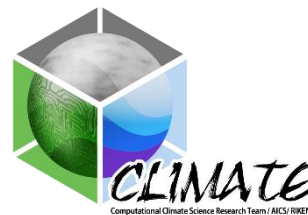
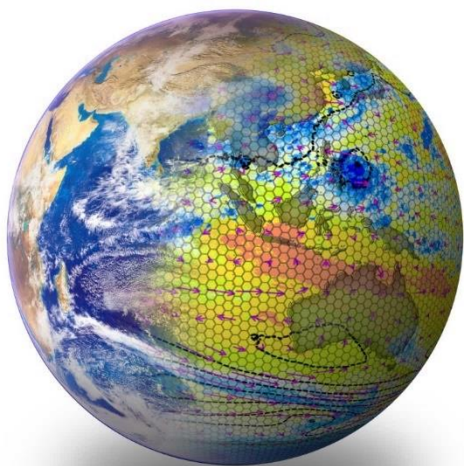


超高解像度全球雲解像実験からわかる対流の統計的性質



富田浩文

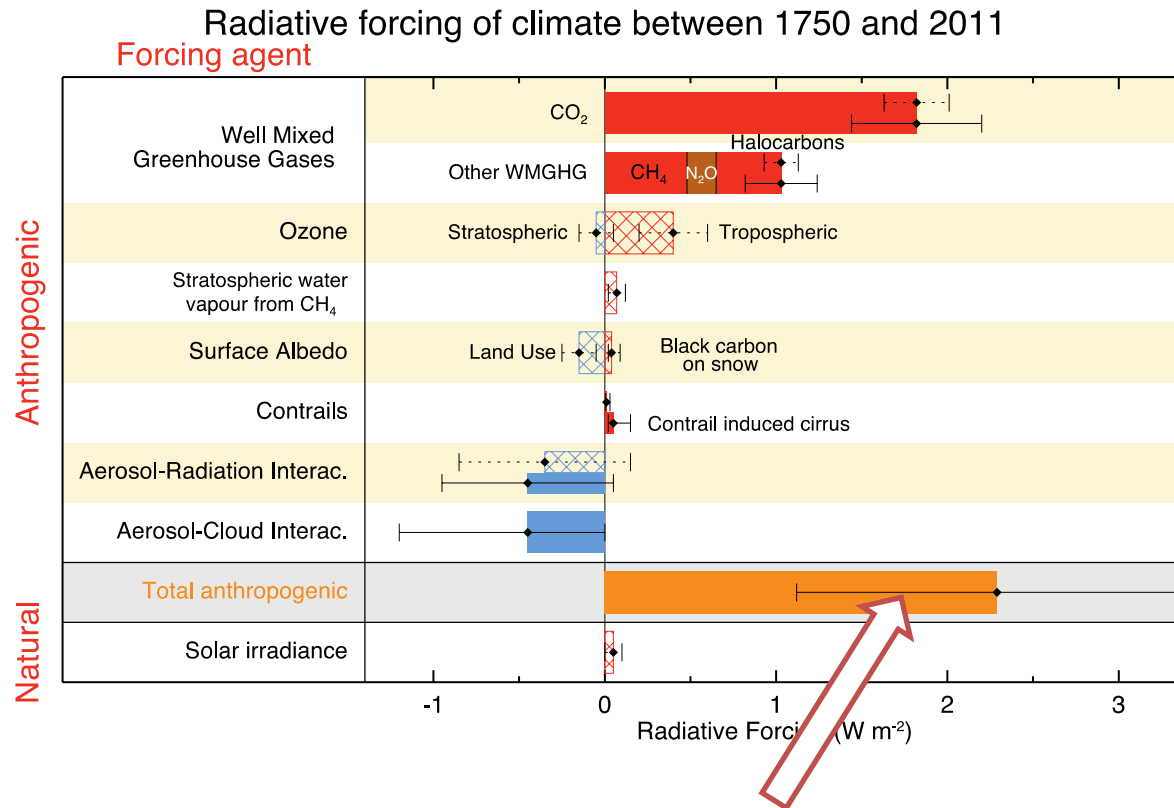
理研・計算科学研究機構
複合系気候科学研究チーム



第10回気象庁数値モデル研究会@気象庁 2017年5月24日

気候学的に見てどのプロセスが悪い？

- Radiative forcing of climate in past 260 years (IPCC AR5)

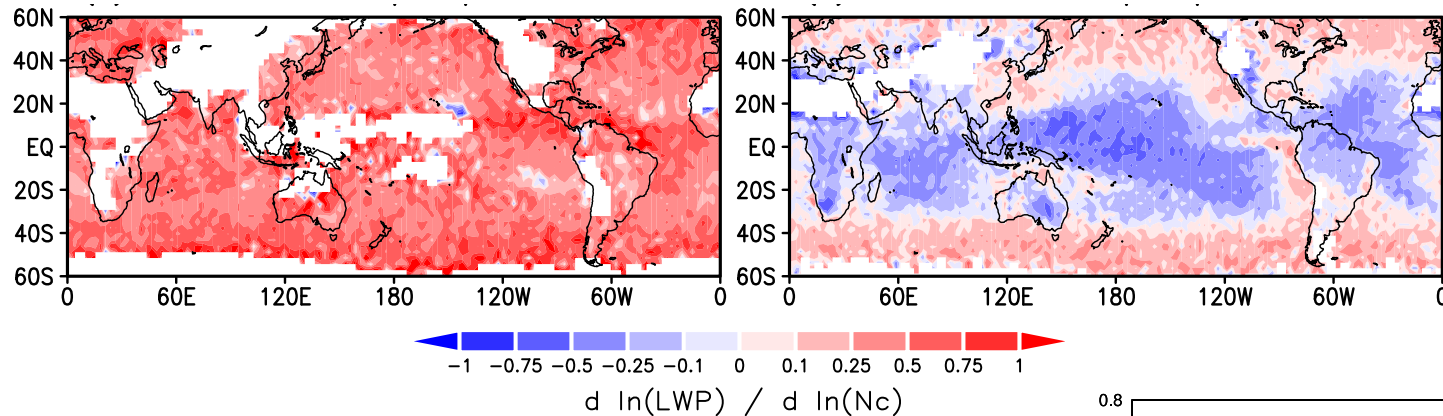


各モデル結果のバラツキ

- もっとも不確定性の高いのは? : エアロゾル-雲相互作用、エアロゾル放射相互作用

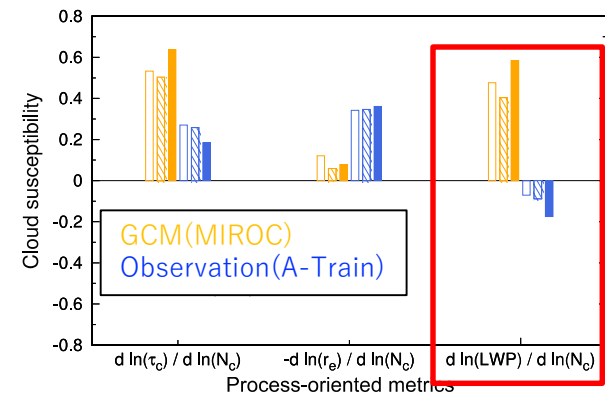
第2種間接効果(雲の寿命効果は本当か?)

Geographical distribution of $\left(\lambda = \frac{\Delta \text{Log}(LWP)}{\Delta \text{Log}(N_c)} \right)$
(Michibata et al. 2016) GCM A-Train



- λ estimated by GCM is positive almost over the world
- λ estimated A-train satellite observation has regional variability
- λ estimated by GCMs in the world shows same pattern (Zhang et al. 2016, Ghan et al. 2016, Wang et al. 2012)

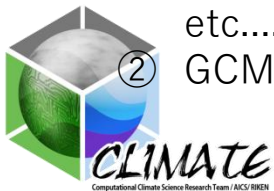
今までの GCMs は第2種間接効果を過大評価しすぎてた
のでは? (現在NICAMで調査中)



Speculation of the overestimation

- ① Large Autoconversion/Accretion ratio in GCM (Gettelmann et al. 2012 etc.....)
- ② GCM cannot resolve the cloud and cloud life cycle

Challenging!



Sato et al.(2017) in preparation

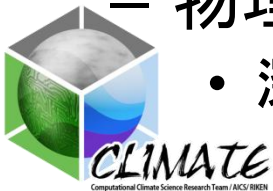
うちのチームのモチベーションとしては、、、

- メソ対流系を原理的に表現するところから、全球気候モデルでの結果に自信をもつこと
- 高解像度、いくつかのキーとなる物理過程のインパクトを領域モデルで調べ、その知見を、GCMへ生かす。
- 先の目標は、より原理的グローバルモデル(LES,エアロゾル、放射、雲微物理の原理的精緻化)でモデルの不確定性を軽減する。

今日はとりあえず、深い対流の話

今、富田が考えていること:

- Global LES?!
 - 乱流に関しては、より原理的・・・
- なぜGLES?
 - 以下のアドバンテージ,
 - より原理的であるが故、次のブレークスルー
 - C.f. NICAMでhydrostaticからnon-hydrostatic with explicit cloud expressionにしたようなもん
 - GLES だと一応浅い雲までちゃんと表現できる?!
 - 知見は、GCMへフィードバック=>適切なパラメタリゼーション
- GLESに必要なものは何か?
 - とにかく高解像度化は必須
 - 物理過程のモデルの高度化
 - 深い対流に関しては、乱流と雲過程のカップリングがキー



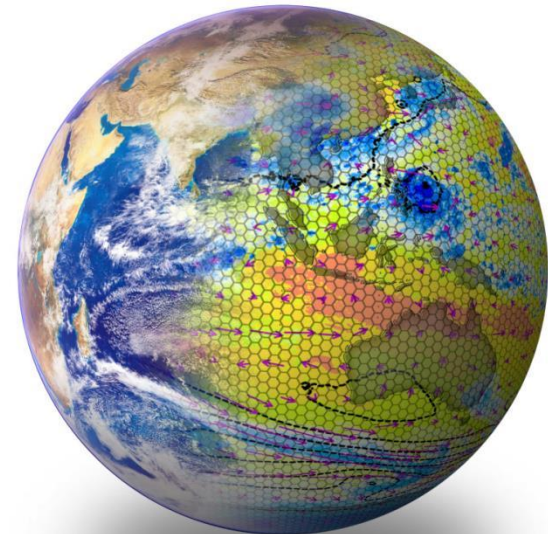
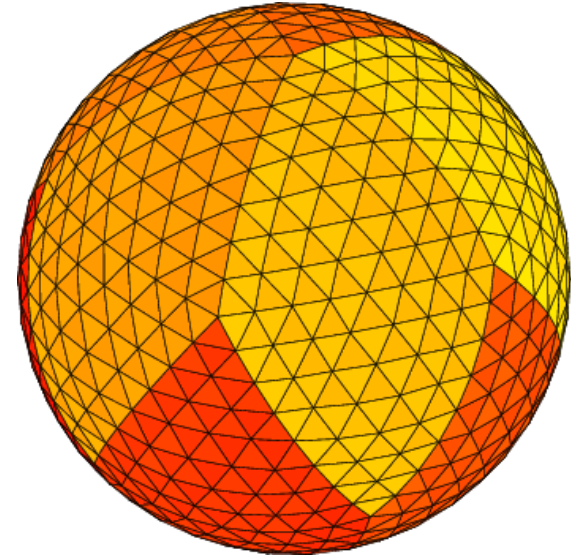
NICAM (global model)

Our research community (NICAM research community)' approach:
Resolve the cloud system & related process over the globe

NICAM development : ~2000
still development is continuing!

Conceptual development philosophy

- **Explicit resolving the cloud itself**
 - **Use of Icosahedral grid**
 - To get a quasi-homogeneous grid for computational efficiency
 - **nohydrostatic DC**
 - To resolve cloud scale (**deep convection**, shallow cloud etc.)
 - **Sophistication of cloud expression:**
 - To avoid the ambiguity of cumulus parameterization and understand the cloud dynamics



Deep convection : Global sub-km experiment

Grand Challenge on K computer!

~Use of ¼~full system of K-computer~

Miyamoto et al.2013, GRL
Miyamoto et al. 2015, ASL
Kajikawa et al. 2016 PEPS
Yashiro et al. 2016 SOLA

- Scientific scope:

- 全球での対流の統計は？（個数とかなんとか）
- 解像度を上げていったときに深い対流の性質はどう変化するか？（ある数理モデルにおける数値解の収束性）

- Grid refinement:

- Horizontal grid:
30, 14, 7, 3.5, 1.7
0.87km

- Vertical layer: 96

- Initial condition:

- 3-day integrated
results of 1-step
coarser
resolution

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



Essential Change of convection statistics(1)

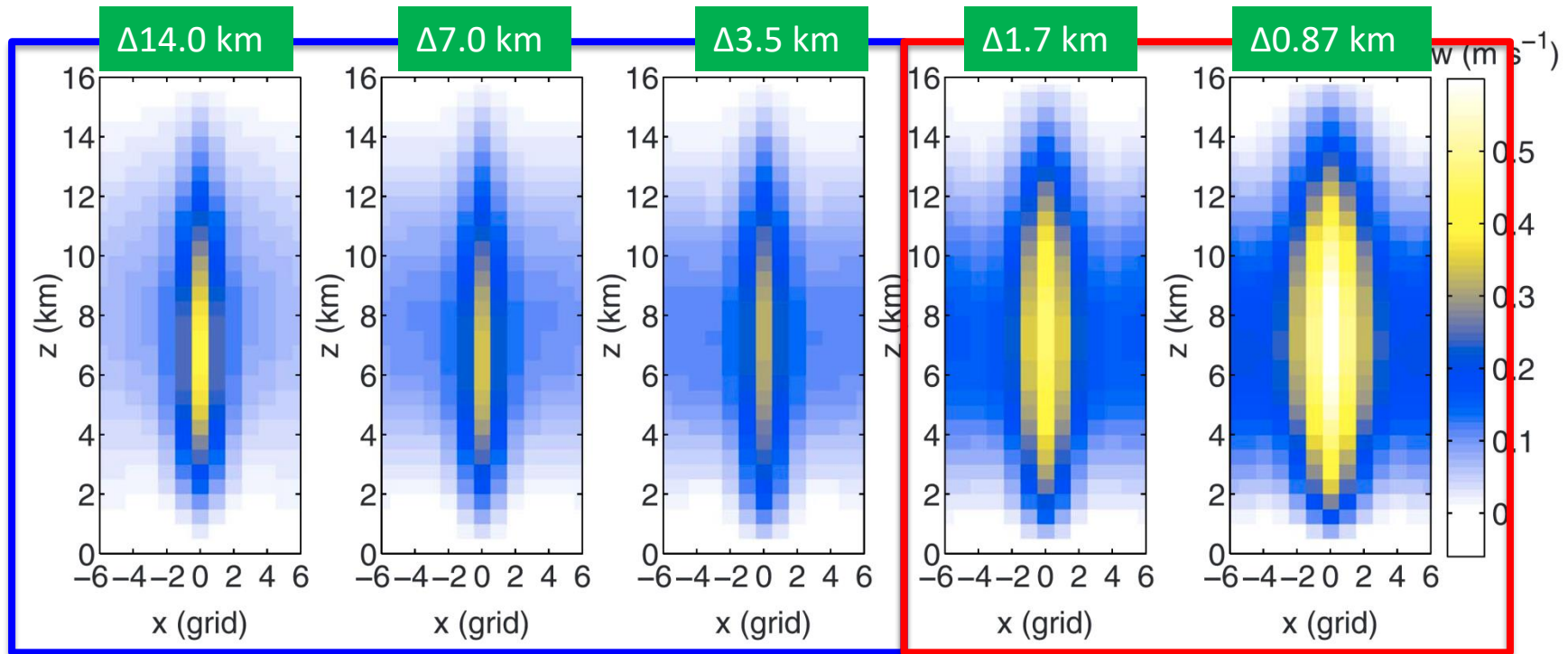


Figure 3. Radius-height cross sections for composites of vertical velocity w for all detected convections in each simulation. The horizontal axis is the number of horizontal grids.

- Convection is represented at 1 grid
- Little dependence on resolution

- Convection is represented at multiple grids
- **Intensify** w / resolution

Essential Change of convection statistics(2)

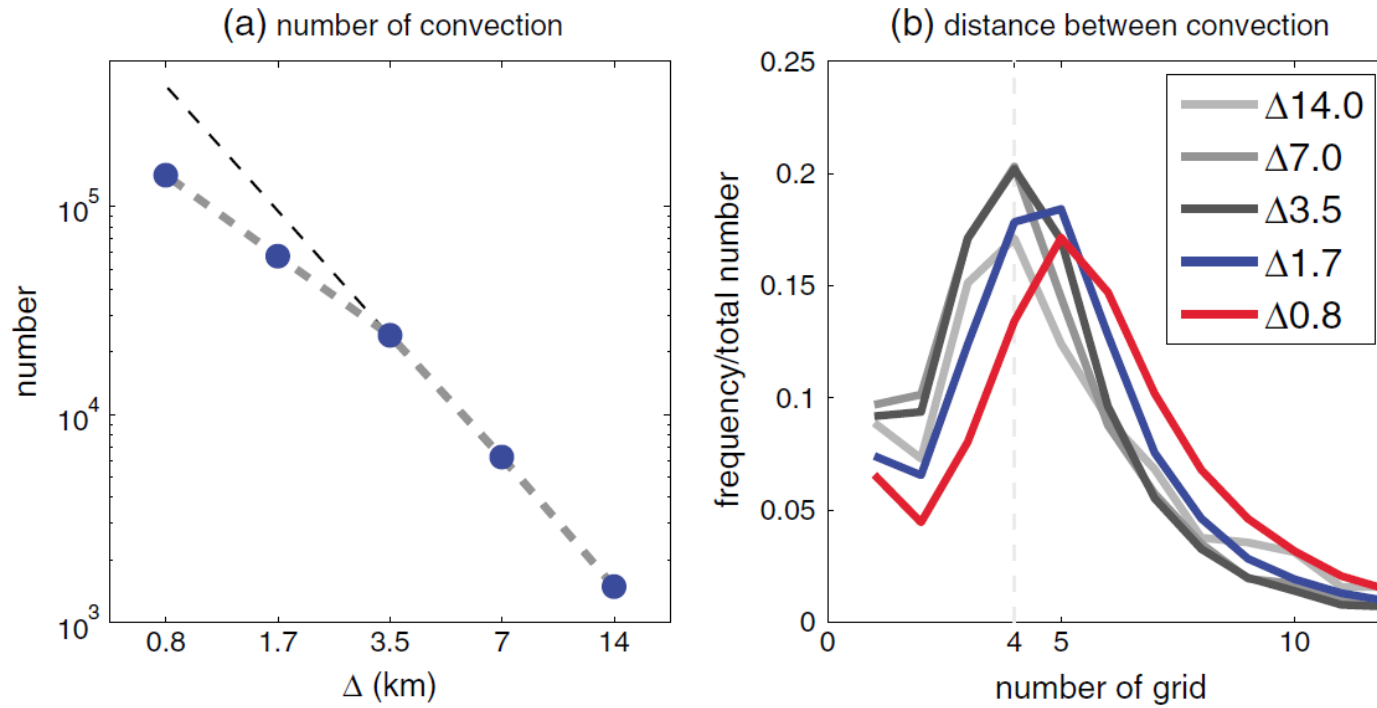
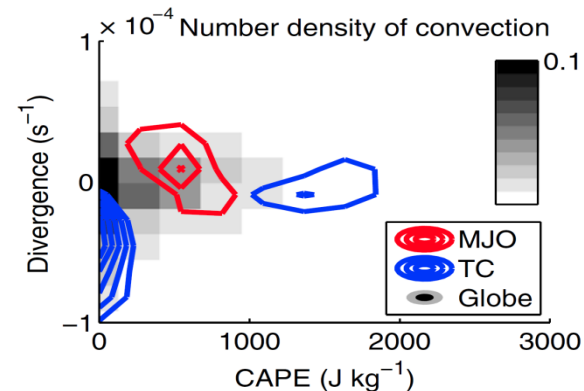
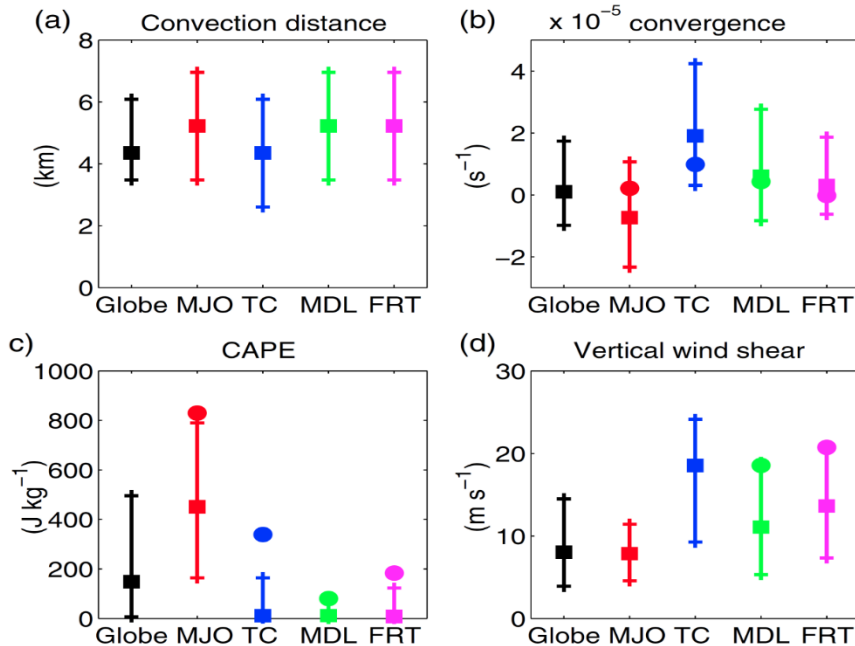


Figure 4. Resolution dependencies of convective features: (a) number of convective features and (b) grid distance to the nearest convective feature. The thin dashed line in (Figure 4a) indicates a $\log \Delta^4$ crossing at the point of $\Delta 14$ as a reference.

The convection structure, number of convective cells, and distance to the nearest convective cell dramatically changed around **2.0km**

More detail in 0.87km simulation

- 雲擾乱別に見たときに、どんな違いがあるか？ (MJO, TC, or Mid-latitude front)
 - convection structure and intensity



MJO: Large CAPE /Weak convergence
TC: Strong convergence/Small CAPE
MDL & FRT: Strong vertical wind shear/Small CAPE

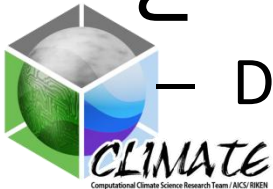
[Discussion] Differences may be attributed to the environmental fields of the convection (i.e., **the disturbances themselves: CAPE & convergence**) => Miyamoto et al.(2016,JGR)

[Future] should be examine the interactions between convection and disturbances based on **longer period** datasets with higher resolution.

- Other papers:
 - Difference in convection structure and intensity in land and ocean? (Kajikawa et al. 2016, PEPS)
 - Convergence of diurnal cycle? (Yashiro et al. 2016, SOLA)

山積みの課題

- 乱流: MY2.5／水平混合なし
 - 解像度1kmをきるのでグレーゾーンに差し掛かる
 - この先は、LES、、しかし湿潤では？
- 雲の表現：1モーメントバルク/エアロゾルなし
 - 簡単すぎ？ より高度化したものではどうか？
 - 浅い雲は、(当然のことながら)、表現不足
- 解像度：
 - Sub-kmでもまだ収束していない。
 - 鉛直解像度依存性はどうなのか？
- 積分時間が短い： 数日の積分
 - 実際には、対流の個数サンプル的には十分。
- 計算そのものと前処理後処理:計算は早いけど・・・そのあとが大変。
 - Data! Data! Data!

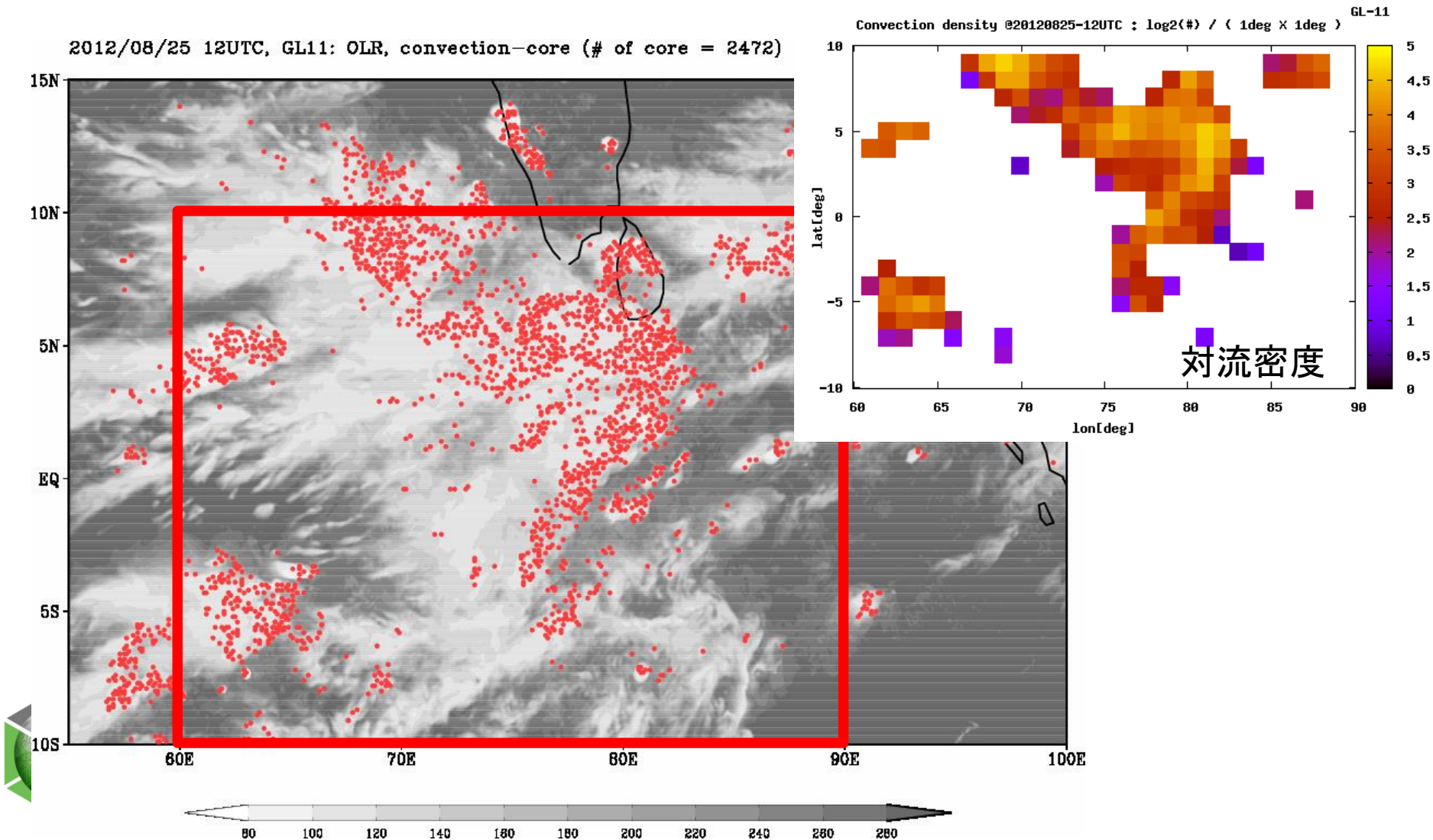


そもそもなぜ対流間距離？

- 雲の階層構造理解
 - ちっちゃいところから、、、
 - 第1の組織化：境界層でのセルが、何かの拍子にプリューム的に組織化する。
 - 第2の組織化：孤立している対流が、集中し始める。
 - 第3の組織化：それらの集中対流群は、何もなくても組織化するか？ベータ効果必要？
 - 第？の組織化：MJOみたいな大規模擾乱へ
- まずは、これらの把握。組織化メカニズムは、数値的収束性担保のもとに・・・

まず、もっと詳細に、deep convection

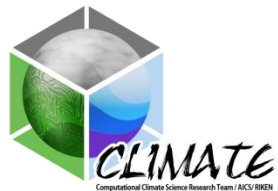
- まずは、数値解の収束性の担保の確認から
- NICAM 3.5kmからMJO部分をダウンスケール



実際にやろうとしていること

- RANSで、まず、とことん解像度依存性
 - 数値的収束ポイント(A)を探る。
 - (注)物理的な意味は、不明(グレーゾーン問題)
 - 格子間隔、3.5km~200mで。
- LESで同様に、とことん解像度依存性
 - 数値的収束ポイント(B)を探る。
 - 物理的には、正当性がある

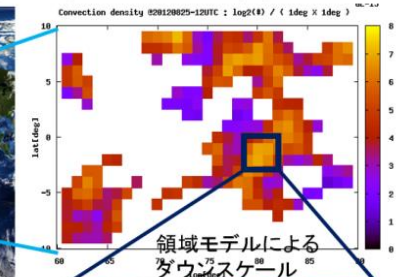
収束点ギャップの解釈:
キーは、エントレインメント?



(a) 全球雲解像モデルでの結果

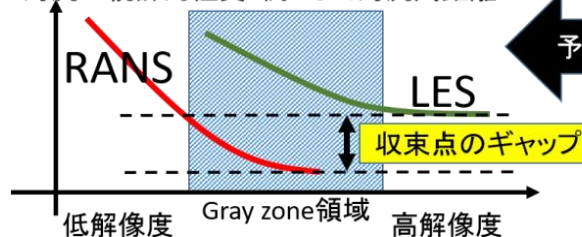


(b) $\text{Log}_2(\text{対流個数密度}) / (1\text{deg} \times 1\text{deg})$

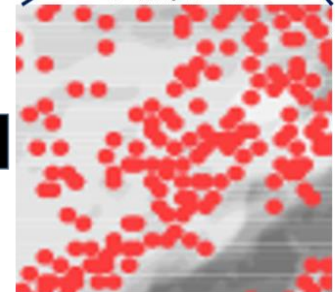


領域モデルによる
ダウンスケール

対流の統計的性質: 例として対流間距離



(d) 結果のイメージ図



(c) RANS / LESを用いた
実験イメージ図

使うツール SCALE (library for met./clim. simulation)



Physical process library
Regional dynamical core

Dynamics in regional model

- Governing equations:
3-dimensional fully compressible
- Grid system:
Arakawa-C type
- Temporal integration:
HEVE, HEVI, HIVI
- Temporal difference:
3 steps Runge-Kutta scheme
- Spatial difference:
 n^{th} order central/upwind difference
- Topography:
Terrain-following
- Positive definitive:
FCT scheme

Other

- Offline/Online nesting system
- LETKF assimilation system

Physical schemes

- Cloud microphysics:
Kessler (Kessler, 1969)
1-moment bulk (Tomita et al., 2008)
2-moment bulk (Seiki and Nakajima, 2014)
1-moment bin (Suzuki et al., 2010)
super droplet method (Shima et al., 2009, *experimental*)
- Turbulence:
Smagorinsky SGS (Brown et al. 1994, Scotti et al. 1993)
MYNN level 2.5 (Nakanishi and Niino 2004)
- Cumulus parameterization:
Kain-Fritsch (*in preparation*)
- Radiation:
MSTRN-X (Sekiguchi and Nakajima, 2008)
- Aerosol microphysics:
3-moment bulk (Kajino et al., 2013, *experimental*)
- Surface flux:
Louis-type (Uno et al. 1995)
Beljaars-type (Beljaars and Holtslag 1994, Wilson 2001)
- Land:
Slab model with a bucket model
- Ocean:
Slab ocean model
- Urban:
Single-layer urban canopy model (Kusaka et al., 2001)

SCALEとNICAMの関係

Physical process library

Regional dynamical core

Nishizawa et al. (2015,GMD)

Sato et al. (2015,PEPS)

Yoshida et al. (2017) PARCO.

Global dynamical core

Tomita et al.(2001,2002,JCP)

Tomita & Satoh (2004,FDR)



New SCALE Library



乱流LESの問題(大きな問題)

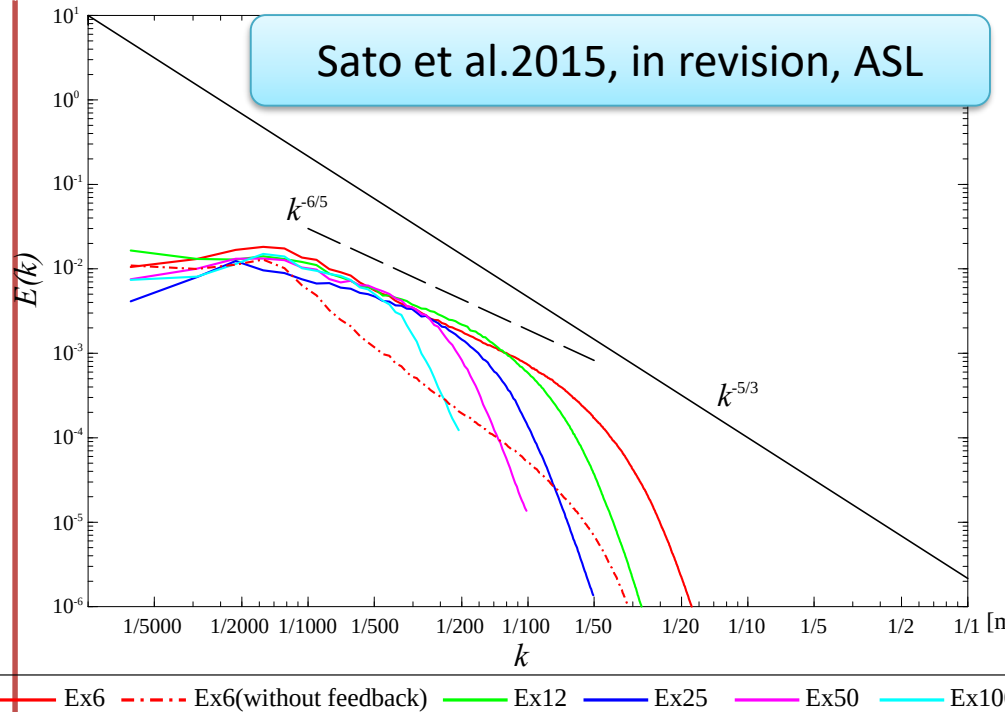
- LESって本当にワークするの？

- 現在のLESはいかに基づく

- 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
- Not -5/3 power but -6/5

本当？

Moist LES theoryの確立とDNSでの突き合わせが必要

まとめ

- NICAMを使った、格子間隔3.5km~0.87kmまでの実験
 - 2kmを境に収束の兆し(対流個数、対流間距離)
 - 2kmを境に対流コアが解像されるようになってくる。
 - 周りの環境
 - MJOでは、CAPE高い／convergence小さい
 - TCでは、逆。
- より掘り下げて、実験(しようとしている)
 - 同じ数理モデルの中で、まずは、収束性の担保。
 - 雲は、とりあえず1モーメントバルク
 - 乱流は、RANSとLESで、
 - 収束点のギャップは何を意味するか？
 - その先には、階層構造を詳細把握のため、放射対流平衡実験
 - 自己組織化のなぞ。
- 問題: GLESは方向性。だが、湿潤での適用は果たして妥当なのか？問題は山積み。