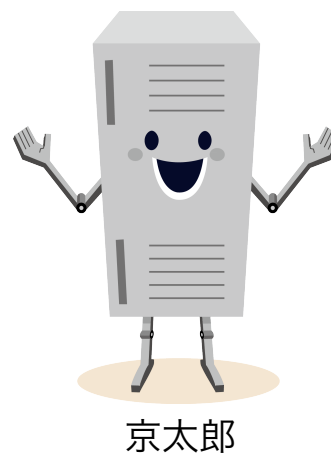


雲、その振る舞いをシミュレーションで再現する挑戦
～次世代大型計算機でのさらなる発展に向けて～

理化学研究所計算科学研究機構 (RIKEN AICS)

©RIKEN

基礎科学特別研究員 佐藤陽祐



目次

- 雲はコンピュータ上でどう表現されているか？
- 10年間で何が進んだか？
- 見えてきた問題とこれからの挑戦

目次

- 雲はコンピュータ上でどう表現されているか？
- 10年間で何が進んだか？
- 見えてきた問題とこれからの挑戦

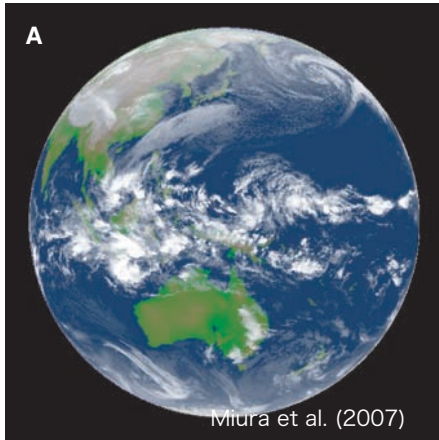
雲のシミュレーション →コンピュータ上で雲を作る

どうやって？→数値気象モデル・数値気候モデルを使って雲を作る



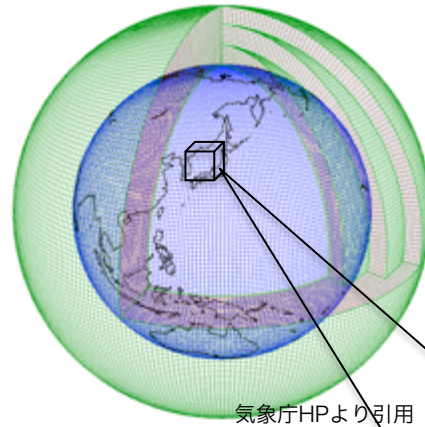
数値気象・気候モデル [格子法]の概要

人工衛星 (MTSAT-1R) に
よってとらえられた雲画像



数値気候モデルの模式図

格子で分割して
地球を表現



気象庁HPより引用

雲：
各格子の水滴、氷粒の
質量などで表現

各格子ごとに様々な物理法則を解いて大気現象を再現

$$\frac{\partial \rho q_v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho q_v \mathbf{u}) = 0$$

$$\frac{\partial \rho q_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho q_l \mathbf{u}) = 0$$

$$\frac{\partial \rho q_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho q_s \mathbf{u}) = 0$$

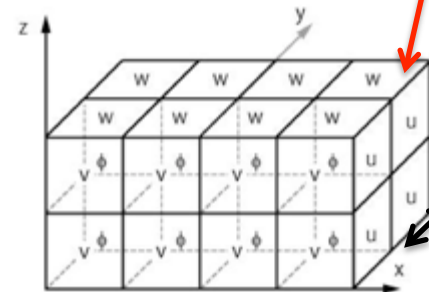
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -\nabla p - \rho g \mathbf{e}_z$$

$$\frac{\partial \rho \theta}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \theta \mathbf{u}) = 0$$

$$p = p_{00} \left(\frac{\rho \theta R^*}{p_{00}} \right)^{\frac{c_p^*}{c_p^* - R^*}}$$

数値気候モデルで用いられる格子系の例

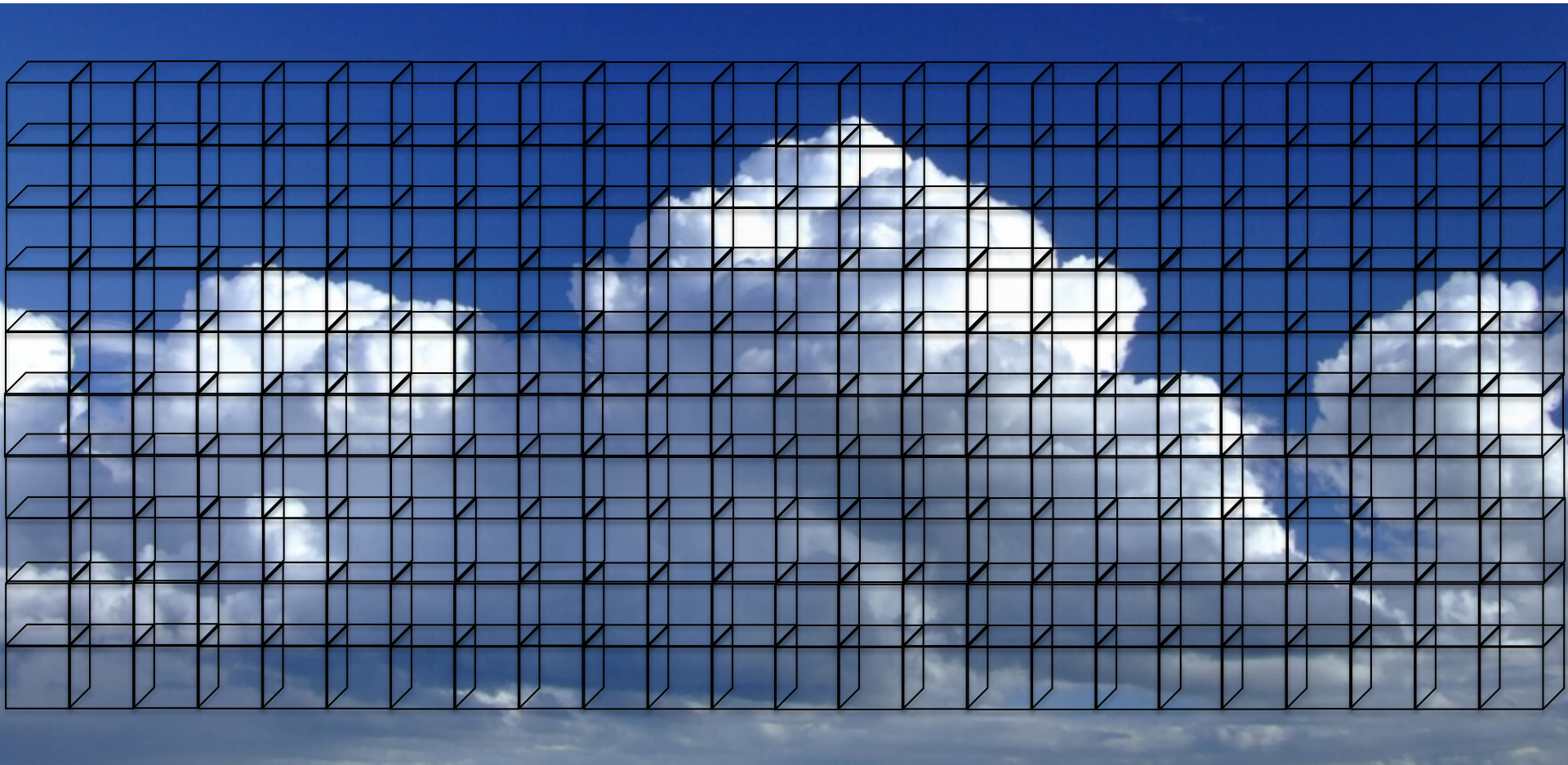


格子の幅：解像度

各格子の物理量を定義

メッシュで区切って表現

雲がある→格子内に水滴がある
雲がない→格子内に水滴がない



メッシュで区切って表現

人力？数値予報のイメージ図

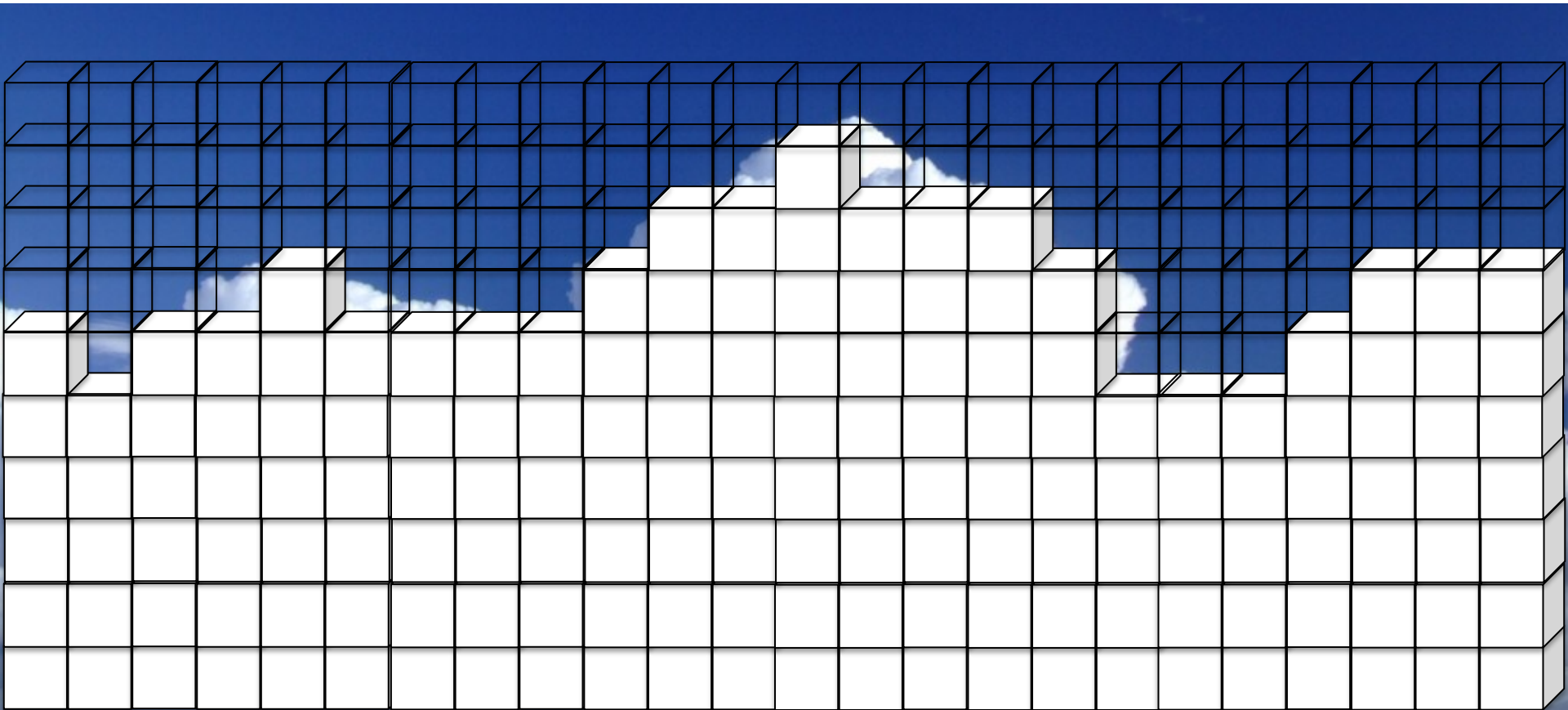


すべての格子で物理を計算・・・

地球全体を約50kmの格子で覆った場合

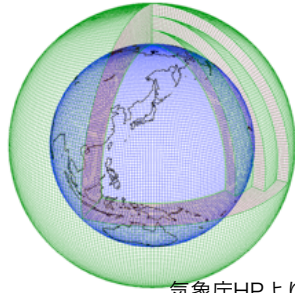
↓
格子数は10万格子

↓
大型計算機が必要

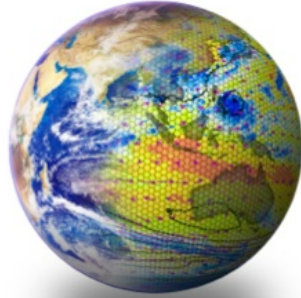


全球モデルと領域モデル

全球モデル：地球全体の計算をするモデル（気候モデル：週間予報）



気象庁HPより引用



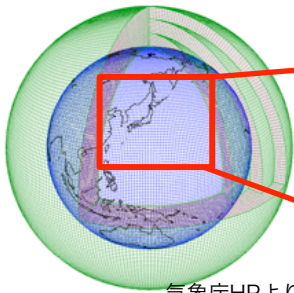
長所：

- 全球スケールの現象を扱える

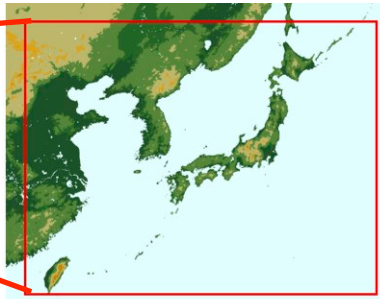
短所：

- 解像度を高くとれない

領域モデル：一部の領域のみに区切って計算を行う（気象モデル：日々の天気予報）



気象庁HPより引用



気象庁技術報告著別冊54巻より引用

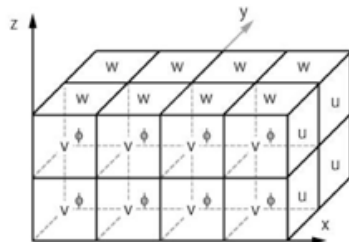
長所：

- 対象領域の高解像度な計算が可能

短所：

- 境界条件を与えるのが難しい
- 対象領域より大きなスケールの現象は解像できない

理想モデル：理想化された空間のみの計算を行う（LESなど）



長所：

- 必要な過程だけなので扱いが容易
- 超高解像度な計算が可能

短所：

- 現実的な事例を扱えない

目次

- 雲はコンピュータ上でどう表現されているか？
- 10年間で何が進んだか？（何に挑戦してきたか？）
 - 高解像・広領域化
 - 精緻化

Key Word：大型計算機（スーパーコンピューター）の計算能力向上

- 見えてきた問題とこれからの課題

日本のスーパーコンピュータの10年

地球シミュレータ（初代）：2002年



ピーク性能：
40TFLOPS

この10年ほどで計算性能は1000倍近くになった！

<http://www.jamstec.go.jp/es/jp/es1/index.html>

地球シミュレータ（第2世代）：2008年



ピーク性能：
122TFLOPS

<http://www.jamstec.go.jp/es/jp/es2/index.html>

京：2011年

計算機の計算能力が向上すると・・・

短時間にたくさんの計算を
できるようになる
(扱える格子数・物理量が増える)



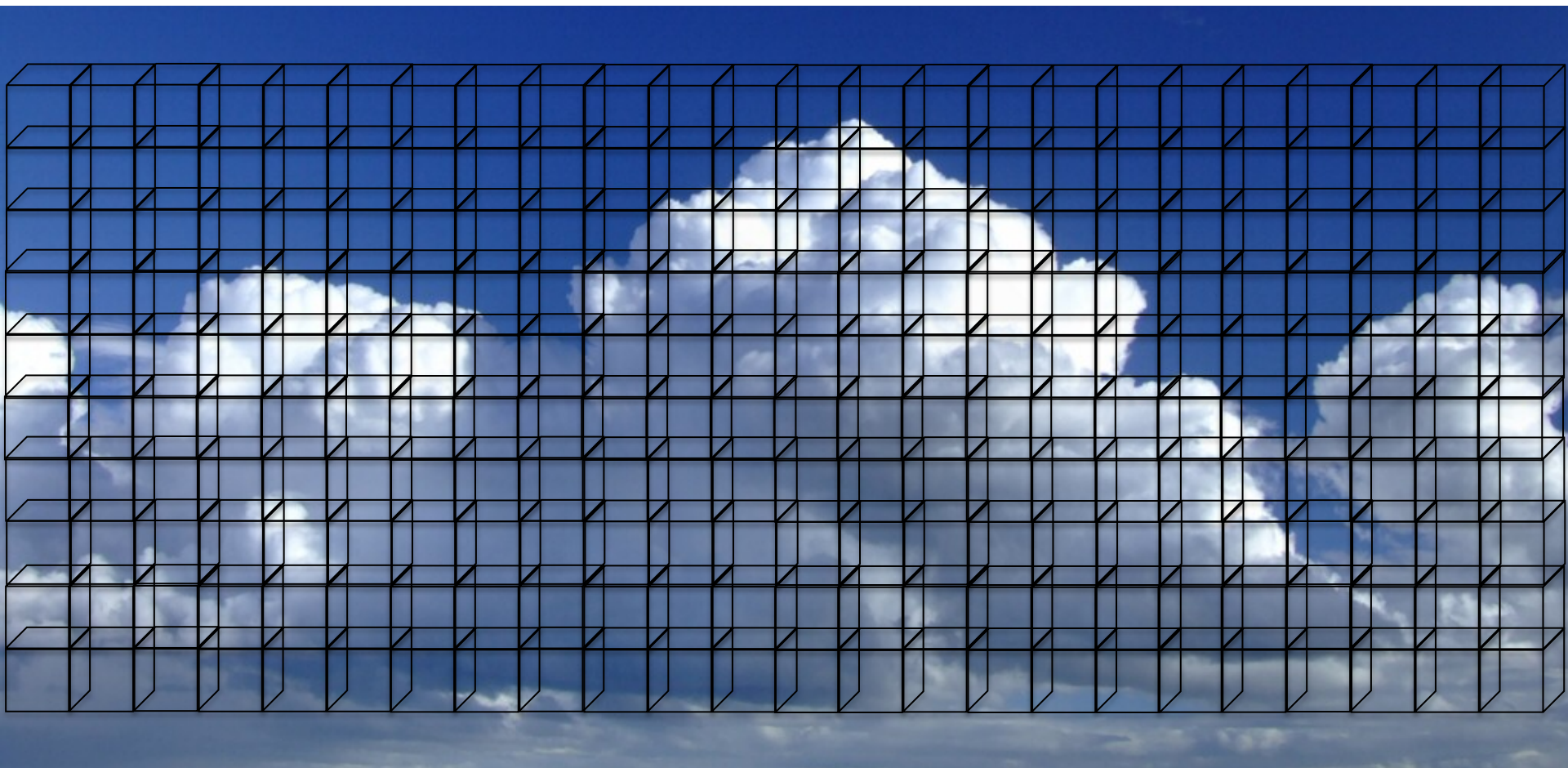
ピーク性能：
10.5PFLOPS

より細かい、広い、複雑な計算が早く終わる

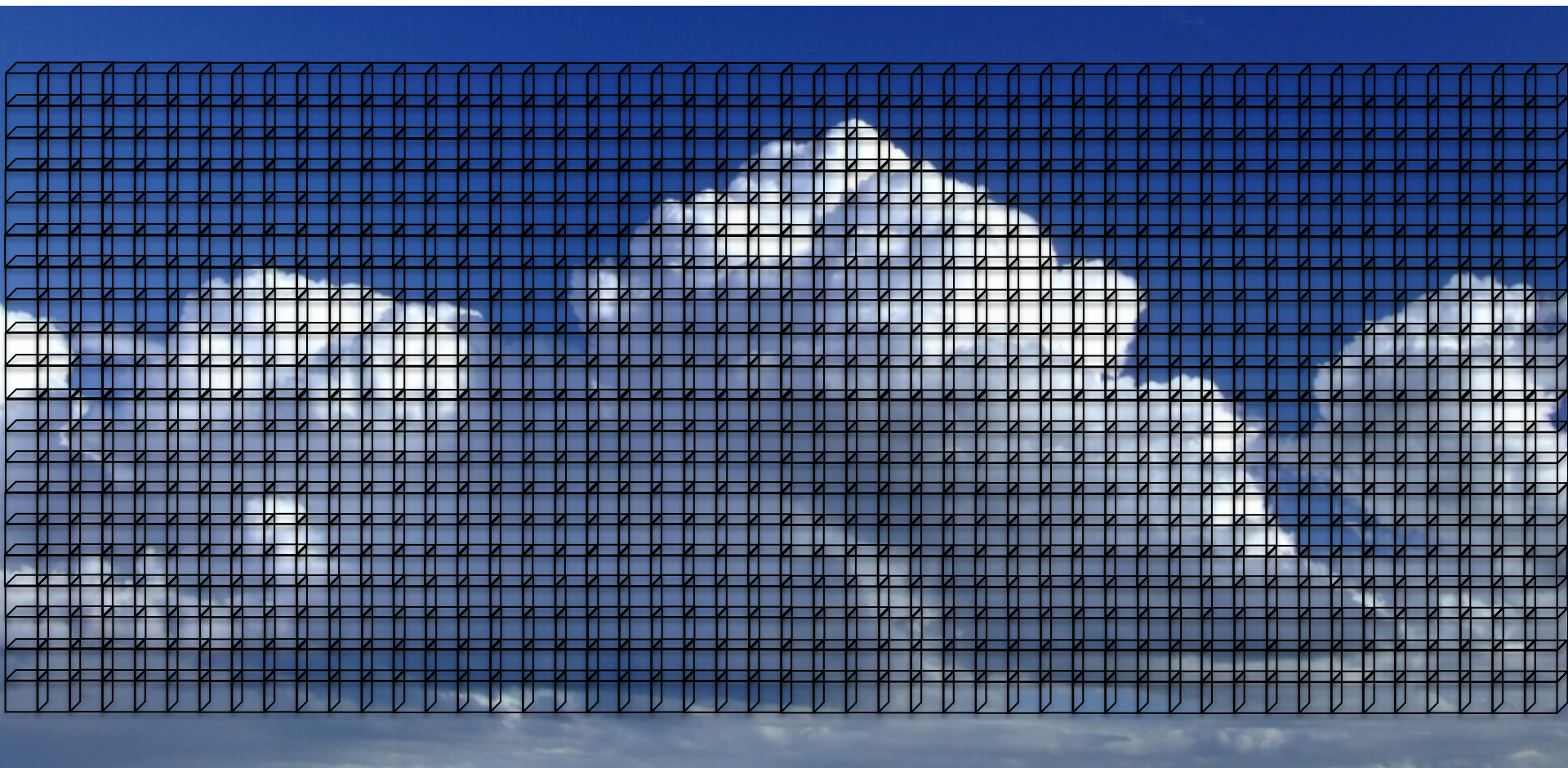
目次

- 雲はコンピュータ上でどう表現されているか？
- 10年間で何が進んだか？（何に挑戦してきたか？）
 - 高解像・広領域化（より細かく、より広く）
 - 精緻化
 - 事例数増加
- 見えてきた問題とこれからの課題

解像度の向上

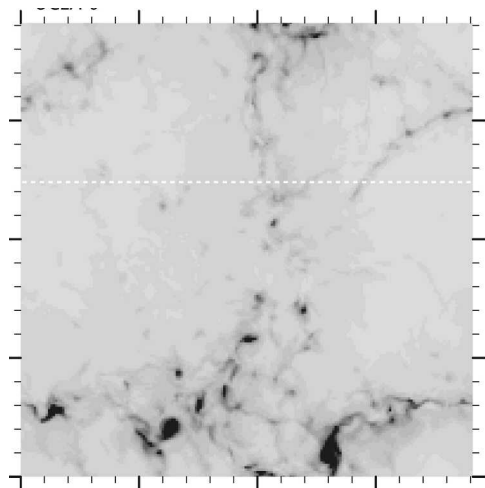


解像度の向上

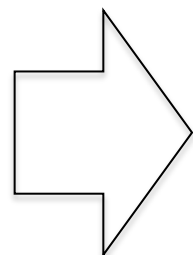


より細かいとは？

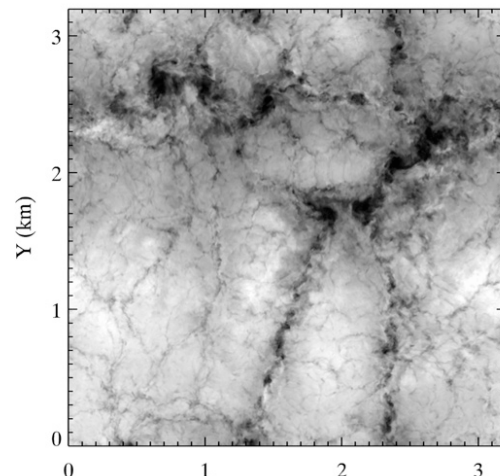
カリフォルニア沖の層積雲の例



Stevens et al. (2005)



格子幅を1/7に

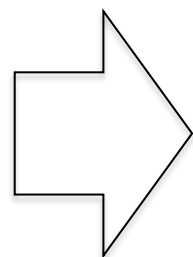
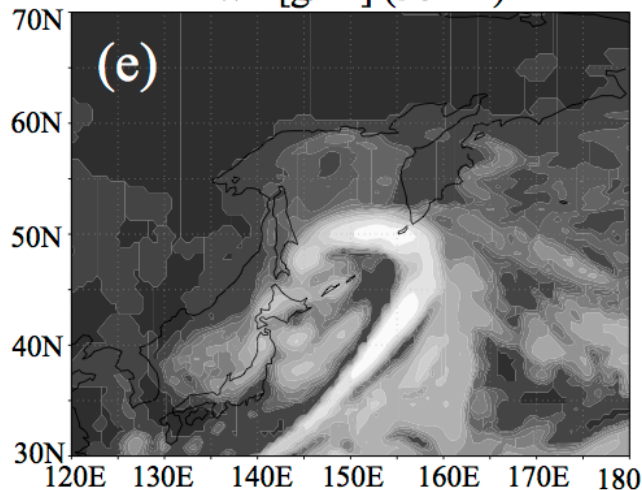


Yamaguchi et al. (2011)

より詳細な現象が再現
されることで
詳細な現象が雲に与え
る影響明らかになる

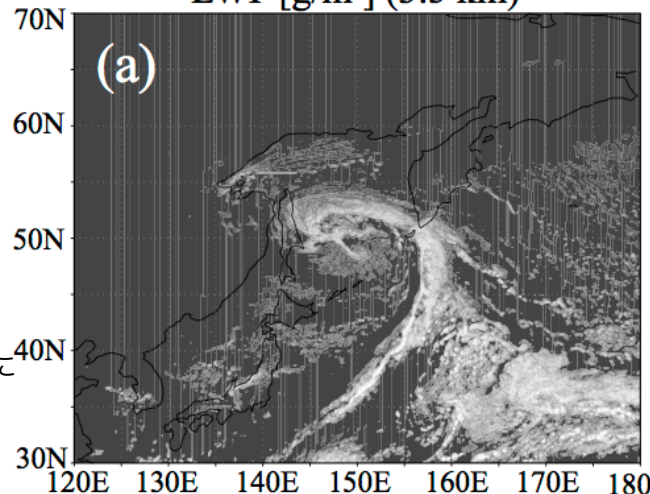
日本付近の低気圧の例

LWP [g/m^2] (56 km)



格子幅を1/16に

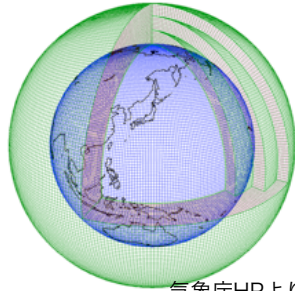
LWP [g/m^2] (3.5 km)



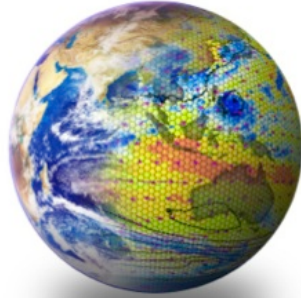
Sato et al. to
be submitted

全球モデルと領域モデル

全球モデル：地球全体の計算をするモデル（気候モデル：週間予報）



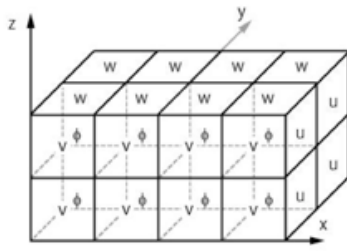
気象庁HPより引用



この10年で・・・

格子幅：数百km→数百m

理想モデル：理想化された空間のみの計算を行う（LESなど）



長所：

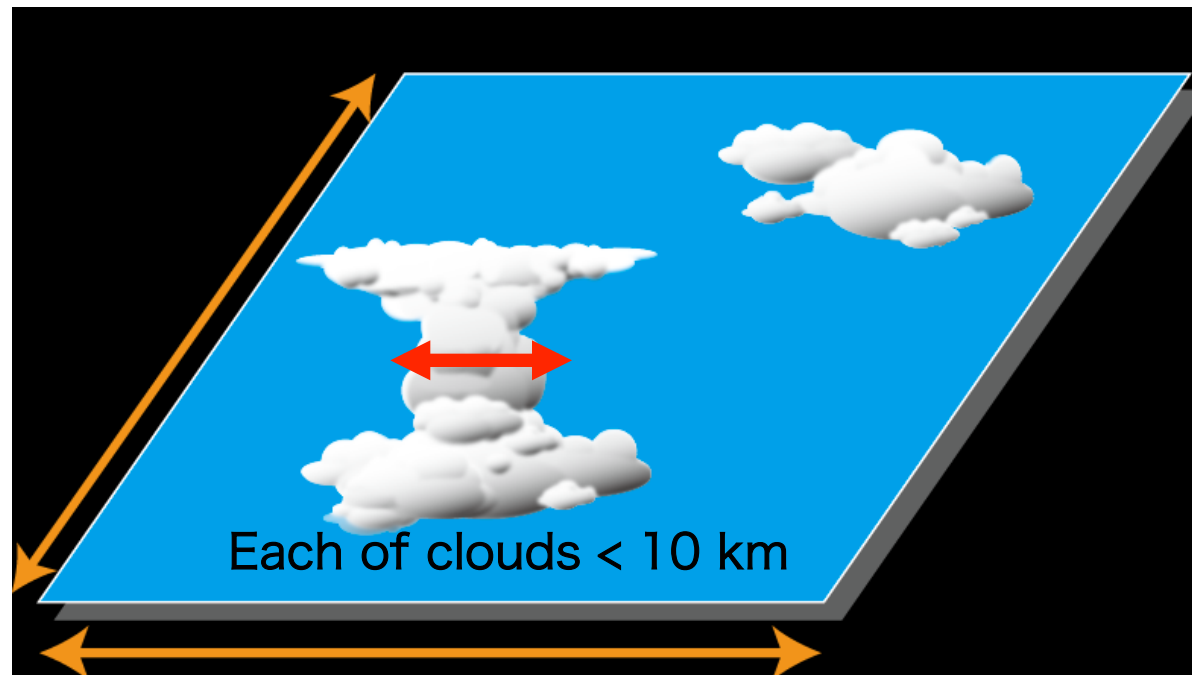
- 必要な過程だけなので扱いが容易
- 超高解像度な計算が可能

短所：

- 現実的な事例を扱えない

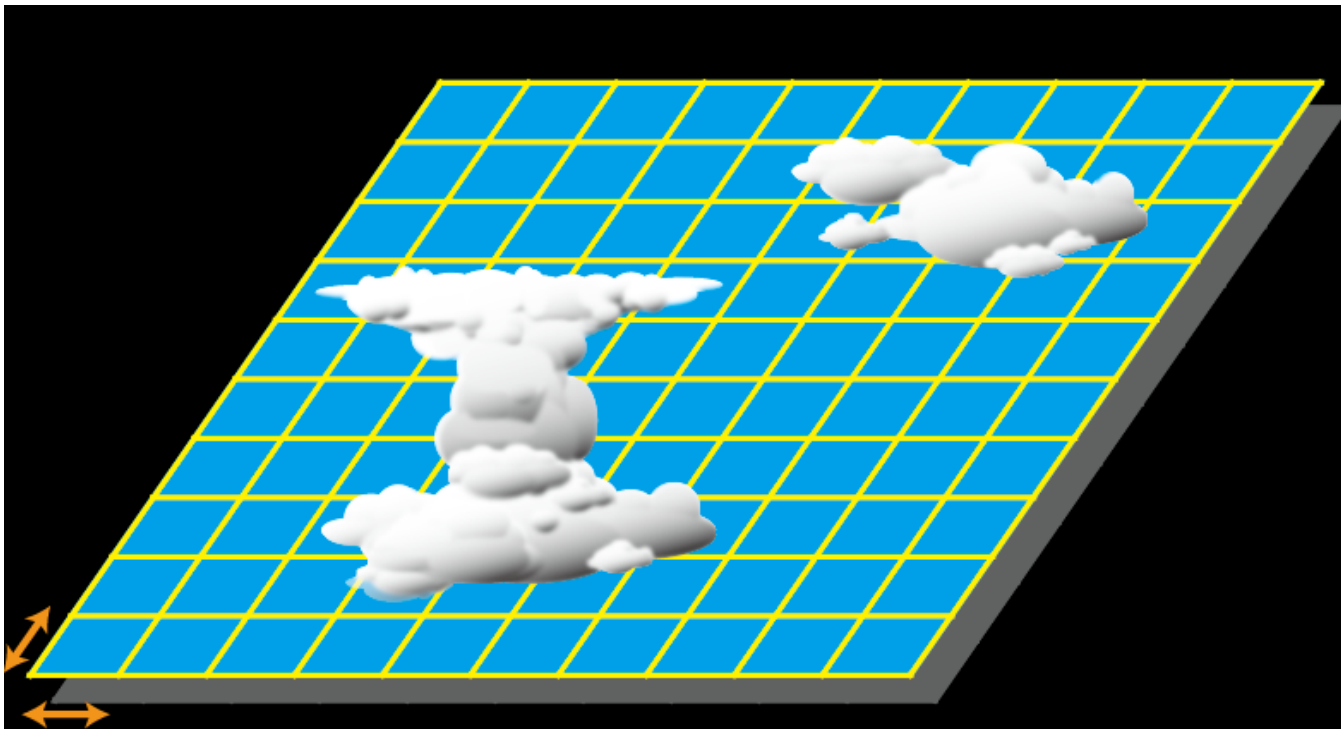
1 0年前後前までの数値モデル中の雲の表現方法 ～パラメタリゼーション～

- 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



近年の数値モデルによる雲の表現方法 ～雲微物理モデル～

- 格子間隔が小さくなり高解像度化が進んだ
- 個々の積雲や積乱雲(雲システム)が解像できるようになった(雲解像モデル)
 - パラメタリゼーションを排除して雲の挙動を直接計算

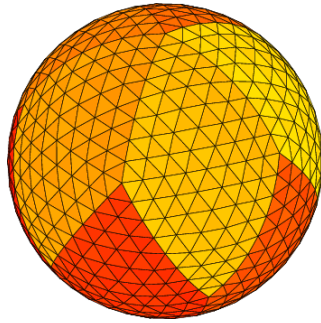


格子幅：数百m～数km（全球モデル）

高解像度化による発展（全球モデルNICAMの事例）

NICAM:正二十面体格子を用いた全球雲解像モデル

NICAMの格子系



参考文献

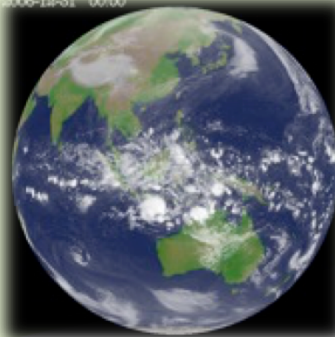
- Tomita and Satoh (2005)
- Satoh et al. (2008)
- Satoh et al. (2014)

地球シミュレータ



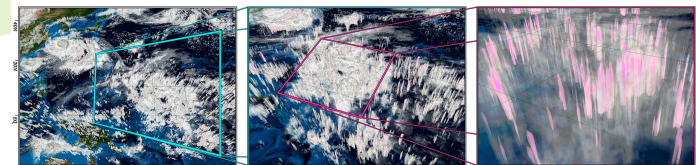
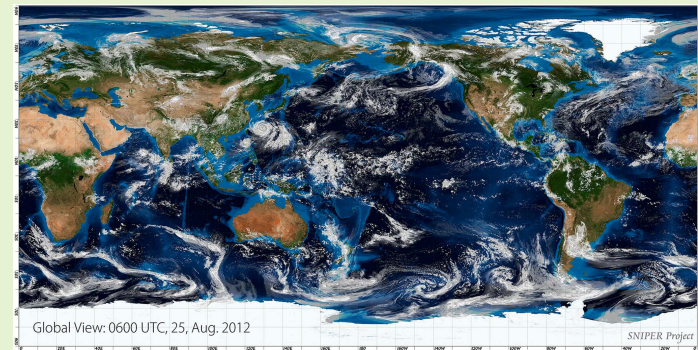
地球シミュレータ以前

格子幅：全球100km



格子幅：全球3.5km
(Miura et al 2007)

京



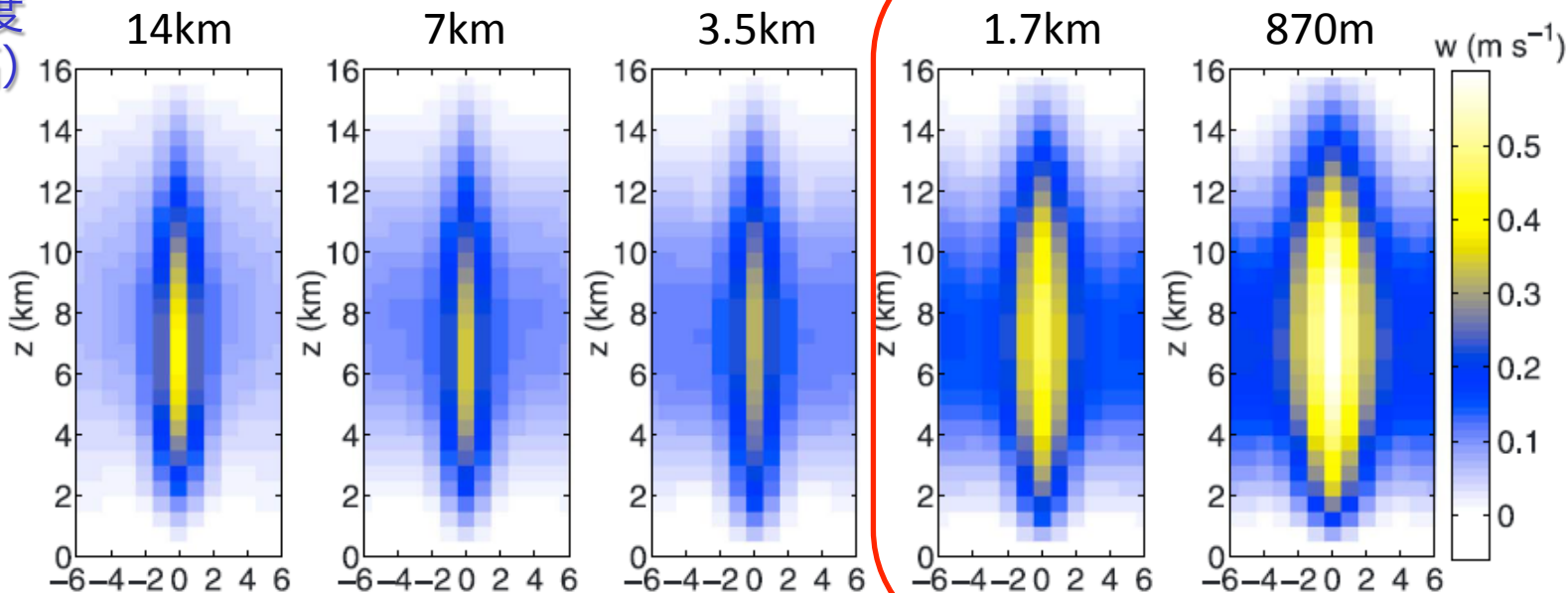
格子幅：全球870m
(Miyamoto et al. 2013)

「京」を使った実験でわかった積乱雲の特徴

水平解像度
(格子間隔)

雲の中の
上昇流

格子数

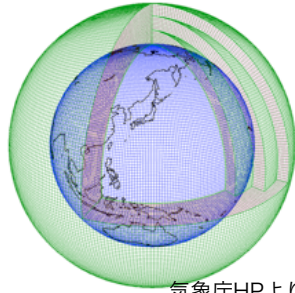


モデルの解像度が 2.0km よりも細かくなると …

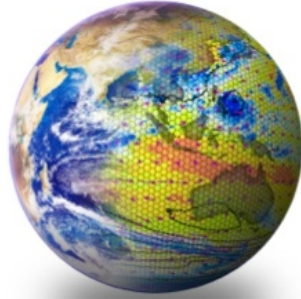
1. 積乱雲の中心が複数個の格子点で表現
2. 全球の積乱雲の表現がより正確に
3. 1つ1つ積乱雲と組織化された積乱雲群、全球大気大循環との相互作用の研究に大きな期待

全球モデルと領域モデル

全球モデル：地球全体の計算をするモデル（気候モデル：週間予報）



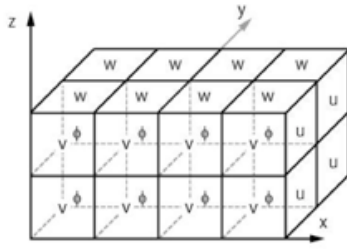
気象庁HPより引用



この10年で・・・

格子幅：数百km→数百m

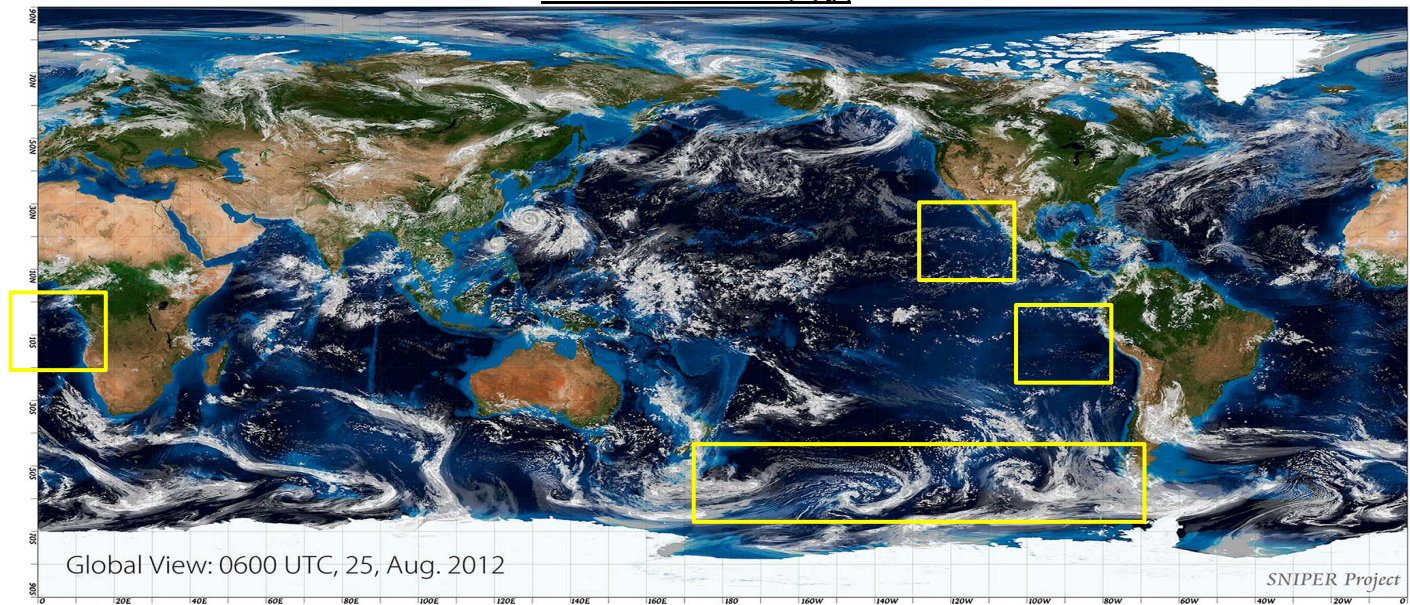
理想モデル：理想化された空間のみの計算を行う（LESなど）



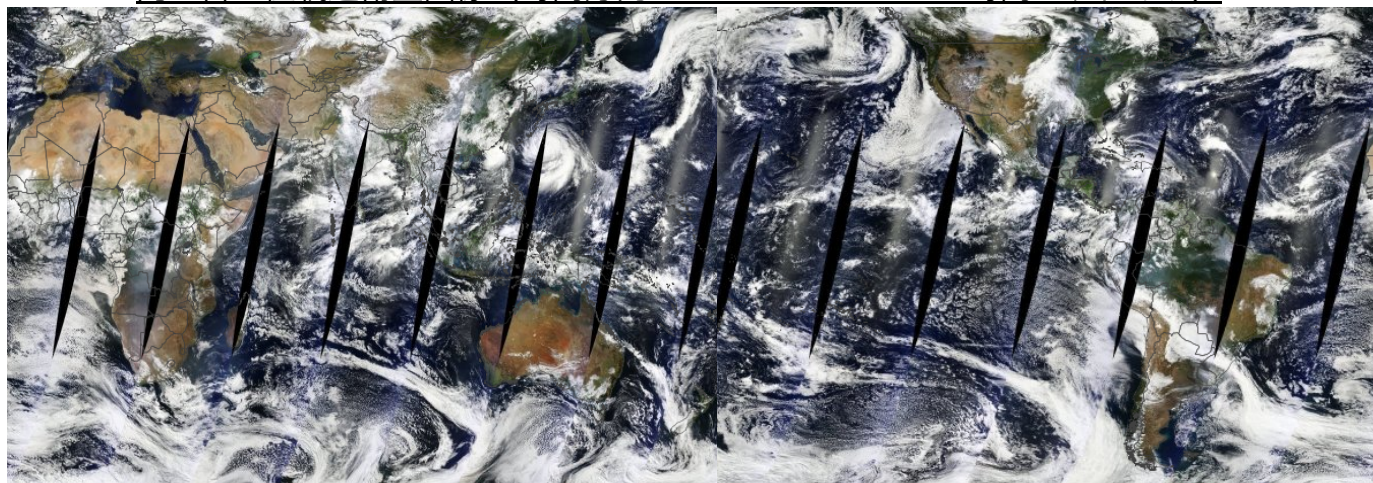
この10年で・・・

計算領域の広さ：数km→数百km
(格子幅は数十m)

NICAM の870m実験

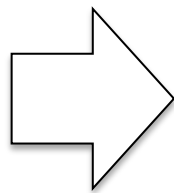
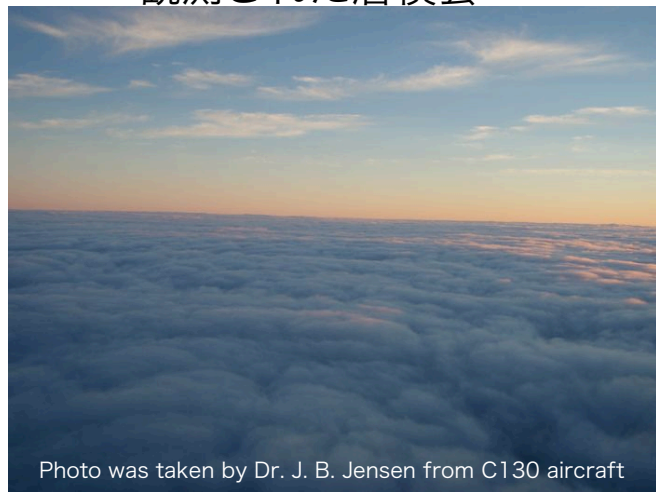


同じ日の極軌道衛星画像（時間方向にマージしているので時間のずれあり）



低層雲を再現する難しさ

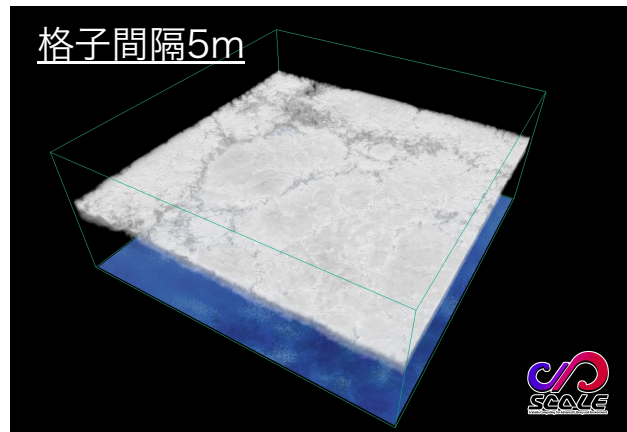
観測キャンペーン (DYCOMS-II) で
観測された層積雲



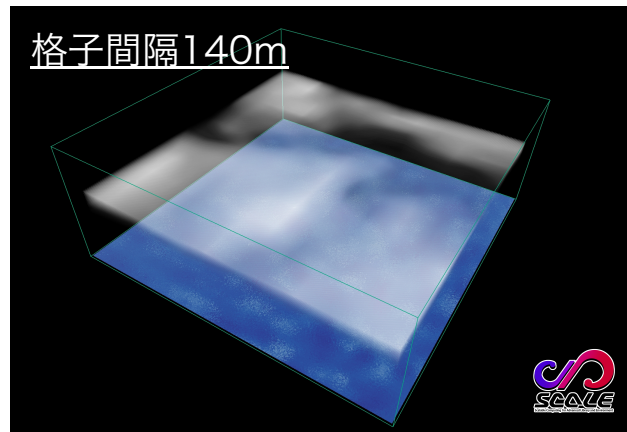
観測データを
元に理想実験

格子間隔を変えた数値実験

格子間隔5m



格子間隔140m



細かい格子幅でなければ層積雲が再現できない



一部の領域だけが、細かいスケールの現象を
再現するモデルで再現

広領域化による発展（理想化されたLESの事例）

理想化されたLESモデル
(格子間隔が数十m～数m)



参考文献

- Sato et al. (2014)
- Sato et al. (2015)
- Nnishizawa et al. (2015)

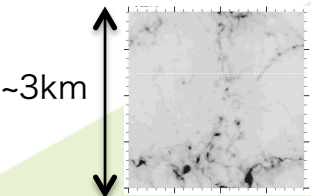
Earth Simulator



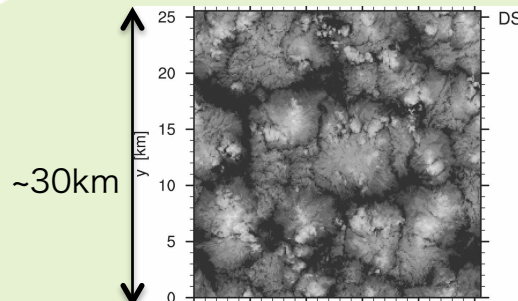
京



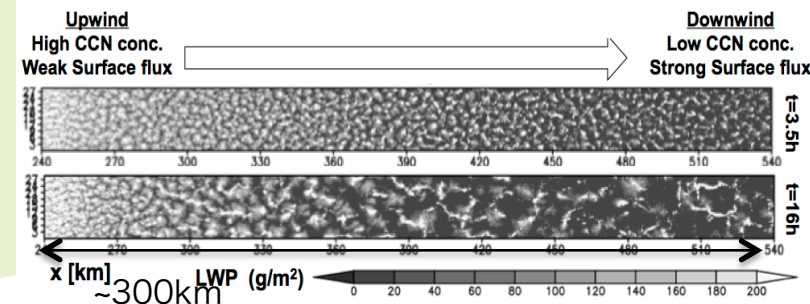
Earth Simulator以前



格子幅：50m、領域サイズ：～3km
(Stevens et al 2005)

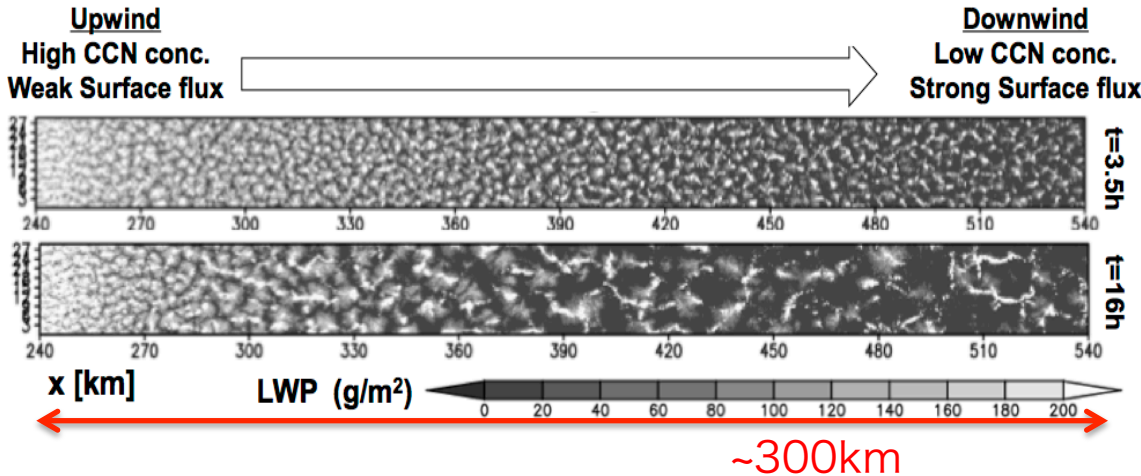


格子幅：50m、領域サイズ：6～30km
(Ackerman et al 2009)
(Savic-Jovcic and Stevens 2008)

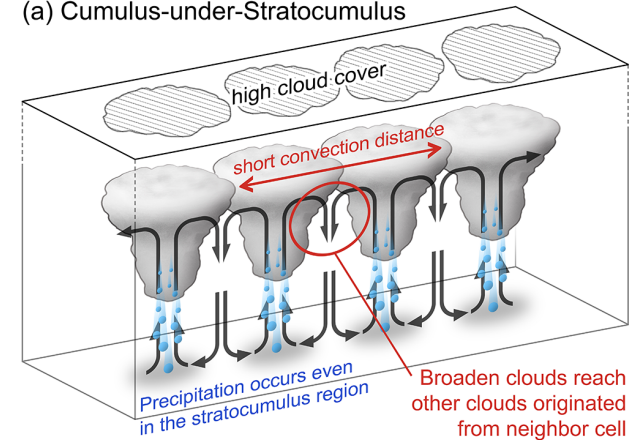


格子幅：50m、領域サイズ30～300km
(Sato et al. 2015)

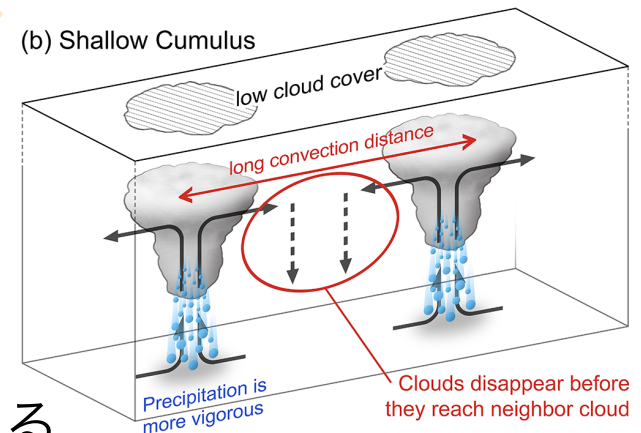
雲ひとつ → 複数の雲の計算



(a) Cumulus-under-Stratocumulus



(b) Shallow Cumulus



モデルの計算領域が広くなると

1. 複数の雲が計算領域内に含まれる
 2. 個々の雲の相互作用を考慮できる
 3. 異なる雲の形状を一つの計算領域で計算できる
- もっと粗い解像度での計算手法の改良に役立てられる



目次

- 雲はコンピュータ上でどう表現されているか？
- 10年間で何が進んだか？（何に挑戦してきたか？）
 - 高解像・広領域化（より細かく、より広く）
 - 精緻化（より複雑に）
 - エアロゾルとの相互作用
 - 精密な雲粒の表現
- まとめとこれからの課題

エアロゾルとは？→大気中の微粒子（塵）

（PM 2.5、PM10もエアロゾルの呼び方の一種）

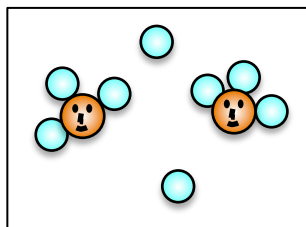
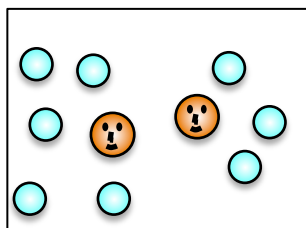


エアロゾルが雲を変える（間接効果）

2005年 石坂氏、村上氏の発表でも紹介

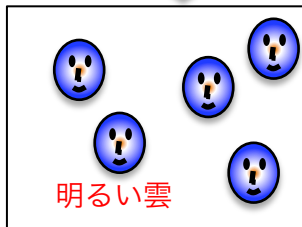
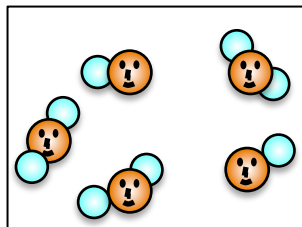
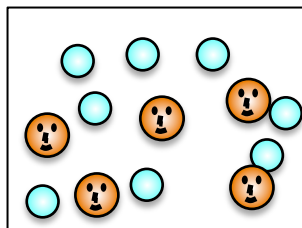
TRMM衛星から観測された雲粒のサイズ（有効半径）

エアロゾルが少ない時



暗い雲

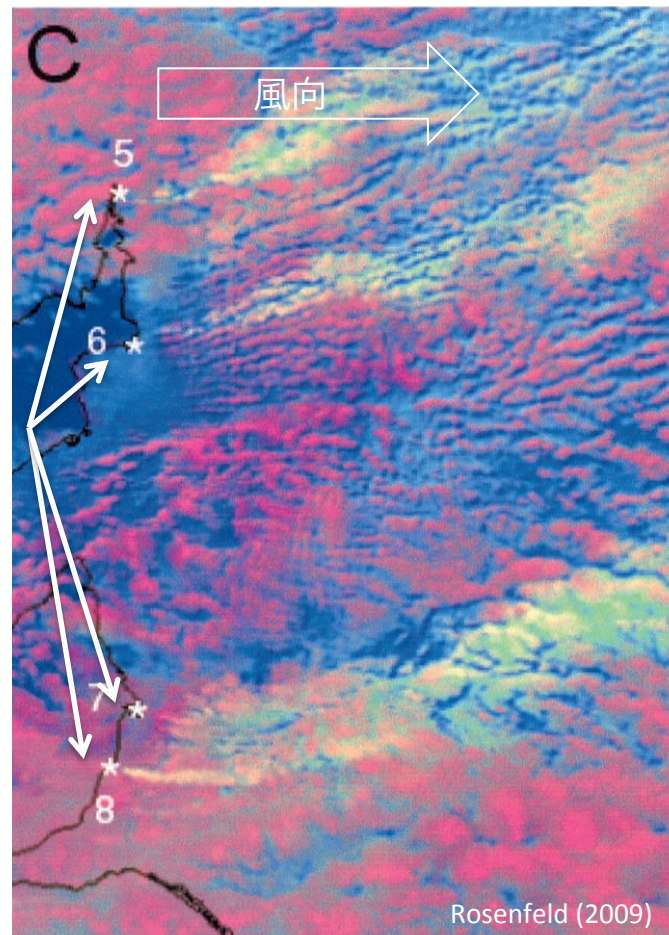
エアロゾルが多い時



明るい雲



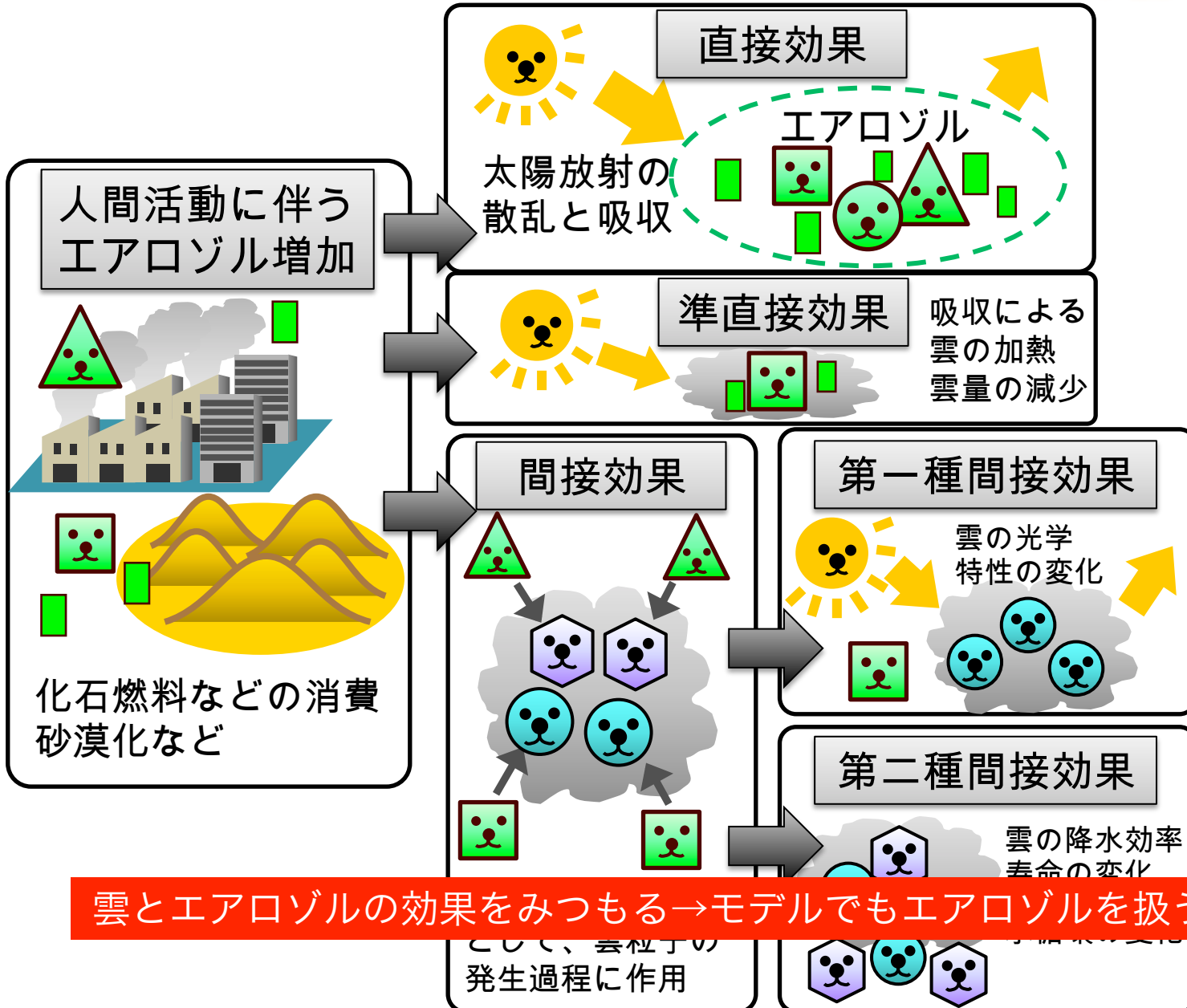
火力発電所



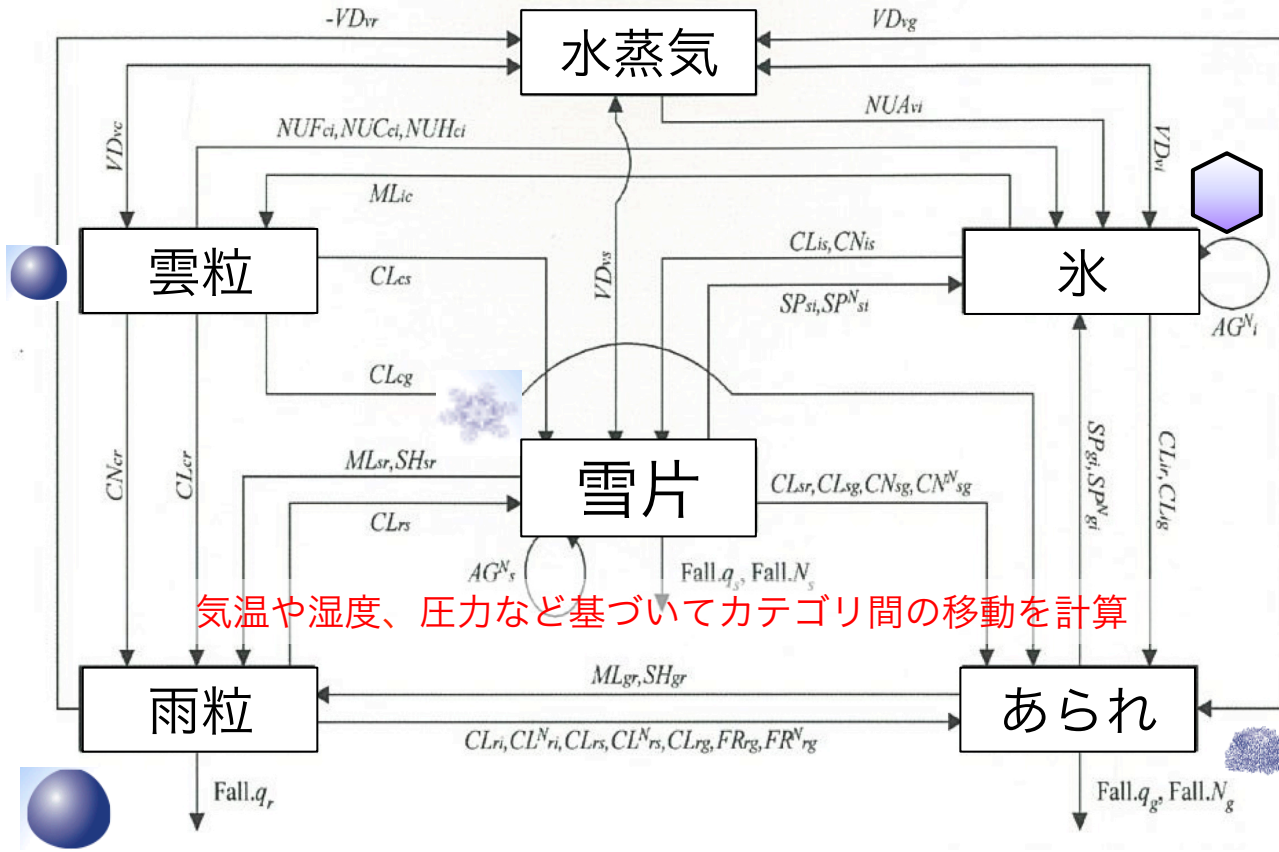
赤：大粒子 黄色：小粒子

エアロゾルが多い時には雲粒が
小さくなる
（間接効果）

エアロゾルの直接効果・間接効果



10年前の最先端モデル (雲モデル)



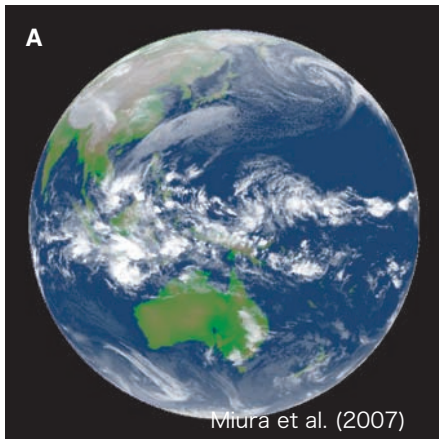
気温や湿度、圧力など基づいてカテゴリ間の移動を計算

2005年名古屋大学水循環研究センター坪木氏の発表資料よりを一部変更

この時点ではエアロゾルを取り扱っていない→雲エアロゾル相互作用は取り扱っていない

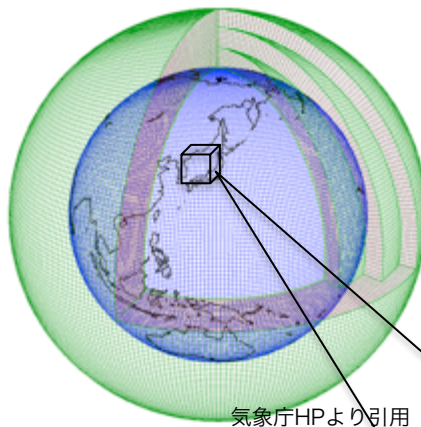
エアロゾルの過程を導入 (この10年での最も進んだところ)

人工衛星 (MTSAT-1R) に
よってとらえられた雲画像



格子で分割して
地球を表現

数値気候モデルの模式図



エアロゾルの要素を追加
(計算量が増える)

雲とエアロゾルの
相互作用を計算

雲：
各格子の水滴、氷粒の
質量などで表現

各格子ごとに様々な物理法則を解いて大気現象を再現

$$\frac{\partial \rho q_v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho q_v \mathbf{u}) = 0$$

$$\frac{\partial \rho q_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho q_l \mathbf{u}) = 0$$

$$\frac{\partial \rho q_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho q_s \mathbf{u}) = 0$$

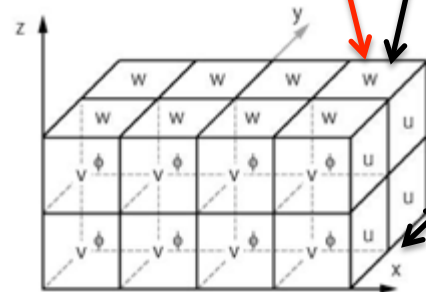
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -\nabla p - \rho g \mathbf{e}_z$$

$$\frac{\partial \rho \theta}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \theta \mathbf{u}) = 0$$

$$p = p_{00} \left(\frac{\rho \theta R^*}{p_{00}} \right)^{\frac{c_p^*}{c_p^* - R^*}}$$

数値気候モデルで用いられる格子系の例

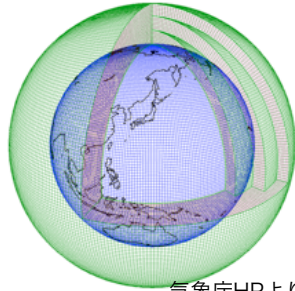


格子の幅：解像度

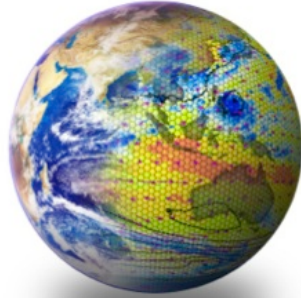
各格子の物理量を定義

全球モデルと領域モデル

全球モデル：地球全体の計算をするモデル（気候モデル：週間予報）



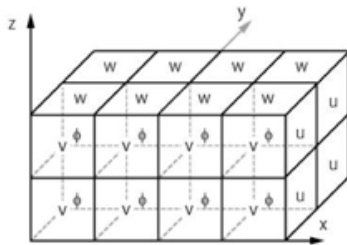
気象庁HPより引用



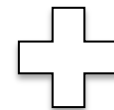
この10年で・・・

格子幅：数百km→数百m

理想モデル：理想化された空間のみの計算を行う（LESなど）



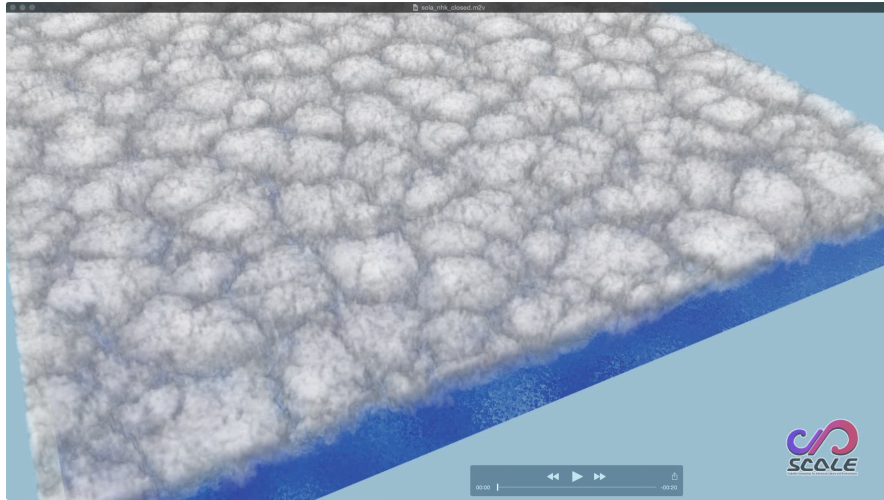
この10年で・・・
計算領域の広さ：数km→数百km
（格子幅は数十m）



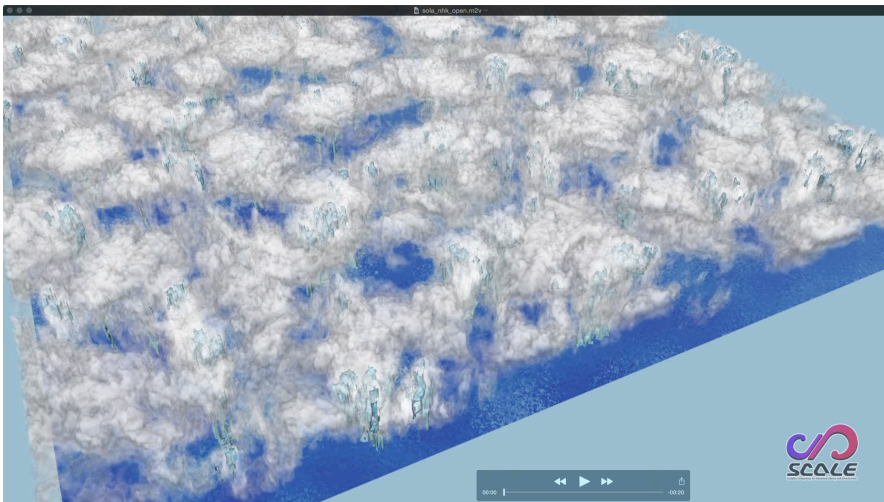
エアロゾルと雲の扱いが
加わった

エアロゾルを考慮した計算例（理想実験）

エアロゾルが多い場合の層積雲



エアロゾルが少ない場合の層積雲



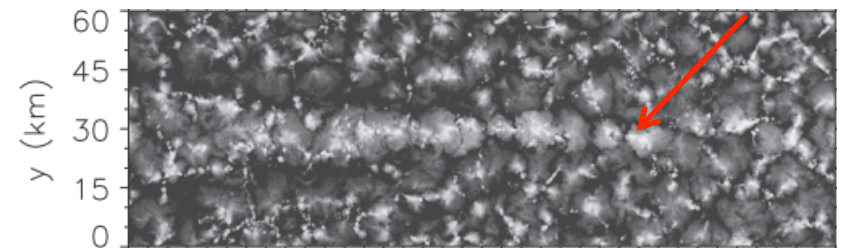
航跡雲



人工衛星から撮影された航跡雲



モデルで再現された航跡雲

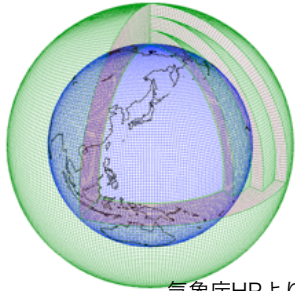


エアロゾルを
発生させる

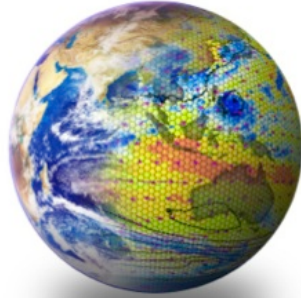
Wang and Feingold (2009)

全球モデルと領域モデル

全球モデル：地球全体の計算をするモデル（気候モデル：週間予報）

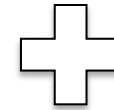


気象庁HPより引用



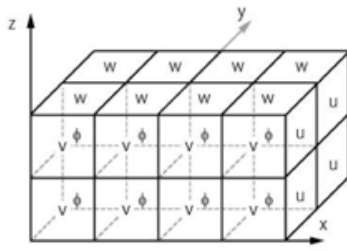
この10年で・・・

格子幅：数百km→数百m



エアロゾルと雲の扱いが
加わった

理想モデル：理想化された空間のみの計算を行う（LESなど）



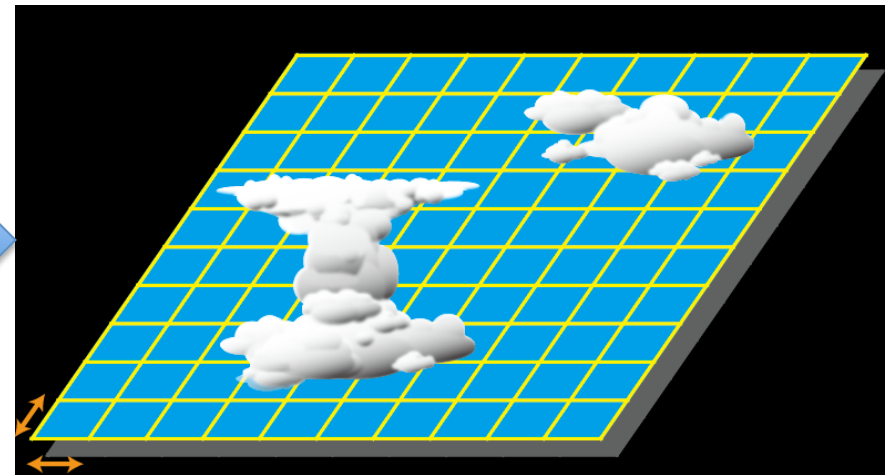
おさらい：この10年で 全球モデルで雲を解像できるようになった

10年前



そもそも雲を表現できていないので、
エアロゾルの影響も（直接）計算で
できない

現在



エアロゾルの雲への影響を（直接）
計算できる！

この10年の雲モデリングの発展

- 計算機性能の向上に伴い発展
 - 高解像化（より細かく）
 - 広領域化（より広く）
 - 精緻化（より複雑に）
 - エアロゾルと雲の計算を直接行うようになった
 - 雲粒の表現方法が精緻になった（特に氷）

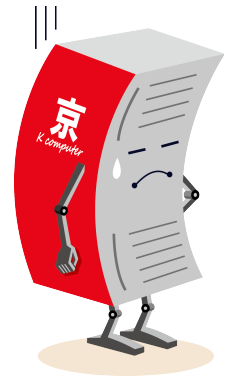
目次

- 雲はコンピュータ上でどう表現されているか？
- 10年間で何が進んだか？
- 見えてきた問題とこれからの課題

10年で見えてきた問題 (数値シミュレーション)

- 大型計算機→使いこなすのが大変
 - 大型計算機の特徴がコロコロ変わる
→これまで使ってきたモデルが新しい計算機で使えない
- 高解像で精緻な計算→データ容量が膨大
 - 計算以外のところに膨大な時間がかかる
 - データ保存場所がない（1回の計算で40TB）

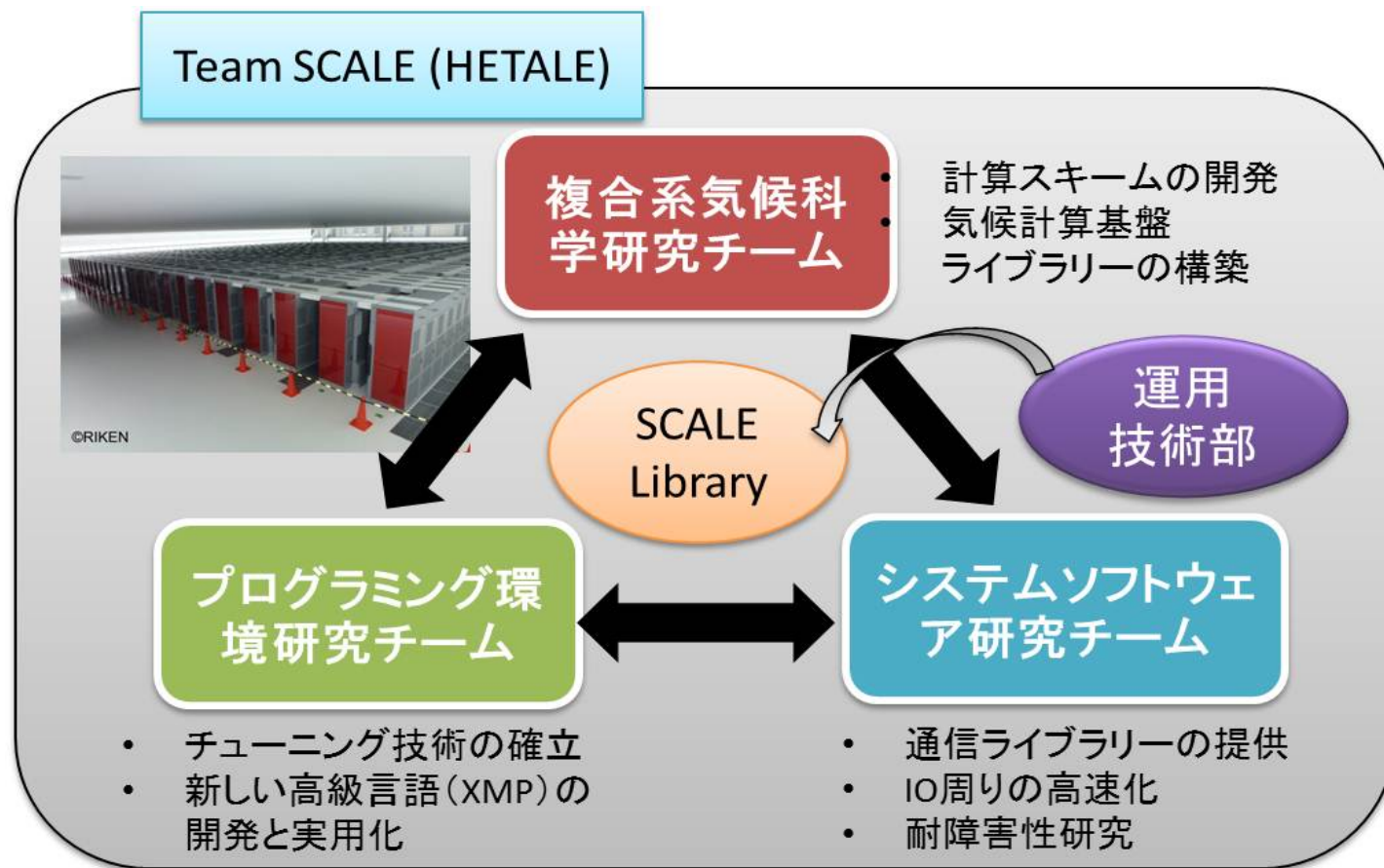
気象学の知識だけでは解決が困難



要した時間

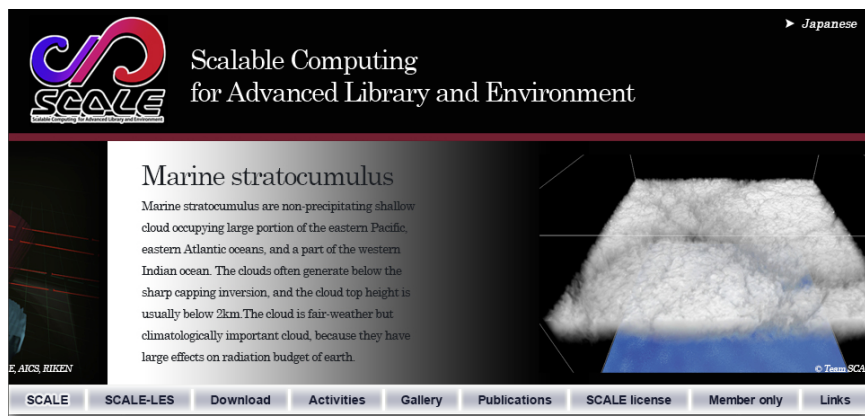
計算準備	計算	データの移動	表示（可視化）
15秒	約1日	約3日	1日

気象学と計算機科学の連携@RIKEN/AICS Co-design



今後は気象学の分野だけでなく、計算機を専門とする研究者と連携も
大型計算機を使う上では不可欠

Co-designにより開発された SCALEライブラリ



計算機科学の研究者と共同開発

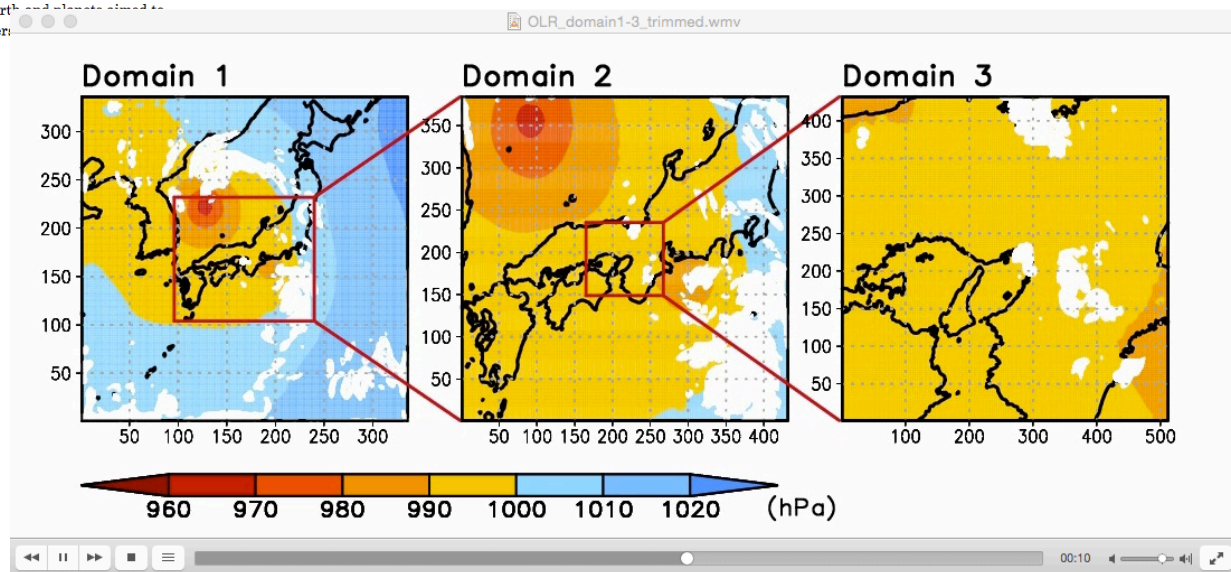
What is SCALE

SCALE (Scalable Computing for Advanced Library and Environment), which stands for Scalable Computing for Advanced Library and Environment, is a basic library for weather and climate model of the earth. It is widely used in various models. The SCALE library is developed with co-design by researchers in meteorology and computer science.

京を用いれば15時間で
4年分の計算が可能



事例数が増加し、統計的な
解析が可能



まとめ

この10年で・・・

- より細かい計算が可能になった
 - 雲を直接解像するようになった
- より広い領域をカバーした計算が可能になった
- エアロゾルと雲の相互作用を直接計算するようになった
- モデル内で計算する雲粒の特徴が増えた

今後、モデリングで雲科学を発展させるために

気象研究者間の連携＋計算機科学を専門とする研究者との
連携も重要