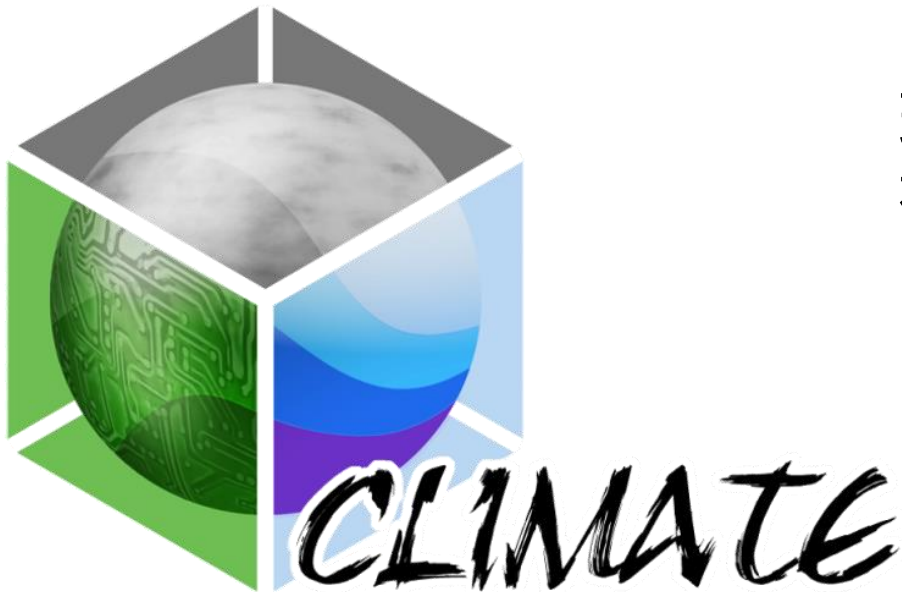


気候シミュレーション： ねらい、方法、面白さ



理化学研究所・計算科学研究センター
複合系気候科学研究チーム
富田浩文

KOBE HPCサマースクール2022：2022年8月30日



本日のお話

前半：これまで私がやってきたこと

- 自己紹介
- 学生時代
 - ベナール対流のお話
 - 私のモデルづくりとサイエンスの原点
- 地球フロンティア・JAMSTEC時代
 - 全球高解像度大気モデル構築のお話
 - 歴史
 - 2000年当時の全球モデルの問題
 - なぜ、20面体格子？
 - 一つのマイルストーン：水惑星実験による熱帯の雲階層構造
- 理研に移ってから、
 - モデルフレームワーク構築
 - なぜ、いまさら新しいモデルつくるの？

後半：気候計算、ねらい、方法、面白さ

- ねらい：
 - そもそも気候学とは？
 - 気候シミュレーションは何のため？
 - アセスメント、本質理解の二本立て
- 方法：どのようにして行う？
 - 離散化
 - 流れの方程式
 - 物理過程
- 面白さ
 - 高解像度、精緻なシミュレーション
 - 現象が現実や理屈にあっているか？
- 私が面白いと思っていること
 - 自己組織化と階層構造
- チャレンジングなこと！
 - 全球ラージエディシミュレーション

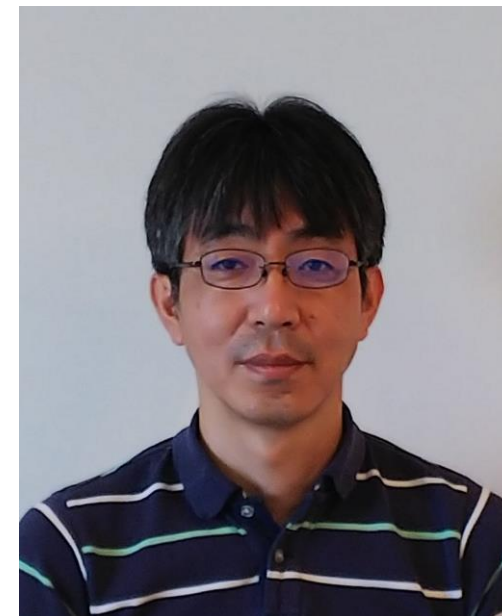
前半：これまで私がやってきたこと



自己紹介

京都市山科区出身：1969年10月21日 (満52歳)

- 1999.3： 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻
博士（工学）取得
- 1999.4: 地球フロンティア研究システム ポスドク研究員
- 2004.4: (独) 海洋研究開発機構 研究員
- 2007.4: 同機構 主任研究員
- 2011.1～ (国) 理化学研究所・計算科学研究機構
(現計算科学研究センター) 複合系気候科学研究チーム チームリーダー
- 2014.4-2021.3: 本務変更
同研究所・フラグシップ2020開発プロジェクト副プロジェクトリーダー
アプリケーション開発チーム チームリーダー
- 2018.4～ 同研究所・開拓研究本部・富田数理気候研究室 研究主宰者 兼務
- 2021.4～ 複合系気候科学研究チーム 本務復帰

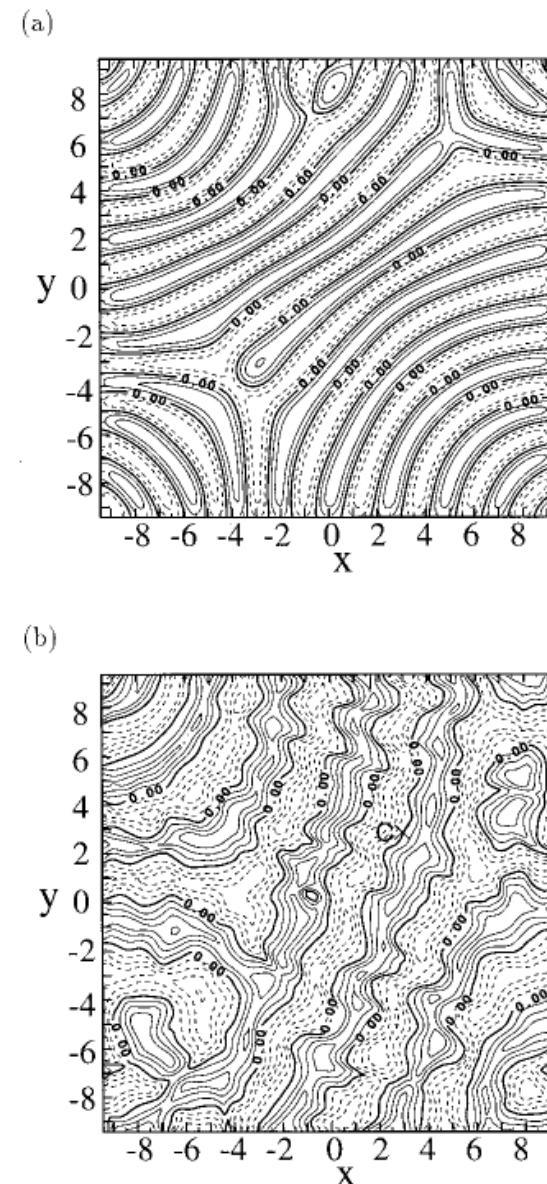




学生時代にやっていたこと

- レイリー（ベナール）対流
 - 熱対流駆動のRayleigh対流：
 - 上下の温度差を上げていくと、熱拡散から熱対流へ移行
 - 更に温度差を上げると、traveling waveが発現します。カオスへの第一歩。
 - 何が面白かったか？
 - 熱対流の形状に興味があった。
 - 温度差を与えるととりあえず対流が発現したので、なんか楽しかった。

Tomita, H. and K. Abe(1999) : Numerical simulation of the Rayleigh-Benard convection of air in a box of a large aspect ratio. *Phys. Fluids*, 11, 743-745



Tomita & Abe (1999): Fig1



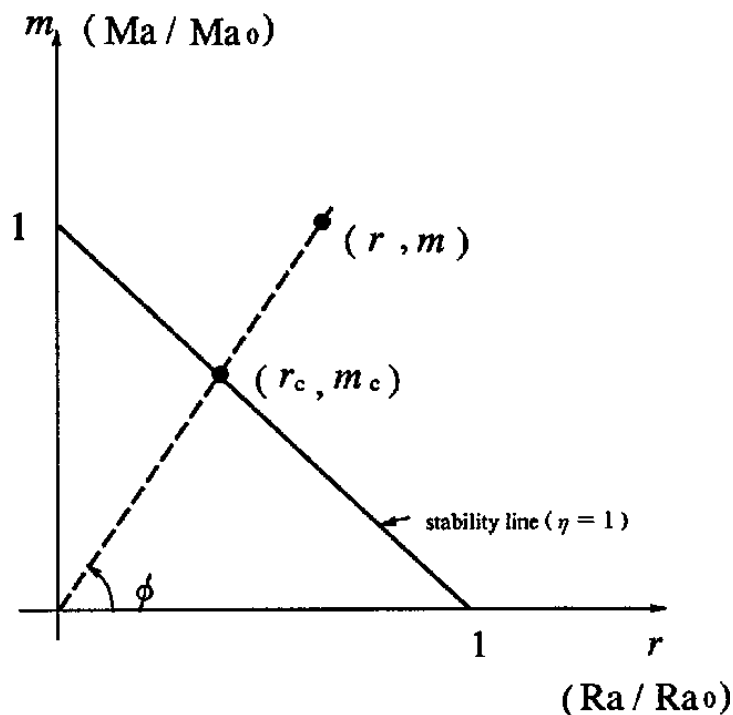
学生時代にやっていたこと(2)

- ベナール＝マランゴニ対流
 - Rayleigh対流は、2次元ロール対流型
 - 六角形対流が見てみたい！
 - お勉強：
 - どうやら、六角形対流は、本質的に内部の浮力が駆動する対流ではないらしい。
 - 上部境界の表面張力の温度依存によって駆動されるらしい（**Marangoni対流**）
 - どんなシチュエーション？
 - 宇宙空間で微小重力下：結晶生成に、対流が悪さする、、、
- では、浮力と表面張力混在ではどんな対流になるのかな？



学生時代にやっていたこと(3)

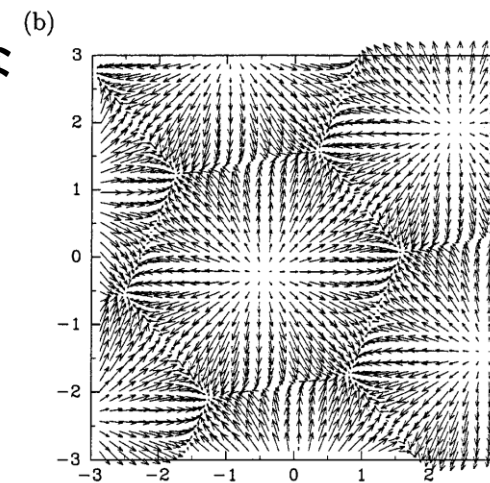
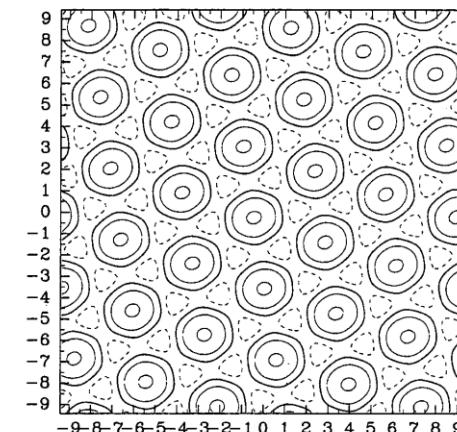
Tomita, H. and K. Abe (2000) : Numerical simulation of pattern formation in the Benard Marangoni convection. *Phys. Fluids*, 12, 1389--1400.



Tomita & Abe (2000): Fig2

- 内部方程式はこれまで通りで、境界条件を小細工：上部境界に表面張力の温度依存性を加える。
- 無事、六角形を再現
- 基本的に、Ra数とMa数の2次元パラメータ空間になる。
 - この時、パラメータ空間上でパターンはどのようなになるだろうか？
 - 対流の形態はクリティカルに変わるのだろうか？
 - また、なぜ、その形状が、選択されるのだろうか？

Tomita & Abe (2000): Fig4

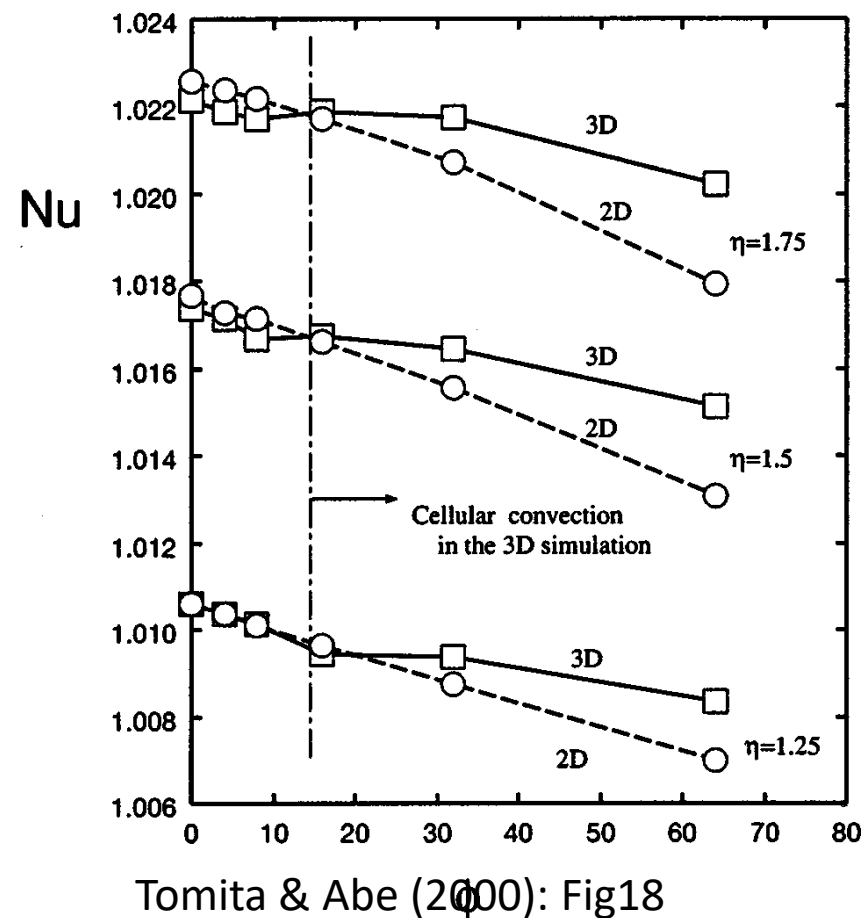
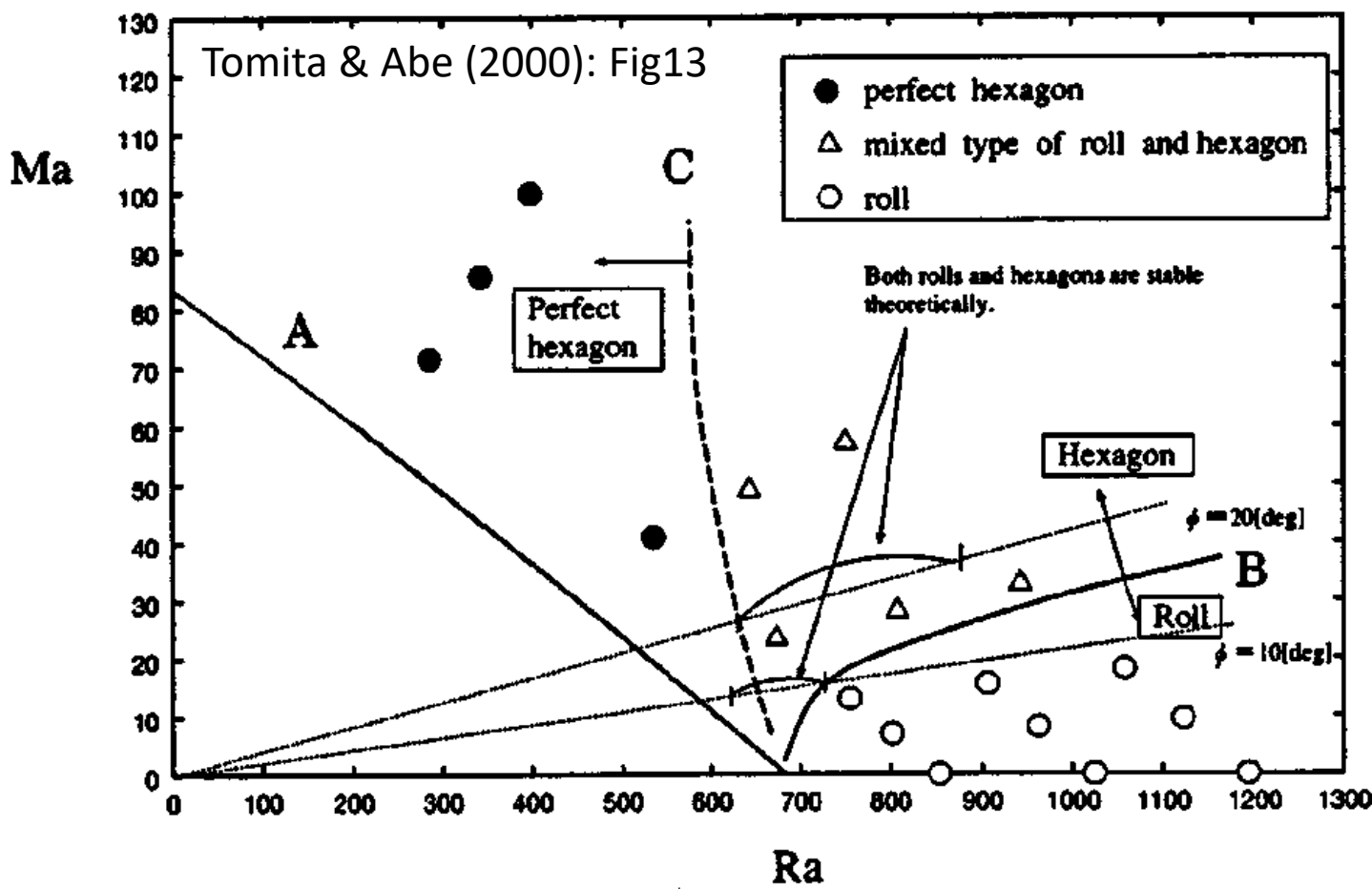




学生時代にやっていたこと(4)

- レジームマップ：
なんとなく、線を引っ張る！
今となっては、おおらかすぎる？

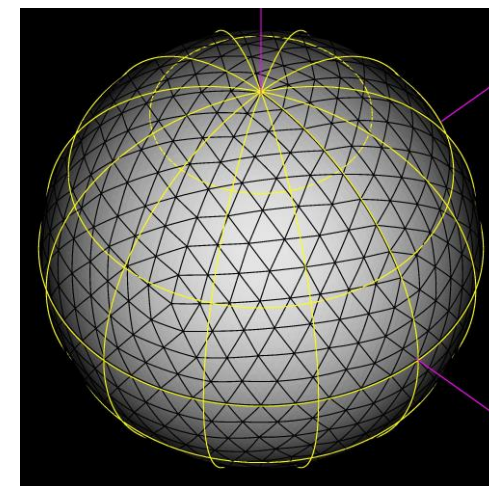
- ロール型と六角形の選択は、
鉛直熱輸送の高い方が選ばれる
--- Nu数は、鉛直熱輸送の指標





ポストドク時代～研究員時代(1)

- 最初に就職したところが、JAMSTEC
- 初代地球シミュレータ（40TF）稼働前夜
- 気象・気候まるで分らん！
- いきなり全球大気モデル作りを命ぜられる：
 - このころ、全球モデルはスペクトル法で決まり！という感じだった。
 - 一方で、スペクトル法の将来は危惧されていた。
 - コミュニケーション量の増大
 - ルジャンドル変換に高速変換がない。などなど、
 - 格子点法は、極に格子点が集中しすぎて、うれしくない。
 - 準一様格子の採用：
 - 6面体と20面体に基づくものが候補。
 - 6面体は、格子が四角形なので、これまでの知見がわんさか使える。
 - が、あえて、20面体を選んだ。
 - 格子は三角形だが周りに6点あって、六角形格子ともいえる。なんかよくね？
 - うつukしい！平面充填問題で、もっとも円に近い多角形。
 - 五角形格子も出てくるが、ま、なんとかなるっしょ、こっちのほうがチャレンジングっぽいし、

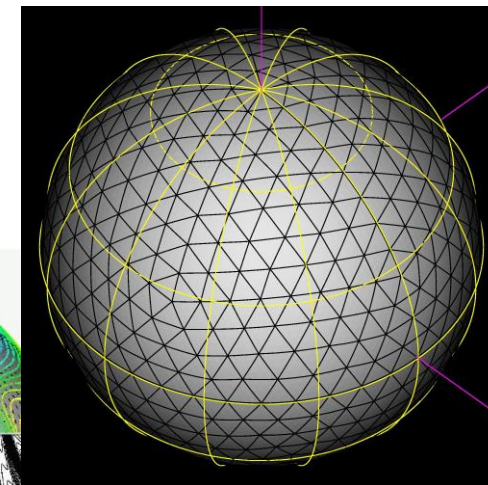




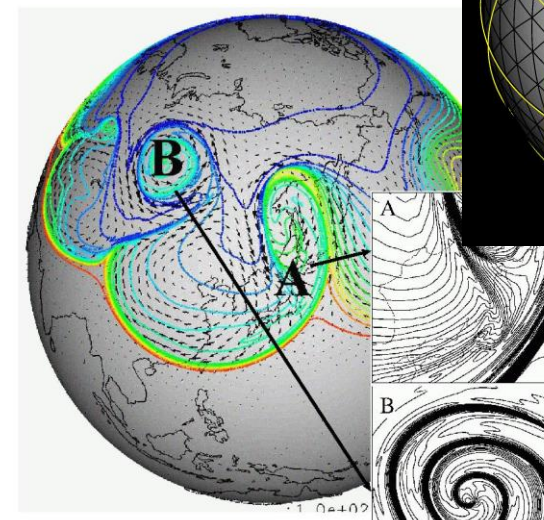
ポストドク時代～研究員時代(2)

- 紆余曲折を経て、**全球高解像度モデルNICAM**を開発
 - 水平方向離散化
 - Tomita, H., M. Tsugawa, M. Satoh, and K. Goto(2001) : Shallow Water Model on a Modified Icosahedral Geodesic Grid by Using Spring Dynamics. J. Comput. Phys., 174, 579-613
 - Tomita, H., M. Satoh, and K. Goto (2002) : An Optimization of the Icosahedral Grid Modified by Spring Dynamics. J. Comput. Phys., 183, 307-331
 - 非静力学モデルのスキーム
 - Satoh,M(2002): Conservative scheme for the compressible non-hydrostatic models with the horizontally explicit and vertically implicit time integration scheme. Mon. Wea. Rev., 130, 1227-1245
 - Satoh,M(2003): Conservative scheme for a compressible nonhydrostatic model with moist processes. Mon. Wea. Rev., 131, 1033-1050
 - 全球力学コア
 - Tomita,H. and Satoh,M. (2004) A new dynamical framework of nonhydrostatic global model using the icosahedral grid. Fluid Dyn. Res., 34, 357-400.
 - Unwind bias 高次精度スキーム：
 - Miura. H(2007):An Upwind-Biased Conservative Advection Scheme for Spherical Hexagonal-Pentagonal Grids, Mon.Wea.Rev. 135, 4038-4044
 - 単調性とCWCを保証するスキーム
 - Niwa, Y, H. Tomita, M. Satoh, R. Imasu(2011): A Three-Dimensional Icosahedral Grid Advection Scheme Preserving Monotonicity and Consistency with Continuity for Atmospheric Tracer Transport, J. Meteorol. Soc. Japan, 89, 255-268
- **NICAMのダイナミカルコア・プロトタイプ完成！**
 - いくつかのテストケースを行う。
 - このあと、基本的な物理過程（放射・雲微物理・乱流・地表面過程）を実装
 - いよいよ、大気シミュレーションへ

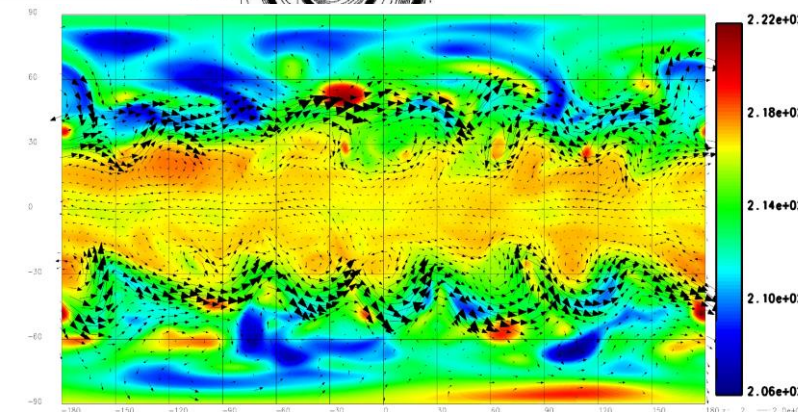
正20面体格子



傾圧波テスト



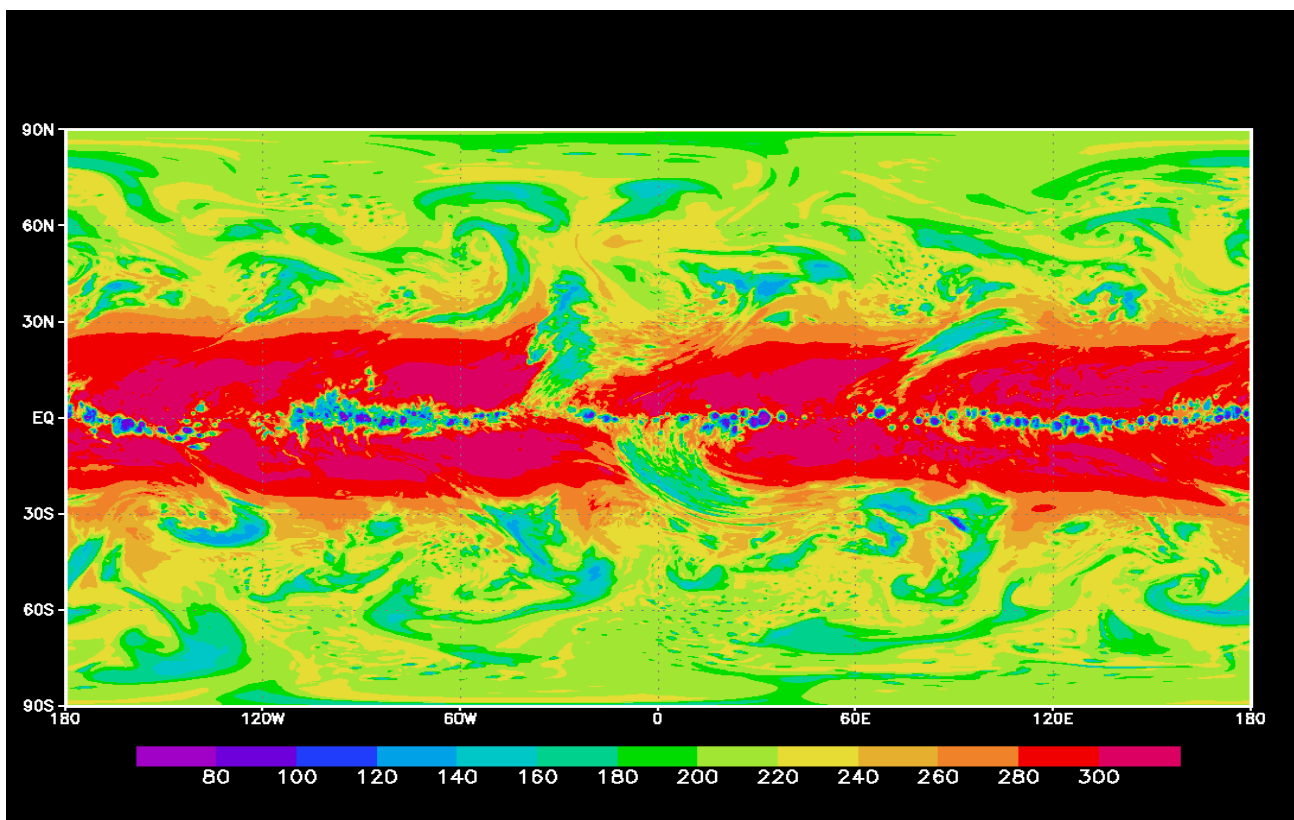
擬似気候テスト



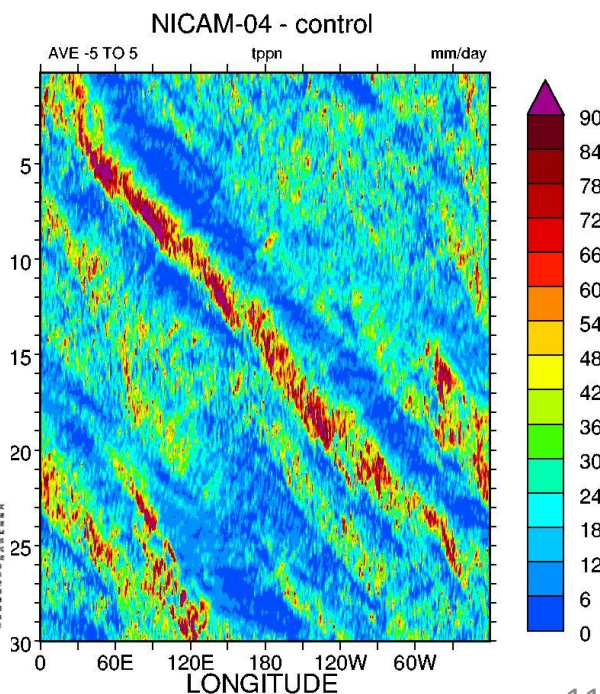
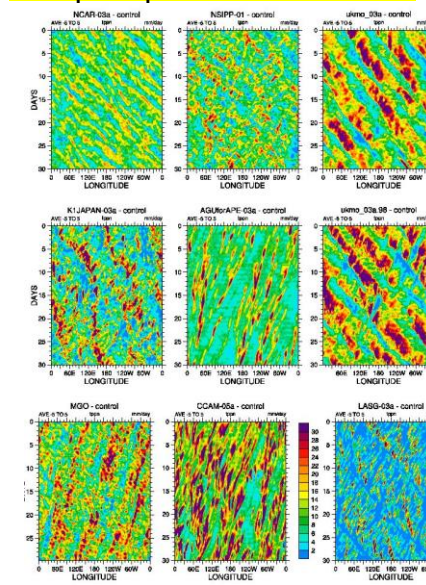


最初の実験: 水惑星実験

- 水惑星MIPに参加
 - 他のGCMはすべて静力学モデル+積雲パラメタリゼーション
 - NICAMだけ、非静力学モデル+雲微物理スキーム
 - この時代の全球7km, 3.5km格子は、ちょっと桁違いだった、、、



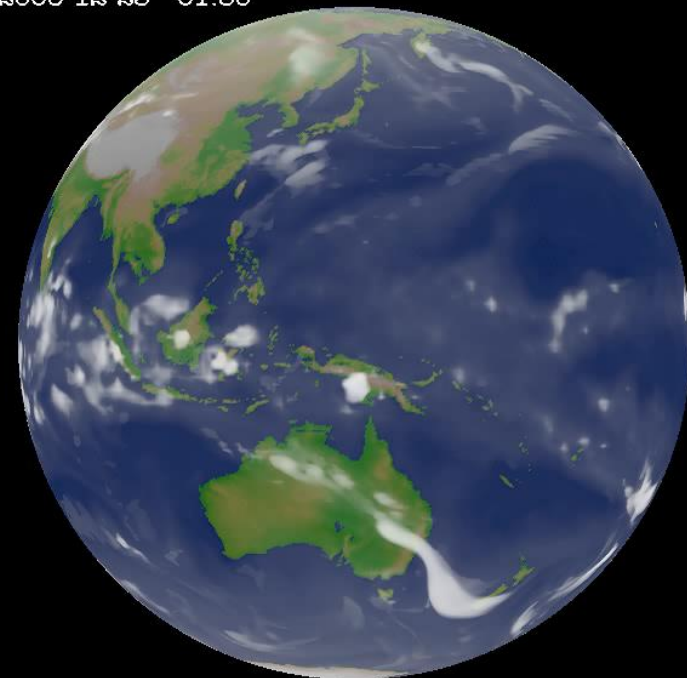
Hovmoller diagram for precipitation on the





NICAMを用いた研究成果例

2006-12-25 01:30



- MJOの再現に成功 (地球シミュレータ)
 - Miura, H., Satoh, M., Nasuno, T., Noda, A. T., Oouchi, K. (2007)
A Madden-Julian Oscillation event simulated using a global cloud-resolving model.
Science, 318, 1763-1765.
- 全球で格子1kmを切る収束性 (京コンピュータ)
 - Miyamoto, Y., Y. Kajikawa, R. Yoshida, T. Yamaura, H. Yashiro, and H. Tomita (2013): Deep moist atmospheric convection in a subkilometer global simulation, Geophysical Research Letters, Volume 40, Issue 18, 4922-4926
- 季節内予報スキルの劇的向上 (京コンピュータ)
 - Miyakawa, T., Satoh, M., Miura, H., Tomita, H., Yashiro, H., Noda, A. T., Yamada, Y., Kodama, C., Kimoto, M., Yoneyama, K. (2014):
Madden-Julian Oscillation prediction skill of a new-generation global model.
Nature Commun., 5, 3769.
doi:10.1038/ncomms4769.
- 雲・エアロゾル・放射フィードバックの新知見 (京コンピュータ)
 - Sato, Y., D. Goto, T. Michibata, K. Suzuki, T. Takemura, H. Tomita, and T. Nakajima (2018), "Aerosol effects on cloud water amounts were successfully simulated by a global cloud-system resolving model", Nature Communications, doi: 10.1038/s41467-018-03379-6

NICAM 870 m - 96 levels

Real Case Simulation: 25 - 26, Aug., 2012

SPIRE field-3: Study of extended-range predictability using GCSRAM
RIKEN / AICS: Computational Climate Science Research Team





2011年1月1日：理研へ移動

- 2011年1月1日付で理研へ移りました。
- 当時考えていたこと：
 - モデル作りのためのインフラは最重要
 - 既存のコンポーネントは比較のために網羅したい。
 - Model Intercomparison Project(MIP)は結局、品評会に終わるのでは？
 - いろんなものがごちゃごちゃ異なって、結果の解釈が難しい。
 - 力学のように正解がない。
 - Model Intra-comparison Project をやりたいな、、、
- SCALE projectの立ち上げ：3つのポリシー
 - 完全にフリーソフトウェアであること。
 - 誰もが自由に使えるほうがよい。
 - 論文ベースでスクラッチから組むこと。
 - オレオレスキームを貰ってきても、そこに行きつくアイデア・ノウハウがわかっていないと、、
 - 独自チューニングが埋め込まれているとそれがデフォルトだと思ってしまい、不健全
 - ドキュメントはディテールまで書き込む。
 - 自分らの忘備録でもある。
 - 論文化するとき、ささっと書ける。
- ※ 現在、これらは守られているか？
 - やや疑問、、、だが、まあまあ、守るようにしている（してもらっている）。

SCALE: a highly sophisticated common library for meteorology/climate simulations



Scalable **C**omputing for **A**dvanced **L**ibrary and **E**nvironment.

Many components, including CFD & computer science techniques

Free software under BSD2-license

https://www.r-ccs.riken.jp/software_center/software/scale/overview/

- **SCALE is a library, but it has also own models**

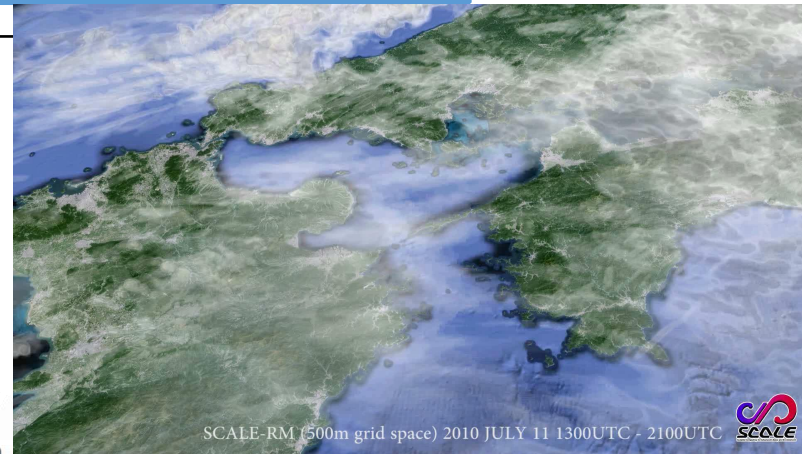
- SCALE-RM : regional model:

Nishizawa et al.(2015, Geophys. Model Dev.)

Sato et al.(2015, Progress in Earth and Planetary Science)

- SCALE-GM: global model(NICAM-DC clone)

- Porting from NICAM(*Tomita & Satoh(2004,Fluid Dyn.Res.)*)



- **Data assimilation has been already equipped in cooperation with Data Assimilation Research Team**

- SCALE-LETKF





～現在まで

- NICAM、SCALEを用いつつ、防災研究、天気予報システム構築などを他機関・同研究所の他チームと連携しながらやっている。
- また、**基礎的気候学の研究**を、若い人たちと楽しくやっている。
- モデラーなので、いつもモデルの問題点を意識しながら、若い人にインプット（汗）
- 途中、「富岳」開発では責任者の一人：
 - いろんな分野のアプリケーションとシステムのco-designを担ってきた。
この間、気候研究はちょっと空白期間。

後半：気候計算、ねらい、方法、面白さ

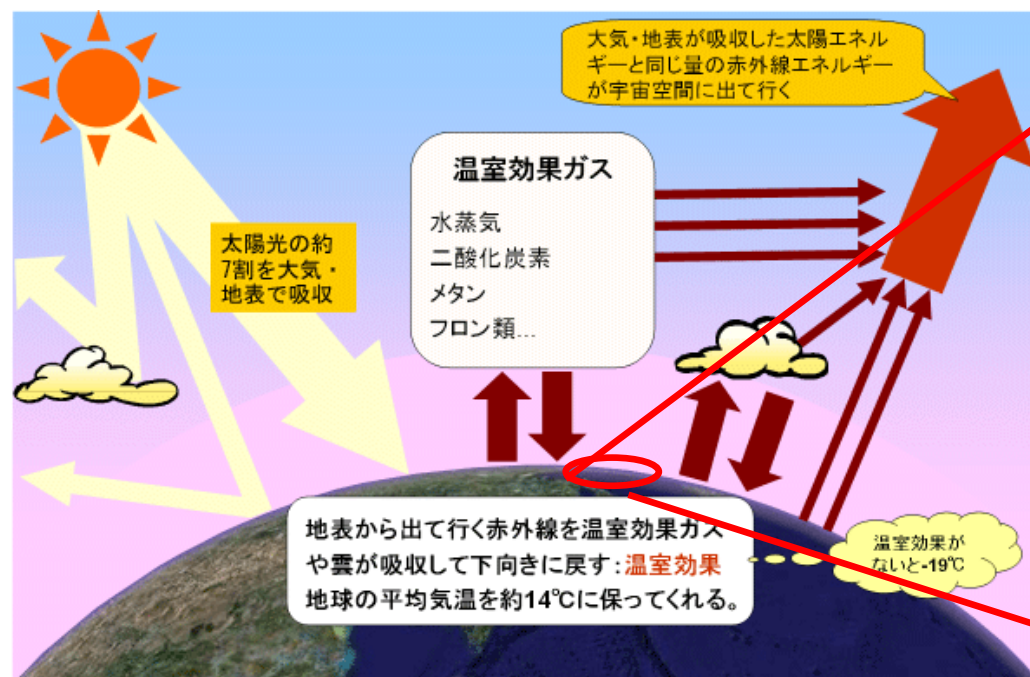


ねらい:そもそも気候学とは？

- 気候？：気象現象によって、ある程度の期間、統計的に特徴付けられる大気の状態
 - 例：
 - 気温、降水量、風などの物理量を、ある程度の長期間(10年間程度)、平均化した描像。
 - その平均からの気象イベントの統計量など
- 計算機を使って何を研究するか（私見）？
 - 社会的な要請から：将来の気候がどうなるか？（気候変動予測）
 - 学術的意義：（現象の各論はおいておいて）、
 - 気候を一つのシステムと見たとき、どのような平衡状態に落ち着くのか？
 - また、その構造はどのようなものか？

将来気候アセスメント(気候変動予測)

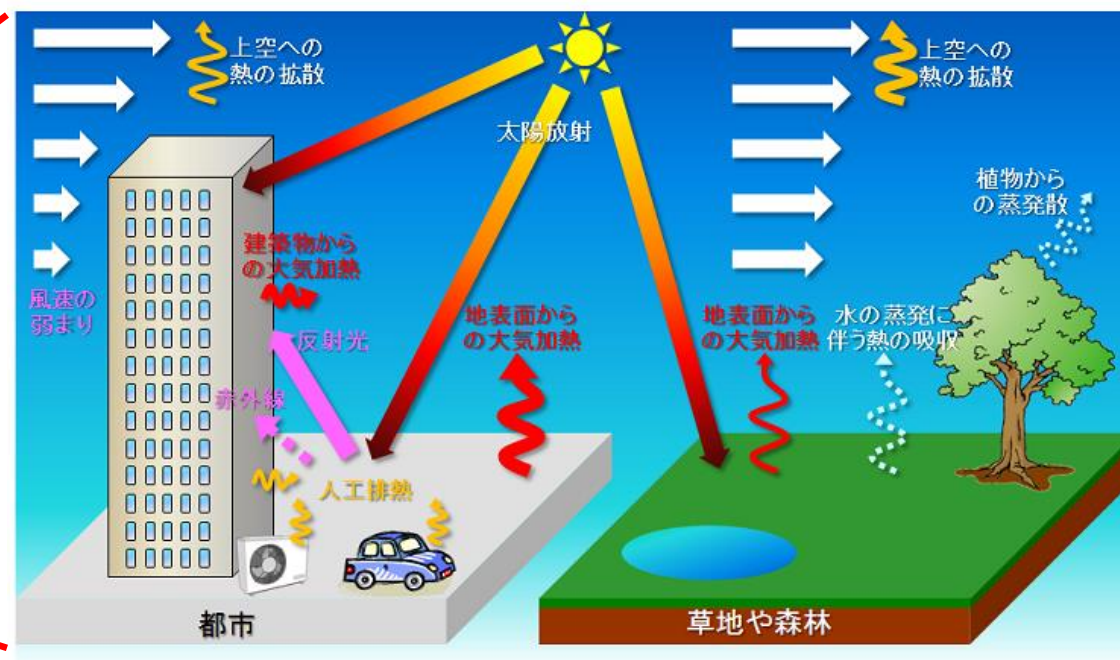
未来の全球気候 (温室効果ガスによる地球温暖化?)



https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/chishiki_ondanka/p03.html

気象庁HPより

未来の地域気候 (全球モデル結果からのダウンスケール)



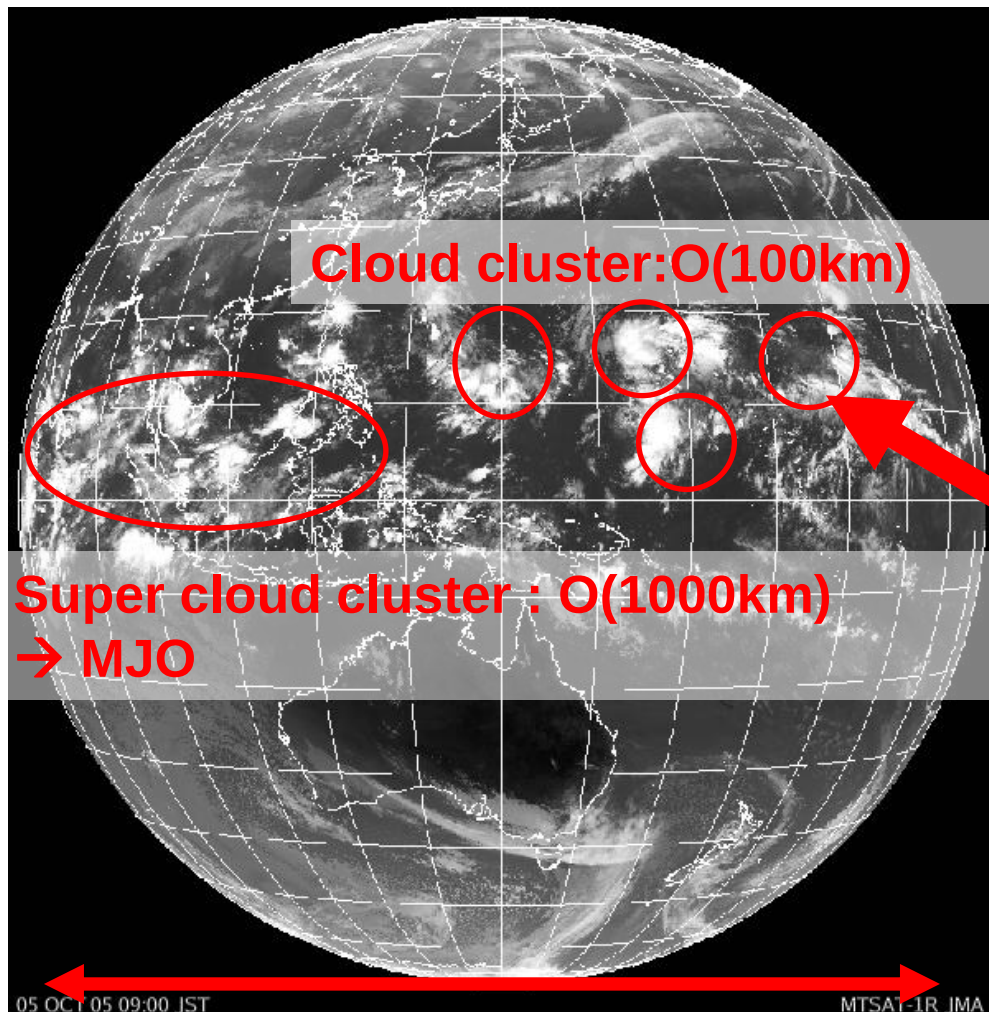
https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr_faq/02/qa.html

全球モデル結果を境界条件として、より高解像度で、より詳細物理で、地域気候を予測



気候学のもう一つの側面

構造の例：雲の階層構造

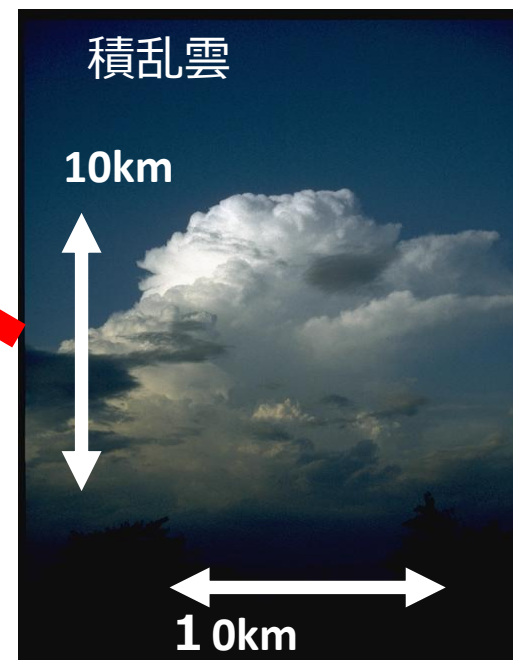


Earth diameter 12740km

- 気候の平衡状態の探索：
なぜその平衡を選択するのか？
 - そこでの構造は？
 - 異なる平衡状態で構造はどのように変調するか？

惑星科学の一つとしての側面

集合して組織化

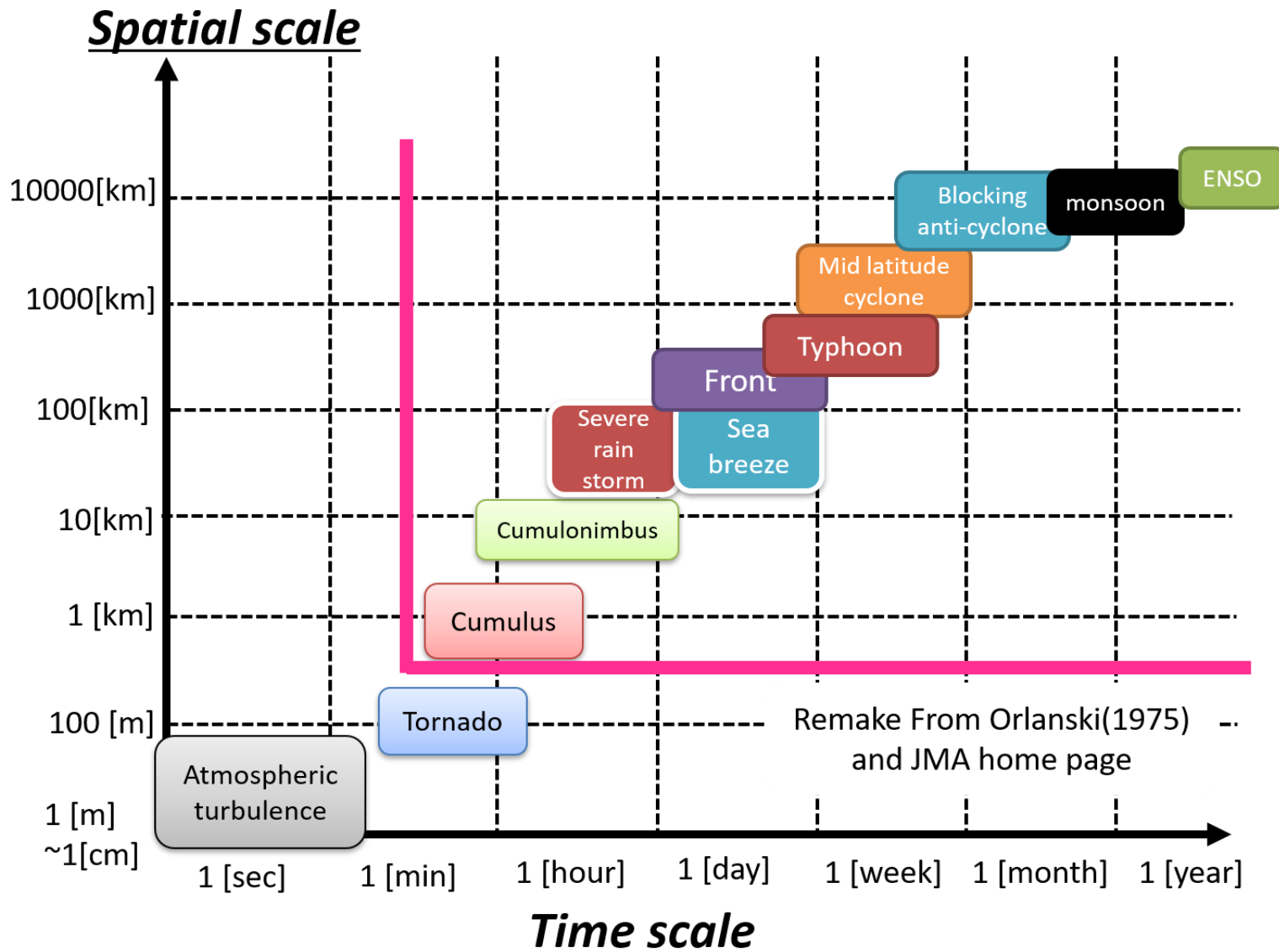


最小の要素としての積乱雲



方法：何をどのようにして計算する？

- どんな現象がターゲット？



すべてを直接表現することは困難

- 計算機上で離散化
直接解像する（表現できる）
現象 = （グリッドスケール）
が制限される
- 直接解像できない現象
= （サブグリッドスケール）
との相互作用を考慮する必要あり。

→ パラメタリゼーション
（雲、乱流など、）



気候モデルの要素(地球システム)

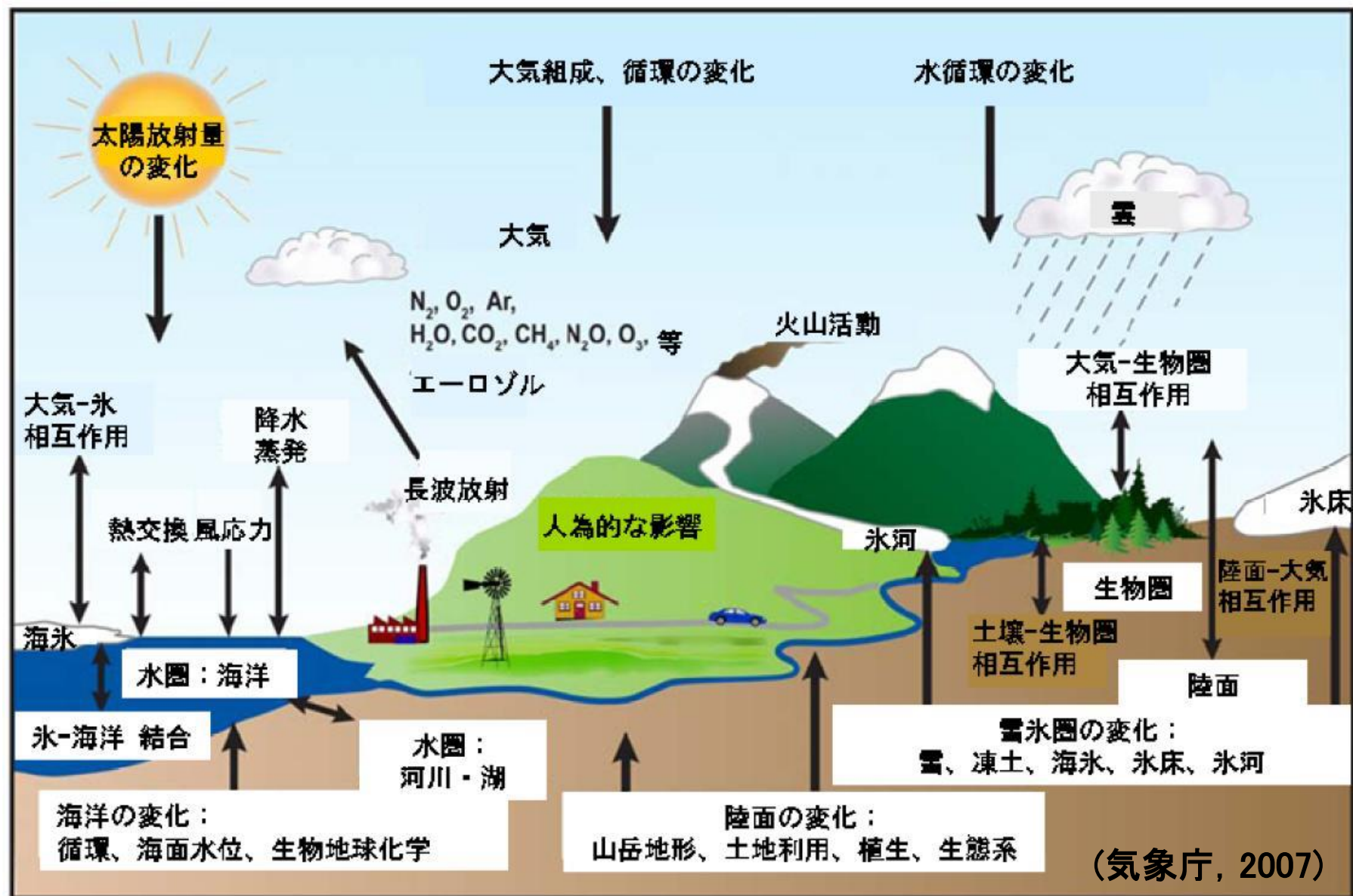
- どのようなモデルコンポーネント？

- 大気モデル
 - 力学過程
 - 物理過程
- 陸面モデル
- 水文モデル
- エアロゾルモデル
- 植生モデル
- 大気化学モデル
- 海洋モデル
- 海氷モデル

=====

- 外部強制力

- 例:火山活動(エアロゾル)
- 太陽活動
- 人為的シナリオ
- 例:CO2の排出など





力学過程

物理過程

放射過程

雲・降水過程

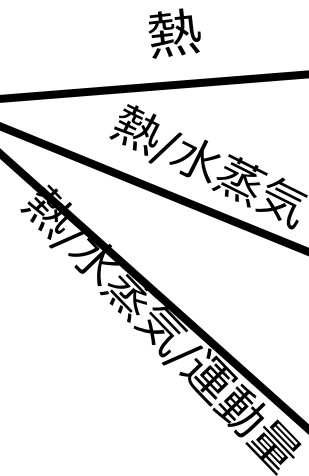
乱流過程

地表面過程 (陸・海)

地形効果

相互作用

大気条件に影響を与える要因とその関係





大気の流れ力学

回転を伴う圧縮性流体の方程式系

オイラー方程式+回転

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} + 2\mathbf{\Omega} \times \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - g + \mathbf{F} \quad \text{Momentum eq.}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad \text{Continuity eq.}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T = \frac{1}{C_p \rho} \frac{dp}{dt} + \frac{Q}{C_p \rho} \quad \text{Thermodynamic eq.}$$

$$p = \rho R_d T \quad \text{Eq. of state}$$



力学過程を解く(概要)

- どのようにデザインするか？

- 方程式の選定：昔は、静力学モデル、最近是非静力学モデル

- 空間離散化手法は？：

- e.g. 格子点法？、スペクトル法？ 局所スペクトル法（ Discontinuous Galerkin method）

- 時間離散化手法は？

- E.g. 全部陽解法、全部陰解法？一部陰解法？

- 精度をどうするか？

- 時間離散化: 何段階？何次精度？

- 空間離散化：何次精度？

- 現在多くは、2次～4次精度が多い

- 全球の場合、格子系はどうするか：

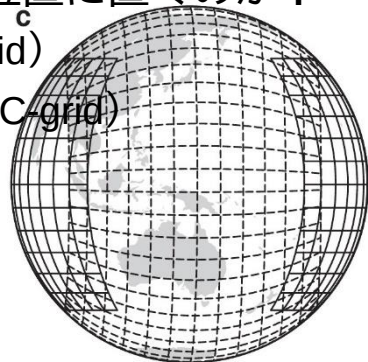
- 緯度経度格子

- 準一様格子, オーバーラップ格子

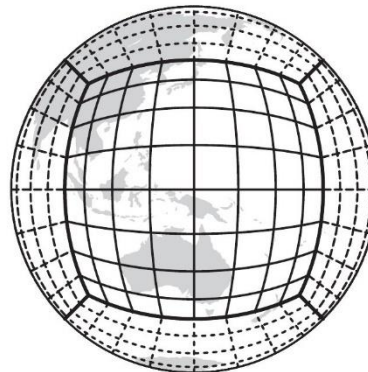
- 各変数は格子のどの位置に置くのか？：

- 単一箇所？（A-grid）

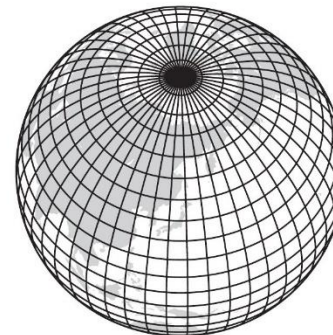
- ずらす？（B-grid, C-grid）



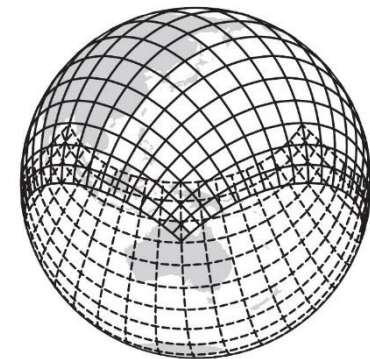
CUBED SPHERE GRID



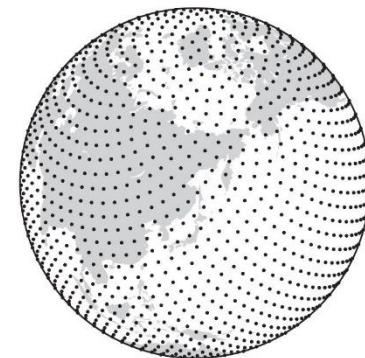
LATITUDE-LONGITUDE GRID



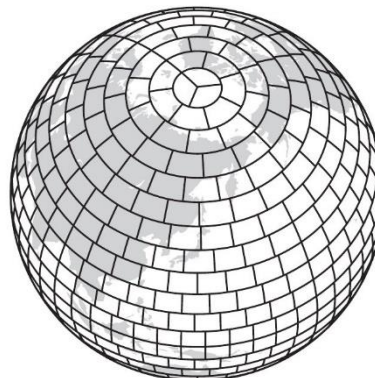
COMPOSITE OR OVERSET GRID



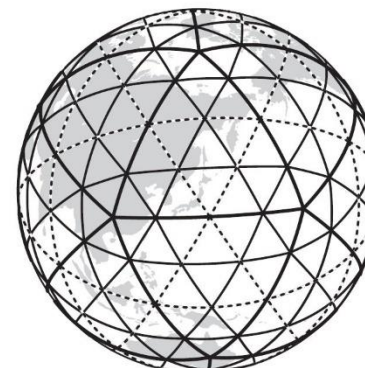
FIBONACCI GRID



KURIHARA OR REDUCED GRID



SPHERICAL GEODESIC
OR ICOSAHERAL GRID





物理過程: 例として雲/降水プロセス過程

相変化、雨滴滴、それに伴う大気中の水の量の変化、断熱加熱などの計算

- 水蒸気は飽和すると、水と氷に凝縮する。
 - 相変化によって、熱が発生または吸収
 - その結果、温度が変化
- さらに、雲は放射に、多大な影響を与える。
- 積雲の大きさは数キロメートルであるため、粗い解像度モデルで直接表現することは不可能。

従来のモデルでは2種類のパラメータ化を併用

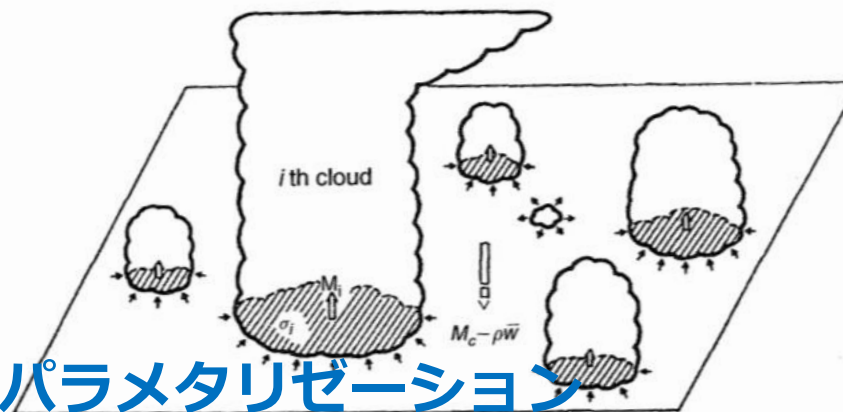
- 各格子で飽和した水蒸気量を求める
- 凝結量、潜熱放出を計算
- 凝結した水は、沈殿物として、すぐに降水させる。

大規模凝結スキーム



- 格子の平均値を使用して、鉛直方向の対流活動を推定
- これに基づいて、凝結量、潜熱放出
- 凝結した水は、沈殿物として、すぐに降水させる。

積雲パラメタリゼーション



Arakawa and Schubert (1974)



雲微物理過程

(モデル格子が比較的小さい場合、雲対流を直接解像している場合、、、)

格子内の各雲の粒子の成長/変化をすべて計算することは困難

いくつかの仮定、何らかの近似に基づいて、単純化(モデリング)

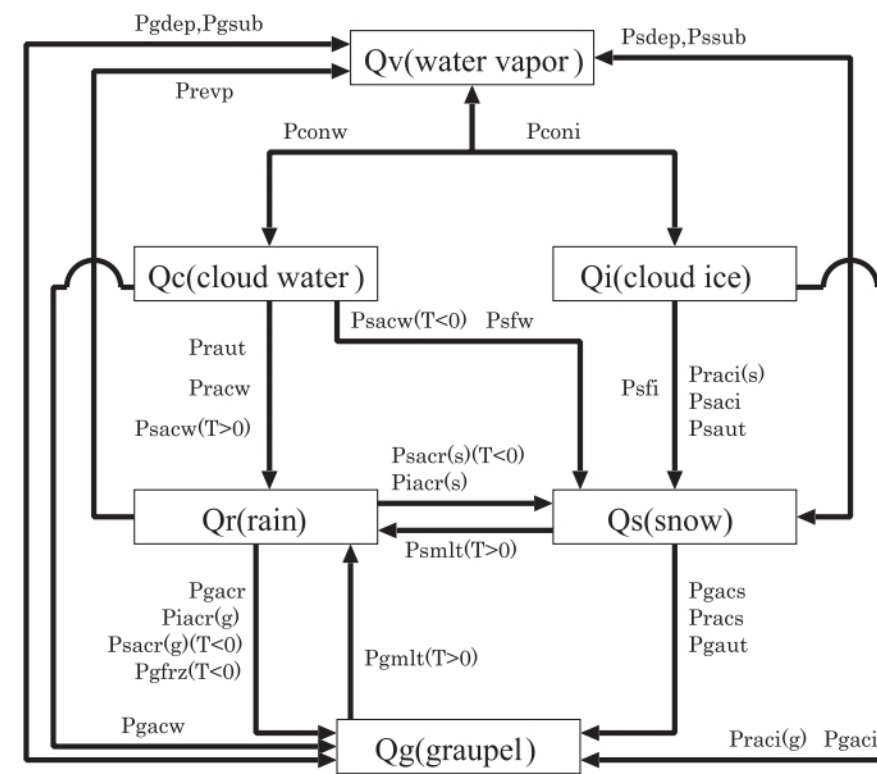
二つのやり方：

- 各雲種類のサイズ分布を精緻に解く場合
→ ビン法 (Euler的手法)
超水滴法 (Lagrangean的手法)
- 各雲の種類をざっくりと分けて (雲水、雨、雲氷、雪、あられ等)、それぞれのサイズ分布に仮定を置く方法
→ バルク法

計算量大

計算量小

※ 現状では、バルク法が主流
将来的には、きちんとサイズ分布を解く方法が主流？
特に超水滴法のように計算コストを削減した手法が有力



Tomita (2008) Fig2



面白さ

- 高解像度、精緻なシミュレーションの可視化
 - 「現象が現実や理屈にあっているか？」は、まず目で見て確認
 - 結果の絵は、そもそも面白い。
- 余談
 - ポスドク時代、多面体用専用viewer, icoviewというのを作りこんだ。
 - 2001年から日本流体力学会の会誌「ながれ」の表紙がカラーになった。
 - 記念すべき第一号の表紙をかざったのは、これ！





「京」時代にやった全球高解像度モデルNICAM結果

NICAM 870 m - 96 levels
Real Case Simulation: 25 - 26, Aug., 2012

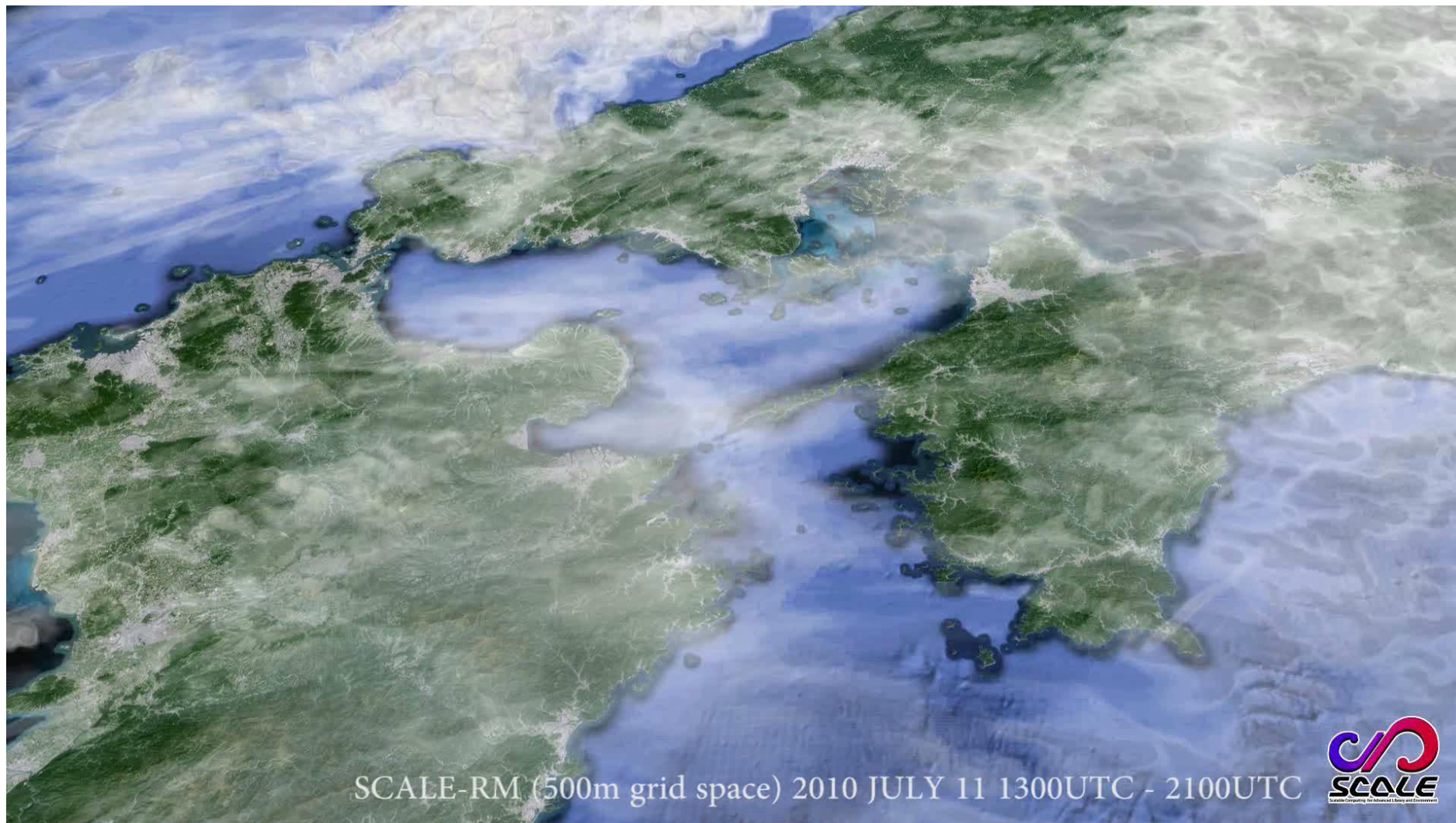
SPIRE field-3: Study of extended-range predictability using GCSRAM

RIKEN / AICS: Computational Climate Science Research Team





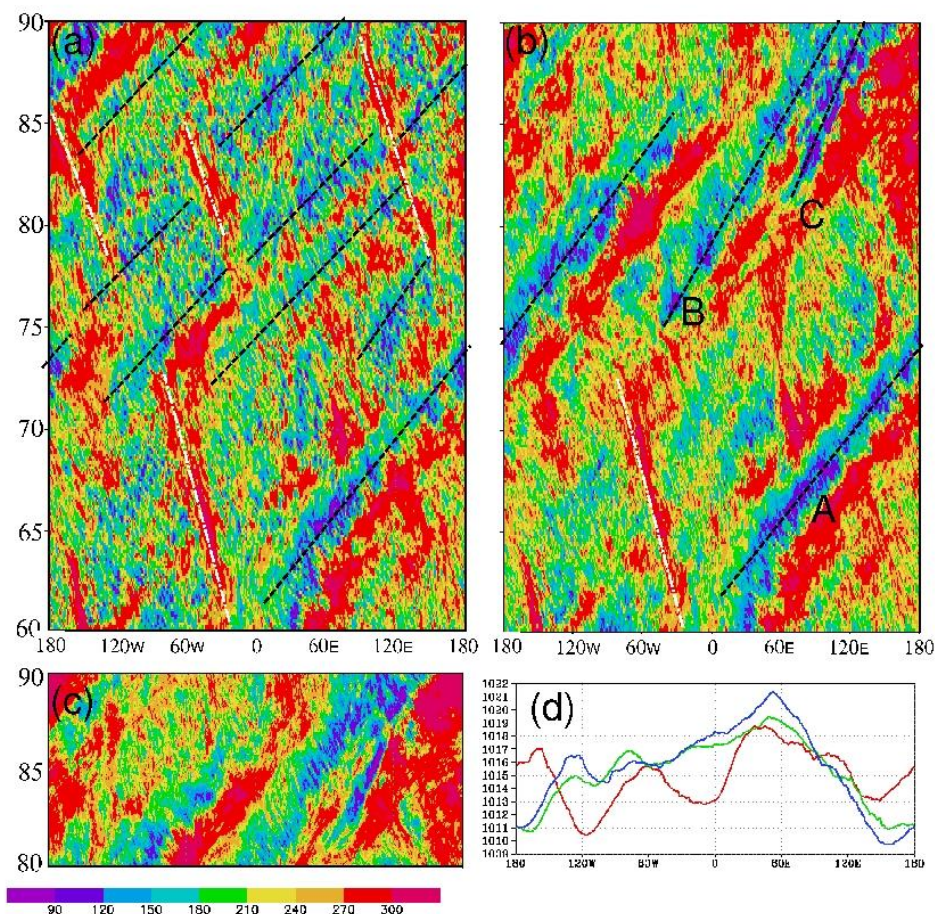
SCALEで行った線状降水帯シミュレーションの様子



私が面白いと思っていること

(雲の) 自己組織化と階層構造

・ 熱帯の雲擾乱の階層構造を捉える！ (2005年)



- ・ 約30日で一周する、割と集中した (wave# 1) スーパークラウドクラスターが東進
- ・ その中身は、100kmスケールのクラウドクラスターが西進
- ・ 前者は、後者のパケットになっている。
- ・ 現実で見られる現象を始めてシミュレーションで再現

Tomita, H, Miura, H., Iga, S., Nasuno, T., and Satoh, M. (2005): A global cloud-resolving simulation: preliminary results from an aqua planet experiment.

Geophys. Res. Lett., vol.32, L08805,
doi:10.1029/2005GL022459

※上記は、水惑星実験の結果

- ・ もっと理想的に平板惑星の上では、どんな組織化を起こすのか？
- ・ それはどんな平衡状態に落ち着こうとするか？
- ・ それを決めるのは何か？



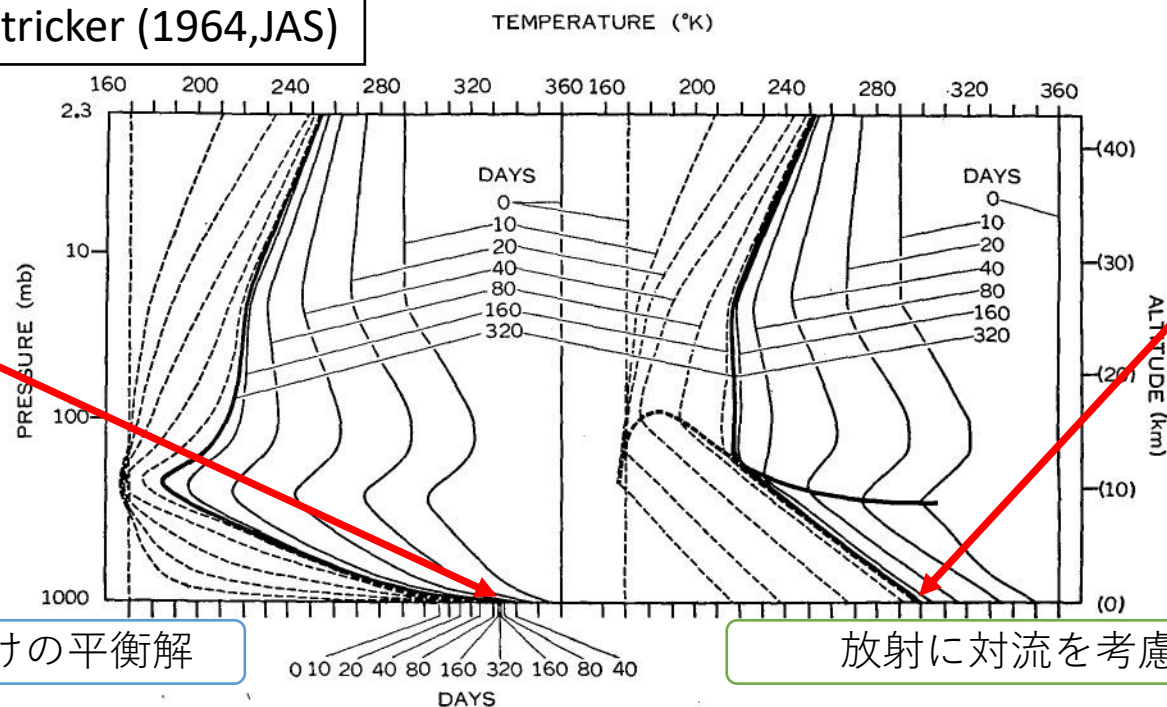
放射対流平衡問題

- ・ 疑問：理想的に平板惑星上では、どんな組織化を起こすのか？
それはどんな平衡状態になるのか？
- ・ 放射と対流のバランスによって決まる状態
- ・ → 放射対流平衡
- ・ 1960年代に真鍋叔郎先生（昨年ノーベル物理学賞受賞）が鉛直1次元モデルで調べていた問題
 - ・ 地球の水平方向を平均化し、鉛直1次元の平衡状態を調べた。

Manabe & Stricker (1964, JAS)

地表面温度は
なんと340K

放射だけの平衡解



地表面温度は、
およそ300Kに落ち着き
現実大気の鉛直プロファイル
も再現している

放射に対流を考慮した平衡解

素直な延長として、水平方向分布を持たせたときの放射対流平衡は如何に？



3次元放射対流平衡問題

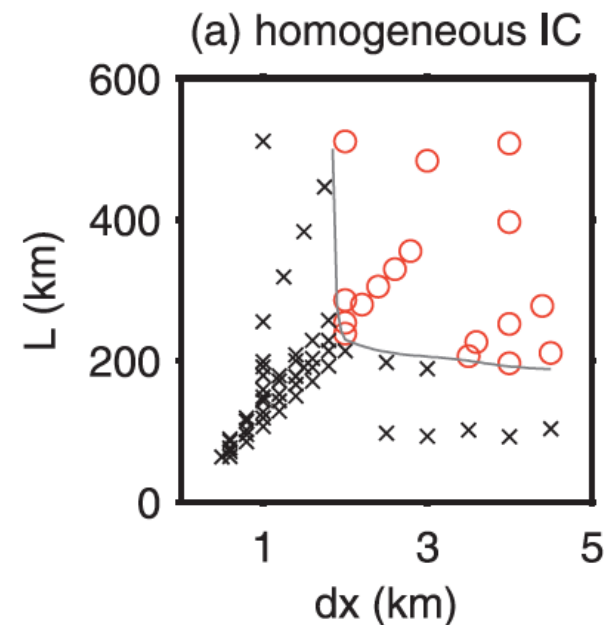
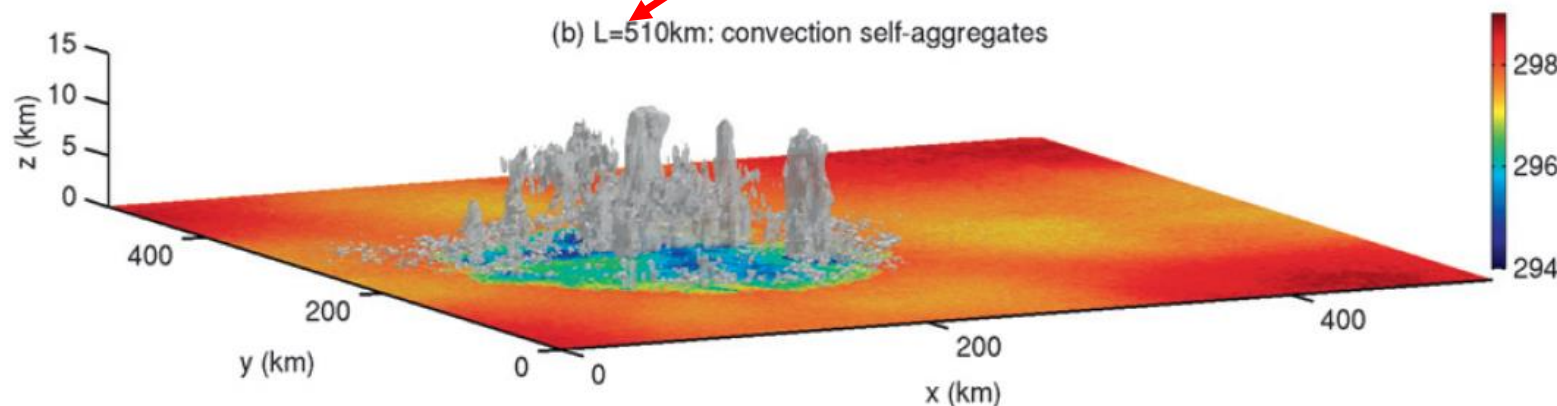
- この手の問題は、魅せられる人は魅せられる。
- 計算機の発達とともに雲解像モデルを使った3次元計算多数。
- 最近のトピックス：

- Convective self-aggregation(CSA)

放射対流平衡における雲の自発的な湿潤対流クラスタリング
(Wing et al., 2017, Surv Geophy ; Muller et al., 2022, Annu. Rev. Fluid Mech.)

Muller & Held (2012)

領域がある程度広いと
対流は勝手に集中しだす



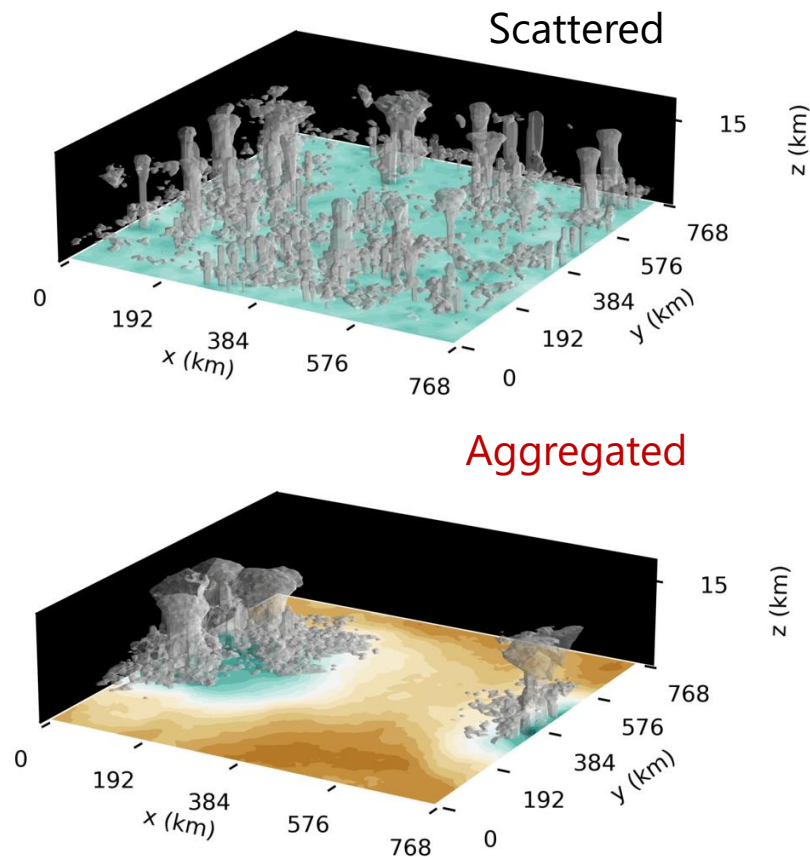
MH2012が示した
領域と解像度をパラメータとした
組織化レジーム図

CSAは解像度が高いと出ない？
ん？なんか、おかしくね？
領域サイズの影響を受けている？
もっと領域サイズを大きくして実験



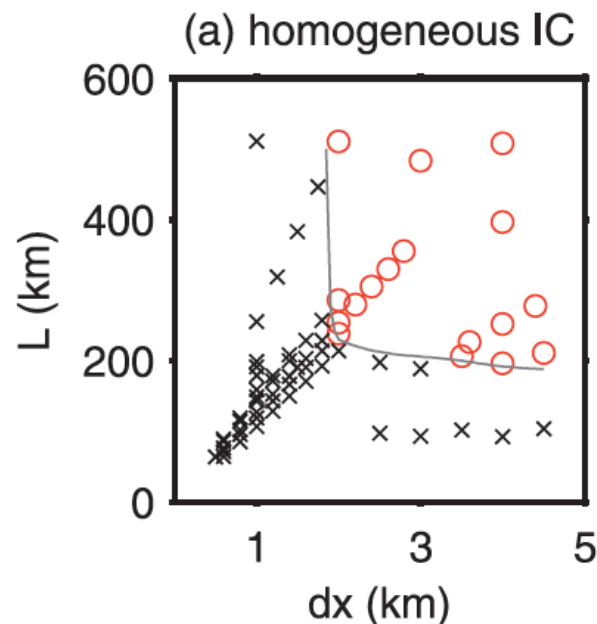
より広領域でシミュレーション

二つのレジーム

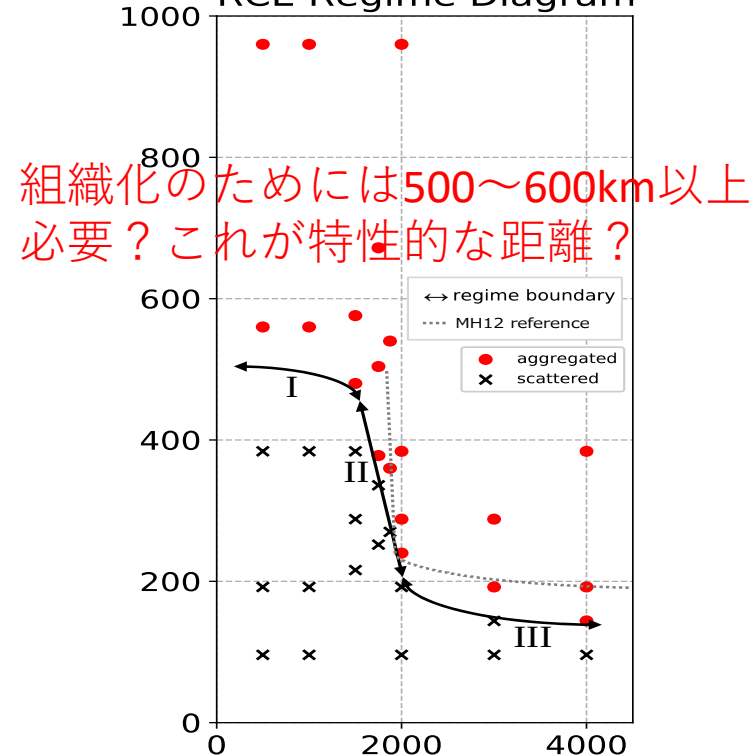


Yanase, T., S. Nishizawa, H. Miura, T. Takemi, and H. Tomita
(2020): "New Critical Length for the Onset of Self-Aggregation
of Moist Convection", Geophys. Res. Lett., 47(16)
<https://doi.org/10.1029/2020GL088763>

Muller & Held (2012)が
示したレジームマップ



我々が拡張したレジームマップ
RCE Regime Diagram



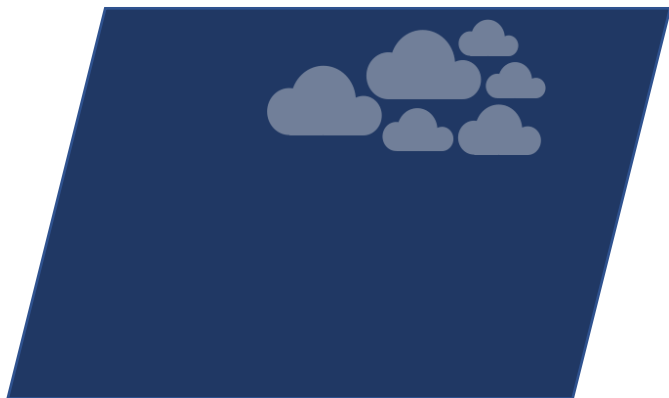
十分な領域をとればCSAは発現する



では、CSAの更なる上位組織化はあるのか？

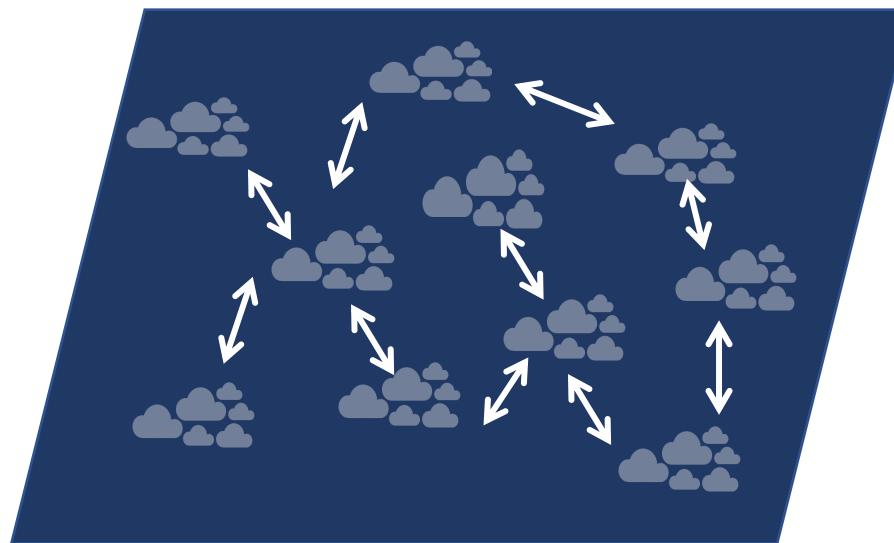
想像、、妄想、、

$L \sim 1,000 \text{ km}$

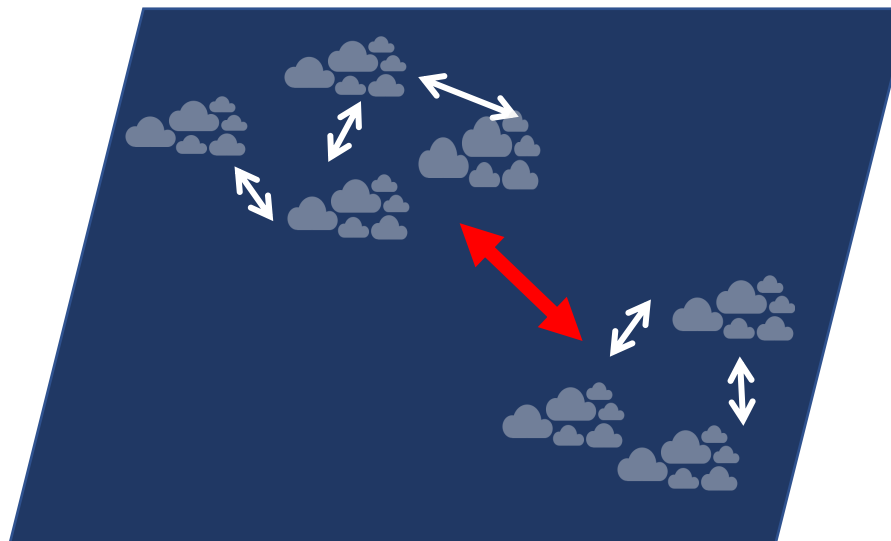


1000km領域では、
単一のクラウドクラスター

$L \sim ?$



単一のクラウド
クラスター
が散在？？？



単一のクラウド
クラスター
が更に組織化
して何らかの
構造を持つ？



25,000kmまで広げてやってみた(on 富岳)！

◆小規模領域では？(L768, L1536, L3072)

✓ 単一のクラウドクラスター

✓ 水平スケール: ドメインサイズに比例していく。

✓ 水平形状: 円形(L768, L1536) or バンド状(L3072)

◆大規模領域では？(L6144, L12288, L24576)

①Transient stage (Day 50);

✓ 複数のクラウドクラスター

✓ 水平スケール: ドメインサイズとの比例関係が崩れる

✓ 水平形状: 円形

その後、更に時間積分すると、、、なんと、、、

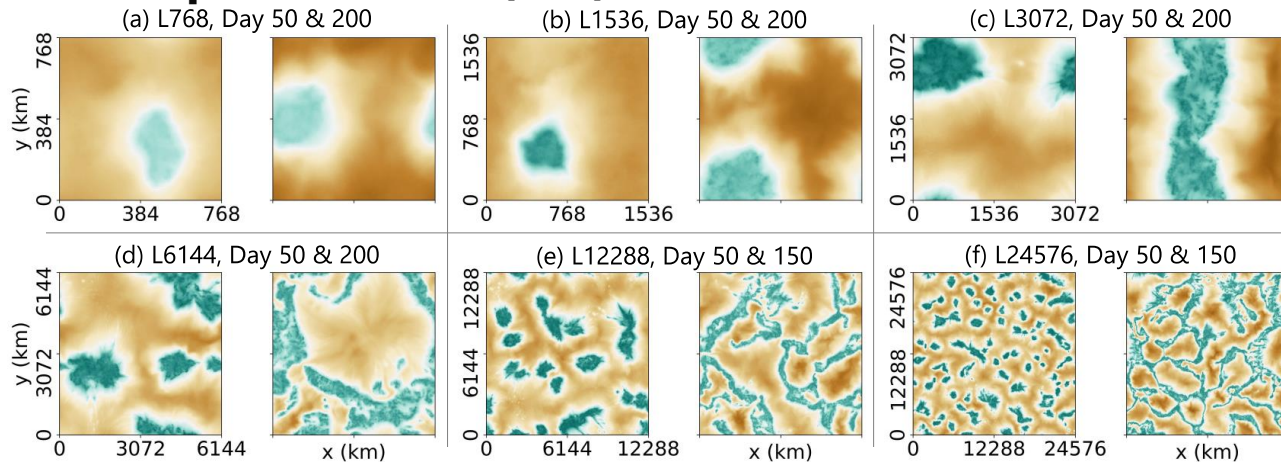
②Quasi-equilibrium stage (Day 150 or 200);

✓ 複数の組織単位(L6144では明確ではないが)

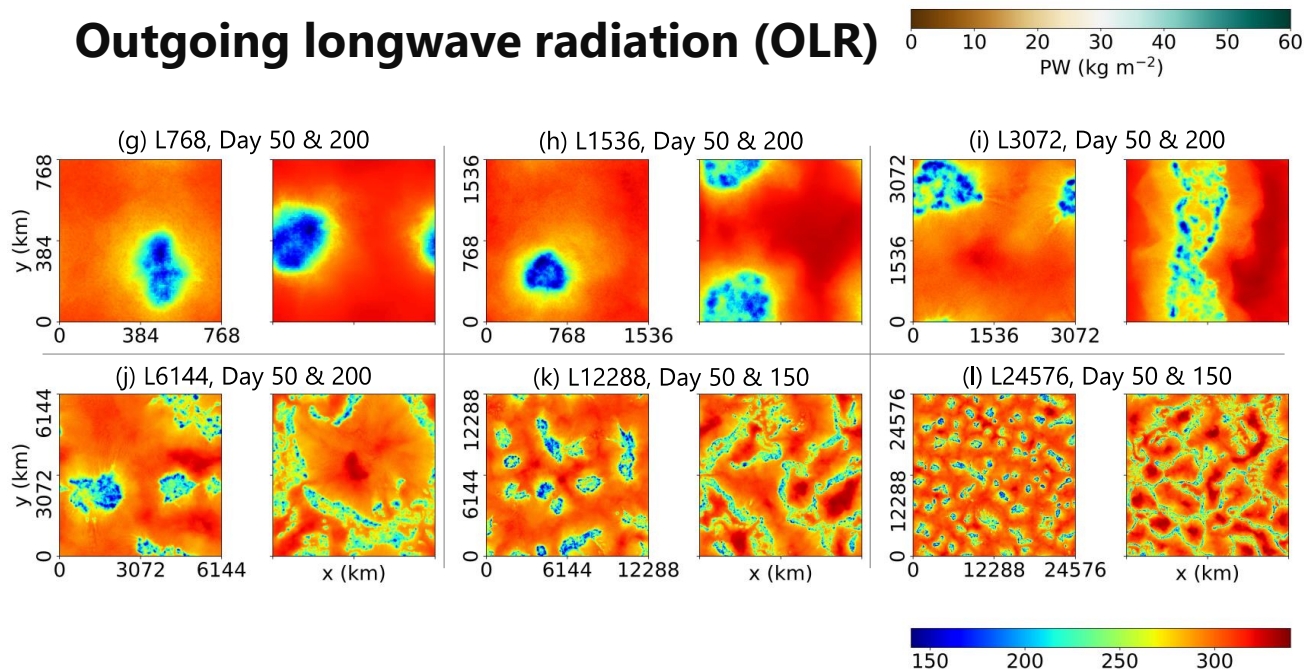
✓ 水平スケール: 数千キロメートル?

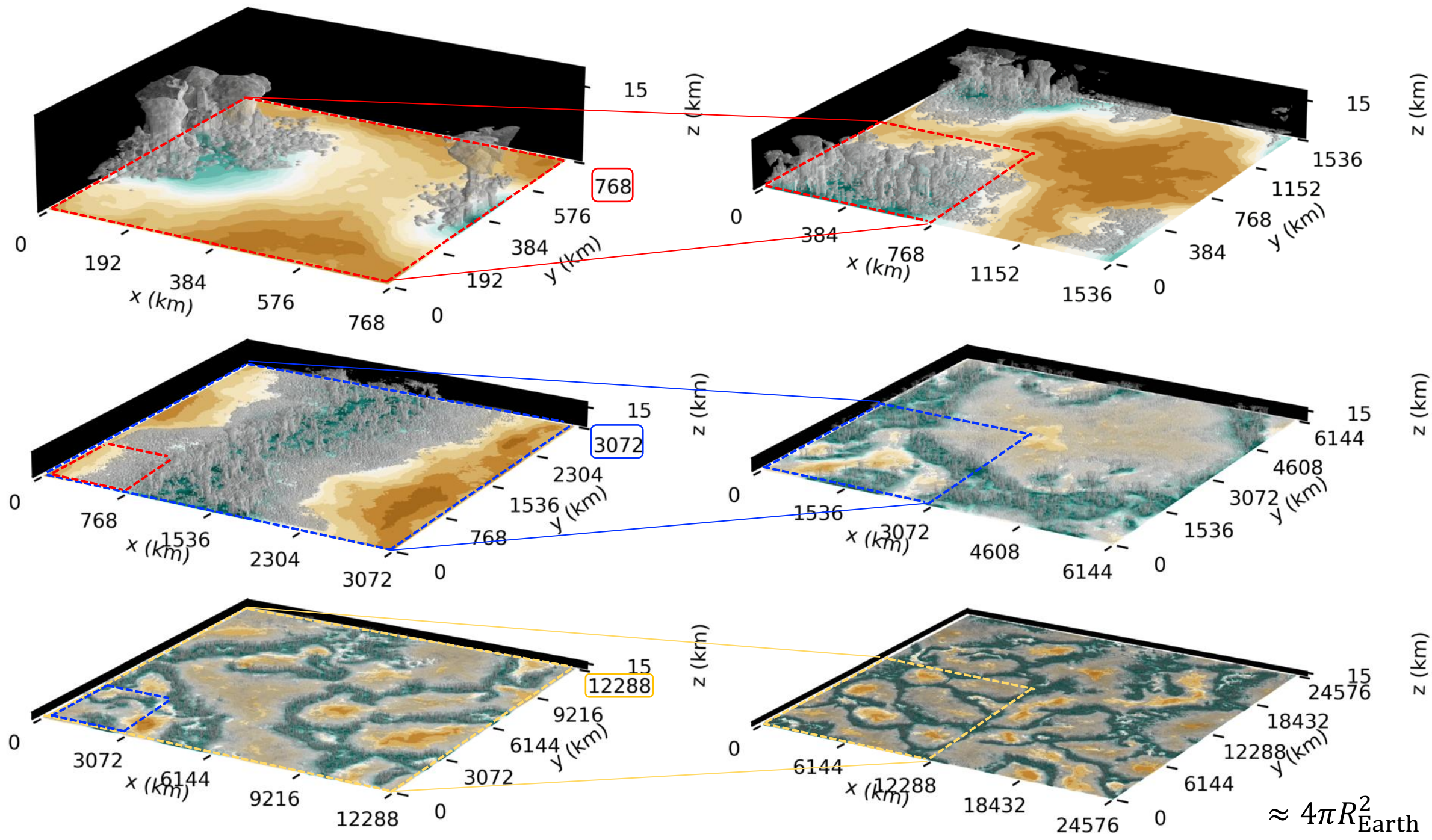
✓ 水平形状: **メッシュ状の組織**

Precipitable water (PW)



Outgoing longwave radiation (OLR)

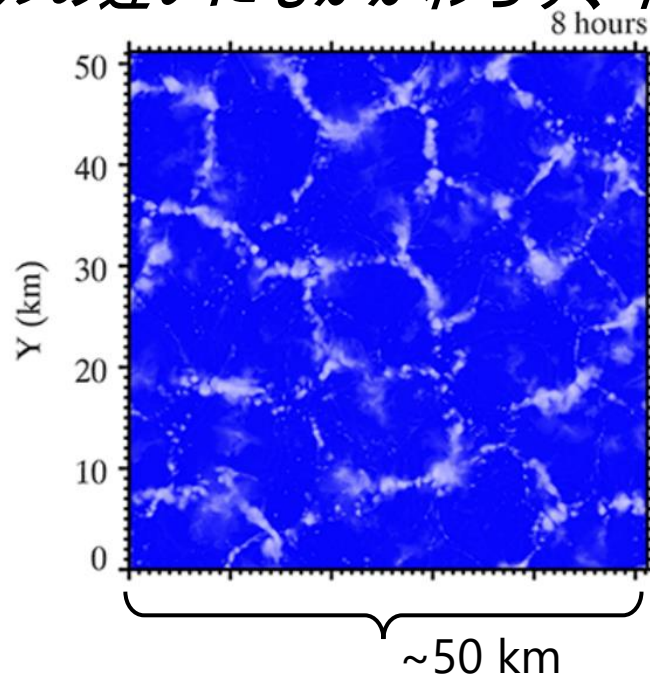
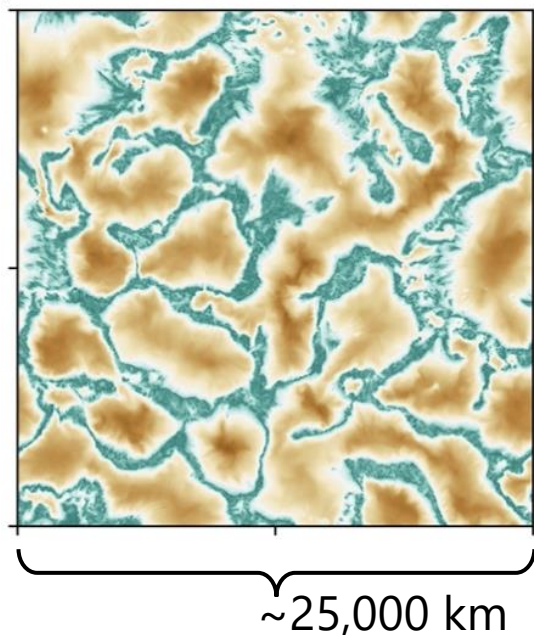




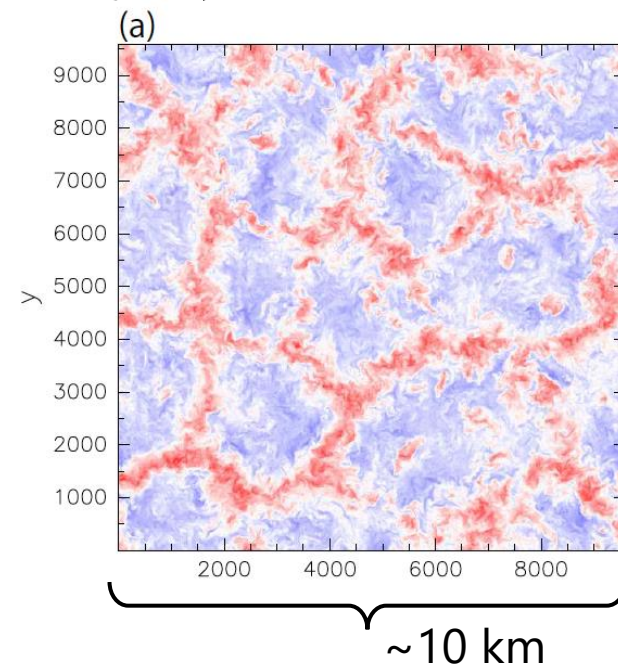


他との類似性

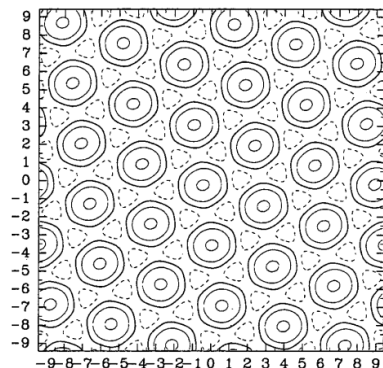
このパターンは、空間スケールの違いにもかかわらず、他の対流現象と非常によく似ている！



開いた細胞浅い積雲場
(Yamaguchi & Feingold 2015)



PBL乱流の垂直速度場
(Nishizawa et al. 2015)

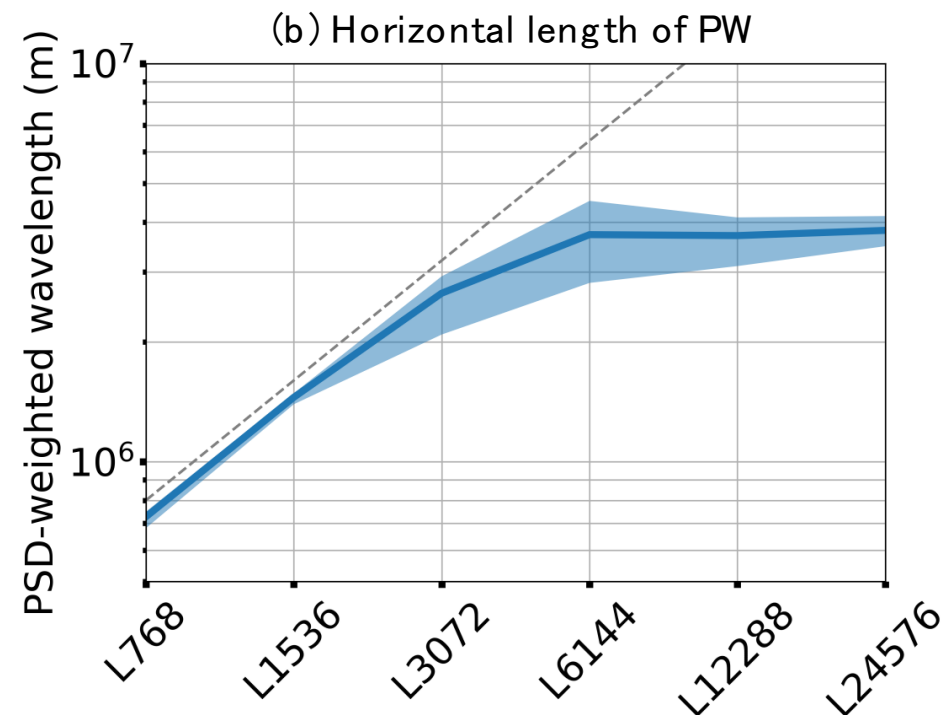
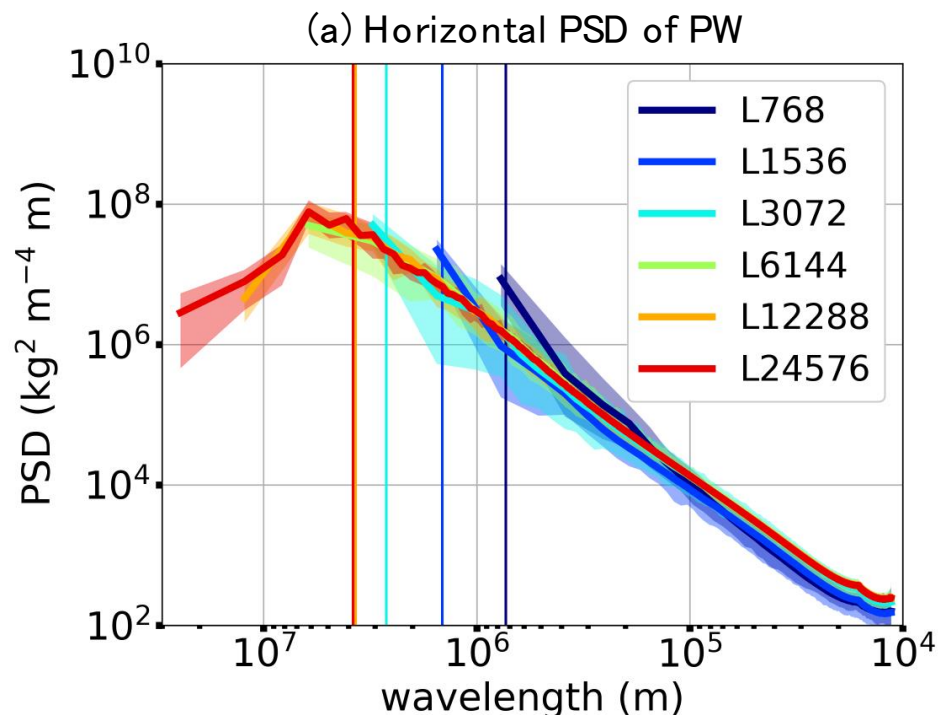


ついでに載せておくと、
B-M対流のパターン
(Tomita & Abe 2000)
ともよく似ている



特徴的な水平スケールを調べる、

- ✓ 可降水量の水平パワースペクトル密度(PSD) $\phi_{\text{PW}}(k_h)$ は、波長が増加するにつれて増加した。
- ✓ 大規模なドメイン実行のPSD分布は、明確なピークを有していた。
- ✓ PSD加重長はドメインサイズとともに増加し、3,000-4,000kmに収束した。



Yanase. T. , S. Nishizawa, H. Miura, H. Tomita (2022) : Characteristic form and distance in high-level hierarchical structure of self-aggregated clouds in radiative-convective equilibrium, Geophys. Res. Lett. (**under revision**)



3D放射対流平衡状態の妄想 (およその話のまとめ)

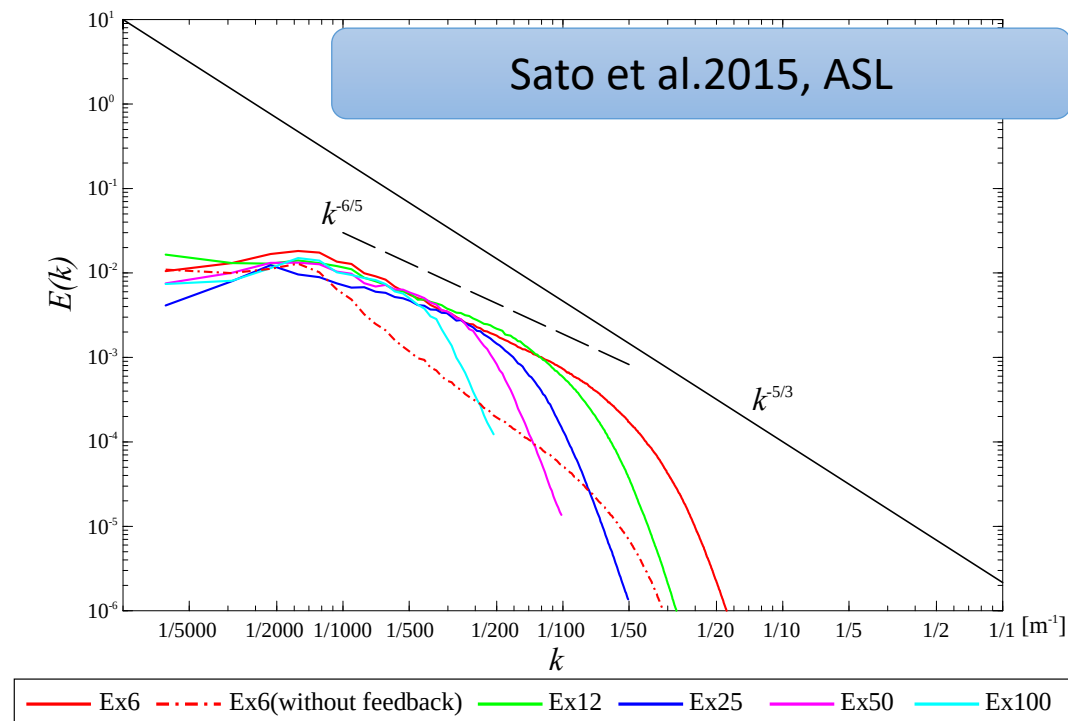
- 熱を伝える手段は、放射、拡散、対流、すべて出てくる
- 系は大気だけ見た場合、「入ってくる熱」、「出ていく熱」がバランスしている。
ここでの熱は、顕熱、潜熱
- fluctuationはあるが、長い目で見ると平衡状態
- 地球上でこんなきれいなメッシュ状のクラウドクラスターはあるか？
 - 見当たらない。
 - 現実大気で、クラウドクラスターがポコポコと発現する。。。我々は、過渡的な状態を見ている？
 - もちろん、回転や外乱の影響も受けるので、こんな理想形にはならない
 - しかし、この平衡状態は、このあとの大気組織化研究の原点であるとも言える？！
- ベナール対流系でみられたように、この系も
温度差を最も効率よく解消するような「パターン形成」「特徴的な距離」を選ぶのだろうか？ → 今後調べる
- もしそうなら、なぜか？ これも結局、哲学的な問い、、、
- 他の分野での自己組織化・階層構造の理解は？：将来的には、気象だけではなく、統合的に理解したい。



最後にチャレンジングなことを一つ！

気候計算は、全球ラージエディーションが次のジャンプ？

- LESって本当にワークするの？
 - 現在のLESは以下に基づく
 - 等方性乱流、成層効果は入っているけど、
 - 一様乱流
 - ドライな時の理論
 - じゃあ、湿潤過程のLESに適用していいのか？
 - 凝結に伴う、グリッドスケールでの熱の注入
 - ドライで見られる、きれいなエネルギーカスケードにはならない。



- 例:
 - 超高解像度で超水滴法での層積雲シミュレーション
 - $-5/3$ 乗即に乗らない、、、、
- 本当？



湿潤LESの構築(原理に基づく雲と乱流の一体化スキーム)、どうやってやっていくか？

- 凝結を伴う現象をDNSでデータベース化
- そこから、原理の推論（データ科学の力を借りよう）
- モデル化

この課題は、熱や運動量の空間的移動だけではなく、空間スケール間での非線形相互作用の問題

※ **HPCをうまく使って（計算科学＋データ科学）、理論が構築できれば、、、**