



地球の気候と雲のかかわり

鈴木健太郎（東京大学大気海洋研究所）

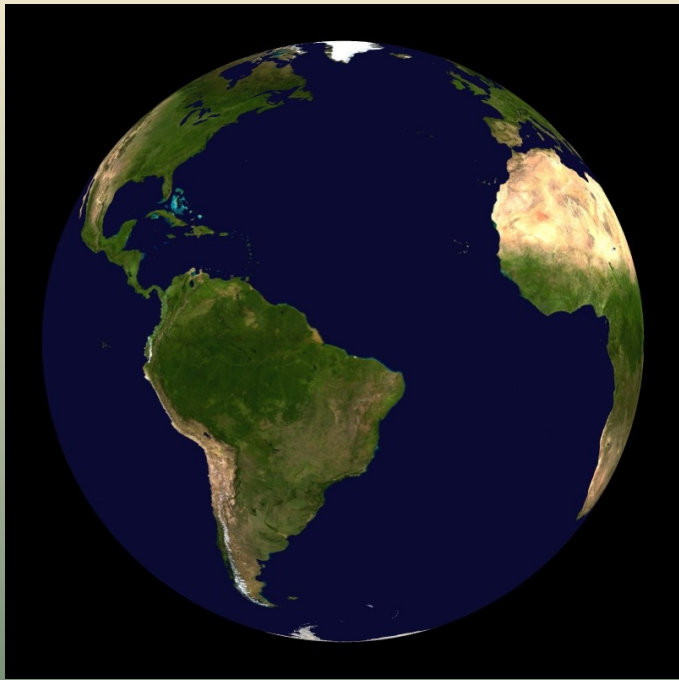
7/18/2015

名古屋大学地球水循環研究センター公開講演会

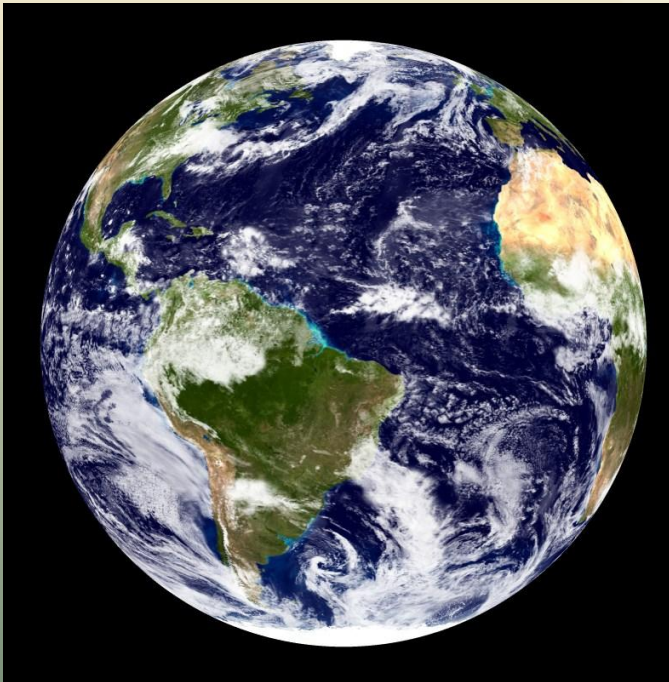
名大シンポジオンホール

地球の気候における雲の役割

雲がない場合の地球



雲がある場合の地球



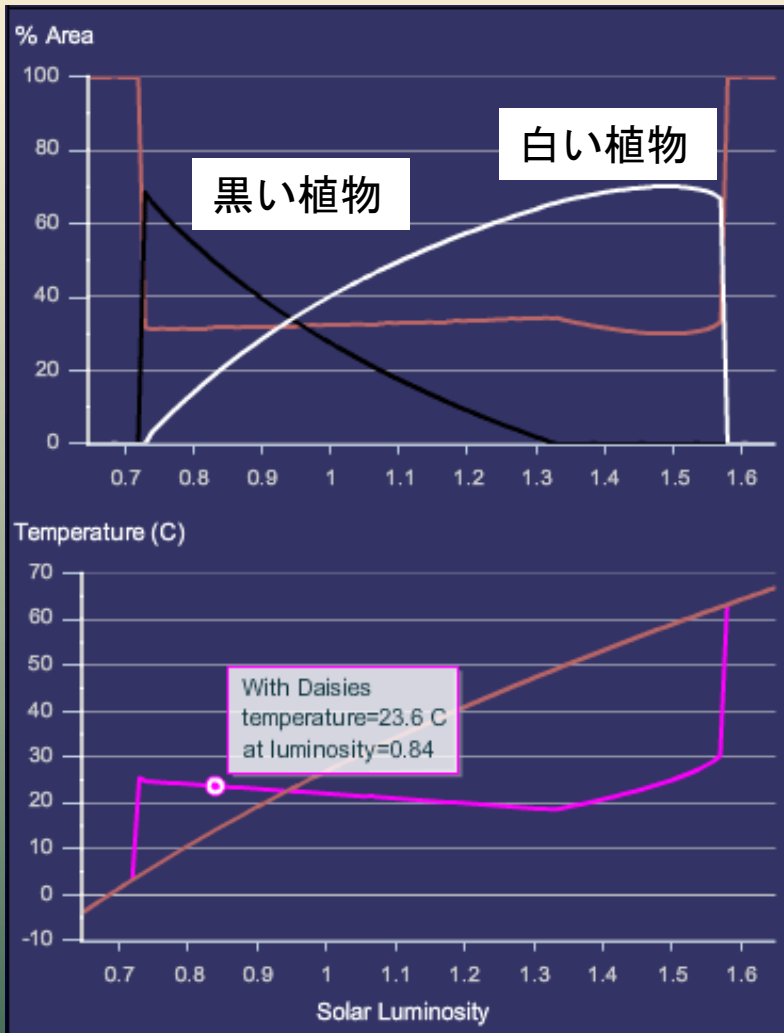
海: 暗い
陸: 明るい
雲: 明るい(白い)

- 雲は地球表面の約6割を覆っている
- 雲は地球を“白っぽく”している

- 太陽光が反射される割合(反射率, アルベド):
 - 地表面: **北半球 > 南半球** (北半球のほうが陸地が多いため)
 - 大気上端: **北半球 = 南半球** (南半球のほうが雲が多いため; なぜ?)

ガイア仮説: “デイジーワールド” モデル

面積



温度



- 黒い植物: 光を吸収する(暖める効果)
- 白い植物: 光を反射する(冷やす効果)

1. 太陽光が弱いとき: 黒い植物が繁殖して、温度が上がる
2. 太陽光が強まると: 黒い植物は衰退し、白い植物が繁殖する。太陽光が反射されるので温度は上がらない。
3. さらに太陽光が強くなっても、白い植物が光を反射するために、温度は一定に保たれる。

色の違う二つの植物は、あたかも気候を「調節する」かのように作用する。



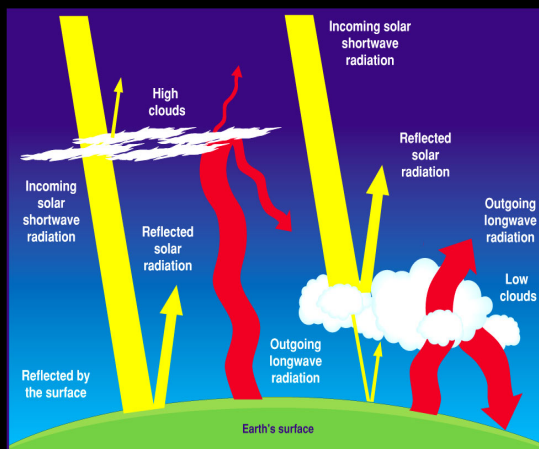
雲にも似たようなはたらきがある??

→ 太陽光の強さ

地球大気の熱のやりとりと雲の影響

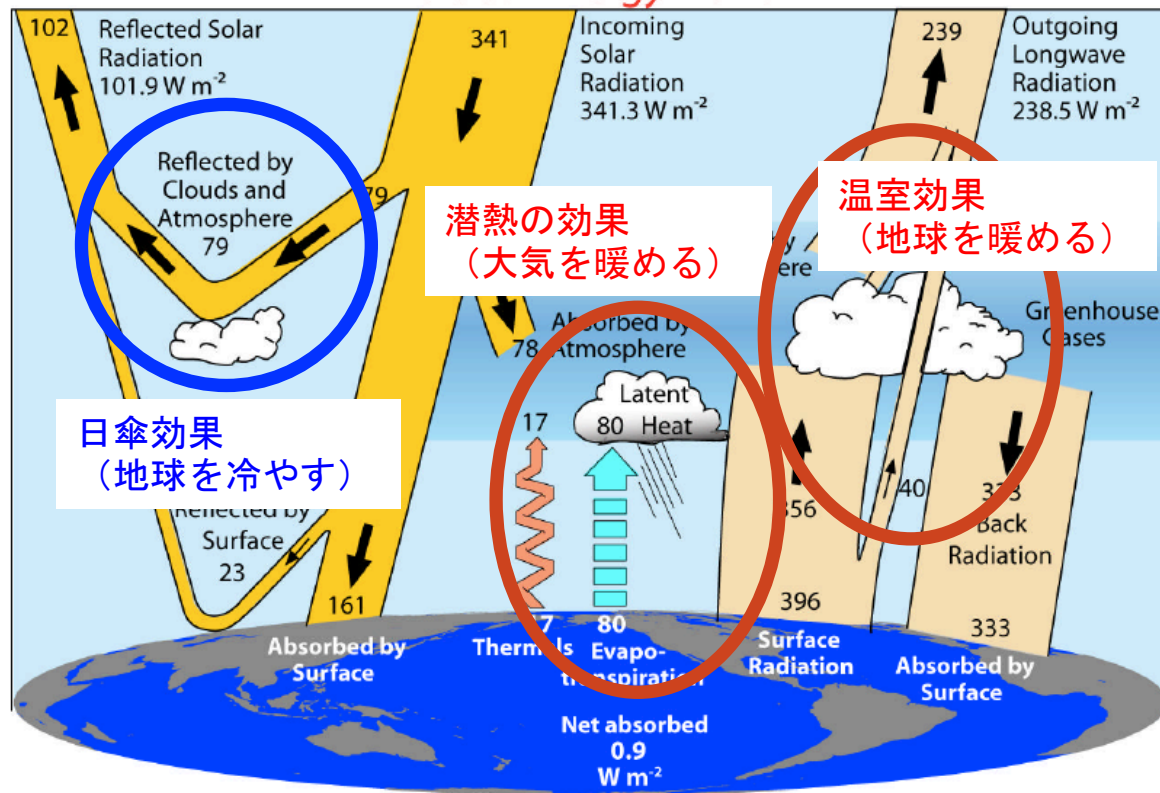
雲の高さによる違い

Cloud Effects On Earth's Radiation



- 高い雲は**温室効果**: 地球を暖める
- 低い雲は**日傘効果**: 地球を冷やす

Global Energy Flows $W m^{-2}$



Trenberth *et al.* ('09)

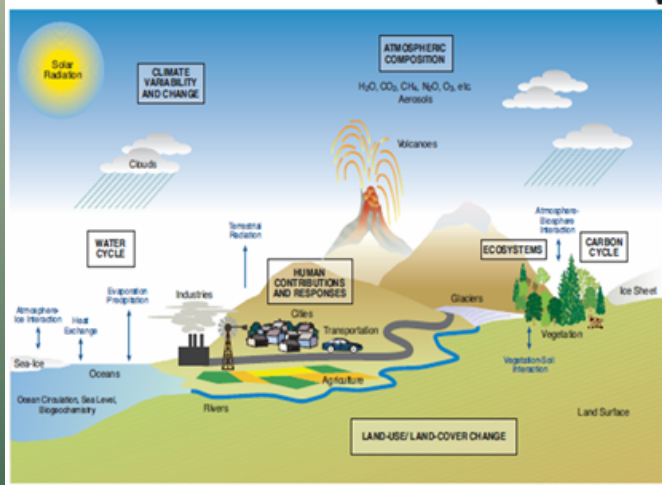
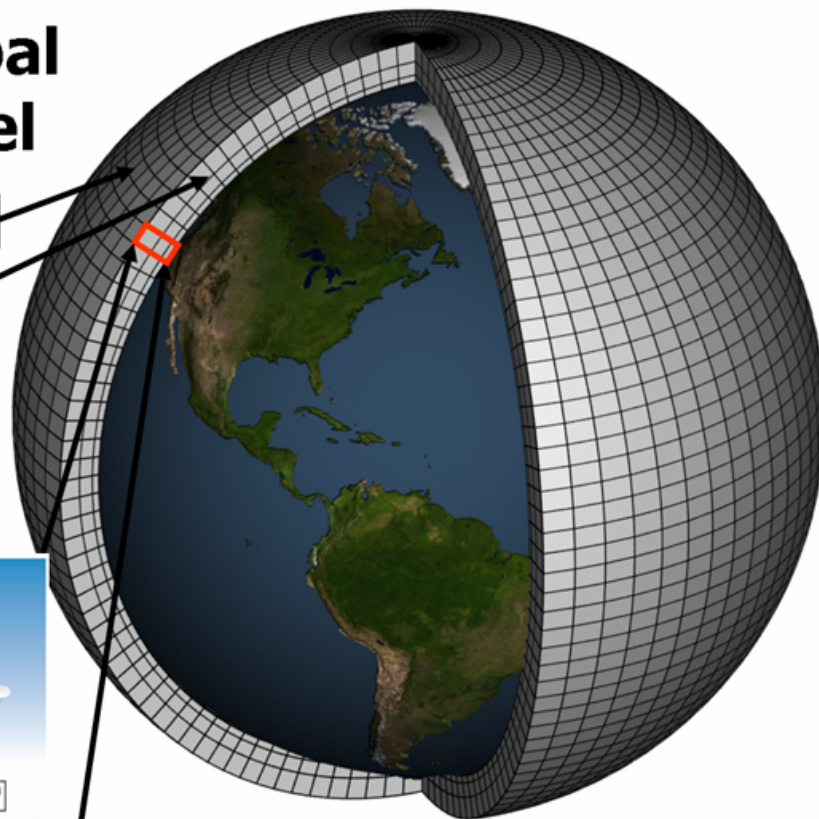
- 日傘効果と温室効果は相殺するが、日傘効果が勝っている
 - もしも雲がなければ、地球はもっと暖まる
- 降雨の生成に伴う潜熱は大気を加熱する：地球規模の大気循環を駆動

仮想地球：気候モデル(Global Climate Model)

Schematic for Global Atmospheric Model

Horizontal Grid (Latitude-Longitude)

Vertical Grid (Height or Pressure)

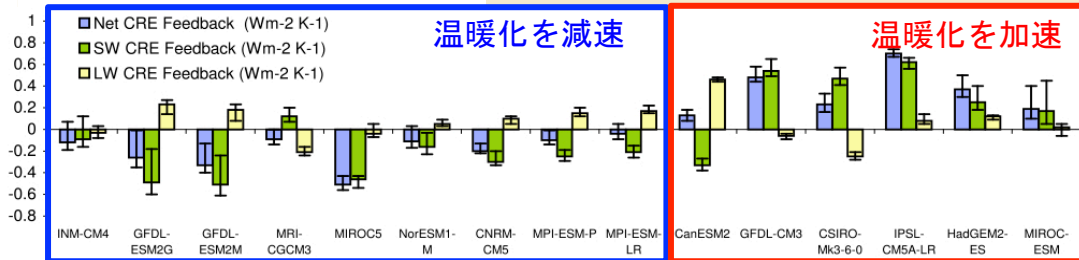


- ▶ 大気・海洋・地面の物理法則を書き表した方程式をスーパーコンピュータで解く
- ▶ メッシュの幅（解像度）が粗いために、雲を直接表現できない：モデルの不確実要因

Image credit: NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory

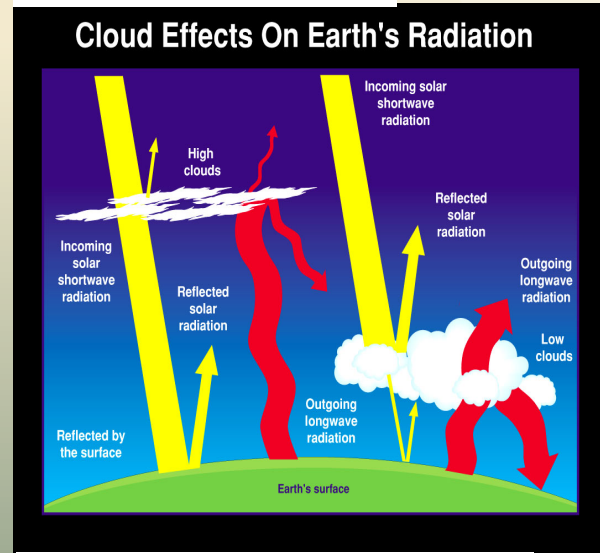
雲は気候の変化を加速するのか減速するのか？

気候変化に伴う雲の変化



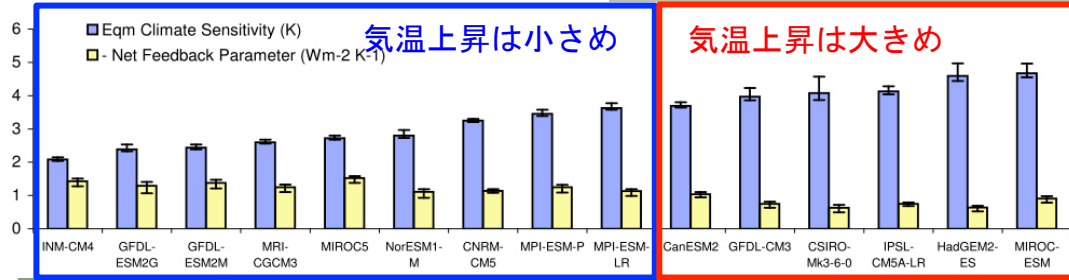
← 様々な気候モデル →

雲の気候への影響

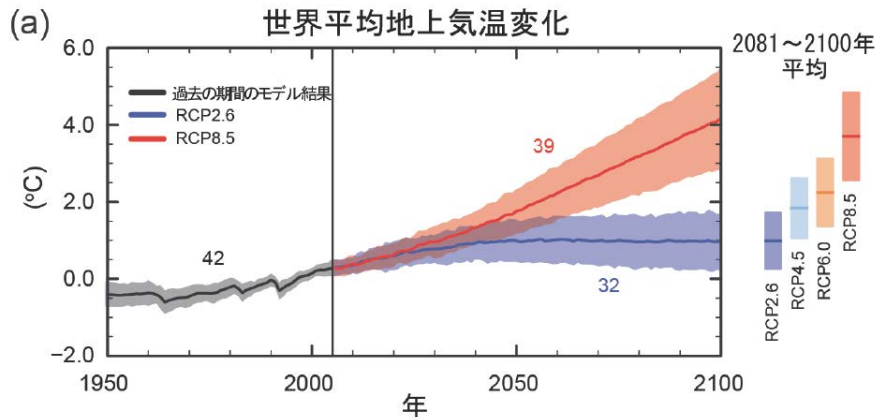


- 高い雲は**温室効果**: 地球を**暖める**
- 低い雲は**日傘効果**: 地球を**冷やす**

CO₂が倍増したときの気温の変化



Andrews et al. ('12)



- 気候変化に伴う雲の変化は不明
- 気温変化の予測に不確実性をもたらす

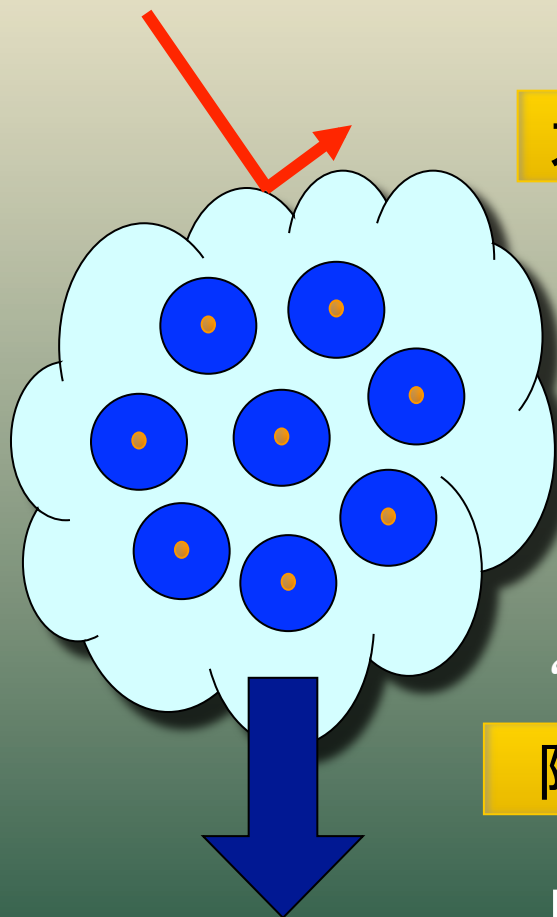
IPCC第5次報告書 ('13)

大気汚染が雲を変える: エアロゾル間接効果

➤ 大気汚染粒子 (エアロゾル) は雲粒ができるときの核になる

エアロゾルが少ないとき

エアロゾルが多いとき



“第1種の間接効果”

太陽光をより反射

(地球を冷やす)

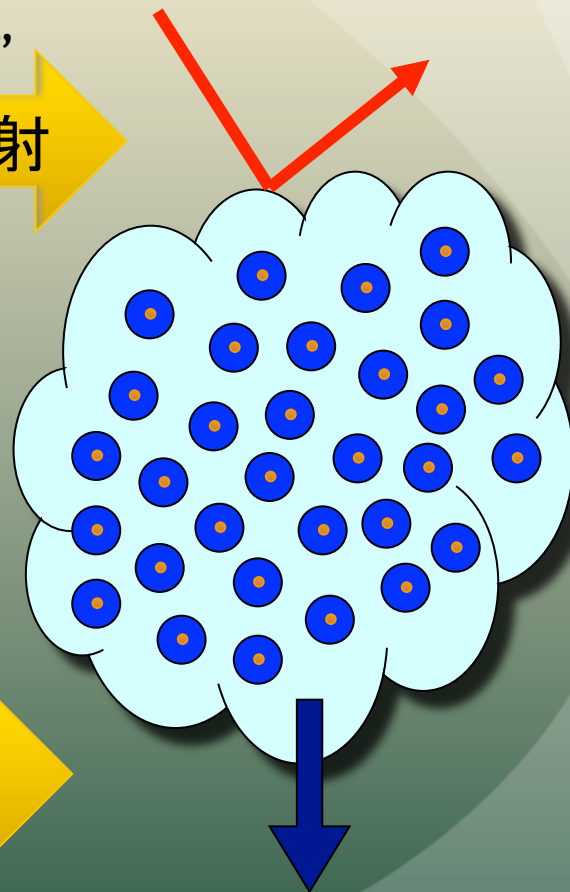
[Twomey, 1974]

“第2種の間接効果”

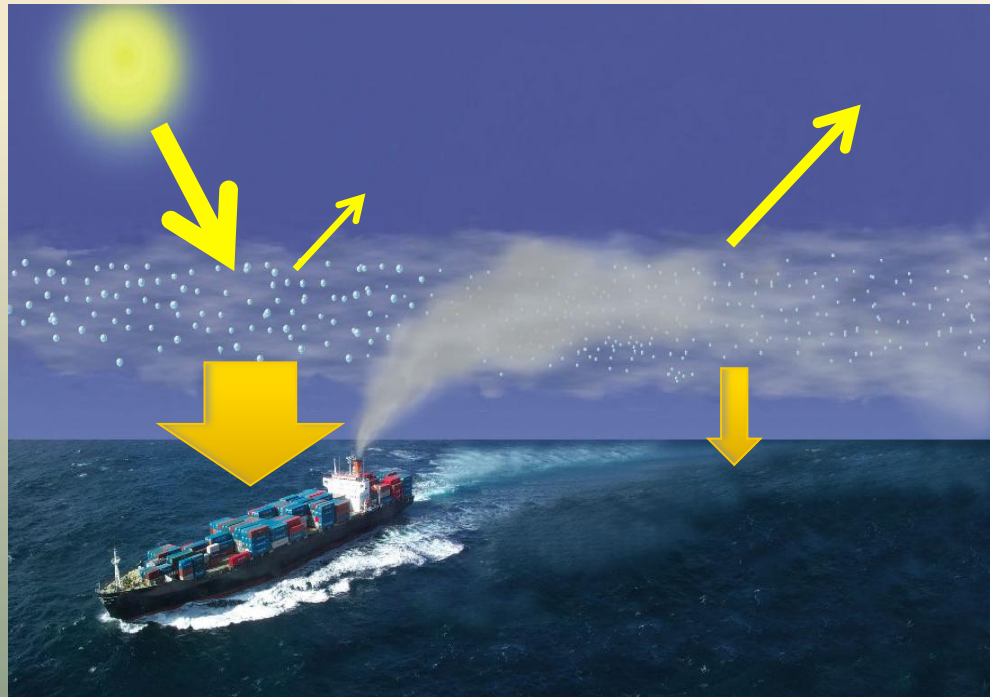
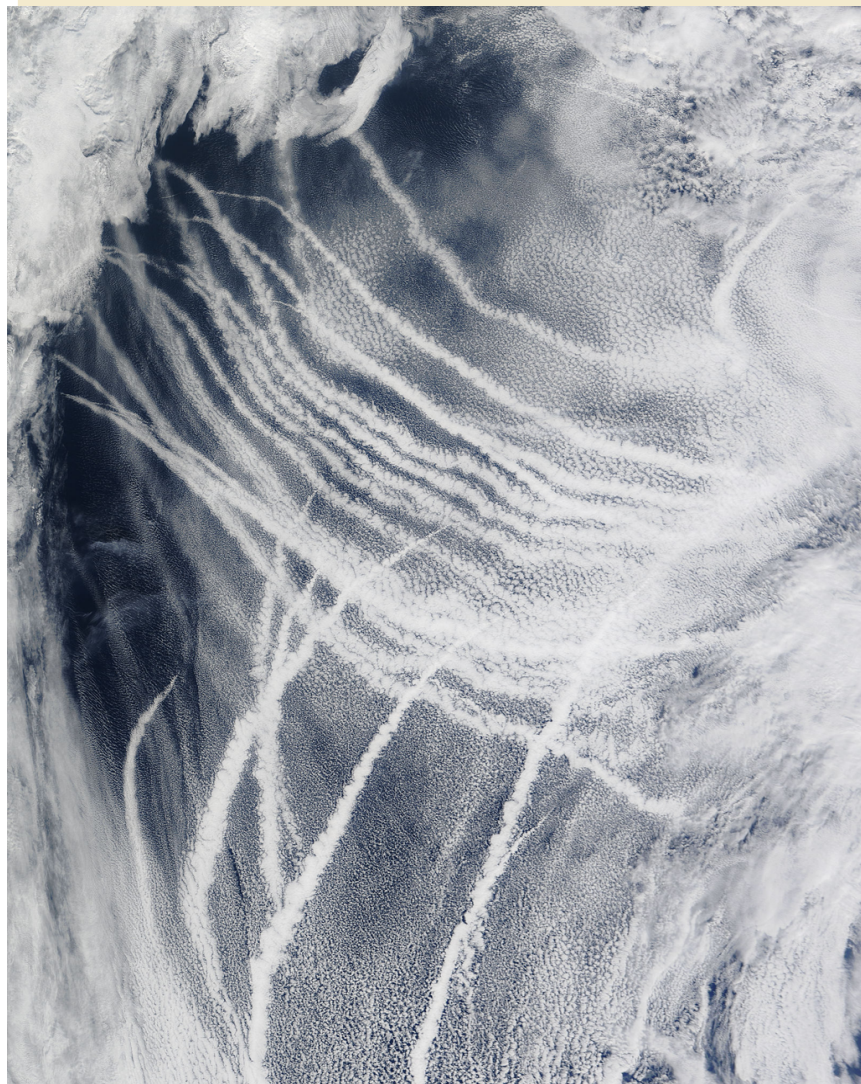
降雨が減少する

(雲が長寿化)

[Albrecht, 1989]



大気汚染が雲を変質させる例



航跡雲(Shiptrack):

- 船の排煙が雲の性質を変える現象
- 汚染を受けた雲は明るくなり、降雨が抑制される

いろいろな大気汚染粒子（エアロゾル）

工場からの排煙



山火事の煙



都市の大気汚染



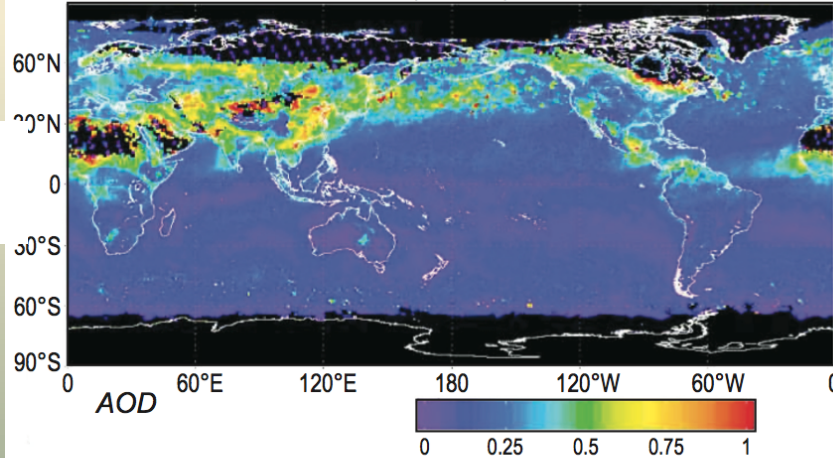
- 自然起源：山火事、黄砂など
- 人為起源：工場の排煙、焼き畑、都市大気汚染など
- 人間活動によってエアロゾルは増加：
気候を変化させる

雲とエアロゾルの全地球的な分布の様子

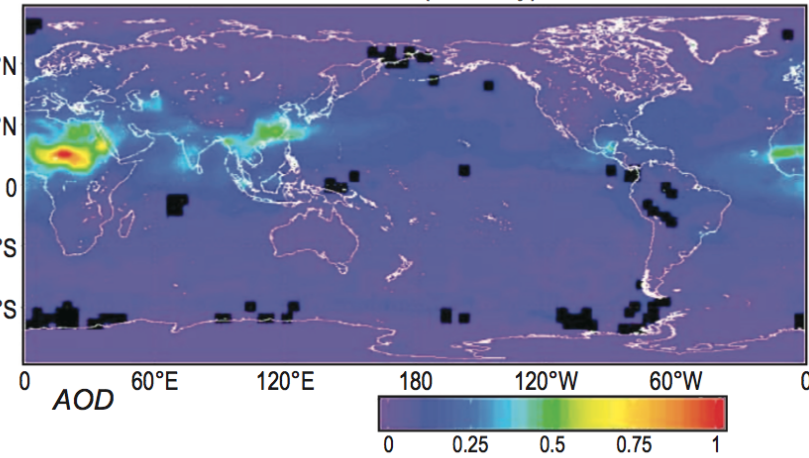
衛星観測

気候モデル

2003/2004 Taua (550 nm) MODIS GSFC

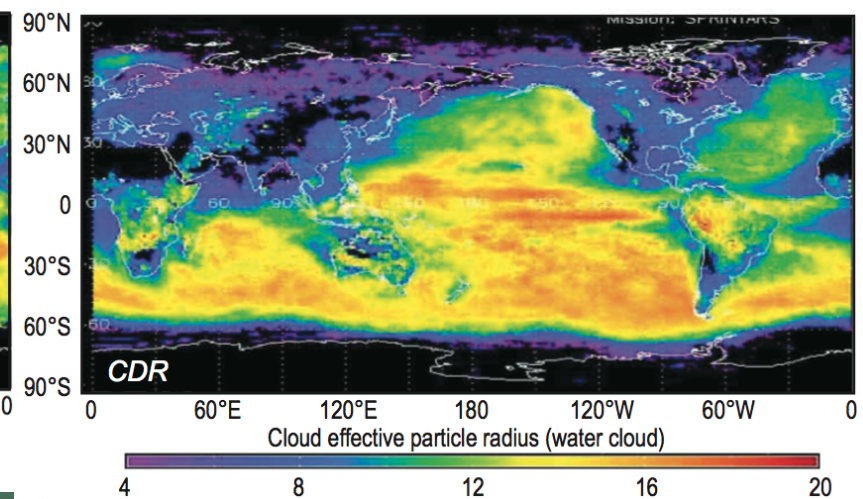
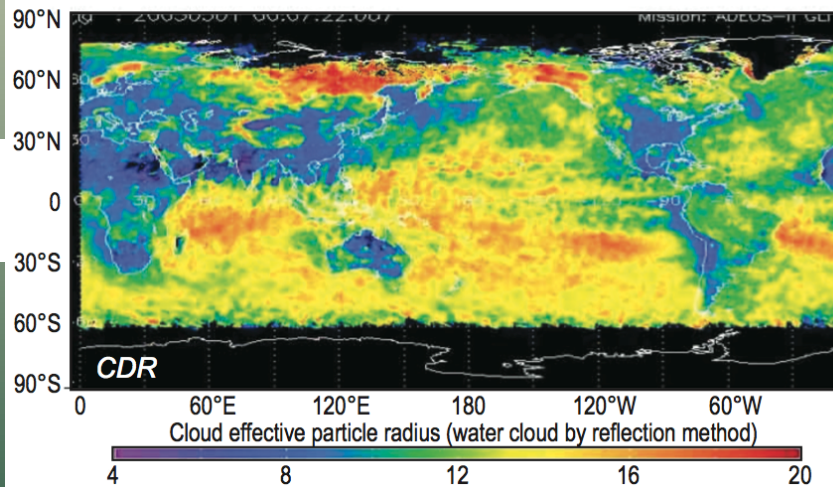


2003/2004 Taua 550 nm (clear sky) SPRINTARS



エアロゾルの濃度

雲粒の大きさ



- 「航跡雲」に似た現象が全球規模で起こっている
- 衛星観測によって気候モデルを検証できる

Nakajima and Schulz ('09)

これによる気候への影響の大きさはわかっていない

“放射強制力”



科学的理解度

二酸化炭素

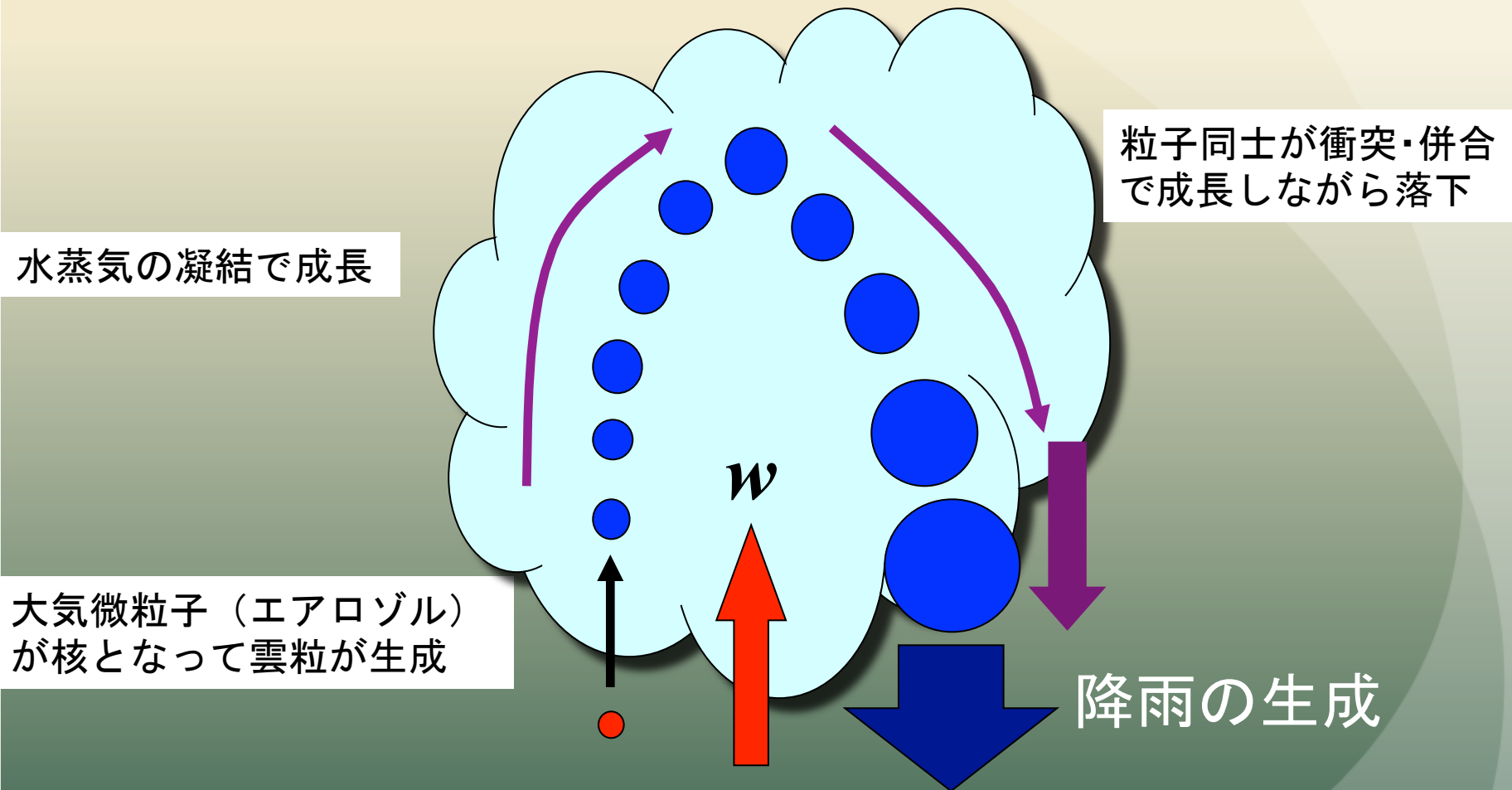
非常に高い

大気汚染が雲を変える

低い



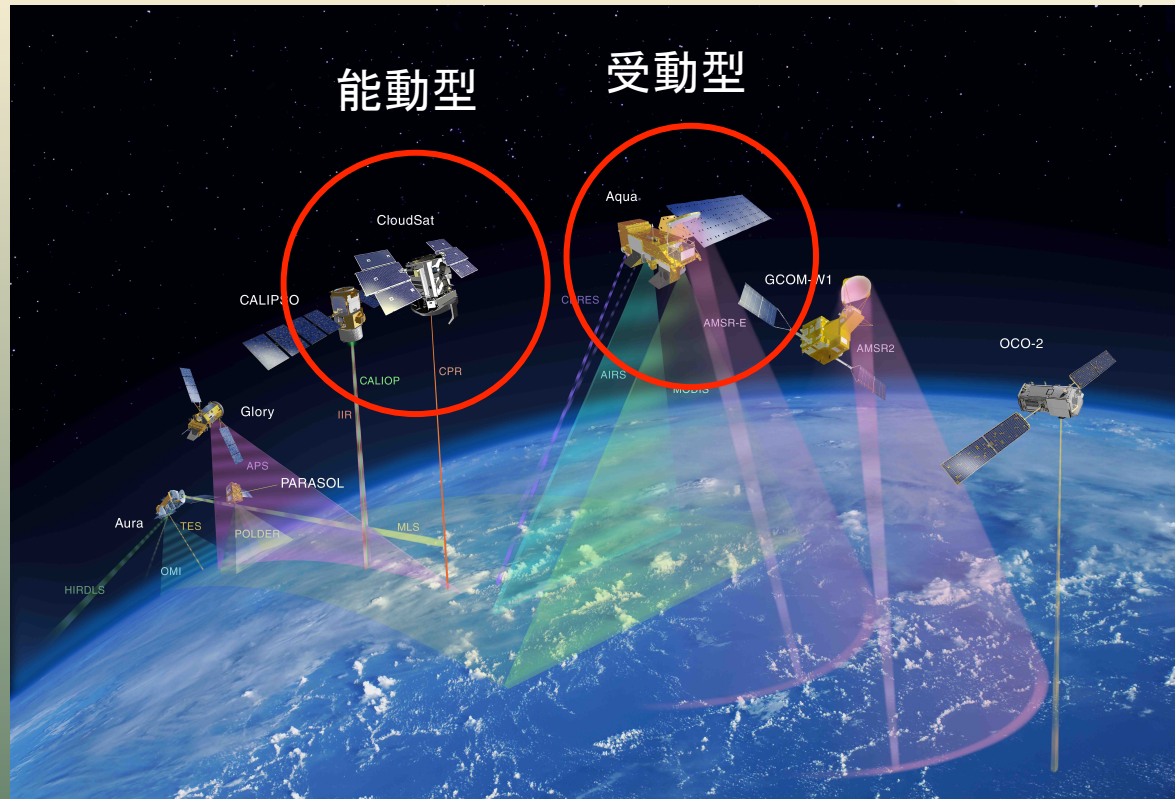
雲の一生：雲粒の生成から降雨まで



- 様々な微物理プロセスが雲粒の成長を決める
- 雲粒の成長に伴って粒子サイズは大きく変化する: 降雨の生成は“段階的”
- 気候影響を知るには、衛星観測とモデリングによる詳細な雲の理解が必要

人工衛星による雲・降雨の観測

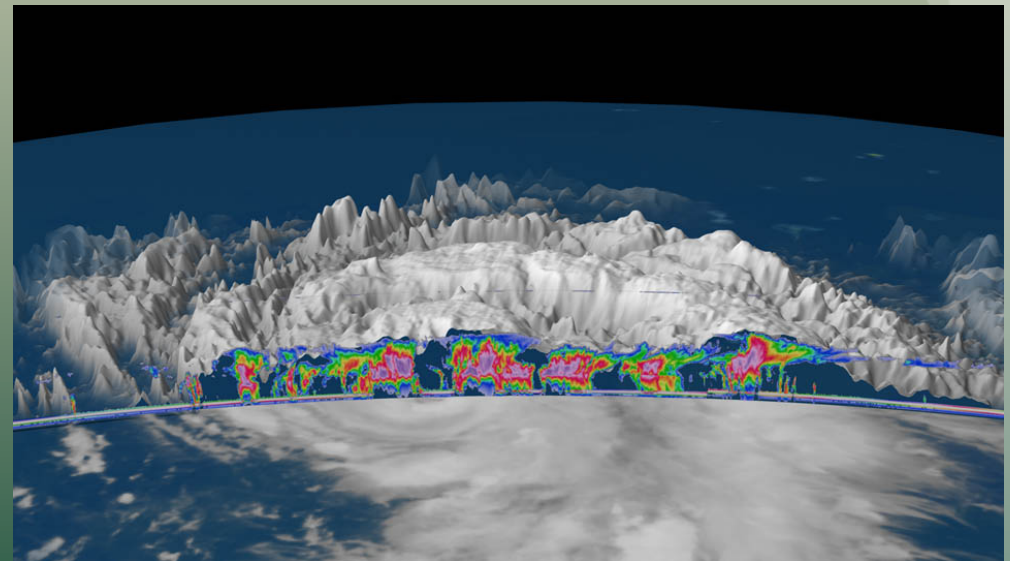
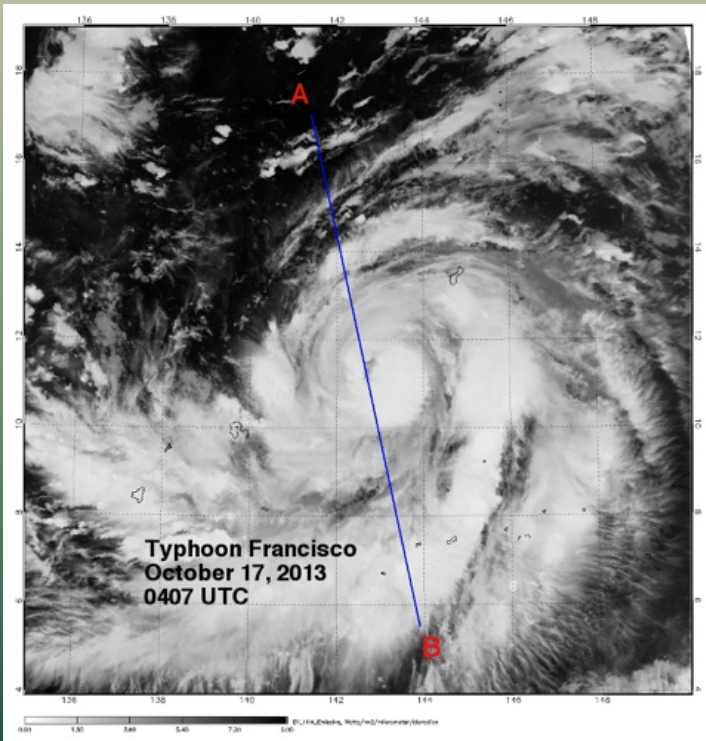
NASA “A-Train” 衛星群



- 複数の衛星で同じ場所をほぼ同時刻に観測する
- 受動型：自然の光を用いた観測（伝統的な方法）
- 能動型：人工的な電波を用いた観測（新しい方法）
- 受動型＋能動型：雲の内部構造に関する新しい情報

観測手法による雲の見え方の違い

受動型 (MODIS) 能動型 (CloudSat)

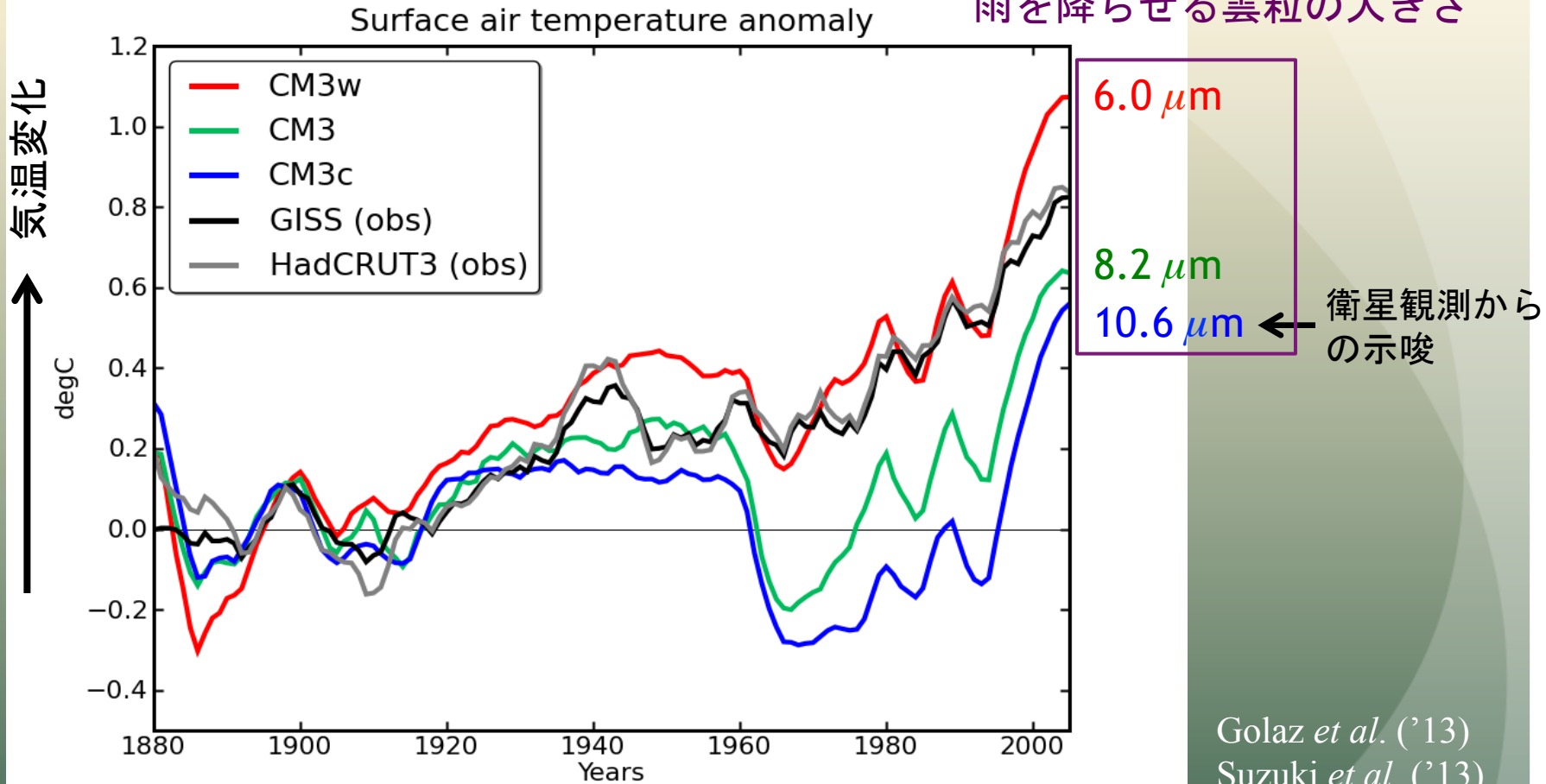


Satellite images by courtesy of S. Suzuki at JPL

最新の衛星観測と気候モデルが物語ること

20世紀の気温変化のシミュレーション

モデルの中の不確かな仮定:
雨を降らせる雲粒の大きさ



- 気温変化のシミュレーション結果はモデルの仮定に依存する
- 衛星観測が示す妥当な仮定に基づく計算結果は実測と食い違う