エクサスケール時代の気候モデル

理化学研究所・計算科学研究機構
富田浩文

内容

- 気候モデルにおけるHPCの必要性
  - 高解像度化する意味はあるか？
  - 物理モデルの精緻化
- ポストペタ、エクサスケールマシンでの気候モデルの方向性
  - アーキテクチャ方向いかんで決まる（かもしれない）。
- まとめ

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

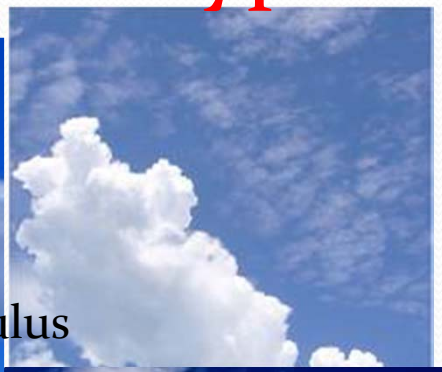
バランスが重要

高解像度化が必要なわけ

- 大気モデルを例に・・・・
  - 雲が、力学的にもエネルギー収支的にも支配する世界

Cloud! Cloud! Cloud!

Various cloud types exist in our earth!



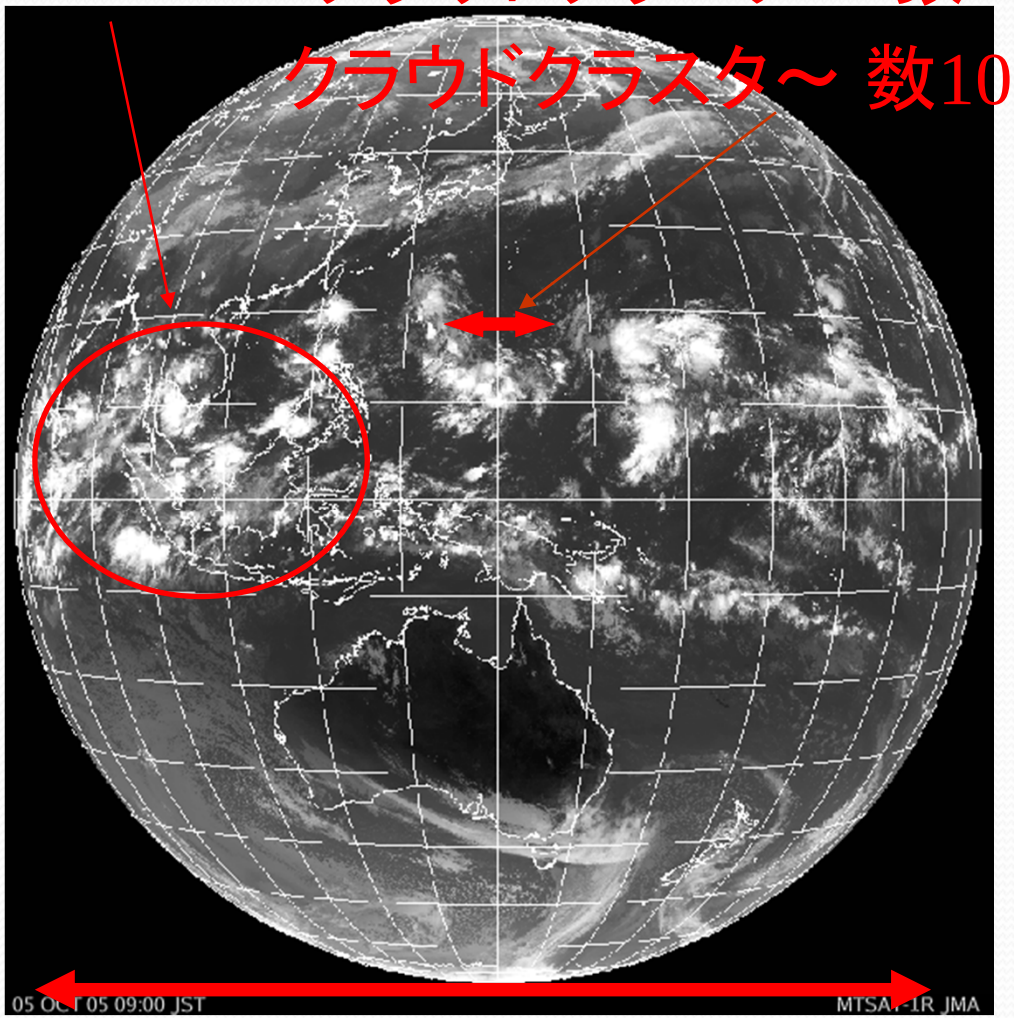
Very difficult to model the cloud!

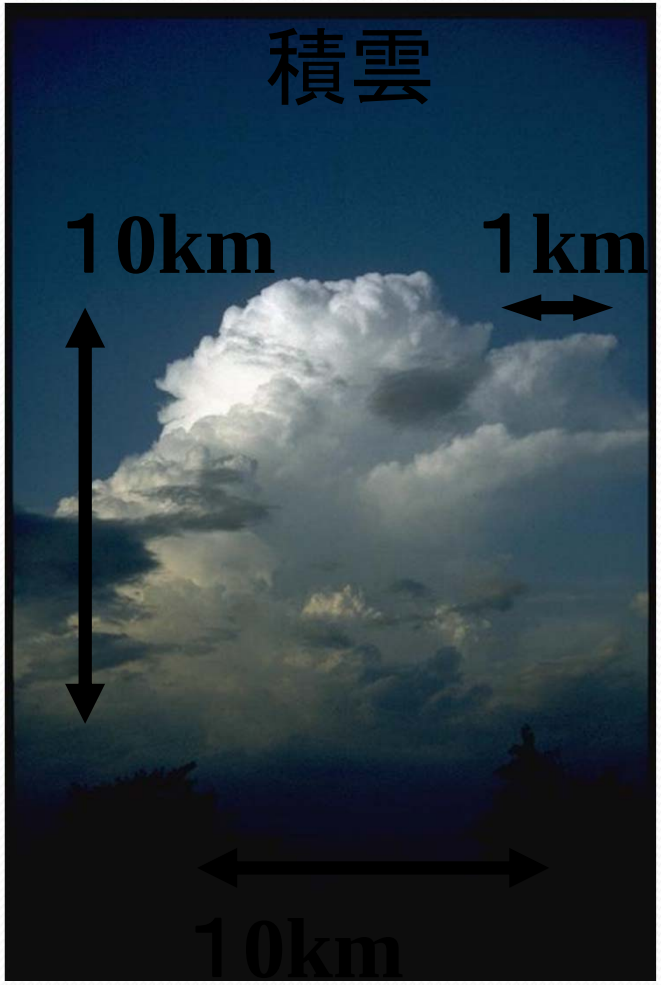
気候モデルを高解像度化する意味（大気モデルを例に）

- 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～ 数1000km → MJO

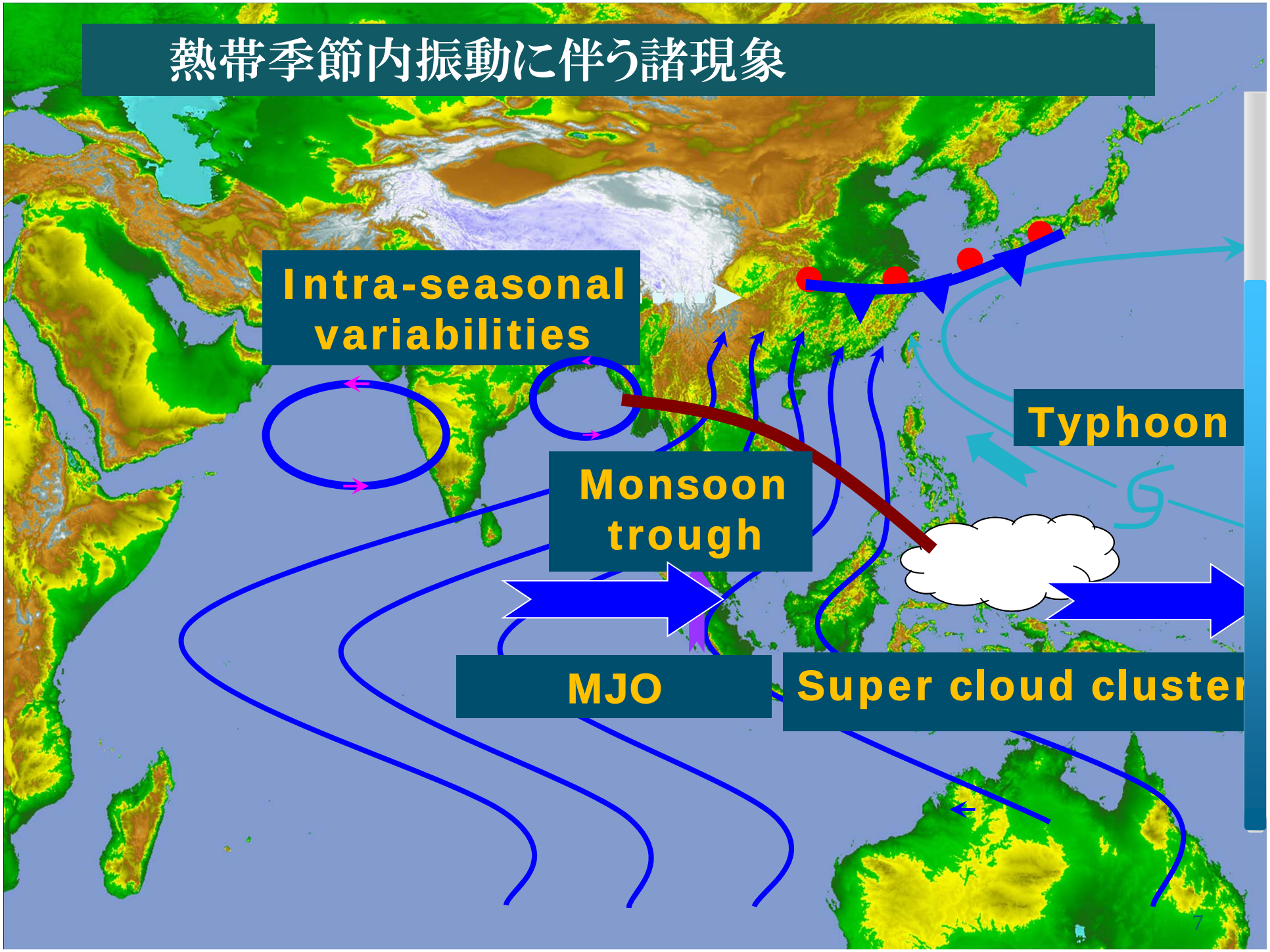
クラウドクラスタ～ 数100km





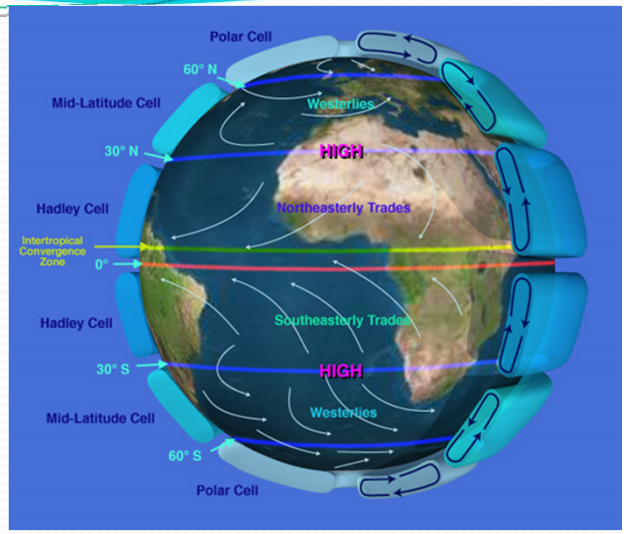
地球の直径12740km

熱帯季節内振動に伴う諸現象

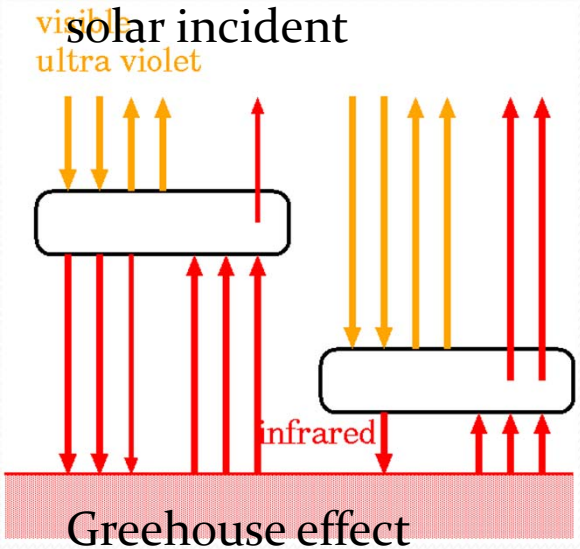


雲はなぜ重要？

- 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
- 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。

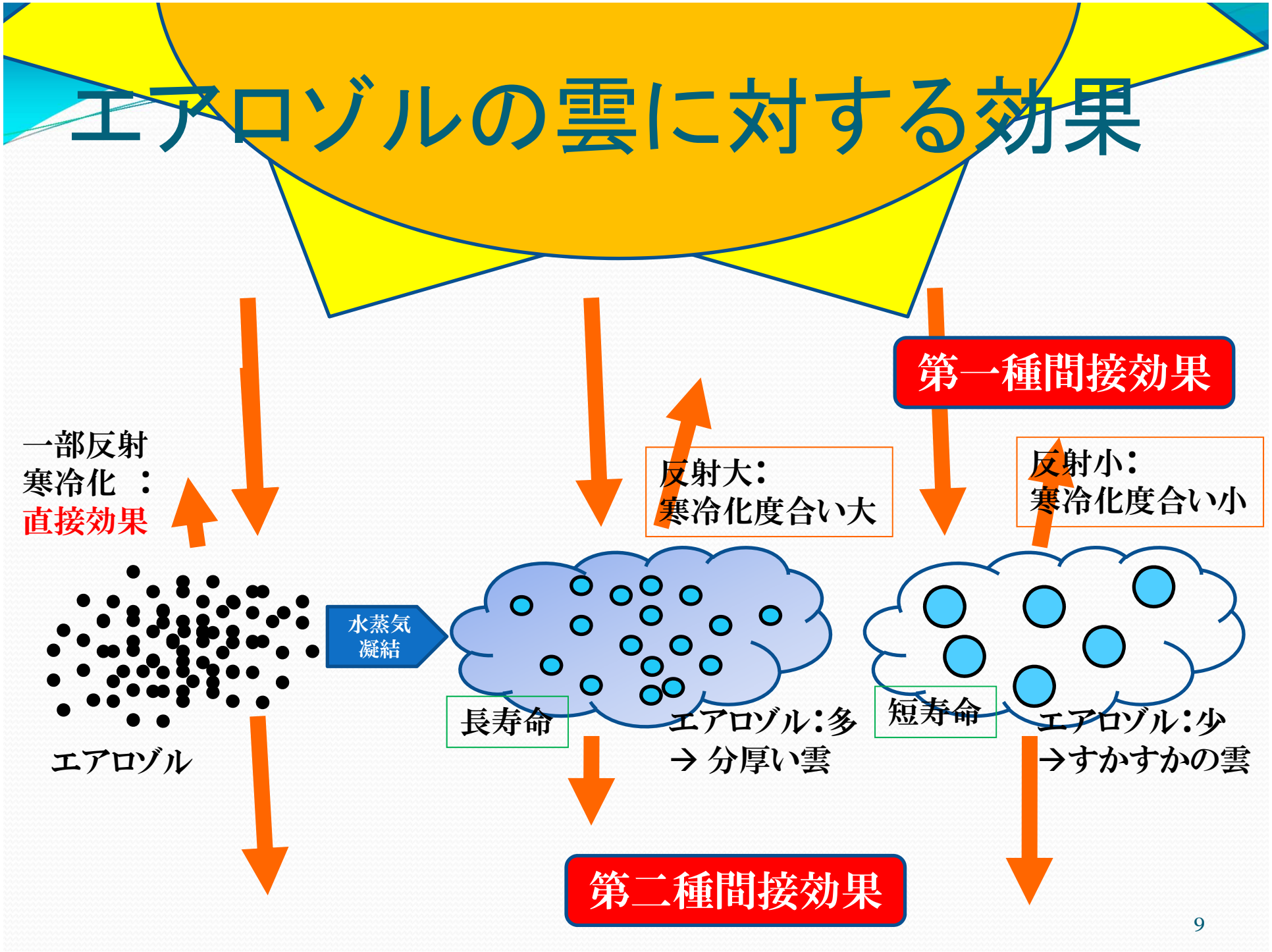


Parasol effect
Reflection of solar incident

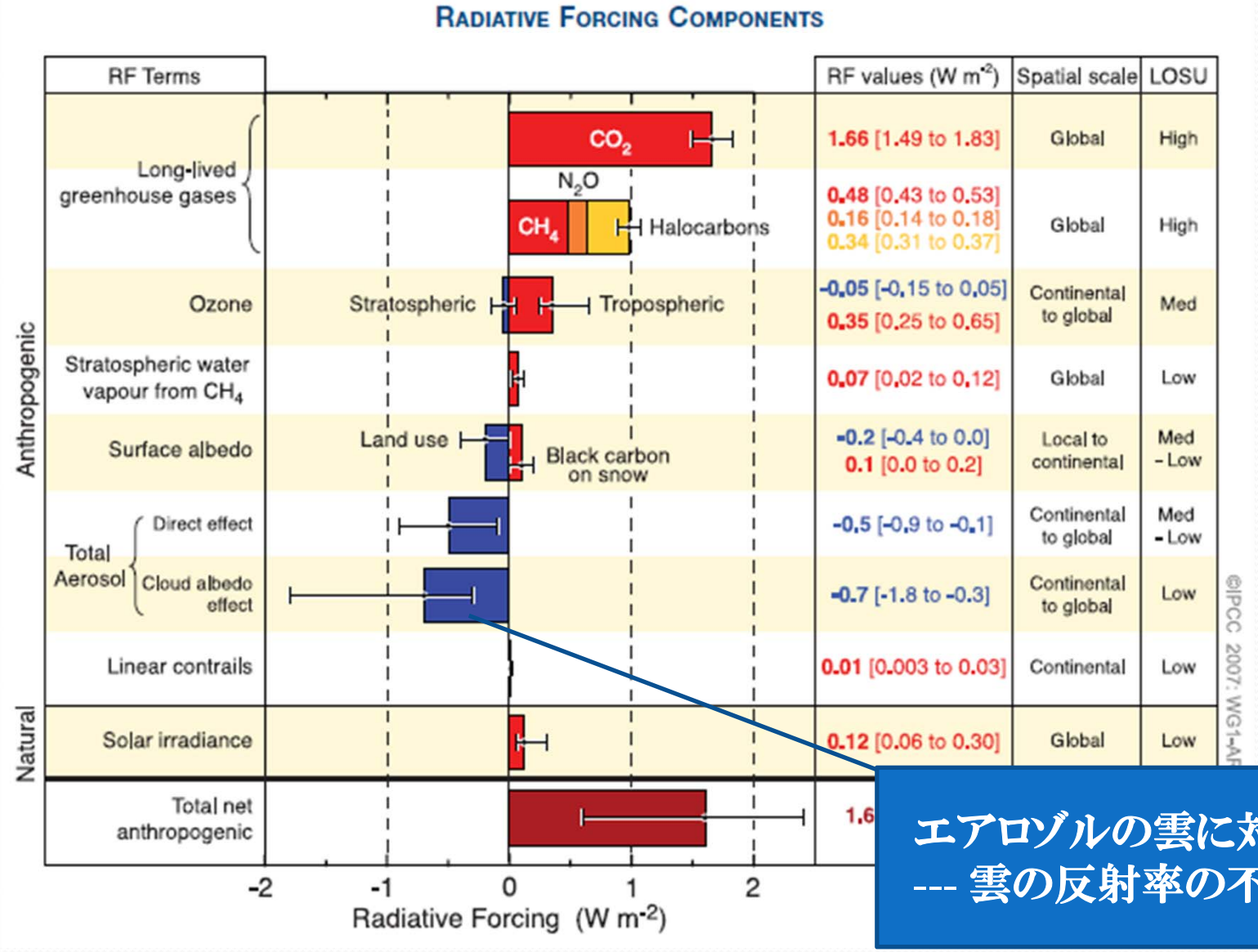


Greehouse effect
Emision of infrare

エアロゾルの雲に対する効果



1750-2005年における気候外部要素の放射強制力（IPCC AR4より）



エアロゾルの雲に対する効果
--- 雲の反射率の不確定性---

大気モデルの方向性

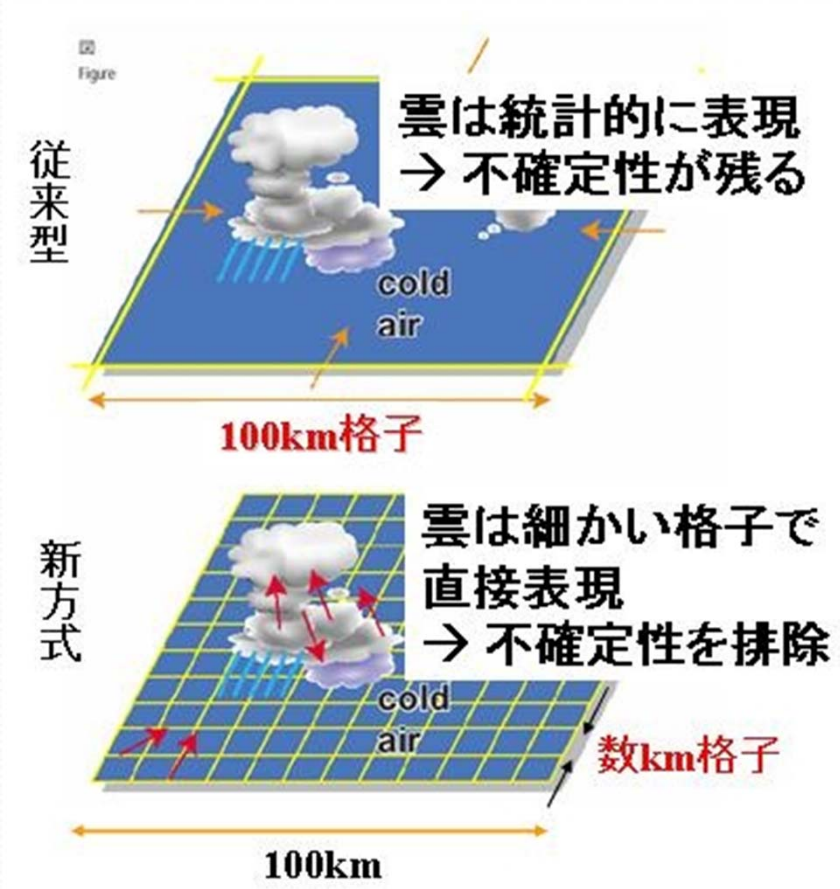
- まず、一つ一つの雲を解像する。
  - 高解像度化
- 雲の微物理を精緻化する。
  - 種類を分ける。氷の形状を考慮する。
  - プロセスの高度化
- エアロゾルとのカップリング
  - プロセス要素の追加
- 放射とのカップリング
  - プロセス高度化

全球大気モデルの進展

- 雲のモデル化が、大気モデルではキー
- 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？

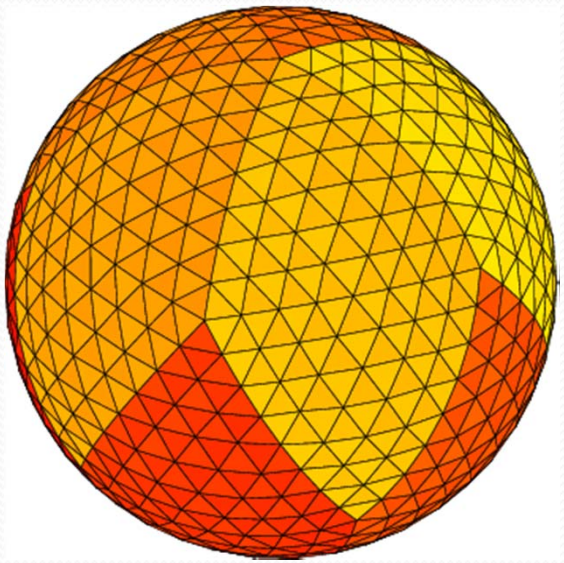
ES出現前

- 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



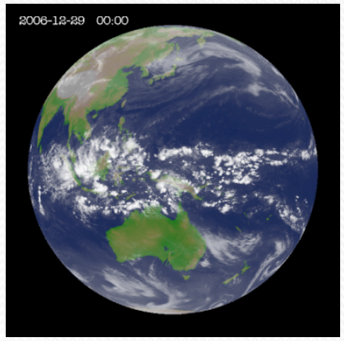
ES出現による従来モデルからの改良

- 力学：
  - 静力学平衡モデルから、非静力学モデルへ
  - 離散化手法：
    - スペクトルモデルから格子点法へ
- 物理：
  - 積雲：
    - パラメータ化から直接解像へ
- NICAM
  - 20面体格子（球面準一様）



ES出現からこれまでの流れ

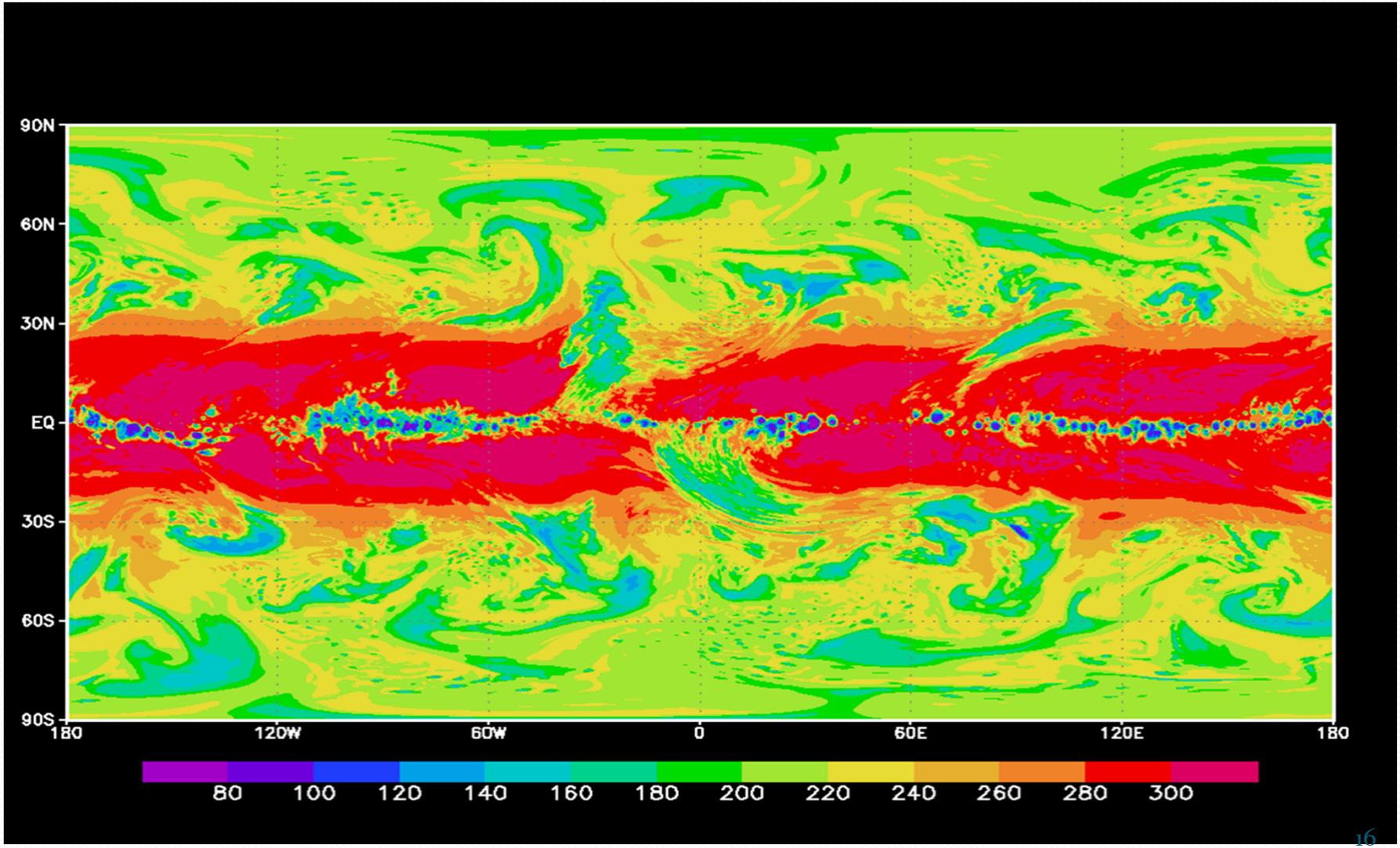
- IPCC的プロダクトラン
  - 全球20km気象庁気象研統一全球大気モデル
    - 温暖化時の台風へ知見
    - ただし、積雲は直接解像せず、パラメータ化/力学過程は静力学平衡
- 雲解像モデルの有効性を示す実験的ラン
  - 全球3.5kmNICAM
    - 積雲のパラメータ化を排除し、雲をexplicitに扱う。
    - 世界初の全球非静力学実験の実施。
      - 雲の階層構造が表現でき、プロセスの理解へ



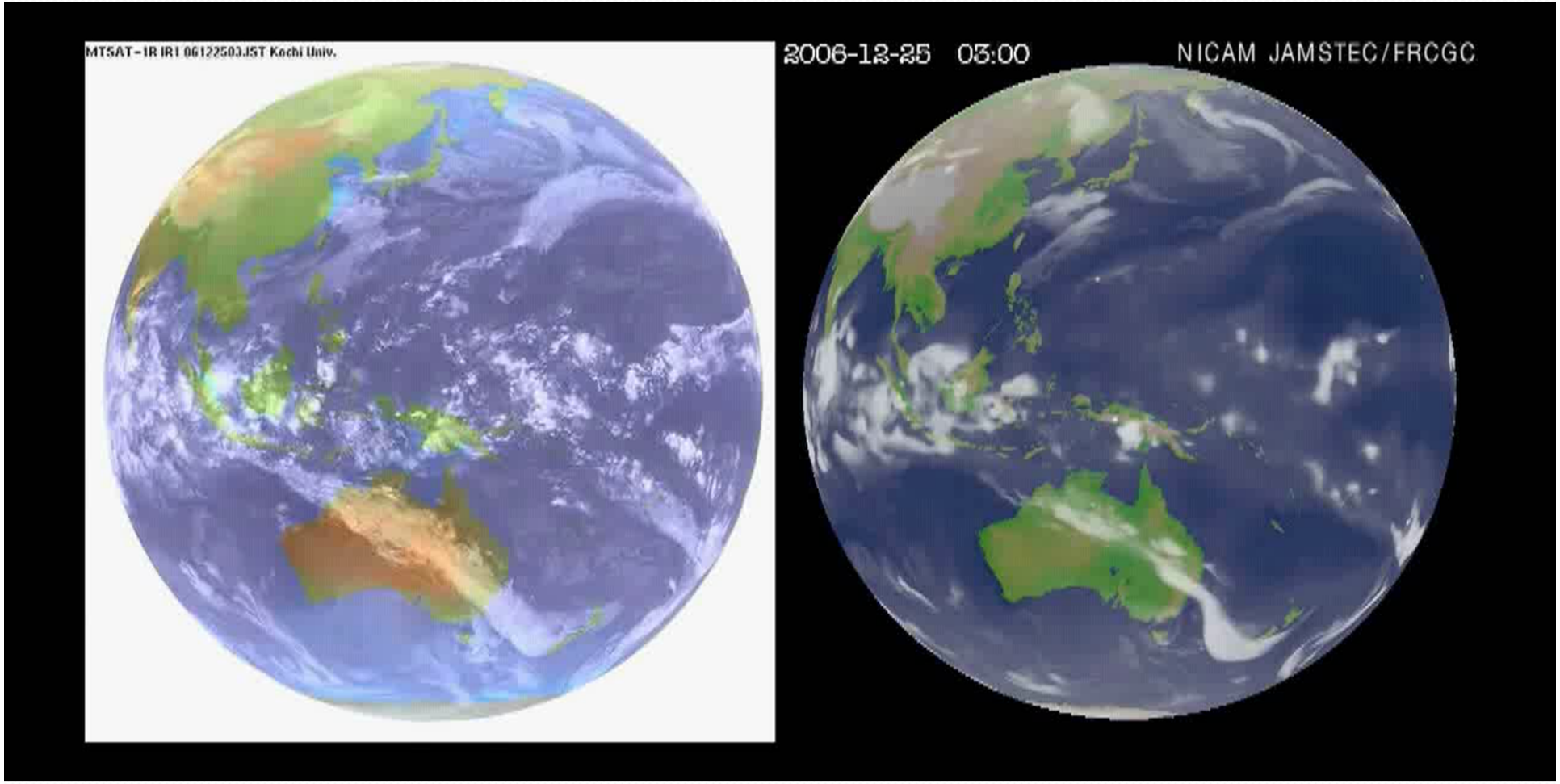
- 「京」: 全球雲システム解像モデルNICAMを使った本格実験
  - 温暖化想定時の台風
    - より原理的なモデルで、気象研・気象庁大気モデルの結果と整合するかどうか？
  - 熱帯気象の延長予測可能性

世界初の全球雲解像実験(Tomita et al.2005)

- 水惑星実験

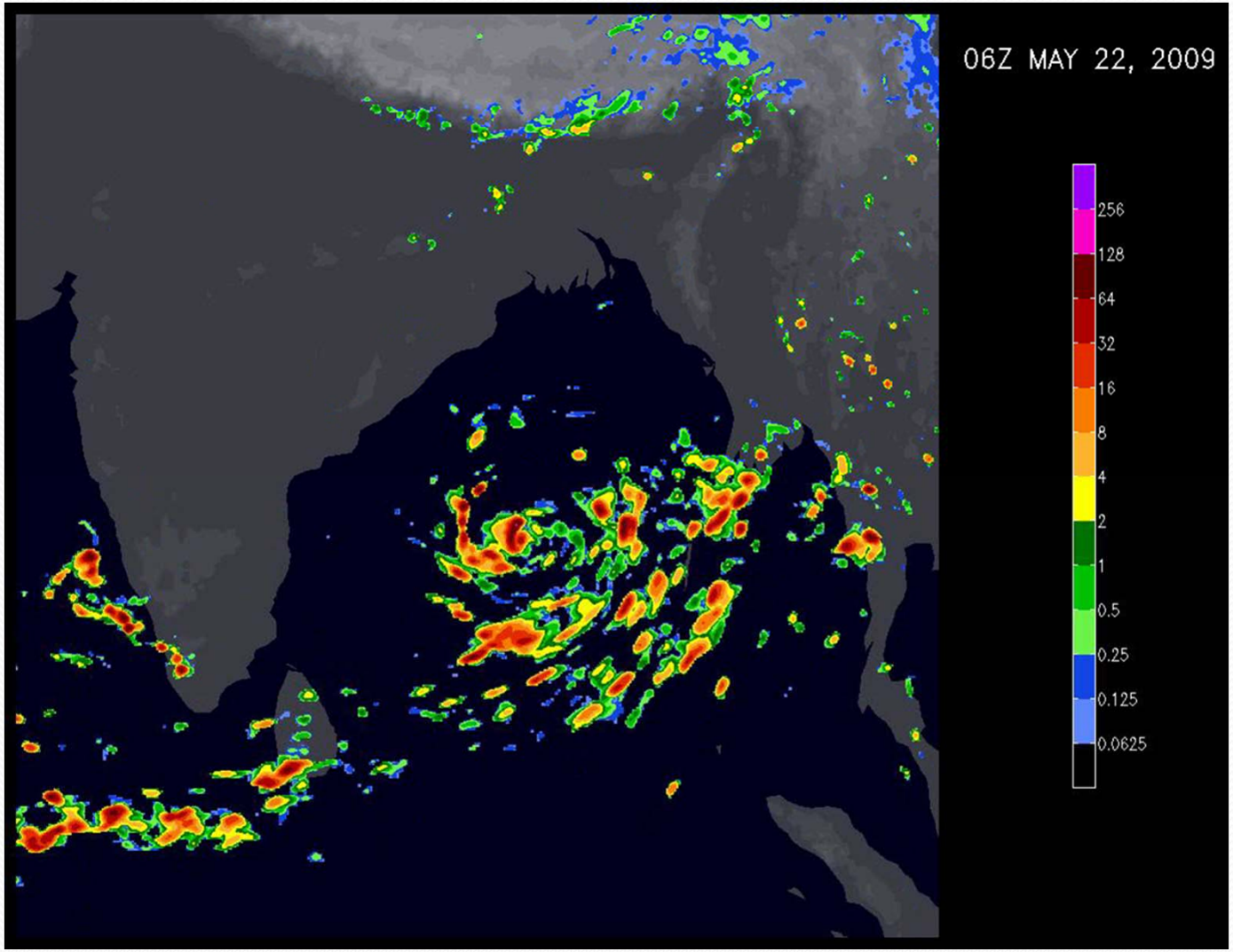


熱帯雲大擾乱MJOの再現（Miura et al.2007）



Athena project

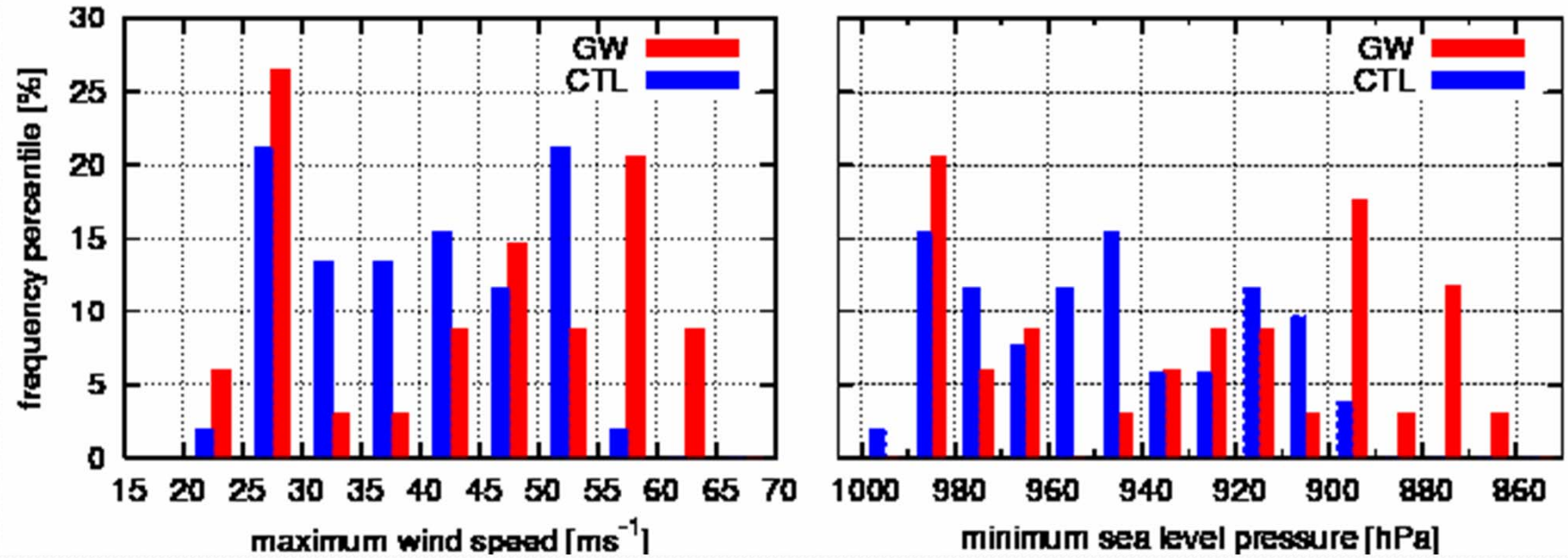
- JAMSTEC/ECMWF/COLA 協同プロジェクト
- 高解像度大気モデルの可能性
- ORNL スパコンAthenaを数か月借り切る。（NICAM7kmモデル 夏の実験8ケース/ IFS 10kmモデルの比較）
  - 2560CPU（Opteron）



温暖化台風事始め(Yamada et al. 2010)

- 戦略3で本格的に行う前にFS的なstudy
  - 積雲パラメタリゼーションを使わずに、行ったことが画期的。
  - 解像度、積分時間は、まだ満足のいくものではない。

Change of tropical cyclone intensity



In CTL-exp. the most intense TC : 905hPa

In GW exp. more intense TC generated
intense TC genesis ratio increased

まだ、高解像度化が必要か？

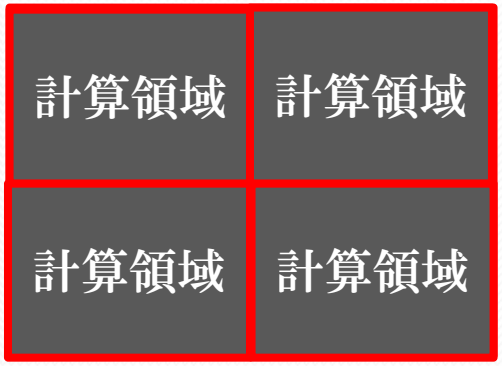
- 高解像度化による次のブレークスルーは？

全球大気モデル超解像度化のマイルストーン

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？
3.5㎞/L40	230P	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/L40	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	ひつと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	2360E					対流を精緻に解像
100m/L100	18880E					全球LESには苦しい。
50m/L200	302Z	100EFLOPS	10%	50分	24時間	全球LES/境界層雲などを直接解像

なぜ、10%ぐらいしか出ない？

- 大気海洋モデルの力学コア
  - 差分法で解いている。
  - MD計算のような総当り的計算でない。
- メモリー＝CPU間の転送速度問題
  - BF比が低すぎる！
- 計算速度/メモリー転送速度
- 計算速度/ネットワークスピード
- 強スケールするのか？
  - CPUが4倍→ 計算量4分の1→通信半分



Performance of dynamical kernels on K computer (courtesy of Dr.Terai (AICS))

- Only 1 core measurement
  - Peak : 16GFLOPS
  - MBW: 64Gbyte/s
  - B/F : 4
- All kernels get the higher performance.
  - Over 15%

kernel	case	K(1proc/1thread)		
		MFLOPS (per core)	F-peak (per core) [%]	Mem.Throughput (per core) [GB/s]
divergence	as is	1825	11.41	2.36
	tuned	2911	18.20	3.63
gradient	as is	2671	16.69	4.10
	tuned	3447	21.55	5.20
diffusion	as is	2941	18.38	6.16
	tuned	3718	23.24	7.65
Tracer advection	as is	2550	15.94	8.79
	tuned	2853	17.83	9.65
Divergence damping	as is	2711	16.94	6.11
	tuned	3010	18.81	5.64

Performance of dynamical kernels on K computer (courtesy of Dr.Terai (AICS))

- 8 threads version
  - Peak : 128GFLOPS
  - MBW: 64GFLOPS
  - B/F : 0.5

Not acceptable
(flux limiter does not contribute the calculation)
→ Need to reconsider the algorithm

kernel	case	K(1proc/1thread)			K(1proc/8threads)		
		MFLOPS (per core)	F-peak (per core) [%]	Mem.Throughput (per core) [GB/s]	MFLOPS (per chip)	F-peak (per chip) [%]	Mem.Throughput (per chip) [GB/s]
divergence	tuned	2911	18.20	3.63	22239	17.37	28.65
gradient	tuned	3447	21.55	5.20	23065	18.02	37.44
diffusion	tuned	3718	23.24	7.65	15642	12.22	40.93
Tracer advection	tuned	2853	17.83	9.65	11477	8.97	43.79
divdamp	tuned	3010	18.81	5.64	12646	9.88	29.98

Sufficiently acceptable

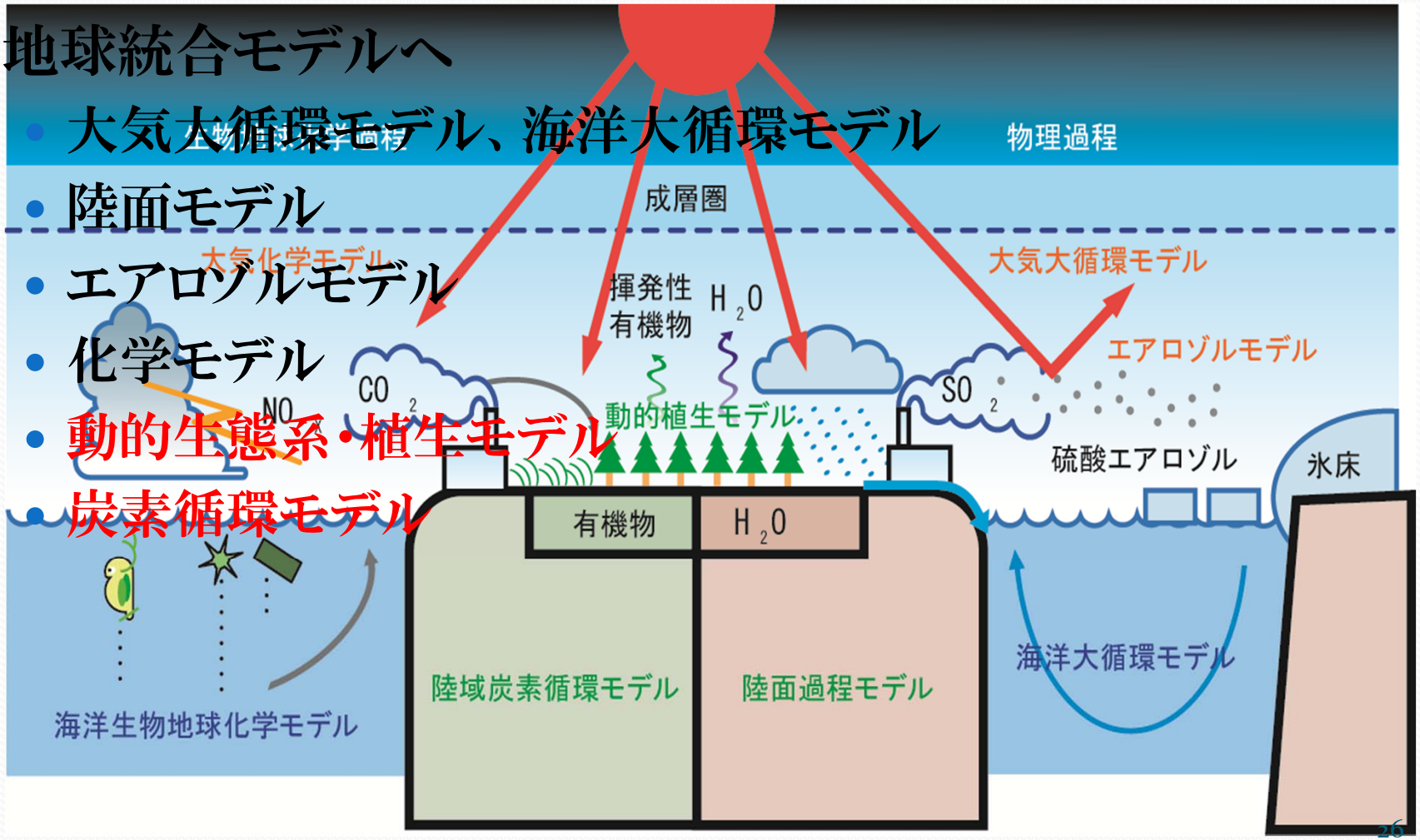
acceptable (over 10%)

Not acceptable: the reason is not found
(theoretically, higher performance can be obtained.)

2番目の軸：
モデル要素の複合化・精緻化

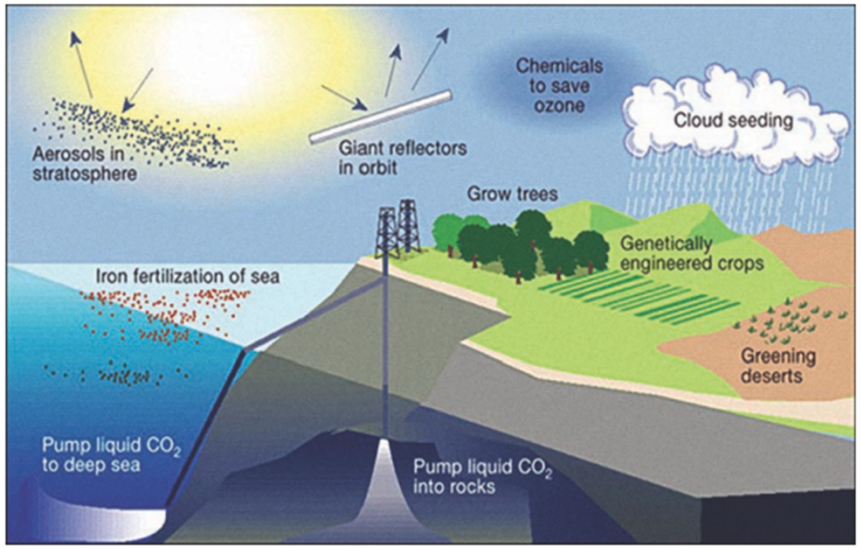
海洋機構MIROC-ESMの模式図：
図提供：海洋機構　河宮未知生主任研究員

- 地球統合モデルへ
  - 大気大循環モデル、海洋大循環モデル
  - 陸面モデル
  - エアロゾルモデル
  - 化学モデル
  - 動的生態系・植生モデル
  - 炭素循環モデル

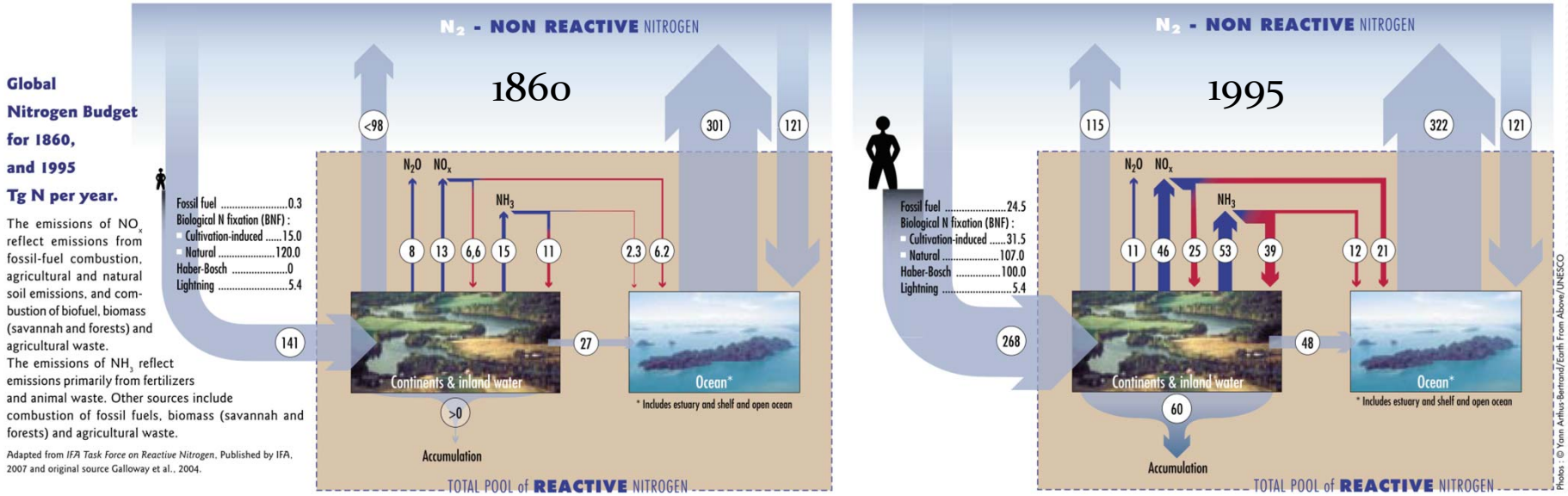


地球統合モデルの方向性

ジオエンジニアリング実験：成層圏へのエアロゾル注入や海洋鉄散布などで人工的に温暖化を抑制する手法の評価.



窒素循環の導入：人為起源の窒素固定は，すでに自然界のものに匹敵. 沿岸の富栄養化などの問題にも関連



ESMと社会システムモデルとの融合

社会システムモデルは温室効果ガス排出シナリオを気候の関数としてESMへ与える。
ESMは、排出シナリオをもとに気候を計算する。

既存の物理過程コンポーネントの精緻化

- 雲微物理
  - 1モーメントバルク法から2 or 3モーメントバルク法へ
  - バルク法からビン法へ

Method	Application	Prognostic Variables	Cost	Expressible
Spectral Bin	Single Column Model Idealized Experiment	Each Particle mass (~ 30 size sections)	30 x 30	Turbulence effect on particles Individual particle shape
1MomentBulk	Weather Forecasting Regional Research Global Climate Research	Mass	1	Mass flux
2Moment Bulk	Regional Research	Mass, Number	2 x 2	+Cross-section, Surface Area Effective Radius, Mean Volume
3Moment Bulk	Regional Research	Mass, Number, Radar Reflectivity	3 x 3	+ Broadness of drop spectra

- 乱流モデル
  - MYモデルからMYNNモデルへ
  - Giga-LES

3番目の軸：
アンサンブルの増大

- アンサンブル同士は、通信がほとんどない。
  - この意味で、アンサンブルを増やしてもスケーラブル。
  - 無問題！？
- アンサンブル数は統計的要請から決まる。

  その要請のもとで、

高解像度化？

プロセスの高度化/コンポーネントの追加？

ポストペタ・エクサスケール メニーコア時代の戦略

- BF比の低下、相対的にネットワーク速度も低下？
  - 力学部分：
    格子点法で偏微分方程式を解くのは、本質的に効率的でない。
    - スペクトル法へは戻れない（all-to-allの転置が頻発）
  - 物理部分：
    精緻化する＝少しのメモリー量をロードしてたくさん計算する。
    - キャッシュが有効利用できて、効率は出やすい。

高解像度化は必要が、、、、、

次のパラダイム（全球LES）へはちょっと遠い。

物理過程の精緻化、重要コンポーネントの追加の方が効率は出しやすい。
＝多くの成果が見込める。

まとめ

- 気候モデルからのHPCの必要性
  - 高解像度化/モデル複合化（複雑化）/アンサンブル数増
- 高解像度化：
  - 大気モデル：次のパラダイムは全球LES。
    - ポストペタ、エクサでは無理？デモは可能かもしれない。
    - そもそも力学過程がスケールするかどうかわからない。
- モデル複合化、精緻化：
  - 重要コンポーネントの追加、精緻化は、メニーコア向きかもしれない。
- そうはいっても、全球LESまで行きたい。
  - 境界層にうごめく細かな低層雲群は気候問題にとってきわめてい重要。（解像したい。）

→ BF比、相対的ネットワーク速度の向上

Team SCALEの紹介

- Team SCALE (Scalable Computing for Advanced Library and Environment)
  - 理研・計算機構の計算機科学チームと気候科学チームのクロスカッティングチーム
    - 通称、HETALE(へたれ)
      - High speed Evolution Team for Advanced Library and Environment
- 目的： 京、ポストペタ、エクサへ向けた気候シミュレーションのライブラリー化

The HETALE 2k11 project

- まずは、全系を使ったgiga-LES計算
- 意義：
  - 物理的側面
    - 真の雲解像モデルの一つのリファレンスとする。
      - より粗い解像度のCRM、GCMの中でのパラメタリゼーションへ示唆を与える。
    - どのプロセスが、対流圏の水蒸気分布を決めているか？などのメカニズムを解明する。
      - そのためより原理的な計算（LES）が必要。
    - モデルの解像度依存の調査
      - CRM－MIPに参画する。
  - 計算機科学的側面
    - 10PFLOPS汎用機のポテンシャルをいち早く示す。
      - 「京」コンピュータの威力（限界）
      - しょぼいBF比で、典型的（古典的）気象コード（差分計算＋物理パラメタリゼーションの複合モデル）は、どのぐらい性能を出すのか？
      - I/O性能は？
    - エクサへ向けての課題の抽出

- 計算規模： 水平200kmX200km、鉛直20km
  - 格子間隔、水平・鉛直ともに20m程度
- 計算コードと計算結果： 全面公開
  - コードは自由に使える、結果は自由に解析できる。
  - 戦略分野3へ一つのリファレンスを与える。

- 計算効率目標： 20％