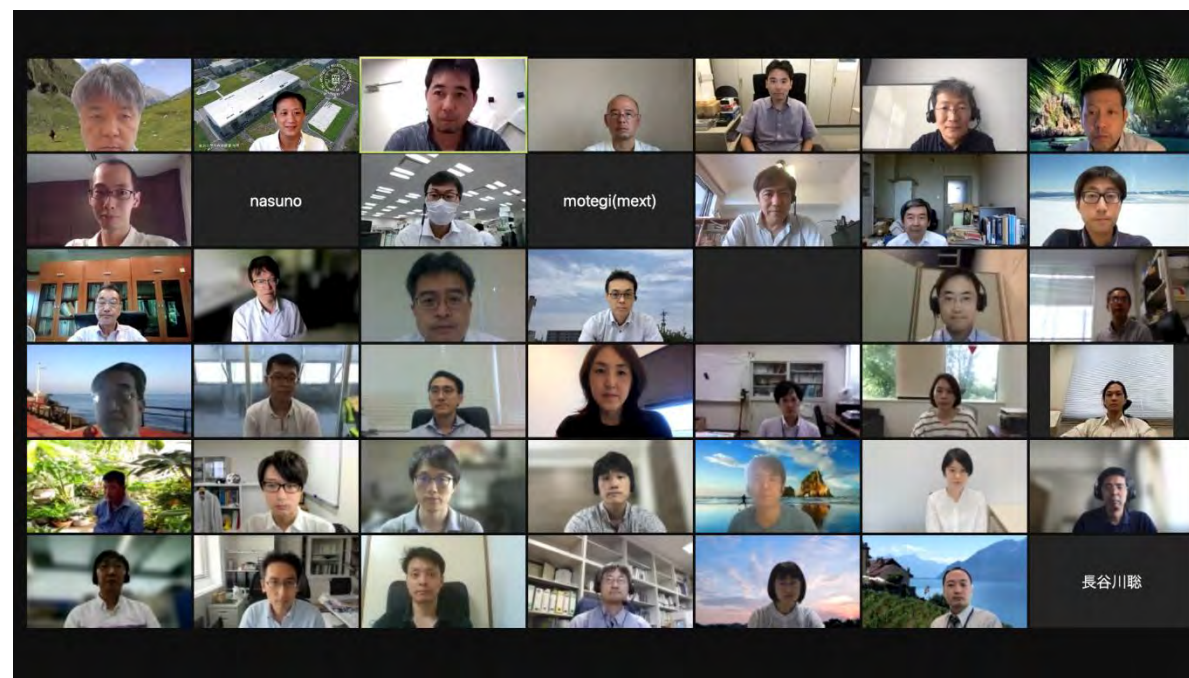


領域テーマA「全球規模の気候変動予測と基盤的モデル開発」



渡部雅浩
東京大学大気海洋研究所

領域テーマ A 「全球規模の気候変動予測と基盤的モデル開発」 (代表：渡部雅浩(東大AORI))

課題構成

CMIP6/IPCC貢献/モデル開発

- (i)-a 近未来予測とCMIP6実験推進 (建部課題)
- (i)-b 物理プロセスの高度化による気候モデル開発 (鈴木課題)
- (i)-c 陸面・河川モデル高度化 (芳村課題)

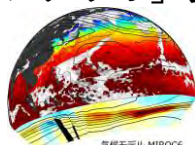
過去から将来の気候変化に対する確かな科学的知見

- (ii)-a 気候フィードバック・気候感度(ECS) (小倉課題)
- (ii)-b 気候変動メカニズム・異常気象要因分析 (今田課題)
- (ii)-c 雲・降水・循環過程の理解 (野田課題)

CMIP6実験の推進
近未来気候変動予測



日本版「気候シナリオ」貢献
IPCC AR6貢献



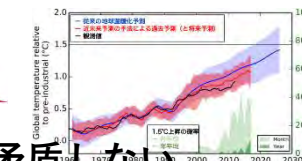
気候モデル MIROC6

「社会に開かれた」
温暖化サイエンス

全球気候モデル開発 = 我が国独自の基盤技術
温暖化のプロセス理解
グローバルストックテイクに資するデータ創出

極端気象の要因・将来変化
1.5°C/2°C温暖化の影響評価

気候感度の制約



過去から将来の矛盾しない
気候変化メカニズム解明



テーマAの活動

国際コミュニティの動き

国内気象災害等

2017

統合プロ開始！

CFMIP会合主催(東京)
HESSS4会合主催(東京)

CMIP6実験開始！

平成29年7月
九州北部豪雨

2018

温暖化メディアフォーラム

IPCC AR6執筆開始

平成30年7月豪雨
平成30年7月猛暑

2019

統合国際ワークショップ(ハワイ)
第1回気候モデルコンソーシアム

台風15号、19号

2020

第2回気候モデルコンソーシアム

CMIP6実験終了

令和2年7月豪雨

2021

日本の気候変動2020公開
ES3からES4へ

IPCC WGI AR6公開！

2020/2021大雪

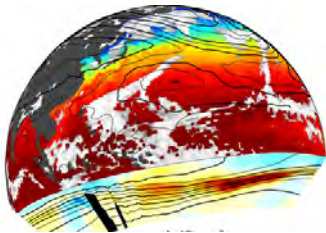
真鍋さんノーベル物理学賞受賞
COP26

令和3年8月豪雨

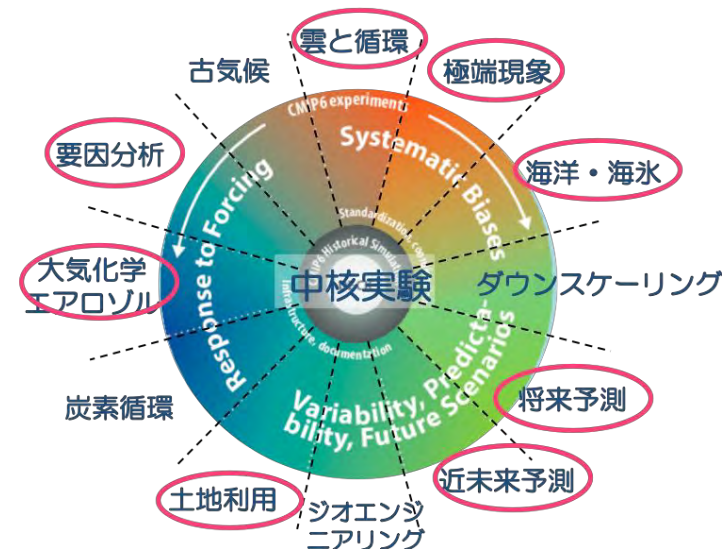
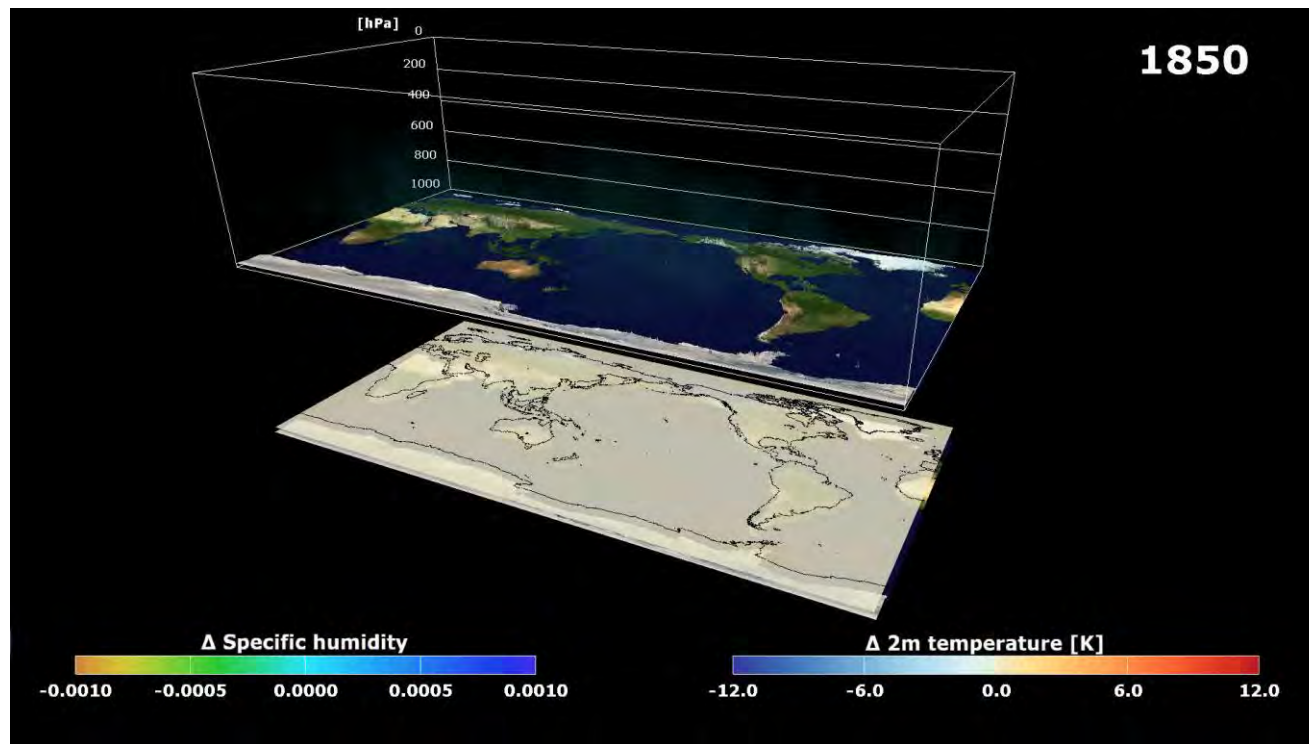
統合プロ終了

CMIP6実験の実施

気候モデル MIROC6



地球シミュレータ活用



■ CMIP6実験を約2年かけて完遂、DIASから国内外研究者に向けてデータ配信開始

- ✓ 実験基盤の整備と実施、データ変換、転送、データ配信に至るまでのフローを構築
- ✓ 世界でもいち早くESGFからデータ公開(38機関中4番目)。国内外研究機関で多岐にわたり活用
- ✓ MIROC6モデル記述論文(Tatebe et al. 2019 GMD)はWoS 被引用上位1%論文に認定

IPCC WGI AR6 — 誰が書いたか —

章	日本人参加者	役割	統合プロ
1章 構成、背景、手法	江守正多 (国立環境研究所)	執筆者	評価委員
1章 構成、背景、手法	安成哲三 (総合地球環境学研究所)	査読編集者	
3章 人間が気候システムに及ぼす影響	小坂優 (東京大学)	執筆者	テーマA
4章 将来の世界の気候	木本昌秀 (国立環境研究所)	査読編集者	PO
5章 地球規模の炭素/生物地球化学的循環	石井雅男 (気象研究所)	執筆者	
5章 地球規模の炭素/生物地球化学的循環	Patra Prabir K. (海洋研究開発機構)	執筆者	テーマB
6章 短寿命気候強制因子	金谷有剛 (海洋研究開発機構)	査読編集者	
7章 エネルギー収支・フィードバック・気候感度	渡部雅浩 (東京大学)	執筆者	テーマA
10章 世界規模と地域規模の気候変化	高薮出 (気象研究所)	執筆者	テーマC
11章 気象及び気候の極端現象	佐藤正樹 (東京大学)	執筆者	テーマA

- 日本からは10名 (執筆者7名、査読編集者3名)
- およそ全体をカバーはしたが、2,8,9,12章に日本人関係者がいないのが残念
- AR6 LA/RE以外でもTG Data (河宮), FactSheet (高薮, 小坂)、CA (多数) がIPCCに貢献



AR6で分かったことーSPMからー

Improved knowledge of climate processes, paleoclimate evidence and the response of the climate system to increasing radiative forcing gives a best estimate of equilibrium climate sensitivity of 3°C with a narrower range compared to AR5.

気候プロセス、古気候、および放射強制に対する気候システムの応答に関する理解が進んだ結果、平衡気候感度の最良推定値は3°Cと評価され、その推定幅はAR5よりも狭まった。

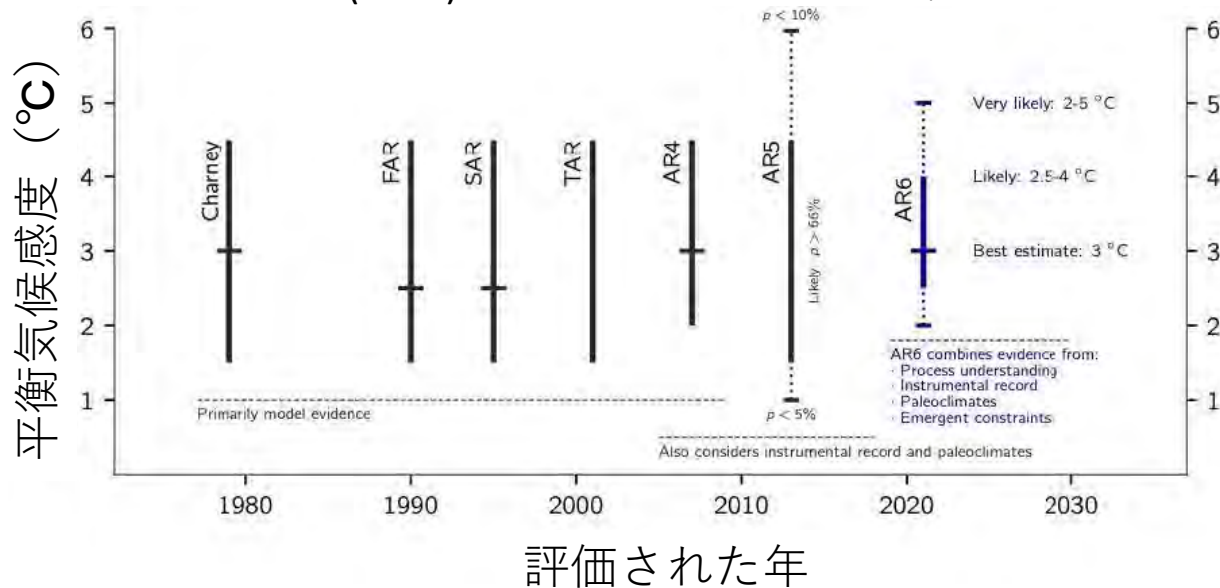
気候感度の66%幅ー
 ・ AR5: 1.5~4.5°C
 ・ AR6: 2.5~4°C (半減)
 ⇒ TCREの推定も確実性を増した



最初期の平衡気候感度推定は真鍋さんの気候モデルによるもの！

そこから40年。。

最初期(1979)からAR6までの気候感度推定値



国際研究グループによる気候感度再評価(Sherwood et al. 2020 Rev Geophys)が重要な役割を果たした

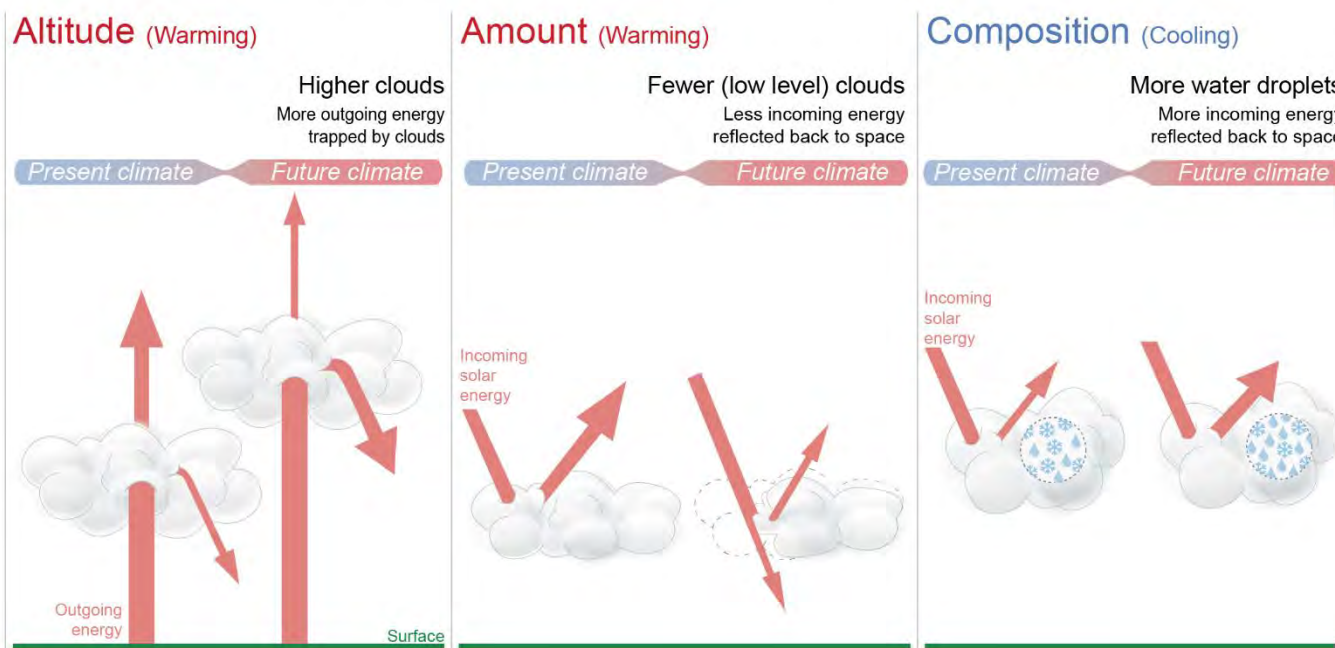


AR6で分かったことーSPMからー

温暖化時に雲が果たす役割についての理解が大きくすすんだ。雲は、**正味で温暖化を促進する**（不確実性は半減した）

雲の高度が上昇（+） 雲被覆率が減少（+） 氷雲が水雲に（-）

Clouds affect and are affected by climate change. Overall, scientists expect clouds to **amplify future warming**.



**MIROC, NICAMを用いた雲
フィードバック・雲プロ
セスの研究成果が貢献**

Ch7 FAQ7.2 Fig 1

AR6で分かったことーSPMからー

Human-induced climate change is already affecting many weather and climate extremes in every region across the globe. Evidence of observed changes in extremes such as heatwaves, heavy precipitation, droughts, and tropical cyclones, and, in particular, their attribution to human influence, has strengthened since AR5.

人間活動が引き起こす気候変化は、既に世界の全地域の極端気象（熱波、豪雨、干ばつ、熱帯低気圧など）に影響している。

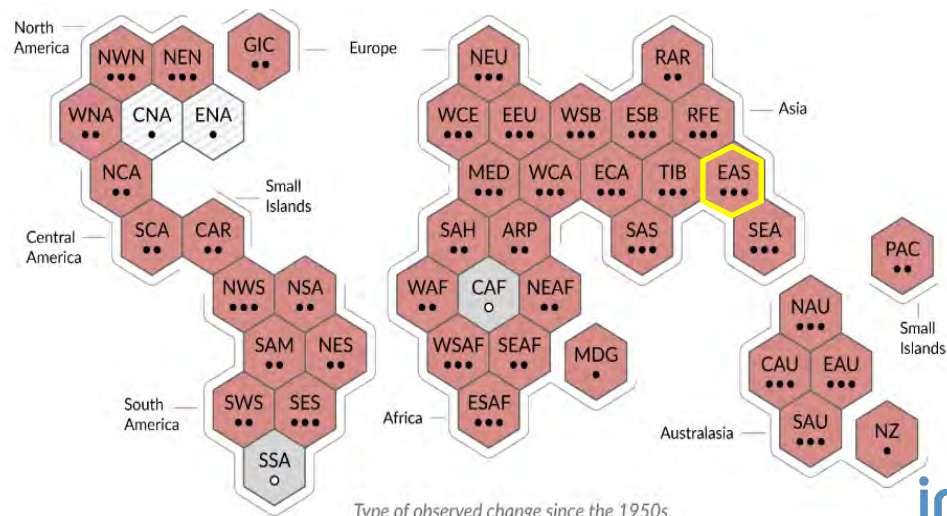
⇒ 統合で実施した個々の異常気象に対する温暖化の寄与推定（イベント・アトリビューション、EA）研究の成果が多く反映されている

2018日本の熱波に対するEA研究

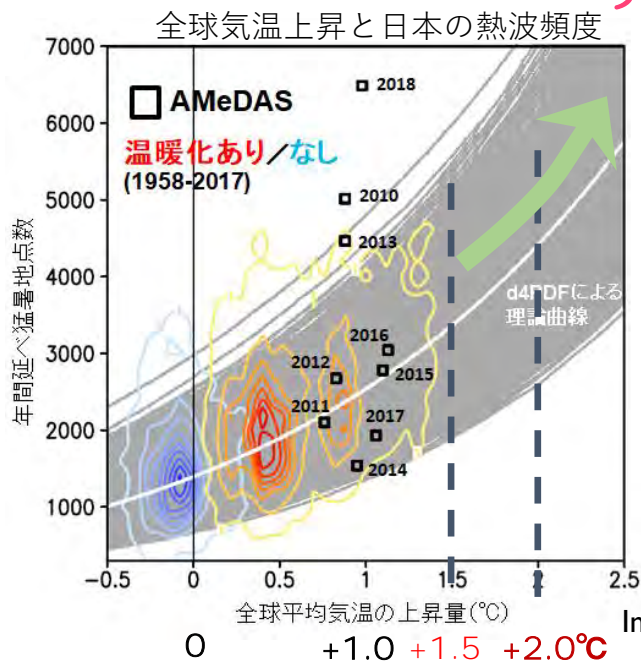
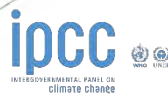
テーマAC連携



観測された高温事象に対する人間活動の影響



SPM Fig 3



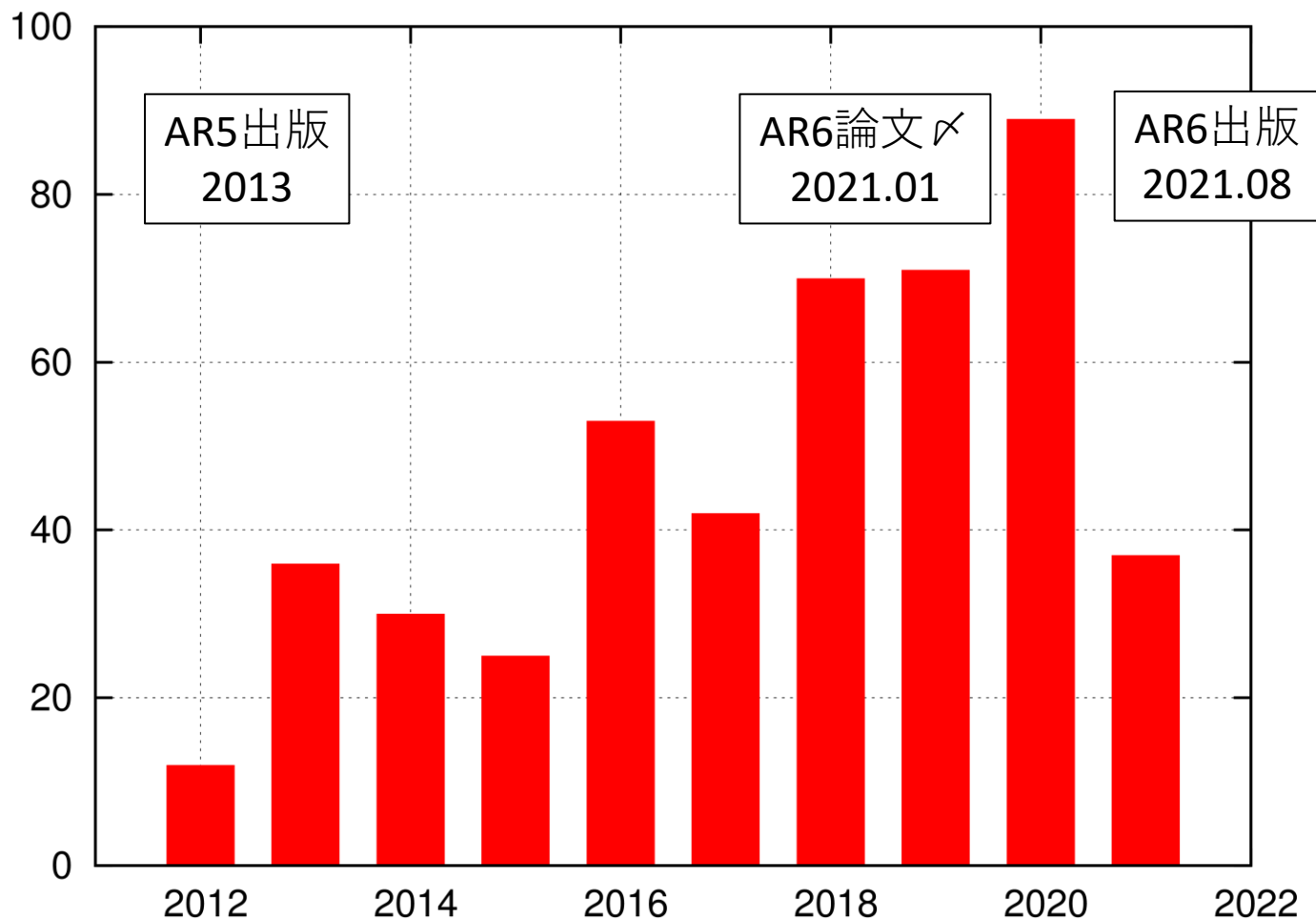
Imada et al. (2019 SOLA)

統合プログラムテーマA+BのAR6への貢献

引用論文数推移

2012	12	156	創生
2013	36		
2014	30		
2015	25		
2016	53		
2017	42	309	統合
2018	70		
2019	71		
2020	89		
2021	37		

計**465**編



創生プログラム

統合プログラム



統合5年間の成果まとめ

	2017	2018	2019	2020	2021
学術論文	52	75	80	90	78
学会発表	96	150	109	59	85
著作物	5	10	8	11	10
メディア等	20	34	45	60	138
プレスリリース	2	5	3	6	11
受賞	3	6	8	9	7

その他、特筆事項

- 海外研究機関・プロジェクトとの連携多数 (>40件)
- High-impactジャーナルに論文多数掲載
- 国際会議主催、その他セッション主催・共催多数

**今年度後半にも大きな成果 (Science, Nature, Nature Clim Change, Nature Comm, Sci Rep) が
出ています**



統合的気候モデル高度化研究プログラム 化研究プログラム
Integrated Research Program for Advancing Climate Models (TOUGOU) ing Climate Models (TOUGOU)

以下、各課題のまとめ

領域課題(i) 地球環境変動予測の向上に資する気候モデル高度化 サブ課題(a)

近未来気候変動予測とCMIP6実験の推進 (代表 建部洋晶、JAMSTEC)

■ CMIP6対応：ESGFでのデータ公開に向けた実験実施・支援と進行調整

- ・ Endorsed MIPのデータ変換と提出段取り・研究基盤の整備・拡張

■ 大規模アンサンブルデータ/CMIP6 Endorsed MIPsデータの活用

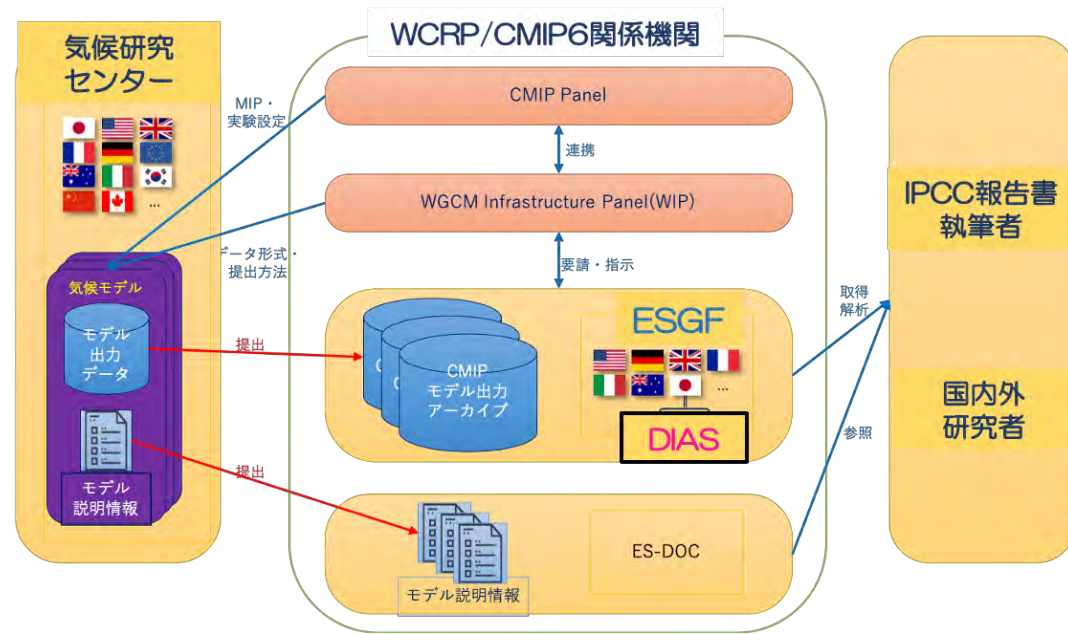
■ 季節から数年規模気候変動予測と初期値化システム開発

- ・ MIROC6を用いた初期値化近未来気候変動予測 (国際連携研究)
- ・ 地球システムモデルを用いた初期値化炭素循環予測 (テーマB連携)

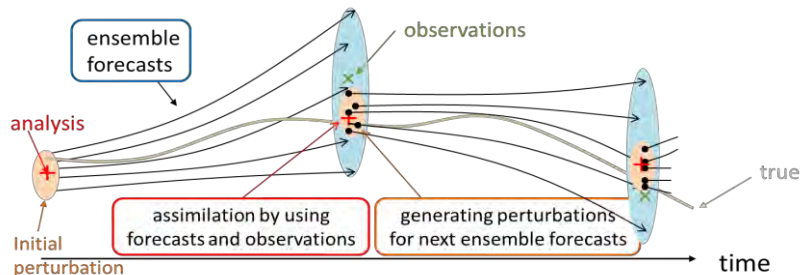
■ 主に海洋過程からの気候モデル高度化 (課題i(b)、ii(a)との連携)

■ 理論・メカニズム研究

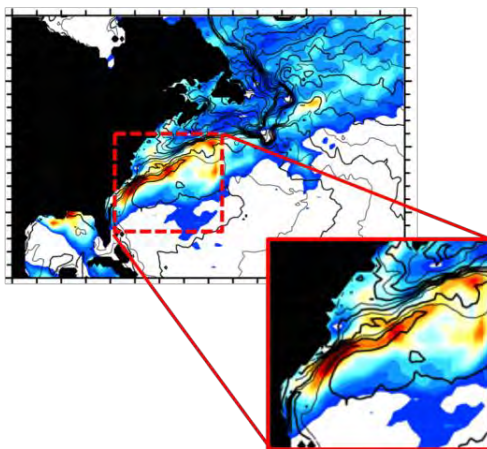
実験遂行からデータ提供に至るフローチャート



同化システム開発



海洋モデル高度化



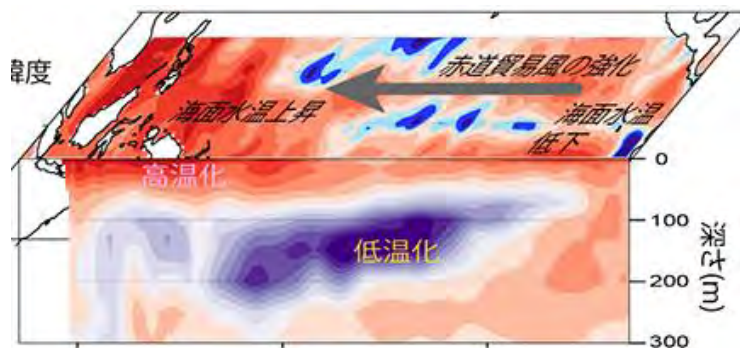
モデルグループ
(われわれ)

CMIP統括・
データ基盤
コミュニティ

ユーザー

大規模アンサンブルデータ/CMIP6 Endorsed MIPsデータの活用

20世紀中盤以降の熱帯太平洋海面水温長期変化傾向の要因分析 Watanabe et al. (2020, Nature Climate Change)

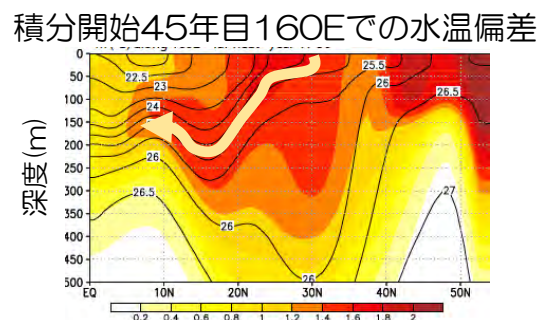
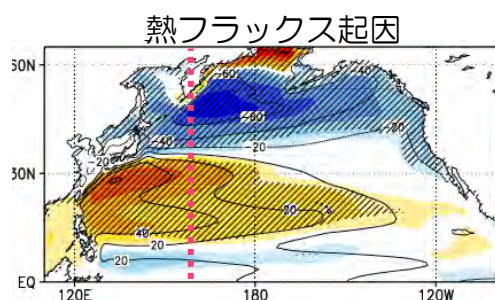
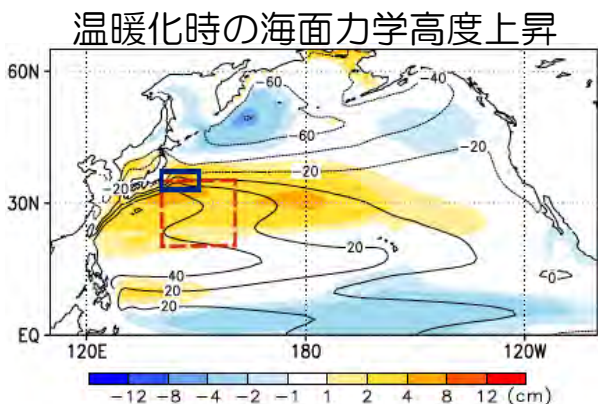


Enhanced warming constrained by past trends in equatorial Pacific sea surface temperature gradient

- ✓ 大気テレコネクションを介し、全球気候へ影響
- ✓ 気候モデルの信頼性・予測不確実性に直結。気候感度の推定にも関連

- 大規模アンサンブルは観測値を包含
- 観測されたトレンドが自然変動で生じ得ることを示唆
- 過去のトレンドを再現しているモデルでは近未来の昇温が増幅

北太平洋西部亜熱帯海域における将来的な海水位上昇の要因分析 Suzuki & Tatebe (2020, PEPS)



- 冬季混合層発達海域で吸収された熱が海洋循環に輸送されて生じる海水膨張が、海水位上昇へ最も寄与
- 海洋循環の気候場と海水位変化不確実性との関連を指摘

近未来気候変動気候予測から地球システム予測へ

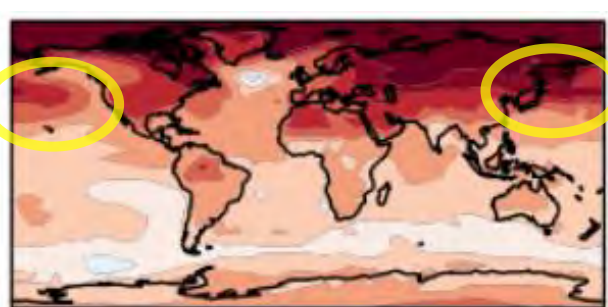
革新プロから継続してきたデータ同化システム開発および
近未来気候変動予測研究は国際連携によるオペレーションへ



WMO Global Annual to Decadal Climate Update

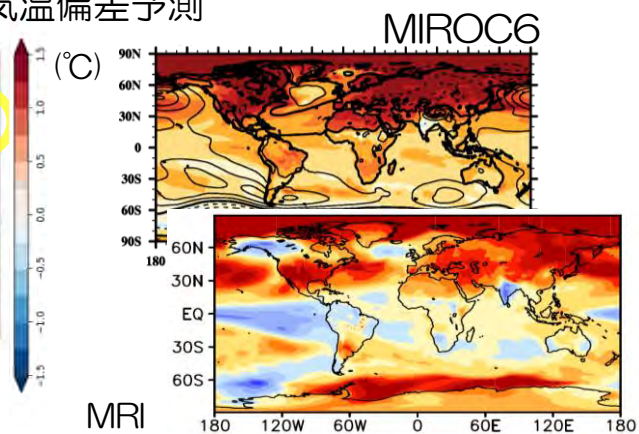
https://hadleyserver.metoffice.gov.uk/wmolc/WMO_GADCU_2020.pdf

複数モデルでの2021~25年地表面気温偏差予測



(1981-2010年基準)

(Hermanson et al., submitted)



- 「最新初期値予測」：数年先までの気候変動予測情報提供
- 今後5年間、北太平洋中緯度の昇温傾向 (Kataoka et al., 2020 JAMES)

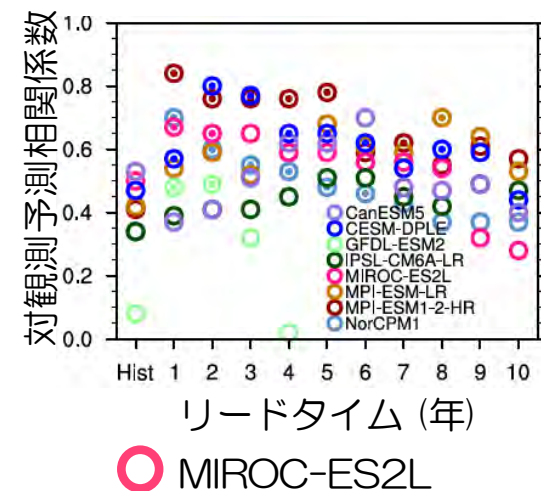
地球システムモデルを活用した「炭素循環予測」 (テーマBとの連携)

地球システム予測のマルチモデル比較へ貢献

(Ilyina et al., 2021 GRL)



大気海洋間CO2フラックス



- 再解析実験に加え、予測精度も中位から上位に位置する (陸域除く)
- 完全モデル実験を実施中 (予測可能性研究)

気候モデル高度化による気候変動メカニズム研究

(Kohyama et al., 2021 Science)

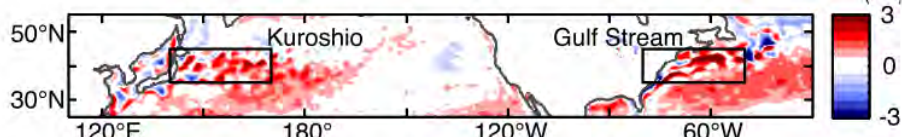
Science

The Gulf Stream and Kuroshio Current are synchronized

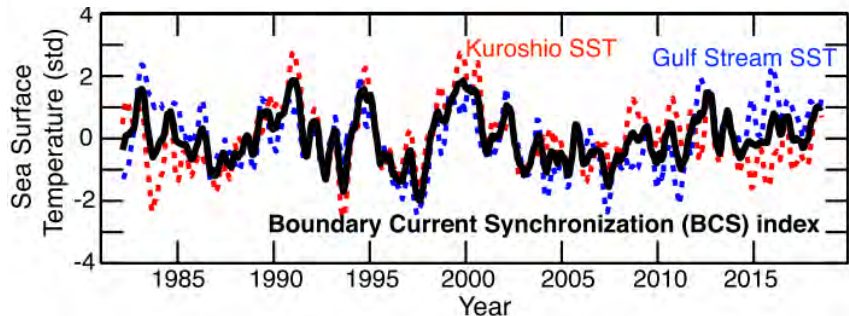
Tsubasa Kohyama^{1*}, Yoko Yamagami², Hiroaki Miura³, Shoichiro Kido⁴, Hiroaki Tatebe⁵, Masahiro Watanabe²

- 境界流同期変動現象の発見 (Boundary Current Synchronization; BCS)
- 日経、毎日新聞をはじめ、多くのメディアで話題

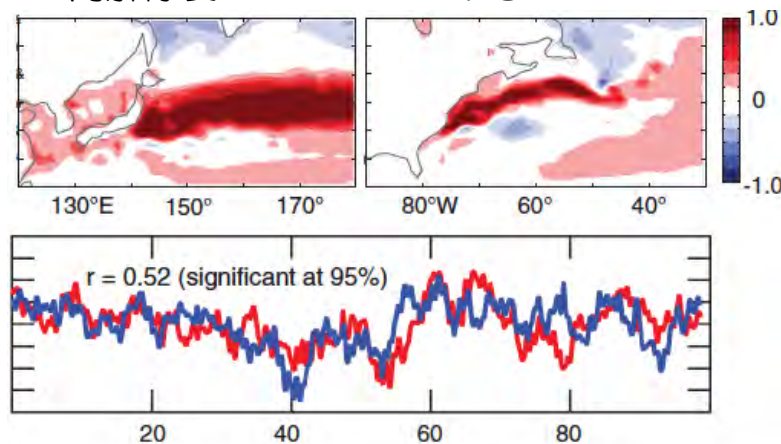
2018年に観測されたSST偏差



観測データでのSST, BCS時系列



高解像度MIROC6におけるBCS



- BCSは海洋高分解能の高解像度MIROC6とGFDLモデルでのみ再現。海盆間相互作用の一種
- 偏西風南北移動と不可分であり、大気下層から上層まで強いシグナルが存在
- BCSと類似の気温パターンはしばしば観測。都市圏熱波への影響。予測研究への応用?

領域課題(i) 地球環境変動予測の向上に資する気候モデル高度化 サブ課題(b)

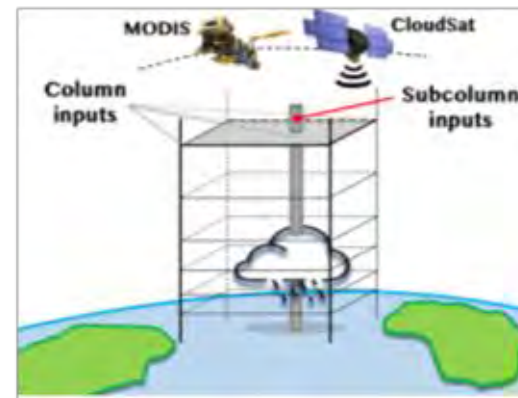
物理プロセスの高度化による気候モデル開発 (代表 鈴木健太郎、東京大学大気海洋研究所)

■ 衛星データ活用による気候モデルプロセス解明

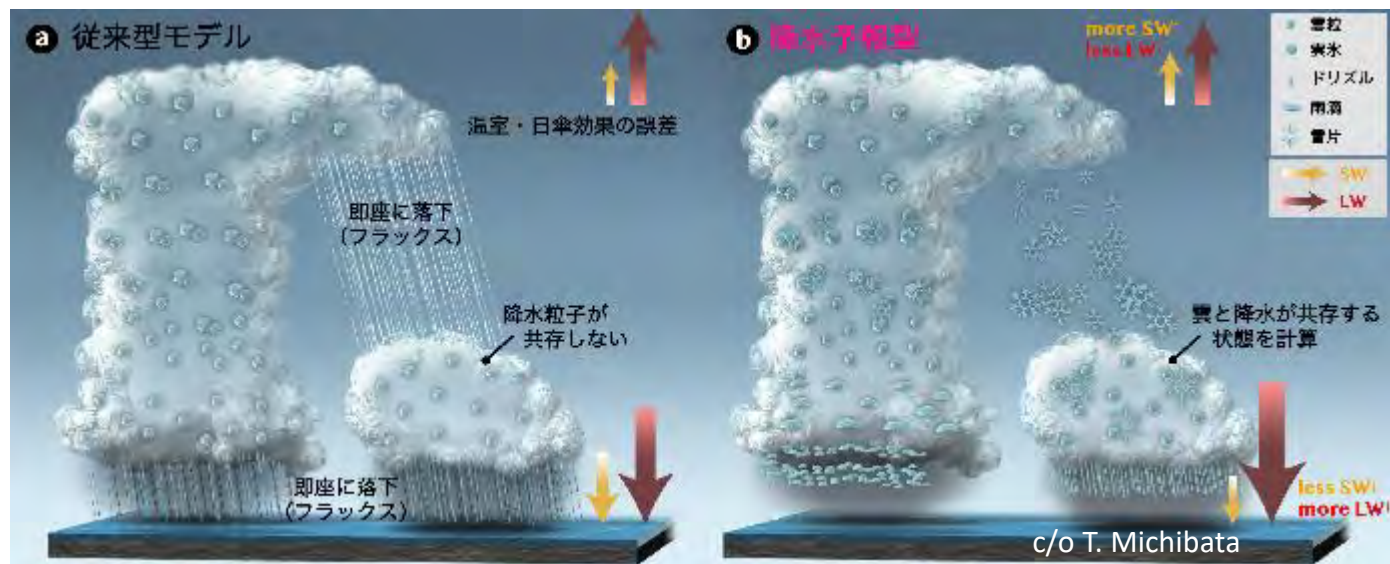
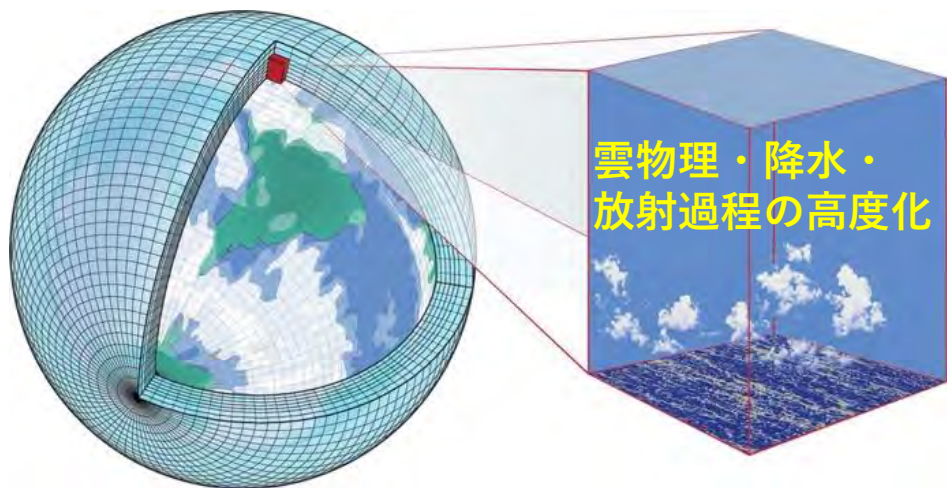
- NASA A-Trainとの比較から雲・降水過程の系統誤差を同定、エネルギー収支に対する誤差補償を明らかにした

■ MIROC6大気物理過程高度化

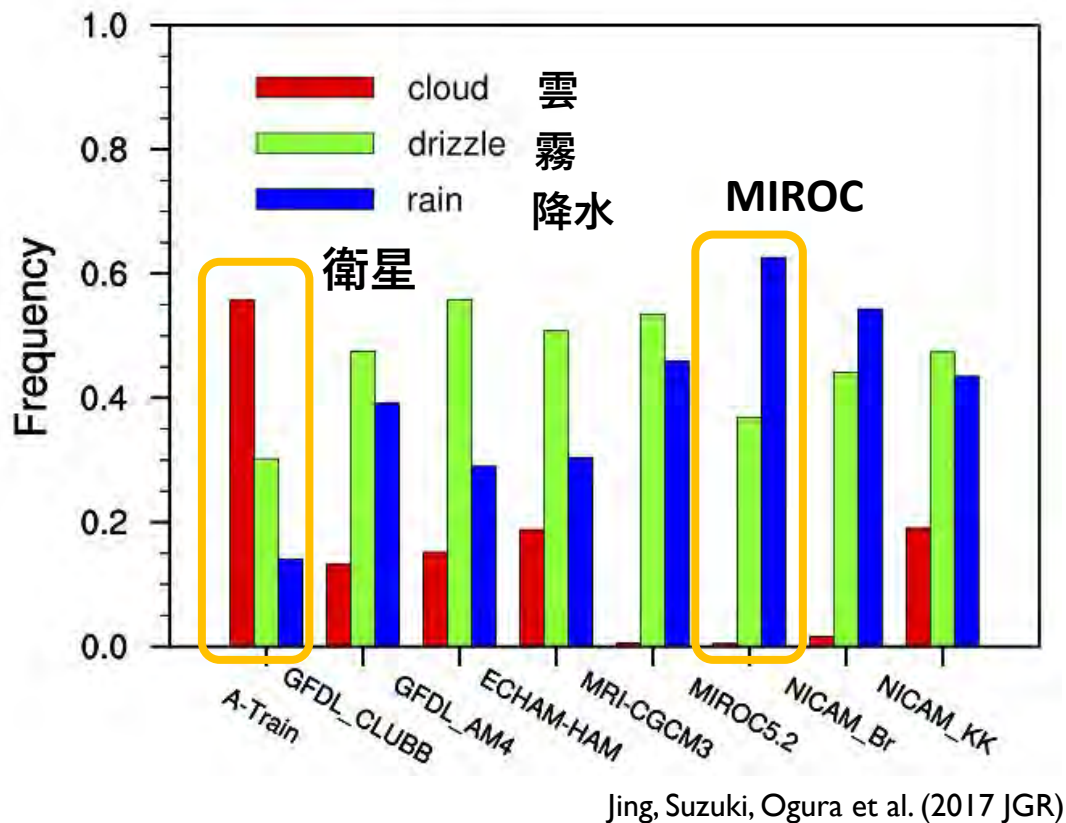
- 統合的雲物理・放射スキームの開発を通じて、雲・降水の系統誤差とエネルギー収支との誤差補償を軽減 (i-aとの連携)
- ポストAR6に向けた、大気物理過程の理解およびモデル高度化がもたらすマクロな気候への影響評価 (ii-aとの連携)



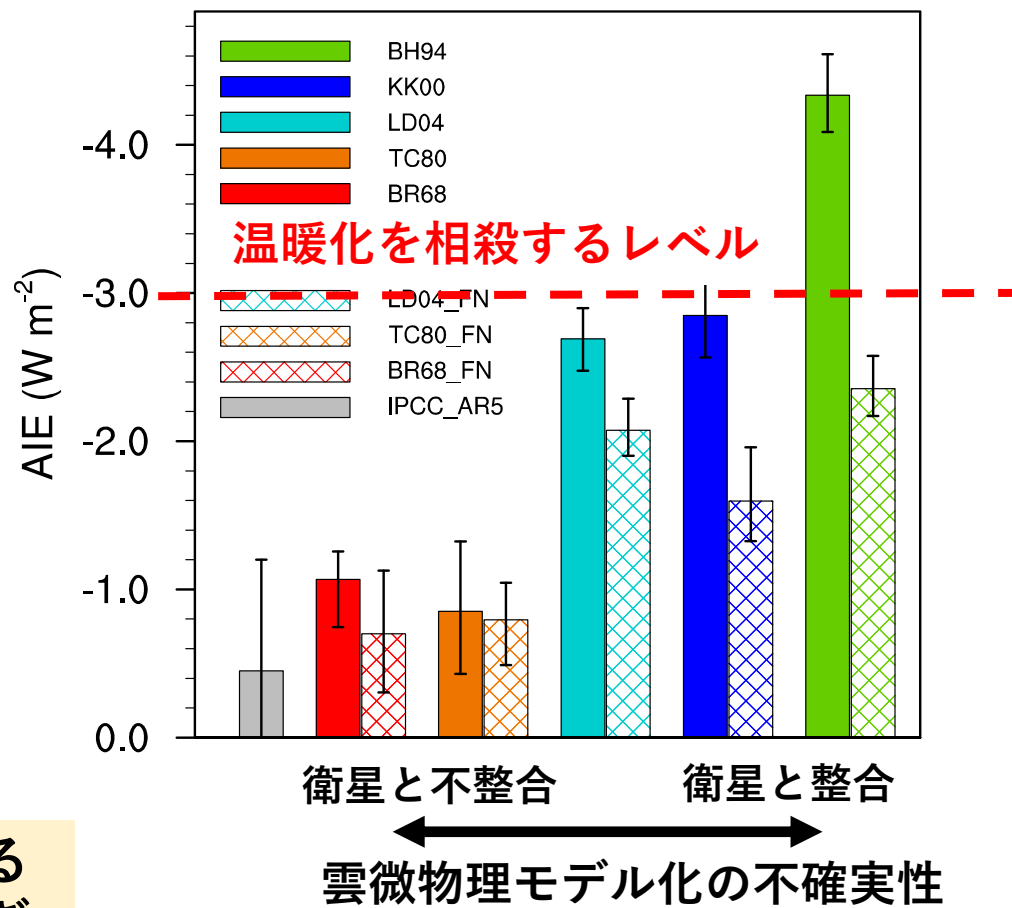
「降水予報型スキーム」の開発



降雨プロセスの系統バイアスとエネルギー収支への影響



地球の“白さ”変化への影響 (MIROC)



- 多くのモデルは衛星観測に比べて、降雨生成が早すぎる
- その単純な補正はエアロゾル・雲による冷却を強めすぎる: 誤差補償

雲・降水表現の高度化

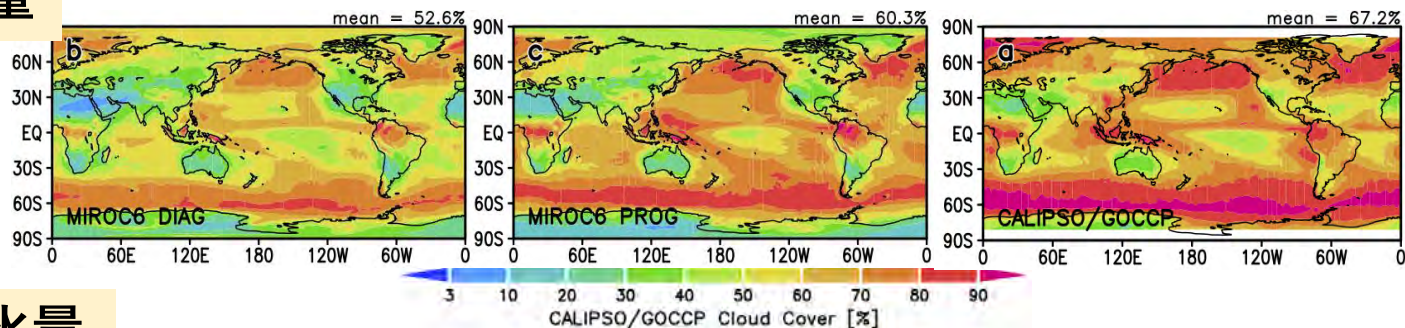
雲の改善

従来のMIROCモデル
(雨と雪を予報せず)

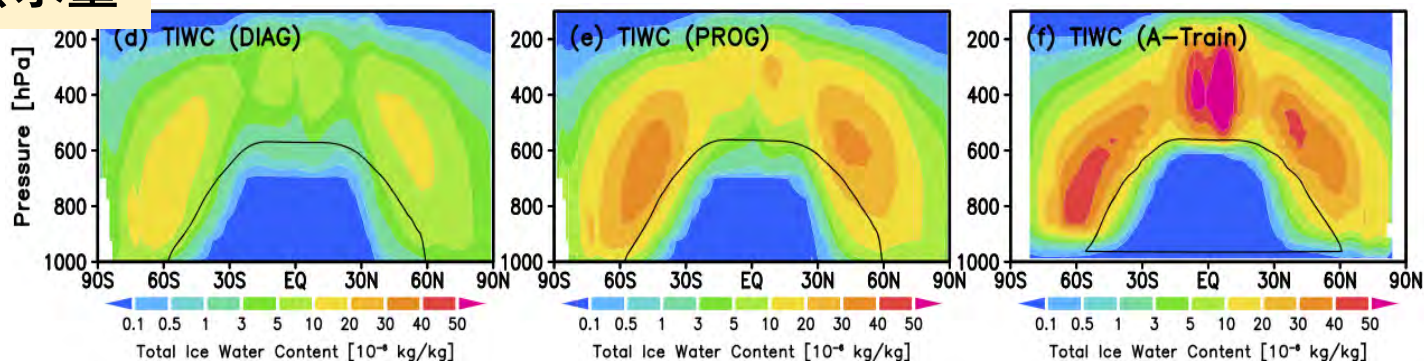
新しいMIROCモデル
(雨と雪を予報する)

衛星観測

雲量



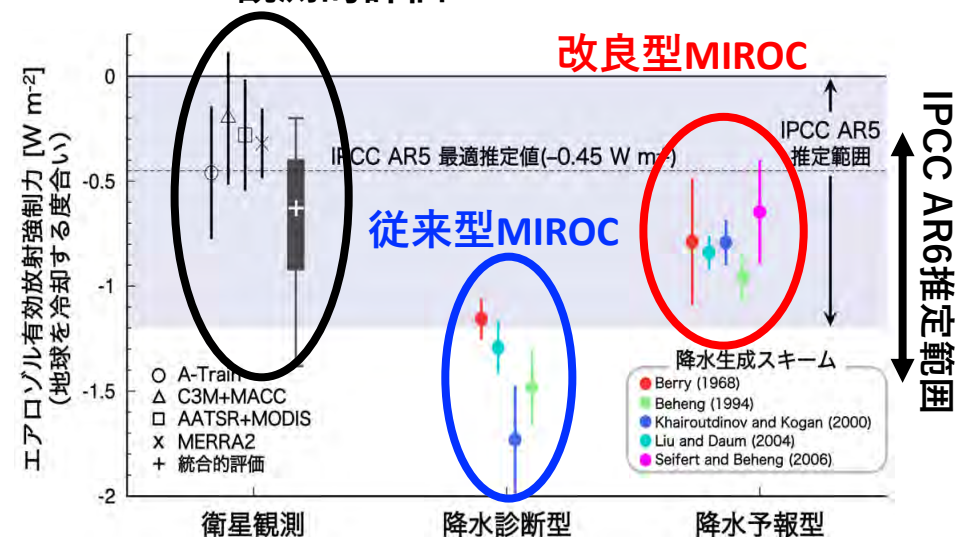
雲氷量



Michibata et al. (2019 JAMES; 2020 ACP)

エアロゾル放射強制力の改善

観測的評価



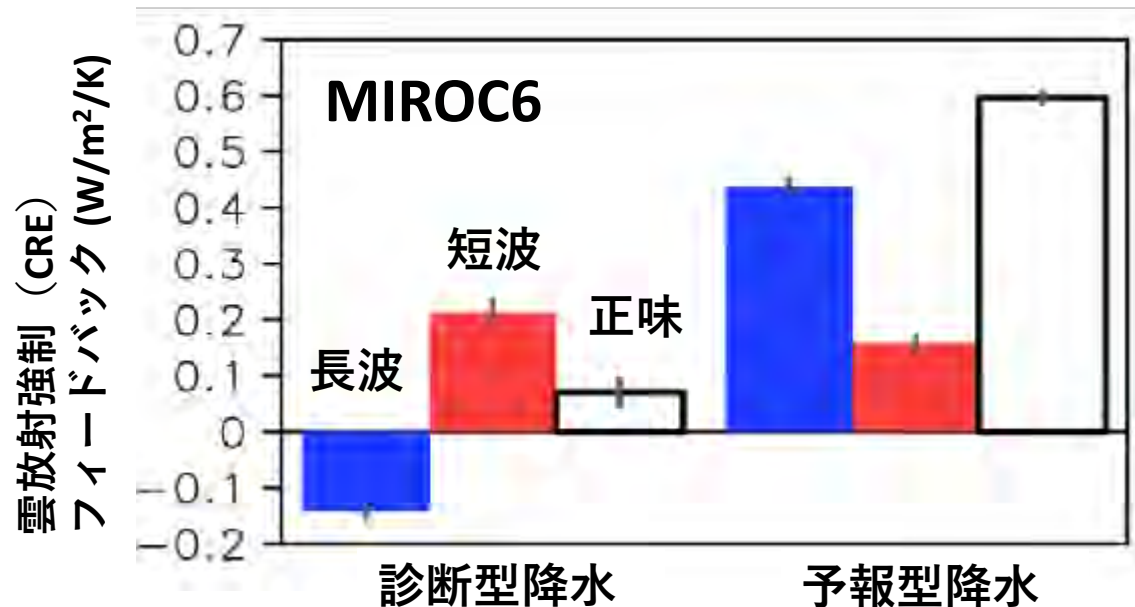
Michibata & Suzuki (2020 GRL)

- 降水予報スキーム開発によりモデル自由度が増大
- 雲微物理(ミクロ)と全球エネルギー収支(マクロ)を統合的に表現

雲・降水表現の高度化

降雨プロセスの国際共同研究

雲フィードバックへのインパクト



Hirota et al. (GRL in revision)

- 降雪粒子の温室効果: 正の雲フィードバックを増大(MIROC)
- 「速すぎる」降雨バイアスの補正: 負の雲フィードバックを増大(MPI)
- 降水過程と雲フィードバックの関係性: AR6以降の重要な課題

GEWEX Process Evaluation Study on Warm Rain (led by K. Suzuki & H. Takahashi)

- 多くの最新モデルで降雨頻度が高い
- モデルは“雲”と“雨”の二山分布だが、衛星観測は連続的な分布

領域課題(i) 地球環境変動予測の向上に資する気候モデル高度化 サブ課題(c)

陸面・河川モデルの高度化（代表 芳村圭、東京大学生産技術研究所）

■ 統合陸域シミュレータ ILS の開発

- ・ 大気から陸面を独立させ、境界条件を汎用カプラJcupで通信する方式に（テーマBとの連携）
- ・ 動的地表水変動（陸-河川結合、水面-大気の相互作用）
- ・ 氾濫、斜面、地下水流動、河川水温、土砂動態、雪氷アルベド、永久凍土、窒素/リン/鉄、湿地メタンなど
- ・ 長期にわたり解決されていない陸面のバイアスを改善（土壌水分と基底流、陸面アルベド、夏季の高温バイアス）
- ・ ポストCMIP6の全球モデル(MIROC, MIROC-ESM, NICAM)の陸モデルの基盤に（i-aとの連携）

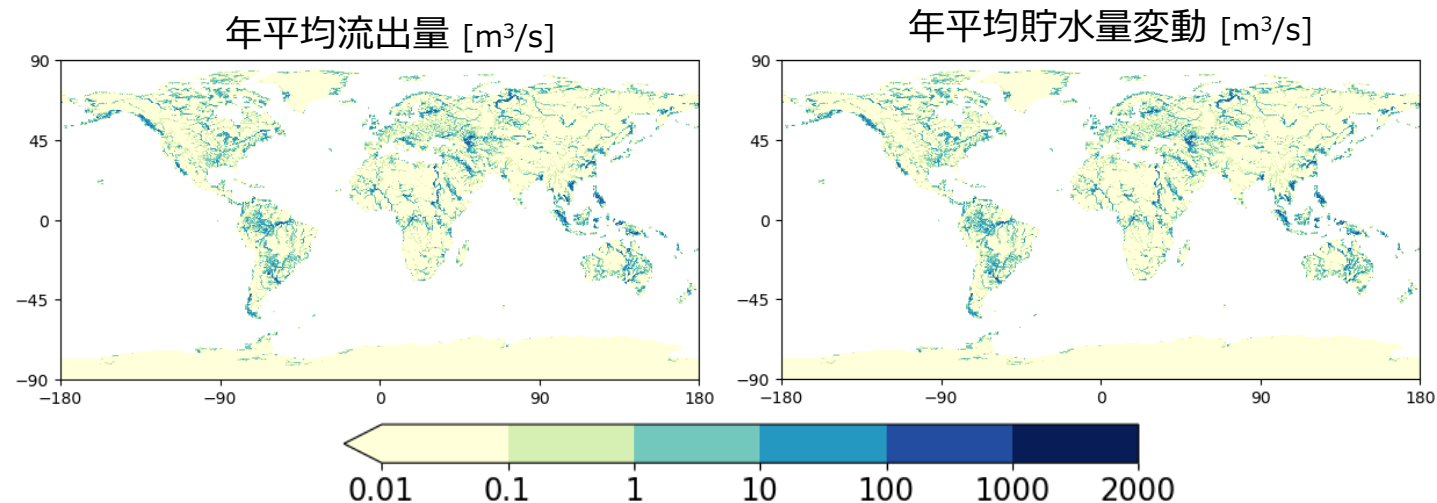
■ CMIP6 陸モデル相互比較 LS3MIP の主導

■ 水同位体比を用いた研究の進化

■ IPCCへの貢献

- ・ 海洋・雪氷圏特別報告書LA
- ・ AR6 WG2 4章LA

ILSによるオフライン計算結果の例



* モデル計算に由来する水収支誤差 < 1%を保証

統合陸域シミュレータの完成

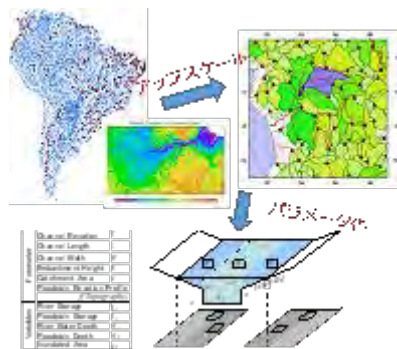
Development of Integrated Land Simulator, ILS (Nitta et al., 2020)

Basic concepts:

- 最新のスタンドアロンモデルを、最小限のコード改変で移植。
- それぞれのモデルを任意の解像度・時間ステップで動かしながら、必要に応じてカプラがデータを送受信・リグリッドする。

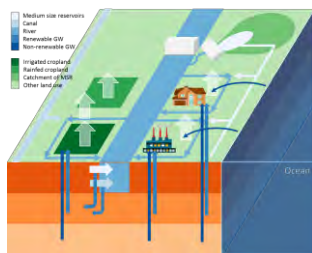
River Model CaMa-Flood

(Yamazaki et al., 2011)



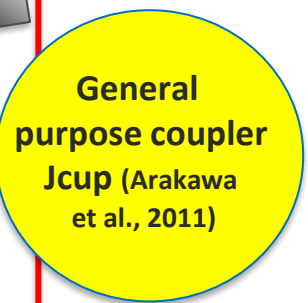
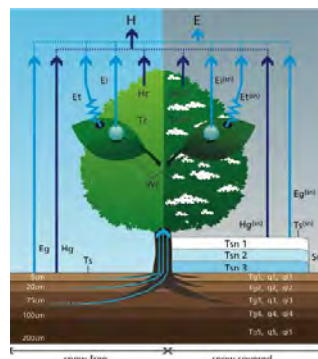
Human Impact Model H08

(Hanasaki et al., 2008)



Land Model MATSIRO

(Takata et al., 2003; Nitta et al., 2014; 2017)

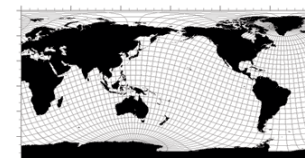


Following models are developed and will be coupled:

- 土砂動態モデル (Hatono and Yoshimura, 2020)
- 3次元地下水モデル (Miura and Yoshimura, 2020)
- 河川水温・水質モデル (Tokuda et al., 2019)
- 治水ダム操作モデル (Hanazaki et al., in prep.), Etc.

AGCMs

MIROC (Tatebe et al., 2019)
NICAM (Sato et al., 2014) etc.

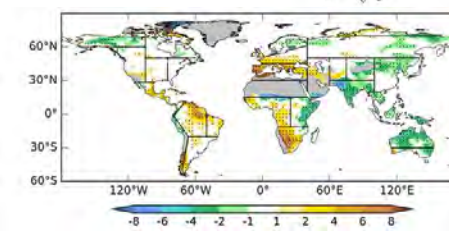
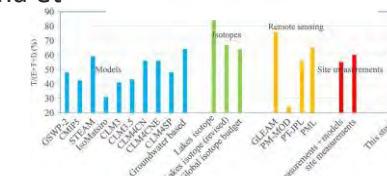
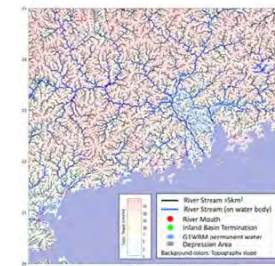


OGCMs

COCO (Hasumi, 2006) etc.

Key Achievements

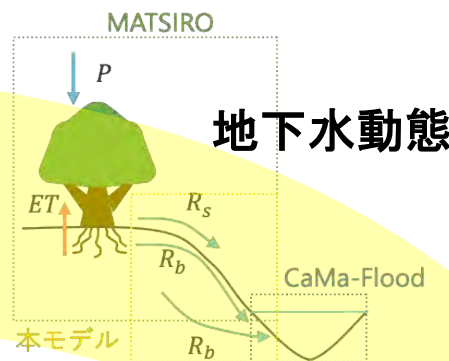
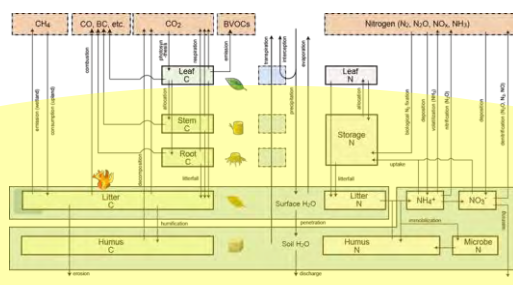
- 全球90m解像度DEMと整合した河川網 (Yamazaki et al., 2017; 2019)
- 全球蒸発散割合 (Wei et al., 2017; 2016)
- 1.5°C上昇時の乾燥度変化 (Takeshima et al., 2020)



テーマB
との連携

陸域モデル開発体制のコミュニティ化

統合陸域シミュレータ(ILS) 開発



- 独立モデル群からなるプラットフォームモデルの構築
- 汎用結合モジュール・各種周辺ツールの整備
- 継続的に陸モデル開発検討会開催

生態系変化・物質循環

テーマA

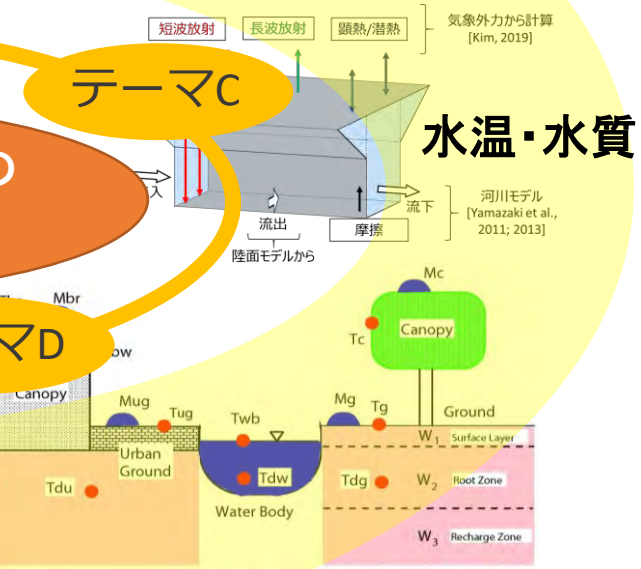
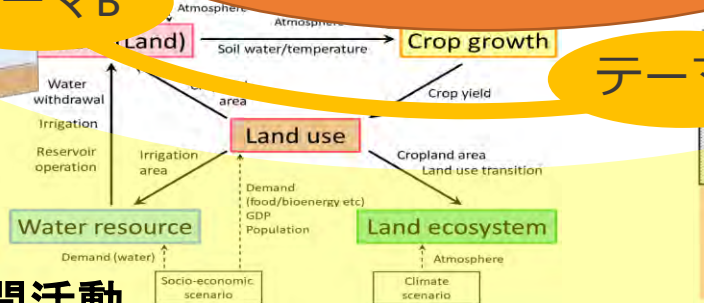
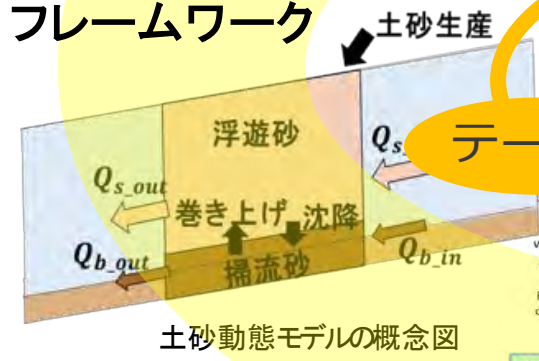
テーマC

テーマB

テーマD

個々のモデル開発者の連携体制の強化

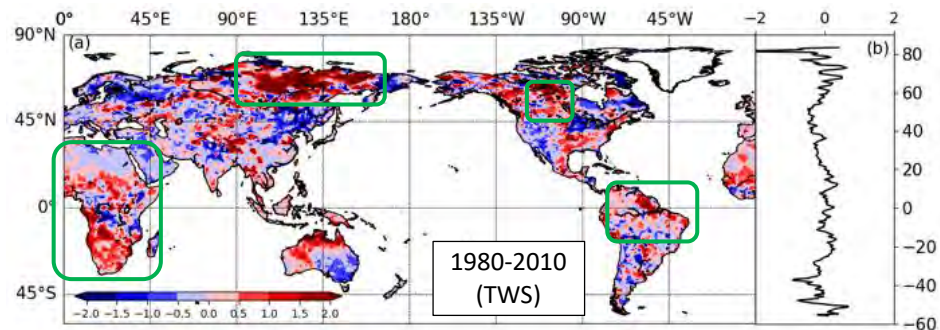
種々のモデルの結合フレームワーク



水面・水田過程、都市キャノピー等々

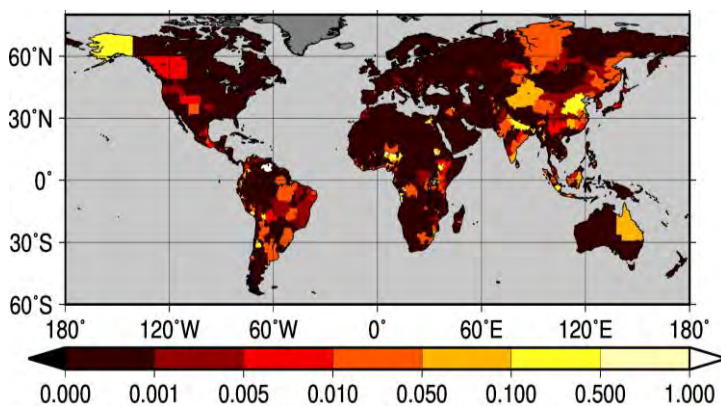
統合陸域シミュレータの応用

LS3MIP長期オフライン実験による過去30年間の陸域貯水量 (TWS) の傾向 (大沼ら, 2018)



気候変動による河川洪水被害の「適応限界」 Tanoue et al. (2021 Nature CC)

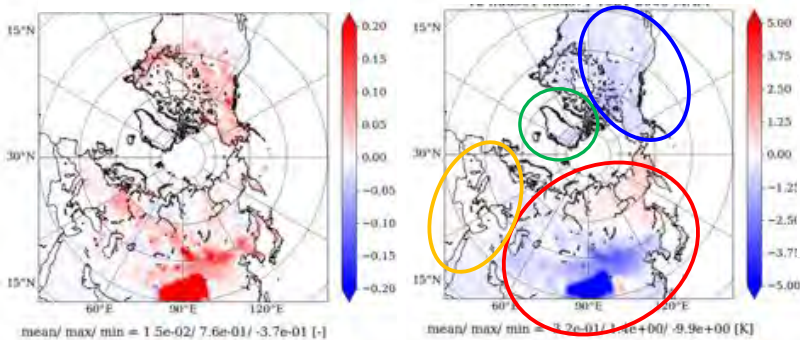
適応策を実施しても現在よりも増加する洪水被害 (GDPに対する%)



陸域 (積雪) ペースメーカー実験

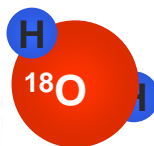
積雪被覆変化)

SAT変化 (MAM)



Onuma et al., in prep.

水同位体比モデリングの進化



水同位体は水の相変化で分別するため地球水循環過程の積分的な指標

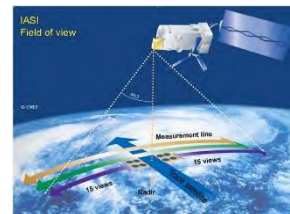
観測技術



質量分析計

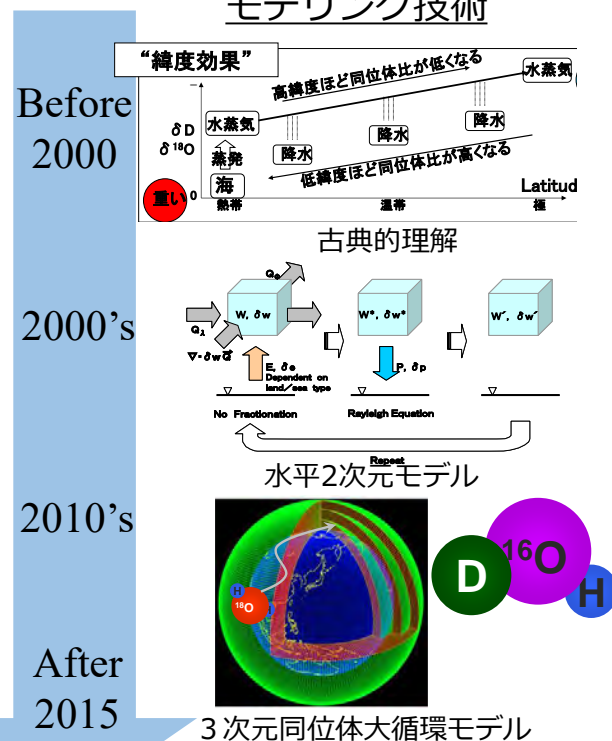


レーザー分光計



衛星搭載分光計

モデリング技術



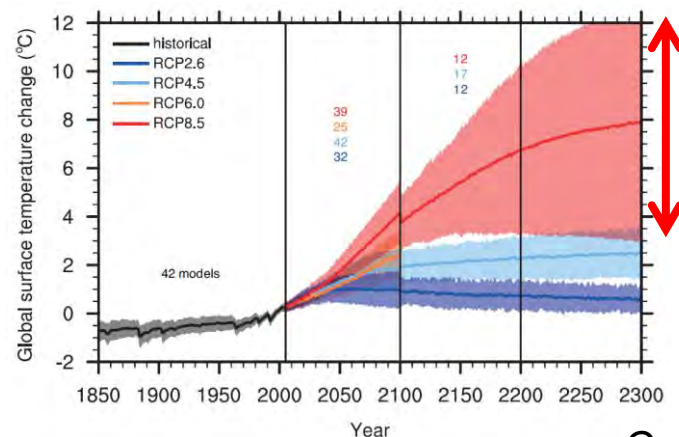
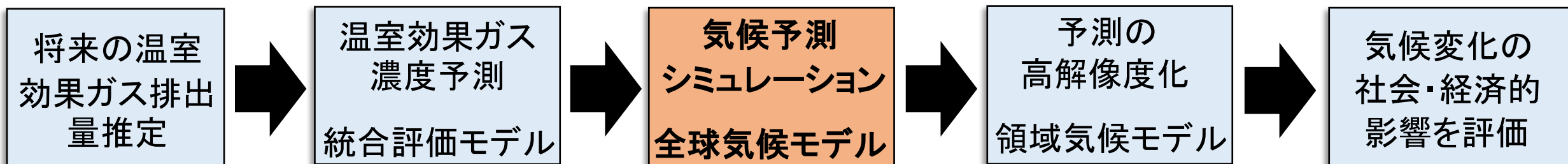
水同位体情報のデータ同化による天気予報改善に関する研究は、日本が世界をリード。水同位体ESM開発は急務。

Toride et al. (2021, GRL); Tada et al. (2021, Sci Rep)

領域課題(iii) 気候変動予測の不確実性低減と科学的知見の深化 サブ課題(a)

気候感度に関する不確実性の理解と低減 (代表 小倉知夫、国立環境研究所)

- CMIP6 (CFMIP/RFMIP) 実験の実施 (i-aとの連携)
- 雲微物理過程高度化の評価 (i-bとの連携)
- 雲の調節過程およびフィードバックの理解 (新規 / 既存アンサンブル実験の解析)



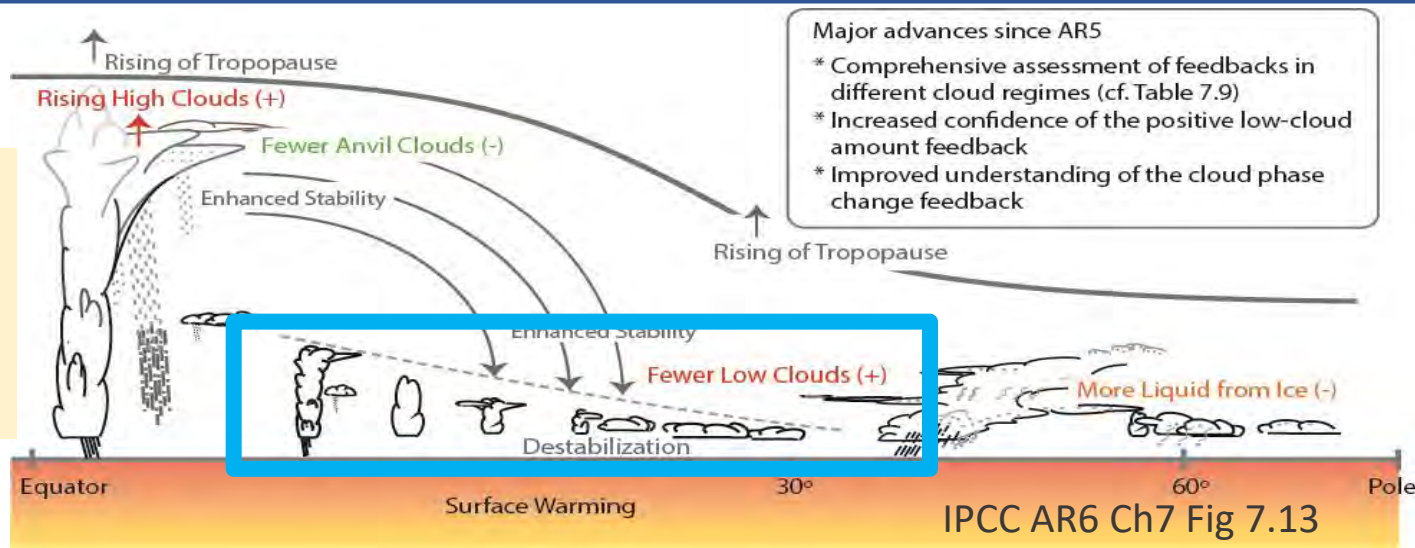
- 複数のモデル間でprojectionが不一致
- 気候感度の不一致が重要な要因

なぜ結果が一致しないか？

どうすれば一致が良くなるか？

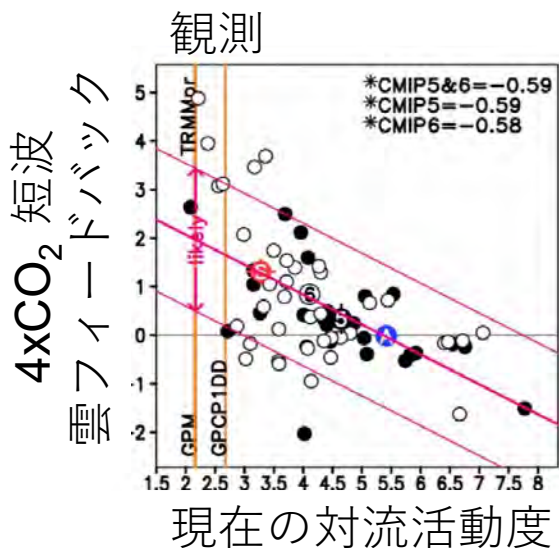
雲の調節過程およびフィードバックの理解

海上下層雲が正のフィードバックをもつことは確かになった
⇒気候科学の大きな進展
(Sherwood et al. 2020)



- CMIP5/6の解析から、亜熱帯海上の雲フィードバックに不確実性が生じるメカニズムを新たに提案
- TRMM衛星観測データより雲短波フィードバックを制約

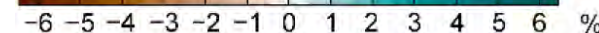
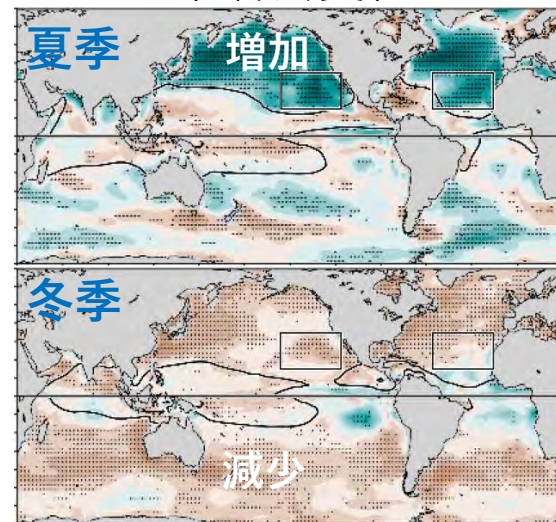
Hirota et al. (2021 ERL)



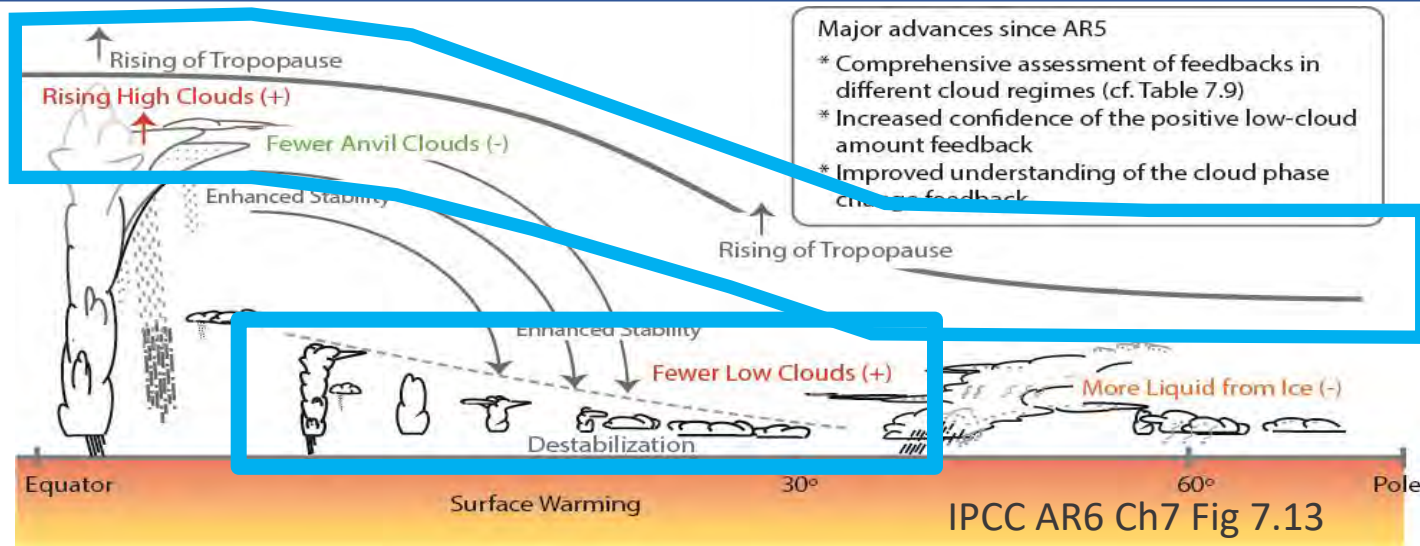
- CO₂の直接効果で雲は増加 ⇒放射強制力を強める
- しかし、下層雲の変化には大きな季節性 (夏に増加/冬に減少)
- CO₂増加で大気下層の安定度が強化することが原因

Kamae et al. (2018 Clim Dyn)

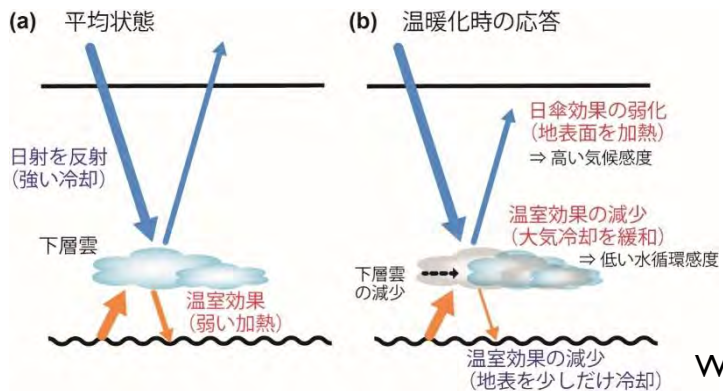
下層雲変化



雲の調節過程およびフィードバックの理解



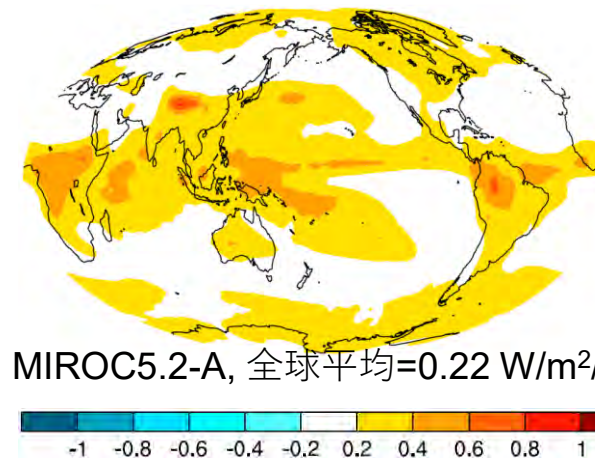
- MIROC実験+CMIP5解析から、気候感度と水循環感度が下層雲の変化を介して関連するメカニズムを発見



- FAT理論「温暖化により、かなとこ雲の高さは上昇、その温度はほぼ一定」
- FATに伴う雲フィードバックは（雲ではなく）温度フィードバックに含める新たな枠組みを提案

Yoshimori et al. (2020 J Clim)

FAT理論に基づく雲フィードバック





温暖化時の全球降水量変化の確かな推定

当日のみ

領域課題(iii) 気候変動予測の不確実性低減と科学的知見の深化 サブ課題(a)

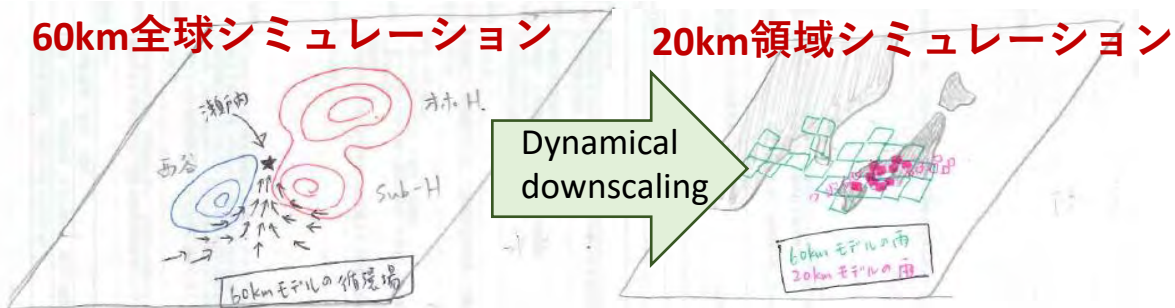
過去の気候変動・異常気象の要因分析と将来予測 (代表 今田由紀子、気象研究所)

- CMIP6 DAMIP、AMIP、PAMIP実験の実施 (i-aとの連携)
- HAPPI実験主導を通じたIPCC 1.5度特別報告書への貢献
- 長期気候変動に対する要因分析研究で世界をリード (海水の影響・ペースメーカー実験など)
- イベント・アトリビューション(EA)研究の実施と発展 ⇒ IPCC AR6へも大きな貢献
 - 「グローバル」アプローチの推進と日本の豪雨に対するEA手法確立 (テーマCとの連携)
 - 結合モデルを用いたEA手法開発 (i-aとの連携)
 - 影響評価変数のEA (i-c、テーマCDとの連携)
 - その他、海のEA、大気の川、MJOと大雪、水文EAなど、多くの成果

メディア展開とさまざまなアウトリーチ



d4PDFと「グローバル」アプローチ



Courtesy of Y Imada



イベント・アトリビューション研究を振り返る



革新
創生プログラム
統合プログラム

Year	Extreme events	発生確率		量・強さ
		Risk-based by MIROC	Risk-based by d4DPF	Storyline by RCM
2011	ロシア熱波・パキスタン豪雨・南アマゾン干ばつ	○	150km	
2012				
2013	平成24年九州北部豪雨	BAMS ○	150km	
	6-7月の米国南西部熱波	○	150km	
2014	7-8月日本猛暑	BAMS ○	150km	
2015	8月日本猛暑	BAMS ○	150km	
2016				
2017	アジア猛暑	BAMS ○	150km	
	H29年7月九州北部豪雨		20km ○	
2018	8月日照不足	BAMS ○	150km	
	H30年7月豪雨		20km ○	BAMS ○ 5km, 2km
2019	7-8月日本猛暑		60km ○	
	令和元年東日本台風			5km ○
2020	2019/2020暖冬		60km ○	
2021	令和2年7月豪雨		5km ※ ○	BAMS ○ 1km
2022				

さらなる発展へ

日本のEAプロトタイプ実験

Pall et al. (Nature) risk-based EAの提唱

MIROCによるEA開始 (150km、50メンバー)

d4PDF第1版公開

WWA (EUの速報EAプロジェクト) 開始

d4PDF延長実験完成 AC連携本格化

量的EA開始

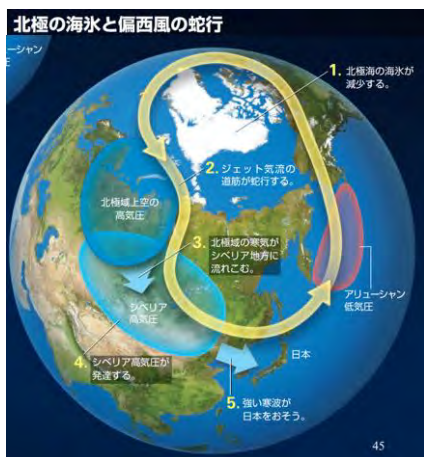
EAメディアフォーラム

Storyline EAに水文モデルを統合 (環境省事業) ACD連携へ

線状降水帯のEA

Timely EA戦略のレビュー

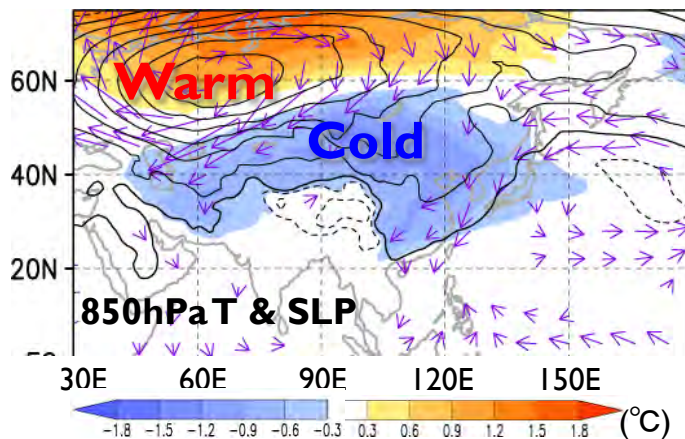
長期気候変動のメカニズムと要因分析



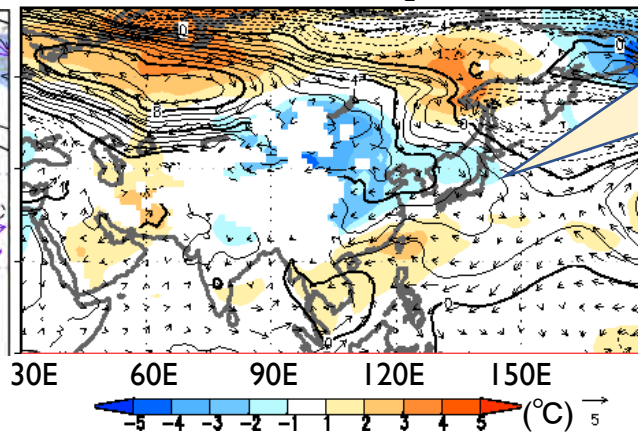
Newton (2021)

‘Warm Arctic/Cold Eurasia (WACE)’ patternの提唱

Typical WACE pattern (1980-2014)

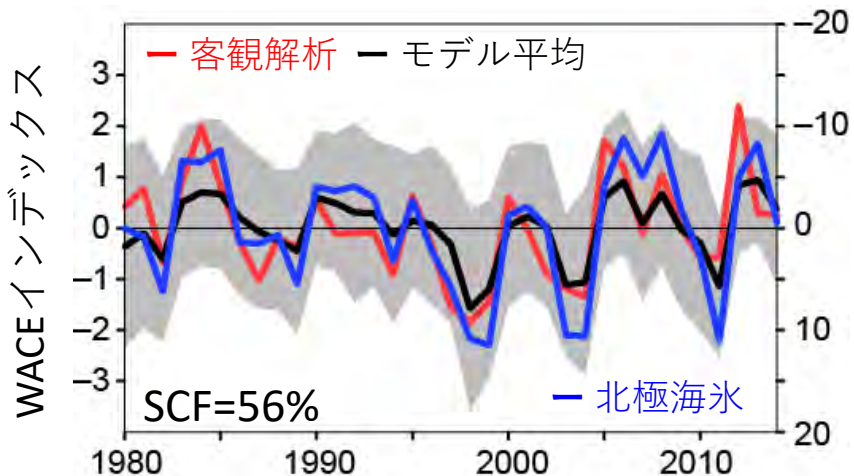


7 Dec 2018 – 5 Jan 2019



日本では
年末年始
の大寒波

AMIP大アンサンブル(219メンバ!)の解析



Mori et al. (2019 Nature CC)



Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades

Masato Mori^{1*}, Masahiro Watanabe¹, Hideo Shiogama², Jun Inoue³ and Masahide Kimoto¹

- バレンツ・カラ海の海氷減少が冬季ユーラシアの寒冬に寄与していることを繰り返し示してきた(Mori et al. 2014 Nature Geo, 2019a, 2019b, 2021 Nature Clim Change)
- 世界的にも論争になっており、現在国際共同研究を展開中



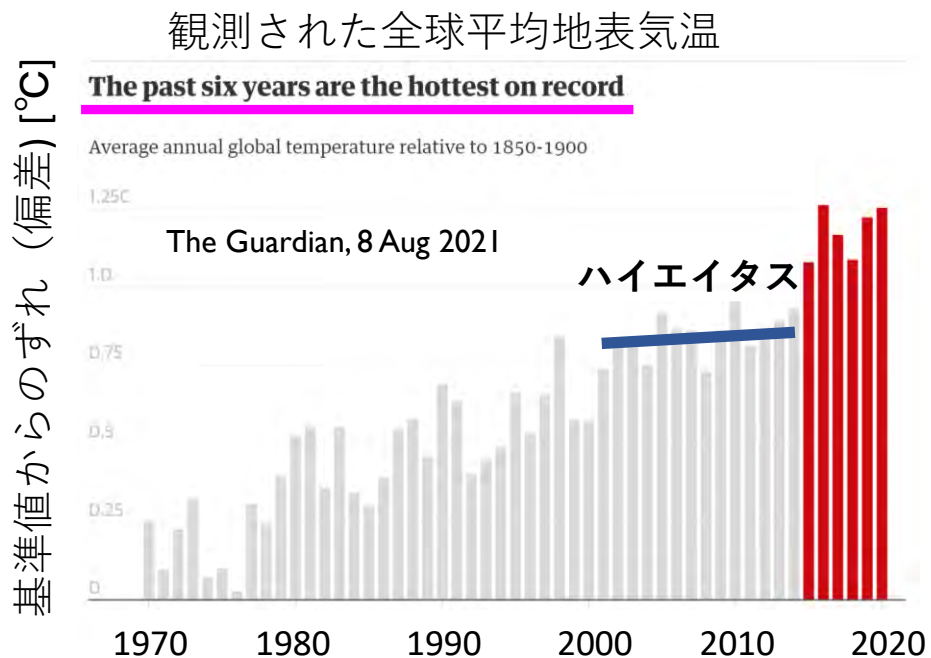
A reconciled estimate of the influence of Arctic sea-ice loss on recent Eurasian cooling

Masato Mori^{1*}, Yu Kosaka¹, Masahiro Watanabe², Hisashi Nakamura¹ and Masahide Kimoto²

地球温暖化の停滞と加速

IPCC AR6 SPMよりー

自然変動は、人間活動により生じる変化
(特に近未来の地域規模) を変調する。



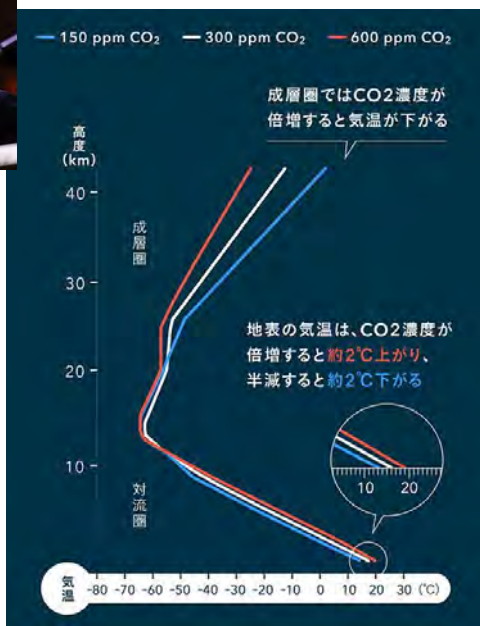
- ハイエイタスに対する気候内部変動の役割はAR6で明記されたが、現在の温暖化「加速」の要因分析、極端高温事象への影響など、さらに明らかにすべき課題も

領域課題(iii) 気候変動予測の不確実性低減と科学的知見の深化 サブ課題(a)

全球非静力学モデルによる雲・降水・循環過程の理解 (代表 野田 暁、JAMSTEC)

- 高解像度大気モデルNICAMの開発と改良
- 放射対流平衡と熱帯上層雲の温暖化応答の理解
- HighResMIP/RCEMIP/DYAMINDOなどの国際共同研究参画

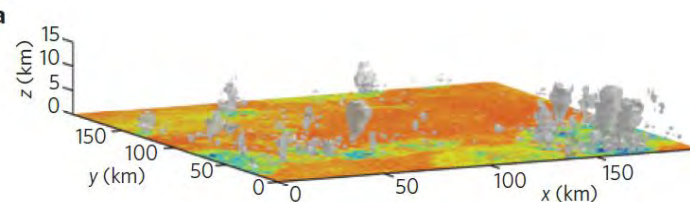
真鍋先生の1次元放射対流平衡から50年以上、、、



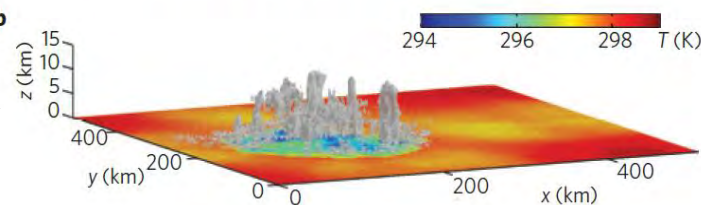
Manabe and Wetherald (1967)

雲解像モデルで計算された放射対流平衡状態

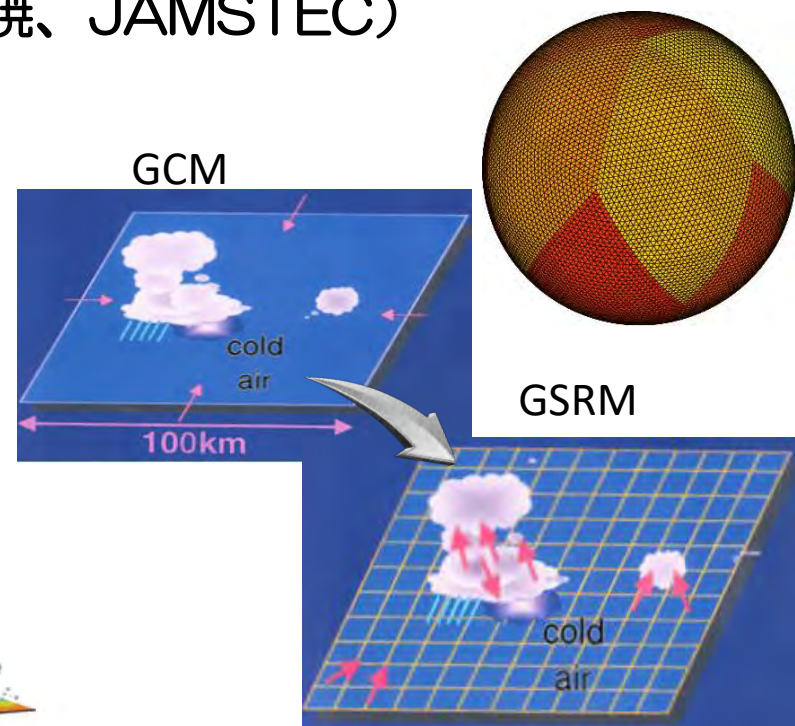
初期
(ランダム)



時間が
経った状態
(組織化)



Muller and Held (2012)

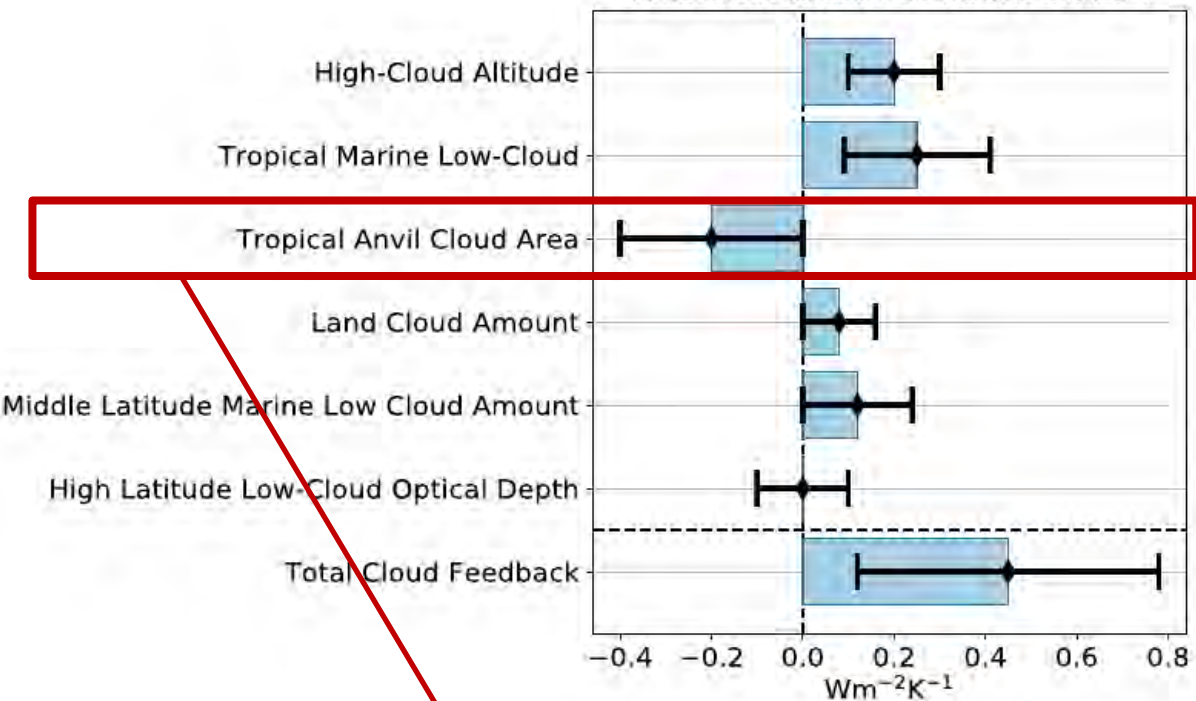


- 放射対流平衡は雲・放射・循環相互作用の問題へ
- 温暖化した時に対流システムと上層の雲はどう応答するか？

雲解像モデルによる温暖化時の上層雲応答

新たな雲フィードバック不確実性

Assessed Cloud Feedback Values

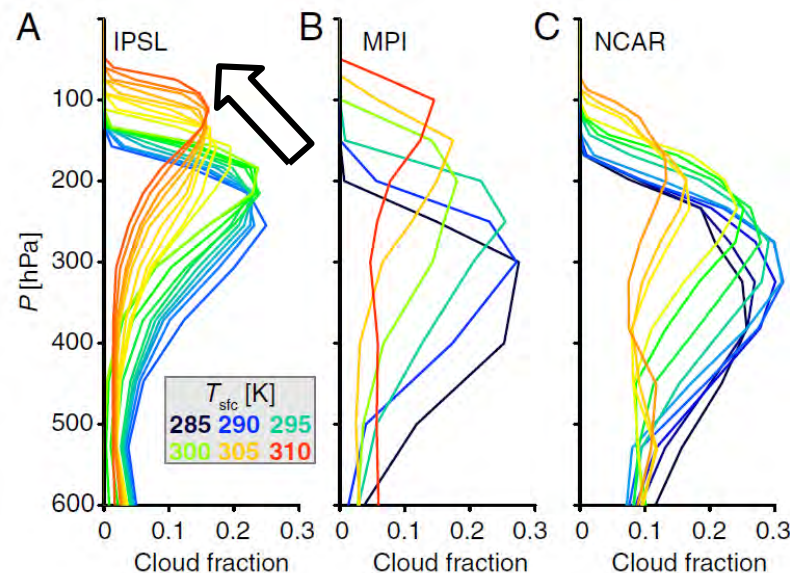


Sherwood et al. (2020)

熱帯かなとこ雲のフィードバック
= 対流組織化に関連する

Stability Iris

SST上昇に対する熱帯雲被覆率の応答



Bony et al. (2016, PNAS)

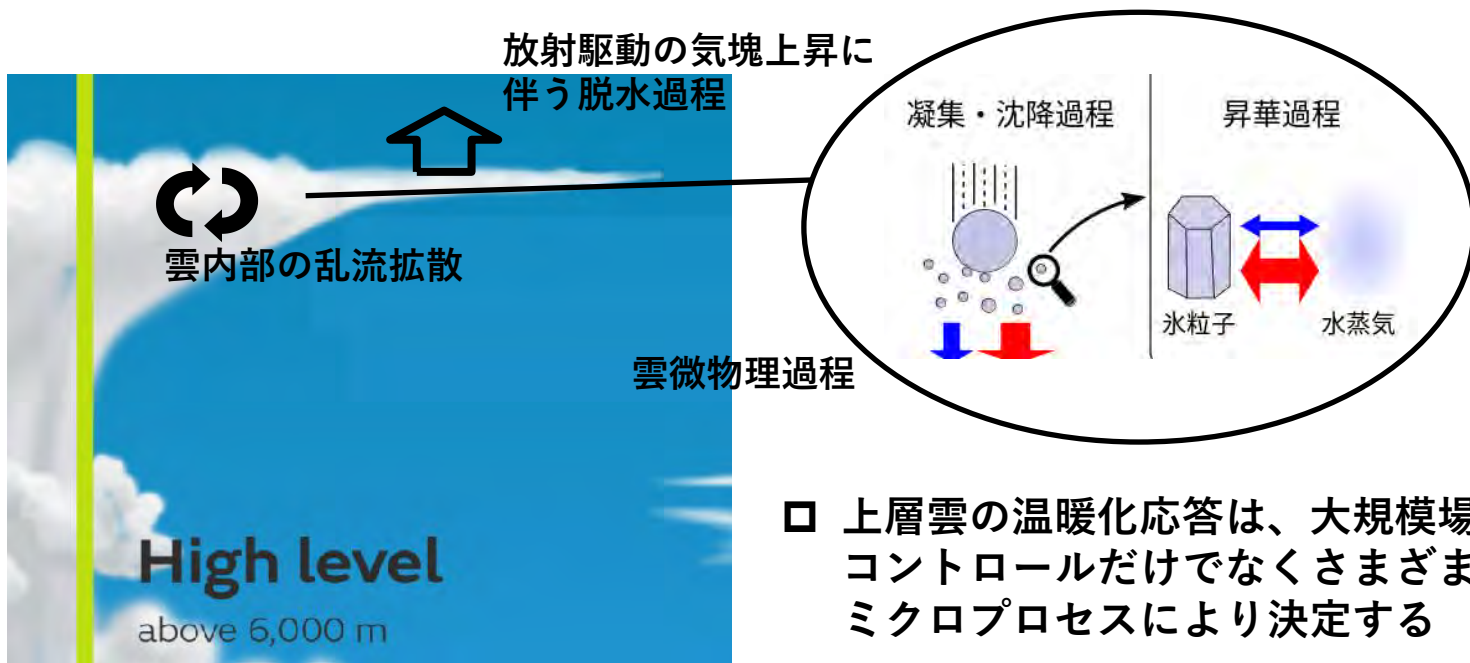
NICAMにおける応答



Ohno and Satoh (2018)

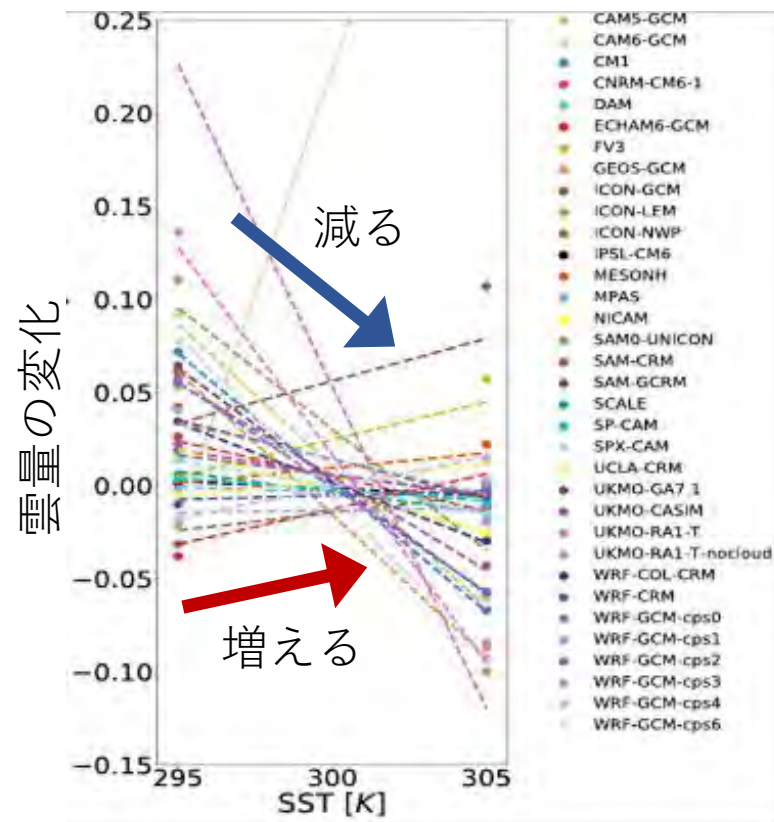
- GCMでは、SST上昇とともに上層発散が弱まるため（FAT理論）、圏界面上昇+上層雲の減少（負のフィードバック）
- NICAMでは、SST上昇とともに上層雲が増加⇒なぜ？

雲解像モデルによる温暖化時の上層雲応答



雲解像モデルによる放射対流平衡相互比較

SST上昇に対する上層雲量の応答



□ 上層雲の温暖化応答は、大規模場のコントロールだけでなくさまざまなマイクロプロセスにより決定する

Ohno et al. (2020, 2021)

プレスリリース

- 熱帯上層雲のフィードバックは温故知新 (cf. 放射対流平衡) の問題であるにも関わらず、**未解決!**
- 今後の雲解像モデリングに期待



本プログラムにおける目標達成十今後に向けた状況

- これまでのプログラムで開発されてきた気候モデル（MIROC6、NICAM）および地球シミュレータを活用して**CMIP6へ参加し**、国際コミュニティにおける気候変動研究をリードすることで、**IPCC AR6へ貢献した**
- 国内の気候変動対策に資するために、**気候モデルのプロセスを高度化・高解像度化**し、近未来予測などを含むシームレスな予測基盤モデルの開発を実施した。上記モデルを用いて気候感度の不確実性の制約や近未来気候変動予測の精度向上を目指し、**重要な科学性成果を得た**
- **過去の気候変化の要因究明や、直近の異常気象に対する温暖化の寄与推定**などの基盤的気候変動研究を発展させ、「**社会に開かれた温暖化サイエンス**」を推進することで、**起こりつつある気候変化に対して市民の求める情報を提供した**

-
- 本プログラムで開発されたモデルは、今後1~2年のうちに**MIROC7-ESMとして統合の予定**
 - **若手研究者を含む研究力の底上げ**により、high-impactジャーナル(例 Nature Clim Change)への論文掲載は珍しくなくなった。本プログラム最終年にはNature, Scienceへの論文掲載も
 - 提言書¹や検討会報告²で挙げられている**今後発展させるべき課題のいくつか**（衛星データ活用、統合陸域モデリング、海面水位変動、AIの利用など）は既に着手
 - **国際的な動き**（IPCC AR7, CMIP7, WCRP Light House Activityなど）との連携体制も徐々に構築