



高解像度モデルを用いた雲・エアロゾル 相互作用に関する数値実験

理化学研究所 計算科学研究機構 (AICS)
複合系気候科学研究チーム 基礎科学特別研究員
佐藤 陽祐
2016/02/11@神戸大学CPS

今日の話は

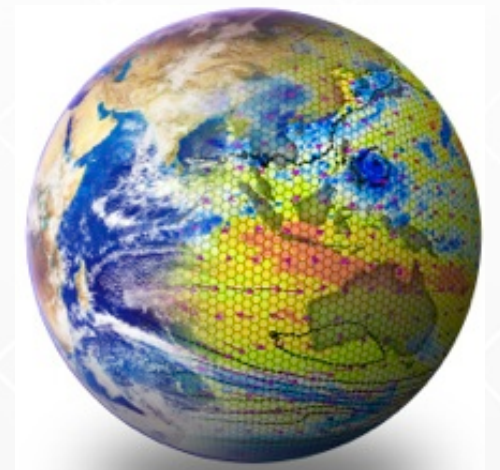


をつかった雲・エアロゾル相互作用に関するお話

「全球規模大気環境汚染に関わる統合環境モデリング」
平成26年度HPCI一般課題 (hp140046)

「次世代型大気汚染物質輸送モデルの精緻化と排出量の推定」
平成27年度HPCI一般課題 (hp150056)

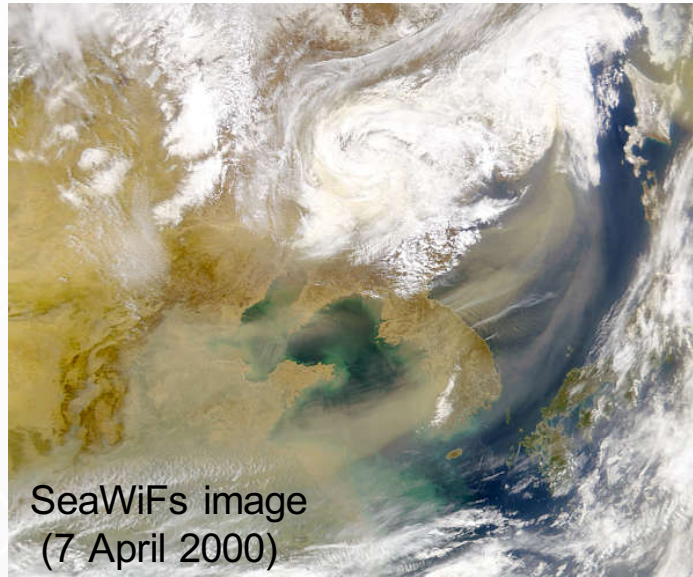
「次世代型物質輸送モデルによる大気汚染 気候・環境影響評価」
「全球雲粒サイズ解像モデルによる雲エアロゾル相互作用に関するシミュレーション」
平成28年度HPCI一般課題・若手利用課題



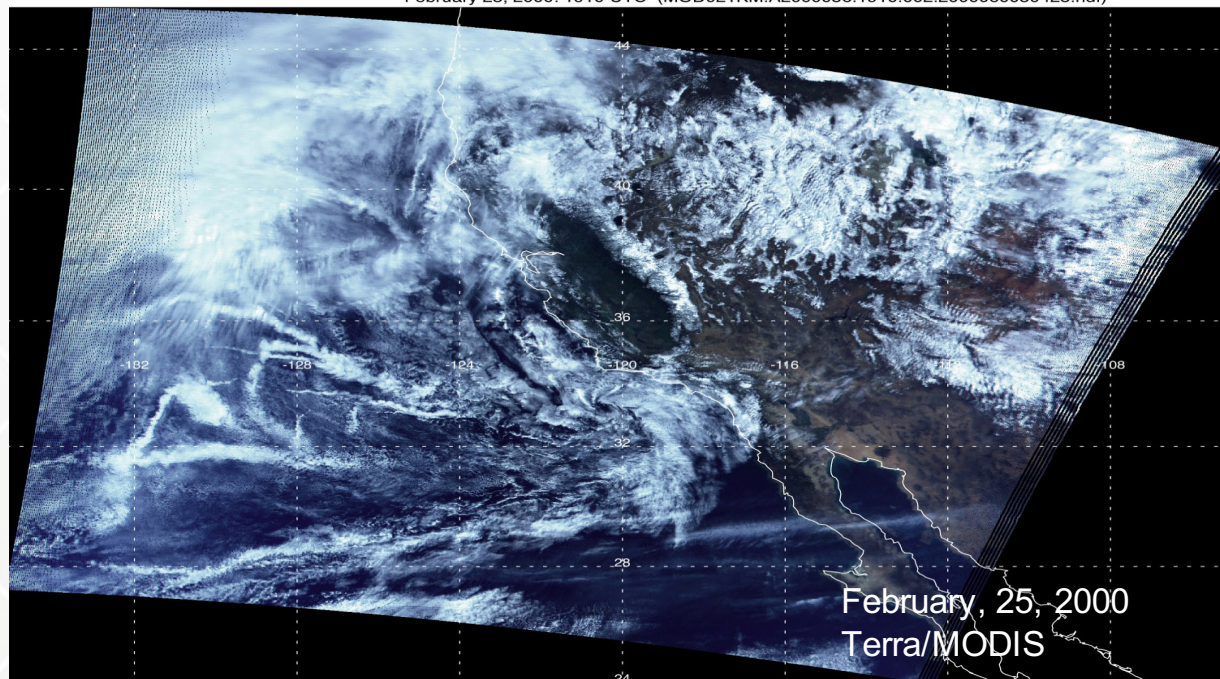
Introduction: Aerosolとは

Aerosol = Aero + sol

Air pollution SLCP: Short-Lived Climate Pollutants



http://www.ecobuddhism.org/bcp/all_content/3rd_pole/abc
February 25, 2000: 1910 UTC (MOD021KM.A2000056.1910.002.2000060050425.hdf)

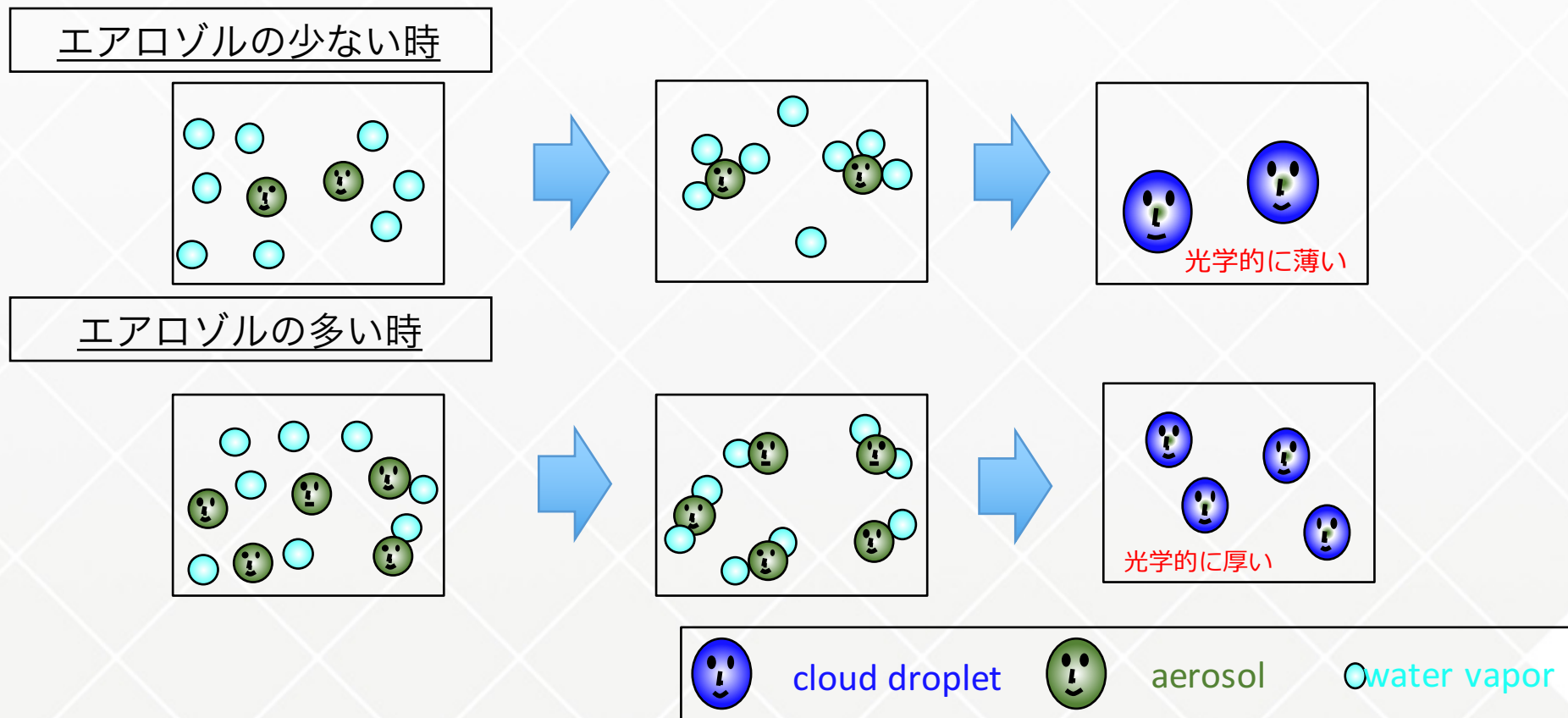


雲・エアロゾルの相互作用

エアロゾルによる主な効果

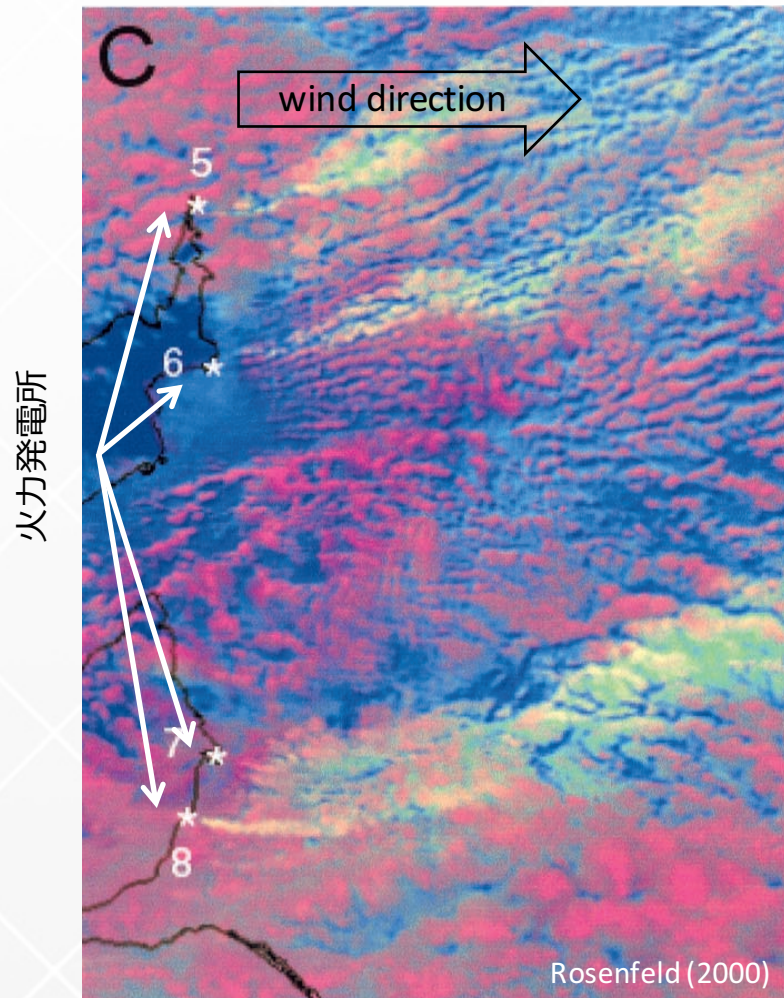
- 直接効果 (*Mitchel et al. 1995*)
- 間接効果
 - 第1種間接効果 (*Twoemy, 1974*)
 - 第2種間接効果 (*Albrecht, 1989*)
- 準直接効果 (*Ackerman et al. 2000*)

エアロゾルの濃度により雲粒のサイズが変わり得る



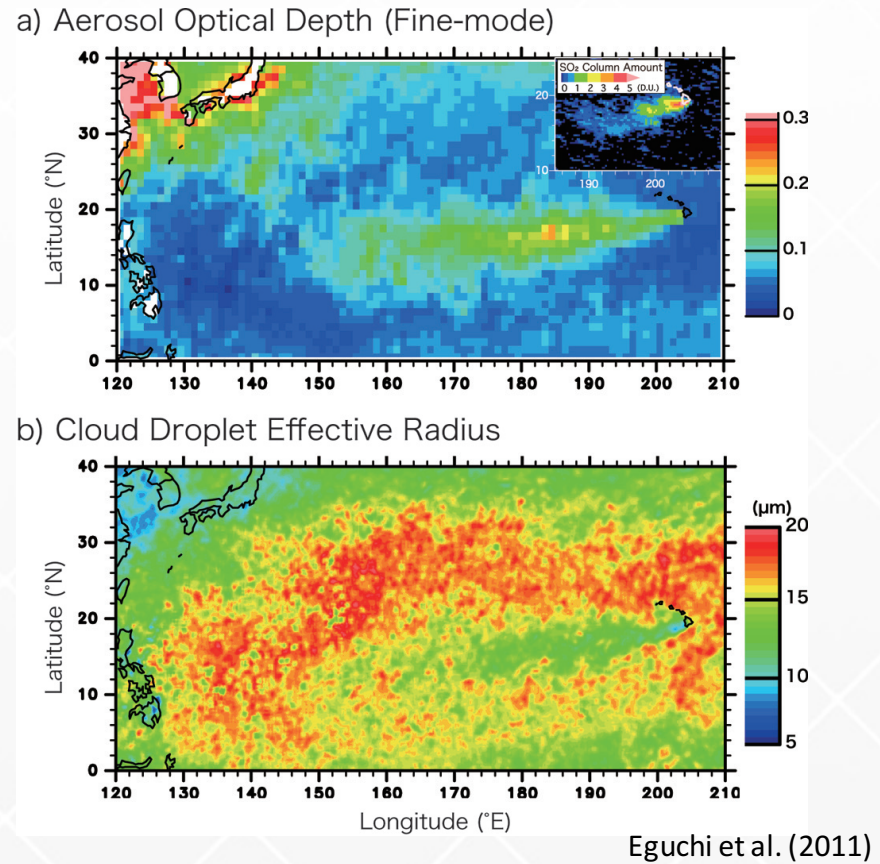
人工衛星から捉えられた第 1 種間接効果の例

火力発電所の排出



赤：光学的に薄くサイズの大きい雲粒からなる雲
黄：光学的に厚くサイズの小さい雲粒からなる雲

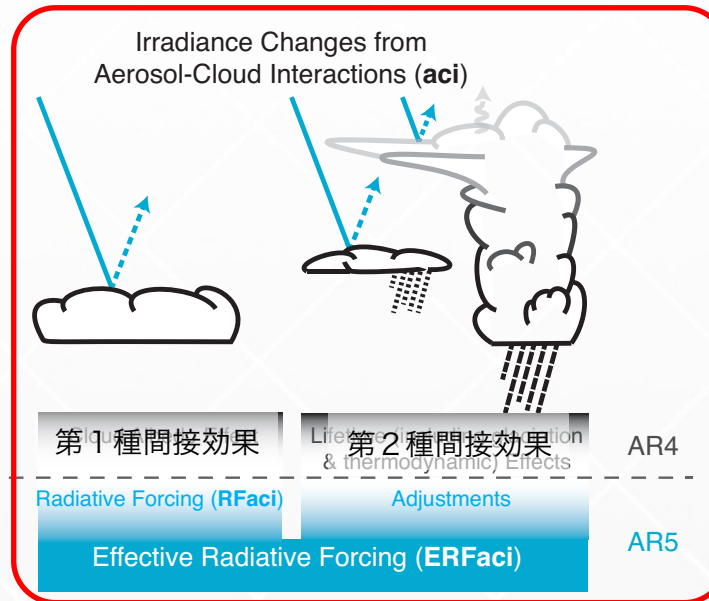
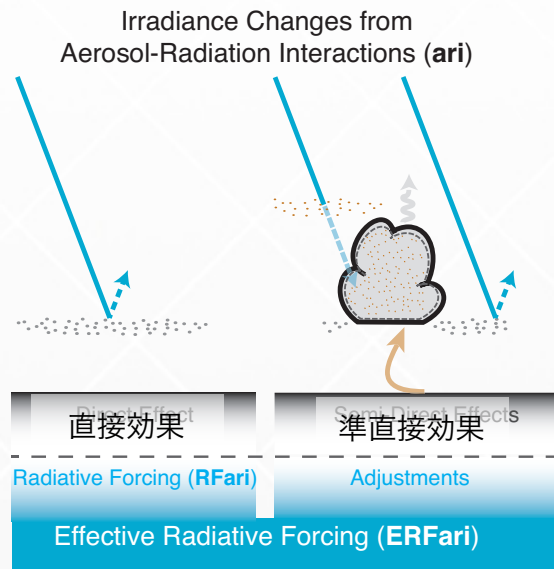
火山による噴煙



雲とエアロゾル相互作用による気候影響の見積もり

エアロゾルによる気候影響の模式図

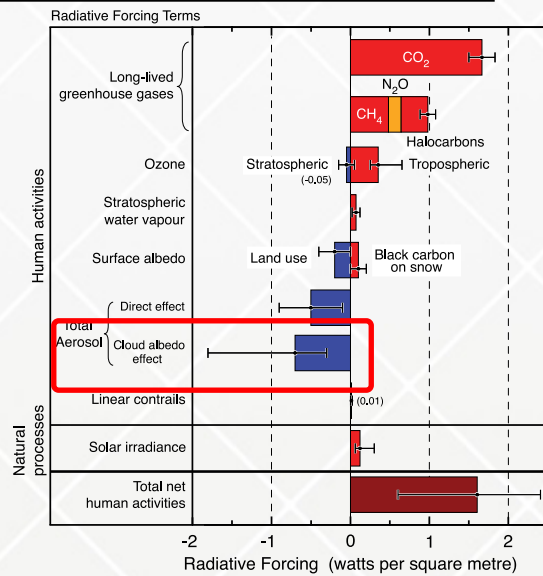
雲エアロゾル相互作用



10年経っても不確定性は全く減っていない

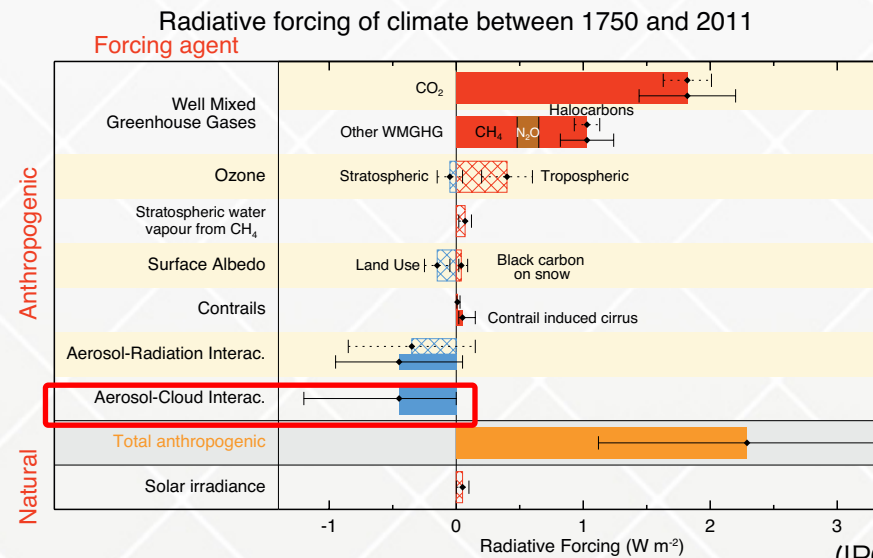
(IPCC AR5)

各要素の放射強制力(AR4)



(IPCC AR4)

各要素の放射強制力(AR5)



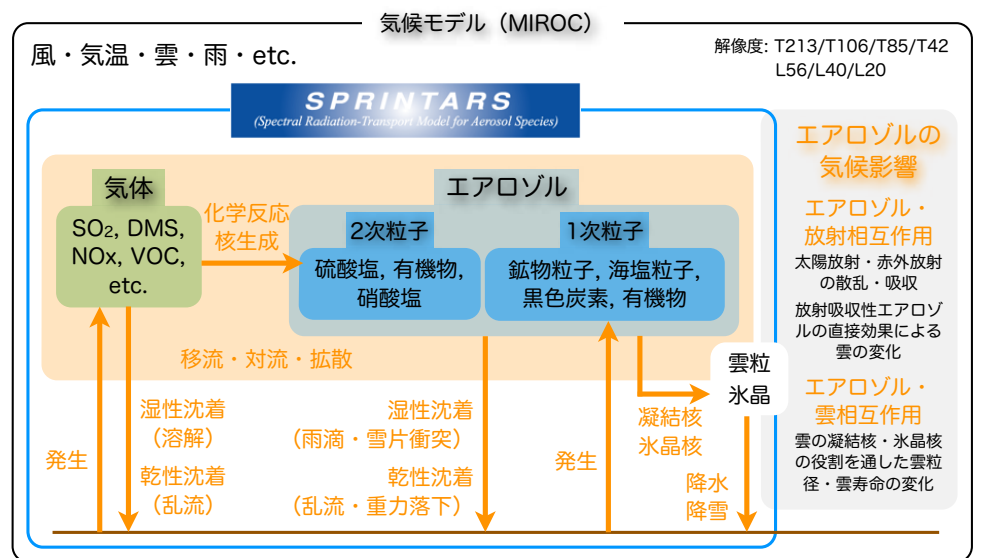
(IPCC AR5)

エアロゾルの気候影響の見積もり →エアロゾル輸送モデル（化学輸送モデル含む）

世界にあるエアロゾルモデル（AeroCOMプロジェクトに参加したもの）

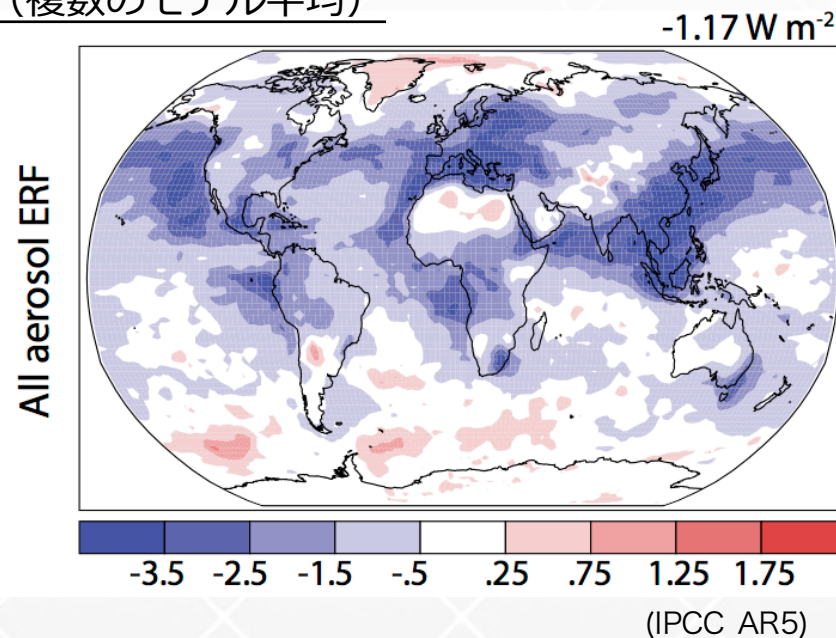
BCC, CAM(ver. 3.5, 4, 5), GEOS-Chem, GISS, GMI, GOCART, IMPACT, INCA, HadGEM, ECHAM-HAM, OsloCTM2, SPRINTARS, TM5, MASINGAR など

例として：SPRINTARS



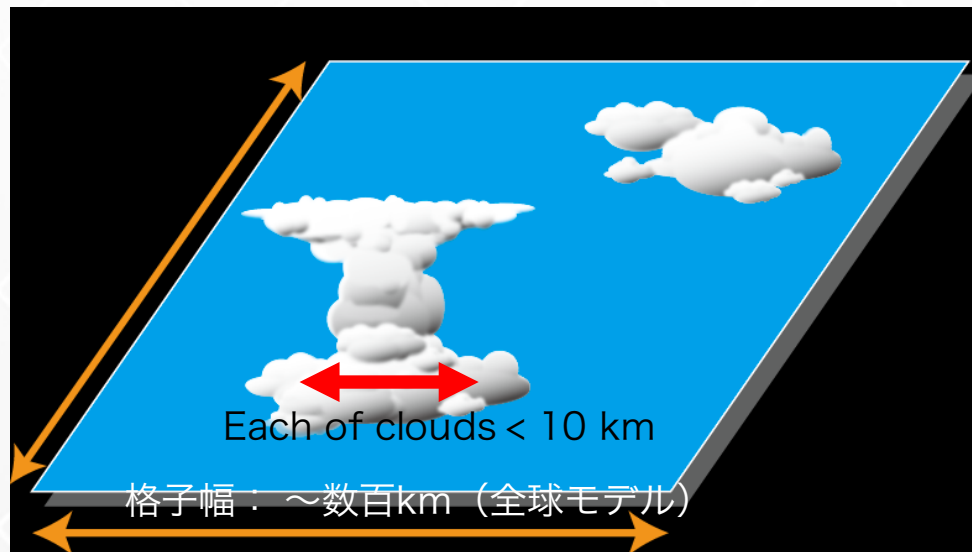
九州大学：竹村教授より提供

雲エアロゾル相互作用の放射強制力の分布
(複数のモデル平均)



雲を解像できていない

- 積雲、層積雲（水平スケール数m～数km）：
 - 個々の積雲や積乱雲は格子内の現象のため
- 積雲の効果はパラメタリゼーションと呼ばれる半経験的な手法で取り込まれる



解像度を上げなければ再現できない雲へのエアロゾルの効果をパラメタリゼーション（半経験的）で議論している

→個人的にもあまり好きではない
（せめて雲くらいは真面目に解きたい）

エアロゾルの効果の表現方法（MIROCの例, Berry 1967）

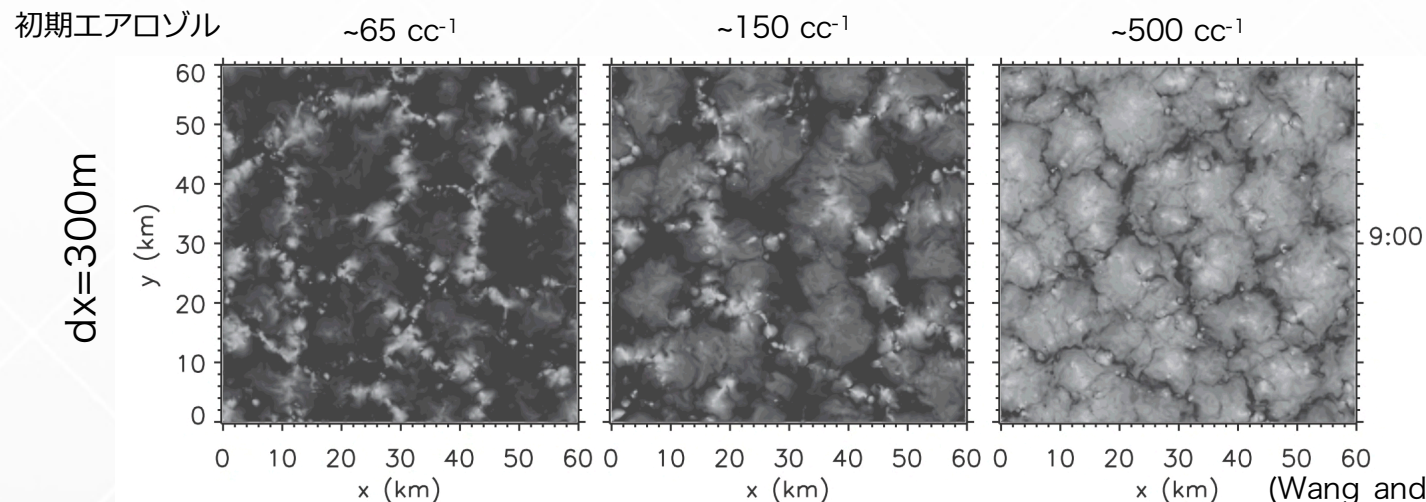
$$P = -\frac{\partial l}{\partial t} = \frac{l}{\tau_p} \quad \tau_p = \tau_p(l, n_c) = \frac{\beta + \gamma^{n_c}}{\alpha \rho l} \quad n_c(z) = \frac{\varepsilon n_a(z) n_m}{\varepsilon n_a(z) + n_m}$$

P : 降水量（大気から除去される雲水の量）、 τ_p : 降水の時定数、 l : 雲水量、 n_c : 雲粒数濃度、 n_a : エアロゾル数濃度

領域モデルによる雲解像シミュレーション

高解像な領域モデル上で雲微物理モデルを使って解く

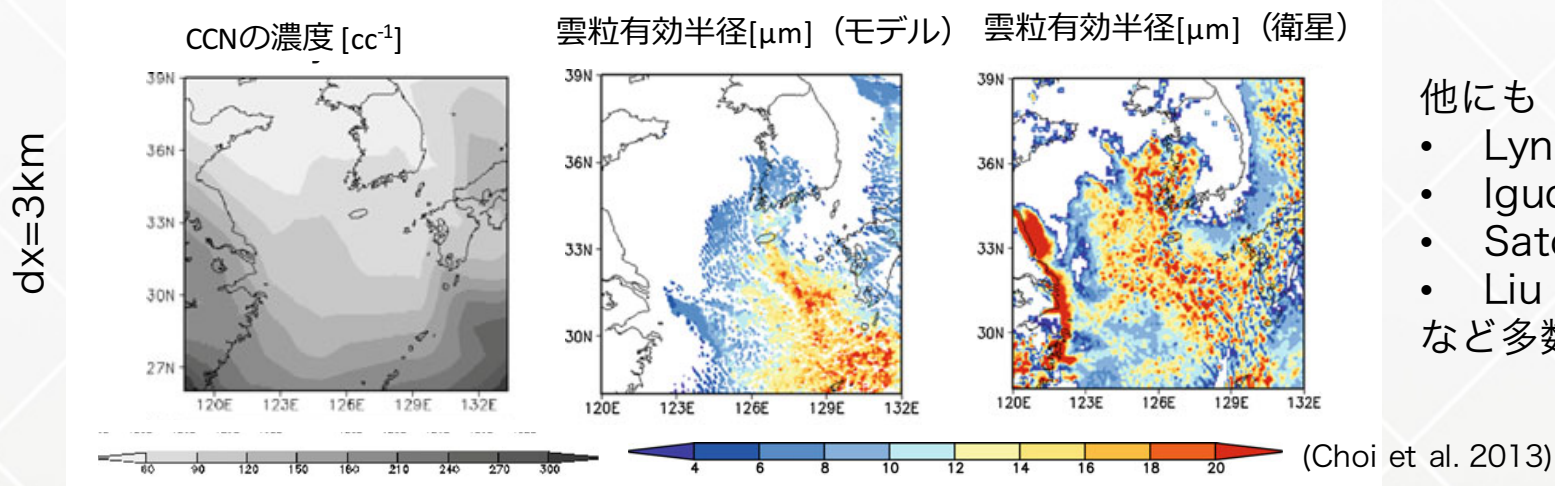
LESによる層積雲 (Open CellとClosed cell) の理想実験 (Aerosol量は固定)



他にも

- Berner et al. 2011
 - Wang et al. 2012
 - Sato et al. 2014
 - Yamaguchi et al. 2015
- など多数

領域モデルによる積雲の再現実験 (エアロゾル量も予報)



他にも

- Lynn et al. 2005
 - Iguchi et al. 2008
 - Sato et al. 2009, 2012
 - Liu et al. 2015
- など多数

問題点：

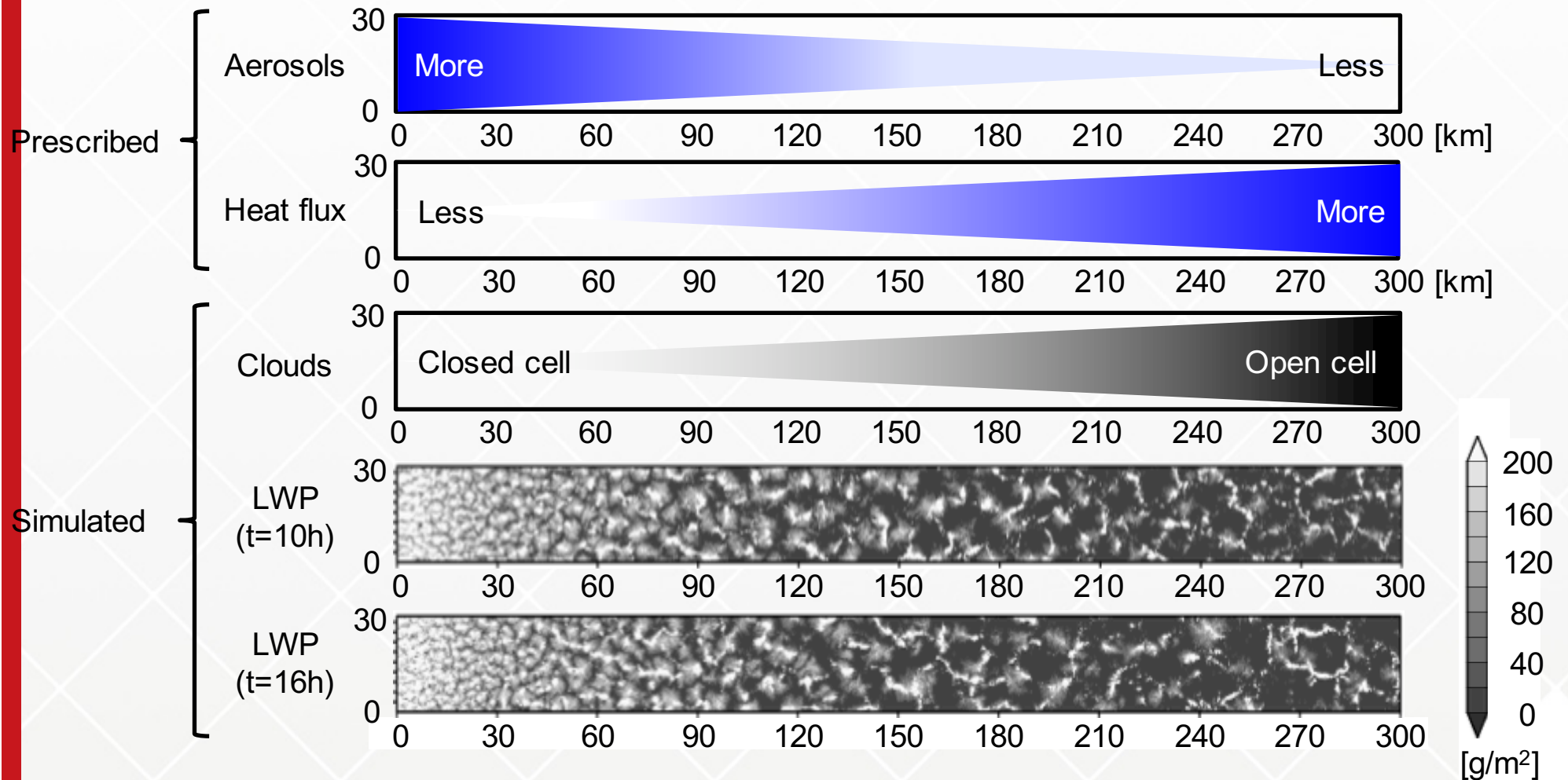
計算領域に限られる、エアロゾルに関して側面の境界で殆ど決まる事例しか扱えない

宣伝：SCALEでもやっています！

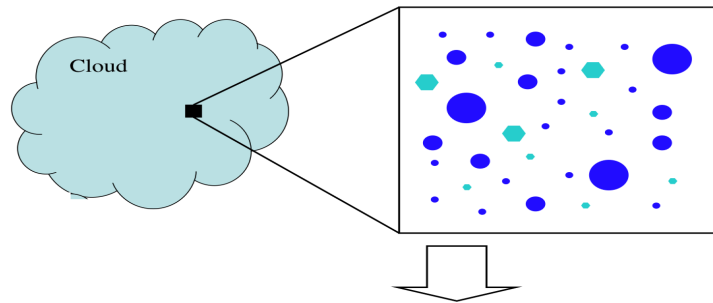
利用した計算資源：約160万NH
出力40TB



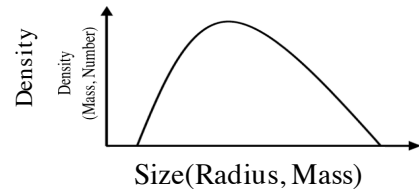
50m simulation



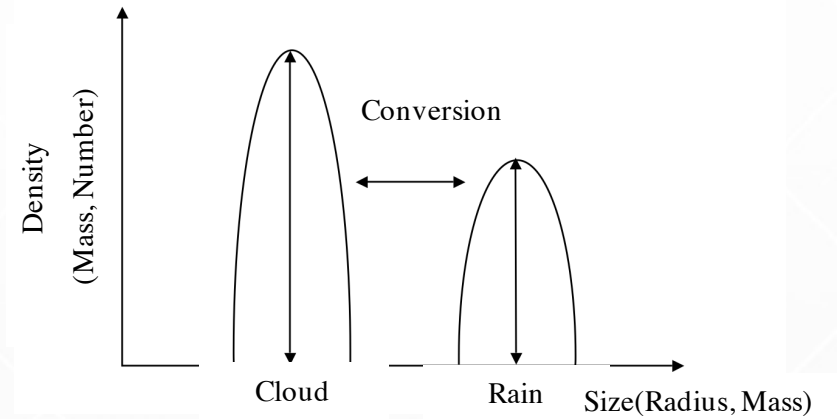
雲微物理モデル



Size Distribution Function(SDF)

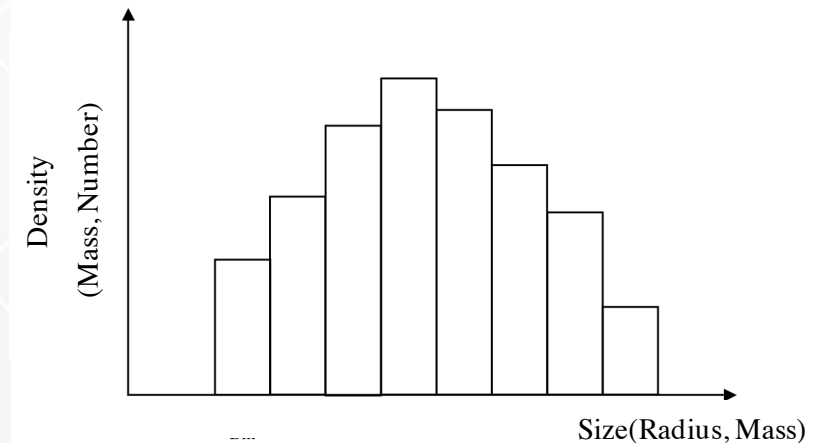


バルク法



各モードをMassのみで表現：1-moment bulk
 各モードをMassとNumberで表現：2-moment bulk

ビン法



雲粒サイズを直接予報

雲エアロゾル相互作用をどう表現しているか？

エアロゾルの効果の表現方法 (MIROCの例, Berry 1967)

$$P = -\frac{\partial l}{\partial t} = \frac{l}{\tau_p} \quad \tau_p = \tau_p(l, n_c) = \frac{\beta + \gamma n_c / (\rho l)}{\alpha \rho l} \quad n_c(z) = \frac{\varepsilon n_a(z) n_m}{\varepsilon n_a(z) + n_m}$$

P : 降水量 (大気から除去される雲水の量) 、 τ_p : 降水の時定数、 l : 雲水量、 n_c : 雲粒数濃度、 n_a : エアロゾル数濃度

13

雲解像モデルの場合 : 雲が直接計算される→雲エアロゾル相互作用を直接扱える

➤ 1-moment bulk法 (雲水のMassのみを予報) : 雲水→雨水の変換速度の項に反映

雲粒→雨粒への変換率 $P_{\text{auto}} = 1350 \times q_c^{2.47} \times N_{c,T08}^{-1.79}$ エアロゾル数濃度と過飽和度 (湿度) で決まるCCNの数濃度を取り込む

➤ 2-moment bulk法 (雲水のMassと数密度を予報)

➤ Bin法 (雲粒のサイズを陽に予報)

雲粒生成の計算で陽にエアロゾルの影響を取り入れる(Prupakker and Klert 1997, Køheler, 1939)

NICAMの現在の開発状況

- バルク法の2-moment化
- ビン法の実装 (全球ビン)

$$r_{N,crit} = \left(\frac{4}{27} \frac{A^3}{B} \frac{1}{S_w^2} \right)^{1/3} \quad A = \frac{2\sigma}{R_v \rho_L T} \quad B = i \frac{m_v \rho_s}{m_s \rho_L}$$

エアロゾル量と化学組成に応じて雲粒になる粒子のサイズを計算 (理論式)

13

まとめてみると・・・

- 雲エアロゾル相互作用に関するシミュレーションの不確定性の要因の一つは雲を解像できない解像度の問題
- 領域モデルや理想化実験では境界の問題や初期値の問題がどうしてもついて回る

計算機の進歩とNICAM-Chem

Standard experiments	Before using K	After using K
Global simulation	dx=7km for 6 days dx=56km for 1 month	dx=3.5km for 2 weeks dx=14km for 2 month
Regional simulation (Stretching)	dx=10km for 1 month	dx=10 km for 4 years

dx: horizontal resolution in NICAM

Earth Simulator



京

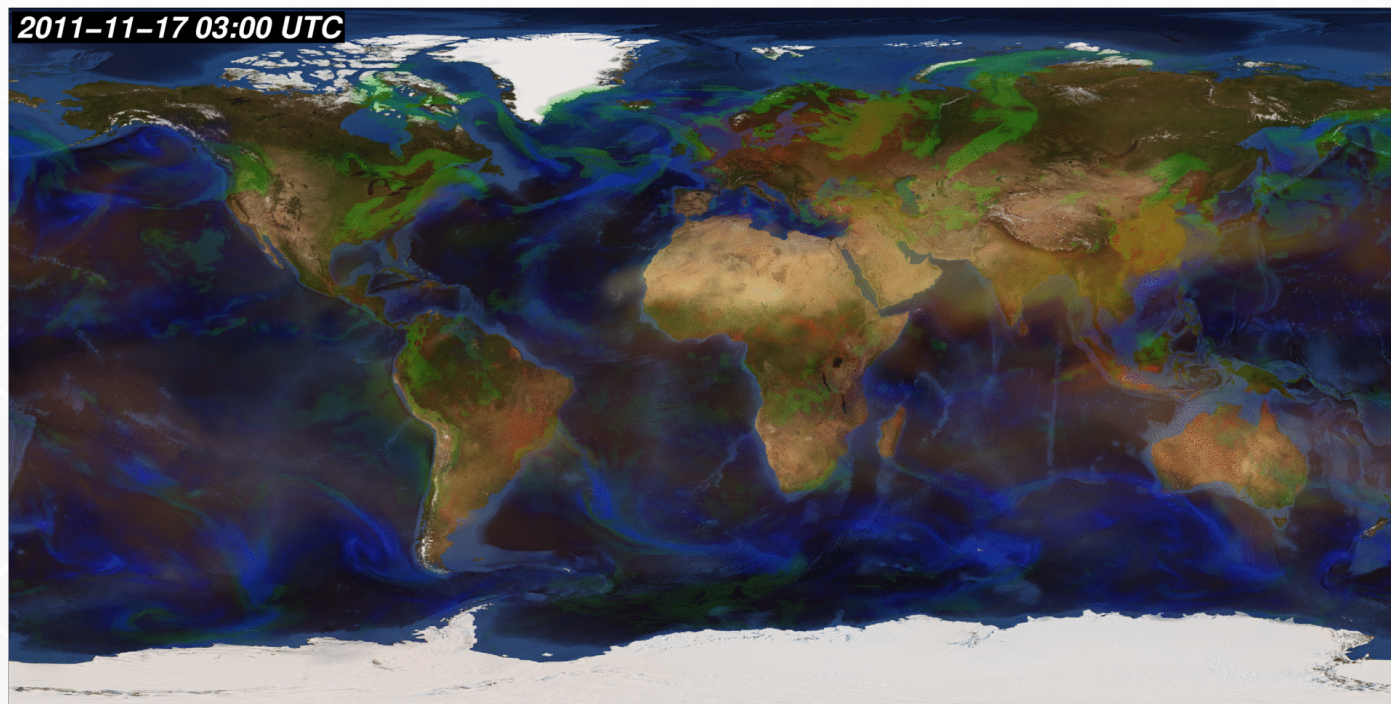


実験設定

- 解像度：水平解像度3.5km (GL11)、鉛直38層
- 初期値：NCAP-FNL (力学)、56km計算 2年分の積分から内挿 (エアロゾル)
- 積分期間：2011/11/17から14日
- 雲物理：Tomita (2008) (積雲パラメタリゼーションは用いず)
- 乱流：MYNN (Nakanishi and Niino 2006)
- 陸面：MATSIRO (Takata and Emori 1999)
- エアロゾル：SPRINTARS
(Takemura et al. 2005, Goto et al. 2013, Dai et al., 2013)
- 放射：MSTRN-X (Sekiguchi and Nakajima 2008)
- エアロゾルのemission：HTAP
 - 人為起源：EDGAR-HTAP_V2 (Janssens-Maenhout et al., 2015)
 - それ以外：Takemura et al. (2005)と同じもの
- 感度実験：水平解像度を3.5km相当 (GL11)、14km (GL09)、56km(GL07)に変更して実行

実験結果（動画）

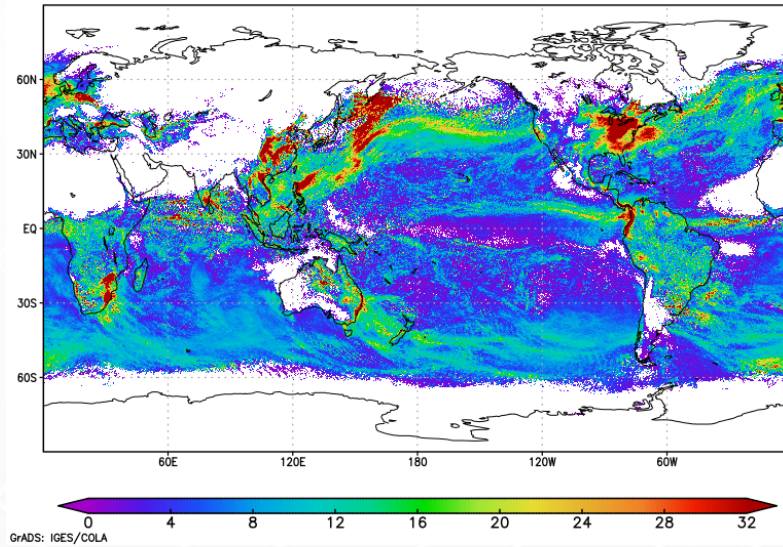
GL11（ $dx=3.5\text{km}$ ）で計算されたエアロゾルの全球分布



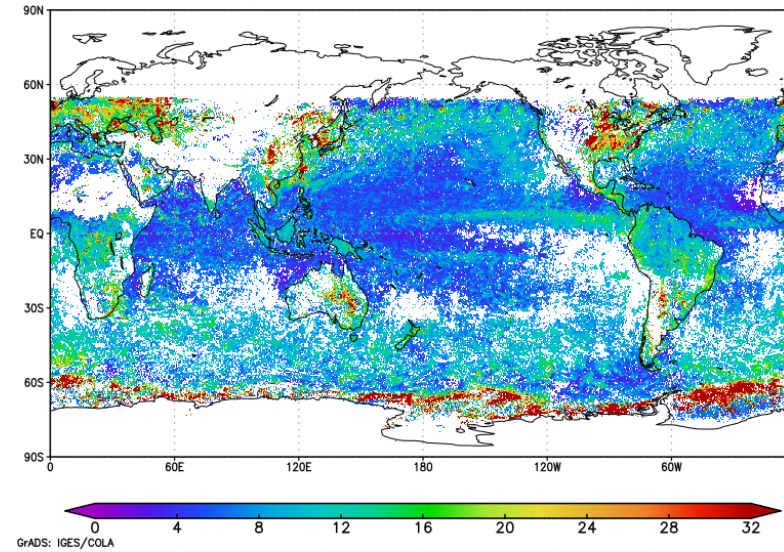
茶色：Dust粒子、緑：硫酸塩+炭素性エアロゾル、青：海塩

全球の平均的な雲場の比較

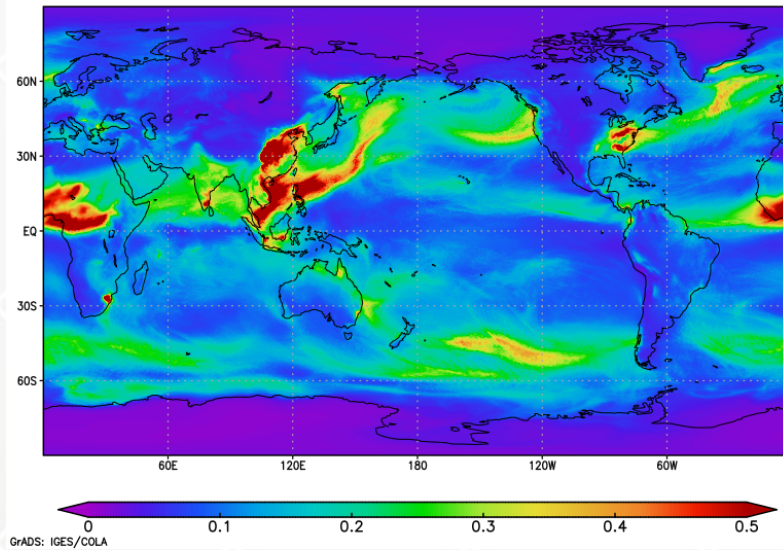
雲の光学的厚さ (NICAM : 10日平均)



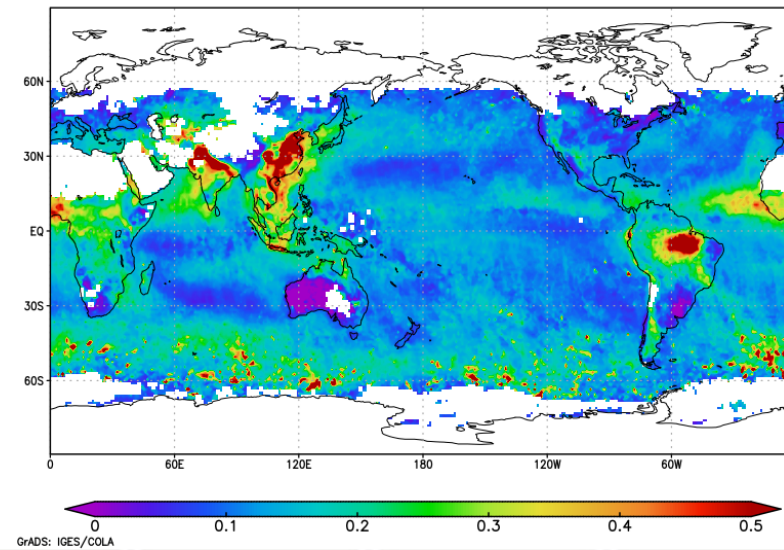
雲の光学的厚さ (MODIS衛星 : 11月平均)



エアロゾルの光学的厚さ (NICAM : 10日平均)



エアロゾルの光学的厚さ (MODIS衛星 : 11月平均)



利用した計算資源

GL11(dx=3.5km) :

- 1事例（2週間積分）：20480node × 19時間 × 2リスタート（約80万NH）
- 計算は7事例：約560万NH
- 計算結果の変換：640node × 4時間 × 20回（約5万NH）

GL09(dx=14km) :

- 1事例（2ヶ月積分）：640node × 1時間 × 60リスタート（約4万NH）
- 計算は4事例：約16万NH
- 計算結果の変換：クラスタで実施

その他として、感度実験、物理チューニングなどのためにおおよそ20万NH程度

H26年度の課題全体の利用率: 9854176/9907200 [NH](=99.47%)

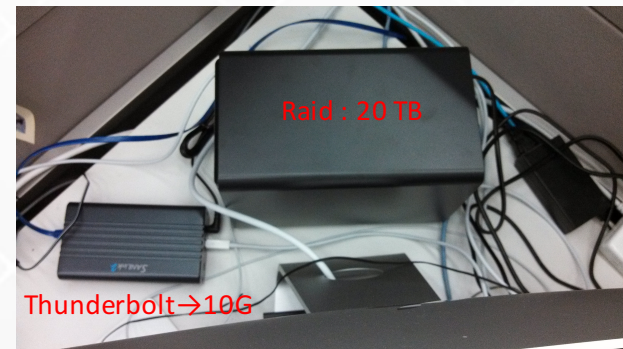
利用したストレージ

GL11(dx=3.5km) :

- 1事例（2週間積分） :
- 生データ : 約32TB
- GrADS形式ファイル : 3TB
- 全部で7事例 : 245 TB

保存方法

- 京のディスク : 45TB
- 共用ストレージ : 150TB (複製度は全て1)
- AICS気候チームサーバー (20TB)
- JAMSTECサーバー : 60TB
- 個人のRaid : 10TB (科研費で購入)



まとめ

- 雲とエアロゾルの相互作用を理解するため、雲、エアロゾル、雲エアロゾル相互作用を陽に計算する全球実験を行っている
- 京のような計算機を用いれば全球規模での上記の実験が（科学的な議論ができる程度の積分時間で）可能になってきた
- 解像度を上げることで、北極向きのBC輸送の過小評価を改善できる可能性がある（現在査読中のため箱口令）
- これは雲エアロゾル相互作用の空間分布の再現性が良くなったと捉えることができる

計算をやりながら困ったこと

- この手の計算に利用した計算資源は560万NH
（生涯消費資源は1000万NHに迫る：僕の給料の？年分のお金）
- ディスクが足りない
- 転送がしんどい