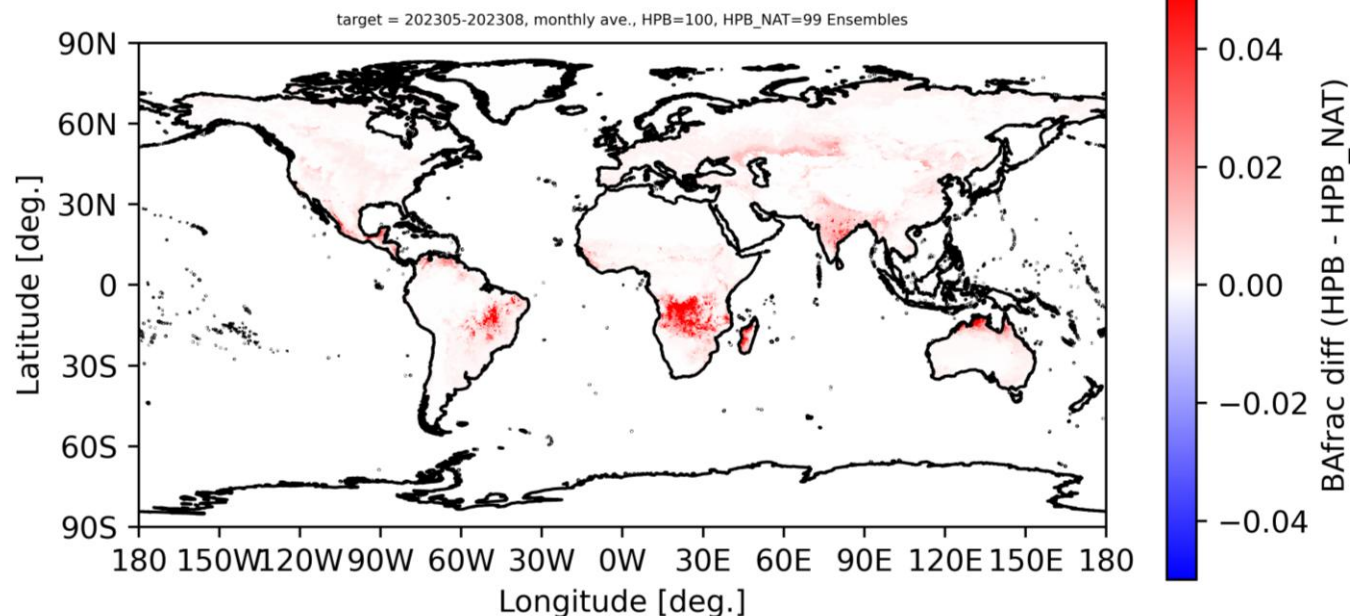
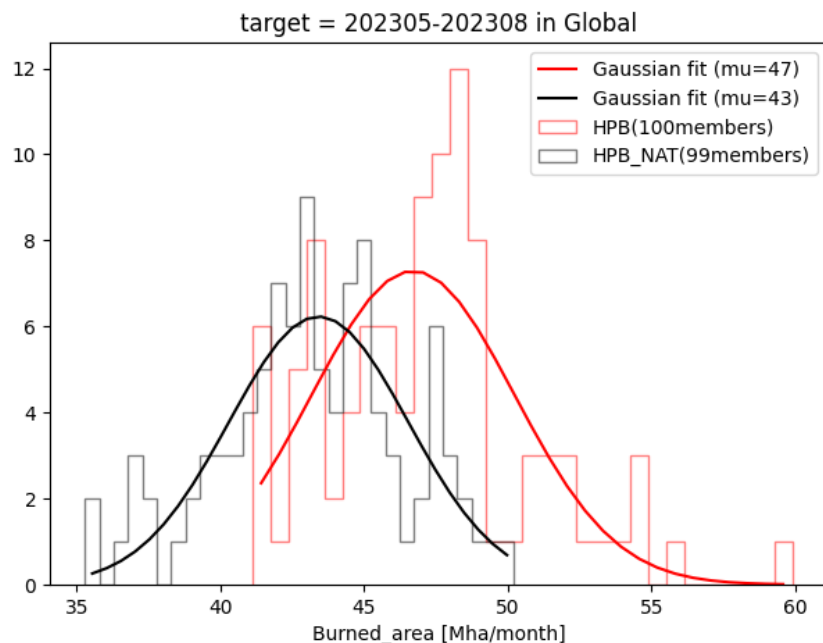
- ✓ d4PDFを用いてHPB（過去再現）とHPB\_NAT（非温暖化）を火災モデルに入力し、焼失面積（fraction）を比較。
- ✓ 2023年5-8月の月平均焼失面積の確率分布（左下図）を比較すると全球で 3 Mha/month 程度温暖化時の方が大きい（正規分布Fit）。
- ✓ 全球の分布（右下図）で見ると、全体的に温暖化時の方が大きい、特に南アメリカ東部やアフリカ南部で大きい。  
→過去20年の実測トレンド（右上図）のうち増加している部分と概ね一致（実測で減少しているのは人間活動起因が主）。
- ✓ なお、温暖化/非温暖化時でGDPは同じと考えて人間活動の補正はしていない。

## BAの変化トレンド（Andela et al. 2017）

サブ課題ia成果



## d4PDF実験（HPB-HPB\_NAT : 202305-202308平均）

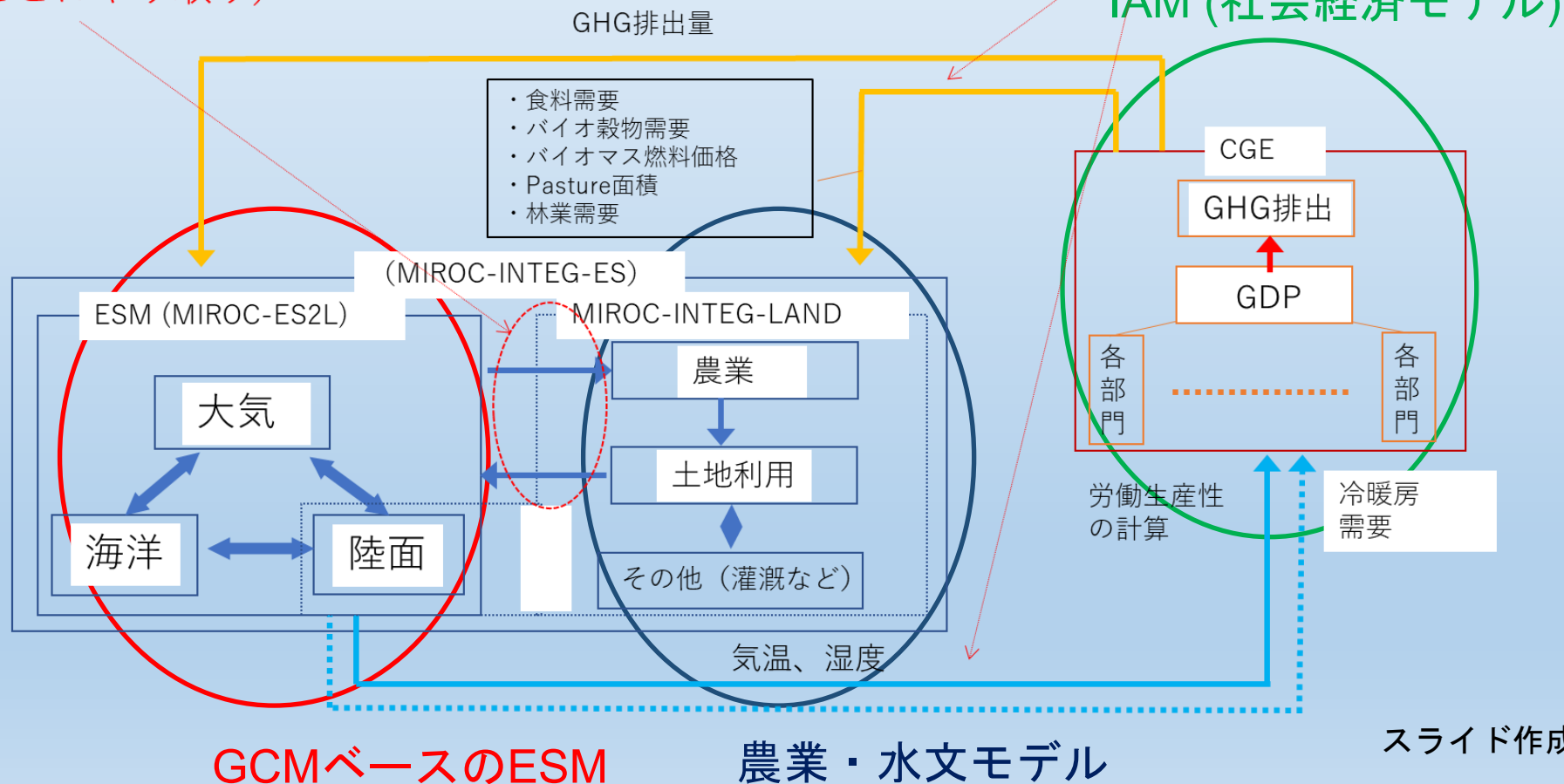




# 地球システムー社会経済結合モデルの開発： GCMベースのESMと社会経済活動、農業・水文モデルを統合

「緩やかな」結合  
(1年ごとにやり取り)

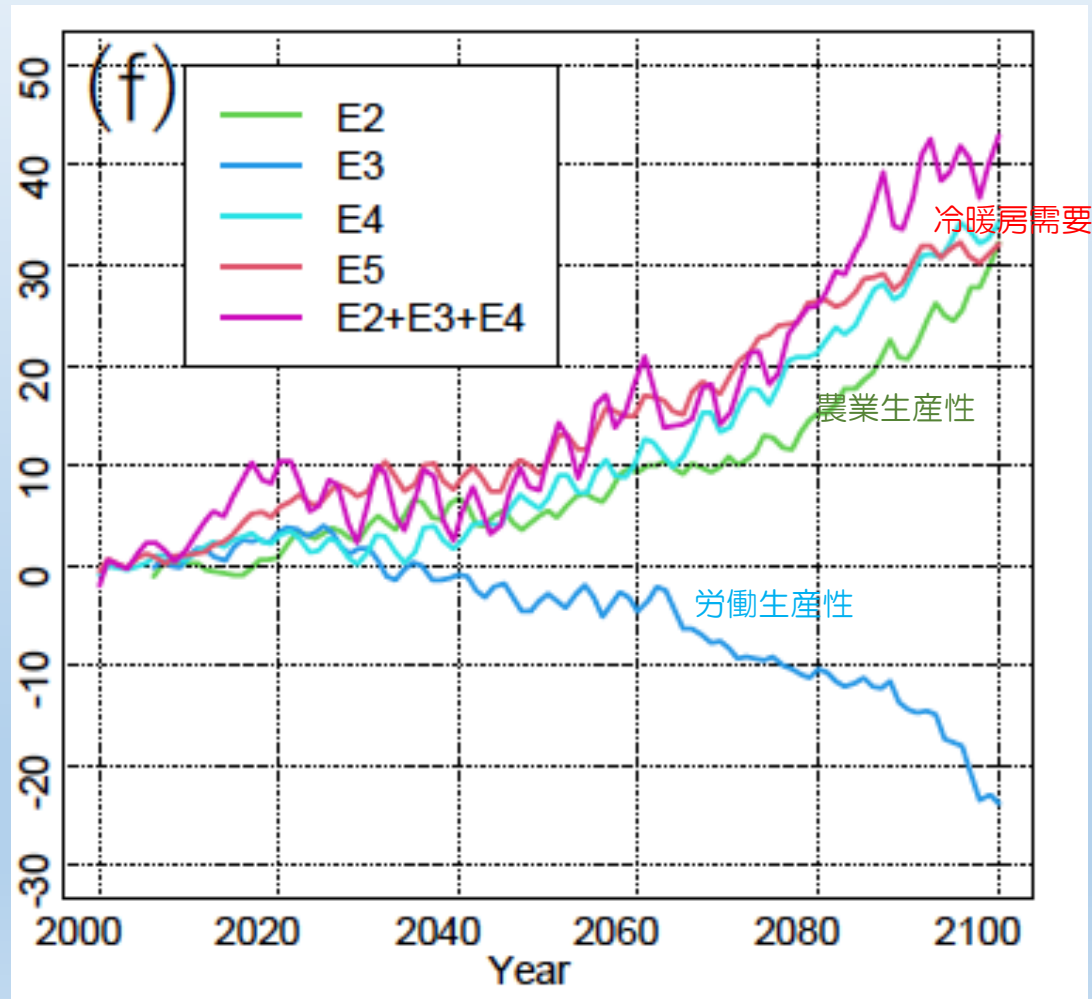
「緩やかな」結合  
(10年ごとにやり取り)



サブ課題iiia,b 成果  
スライド作成：立入(JAMSTEC)



# ESM + 人間・社会経済活動



人間活動変化と炭素循環変動の相互作用を定量化

農業生産性・冷暖房需要：CO<sub>2</sub>濃度増  
労働生産性：CO<sub>2</sub>濃度減

トータルでは正のフィードバック  
→既往研究の改訂

将来シナリオ作成で  
考慮することの重要性

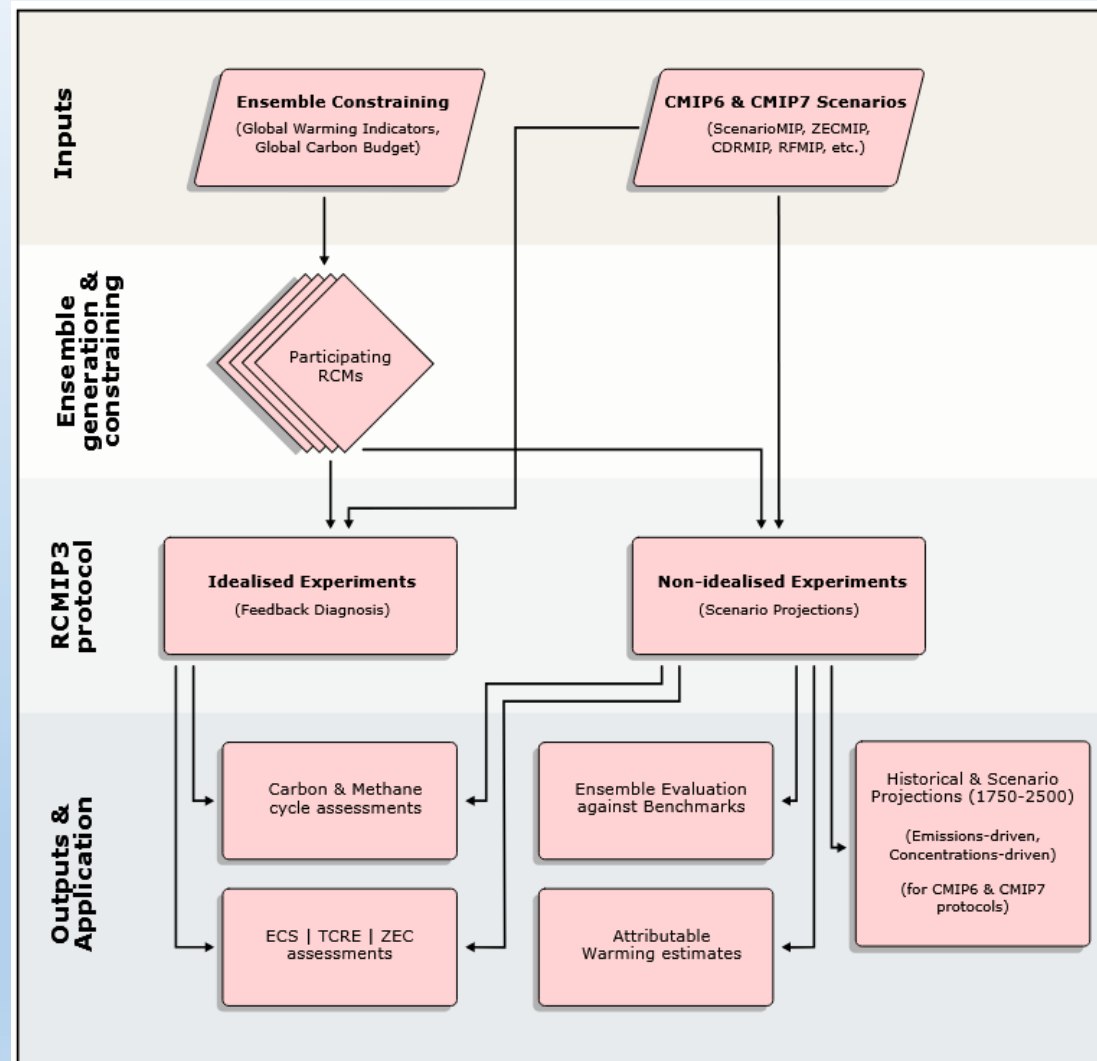


IPCC WG間連携への  
直接的な貢献可能性



# RCMIP3 (Reduced Complexity Model Intercomparison Project) への参画

## RCMIP プロトコル チャート図



サブ課題ib成果

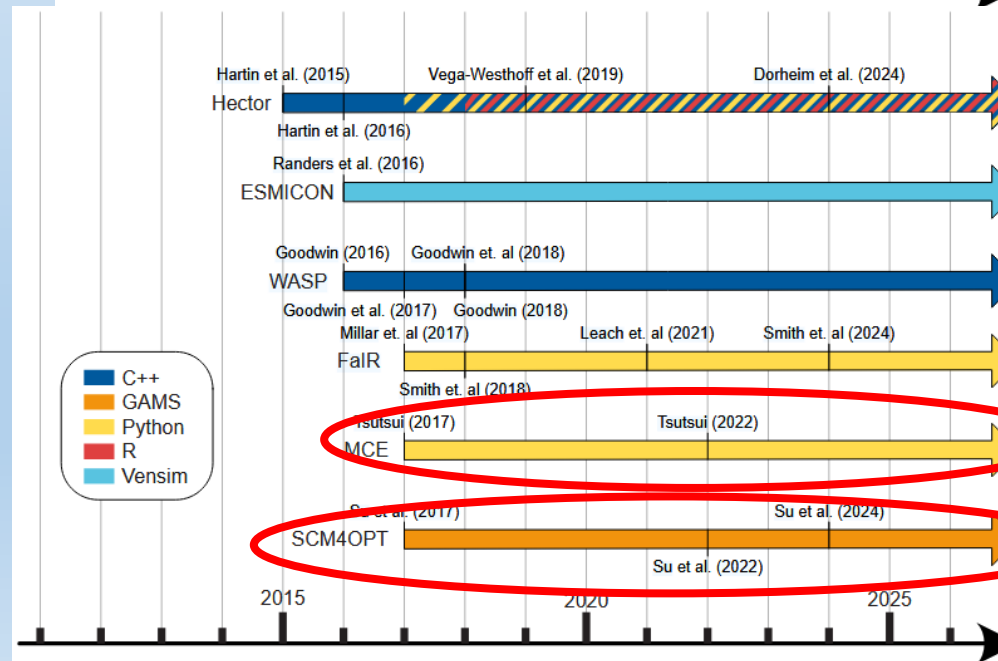
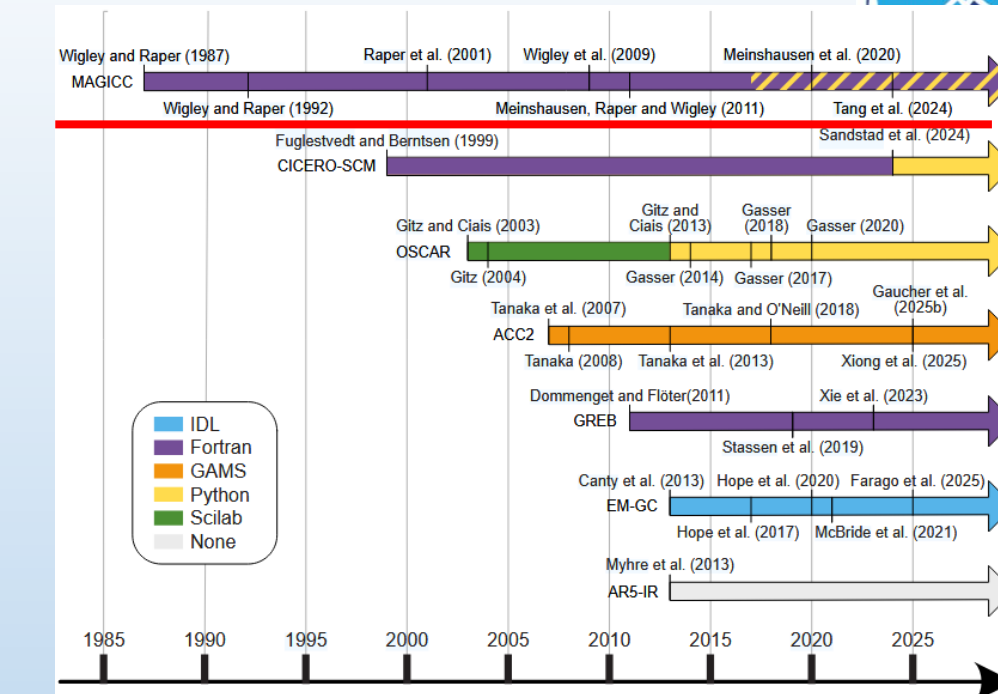


# RCMIP 参画モデル 一覧

- 国内2モデル参加
- 「老舗」のMAGICCが社会経済分野ではポピュラー
- 多様化が正当な評価につながる  
ことが期待される。

The evolution of 13 models (excluding Held et al. 2-layer model) is represented with published references; Colors indicate the programming language used for each model's implementation and interface

Source: Romero-Prieto et al. (2025, review preprint), Figure 1, 2



サブ課題ib成果



- ・ シミュレーションデータ発信
- ・ 温室効果ガス、SLCF(短寿命気候強制力因子)の収支理解
- ・ ティッピングエレメント
- ・ 新規モデル開発
- ・ 国際貢献、技術・事務支援



# 国際コミュニティへの貢献

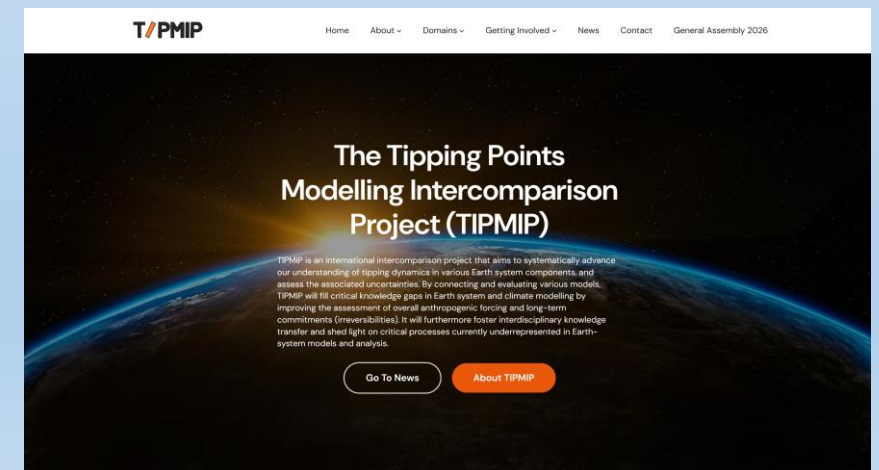
- IPCC AR7
  - 【WG1】 日本の研究機関として初のWG1 CLA 輩出**
  - 第4章：伊藤昭彦（LA、東大）
  - 第9章：立入郁（CLA、JAMSTEC）、イリナ・メルニコワ（LA、NIES）、河宮未知生（RE、JAMSTEC）
  - 【WG3】**
  - 第2章：田中克政（LA、NIES）
  - 【SLCF方法論報告書】**
  - 第2章：金谷有剛（LA、JAMSTEC）
- ほか
- WCRP
  - Earth System Modeling and Observations (ESMO) Steering Committee: 河宮
  - ESMO Working Group on Coupled Models (WGCM): 建部
- SCOR/ICSU
  - Reducing Uncertainty in Soluble aerosol Trace Element Deposition (RUSTED): 伊藤彰記(共同議長、JAMSTEC)





## 関連国際会議

- CMIP Community Workshop
  - 2026年 3/9-13, 京都国際会館
  - 先端P関係者らで LOC 結成
  - 先端P, AIMEC, JAXA から 運営資金拠出
- TipMIP Workshop
  - 2026年3月4-6日、於：東大本郷
  - Ricarda Winkelmann氏 (PIK) から阿部（彩）、河宮に協力依頼
  - 課題2参画者を中心に LOC結成
- 関連して、LHA/WCRP主導のTipping 現象評価論文の執筆も進行中（阿部、河宮が参加）。





# AI勉強会

日時：令和8年1月13日(火) 13：50-17:30

場所：キャンパスプラザ京都

## 議事次第

- 趣旨説明：河宮未知生（JAMSTEC）
- データ駆動型アプローチで探る気候ティッピングの予測限界（オンライン）：澤田洋平（東京大学）
- 拡散モデルを用いたメソスケール降水の予測と診断：高野雄紀（気象研究所）
- 拡散モデルを用いた波浪予測：増田和輝（東洋建設技術研究所）
- Towards Probabilistic Reconstruction and Uncertainty Quantification of Subsurface Ocean Heat Content from Surface Temperature Anomalies Using Generative AI: Namal Rathnayake (JAMSTEC)
- 分野横断シナリオ研究におけるAI・統計ベースエミュレータの役割：筒井純一（電力中央研究所）
- 総合討論：

先端プロにおけるAI適用は現状、ダウンスケーリング関連が多いが、今回は趣向の異なる題材を取り上げた。

先端P 4年目となり、高度なAI適用も進んでいる。

「ティッピングの予測限界」の話題は、気候予測分野でのAI適用に新たな次元を提供している。



2025年度AI勉強会の様子





# 公開シンポジウム

## 「なぜ森は燃えるのか？－気候変動と林野火災のリアル－」 (8月20日 (水) 13:00-15:50、オンライン)

「2025年、大船渡を襲った林野火災－水文学の視点から読み解く－」 峠嘉哉 (京大)

「猛暑、大雨、林野火災も？－異常天候をもたらす偏西風の蛇行と温暖化－」 関澤惲温 (気象研)

「衛星観測で分かる世界の林野火災」 棚田和玖 (JAXA)

### トークセッション

ファシリテーター：三浦 菜摘 (日本科学未来館)



\* 林野庁からの参加が目立った。中学生 (!) など、若い世代の参加もあった。





# 先端P成果集

## 内容：

○気候変動予測研究史→次の5年へ

○科学的成果

CMIP、5km Down Scaling (d4PDFv2)、イベントアトリビューション、極端現象・含ハザード、カーボンバジェット、ジオエンジニアリング、ティッピング、メカニズム解明

○国際コミュニティへの貢献

IPCC, AR6から継続的に貢献、WCRP (GEWEX OSC, CMIP WS), CMIP 7 TT, CMIP Panel, UNFCCC (COP)

○国内コミュニティ、省庁、自治体

気候変動レポート、DS20XX、省庁・自治体での活用例、公開シンポ

○今後に向けて

話題：AR7、DS20X2X次期予測DS、気候変動適応等の施策、AI活用、統合ハザードモデル



表紙案

脱稿・製本済み





# まとめ

- CMIP7 Fast Track 対応
  - 計画立案の国際コミュニティ活動への積極的関与、論文成果創出
  - 適用可能なモデルコードは保持、2026年中のAFT完了を前提に、可能な限り改良
- 温室効果ガス、SLCF(短寿命気候強制力因子)の収支理解
  - メタン緩和策に対する化学フィードバック（緩和策の効果を弱める方向に）
  - 林野火災モデル開発：林野火災EA→気候変動による林野火災増加の定量的評価
  - Global Carbon Budget への貢献継続
- ティッピングエレメント
  - 気候－氷床結合モデルの開発→グリーンランド氷床融解が早まる
  - アマゾン（部分的）枯死の可能性（6℃超）
- 新規モデル開発
  - 人間活動のモデル化→ 冷暖房需要の変化によるCO2濃度増などを評価
  - NICAM 地球システムモデル化：化学コンポーネントの導入
  - 簡易気候モデル（エミュレータ）の開発：RCMIPへの貢献、AR7でも引き続き活用
- 国際貢献、技術・事務支援
  - IPCC AR7 CLA, LA, RE執筆者輩出、国際WS運営、等
  - 共有サーバ運用

