

# 京を使った高解像度全球大気シミュレーション の成果とこれからの展望

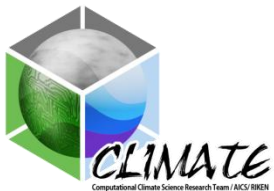
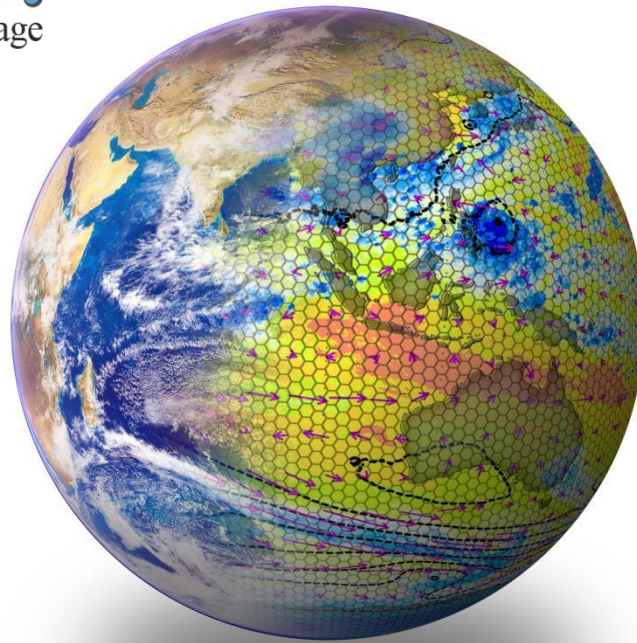


富田浩文（理研・計算機構）

*NICAM working team*

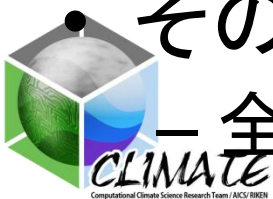
&

*Team SCALE*



# 内容

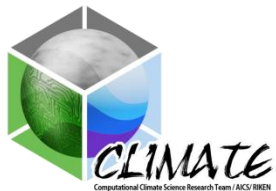
- 2011年SS研でお話した内容
  - 大気モデリング研究でのこれまでの進展
    - ES出現前はどうだったか？
    - ES出現後はどうなったか？
    - 今後は(京では)？
- 今回SS研でお話しする内容
  - 京コンピュータで得られた二つのlandmark的な成果
    - 全球1kmを切る超高解像度実験( Miyamoto et al. GRL 2013)
    - 雲解像することによるMJOの予測可能性へ前進(Miyakawa et al. Nature Comm. 2014)
- その先には、、、あくまで、富田の方向性
  - 全球雲解像から、全球大渦解像へ



# 気候モデルでのHPCの必要性

## 計算量が増大する三つの軸：

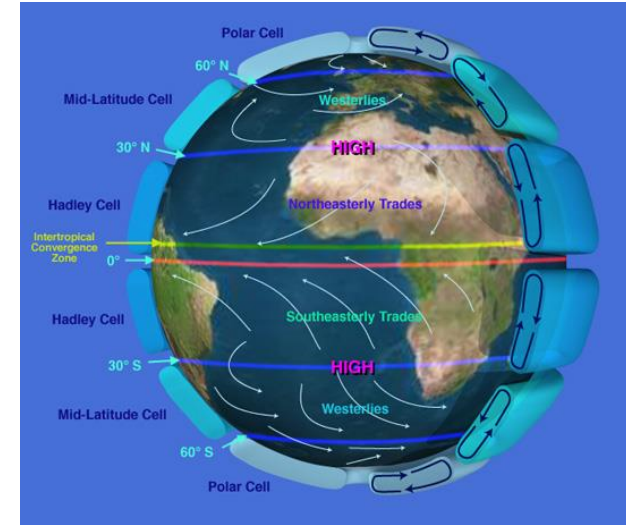
- 高解像度化
  - サブグリッドスケール現象（乱流や雲）のパラメータを排除
    - 雲対流系まで解像
    - e.g. NICAM, NHM, WRF
- モデル要素の複合化・精緻化
  - 精緻化されてきたプロセスモデルの統合
    - 大気・海洋・陸面モデル＋炭素循環＋生態系＋...
    - e.g. MIROC-ESM
- アンサンブル数の増大、積分期間の延長
  - より統計的な評価のため
    - 非線形系の予測には必須



## バランスが重要

# 雲はなぜ重要？

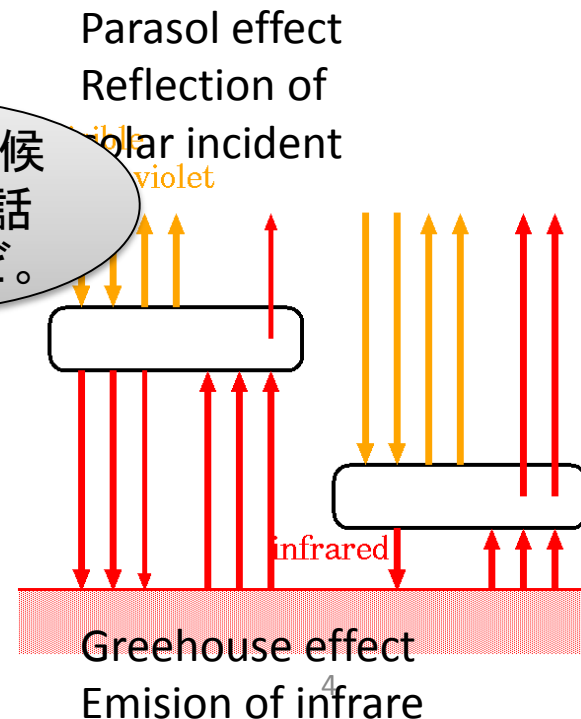
- 大気大循環のエンジンとして：
  - 熱帯の雲は、熱を中緯度方面へ運ぶ重要な役割をになう。
    - 熱帯の雲： 階層構造
      - クラウドクラスター、スーパークラウドクラスター、熱帯低気圧、MJO



まずは、積乱雲系のメカニズムや予測可能性お話

こちらの気候学系のお話はのちほど。

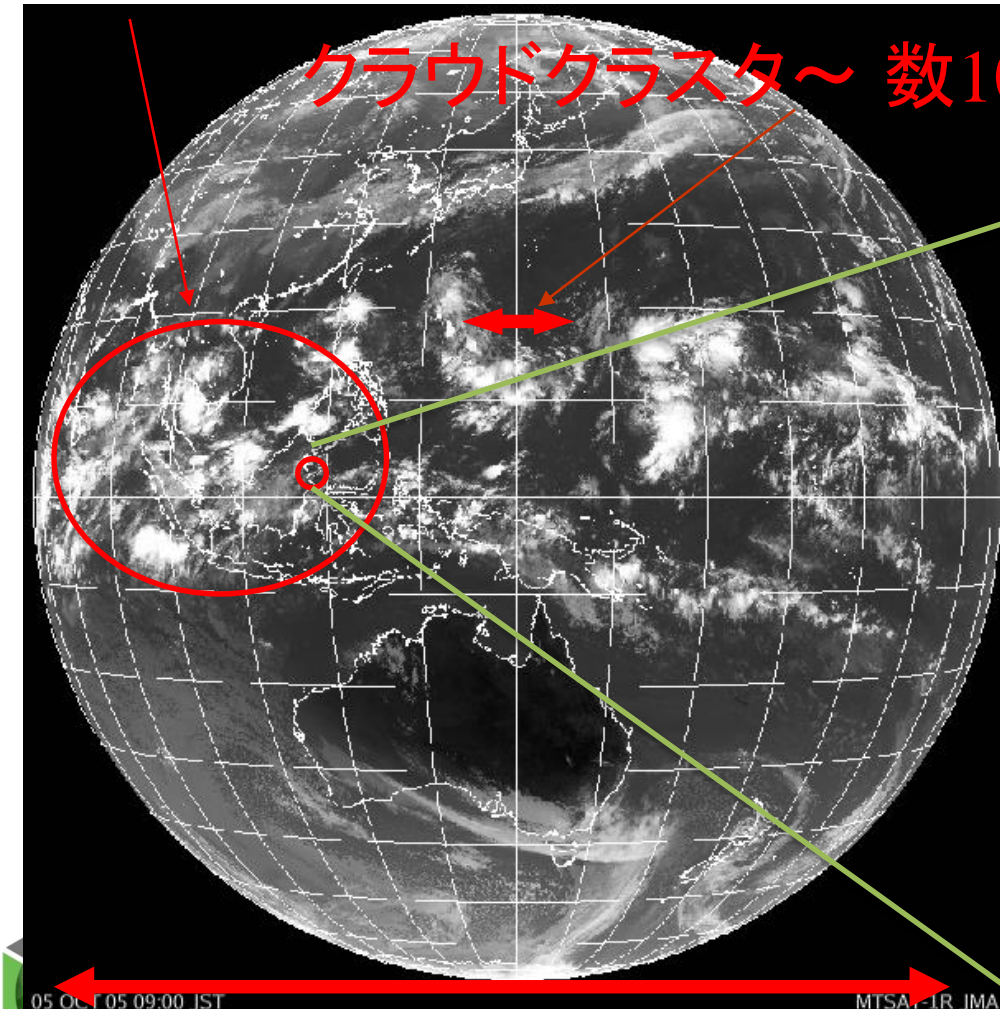
- 気候学的にはエネルギー収支に大きく影響：
  - 二つの効果！
    - パラソル効果：日射を跳ね返す。
    - 温室効果：地面からの赤外放射をいったん吸収。地面へ再放出する。
  - エアロゾルとの関係。
    - エアロゾル間接効果：光学的厚さを変える。



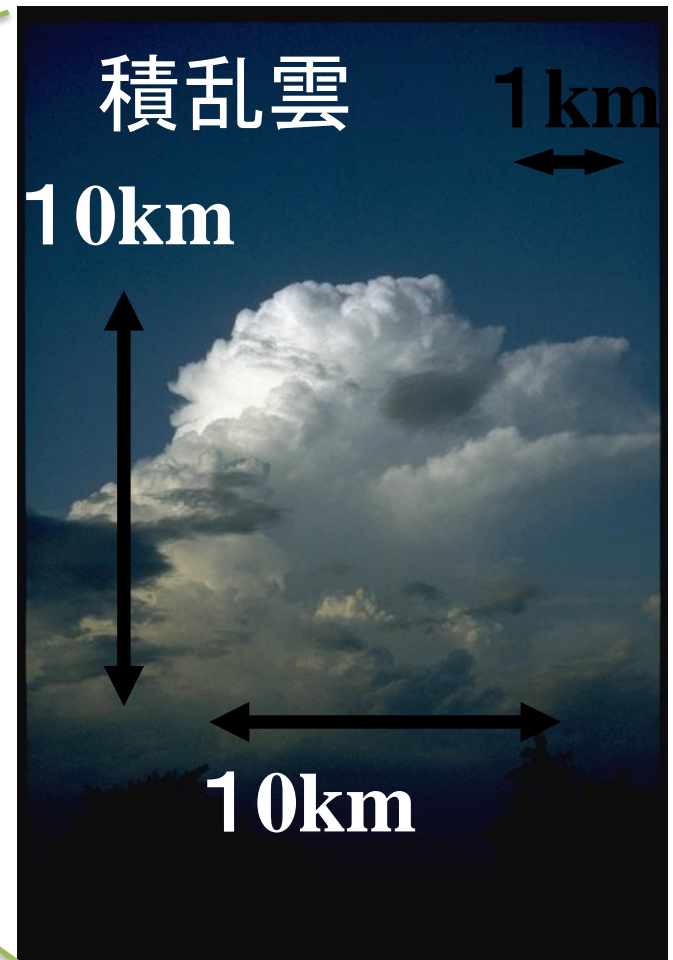
# 熱帯の雲活動概観

## 大気現象の空間スケールと階層構造

スーパークラウドクラスター～ 数1000km → MJOと台風



クラウドクラスター～ 数100km

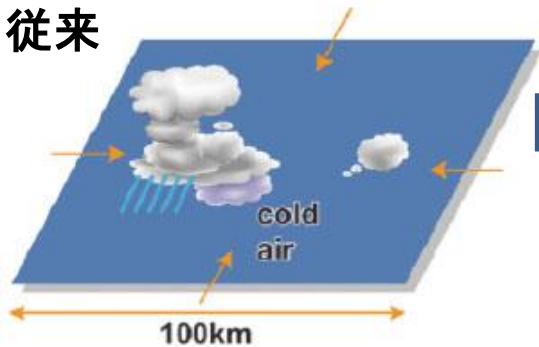


# 全球雲解像モデルNICAMの概要

NICAMとは？

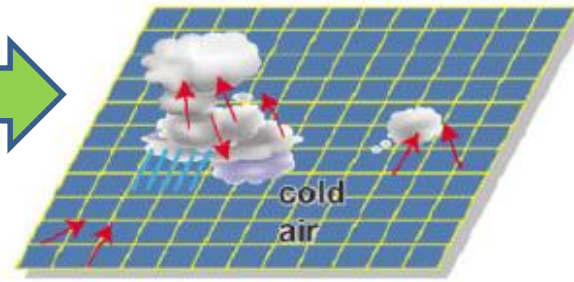
<b>N</b> on-hydrostatic 非静水圧平衡 (≡雲解像)	<b>I</b> Cosahedral 二十面体	<b>A</b> tmospheric 大気	<b>M</b> odel モデル
---	-----------------------------	---------------------------	----------------------

従来

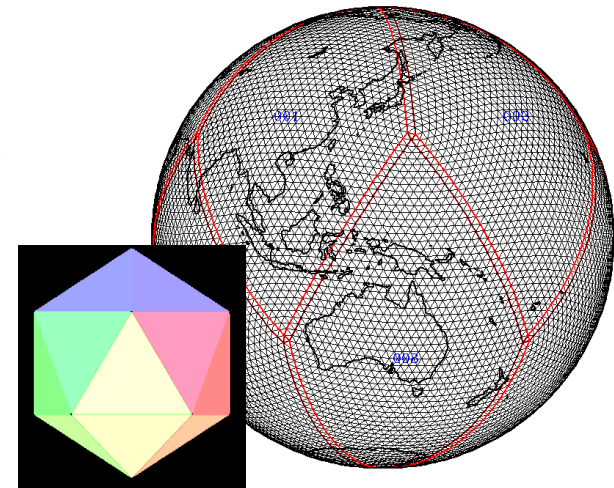


従来の全球モデル

NICAM



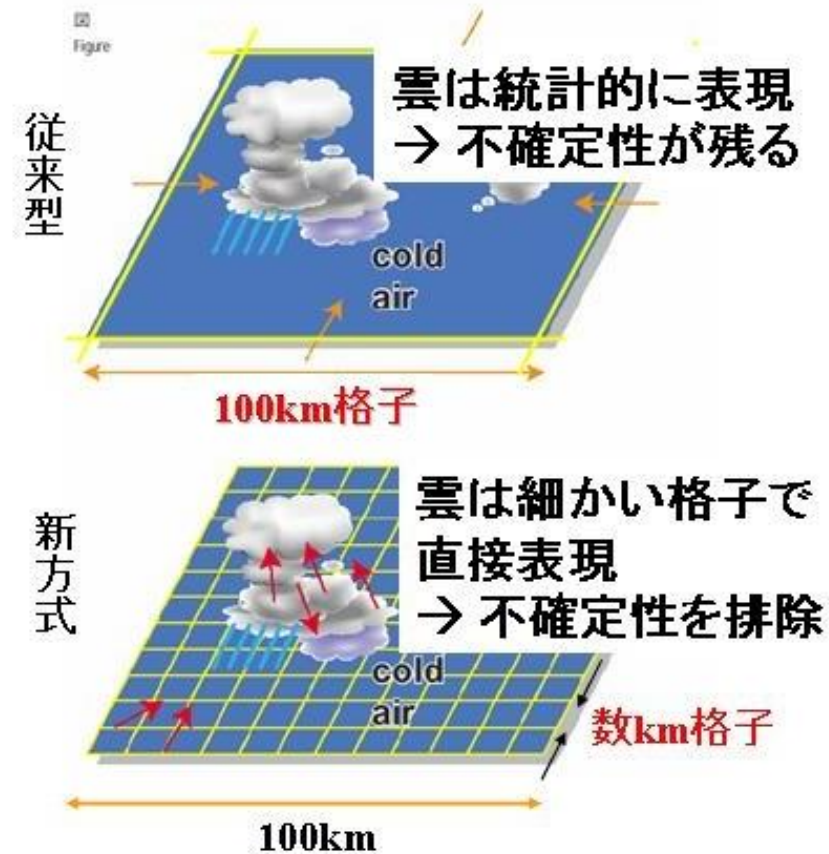
格子間隔 数十～数百 km  
雲を大規模場の関数として簡単化



格子間隔 数百m～十数 km  
雲の対流を陽に計算

# NICAMのアドバンテージ

- 従来型AGCM
  - 解像度100km～数10km
  - 積雲パラメタリゼーション  
＋大規模凝結
    - 統計的/経験的法則に基づく
    - モデルの不確定要素No.1
- 雲を一つ一つ解像すること  
の必要性
  - これにより、雲の階層構造を表現
  - パラメタリゼーションの不確定性排除



# NICAMのモデリング戦略

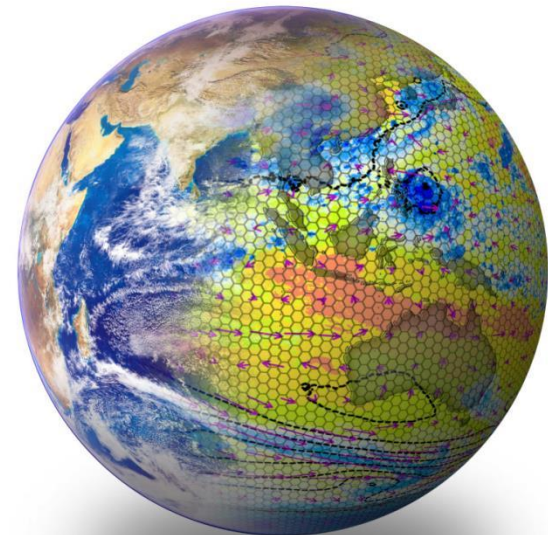
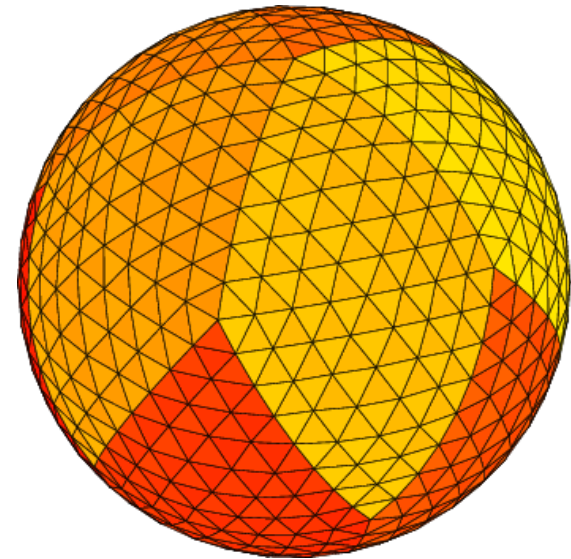
NICAM の開発: ~2000

まだまだ、改良が続いている。

## 開発の基本的ポリシー

### 雲そのものを露わに表現すること

- 高解像度化、物理過程の精緻化は当然の方向
  - 正20面体格子の採用
    - 準一様格子点法を用いることは、計算効率上不可避。スペクトル法では、もはやしんどい。
  - 非静力学ダイナミカルコア
    - 一個一個の雲スケールでは、激しい上昇下降流が起こっている。
  - 雲微物理による直接表現:
    - 積雲パラメタリゼーションの不確定性を排除し、雲力学を露わに表現すること(凝結、蒸発、衝突・併合)で現象を理解する。



# NICAMの開発歴

- NICAM力学過程 ( ~2000)

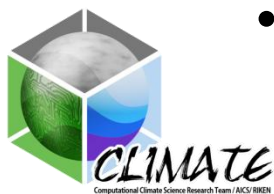
- 水平格子 : 修正型正20面体格子  
( Tomita et al. 2001, 2002 JCP)
- 力学系 : 全エネルギー保存考慮の非静力学方程  
( Satoh 2002, 2003 MWR)
- 3次元力学コア  
( Tomita and Satoh 2004 FDR)

– **2004 : 物理過程を含み最初のバージョン完成**

- 2004以降

- 高次精度 + 単調性考慮の移流スキーム(Miura 2007)
- Consistency With Continuity( Niwa et al. 2011)
  - 混合比が移流スキームの拡散などに左右されない。
- 水平格子ファミリー( ストレッチ格子, Tomita 2008, Iga and Tomita 2013 )
- NICAM-DC は、現在BSD2 license化し、以下で公開。

– <http://scale.aics.riken.jp/nicamdc/>



# Summary of NICAM current status

**Ref.** Satoh et al. 2014 PEPS in press, / Satoh et al. 2008 *J. Comput. Phys.*

Tomita & Satoh 2004 *Fluid Dyn. Res.* /Tomita et al. 2011, *ECMWF workshop proceeding*

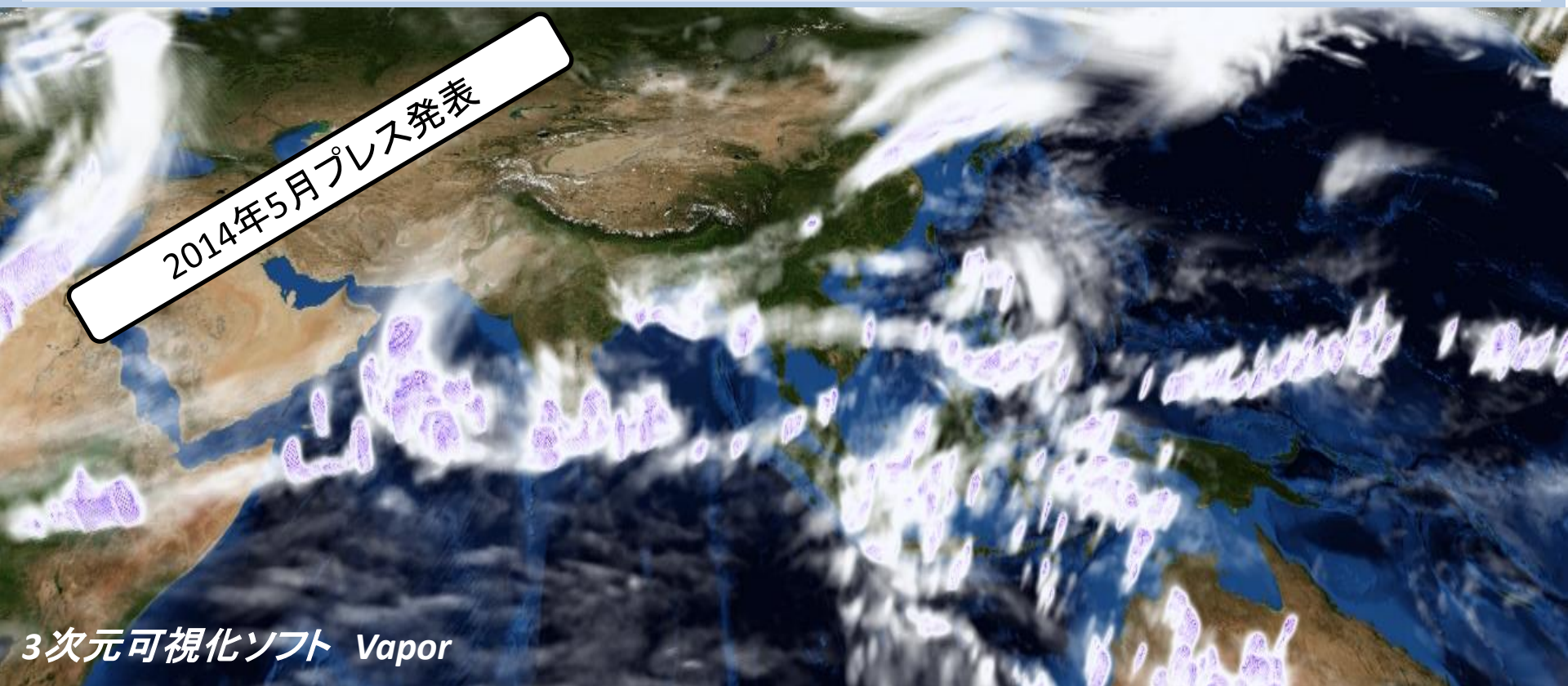
## ■ Dynamics

Governing equations	Fully compressible non-hydrostatic system
Spatial discretization	Finite Volume Method
Horizontal grid configuration	Icosahedral grid with spring dynamics smoothing (Tomita et al. 2001/2002)
Vertical grid configuration	Lorenz grid
Topography	Terrain-following coordinate
Conservation	Total mass, total energy (Satoh 2002, 2003)
Temporal scheme	Slow mode — explicit scheme (RK2, RK3) Fast mode — Horizontal Explicit Vertical Implicit scheme

## ■ Physics

Turbulence/shallow clouds	MYNN 2.0,2.5(Nakanishi and Niino 2004) modified by Noda(2009)
Surface flux	Louis (1979), Uno et al. (1995)
Radiation	MSTRNX (Sekiguchi and Nakajima, 2005)
Cloud microphysics	NSW6 (Tomita 2008) --- 6 caegories of water ( 1moment-bulk) <b>NDW6(Seiki et al.2013)</b> --- 6 caegories of water ( 2moment-bulk)
Cloud parameterization	NONE
Surface process	MATSIRO(Takata et al.)

# 熱帯域におけるマッデン・ジュリアン振動の 1ヵ月予報が実現可能であることを実証 ～「京コンピュータ」+ 次世代型超精密気象モデルによる予測～



*Nature Communications* 2014年5月6日号 ハイライトペーパーとして掲載

著者：宮川知己，佐藤正樹，三浦裕亮，富田浩文，八代尚，野田暁，  
山田洋平，小玉知央，木本昌秀，米山邦夫



独立行政法人

海洋研究開発機構



東京大学  
大気海洋研究所



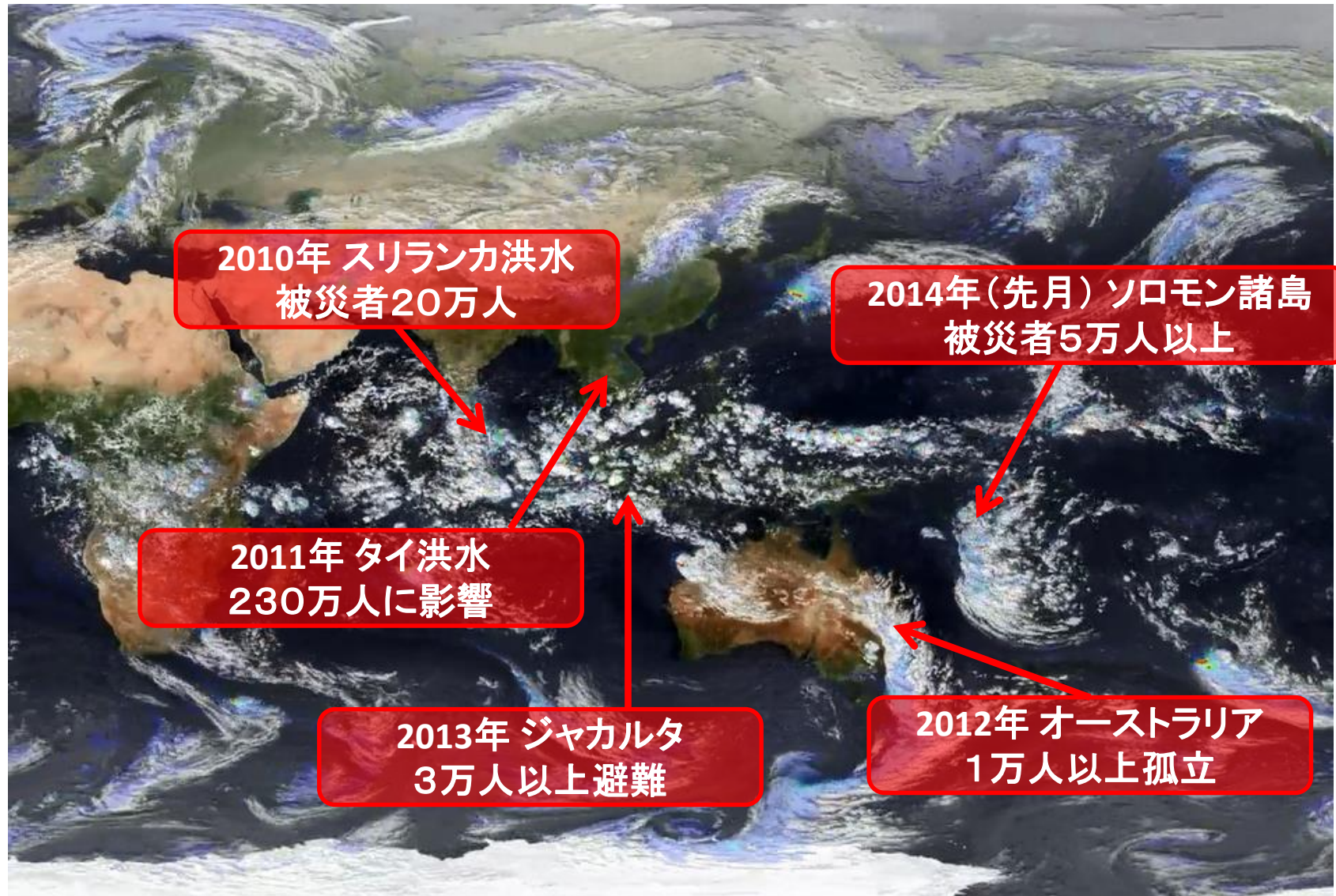
東京大学 大学院  
理学系研究科・理学部  
SCHOOL OF SCIENCE, THE UNIVERSITY OF TOKYO



理化学研究所

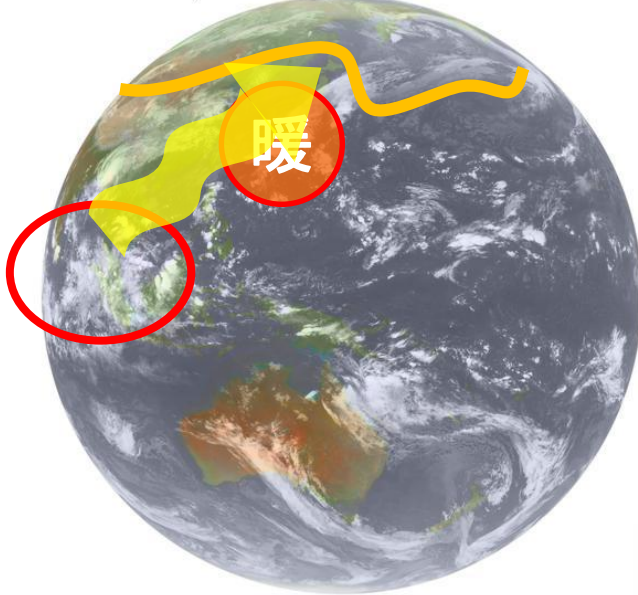
# MJO の影響による近年の洪水被害

宮川氏(東大)提供



## 2011年秋の異常高温と厳冬

MTSAT-2 IR1 11102000JST Kochi Univ



平均気温平年差 (°C)  
(2011年11月)



小笠原諸島

2011年10月下旬～11月 MJOがインド洋で大きく発達  
持続的な加熱の影響がジェット気流を蛇行させて記録的な暑さに。

MTSAT-1R IR1 11120515JST Kochi Univ



平均気温平年差 (°C)  
(2011年12月)



小笠原諸島

気象庁報道発表資料

MJOの活動がインドネシア付近で活発だった12月はインド洋の対流は抑制され、一転して寒冷化。



# 成果をザックリ言うと

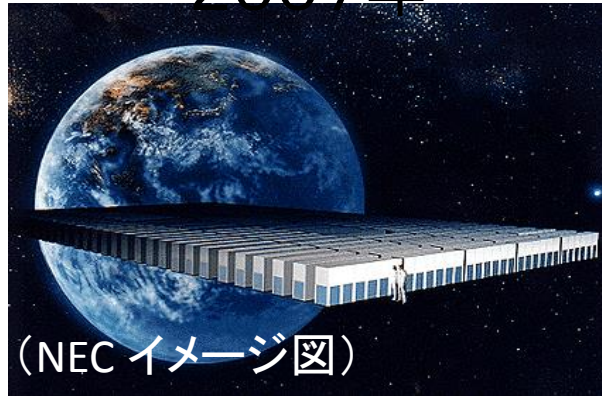
- 熱帯の雨の大部分を支配する現象の予測が約1ヶ月先まで可能なことが示された。
- 日本を含む中緯度の予測精度向上にもつながると期待できる。

## Capacity vs Capabilityの観点

これらは、地球シミュレータ時代に可能性にとどまっていた熱帯気象予測において、京を駆使して、中規模ランを大量に流すことによって統計的な知見へ引き上げたこと。

# 今回の計算の位置づけ

2007年



JAMSTEC

## 地球シミュレータ(初代)

NICAMを使い、  
世界に先駆けて**MJOの再現に成功**  
(Miura et al. 2007, *Science*)

ただし、多くの事例を行うのは困難!  
一発計算で可能性示す。

ES時代のCapability computingの典型

今回



## 京コンピュータ RIKEN/AICS

NICAMによる多数の  
シミュレーションが可能に。

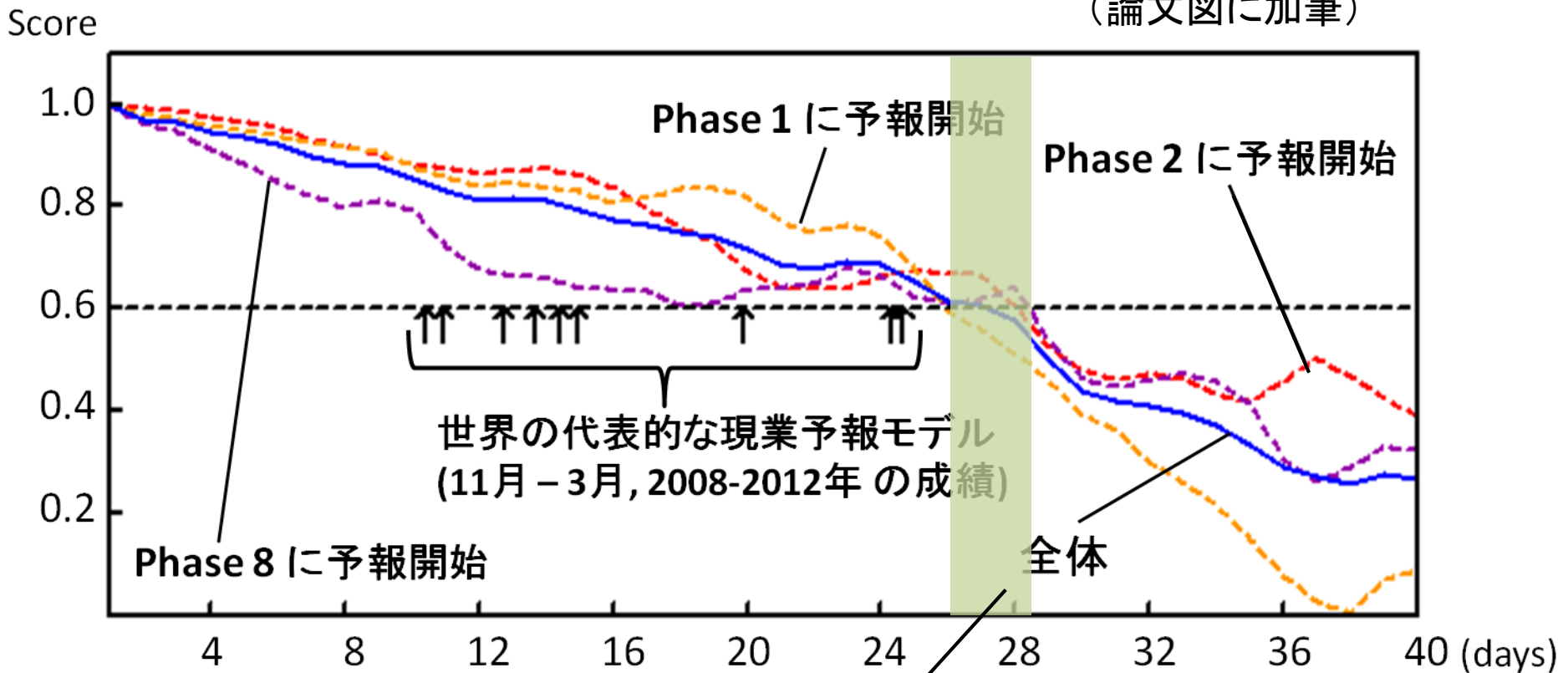
改良の進んだNICAMで**過去10年の  
冬季MJOすべての予測実験**  
(19事例 54本のシミュレーション)  
により**MJO予測性能**を調査

京時代のCapacity computingの典型

可能性を示すデモンストレーションから真の科学的成果への昇華

## NICAMによるMJO予測スキル

(論文図に加筆)

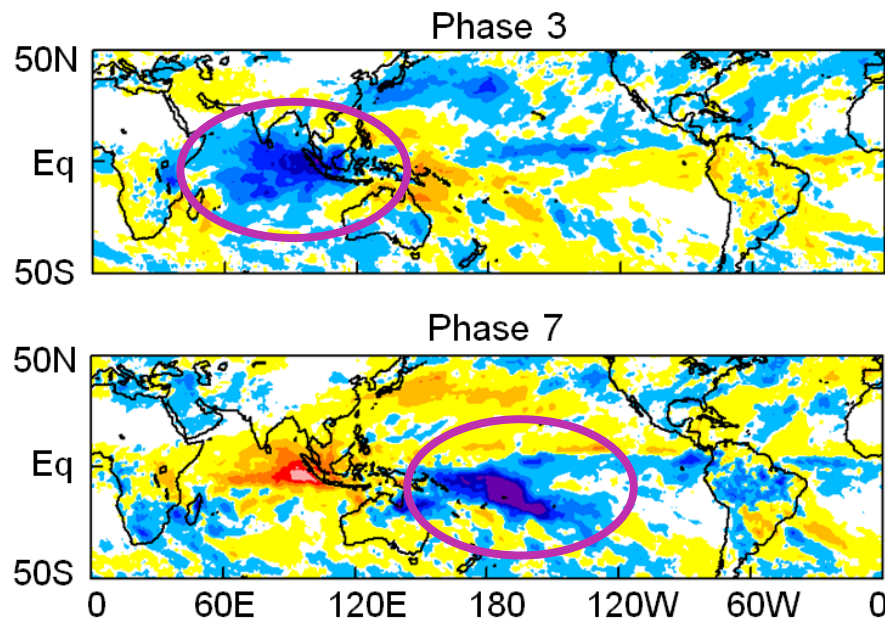


有効な予測スコア (0.6以上) を 26 - 28 日程度維持

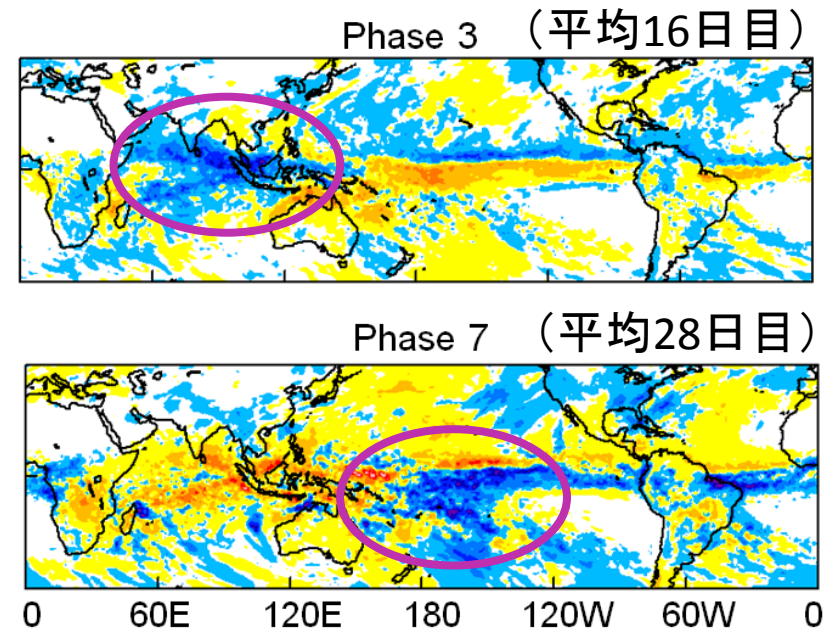
## 54本の実験におけるMJOの位置(phase)別の平均降水分布

(論文図に加筆)

a) 降水量(観測)



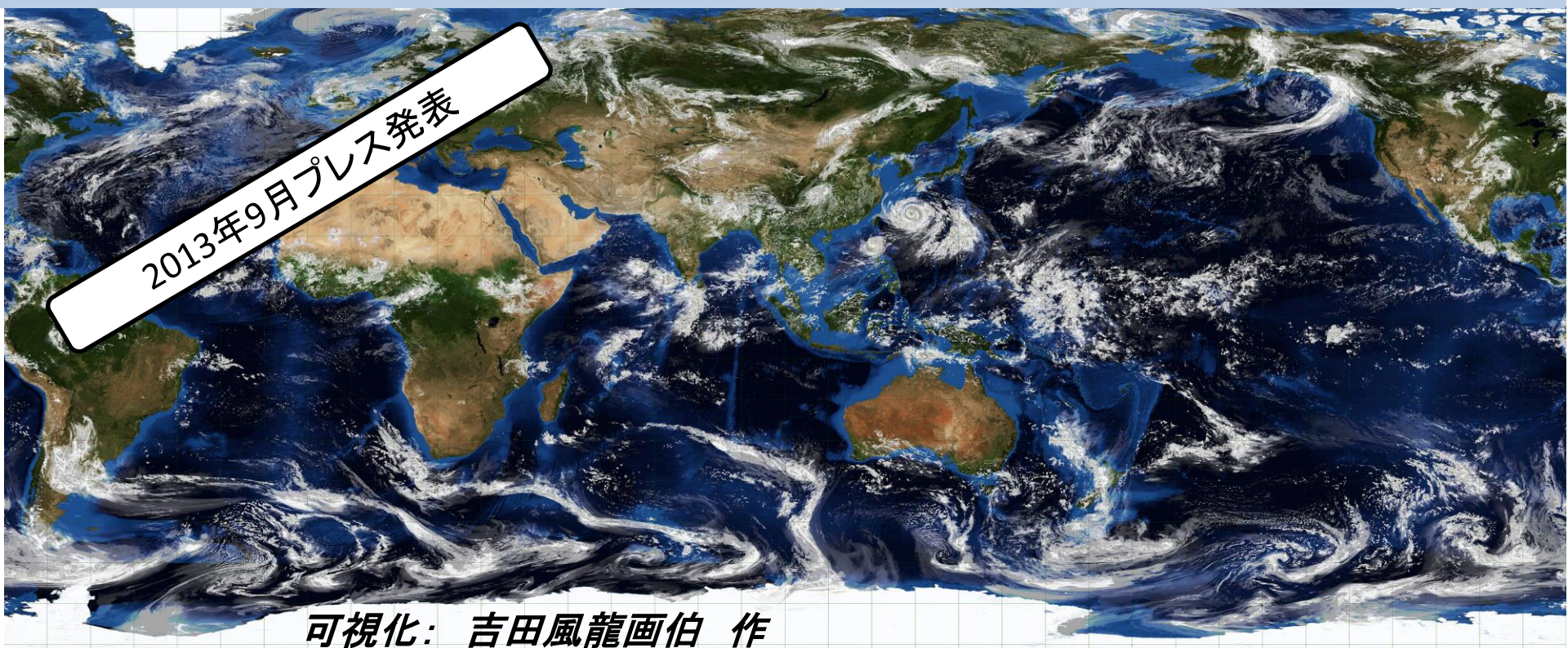
b) 降水量(シミュレーション)



前スライドの予測スコアにあまり反映されない  
降水の水平分布も観測とよく一致

# 「京」を利用した世界初の超高解像度全球大気シミュレーションで 積乱雲をリアルに表現

～台風や集中豪雨などの発生メカニズムの解明に寄与～



Geophysical Research Letter 2013年9月号 米国地球物理連合Research Spotlight

著者: 宮本佳明, 山浦剛、吉田龍二、八代尚、梶川義幸、富田浩文

# 水平1km格子以下のシミュレーション！

SNIPER project (sub km 水平格子間隔) (2012- ) :  
非公式プロジェクト  
理研AICS＋戦略分野3で共同実施

## Grand Challenge like simulation on K Computer!

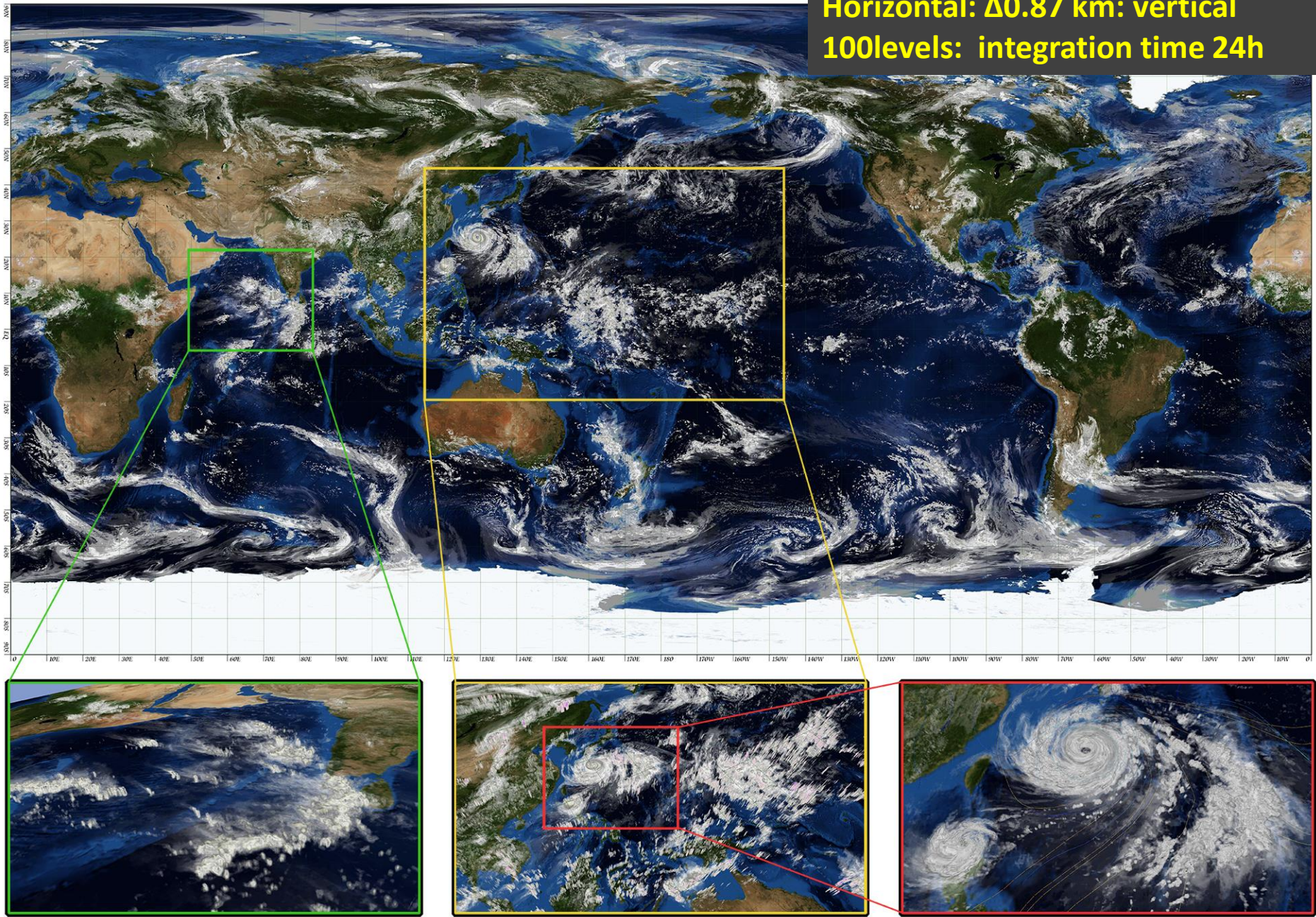
- 水平860m格子間隔,  
鉛直100層
- K-Computerの1/4~全系を使わしてもらう。
- 目的
  - 高解像度のリファレンスランを作る。
  - 計算科学的には、スケーラビリティチェックを兼ねる。
- 解析:
  - 全球での積雲対流の統計的描像
    - 収束性
    - 対流の個数
    - 隣の対流との距離
    - などなど
- 論文:  
Miyamoto et al. (2013), Geophysical Research Letter  
--- ***Americal Geophysical Union EOS Research Spotlight***

## Why challenging? What is a challenge?

High end computerでも、sub-km GCMはデモンストレーションの域(大道芸！)  
でも次の時代には、かならず、capacity computing化され、先端的成果に最も近いものになる。

# A snapshot of sub-km AGCM (NICAM)

**Horizontal:  $\Delta 0.87$  km: vertical  
100levels: integration time 24h**



# 風龍画伯によるNICAM870mアニメーション作品

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

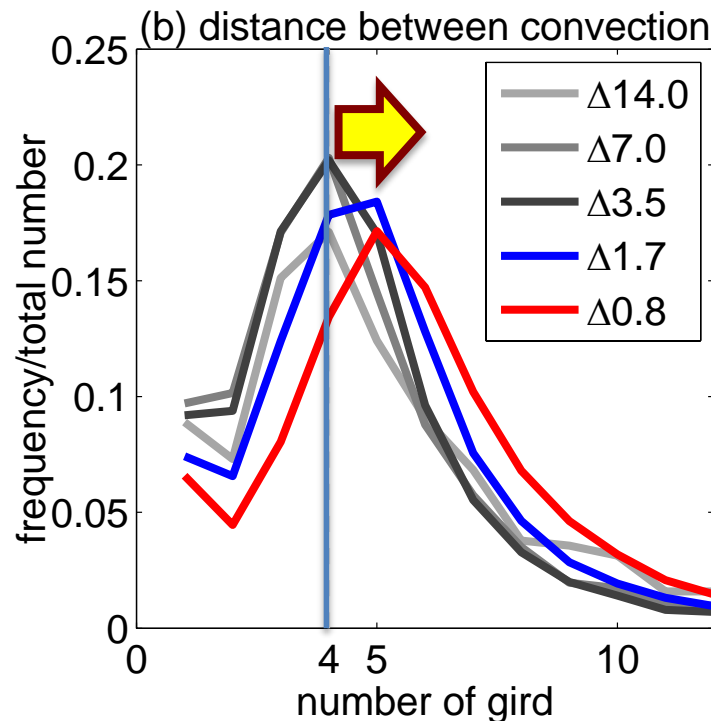
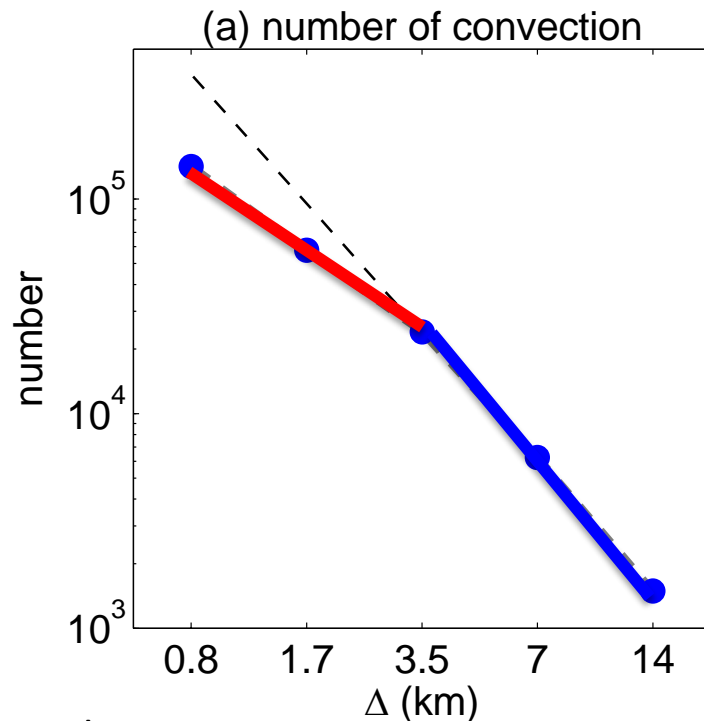


**風龍**: 本名吉田龍二、理研AICS複合系気候科学チーム所属、博士(理学)

2011年彗星のごとく現れ、京を用いた計算の可視化において、数々の名作を生み出してきた。2014年学位取得後、その技にますますの磨きがかかり、業界(?)でも引く手あまた。今後の活躍(研究も?)が期待される若手のホープである。



# 対流の個数と対流同士距離



$\Delta x \geq 3.5$  km:

- 個数: 解像度により4倍に増える
- 対流間距離: 4 格子  $\Rightarrow$  非物理?

$\Delta x \leq 1.7$  km:

- 個数: 増加の傾向弱まる
- 距離:  $>5$  格子以上にピーク  $\Rightarrow$  だんだん収束始める。

## 結論

対流の描像について、

$\Delta 3.5$  km  $\Leftrightarrow$   $\Delta 1.7$  km の間で変わる

- リアリスティックな対流解像には、2.0km以上が、全球雲解像モデルでは必要。

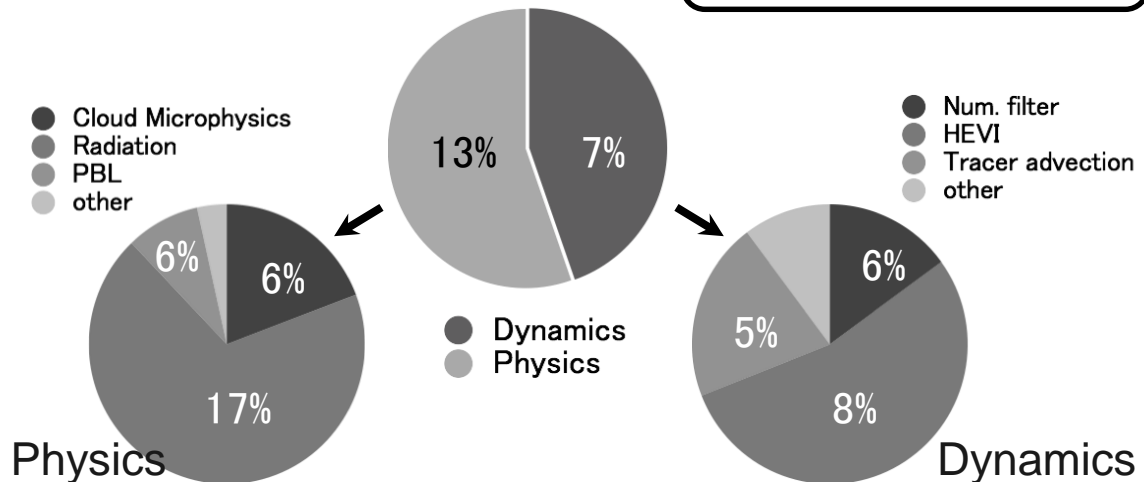


# Efficiency of NICAM on K Computer

## Performance efficiency

- ESからportingしただけ：~4%
- ステンシル計算のキャッシュ最適化：~5%
- コードをスリム化、クリーニング：~7%
- 条件分岐の改良：~10%

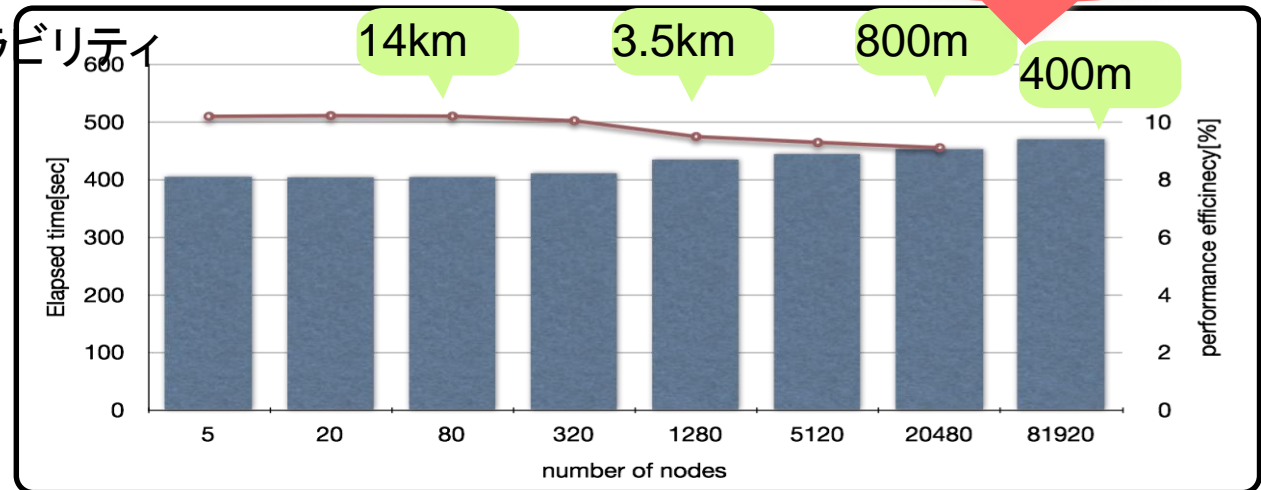
H. Yashiro  
(RIKEN/AICS)



## Weak scaling test

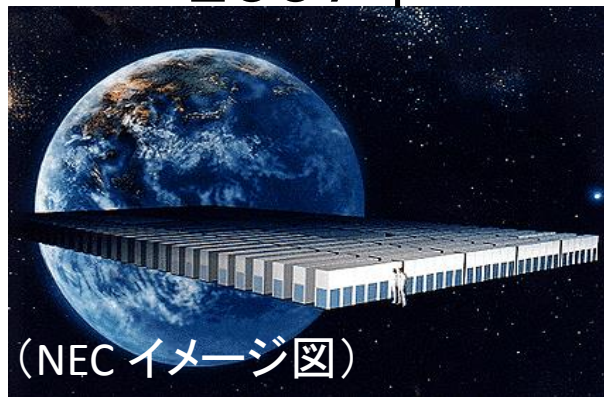
- 同じ問題で、同じステップ数
- まあまあ、よいスケーラビリティ

0.9PetaFLOPS



# 今回の計算の位置づけ

2007年



JAMSTEC

## 地球シミュレータ時代

NICAMでも3.5km解像度ランが限界  
メモリー量とも演算性能も不足！

各研究機関からの指摘：

- 3.5km解像度で雲解像と言えるのか？
- 気候値が合わないのでは？
- 解像度はまだ足りない？

今回



京コンピュータ RIKEN/AICS

NICAMで1発大規模計算を行い、  
批判に答える！

2011年度の8月の事例(MJO, 台風ありの)で、1km以下の解像度で鉛直層も100まで上げて、実験

京時代のCapability computingの典型

ここからが真の勝負！数値的な収束の兆しは見た！全球対流特性は把握できており、来るべきエクサスケールで、スケール相互作用の解析、衛星データ大量同化実験でいかに？

# 今後、、、

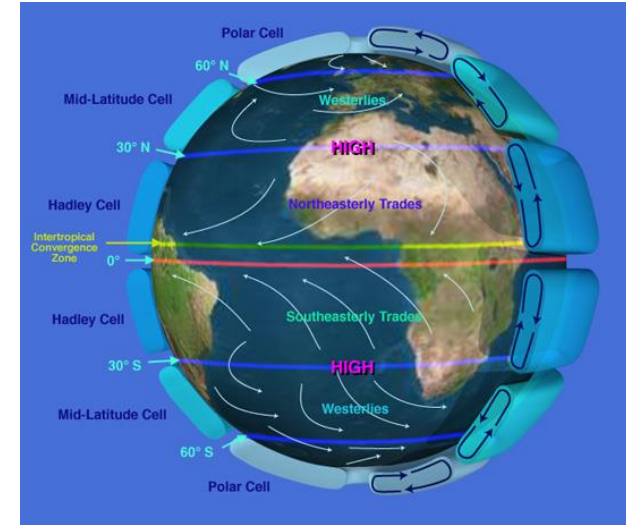
1. 更なる高解像度化
2. より多くのアンサンブルとデータ同化
3. より高度化された物理過程

富田の興味は上記の中でも、、、1番。

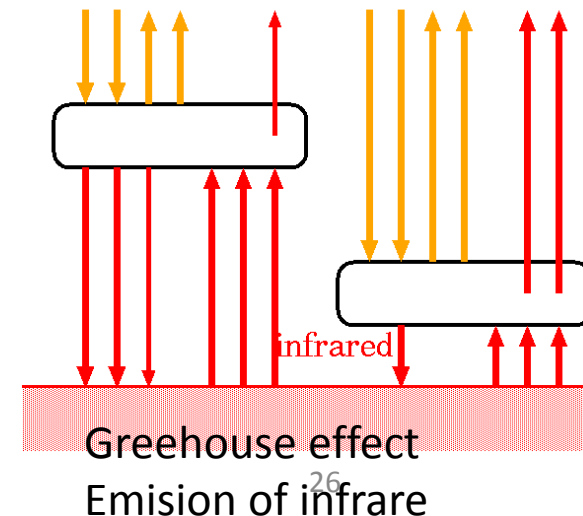
GCRM => GLES?!

# なんでLESなのか？

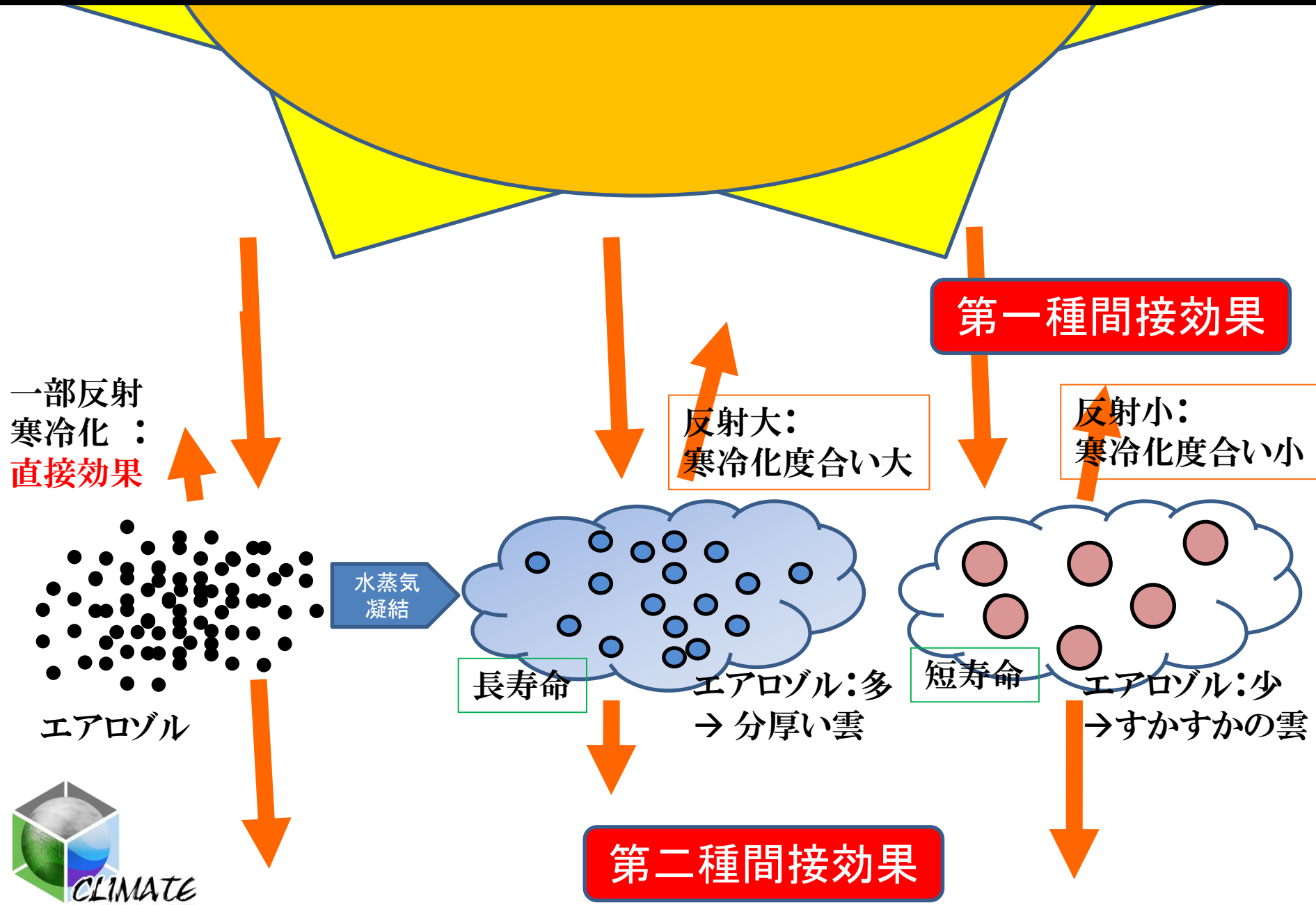
- 大気大循環のエンジンとして：
  - 熱帯の雲は、熱を中緯度方面へ運ぶ重要な役割をになう。
    - 熱帯の雲：階層構造
      - クラウドクラスター、スーパークラウドクラスター、熱帯低気圧、MJO
- 気候学的にはエネルギー収支に大きく影響：
  - 二つの効果！
    - パラソル効果：日射を跳ね返す。
    - 温室効果：地面からの赤外放射をいったん吸収。地面へ再放出する。
  - エアロゾルとの関係。
    - エアロゾル間接効果：光学的厚さを変える。



Parasol effect  
Reflection of  
visible solar incident  
ultra violet



# エアロゾルの雲に対する効果

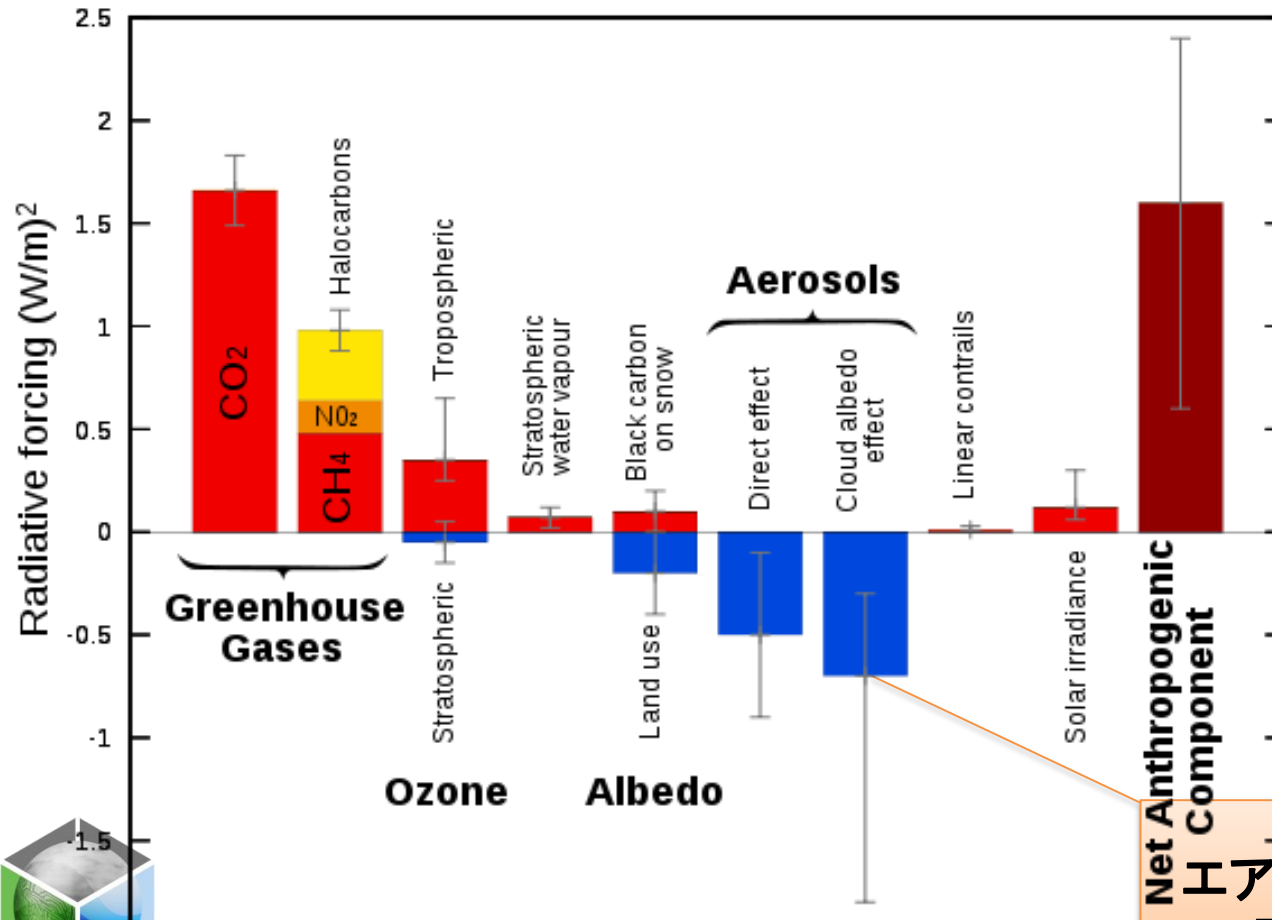


# なんで、LESなのか？

1750年から2005年の間における、各要素の放射強制力(2007年、[IPCC第4次評価報告書](#)による)

出展： wikipedia

## Radiative Forcing Components



上層の巻雲も絡むが、境界層での細かい雲も大いに絡む

エアロゾルの雲に対する効果  
--- 雲の反射率の不確定性 ---

# AGCM milestone from GCRM to GLES?!(roughly estimate)

希望的に、効率10%にしている。

解像度	一日積分計算量 (FLOP数)	想定マシン	効率(%)	一日積分経過時間	一か月積分経過時間	何を解像? 何がうれしい?
3.5km/L40	1250P	131TFLOPS (ES2)	15%	3.2時間	4日	いくつかの積雲が集まった対流系
1.7km/L100	1840P	10PFLOPS (K computer)	10%			同上。日変化などが良くなることが期待される。
800m/L100	36800P	10PFLOPS (K computer)	10%	10時間	12.5日	ひとつひとつの対流のほとんどを解像
400m/L100	295000P	1EFLOPS	10%	50分	24時間	文句なしに対流解像モデル(真の雲解像)
200m/L100	236000P					対流を精緻に解像
100m/L100	188800P					全球LESには苦しい。
50m/L200	302200P	100EFLOPS	10%	50分	24時間	全球LES/境界層雲などを直接解像

We are here

Exa scale era

Tentative goal?

# GLESへ向かおう！

- と、言ったものの、計算量的にかなり大変！！  
当分は、、、

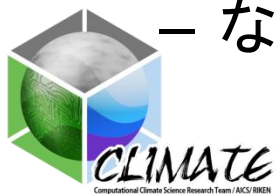
## トップダウン型アプローチ:

全球モデリングの高解像度化と物理過程精緻化、、、準一様格子であれば、この先も続くでしょう。。。。

## ボトムアップ型アプローチ

LESはほんとに機能するの？  
多くの文献で言っていることは本当？  
再試、追試が必要。これまでわかっていることの更なる深い理解。

- LESを使って、とりあえず今ある問題に取り組もう！
  - 格子アスペクト比に対する乱流(エネルギースペクトル)へのインパクト
  - 高解像度でどの程度、浅い雲が表現できるか？遷移過程はどうか？
  - 湿潤LESの理論は？  
ー などなど



# SCALE project

- We have started the preparation towards the Global Large Eddy Simulation
- Co-design with computer science people in RIKE/AICS

<http://scale.aics.riken.jp/>



## Team SCALE



**Computational Climate Science Research Team**

TL : H. Tomita



**System Software Research Team**

TL : Y. Ishikawa



**Programming Environment Research Team**

TL : M. Sato



**Programming Framework Research Team**

TL : N. Maruyama



**HPC Usability Research Team**

TL : T. Maeda



Library, and Research for weather/climate research  
With computer science people (SCALE library)



# 格子アスペクト比に対する境界層乱流への影響

S.Nishizawa(RIKEN/AICS): Preparation for submission

## Scotti et al. (1993) formulation

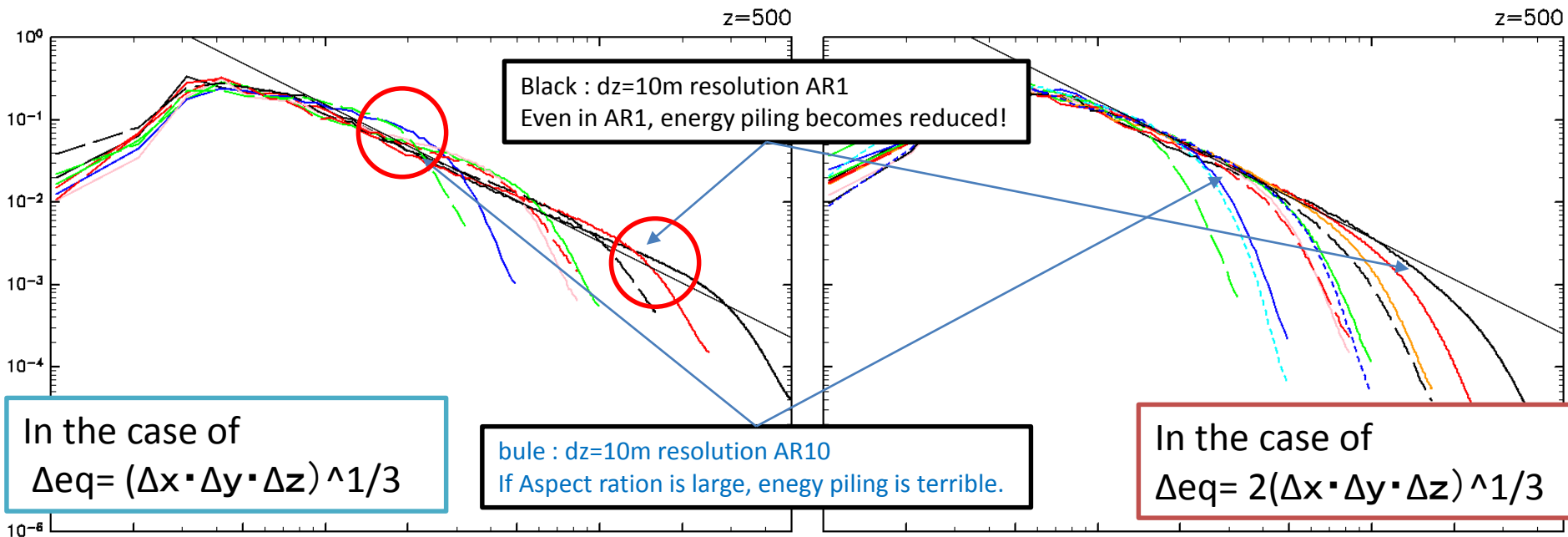
Filter length  
effect

$$\tau_{ij} = -2[c_{\Delta_{eq}} f(a_1, a_2)]^2 [2\tilde{S}_{mn}\tilde{S}_{mn}]^{1/2} \tilde{S}_{ij}.$$

### Filter length problem:

- $(\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z)^{1/3}$ : Usually used.
- This depends on the numerical scheme
- In Scale-LES, 4<sup>th</sup> order advection scheme with 4<sup>th</sup> order hyper diffusion to remove 2grid-component.  
=>  $2X(\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z)^{1/3}$

dx \ dz	5m	10m	30m
10m		10mAR1	
20m		10mAR2	
30m		10mAR3	30mAR1
50m	5mAR10	10mAR5	
60m		10mAR6	30mAR2
100m	5mAR20	10mAR10	
150m			30mAR5



# 格子アスペクト比に対する境界層乱流への影響

S.Nishizawa(RIKEN/AICS): Preparation for submission

Scotti et al. (1993) formulation

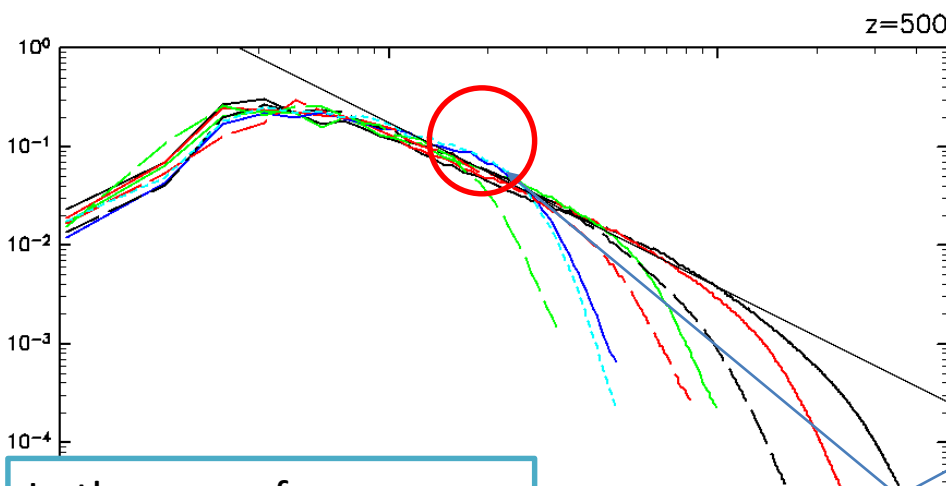
$$\tau_{ij} = -2[c_s \Delta_{eq} f(a_1, a_2)]^2 [2\tilde{S}_{mn}\tilde{S}_{mn}]^{1/2} \tilde{S}_{ij}.$$

Aspect ratio  
effect

## Aspect ratio problem:

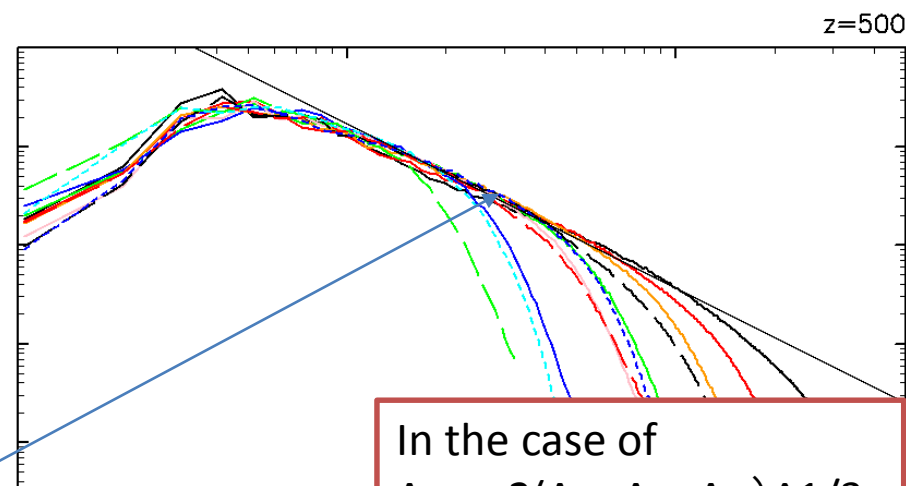
- Usually, no consideration :  $f=1$  (left figure)
- If  $f$  is appropriately set according to grid aspect ratio, spectrum is drastically improved. ( right figure )

dx \ dz	5m	10m	30m
10m		10mAR1	
20m		10mAR2	
30m		10mAR3	30mAR1
50m	5mAR10	10mAR5	
60m		10mAR6	30mAR2
100m	5mAR20	10mAR10	
150m			30mAR5



In the case of  
 $\Delta_{eq} = (\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z)^{1/3}$   
and  $f(a_1, a_2) = 1$

bule : dz=10m resolution AR10  
If Aspect ration is large, enegy piling is terrible.



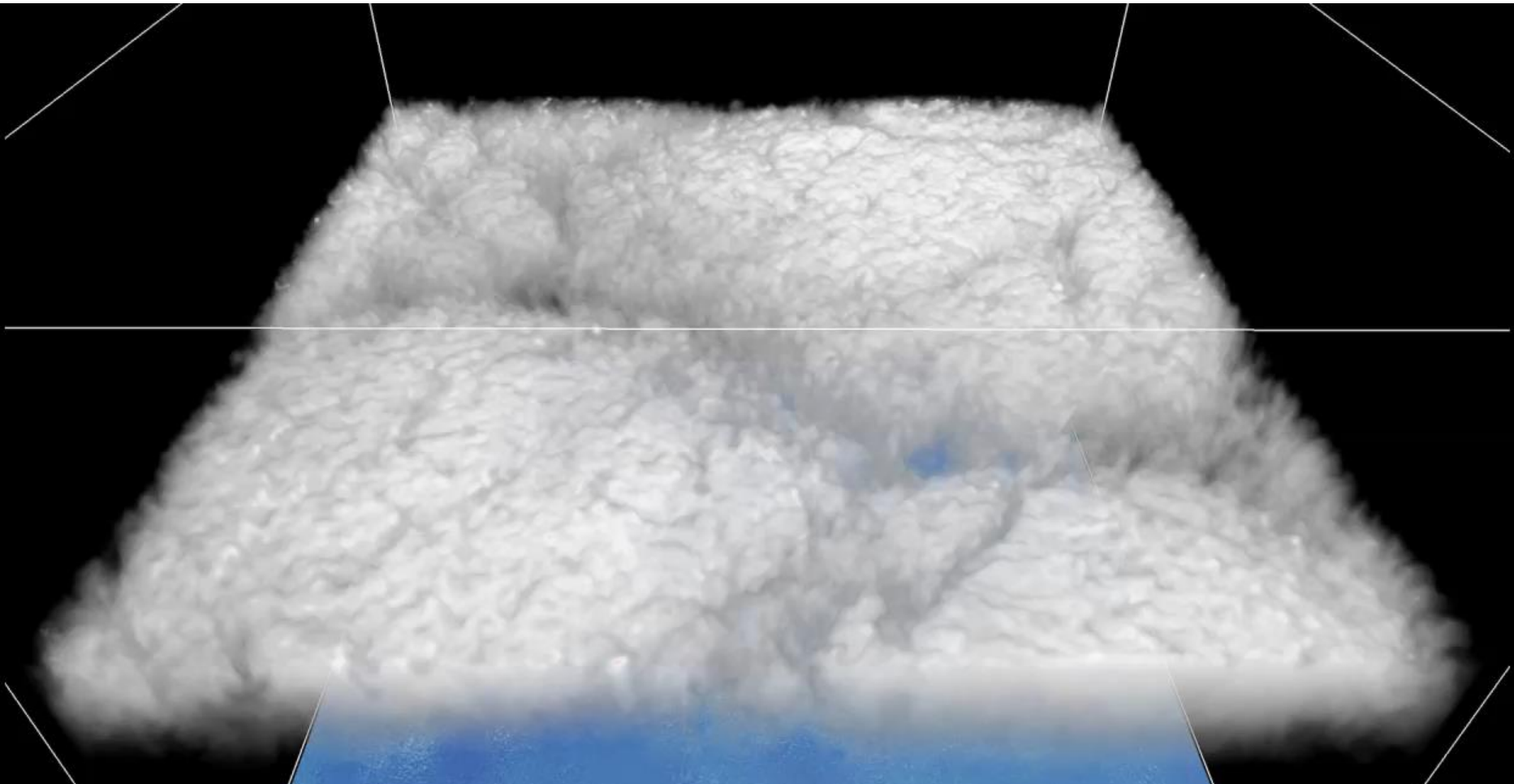
In the case of  
 $\Delta_{eq} = 2(\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z)^{1/3}$   
and  $f(a_1, a_2)$  setting  
appropriately

超高解像度で、めちゃ狭い領域ながら・・・浅い雲の再現？

- **Very high resolution run for DYCOMS II RF01**

- LES with 5m cubic grid and 2<sup>nd</sup> moment microphysical scheme.

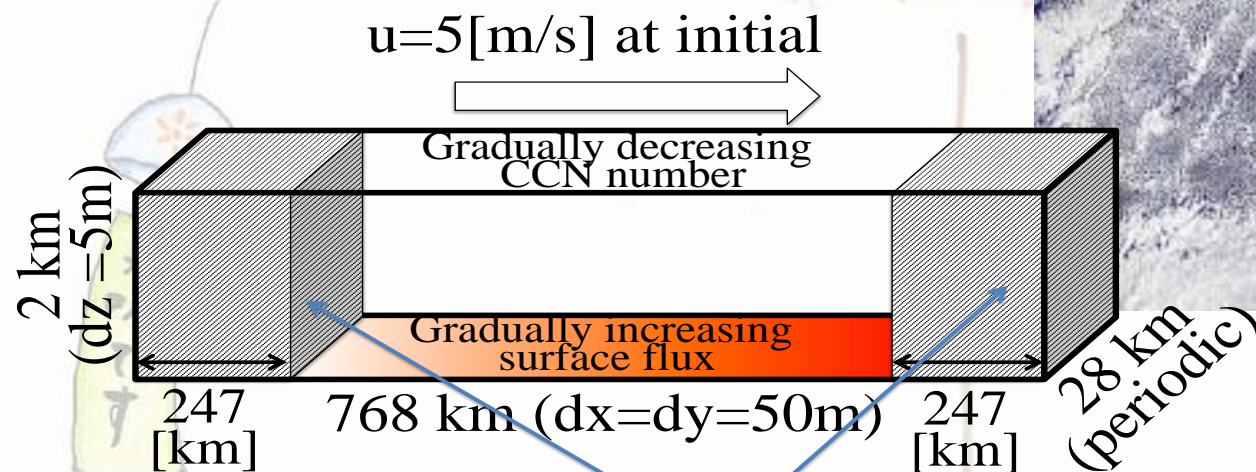
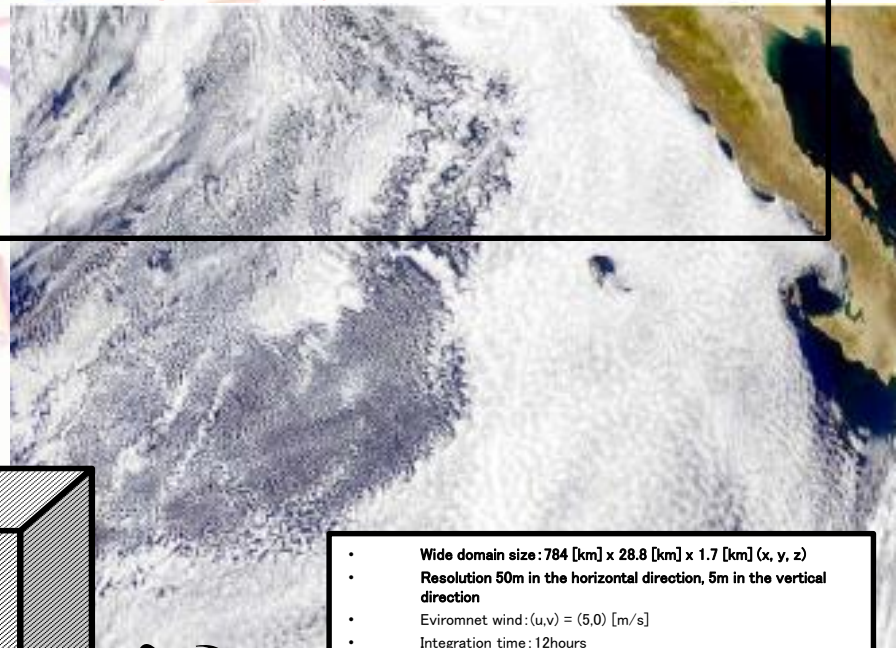
Y.Sato (RIKEN/AICS)



# 浅い雲の形態の遷移過程を見るための実験

## • Very wide domain, meso-scale LES run

- The transition between open & close cells, and POCS.
  - aerosol interaction & surface flux strength : key issue?
- 5m v-grid & 50m h-grid with 30km X 700km?



Y.Sato (RIKEN/AICS)  
Preparation for sumition

Rayleigh dumping  
to initial value

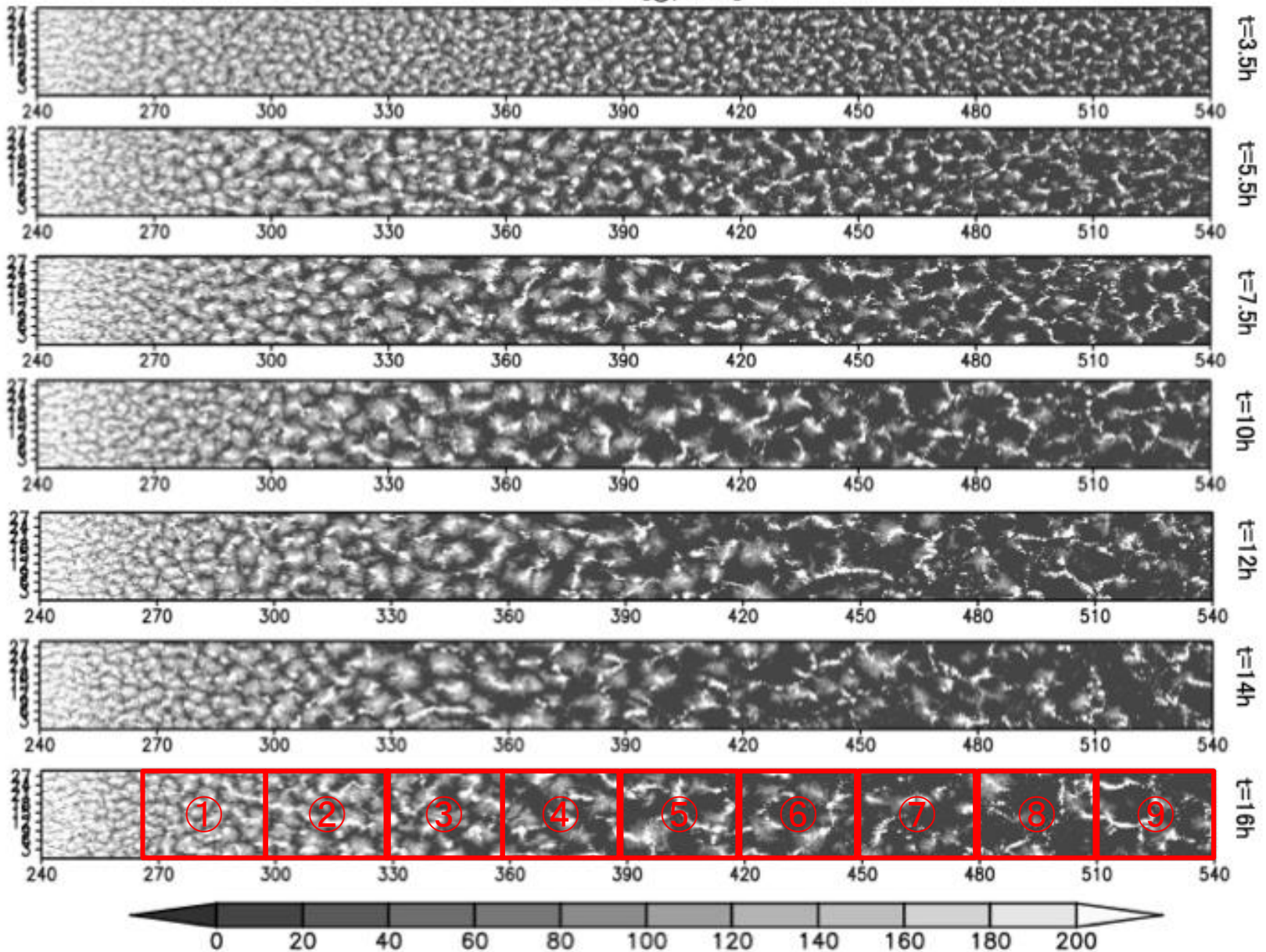
- Wide domain size: 784 [km] x 28.8 [km] x 1.7 [km] (x, y, z)
- Resolution 50m in the horizontal direction, 5m in the vertical direction
- Enviromnet wind: (u,v) = (5,0) [m/s]
- Integration time: 12hours
- Surface flux:
  - momentum frictional velocity=0.25 m/s
  - Latent heat (93 W/m<sup>2</sup> → 200 W/m<sup>2</sup> linearly varied from left to right)
  - Sensible heat (16 W/m<sup>2</sup> → 40 W/m<sup>2</sup> linearly varied from left to right)
- External forcing:
  - largescale subsidence (1.33e-6): Corresponding to Peru offshore
  - Radiation: same as the DYCOMS-II
- Aerosol : varied from 250 [/cc] to 1 [/cc] with logarithmic

# First quick view!

エアロゾルがたくさん  
Surface flux 弱い

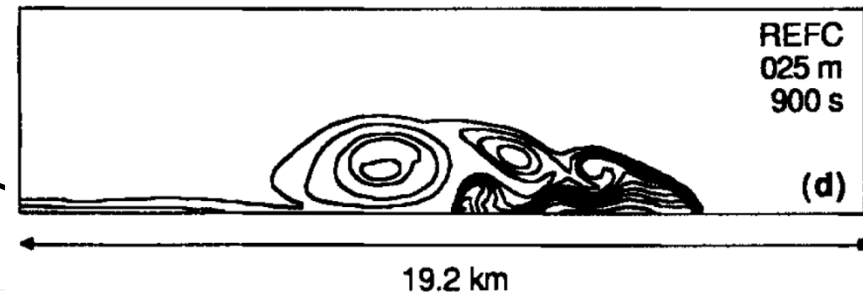
エアロゾルが少ない  
Surface flux: 強い

LWP [ $\text{g}/\text{m}^2$ ]

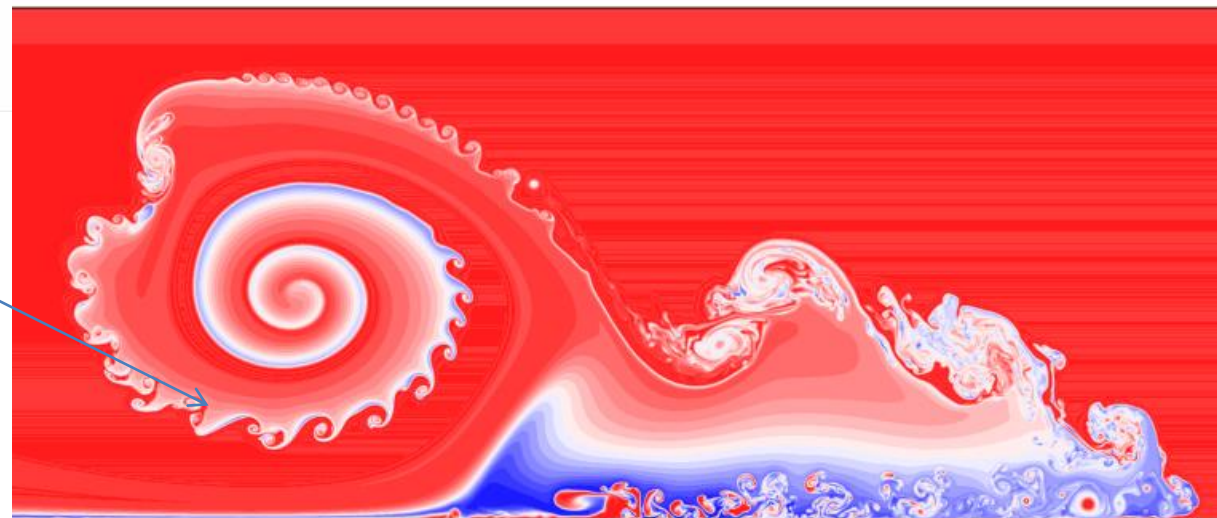


# おまけ: ちょっと面白いテスト: based on Straska et al.

- 数値粘性を不安定を起こさないまで、うんと小さくしてみる
  - $Dx=dx=1.5m$ まで
- 通常は、200m格子とかそれぐらいのテスト



解像度高めると、渦拡散が陽に見え始める  
(拡散方程式の形でなく)  
→ 渦粘性パラメタリゼーションへ指針



# まとめ



- 京で行った二つのランドマーク的な研究成果を紹介
  - MJOの長期予報の可能性が広がる (Miyakawa et al. 2014)
    - 一つ一つの規模は小さいcapacity computing典型例
  - 全球1kmを切る大気大循環モデルによる対流の全球特性を把握 (Miyamoto et al. 2013)
    - 大規模実験で、capability computingの典型例
- いつの時代も、capability computingは、次の時代のcapacity computingとなることが多い。
- 次の(富田の)ターゲット、全球LESまでは、遠い。
  - 今から地道に、トップダウン、ボトムアップ研究で基本的なところから入る。
  - 特にボトムアップが重要と認識。
  - 基礎的、基盤的研究は、なかなか日の目を見ないが、これなくして、明日はない。(あたりまえか、、^^)
  - 全球LESはいつになるんだろうか？10年後？？？