



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

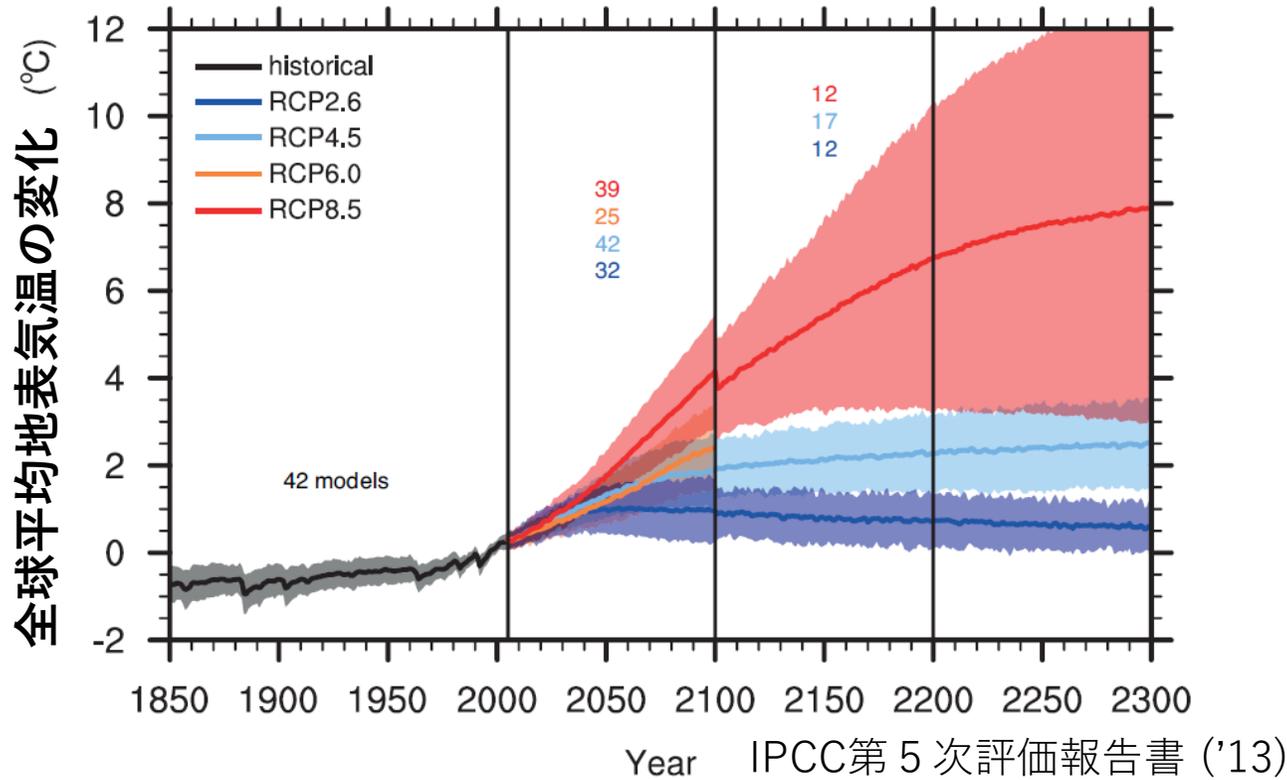
地球温暖化と雲・エアロゾル

鈴木健太郎（東京大学大気海洋研究所）

統合的気候モデル高度化研究プログラム オンライン講演会

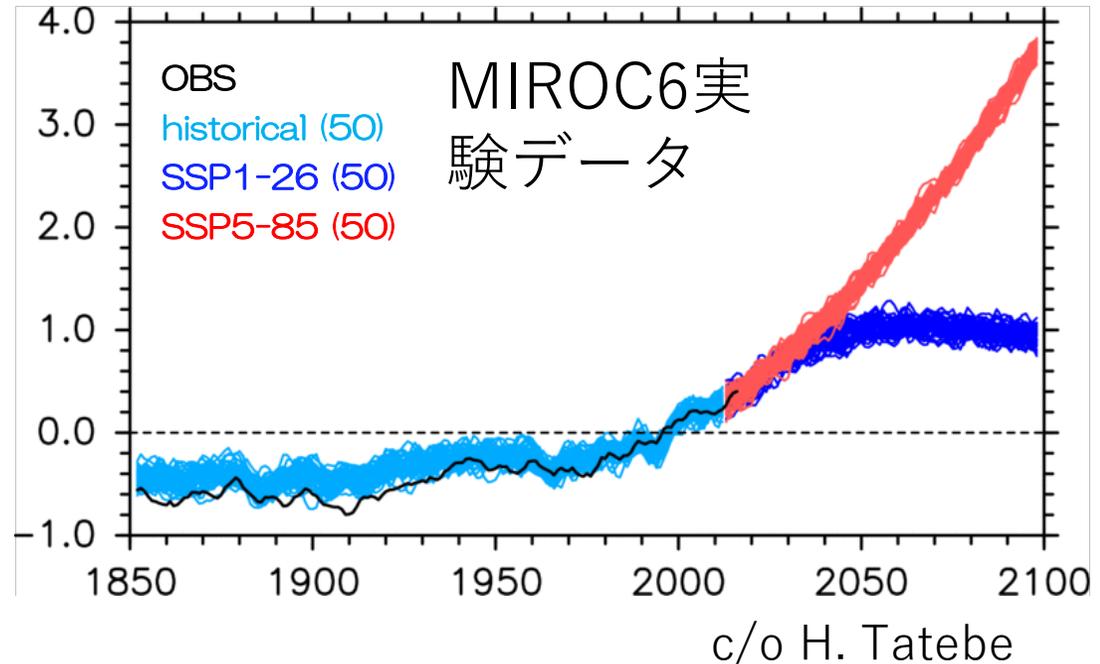
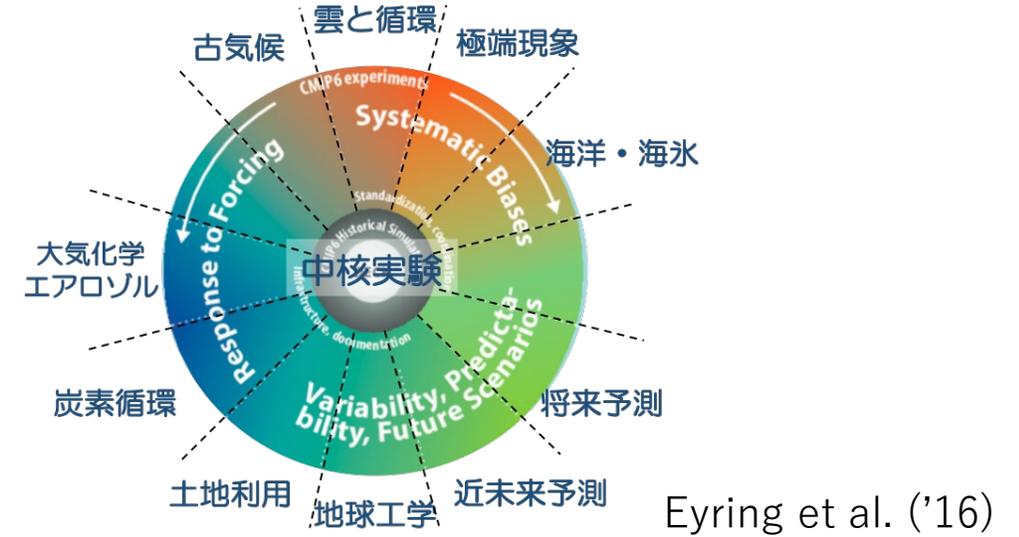
2020年10月16日

温暖化予測への取り組み



- 依然として不確実性が大きい
- IPCC第6次評価報告書が準備されている
- 統合プログラム(テーマA)からの貢献:
 - 気候モデル数値実験の実施とデータ提供
 - 気候モデルの高度化: 特に雲と降水

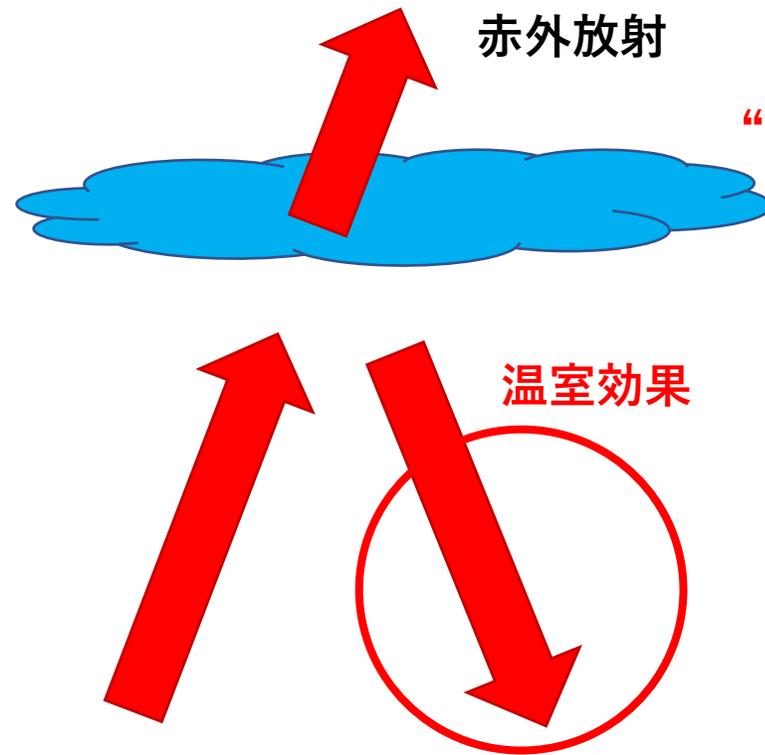
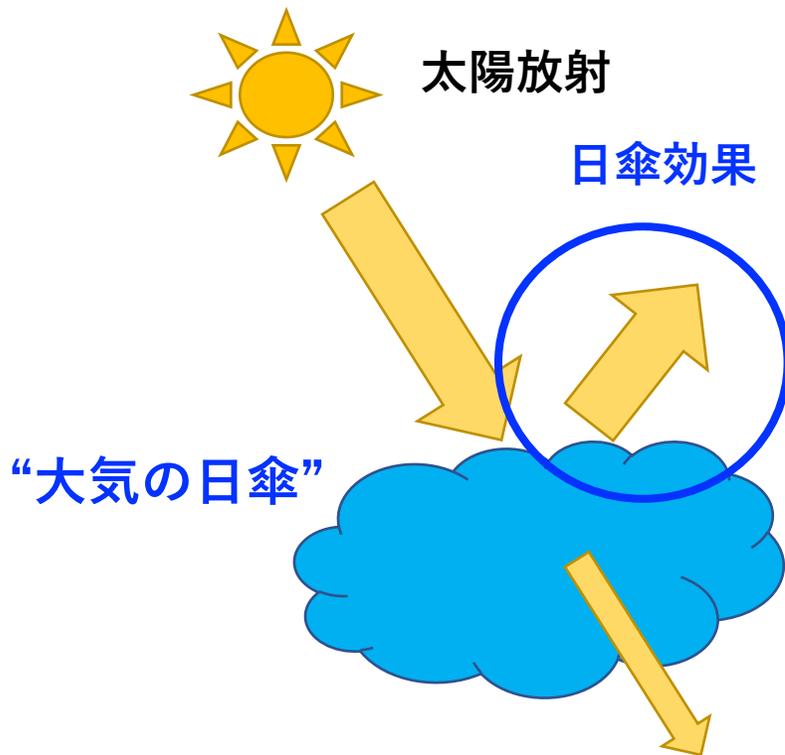
気候モデル国際相互比較 CMIP6



気候予測を難しくしている要因: 雲

- 低い雲: 日傘効果(冷却)
- 高い雲: 温室効果(加熱)
- 正味では雲は地球を冷却

- 気候変化に伴って高い/低い雲は増える/減るのか?
 - 雲は温暖化をどの程度加速/減速するのか?
- > 最新の気候モデルでも答えは大きくバラついている



- 鍵となる雲の性質:
- ✓ 雲の高さ
 - ✓ 雲の広がり
 - ✓ 雲の湿り具合
 - ✓ 水の雲か氷の雲か

地表面

地球の気候と雲 - 地球は“青い惑星”か？



- 雲は地球を“白っぽく”している
- 地球の“白さ” = 太陽エネルギーをどの程度宇宙に反射するか

ひとつの大きな謎

- 宇宙から見た“白さ”:
北半球 = 南半球
- 地表面(海と陸)の“白さ”:
北半球 > 南半球
- 雲に覆われた面積:
北半球 < 南半球

ひまわり 9 号初画像 (気象庁HPより)

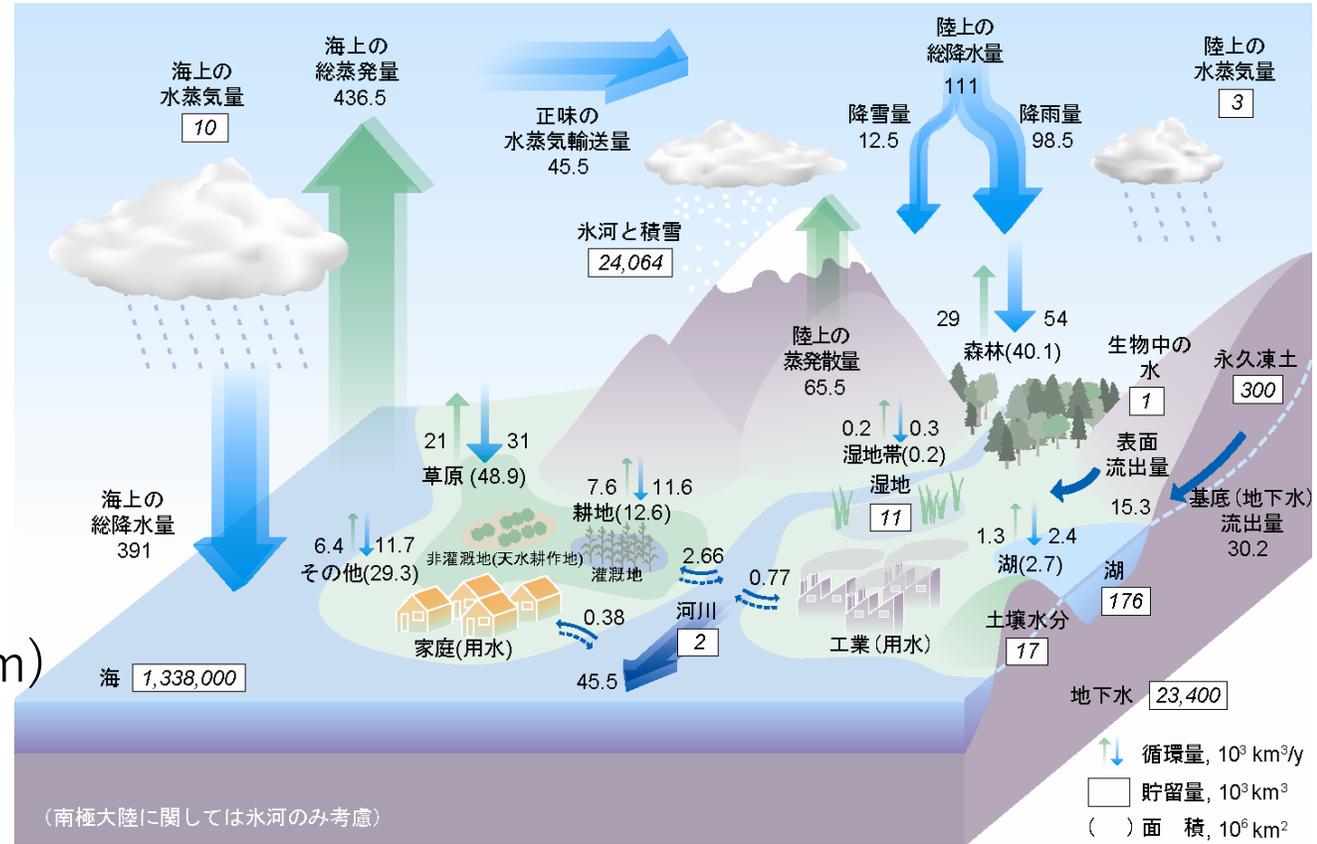
http://www.jma-net.go.jp/sat/data/web89/parts89/himawari9_first_image/tcr/tcr_l.jpg

地球の水循環における雲

地球表層の水の内訳:

- ◆ 96.5%: 海洋 (厚さ~3km)
 - ◆ 1.7%: 氷河氷床・積雪
 - ◆ 1.7%: 地下水
 - ◆ ~0.03%: 湖沼河川・凍土
 - ◆ ~0.001%: 水蒸気
 - ◆ ~0.00001%: 雲
- } 大気の水 (厚さ~2.5cm)

降水量: ~2.7mm/日 ~0.1mm/時

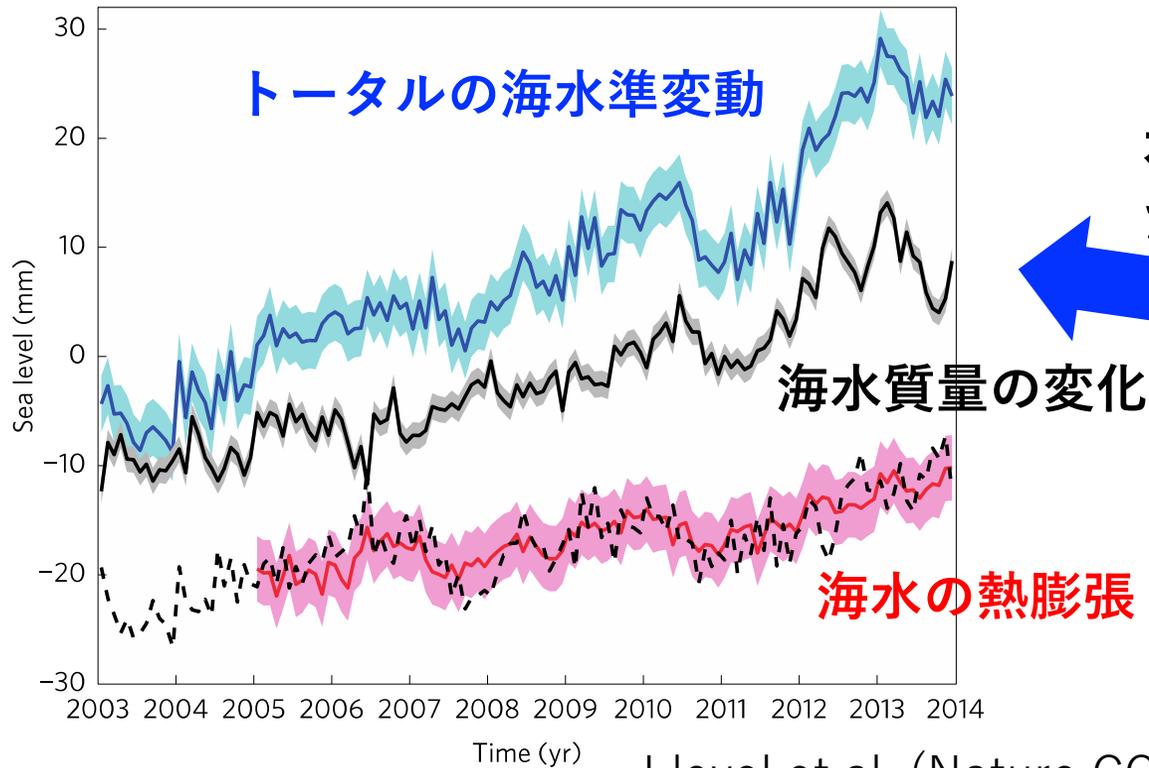


Oki and Kanae (Science '06)

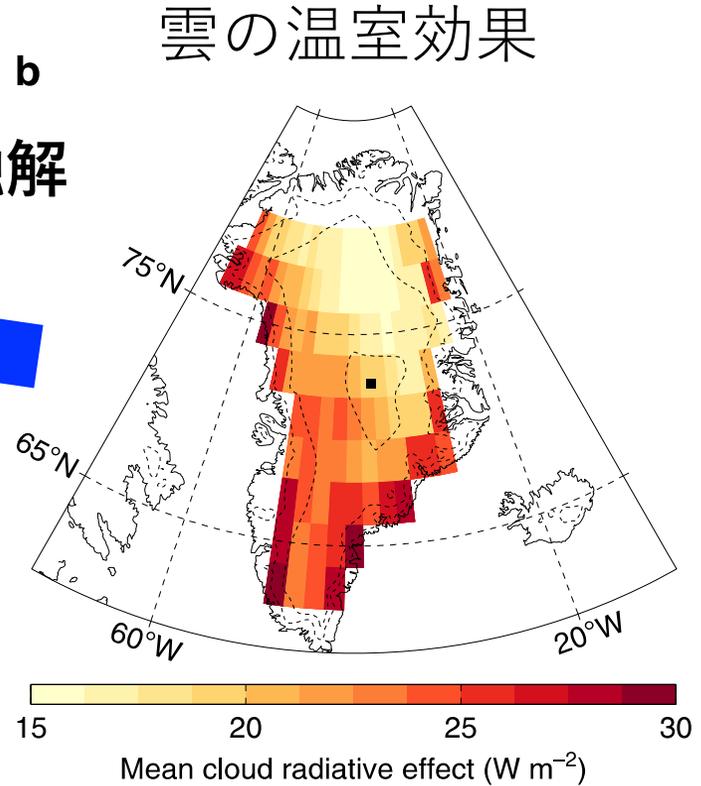
雲は質量比では“ちっぽけな存在”だが

- 日傘/温室効果を“てこ”にして地球の水を動かす
- 気候モデリングにとって大きなチャレンジ

地球の水循環への雲の影響: ひとつの例



Llovel et al. (Nature CC '14)

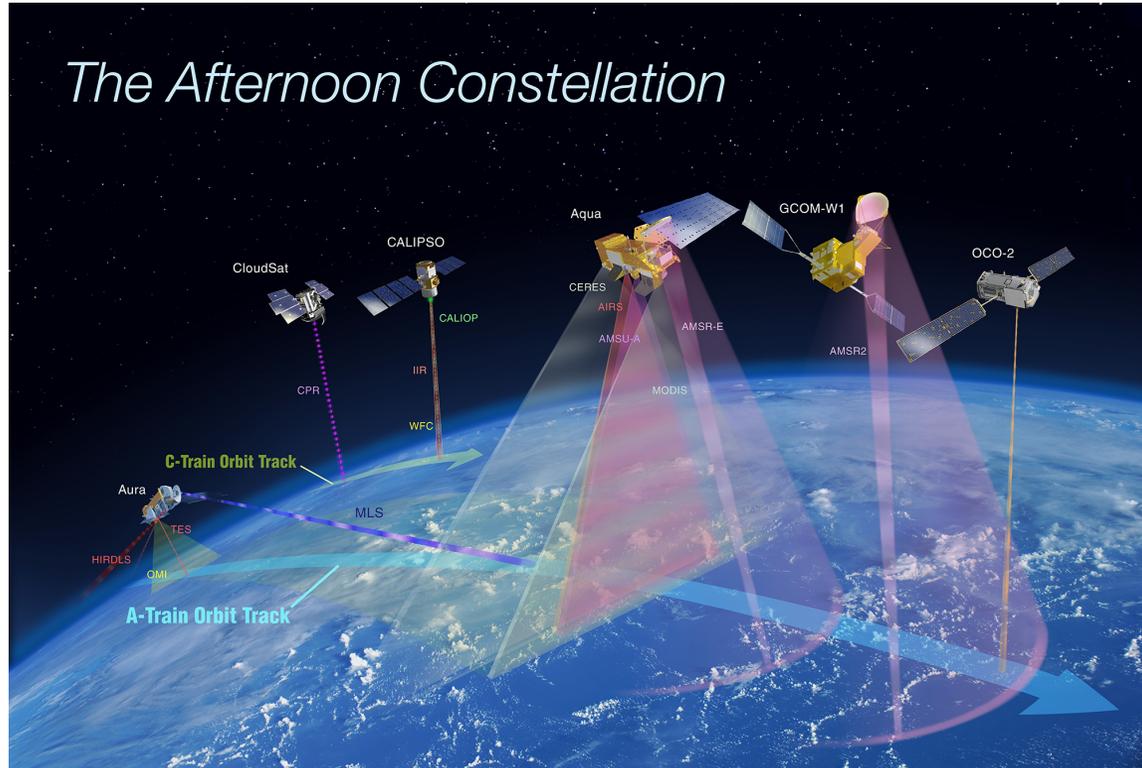


Van Tricht et al. (Nature Comm. '16)

- 海水準変動 = 海水質量の変動 + 海水の熱膨張
- 海水質量の増加には、氷床の融解が大きく寄与
- 氷床の融解は部分的に雲の温室効果に起因

衛星からの地球観測

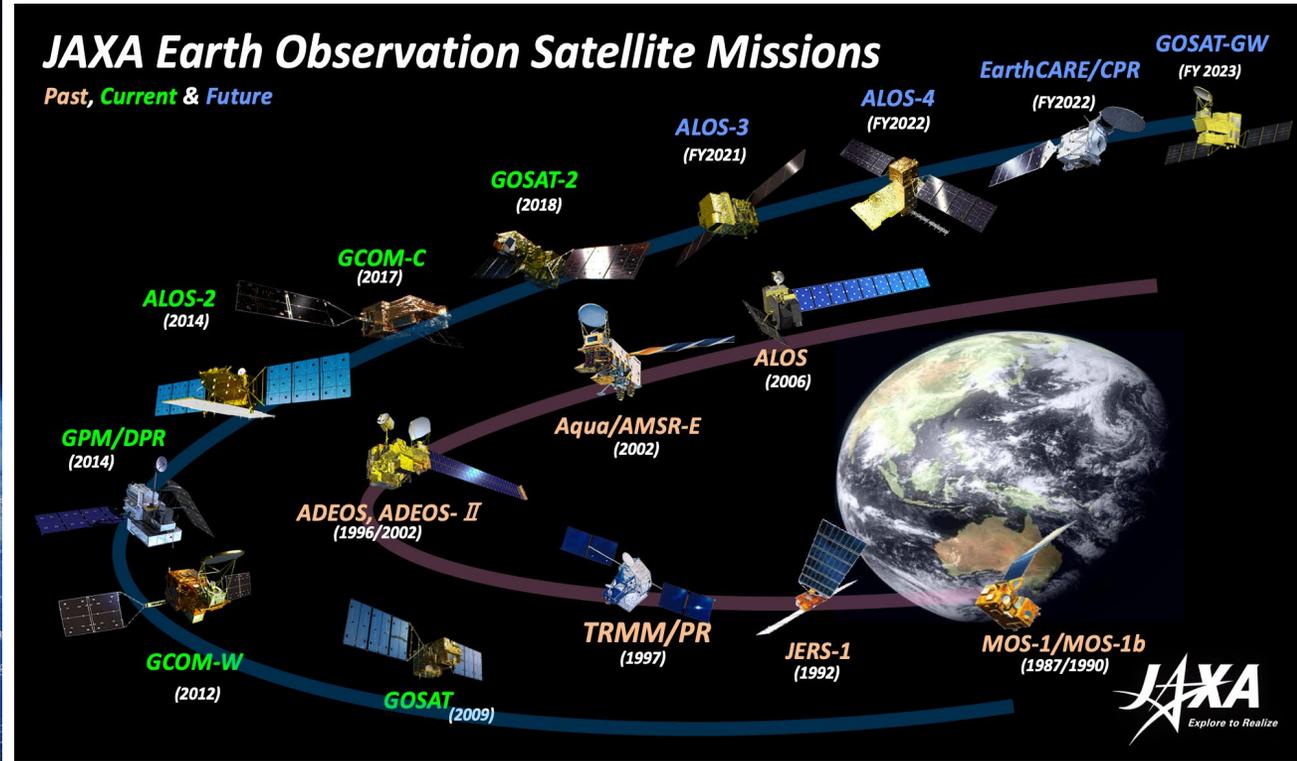
NASA “A-Train” 衛星群



Credit: NASA, <https://atrain.nasa.gov>

- 複数の人工衛星で地球の様々な側面を観測
- 宇宙からの衛星地球観測は“黄金時代”を迎えている
- 雲・降水についても新たな観測情報

JAXA 地球観測衛星



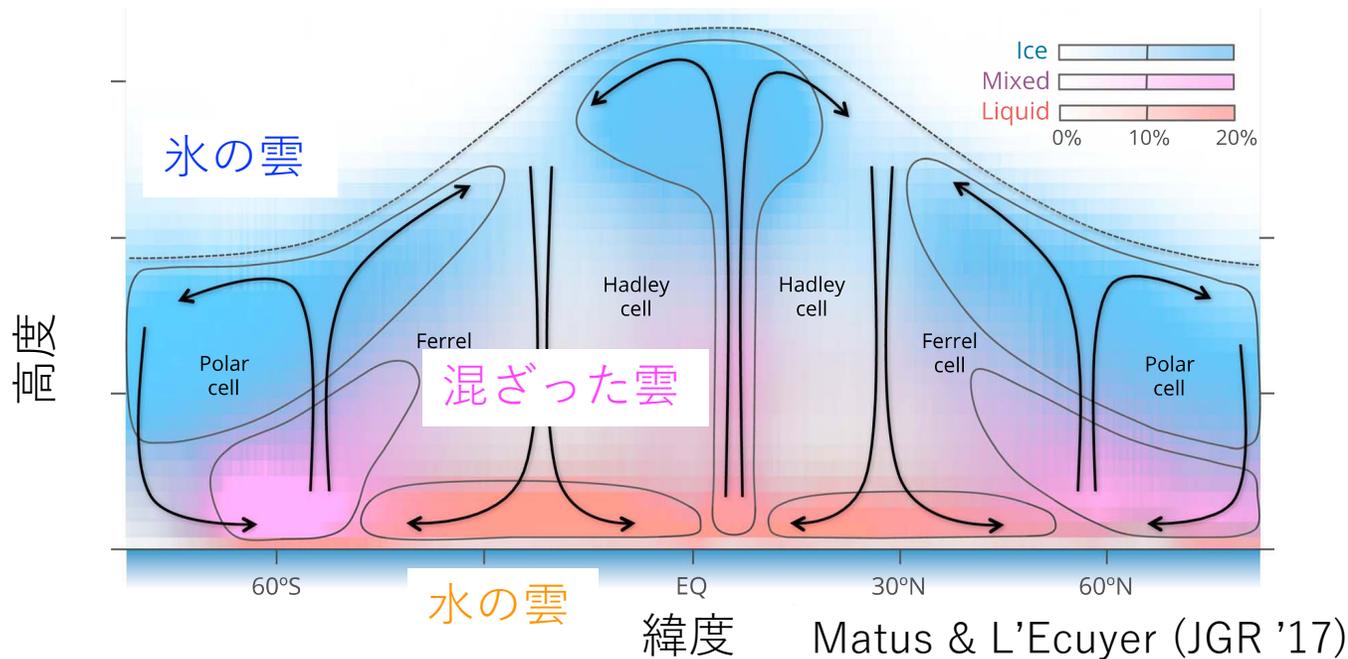
衛星観測でわかってきた雲・降水の新しい情報

■雲はどのように大気に浮かんでいるのか

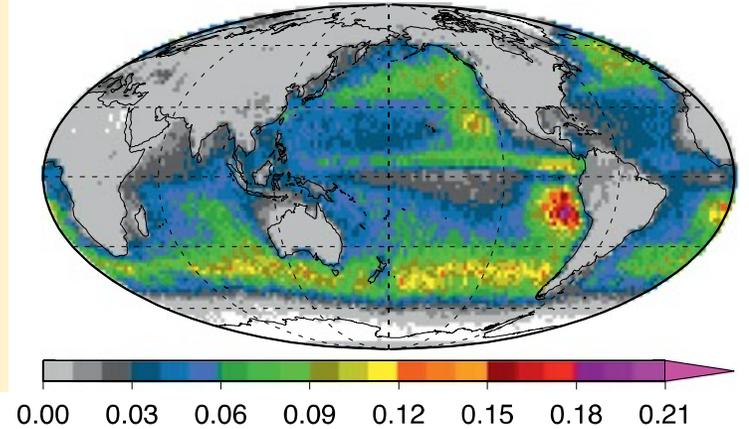
- ✓ 雲の高さ、湿り具合、水か氷か etc.

■雨はどのように降るのか

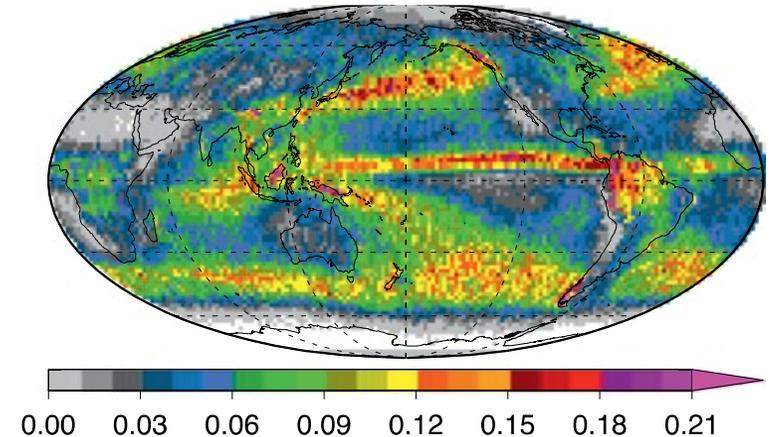
- ✓ 降水の頻度、強度、高さ etc.
- > 雲と降水の仕組みに関する知見
- > 気候モデルの雲・降水の検証・改良が可能に



弱い雨の頻度

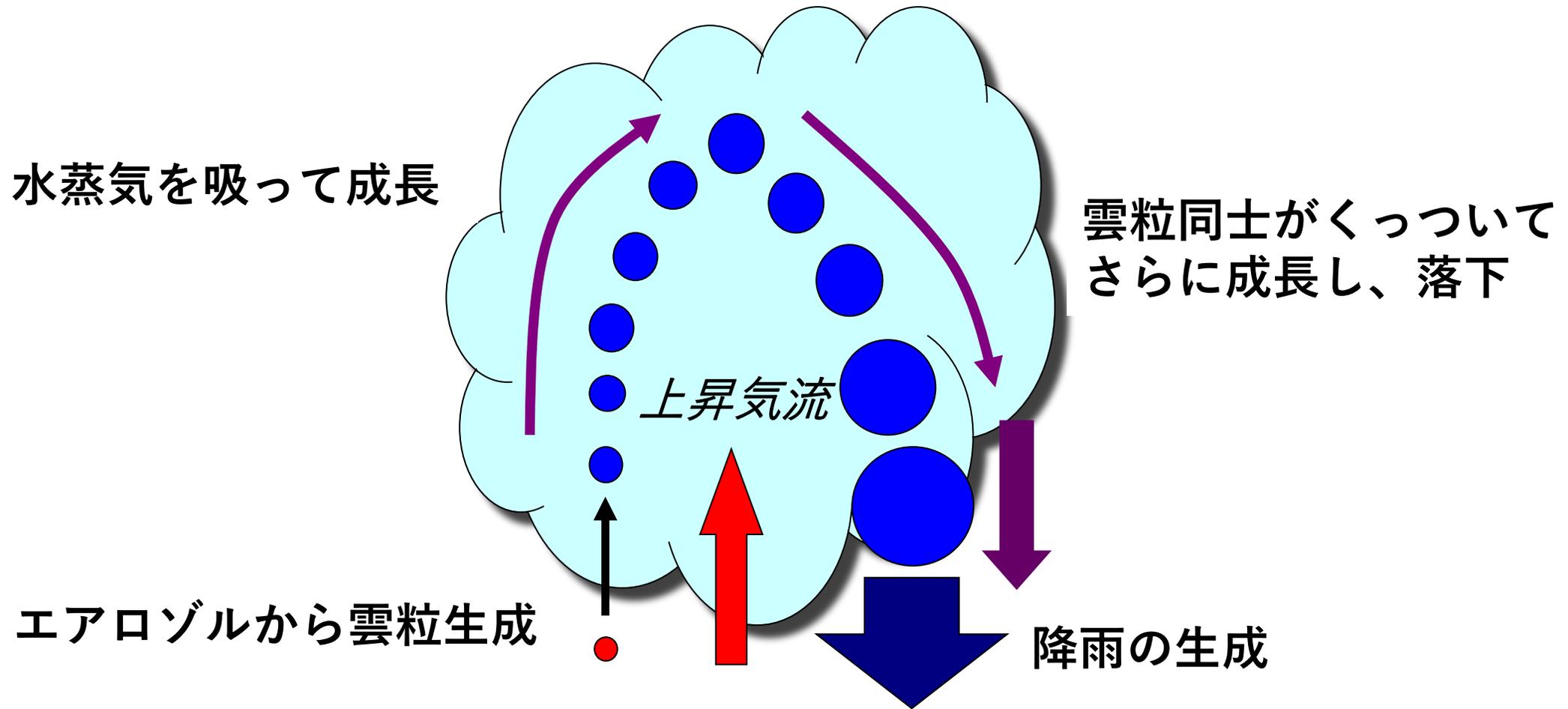


強い雨の頻度



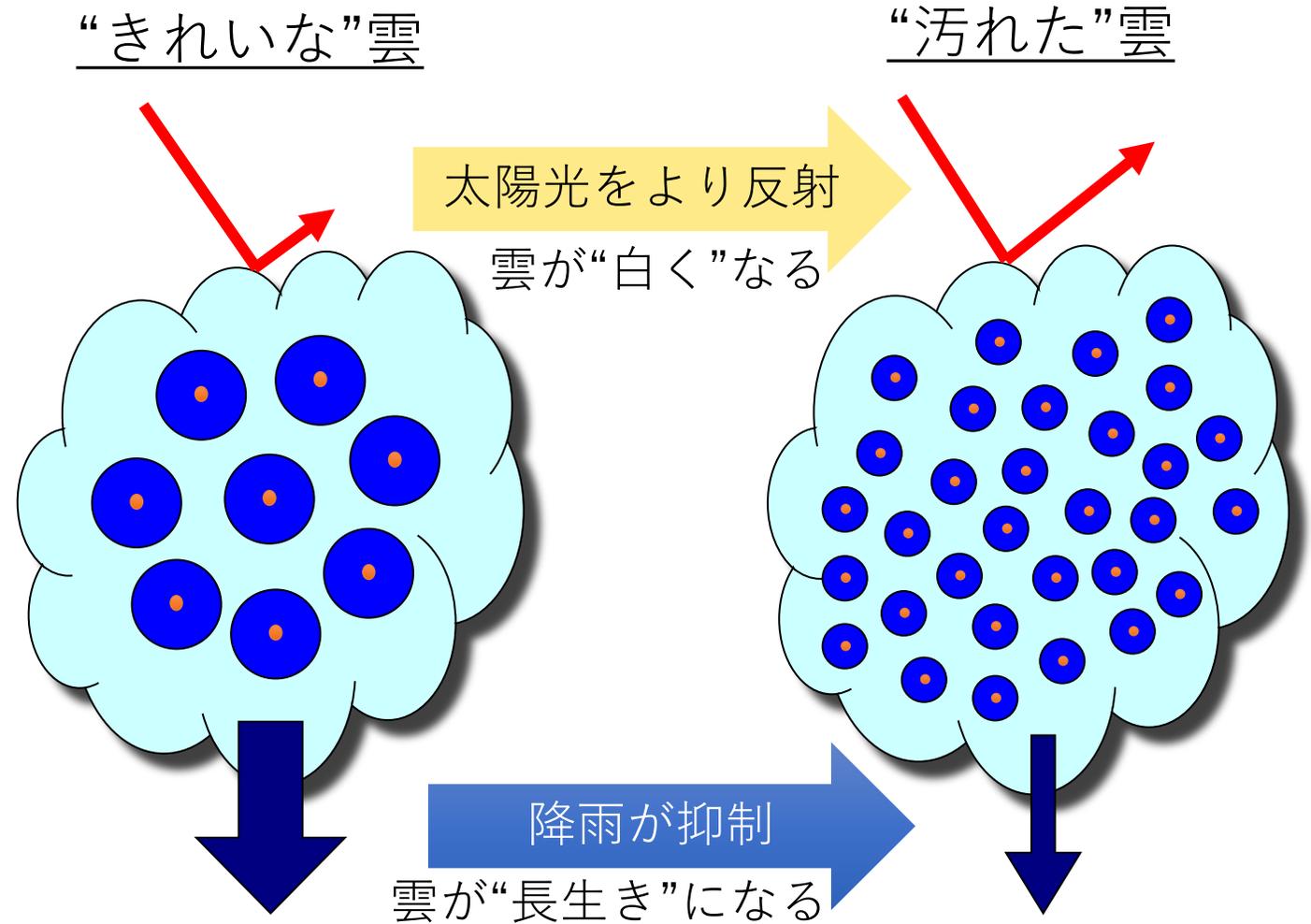
Stephens et al. (BAMS '18)

雲からどのように雨が降るのか？



- 雲粒の大きさがある“臨界”を越えると、雨が降る
- 雲の生成には種となる微粒子(エアロゾル)が必要

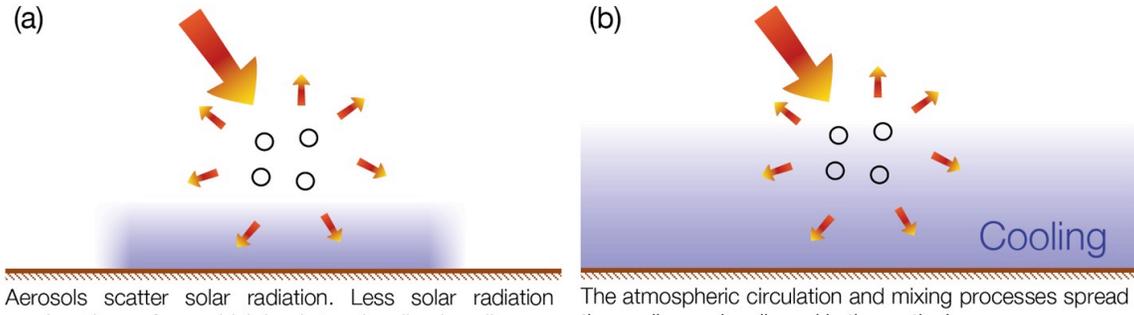
エアロゾル（大気微粒子）とその雲への影響



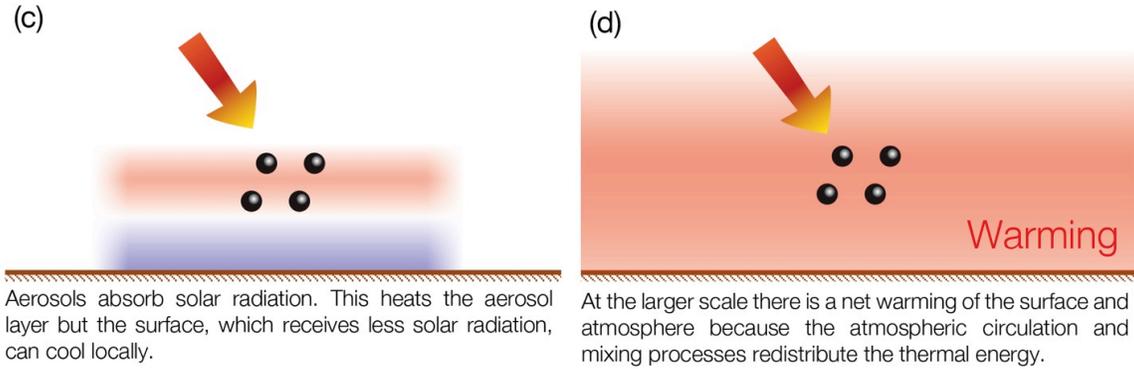
- 自然起源のエアロゾル: 森林火災, 黄砂, etc.
- 人為起源のエアロゾル: 都市大気汚染, バイオマス燃焼, etc.

エアロゾル（大気微粒子）の気候への影響

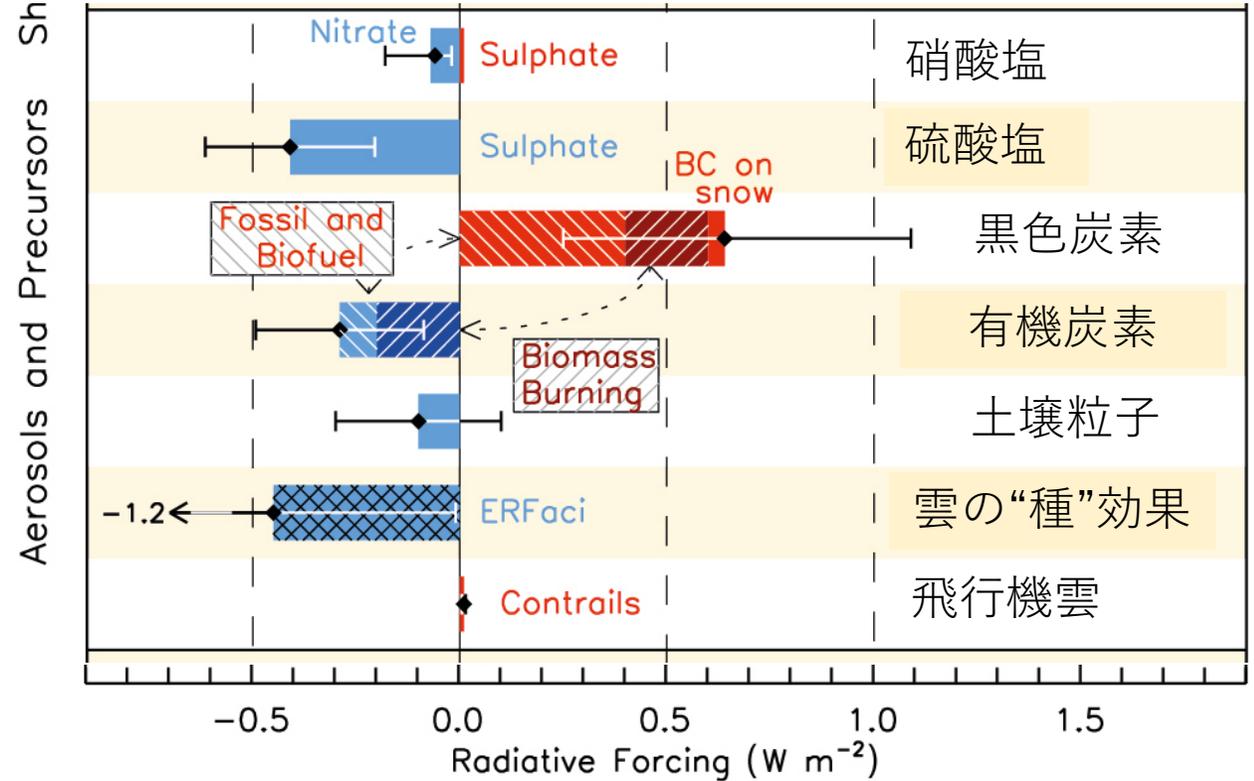
“白い”エアロゾル（例: 硫酸塩）



“黒い”エアロゾル（例: 黒色炭素）



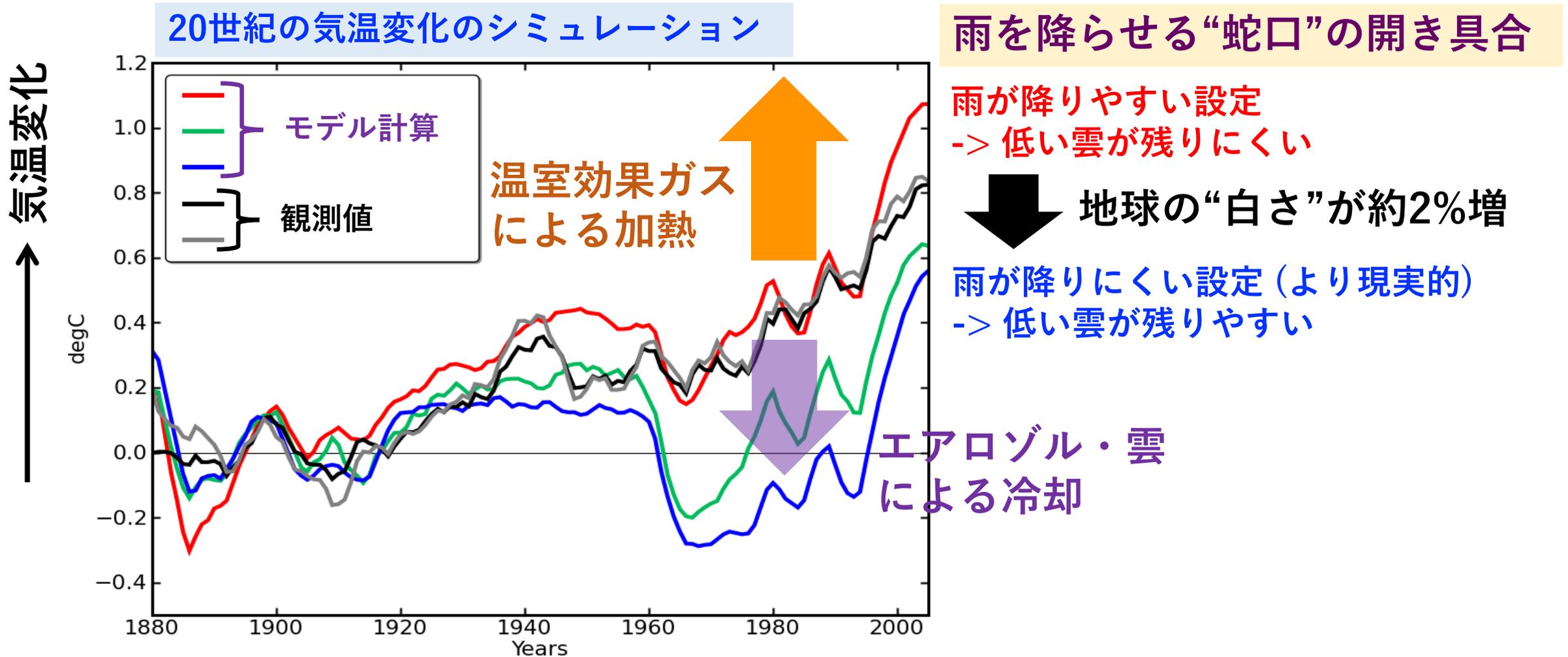
“白く”する ← → 地球を“黒く”する



IPCC第5次評価報告書（'13）

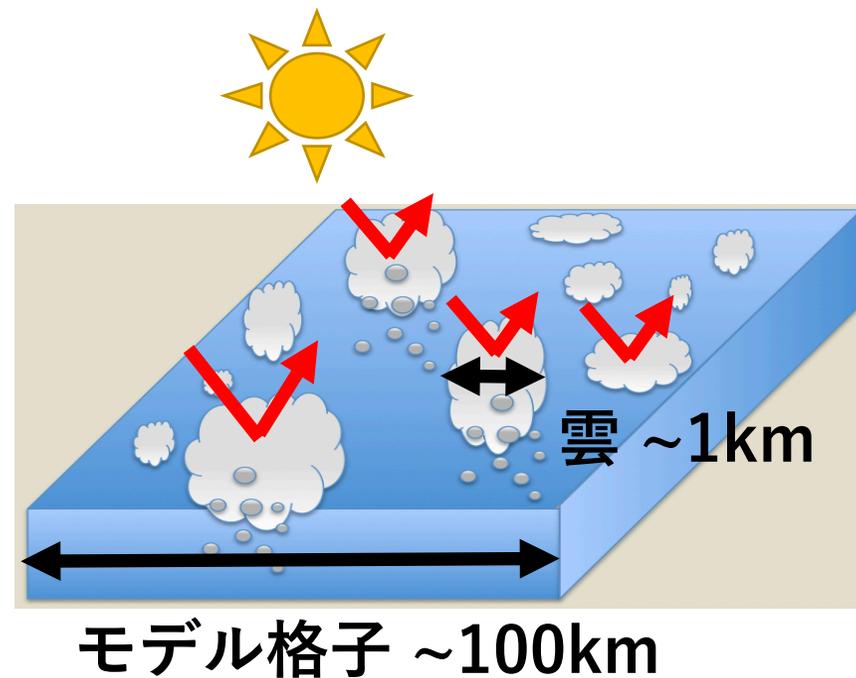
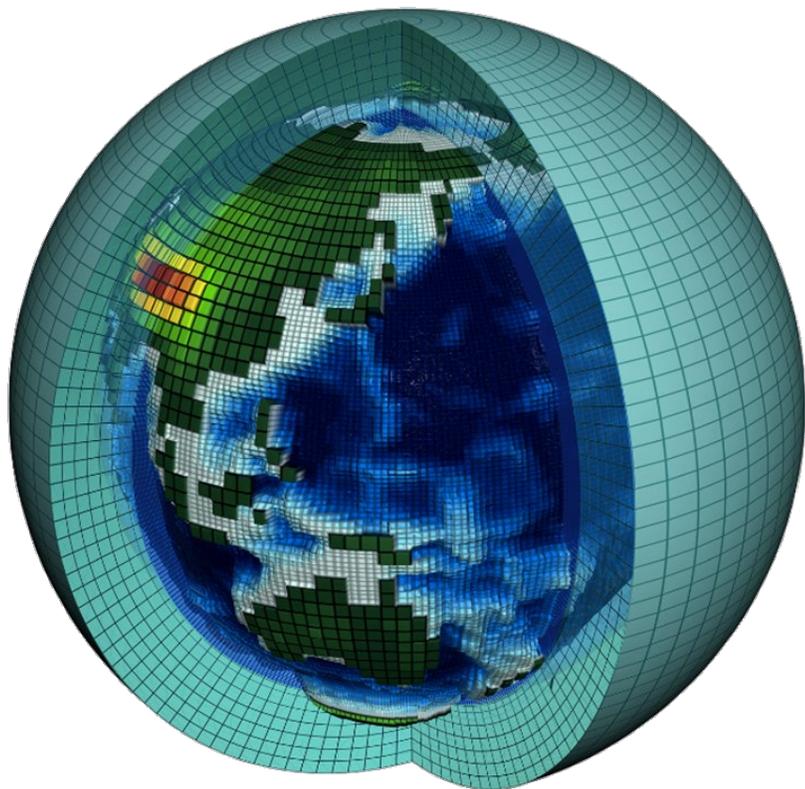
- 冷やすエアロゾルと温めるエアロゾルがある
- 雲の種になるはたらきによって、雲をより“白く”する
- 正味では冷却効果だが、その大きさには不確実性が大きい

エアロゾル・雲の気候予測への影響



- 気候の状態は地球の“白さ”に敏感に依存する
- 雲の小さな変化が気候の予測結果に大きく影響する

気候モデルで雲はどう表現されているか？



- 気候モデルは雲を直接解像していない
- 雲に関わる現象は近似的に表現される
- モデルの“構成部品”の中で、雲は特に不確実性が大きい

統合Pでの取組み: MIROC気候モデルの高度化

従来型モデル



雨と雪の降り方を簡略化して表現

改良版モデル



雨と雪が降る様子を詳しく表現

雲の再現性の向上

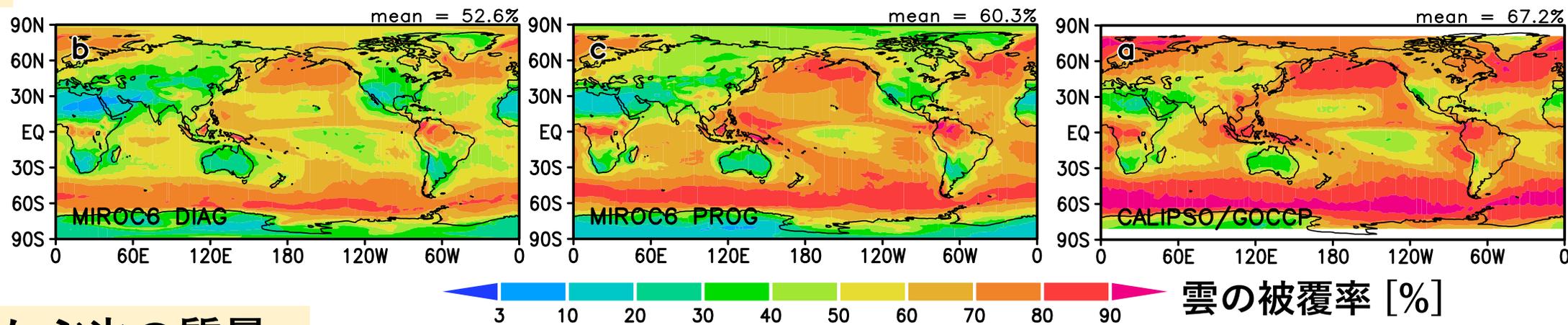
Michibata et al. (JAMES '19, ACP '20)

雲の分布

改良前のMIROC

改良後のMIROC

衛星観測

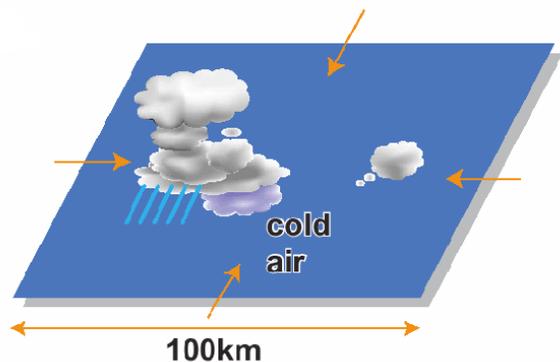


大気に浮かぶ氷の質量

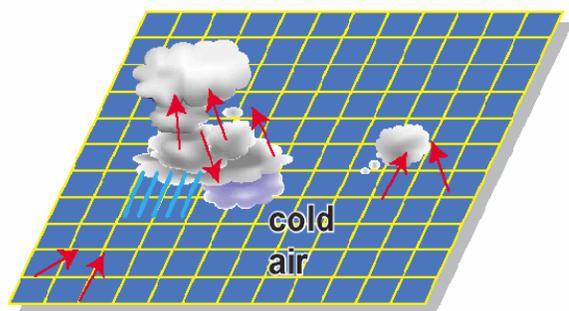
高度

もうひとつのアプローチ: 全球雲解像モデリング

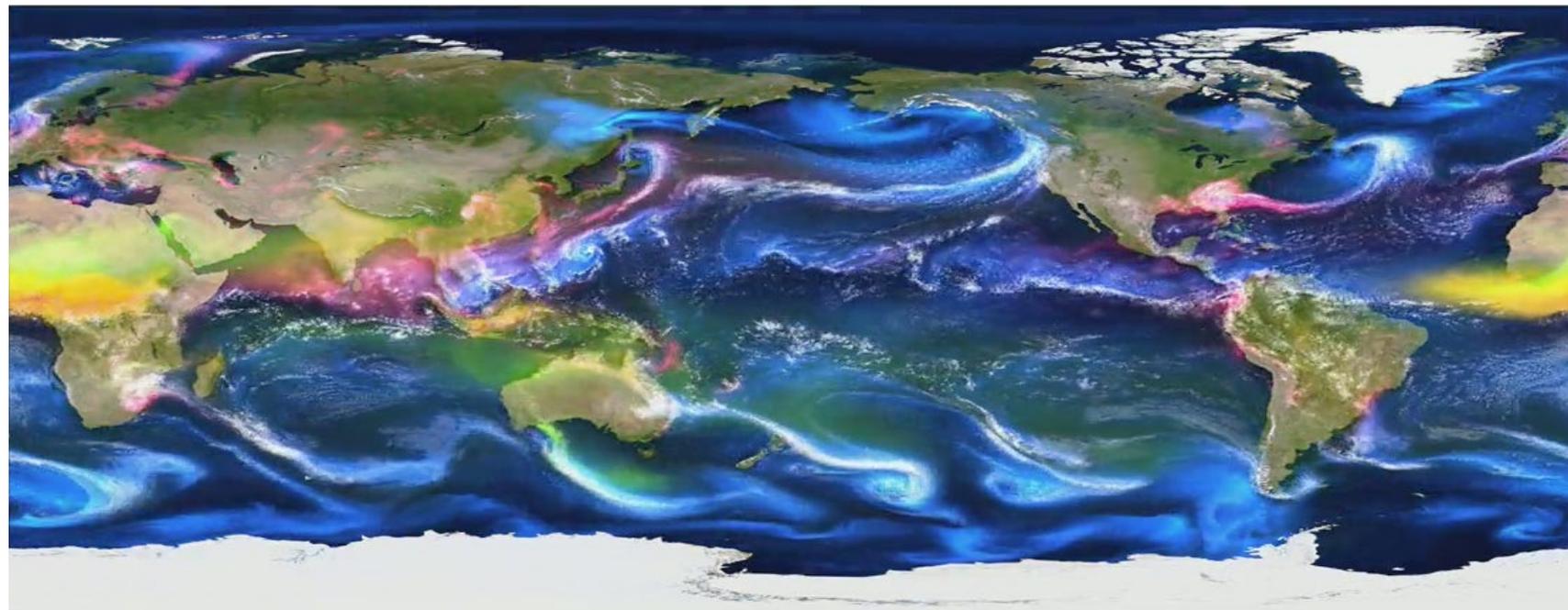
伝統的な気候モデル



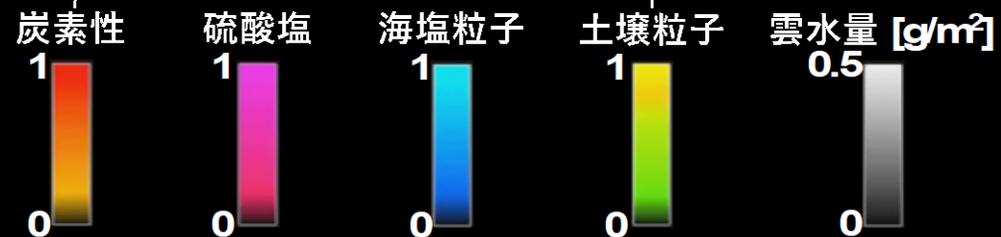
全球雲解像モデル



c/o M. Satoh

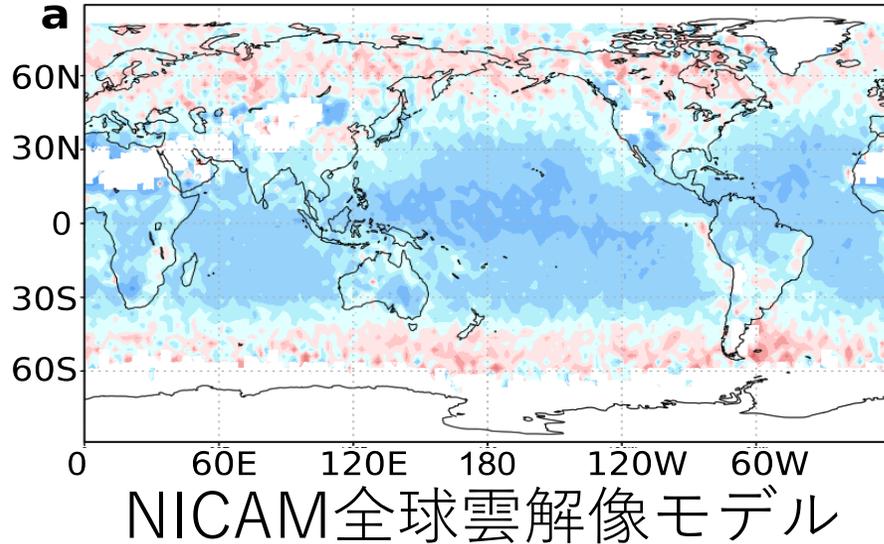


エアロゾル光学的厚さ

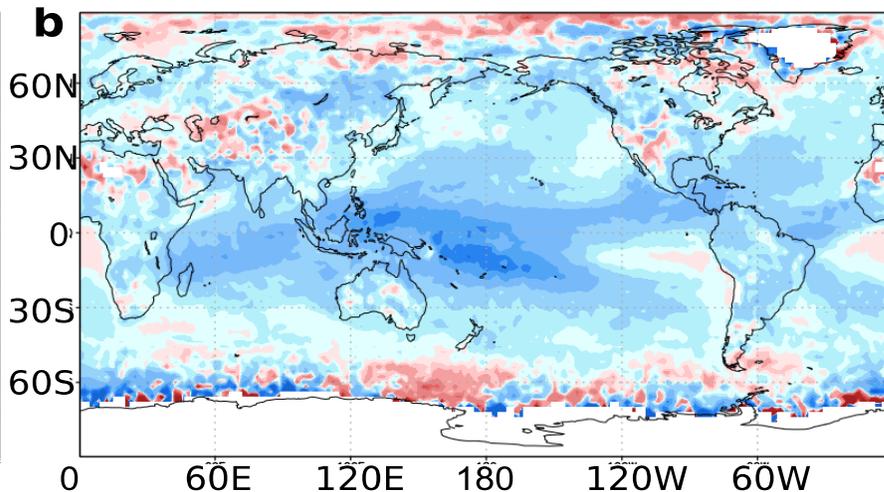
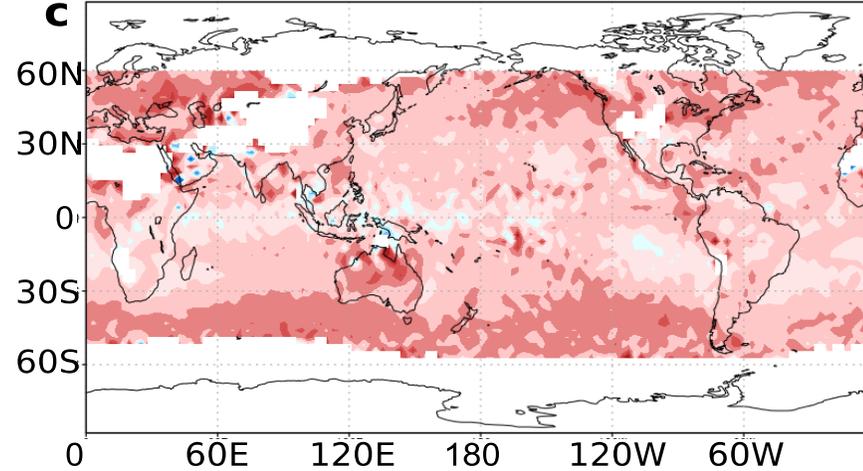


エアロゾルの増加に対する雲の反応

衛星観測

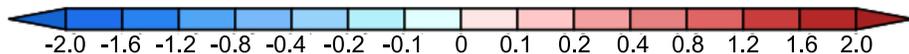


MIROC気候モデル



- 従来型気候モデル:
 - 大気微粒子によって雲は常に湿る
- 全球雲解像モデル:
 - 雲の多様な反応を再現する

雲が乾く

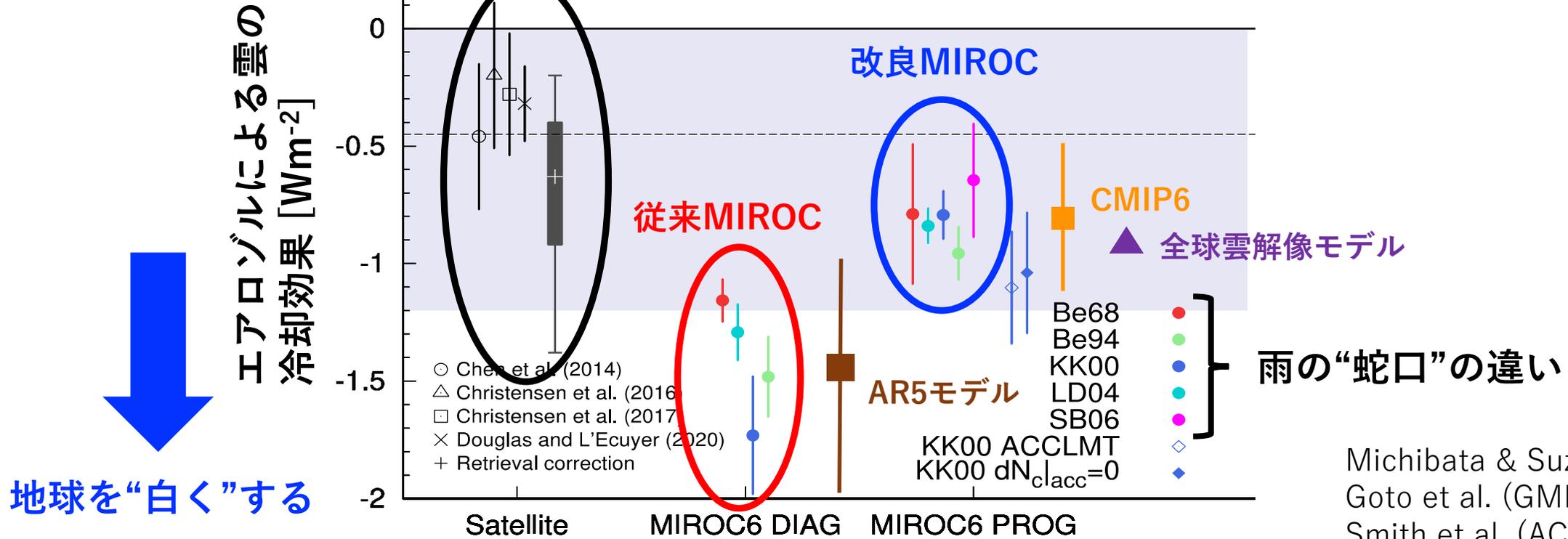


雲が湿る

Y. Sato et al. (Nature Comm. '18)

地球への冷却効果はどれだけか？

温室効果ガスによる温暖化:
+2.9Wm⁻² (CMIP6)



Michibata & Suzuki (GRL '20),
Goto et al. (GMD '20),
Smith et al. (ACP '20)

- エアロゾルで雲が“白く”なる効果は小さく評価されるようになってきた
- 一方、雲は温暖化を正味で加速するらしいとの最新報告もある
- これらの知見は気候予測をどう変えるか?: これからの課題

まとめ

- “ちっぽけな存在”である雲とエアロゾルは、地球の“白さ”を決めることを通じて気候に深く影響し、温暖化予測における主要な不確定要因になっている。
- 統合プログラムでは、準備中のIPCC第6次評価報告書に対して数値気候モデルによる各種実験を実施・データ提供するとともに、モデルにおける雲・降水の高度化に取り組んでいる。
- 人工衛星からの地球観測は黄金時代を迎え、雲・降水に関する新しい観測情報は数値気候モデルの検証・高度化に活用されている。
- エアロゾルが雲を“白く”することによる冷却効果は、従来よりも小さめの評価になってきた。一方、雲は正味で温暖化を増幅する方向に働くらしいとの最新報告もある。
- これらの知見は気候予測の精度向上に今後活かされていく。