



サブ課題(i): 地球環境変動予測の向上に資する気候モデル高度化

サブ課題代表: 建部洋晶¹, 鈴木健太郎², 芳村圭³

(1: 海洋研究開発機構, 2: 東京大学大気海洋研究所, 3: 東京大学生産技術研究所)

本サブ課題では地球環境変動の予測に耐える数値気候モデルの高度化を行い、それに基づいて近未来の気候変動予測に科学的に資するための幅広い研究を実施しています。このために、日本の気候研究コミュニティが有する気候モデルMIROCを検証・改良するとともに、それをを用いた様々なシミュレーション実験に取り組んでいます。

近未来気候変動予測とCMIP6実験の推進: 課題(i)-a

MIROCの旧バージョン(MIROC5)から更新された**MIROC6**を系統的に評価(図1)するとともに、気候モデル国際比較プロジェクト(CMIP6)への参加(図2)を通じて、**IPCC第6次評価報告書に直接貢献**しています。

図1: 経度平均した気温(上段)と東西風(下段)のモデル誤差の比較。MIROC6(左)ではMIROC5(右)に比べて成層圏の循環がよく表現されている(Tatebe et al. '19)。

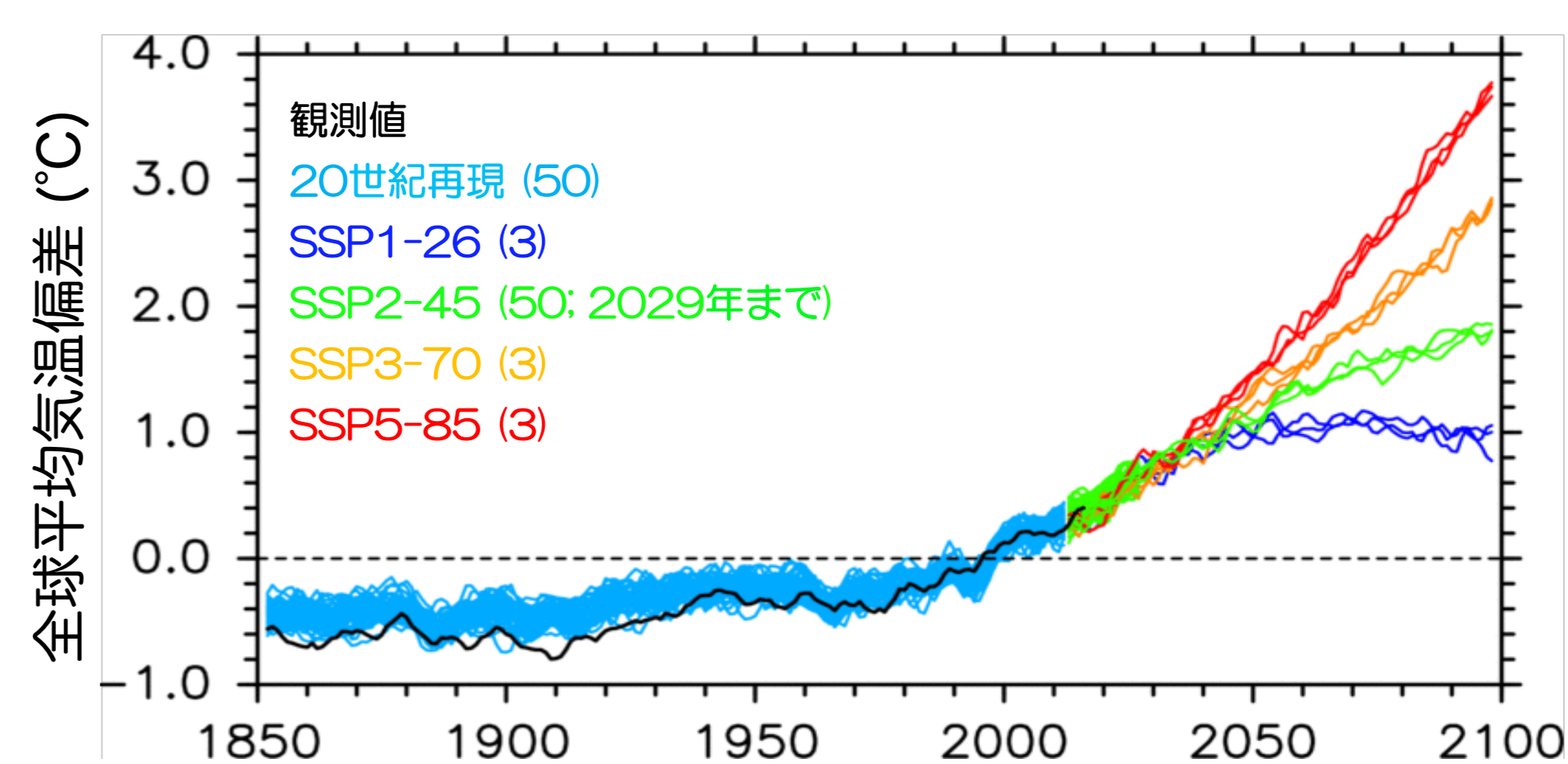
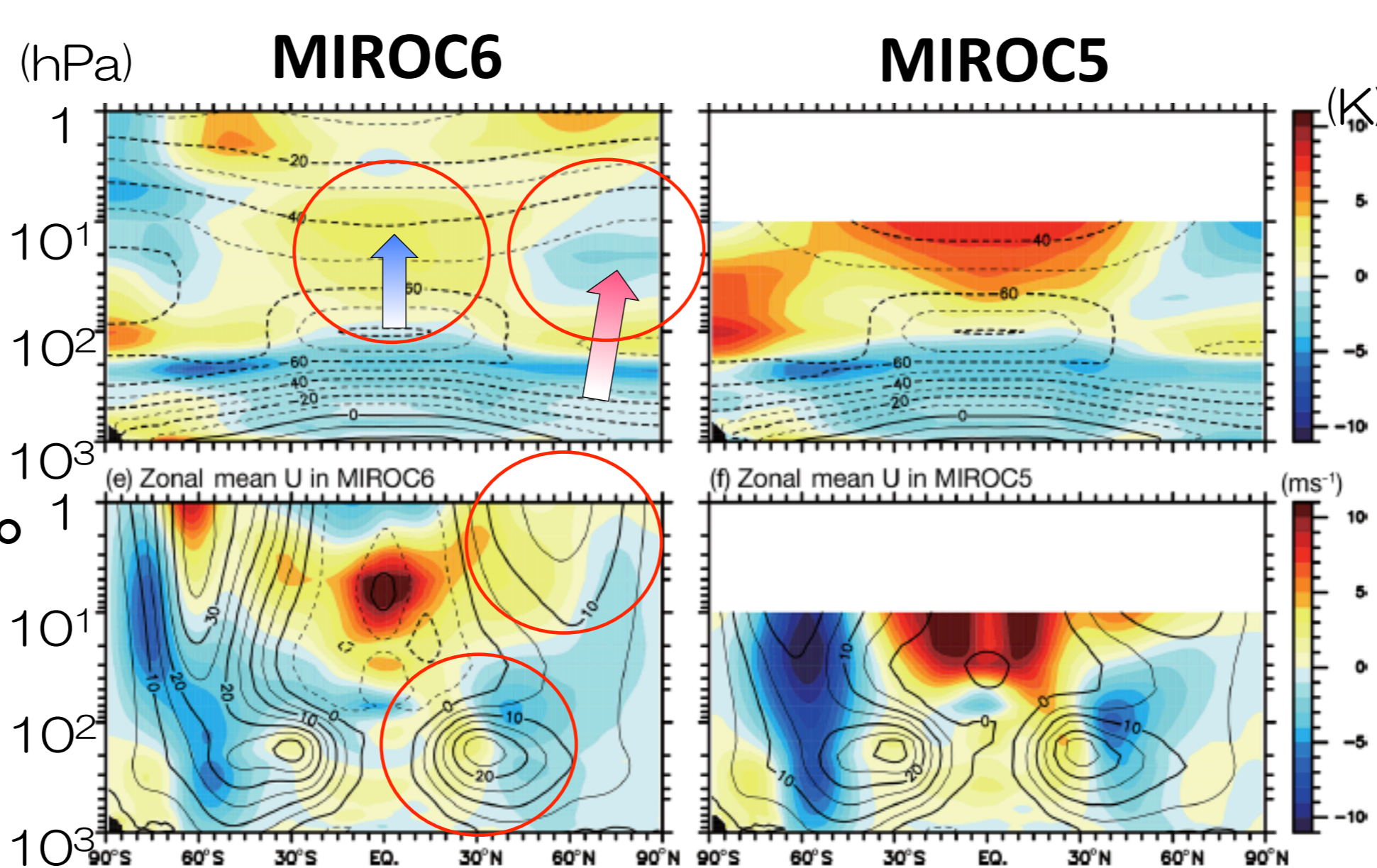


図2: MIROC6で実施された20世紀再現実験および将来シナリオ実験の結果。

物理プロセスの高度化による気候モデル開発: 課題(i)-b

MIROC6をさらに改良するために、特に不確実性の大きい**大気物理(雲・降水・放射)プロセスの表現を高度化**しています(図3)。世界各国の**気候モデルが共通して抱える誤差の軽減**(図4)に役立つことが期待されます。

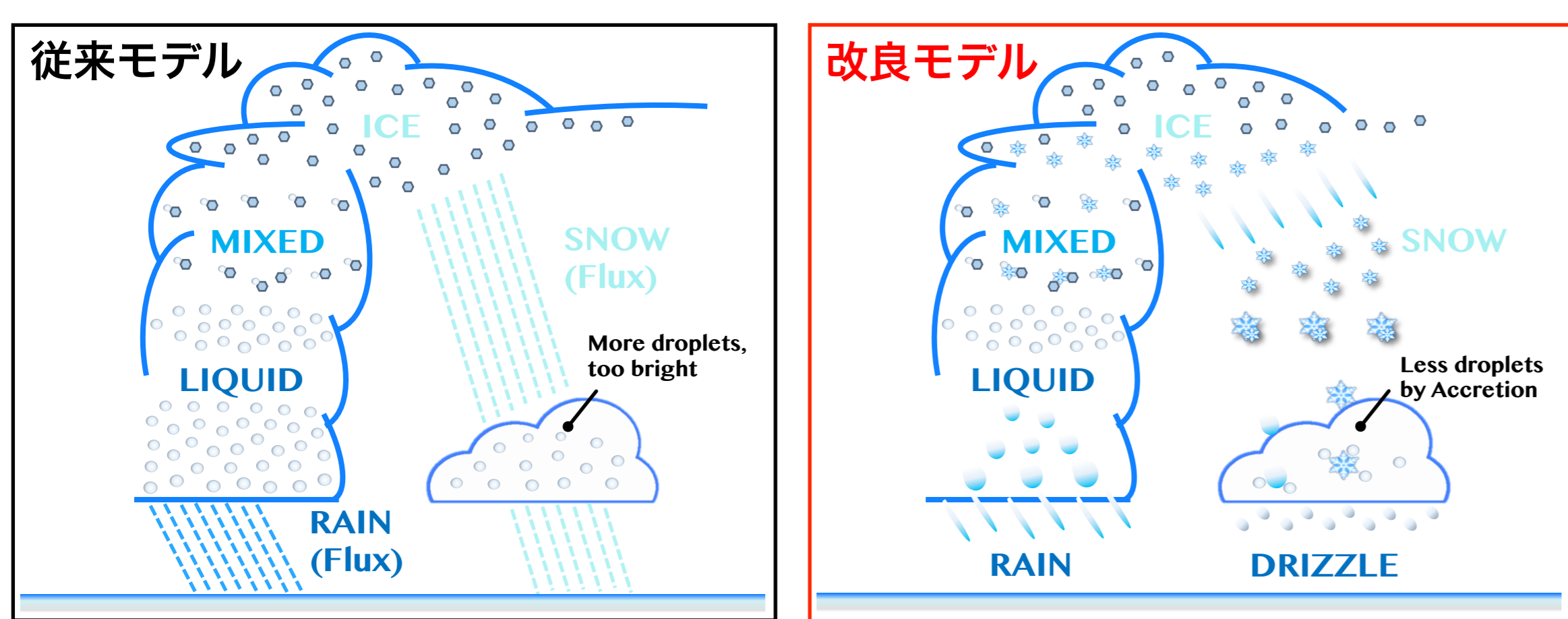


図3: 従来モデル(左)と改良モデル(右)における大気物理プロセスのモデル表現。改良モデルは降雨・降雪をより現実的に表現している。

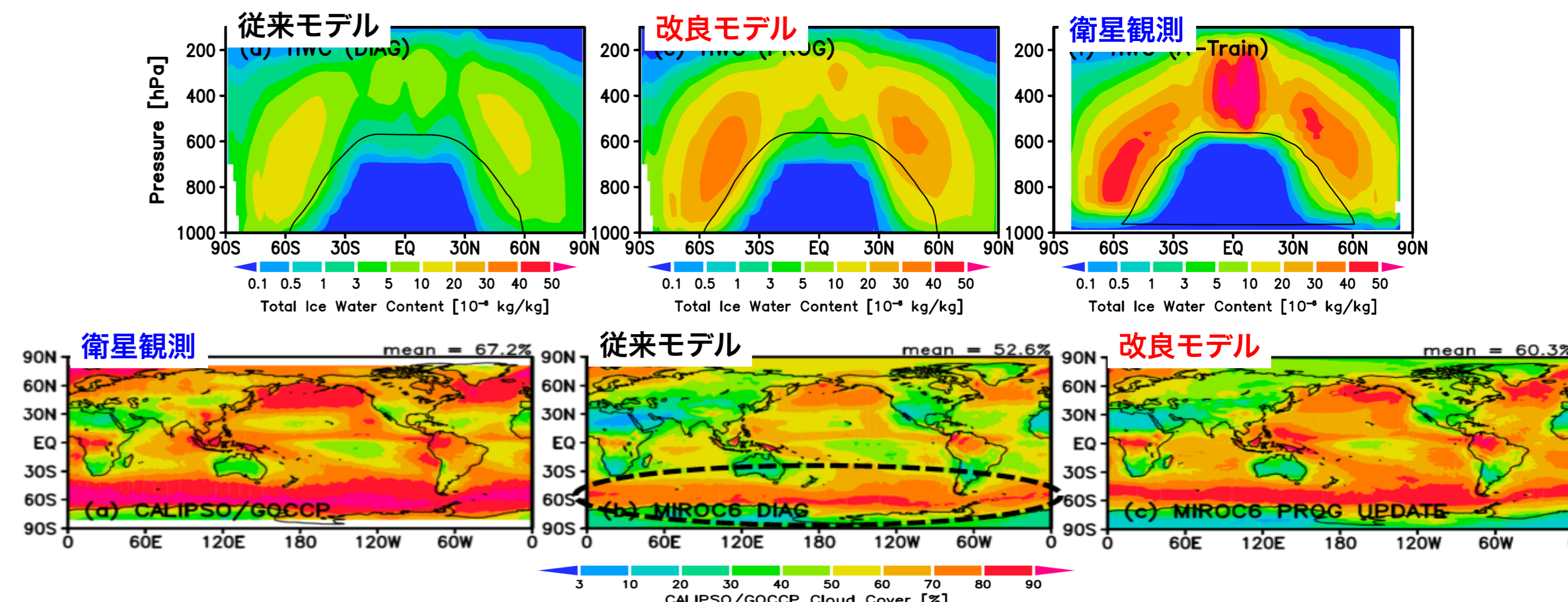


図4: 大気物理改良前後でのMIROC6の雲表現の比較。改良によって雲氷(上段)と雲量(下段)の再現が衛星観測に近づいた(Michibata et al. '19)。

陸面モデルの高度化: 課題(i)-c

気候変化に伴う洪水・渇水を精度良く予測するためには、**陸域の水循環を適切にモデル化することが不可欠**です。このために、次世代MIROCを含む様々なモデルで利用できる**統合的陸面モデルの開発**(図5)に取り組むとともに、河川水や地下水などの表現が高度化されたモデルによる**陸域水循環の影響評価**(図6)も行っています。

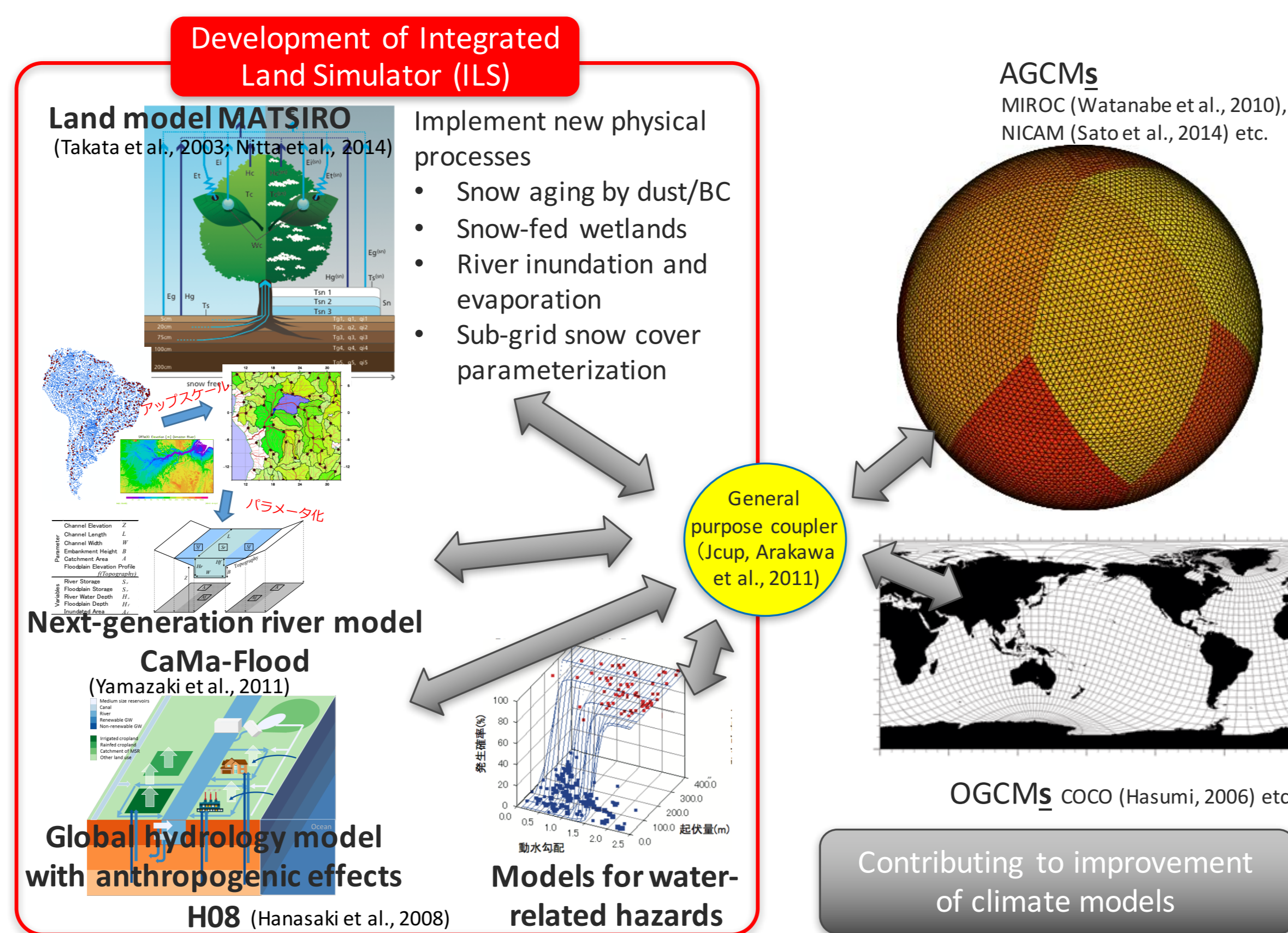


図5: 統合的陸面モデル(ILS)の概要。陸域植生モデル(MATSIRO)や次世代河川モデル(CaMa-Flood)などが様々な全球モデルと汎用的に結合できる形で設計されている。

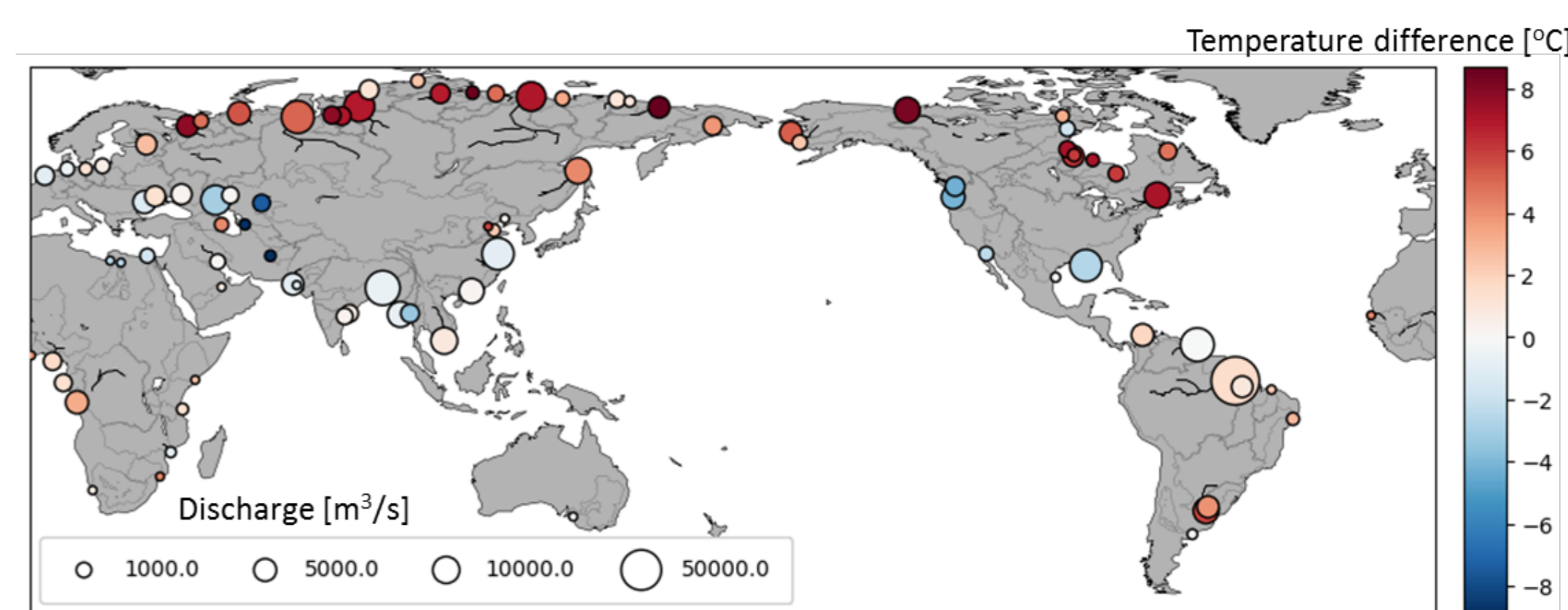


図6: CaMa-Floodで再現された河口と沿岸の水温差。河川流水が南北熱輸送を担っていることを示す(Tokuda et al. '19)。



過去の気候変動・異常気象の要因分析と将来予測

背景 自然変動と人為的な温暖化を区別できる？

近年、猛暑や豪雨などの**極端な気象現象**が世界中で頻発しています。その主な要因は、地球本来の**自然変動**なのでしょうか？それとも**人為的な温暖化**なのでしょうか？

気候モデルの性能向上、計算機の高速化やデータ保存容量の増大から、稀にしか生じない猛暑や豪雨などを気候モデルで数多く再現することが可能になりました。わずかに異なる条件で多数の気象計算を行う**アンサンブル実験**によって、極端な気象現象の発生確率などを議論できるようになりました。

手法 アンサンブル実験による発生確率の比較

猛暑や豪雨などの対象とする極端な気象現象が発生する時期について、気候モデルを用いて**過去**を再現・**非温暖化**を想定したアンサンブル実験を行って、発生確率を比較します。

図1 複数年(太線)・特定の年(細線)の過去再現・非温暖化実験の気温や降水量の発生確率分布の比較の概念図。

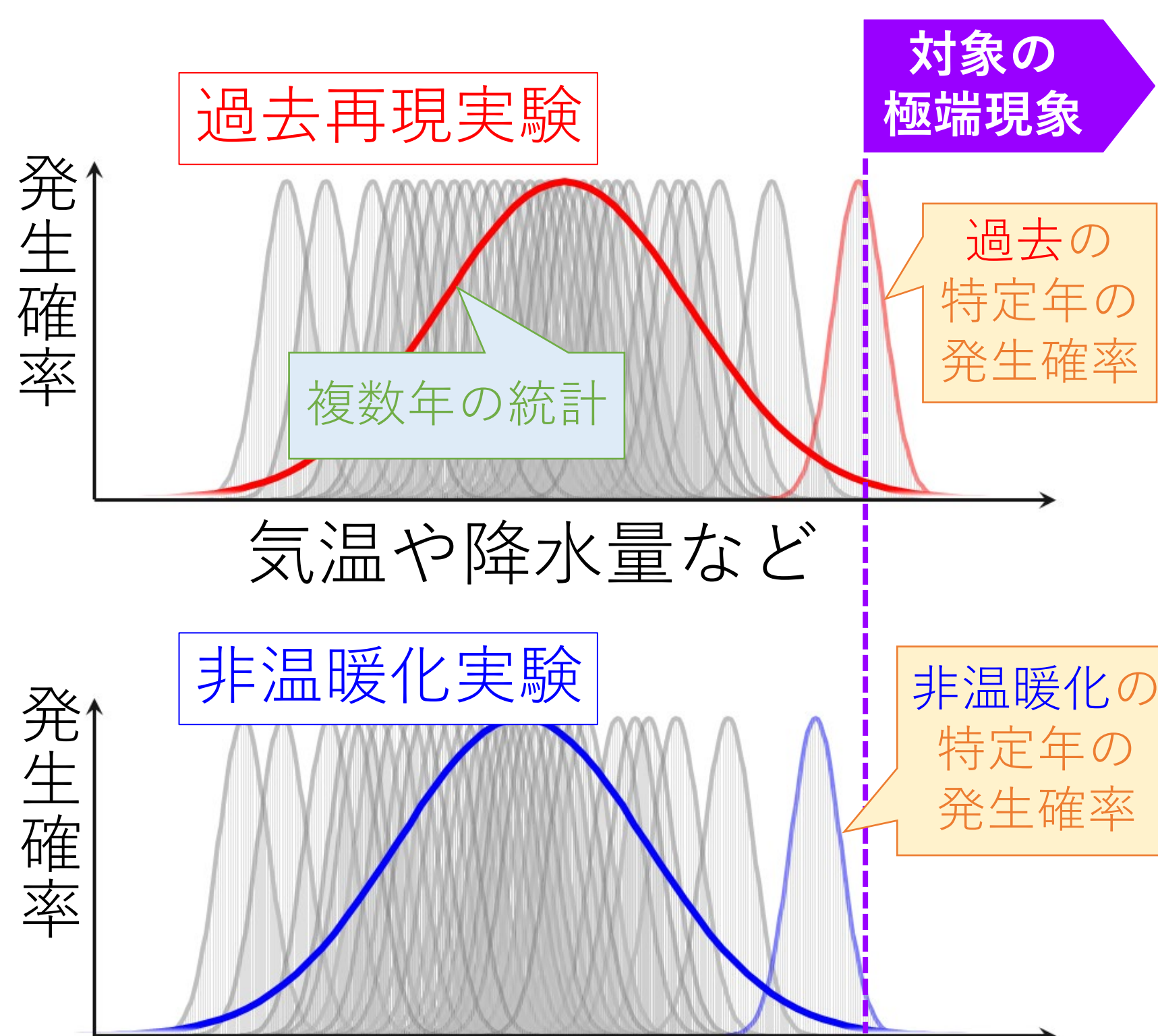
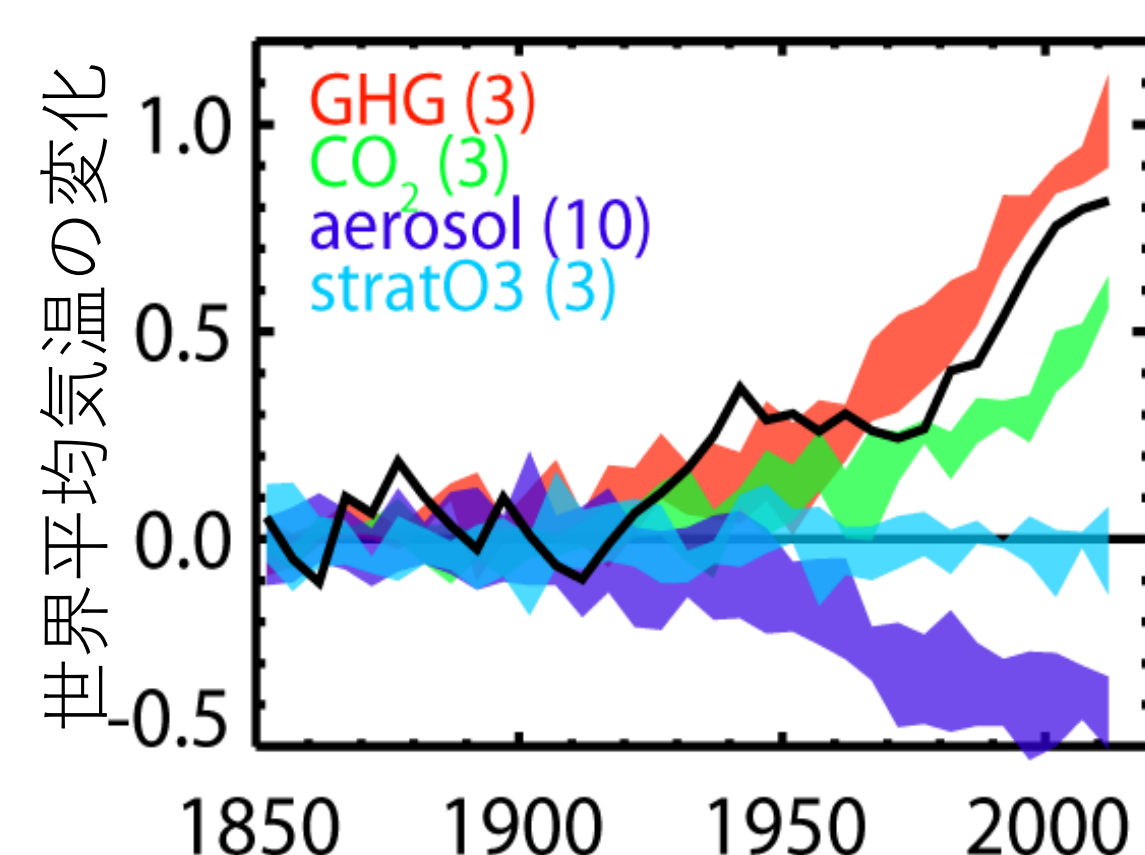


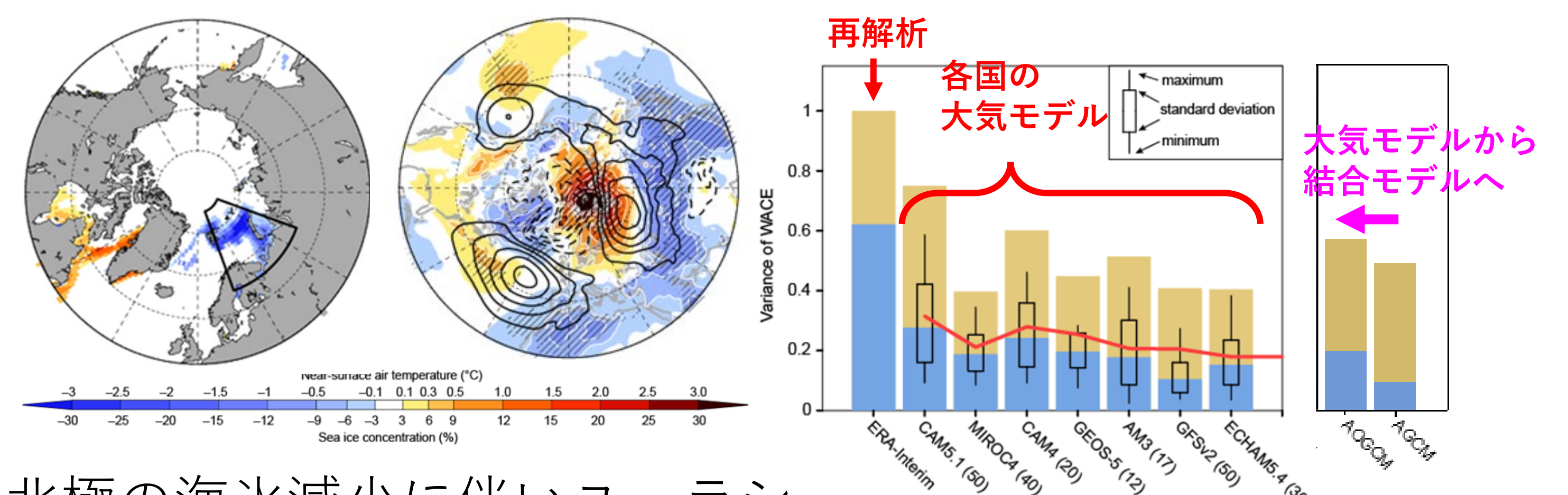
図2 人為起源物質の成分別に寄与を特定する試み (MIROC6によるCMIP6公式実験)



(赤) : 温室効果ガスのみ排出
(黄緑) : 二酸化炭素のみ排出
(青) : エアロゾルのみ排出
(水色) : オゾンのみ排出

DA 海水減少と寒冬/温暖化の不公平性の地域差

図3 海氷の増減と気温の関係を説明。モデルによる再現性能を検証。

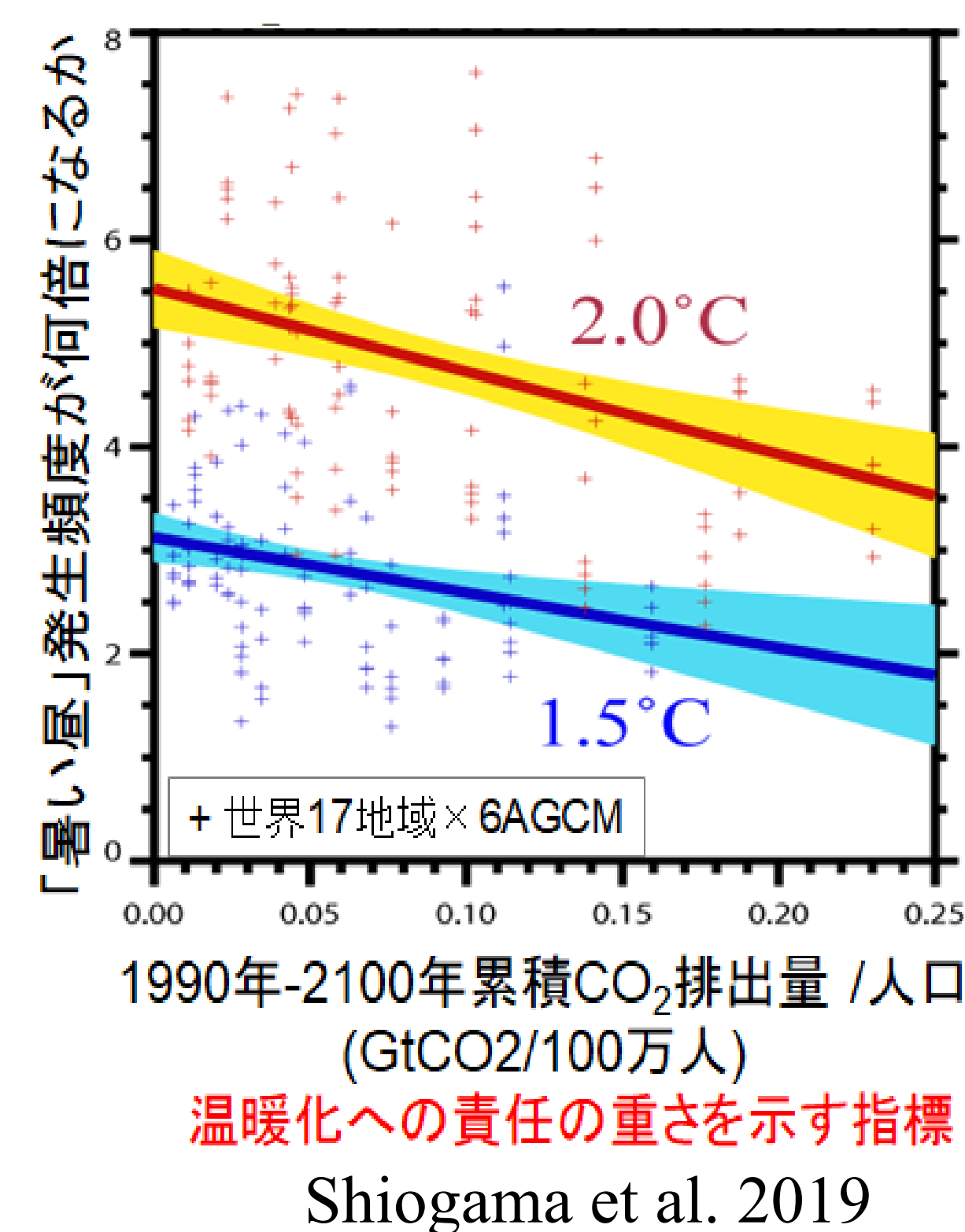


北極の海水減少に伴いユーラシアの寒波が促進されるメカニズムを説明。多くの大気モデルでこの現象の再現が弱いですが、結合モデルにすることで改善が期待されることが分かりました。

(左) : 冬季の海水の増減パターン
(中) : 海氷に関連する冬の気温[色]と海面気圧[線]のパターン
(右) : このパターンの卓越度合い。内、青棒は海水結合の影響。

Mori et al. 2018; 2019

図4 温暖化による異常気象ハザードに関する不公平性を検証

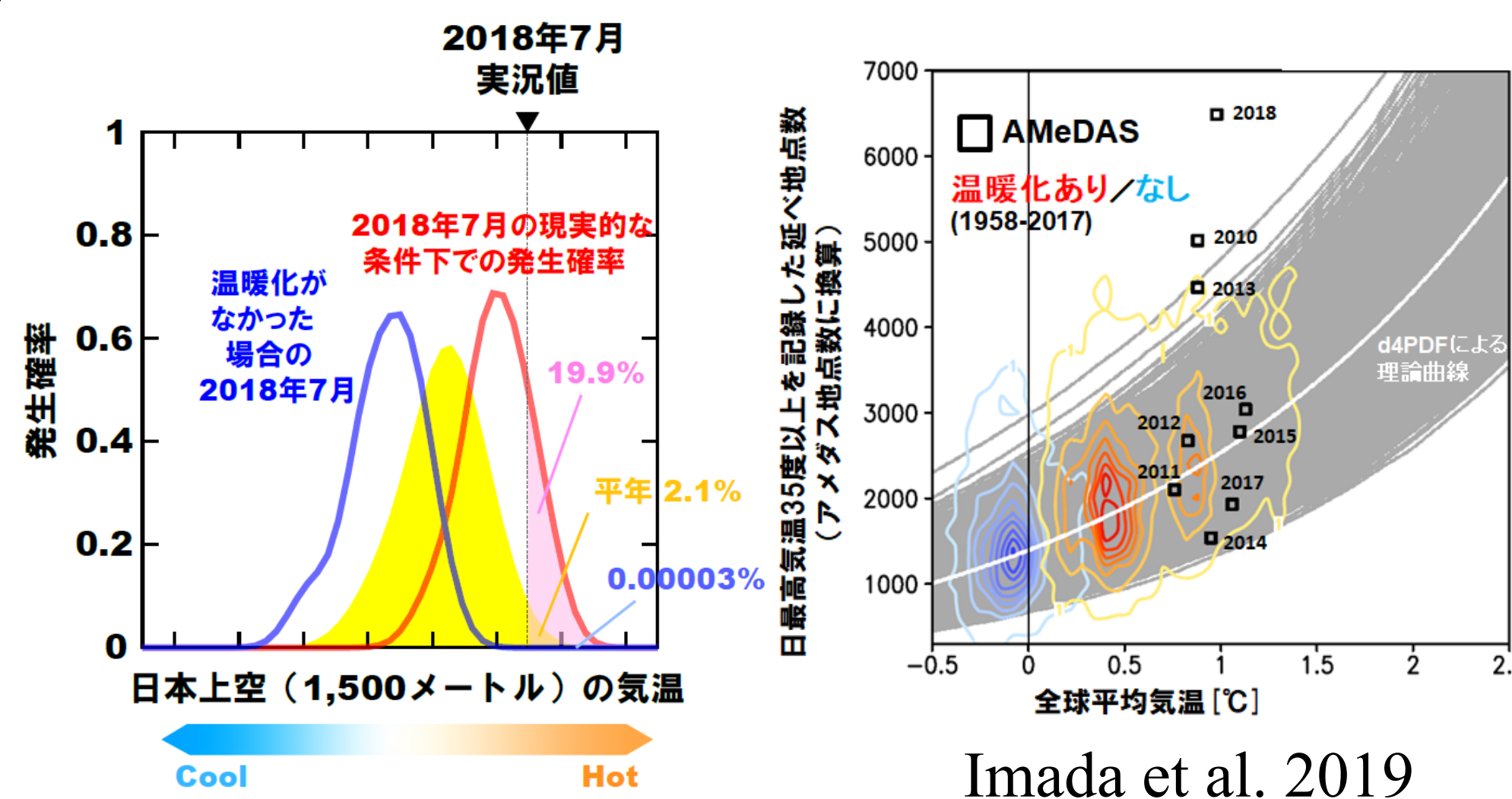


CO₂の排出率が高い国・地域ほど異常気象ハザードの増加は小さい傾向にあり、温暖化に関する不公平性が論争の一因となっています。大気モデルによるアトリビューション実験の結果から、2°C昇温した世界よりも1.5°C昇温に抑えた世界の方が、ハザードが減るだけでなく、不公平性も減少することが示されました。

Shiogama et al. 2019

EA 2018年7月の日本の記録的な猛暑と豪雨

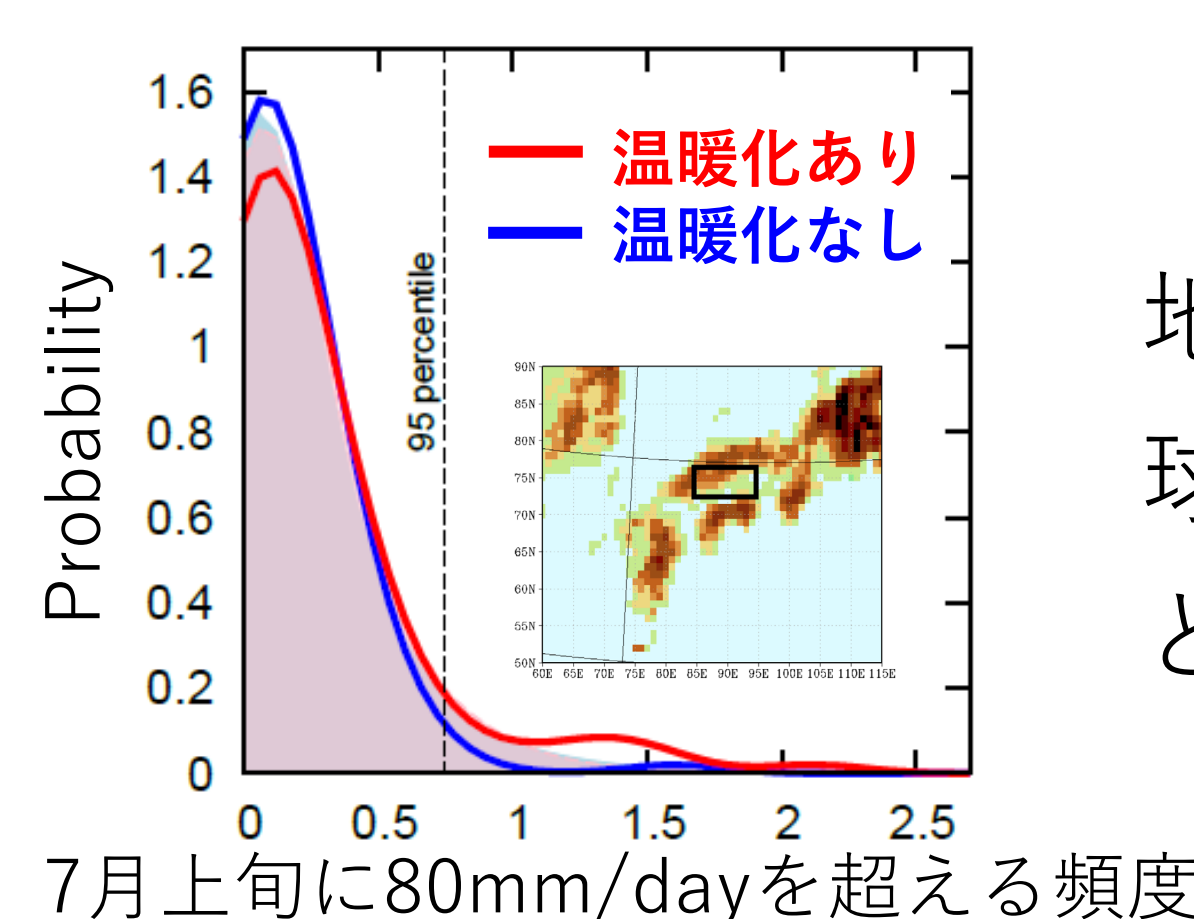
図5 2018年7月の猛暑の発生確率の比較 (左) と日本の猛暑地点数の将来見通し (右)



2018年7月の日本の猛暑は温暖化がなければ起こり得なかったこと、また、2°C昇温した世界では日本の猛暑地点数は1.8倍になることが示されました。

Imada et al. 2019

図6 「平成30年7月豪雨」における瀬戸内地方の豪雨の発生確率



「平成30年7月豪雨」時の瀬戸内地方の極端降水の発生確率が、地球温暖化によって増加していたことが明らかになりました。

Event Attribution (EA)

年々変動や温暖化の状況を特定したある年の確率分布を比較して、極端現象の発生確率に対する温暖化の寄与を見積もる。

Detection & Attribution (DA)

時期や現象を限定せず、短期から長期まで様々なスケールの自然の内部変動を考慮した上で温暖化の影響を定量化する。非温暖化だけでなく、人為起源の物質別、自然起因の要因別に影響を見る実験なども行われている。

改良 大気海洋結合モデルを用いたEA手法の構築

従来のEA研究では気候モデルとして海洋の状態を条件として与えて大気の状態だけを計算する大気モデルが用いられています。大気と海洋の状態を共に計算する結合モデルを用いることで、より正確な確率の見積もりが期待されています。



将来気候予測と雲・降水プロセス

将来気候予測には大きな不確実性があり、温暖化に対する社会的な対応を困難にしています。気候モデルによる将来変化のばらつきは、CO₂倍増時の地表気温変化量で定義される「気候感度」という指標の違いでよく表されます(図1)。IPCCによる気候感度の見積もりは1.5~4.5°Cで、その不確実性の幅は数十年間小さくなっていません。

不確実性の最大の要因は雲・降水プロセスであることが知られています。我々は、(1) 過去再現実験において雲・降水プロセスの表現が良いモデルの将来予測をより信頼する方法、(2) 雲・降水プロセスをより現実的に表現できる高解像モデルによる実験から、将来予測の不確実性の問題に取り組んでいます。

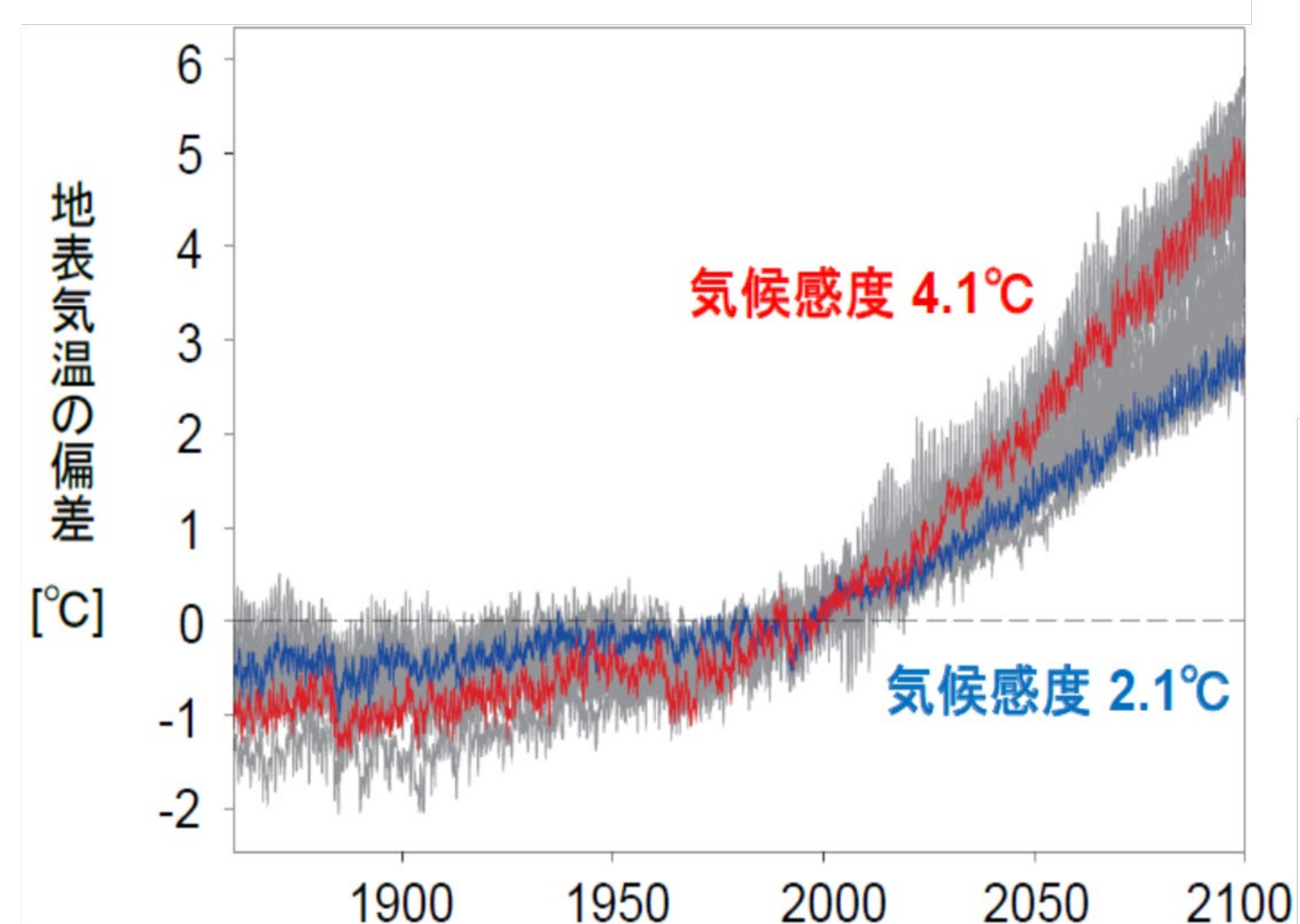


図1 気候感度が2.1°Cと4.1°Cの気候モデルによる過去再現・将来予測実験の地表気温時系列。
Zelinka et al. (2017)の図を改変。

実験1 気候感度はモデル対流のバイアスと関係?

世界の気候モデルCMIPの実験結果から、モデルには、熱帯の乾燥海域における対流が過剰に活発になるバイアスがあり、このバイアスが大きいモデルは気候感度が小さい傾向があることが分かりました。

図2は、CMIPモデルにおける、気候感度と熱帯の比較的乾燥した海域の降水量の関係を示しています。全てのモデルは、この地域の降水量が観測に比べて過大で、対流が過剰に活発なバイアスがあります。また、対流が活発なモデルほど、気候感度が小さい傾向があります。現実の熱帯の乾燥海域では、逆転層が発達し、下層雲が卓越しています(図3a)。温暖化が進むと、これらの雲は減少し、太陽光が地表をより温める雲フィードバックが働きます。しかし、多くのモデルでは、対流が過剰に活発なため逆転層と下層雲の発達が妨げられています(図3b)。このため雲フィードバックが弱くなり、低感度になると考えられます。

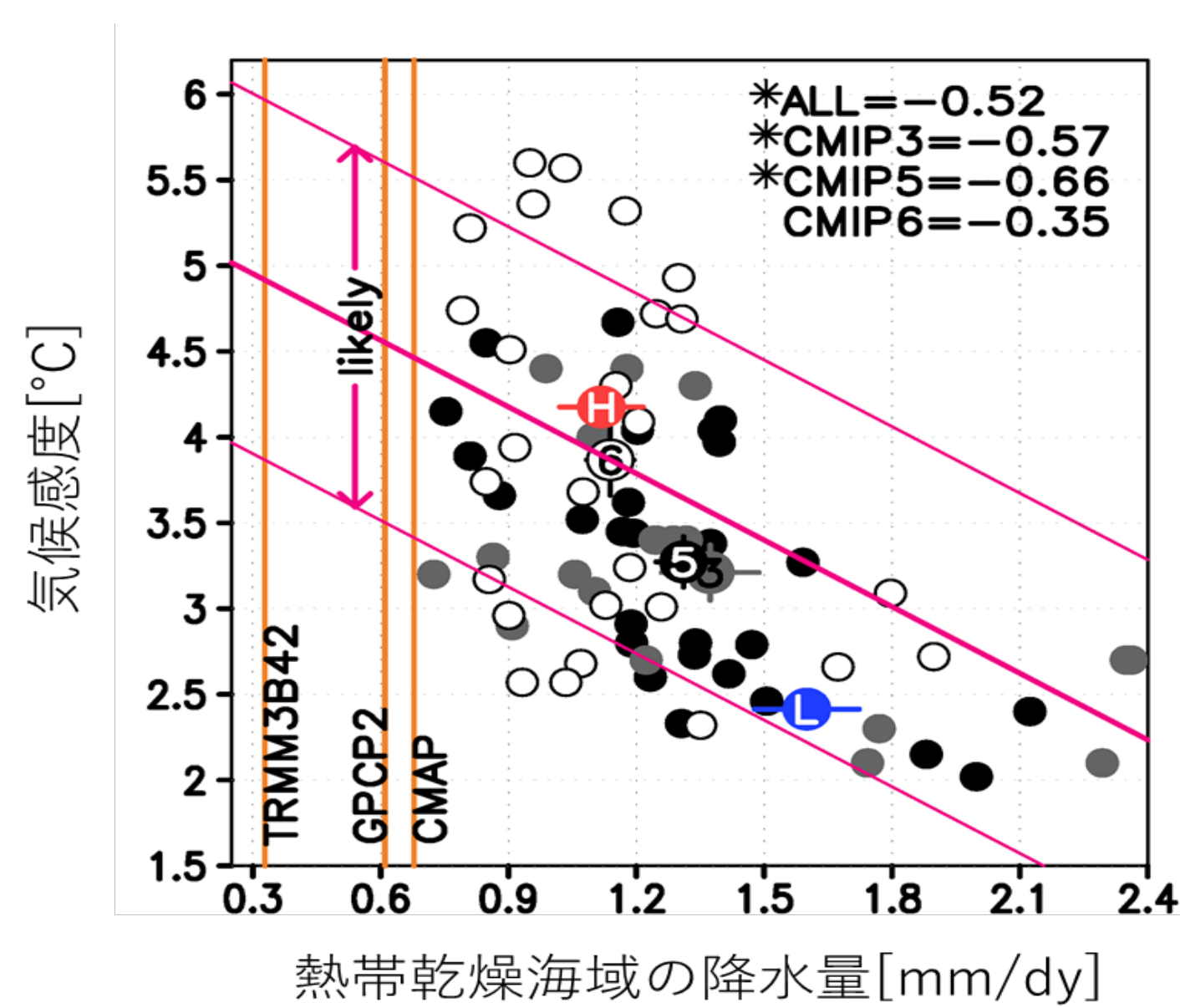


図2 CMIPモデルにおける気候感度(縦軸)と熱帯の乾燥海域(観測降水<1mm/dy)の降水量(横軸)の関係。オレンジ線は観測降水量。ピンク線は回帰直線と、そこから1標準偏差。

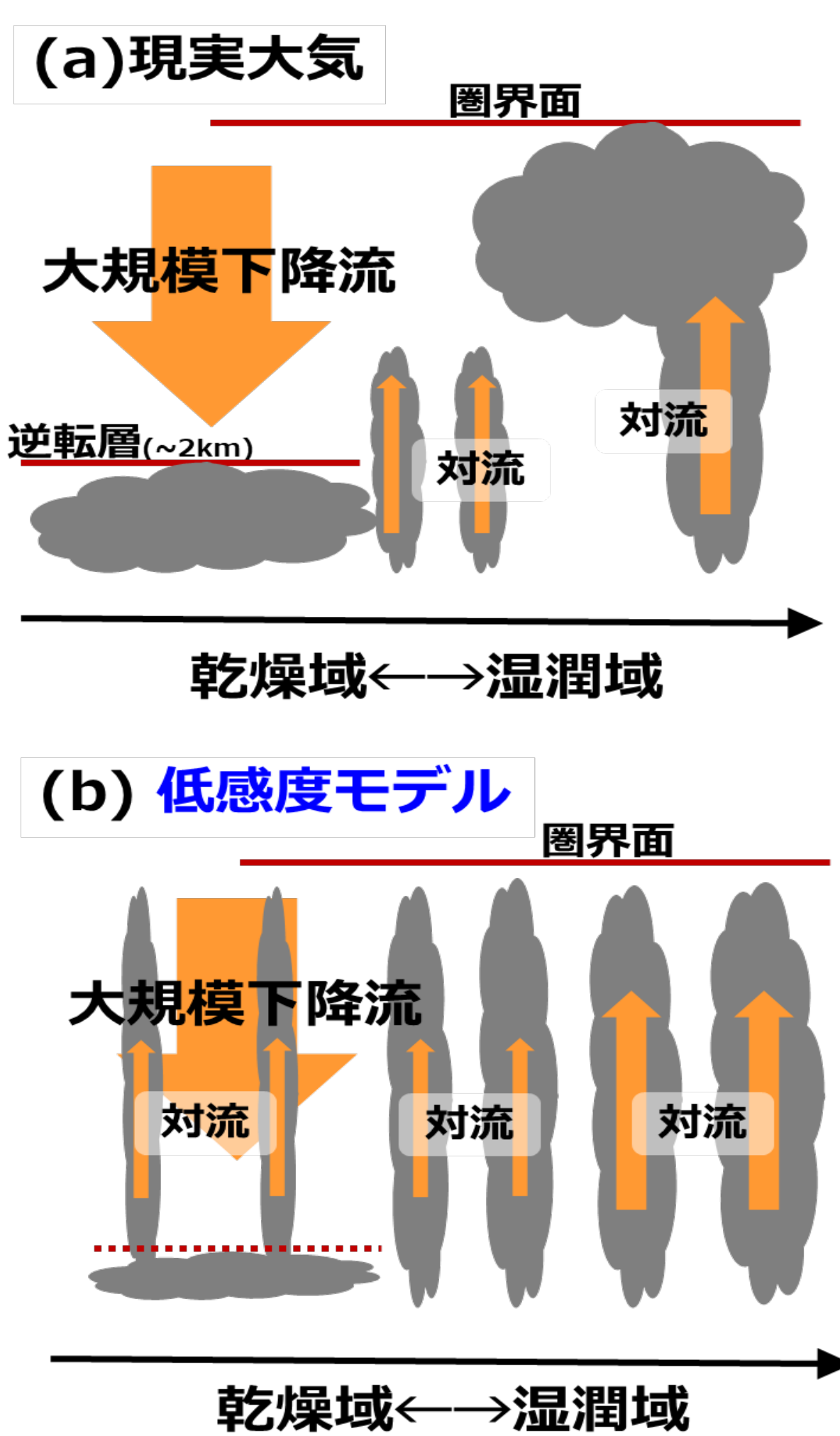


図3 対流と逆転層と低層雲の関係の概念図。
(a) 現実大気、(b) 気候感度が低いモデル。

実験2 将来の熱帯の積乱雲群は小規模化?

熱帯域の背の高い積乱雲群に伴って大気上層に発達する上層雲の広がりの変化は、地球の昇温量を正確に見積もる上で重要になります。全球非静力学大気モデル「NICAM」を用いて行われた約100年後を想定した将来地球のシミュレーションデータを解析し、熱帯域の積乱雲の集団が小規模化(雲が非組織化)する可能性を示しました。将来の温暖化した大気では雲の組織化の強さを表す指標が減少することがわかりました(図4)。更に、熱帯域の大循環の強さとこの指標の間には強い正の相関があり、熱帯域の大気大循環に伴う上昇流が強いほど雲が組織的に発達しているという関係があることから、温暖化によって大気大循環が弱まったことで雲の組織化も弱まったこともわかりました。この結果は、人為起源の温室効果ガスの排出量が増加し温暖化が進行した大気では、熱帯域の雲はより温暖化を強めることを示唆しています(図5)。

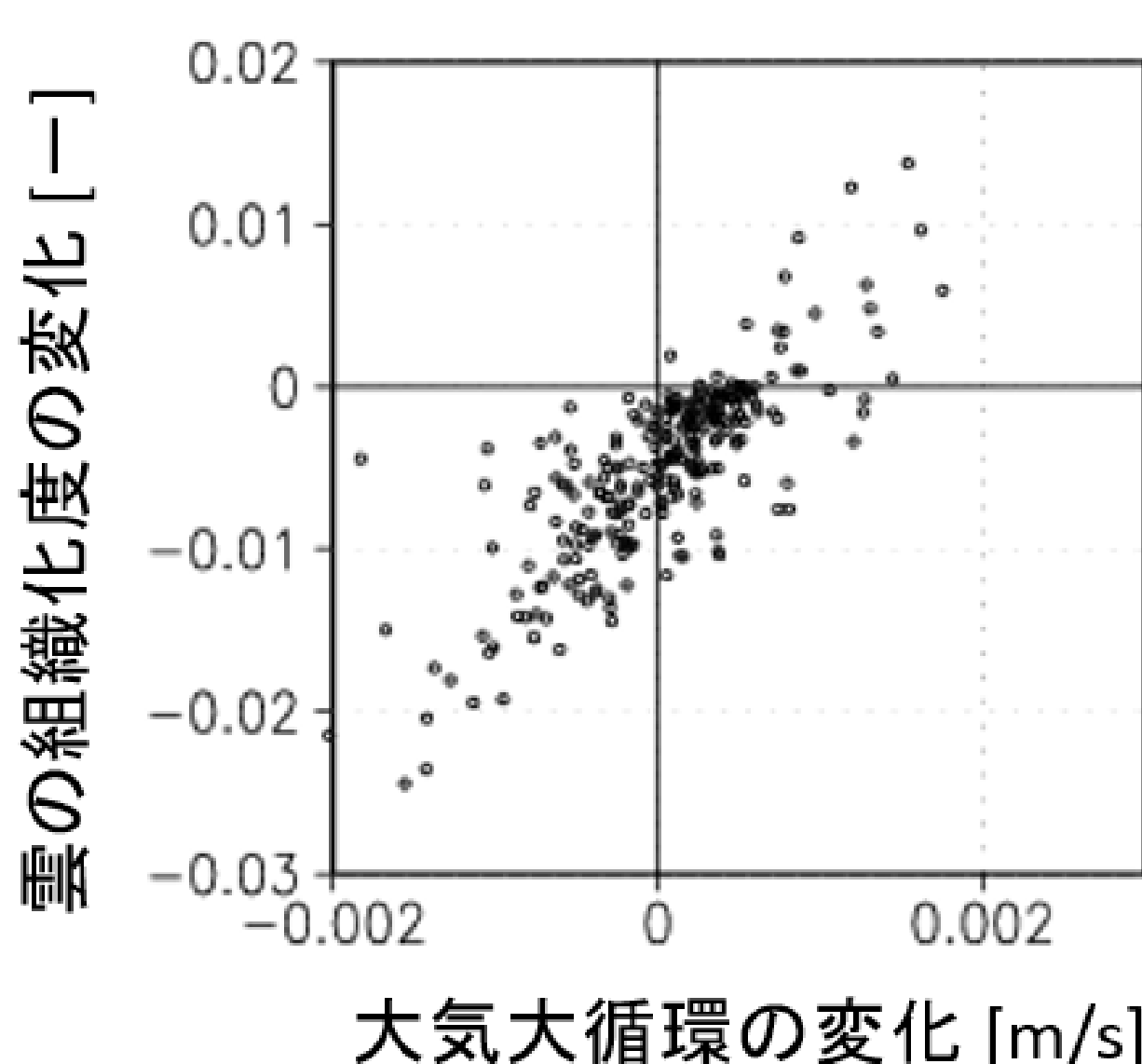


図4(右) 縦軸を雲の組織化の変化と大気循環の強さの変化の関係(雲の組織化の指標は下降流域の面積の割合で定義した。この指標の値が大きいほど雲による上昇流域の割合は小さくなり(雲はより狭い領域で発達している)、雲の組織化が強くなっていると判断される)。

図5(下) 組織的、非組織的に発生している雲とそれらの赤外放射の概念図。雲周辺の濃い水色は冷気塊。矢印は色が濃く太いほど赤外放射量は大きい。

