

統合的気候モデル高度化研究プログラム

領域テーマB「炭素循環・気候感度・ ティッピング・エレメント等の解明」

海洋研究開発機構
環境変動予測研究センター
センター長 河宮 未知生

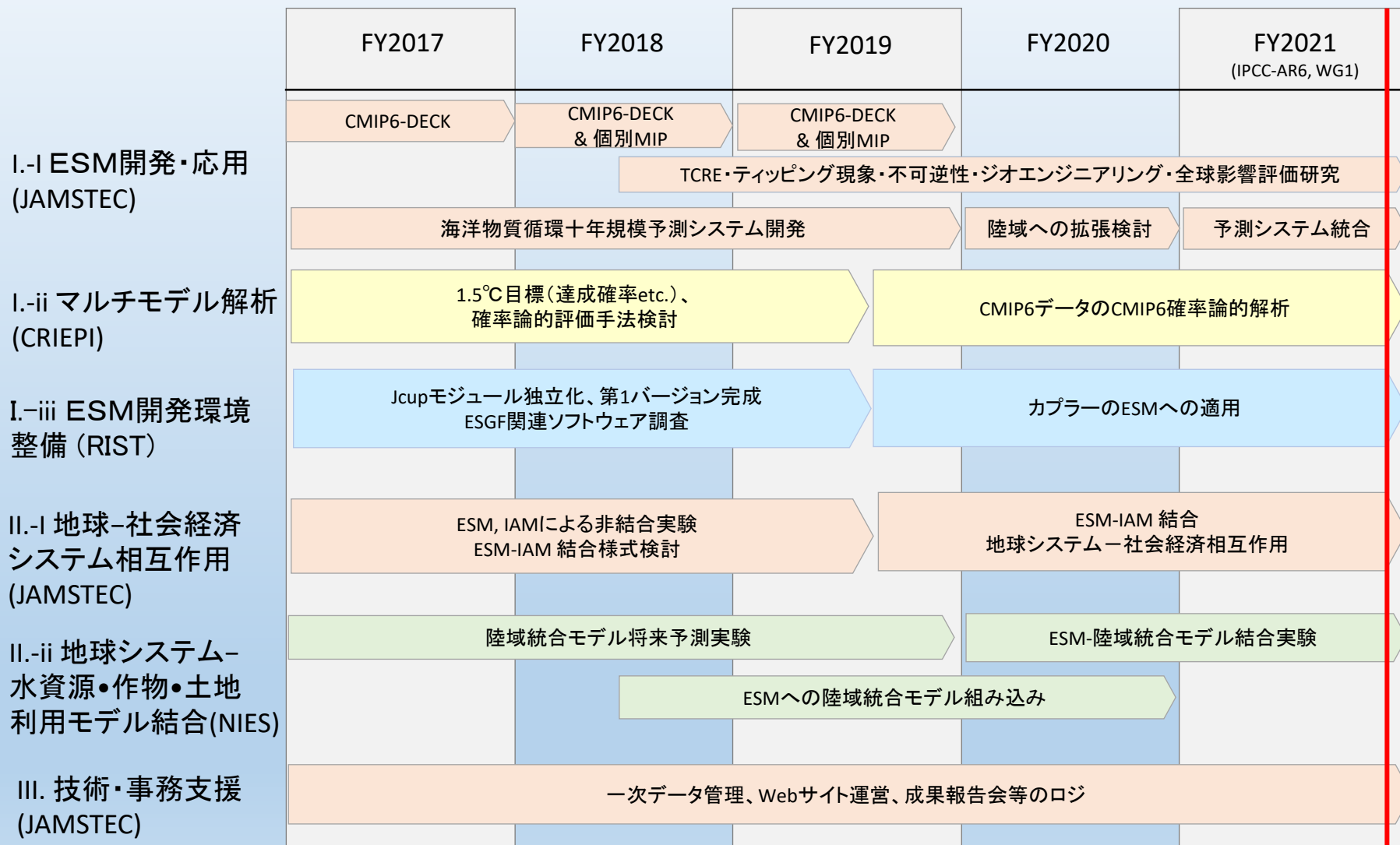
課題構成

- i. ESMの開発・地球システム解析
 - a. ESM開発・応用 (JAMSTEC)
 - b. マルチモデル解析による温度上昇の確率論的評価(電中研)
 - c. ESM開発環境整備(高度情報科学技術研究機構 RIST)
- ii. 地球-人間システム相互作用
 - a. 地球-社会経済システム相互作用 (JAMSTEC)
 - b. 地球システム-水資源・作物・土地利用モデル結合(環境研)
- iii. テーマ間連携のための技術・事務支援 (JAMSTEC)



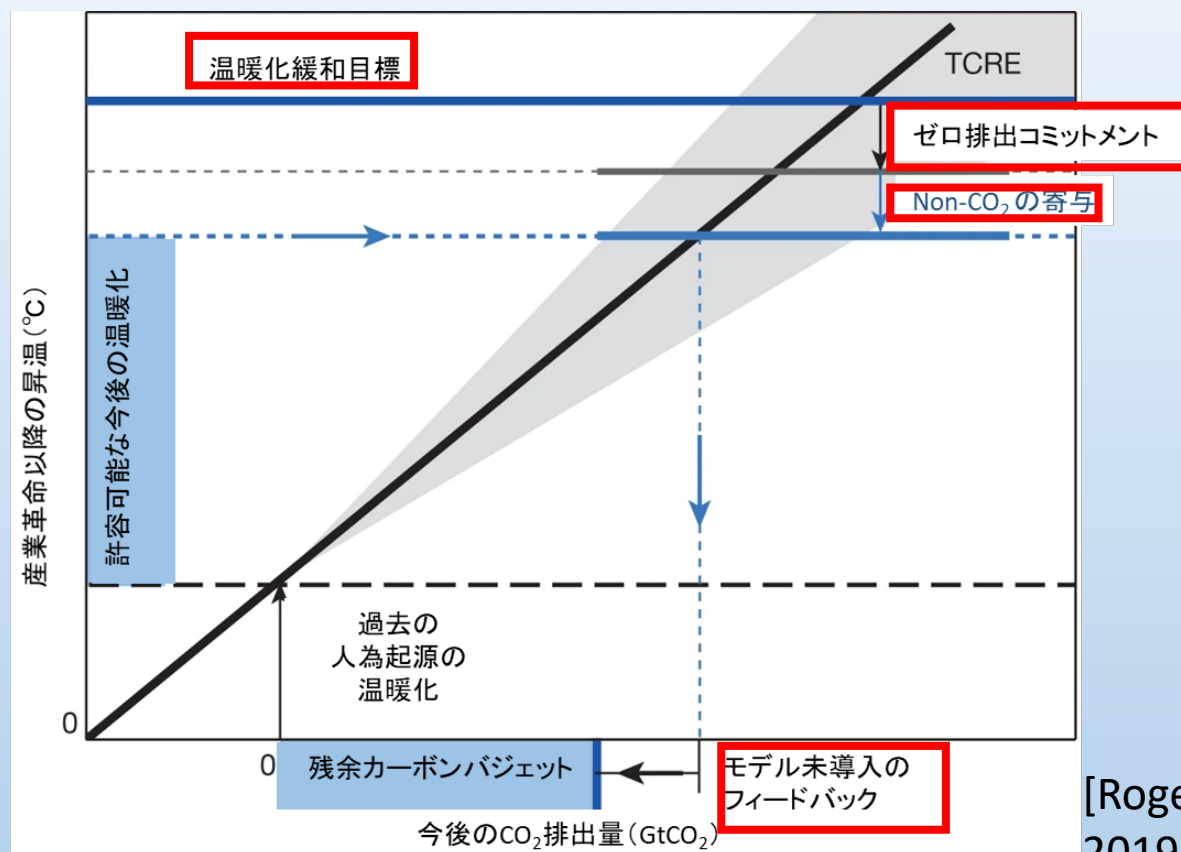
グローバル・ストックテイク等、温暖化緩和抑制策立案に
資する科学的知見の獲得

タイムライン



TOUGOU Theme B in a nutshell

「残余カーボン バジェット」算出 手法の概念図



[Rogelj et al.,
2019, Nature]

温暖化緩和目標達成のために、CO₂排出量をどの程度に抑えるべきかを評価するための課題

- 物質循環過程高度化 ← 未導入のフィードバック、不確実性低減、ゼロ排出コミットメント評価
- 社会経済過程導入 ← Non-CO₂ の寄与評価、未導入のフィードバック
- ティッピングエレメントの同定 ← 温暖化緩和目標設定の指針

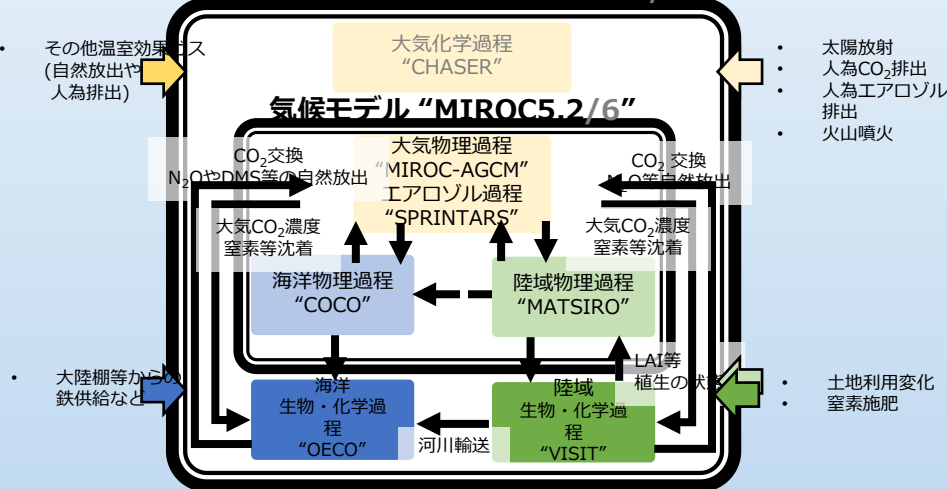
i-a: ESM開発・応用(JAMSTEC)

当初計画の要点: 新規導入要素・プロセス実装、CMIP6実験、
結果解析

テーマBの研究開発の礎となるESM開発とCMIP6

● 地球システムモデル開発

地球システムモデル“MIROC-ES2L/H”



Hajima et al. 2020 GMD • **WOS “Hotpaper (top0.1%)”選出!!**

• AR6 Ch.5 & AnnexII 引用

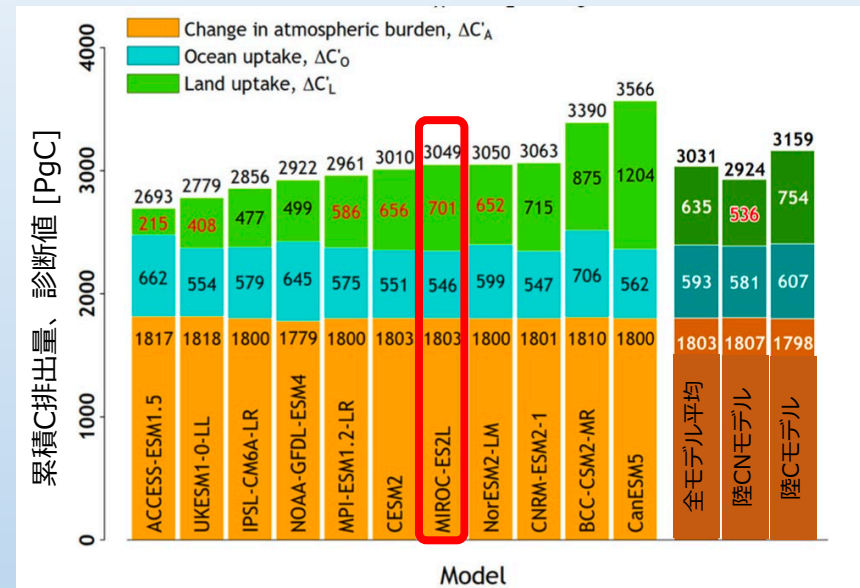
関連成果:

MIROC-ES2L, 古気候版開発論文 : Ohgaito et al. (2021) CP
地球システムモデル開発総説 : Kawamiya et al. (2020) PEPS

AR6 AnnexII 引用

- 物理コア: 最新気候モデル MIROC5.2/MIROC6
- 陸域: VISITを結合、**N循環→C循環**の制約
- 海洋: OEEOを高度化、開放系のC/N/Fe/P/O循環に
- CMIP6 や サブ課題iiなど、統合テーマBの研究開発の礎に

● 陸域窒素循環導入の効果



Arora, Hajima, Tachiiri, Kawamiya et al. (2020) BG

WOS 高被引用文献!!

AR6 Ch.1, 3, 4, 5, 7, 8 引用

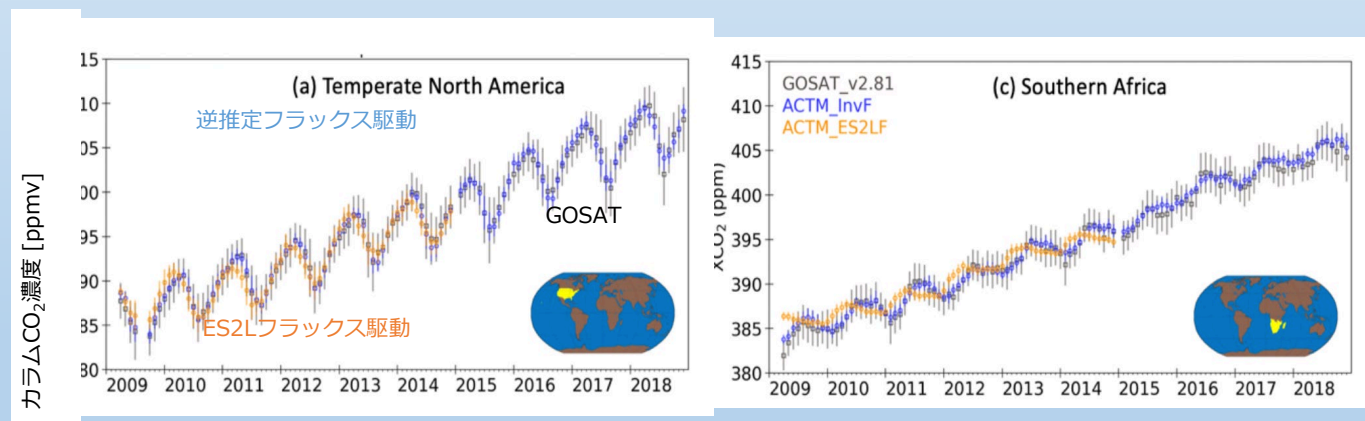
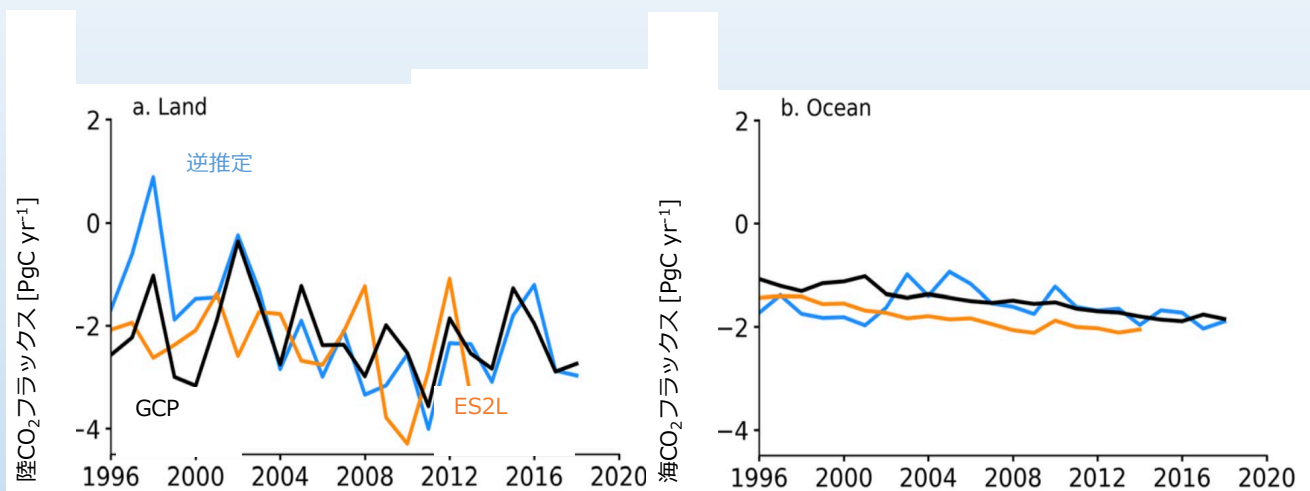
関連成果:

ESMsのCO₂応答: Kawamiya et al., (2020) PEPS

- 最新ESMsの炭素循環フィードバックを比較
- 陸域のCN循環入りモデルは総じて陸のC吸収が抑制傾向
- フィードバックの内訳も議論できるように

統合Pでは炭素循環モデル検証にも注力

● 炭素循環過程の詳細検証 UNFCCC SBSTA紹介!

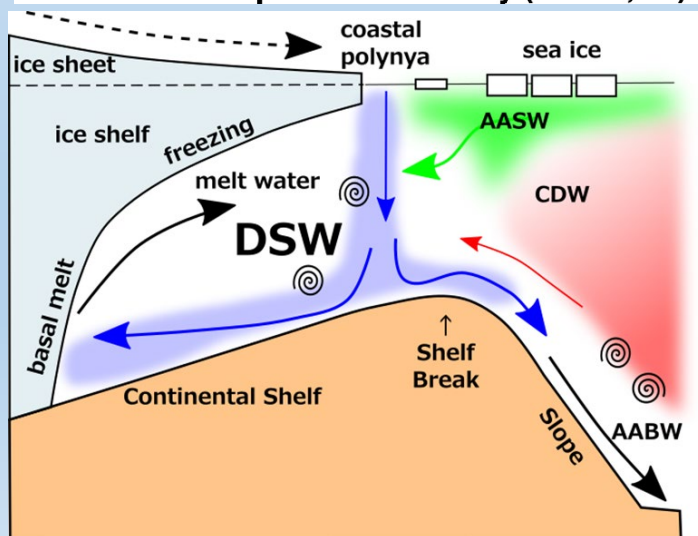
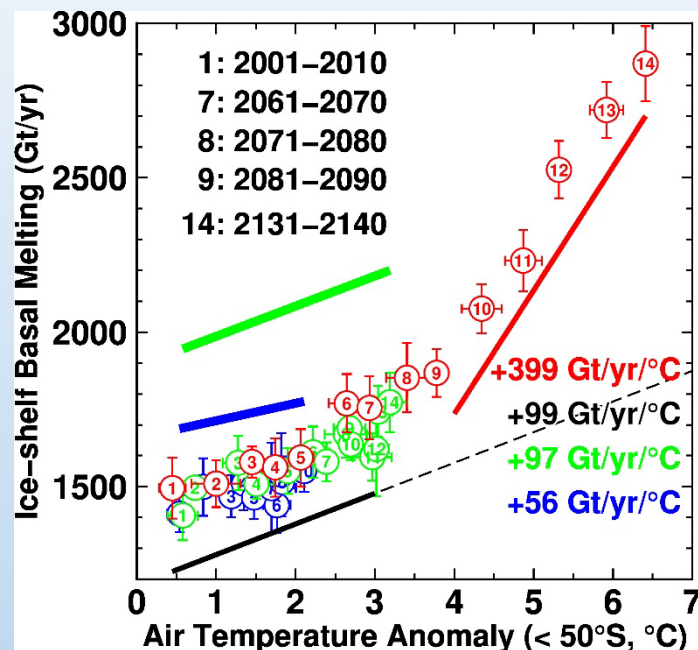


Patra, Hajima, Ichii, Kawamiya, Ito et al. (2021) PEPS

- ESMのCO₂フラックス/カラム濃度を、トップダウン手法や衛星観測を用いて検証、2000年代以降は良好
- 古気候環境に適用、モデル間で中庸な振る舞いを確認

SSPs(RCPs)を用いた温暖化予測

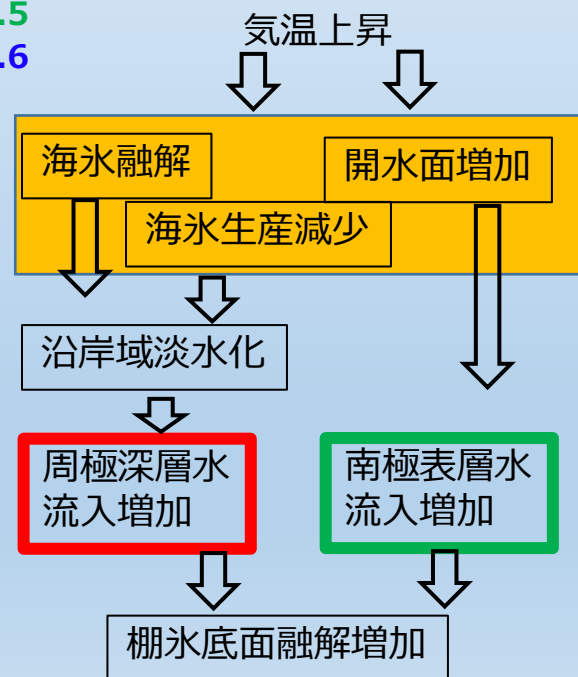
● 南極棚氷融解(RCPs使用、ティッピング)



● 海洋-海氷-棚氷 モデルを使用

● 南大洋気温が+3~4度(1981-2000比)を超えたところから底面融解量が急増:

99 [Gt yr⁻¹ °C⁻¹]
→ 399 [Gt yr⁻¹ °C⁻¹]



要素モデルを活用した新たな知見 (例)

●海洋物質循環モデル [氷河性ダストからの鉄供給、古気候]

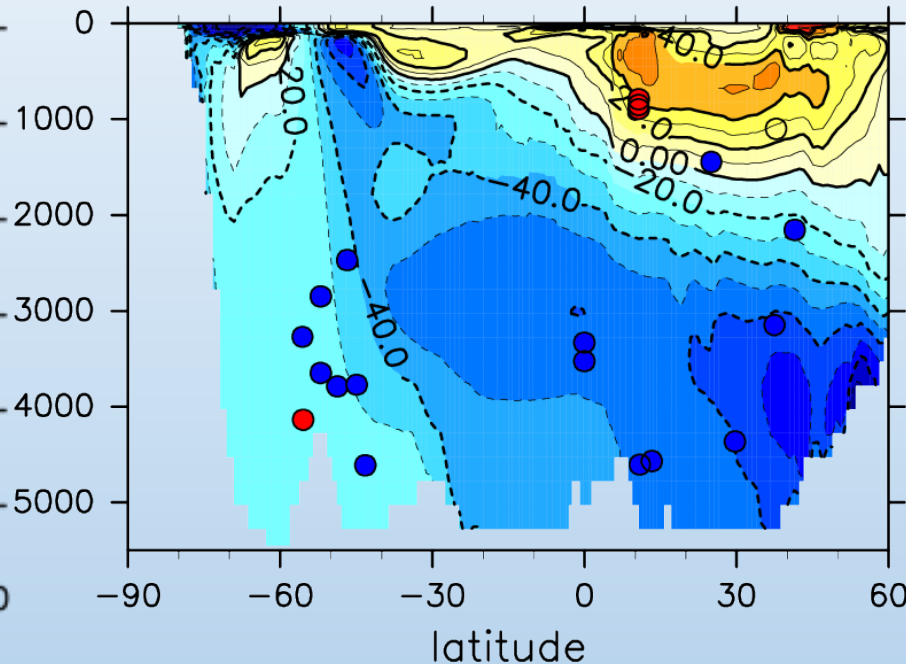
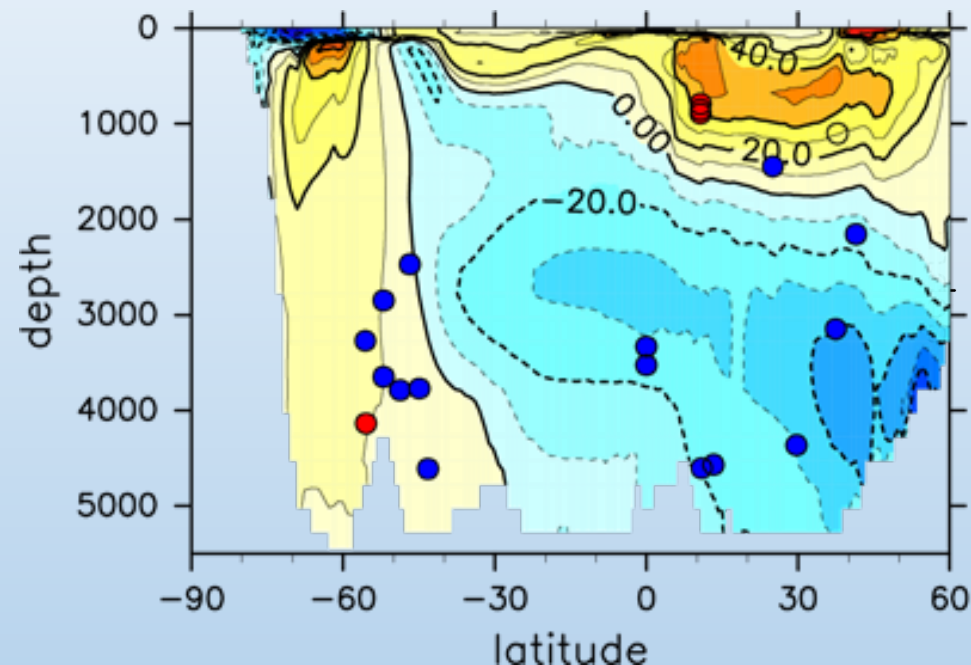
プロキシー

- 増加
- 減少

ΔO_2 (最終氷期 - 産業革命前、大西洋)

通常実験

氷河ダスト起源鉄を考慮



・氷河起源ダストの鉄供給を考慮し、貧酸素化を初めて定量的に再現.

・酸素の減少≡生物起源炭素の蓄積である為、生物生産の増加が 30ppmのCO₂低下を引き起こしたことを示した.

Yamamoto, Ohgaito,
Ito et al. (2019) CP

Highlight Article選出!

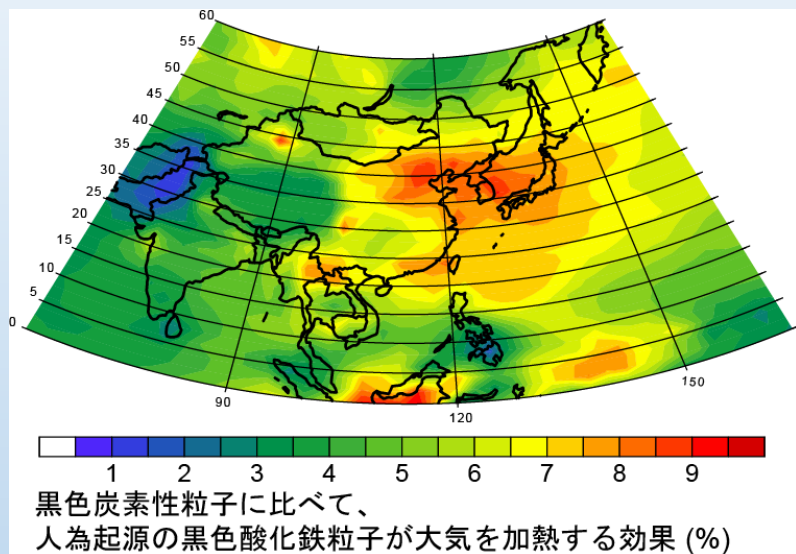
AR6 Ch. 5 引用

関連成果:

最終氷期のダスト再現性向上 : Ohgaito
et al. (2019) CP

要素モデルを活用した新たな知見 (例)

●大気化学輸送モデル [黑色酸化鉄による加熱効果]



Ito et al. (2018) Sci. Rep. **プレスリリース**

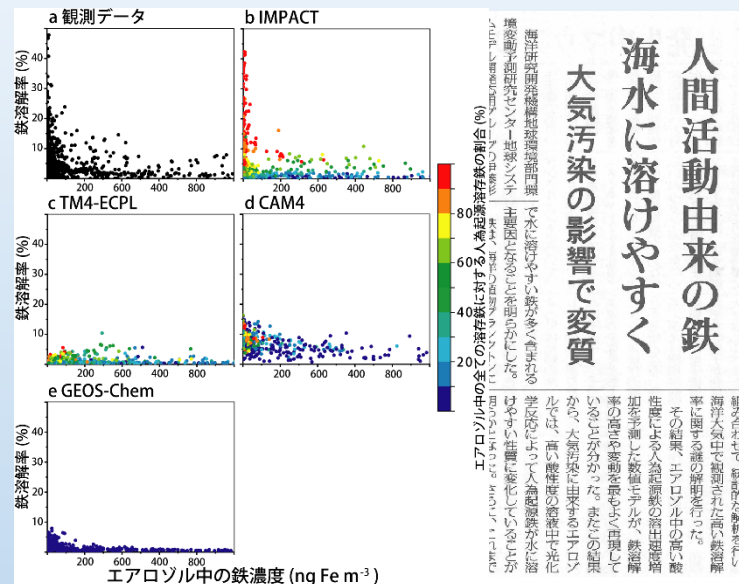
- ・排出インベントリで見逃されてきた「黑色酸化鉄」
- ・鉄鋼業が盛んな地域・周辺で黑色炭素の+10%程度の加熱効果

関連成果：

鉱物エアロゾルと大気加熱効果：

Ito, A. et al., (2021) Atmos. Chem. Phys.

●大気化学輸送モデル [予測における燃焼起源鉄の重要性]



Ito et al.
(2017) Sci.
Adv.

IF 11.5

- ・燃焼性エアロゾル鉄の溶解度は、
鉱物性エアロゾルよりもかなり高い
- ・効果的に海洋の生物生産を増加

関連成果：

豪州林野火災：Ito et al. (2020) PEPS

森林火災と溶存鉄総説：

Hamilton, Ito et al. (2021) ARMSci.

燃焼起源鉄に関する総説：Ito et al. (2021) npj clim. atm.

鉄同位体によるモデル評価：Kurusu, Ito et al. (2021), ACP

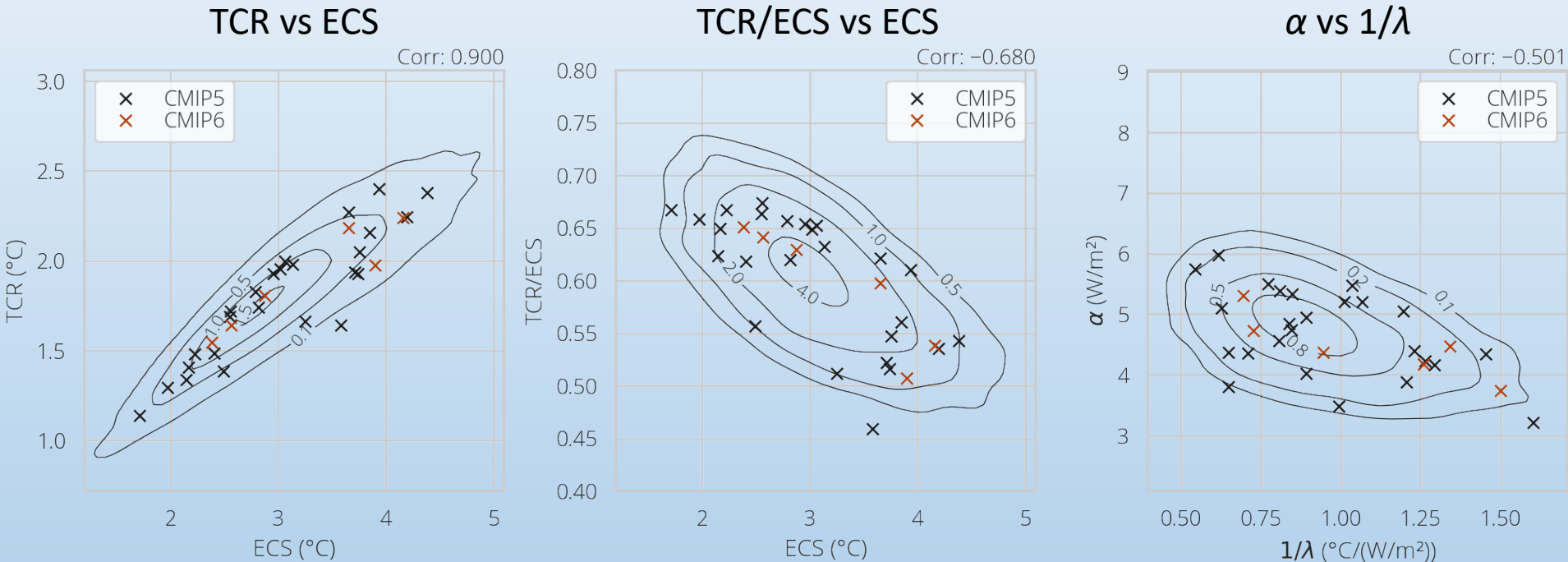
可溶性鉄と濃霧：Shi, Ito et al. (2020) GRL

大気酸性度と海洋施肥：Baker, Ito et al. (2021) Sci. Adv.

i-b:マルチモデル解析による温度 上昇の確率論的評価(電中研)

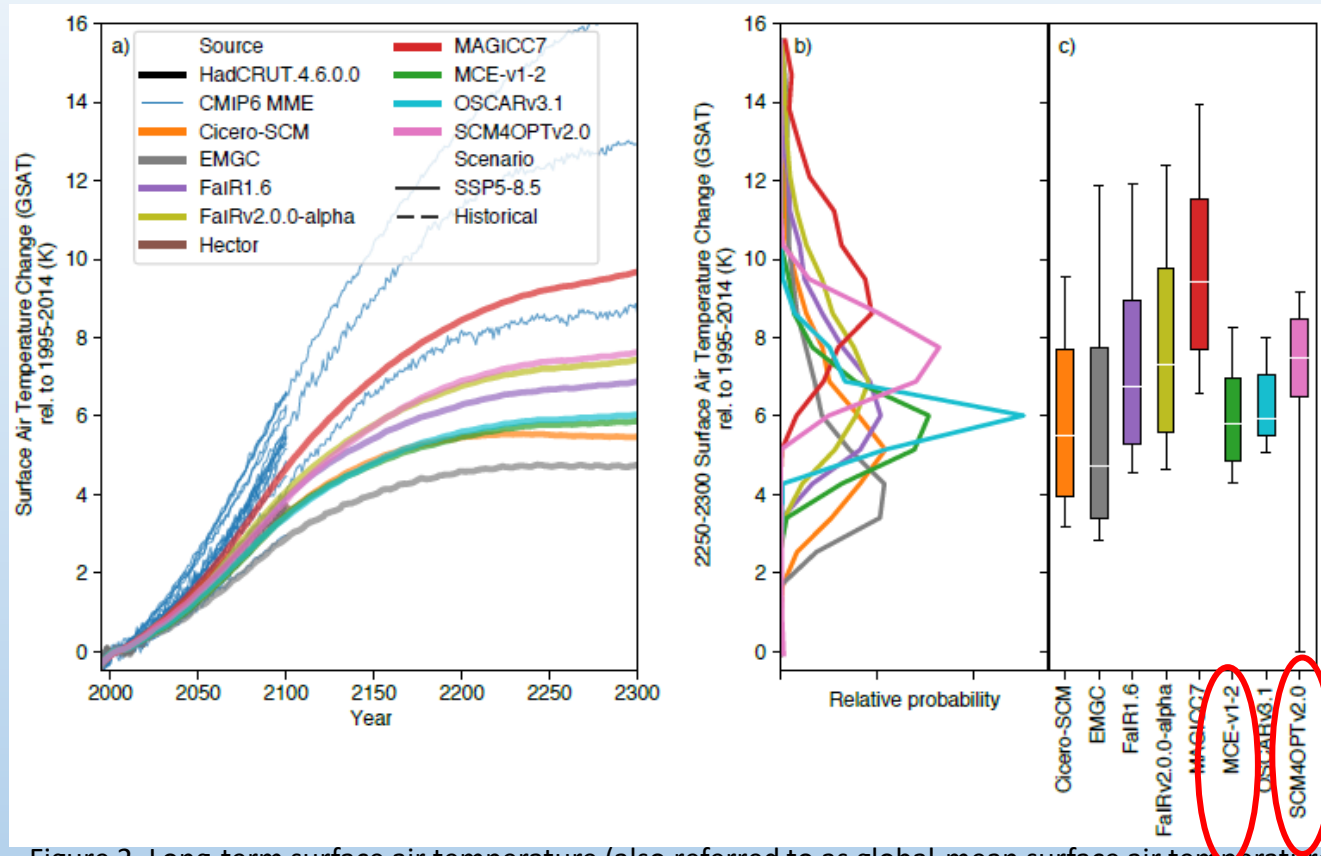
**当初計画の要点: CMIP6への確率論的評価適用、
カーボンバジェット科学基盤更新**

簡易モデルを用いた CMIP5・CMIP6データの拡充



コンターはCMIP5の確率分布。ECSが大きいモデルはTCR/ECS比が小さい(海洋熱吸収が卓越する)傾向。右図の縦軸(α , CO₂強制力のスケールリングファクター)と横軸($1/\lambda$ = 気候フィードバックパラメータ)の積が温度上昇の度合いを表す。モデル間差異は後者が卓越するが前者も有意。CMIP6はCMIP5と同様の分布 (cf., Tsutsui, 2020, GRL)。

RCMIP Phase 2 ハイライト MAGICC—強体制脱却への布石



SSP5-8.5 GSAT変化

参加9モデルは、**共通の強制力・感度・観測トレンドなどの制約**に合致するアンサンブルを生成。各制約はWG1 AR6前の "proxy assessed ranges"。合致度は参加9モデルのうちMAGICCとMCEが比較的良好。感度に寄せるか観測トレンドに寄せるかで二極化する傾向

日本発のモデル

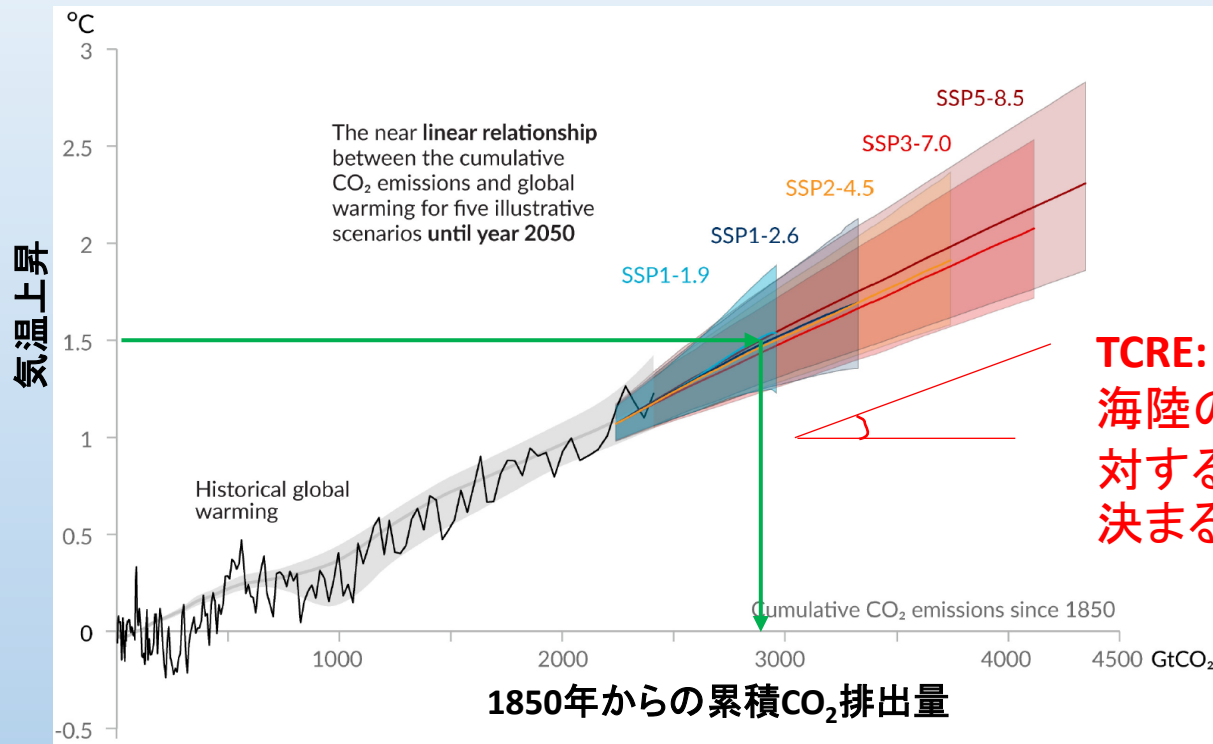
Figure 2. Long-term surface air temperature (also referred to as global-mean surface air temperature, GSAT) change under the high-emissions SSP5-8.5 scenario. a) GSAT projections from 1995 to 2300. We show the median RCM projections (coloured lines), GMST observations from (Morice et al., 2012) up to 2019 (dashed black line) and available CMIP6 model projections (thin blue lines, we show the average of all available ensemble members for each CMIP6 model); b) distribution of 2250-2300 mean GSAT from each RCM; c) very likely (whiskers), likely (box) and central (white line) 2250-2300 mean GSAT estimate from each RCM. All results are shown relative to the 1995-2014 reference period.

Nicholls et al., Earth's Future, submitted to Earth's Future

ii-a:地球-社会経済システム 相互作用 (JAMSTEC)

当初計画の要点: ESM と IAM を間歇結合した
モデルを用いた政策等の評価

累積炭素排出量と昇温は正比例： 排出分だけ、気温もあがる



TCRE: このグラフの傾き：
海陸の炭素吸収、CO₂増に
対する気候の応答によって
決まる。

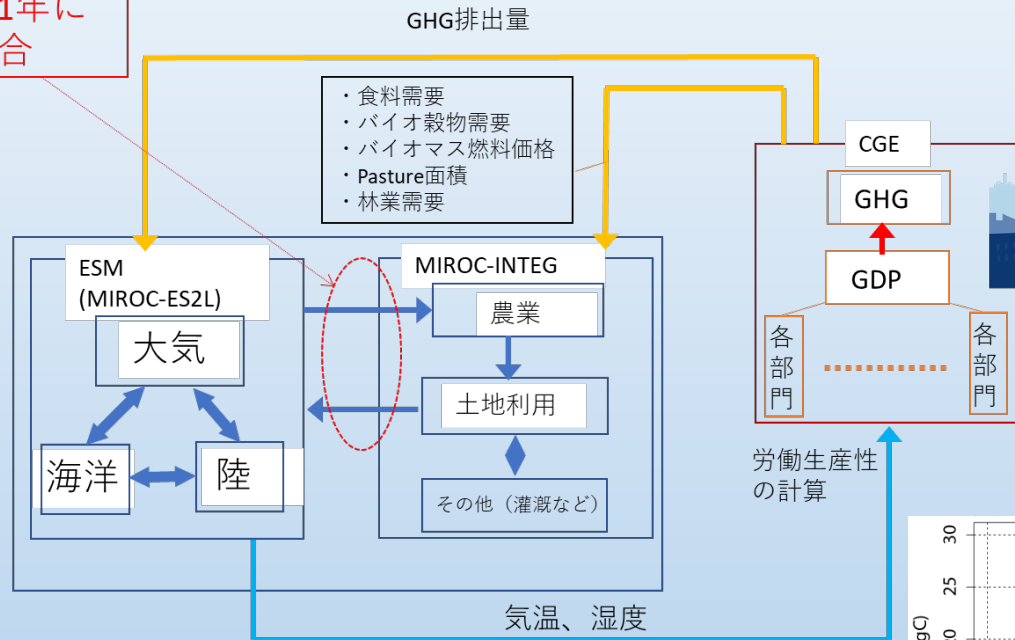
AR6, Fig.SPM10

TCRE(排出に対する過渡気候応答): 1.5°C, 2°Cといった目標達成のために、排出をどの程度までに抑える必要があるかの検討に大切な数値。

-> 統合PテーマBの成果(Tachiiri et al., 2015, 2019)などをもとに決定。

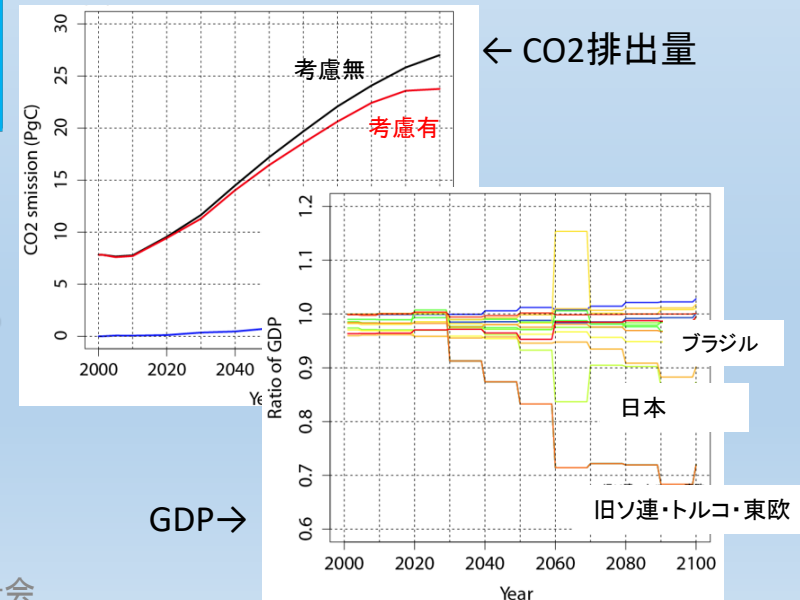
ESM—社会経済結合モデル「落成」

間歇的（1年に一回）結合



社会経済モデル、農業モデルなど人間活動を扱うコンポーネントを結合

出力例：労働生産性への温暖化影響を考慮したときのCO2排出量とGDPの違い



気候変動予測の知見を緩和策立案に反映させるための有力なツールに

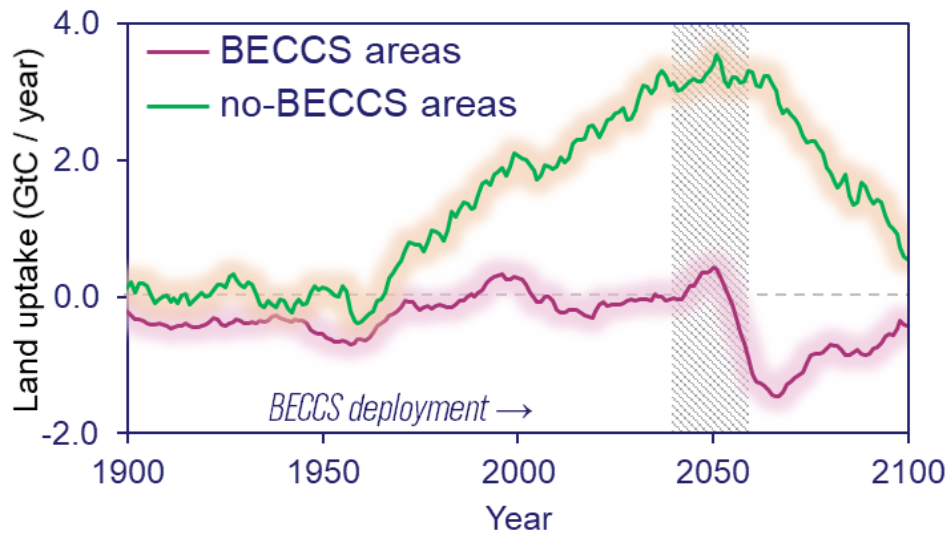
ii-b:地球システム-水資源・作物・ 土地利用モデル結合(環境研)

**当初目標要点:水資源・作物・土地利用モデルの
ESM組み込み、モデル実験**

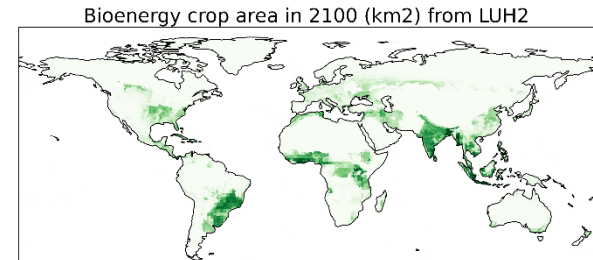


BECCS 土地利用変化が 炭素吸収を低下

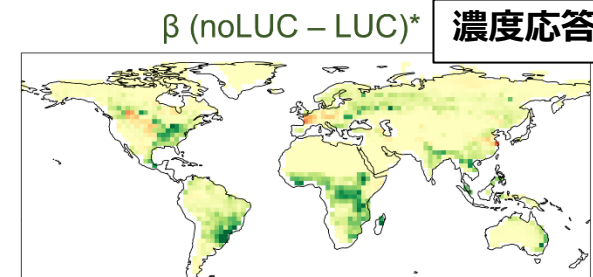
Melnikova et al. 2021, Earth Sys. Dyn. Disc.



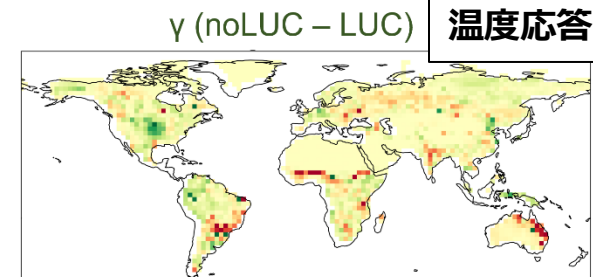
BECCS による農地の拡大によって、濃度変化あたりの炭素吸収が低下し（濃度応答）、気温変化あたりの炭素放出（温度応答）が増加する：陸域炭素吸収を低下させる



BECCS による農地面積の拡大

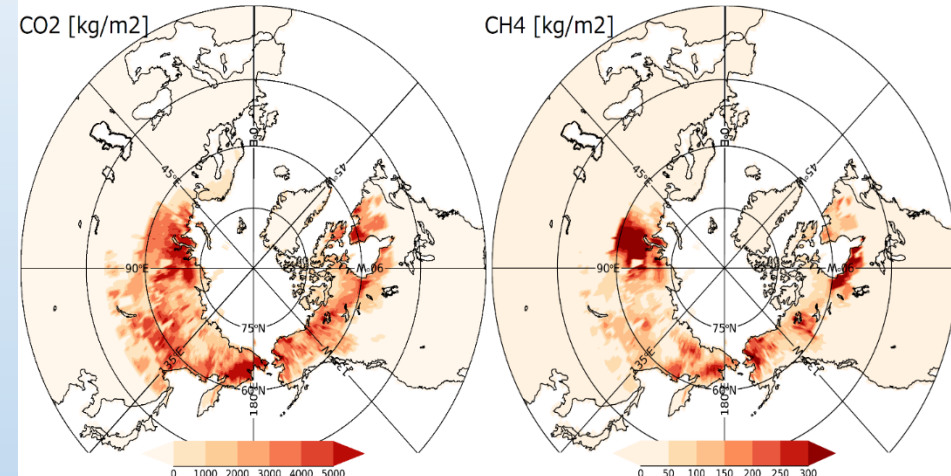
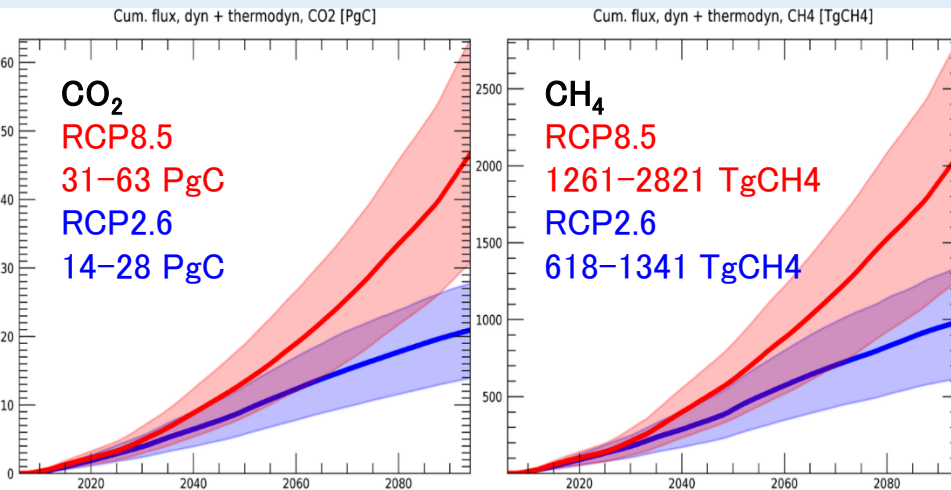


正の値 = LUCによる炭素吸収の低下



正の値 = LUCによる炭素放出の増加

温室効果ガス放出の将来予測 Yokohata et al. 2020b, PEPS



2100年までの CO₂/CH₄ 放出による気温上昇
By 簡易モデル ACC2 (Tanaka and O'Neil 2018)

RCP8.5: 0.05-0.11°C, RCP2.6: 0.03-0.07°C

Cf. 従来の研究による推定

RCP8.5: 0.05-0.14°C (Schneider von Deimling et al. 2015)

0.17-0.41 °C (Schaefer et al. 2014)

RCP2.6: 0.03-0.10 °C (Schneider von Deimling et al. 2015)

CO₂/CH₄ 積算放出量分布

GHG 排出量の高い領域 -> 土地利用管理などを行うことにより、GHG 放出の削減に貢献？

永久凍土/土壌有機物は2100年に おいても残存する -> 永久凍土融解によるGHG放出は **2100年以降も続く**

→「2°C目標」に対応するカーボンバジェットを1割程度減らしうる

i-c: ESM開発環境整備 (RIST)

**当初計画の要点：ソフトウェア基盤完成、ESM に適用
ESGF と、国内データ解析手法・システムとの連携**

統合プロでのJcup開発と応用

2017 2018 2019 2020 2021

Ver.3

Ver.4 β

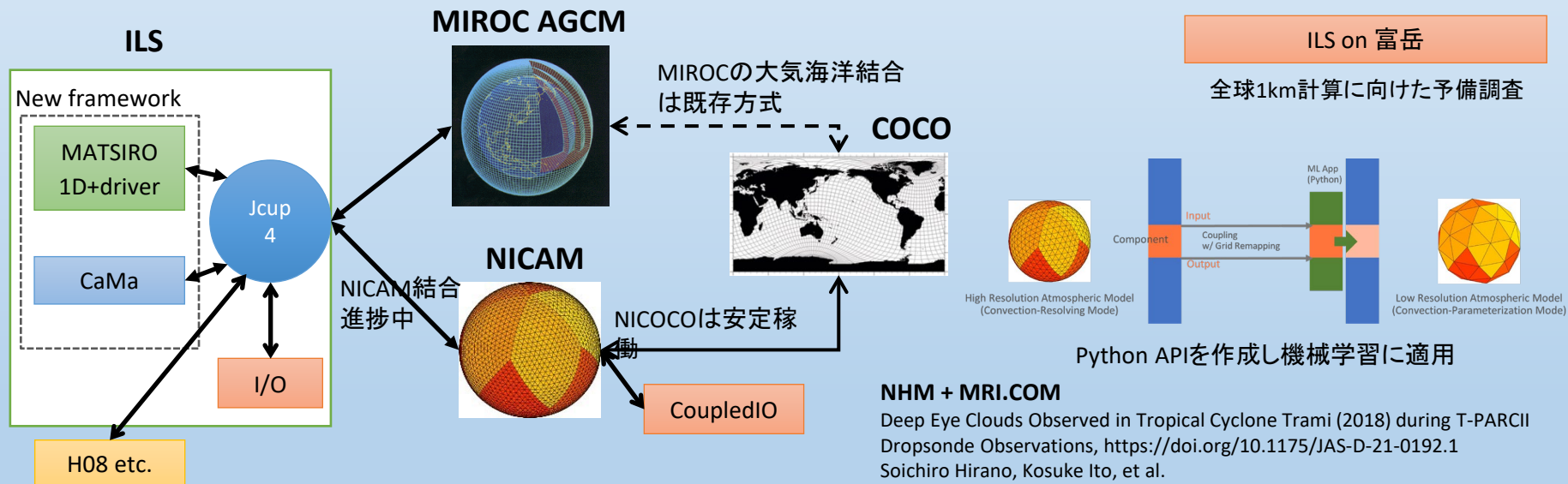
Ver.4

ΔT可変結合への対応

RMA通信の実装

ILS開発、MIROCとILSの結合(テーマA ILSチームと連携)

Ver.5

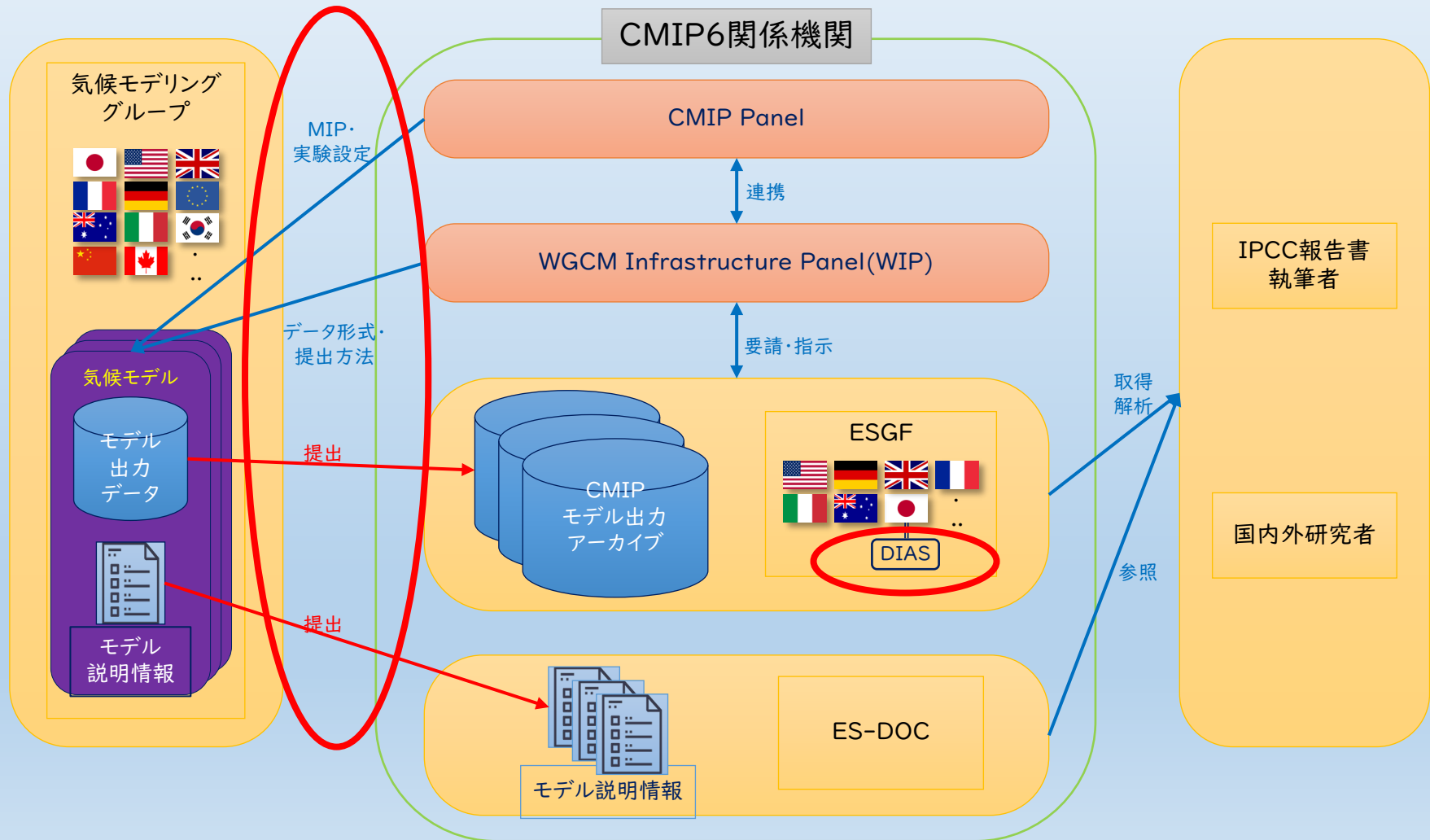


論文

Takashi Arakawa, Takahiro Inoue, Hisashi Yashiro, Masaki Satoh: Coupling library Jcup3: its philosophy and application. Prog. Earth Planet Sci. 7, 6 (2020). <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0320-z>
 Nitta, T., Arakawa, T., Hatono, M. et al.: Development of Integrated Land Simulator. Prog Earth Planet Sci 7, 68 (2020). <https://doi.org/10.1186/s40645-020-00383-7>

データ統合・解析システム(DIAS)と連携した予測データの配信

CMIP6実験データや本プログラムで創出された予測情報などを、DIASを通じて国際配信システムに提供し、国内外の研究者に展開するなど、気候変動に係る研究基盤の強化を推進している。



iii:テーマ間連携のための技術・ 事務支援 (JAMSTEC)

**当初計画の要点: ディスク配分等の研究資源配分、
イベント支援、会合アレンジ、等**

創生プログラム共有ファイルサーバシステム

統合プログラム共有ファイルサーバシステム

シミュレータ棟LAN

ネットワークスイッチ

**運用終了
(撤去済)**

ファイバーチャネルス
イッチ(8Gbps)

ストレージ装
置A
2.4PB

ストレージ装
置B
400TB

ストレージ装
置C
512TB

ストレージ
装置D
480TB

ラック移設

ファイルサーバ
(asteroid)

ファイバーチャネルス
イッチ(16Gbps)

ストレージ
装置E
800TB

ストレージ
装置G
800TB

ストレージ
装置I
200TB

ストレージ
装置J/K/L
5PB

ストレージ
装置M
1.2PB

ストレージ
装置O/P
1.5PB

テーマC専用
10000U

ストレージ
装置F
800TB

ストレージ
装置H
300TB

ストレージ
装置N
500TB

創生システム

2021/05/27 撤去

統合システム(ディスク容量:10.0PB+1.6PB)

現在(2022/01/18)

1.5PB増強²⁴

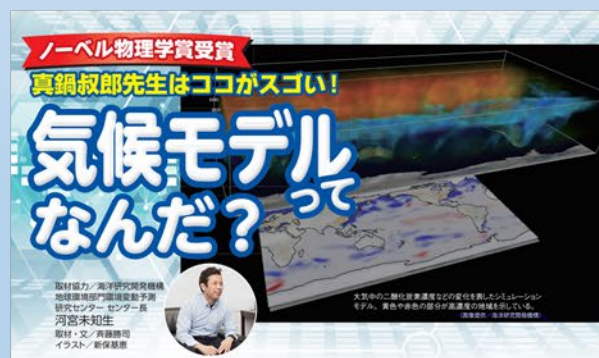
アウトリーチ：真鍋博士ノーベル賞受賞 を契機とした気候モデリング啓発活動

真鍋博士ノーベル賞受賞を受けての啓発活動

- ・ テレビ出演
 - ・ テレビ東京「ワールドビジネスサテライト」(R3/10/6放送)
 - ・ NHK「高校講座」(適宜放送)
 - ・ おはよう日本(12/7放送)
 - ・ サイエンスZERO(12/12放送)
- ・ 新聞、雑誌取材対応
 - ・ 毎日新聞(2021年10月26日)
 - ・ ガスエネルギー新聞(2021年11月22日)
 - ・ 「子供の科学」(2022年2月号)
 - ・ 日本環境アセスメント協会機関紙(2022年冬号)
- ・ 文科大臣視察対応(11月8日)



「サイエンスZERO」より



「子供の科学」より



末松文科大臣視察時の様子
統合プログラム成果報告会

達成度「星取表」

- I.-i ESM開発・応用
 - 新規導入要素・プロセス実装、実験結果解析 ○
- I.-ii マルチモデル解析による温度上昇の確率論的評価
 - CMIP6への確率論的評価適用、カーボンバジェット科学基盤更新 ○
- I.-iii ESM開発環境整備
 - ソフトウェア基盤完成、ESM に適用 ○
 - ESGF と、国内データ解析手法・システムとの連携 ○
- II.-i 地球-社会経済システム相互作用
 - ESM と IAM を間歇結合したモデルを用いた政策等の評価 ○
- II.-ii 地球システム-水資源・作物・土地利用モデル結合
 - 水資源・作物・土地利用モデルのESM組み込み、モデル実験 ○
- III. テーマ間連携のための技術・事務支援
 - ディスク配分等の研究資源配分、イベント支援、会合アレンジ、等 ○

5年間の諸活動

研究集会、検討会、イベント等

- UNFCCC SBSTA での成果報告
 - 2017年5月10日 9th Research Dialogue “Earth System Modeling to Contribute to the Paris Agreement in the Integrated Research Program for Advancing Climate Models” by T. Hajima
 - 2019年12月3日 Earth Information Day “Utilization of Earth observation data for furthering Earth system models’ validation and sophistication in Japan’s climate model development project, TOUGOU” by P. Patra
 - 2020年11月3,4日 12th Research Dialogue “Interconnections of Earth-Human systems: Visualization and projection of future climate, ecosystem, water, energy, and food” by T. Yokohata
 - 2021年6月1日 19th Research Dialogue “Findings from the Reduced Complexity Model Intercomparison Project” by J. Tsutsui
 - 2021年11月3日, Earth Information Day “Estimating and predicting global ocean and terrestrial carbon uptakes in a decadal time scale” by M. Watanabe
- JpGU2017-2021 温暖化セッション開催
 - 米GFDL(NOAA)所長 Ramaswamy 氏と共同開催
 - ESM, IAM 開発やCMIP6に関わる海外著名研究者を毎年招待
- 広報素材制作
 - アニメーション、ブローシャ
- 他に、メディアフォーラム、公開シンポジウム、成果報告会の開催支援など



SBSTAでの話題提供例:炭素循環同化予測を通したAB連携の推進

- ・同化による、精緻な10年規模炭素予測のためのシステム開発

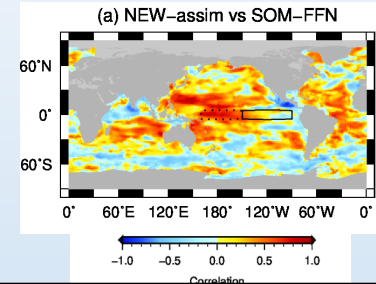
同化実験における海面CO₂フラックスのふるまいについて、先行する欧州のグループより良好な結果 (Watanabe et al., 2020)

削減努力の可視化などの観点で、2023年や、以降のグローバル・ストックテイクに有用な知見を与える可能性。

1. 同化スキーム + MIROC-ES2L 開発

Watanabe et al. 2020 OS

大気海洋CO₂フラックス
同化実験vs観測

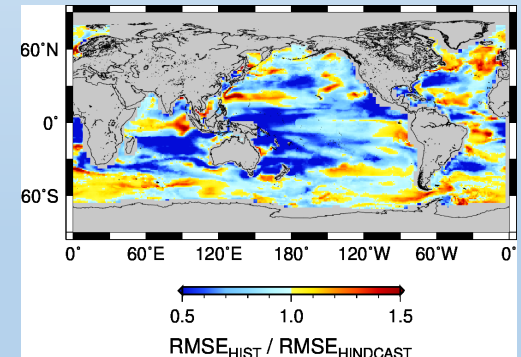
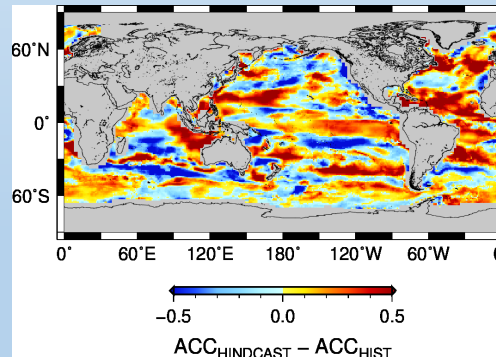


2. 予測実験の実行と解析

$$\text{CO}_2\text{F} = \text{Kw}(\text{pCO}_2^{\text{sea}} - \text{pCO}_2^{\text{air}})(1 - \text{SIC}),$$

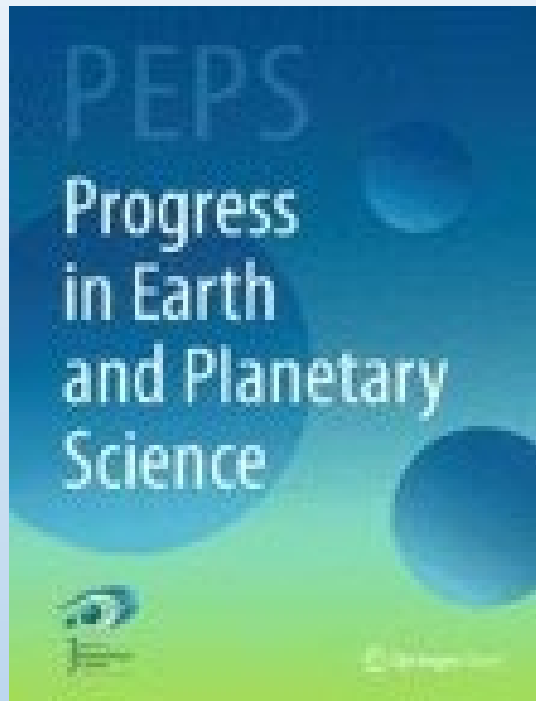
Kw(wind speed, solubility, Schmidt num.)

$(\text{pCO}_2^{\text{sea}} - \text{pCO}_2^{\text{air}})$ vs SOM-FFN

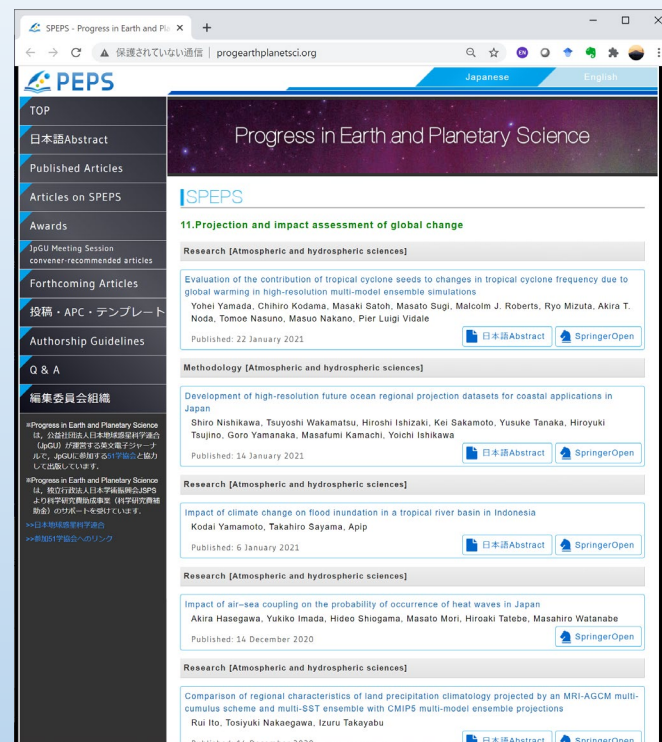


初期値化あり／なし実験での、ACCの差(RMSEの比)

PEPS統合P特集号



IF = 3.604



http://progearthplanetsci.org/speps_j/011.html

PEPS特集号

27編、総ページ数約400

d4PDF総説論文など、統合Pの代表的成果をまとめる

1編あたり平均被引用数 4.44(2022年1月7日現在)

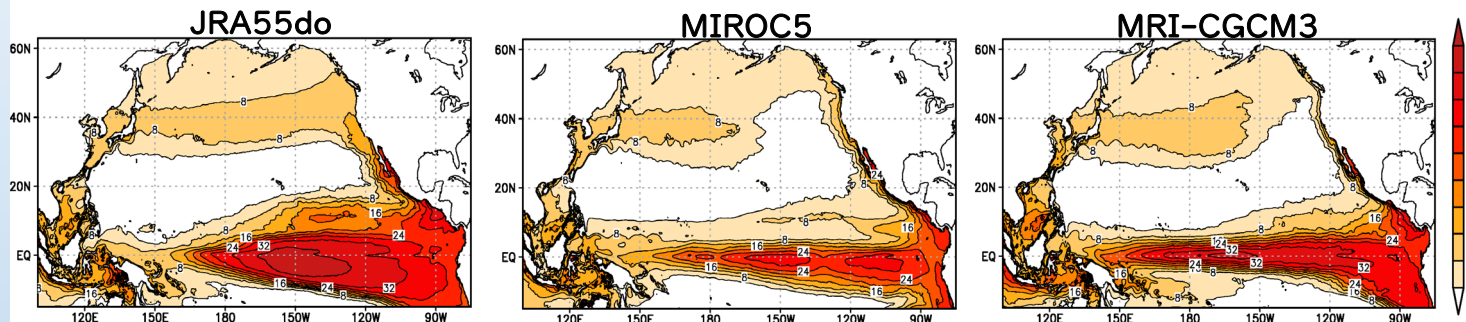
海洋生態系データ創出に関するBC連携推進



3つのフォーシングデータによる再現性の比較

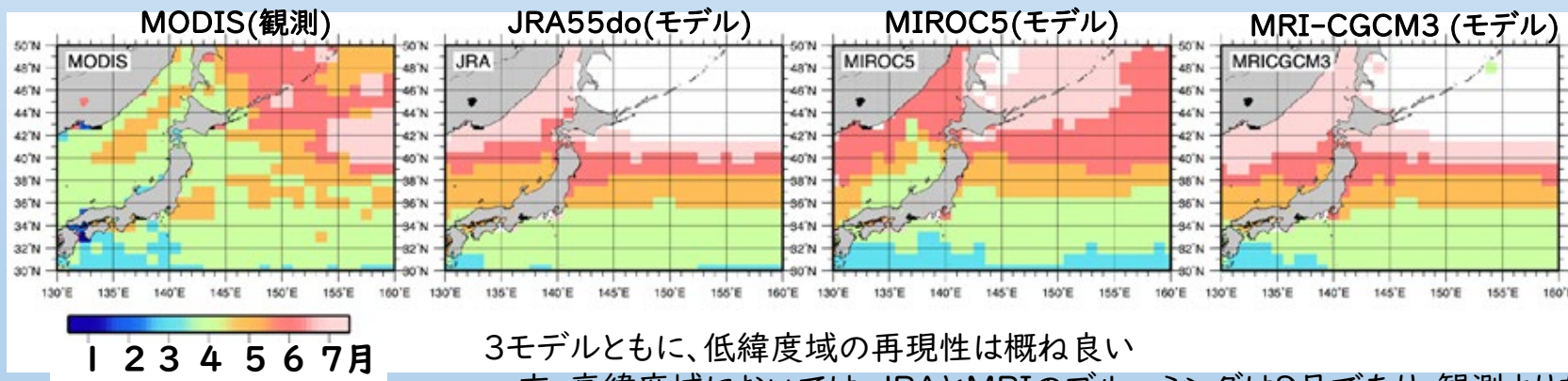
資料提供: 西川史朗さん
西川悠さん

基礎生産量 年平均値 (NPP, mol/m²/yr)



いずれのモデルも空間パターンを良く捉えている。MIROC5の赤道域の結果は観測値に概ね一致している。

春季ブルーミングのタイミング



3モデルともに、低緯度域の再現性は概ね良い

一方、高緯度域においては、JRAとMRIのブルーミングは8月であり、観測よりも一カ月遅い
日本海については、いずれのモデルも1か月程度遅い傾向

論文成果、IPCC, UNFCCC貢献等

年度/研究成果	論文発表	論文投稿中	学会発表	広報活動・ 記者発表	受賞等	著書等	開発したモ デル	海外機関等 の連携	国内での 連携	外国人招聘	計
平成29年度	18	0	41	7	2	0	7	0	2	0	77
平成30年度	20	4	61	26	2	1	2	3	2	1	122
平成31／令和1年度	23	22	69	14	2	2	1	3	2	2	140
令和2年度	51	0	55	14	1	2	1	4	1	0	129
令和3年度	28	3	47	28	0	0	0	1	0	0	107
計	140	29	273	89	7	5				3	

(開発モデル等は年度をまたいだ重複があるため通年で合算せず)

• IPCC WGI AR6 での引用論文数

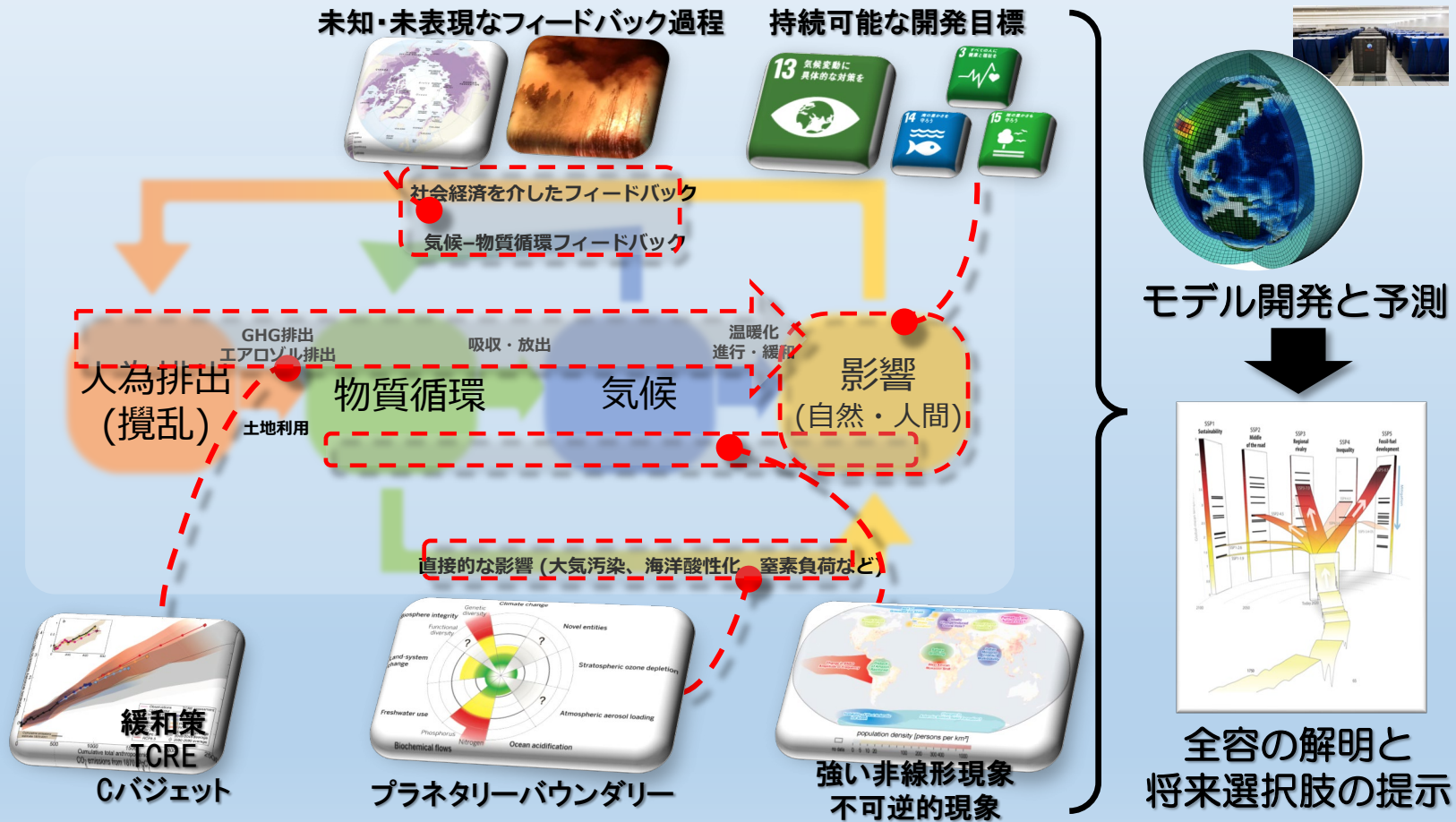
- テーマA, B 合計で465編
- 参考: 全引用論文数14000以上

• 代表・貢献執筆者、タスクグループメンバー、日本代表団メンバーなど輩出



第48回IPCC総会
(2018年、仁川) での
コンタクトグループの
様子

地球システムモデルの今後の発展



5年間の総括

- カーボンバジェット評価高精度化
 - 「ゼロ排出コミットメント」評価、TCR, ECS評価の高精度化など
 - IPCC WGI AR6 貢献執筆者として関連部分を執筆
- 地球システムモデル高度化: 緩和策推進への貢献
 - CMIP6論文成果多数、IPCC AR6にも貢献、Top0.1%論文も
 - メタン、N₂OなどのGHGs放出過程導入 → 低排出シナリオ評価
 - 人間活動を含むモジュールとの結合 → LHAなどでも重要視
- 炭素循環10年規模予測システム: プロトタイプ構築
 - 形成されつつある国際コミュニティにも積極参加
- ティッピング現象の検討
 - 南極氷床棚氷融解のシナリオ依存性
 - 永久凍土からのCO₂, CH₄放出
- 国際的データ配信体制の確立、結合ソフトウェア基盤構築
- 影響評価データセットへの貢献(海洋低次生態系)