

将来のスーパーコンピュータ上での 大規模気候計算の方向性

理化学研究所・計算科学研究機構
複合系気候科学研究チーム
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にで決まる(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：

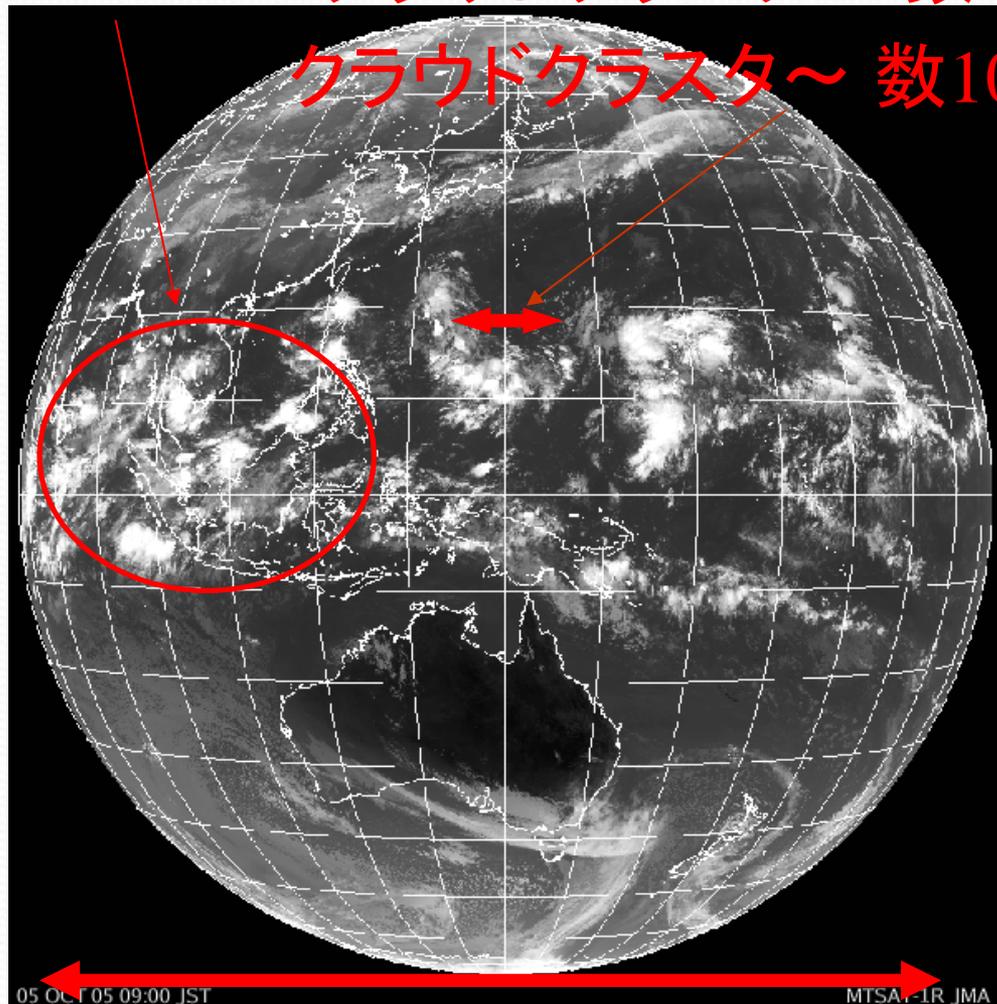
- 高解像度化
 - サブグリッドスケール現象(乱流や雲)のパラメータを排除
 - 雲対流系まで解像
 - e.g. NICAM
- モデル要素の複合化・精緻化
 - 精緻化されてきたプロセスモデルの統合
 - 大気・海洋・陸面モデル＋炭素循環＋生態系＋...
 - e.g. MIROC-ESM
- アンサンブル数の増大、積分期間の延長
 - より統計的な評価のため
 - 非線形系の予測には必須

バランスが重要

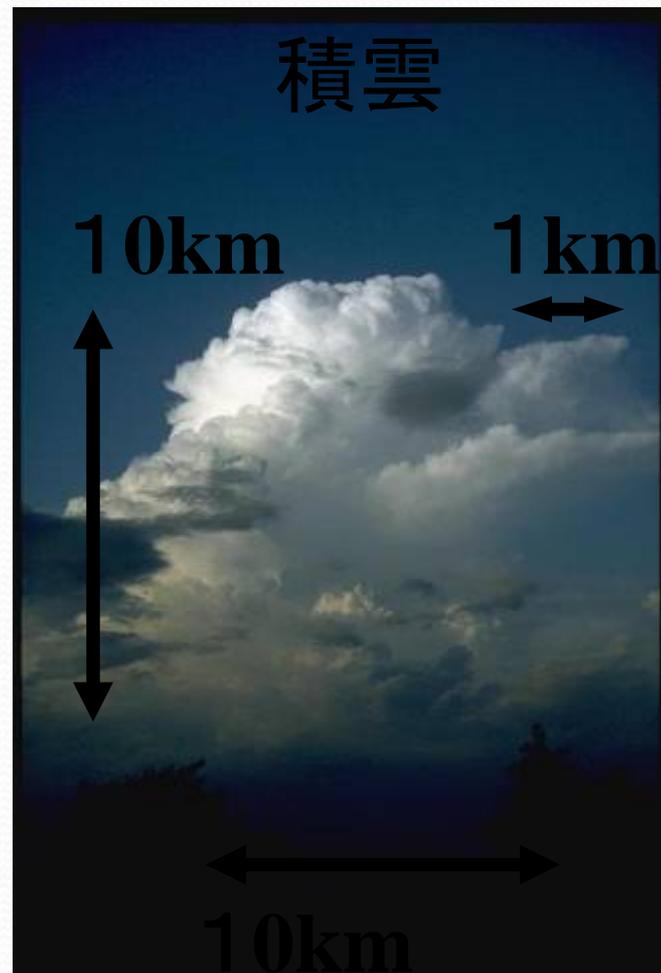
気候モデルを高解像度化する意味(大気モデルを例に)

■ 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



地球の直径12740km



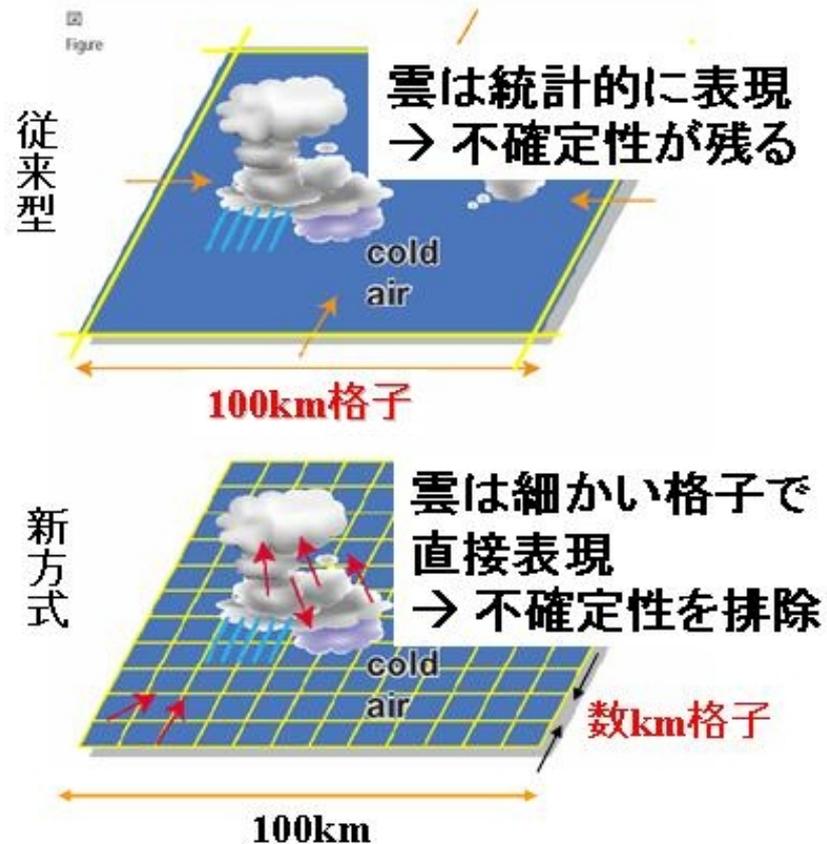
大気モデルを高解像度化する意味

● 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

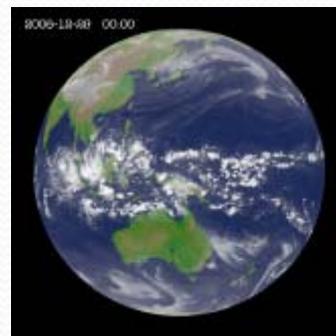
● 雲を一つ一つ解像することの必要性

- 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を排除



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



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)

全球大気モデル超解像度化のマイルストーン (NICAMを例に)

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	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	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

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の計算でない。
- 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



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

物理過程

- 陸面モデル

成層圏

- エアロゾルモデル

大気化学モデル

大気大循環モデル

- 化学モデル

NO

CO₂

SO₂

エアロゾルモデル

- 動的生態系・植生モデル

動的植生モデル

硫酸エアロゾル

氷床

- 炭素循環モデル

有機物

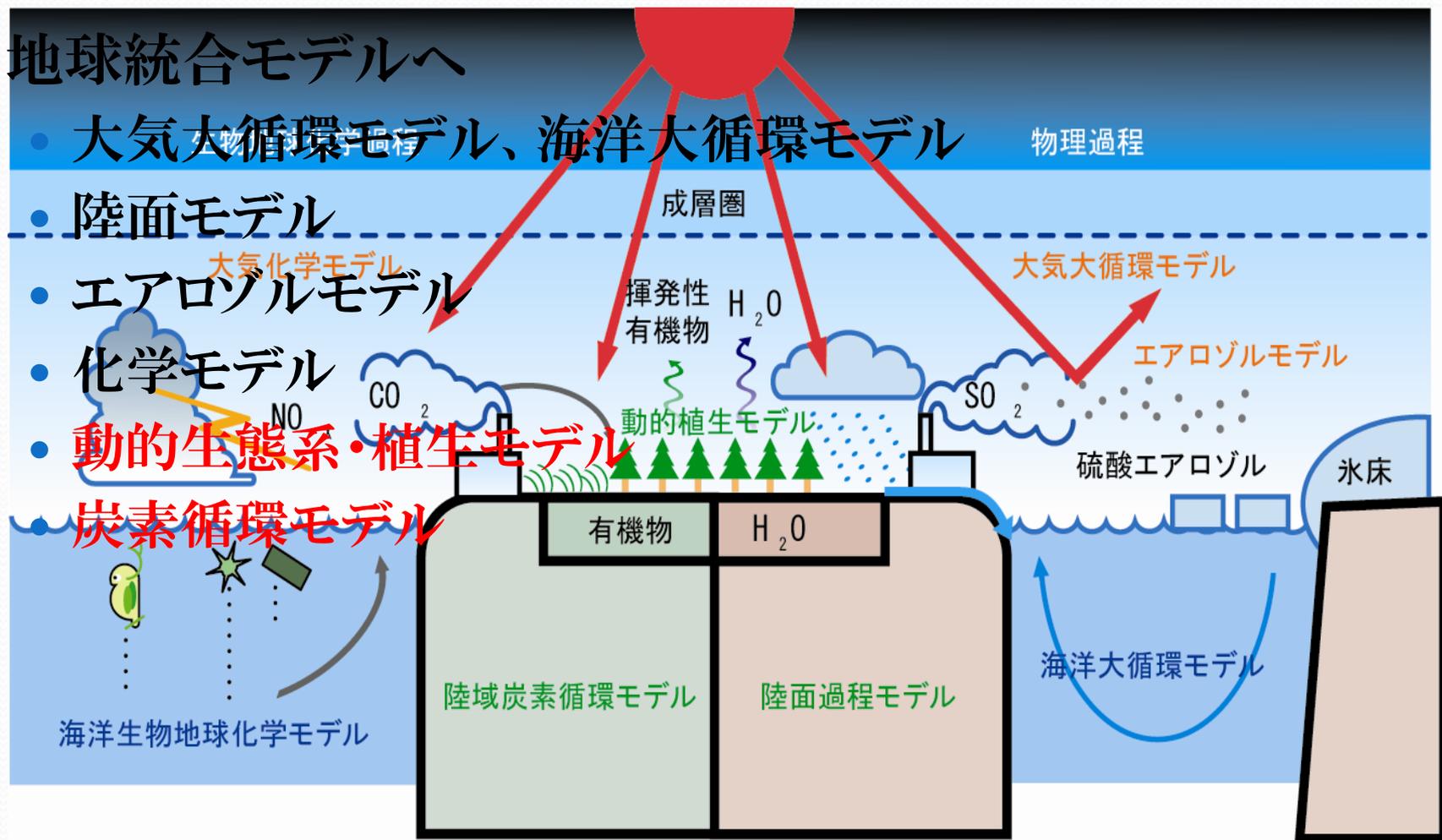
H₂O

海洋大循環モデル

海洋生物地球化学モデル

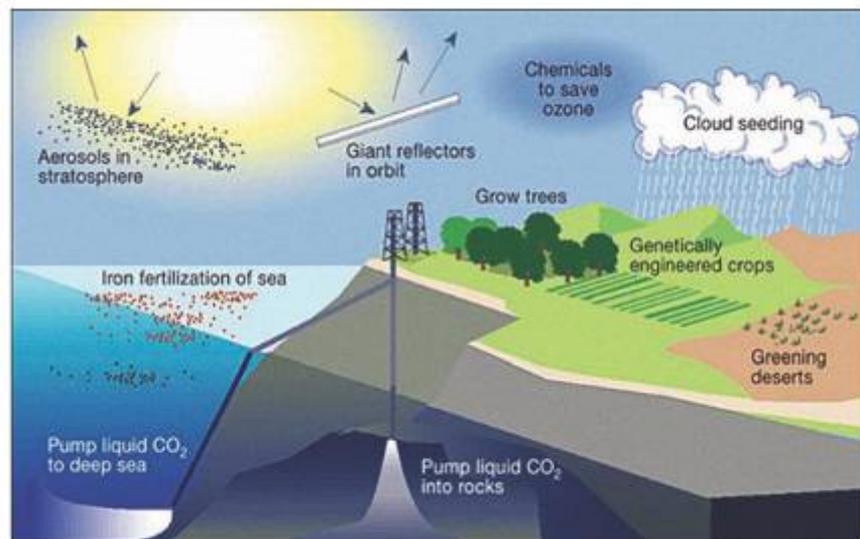
陸域炭素循環モデル

陸面過程モデル

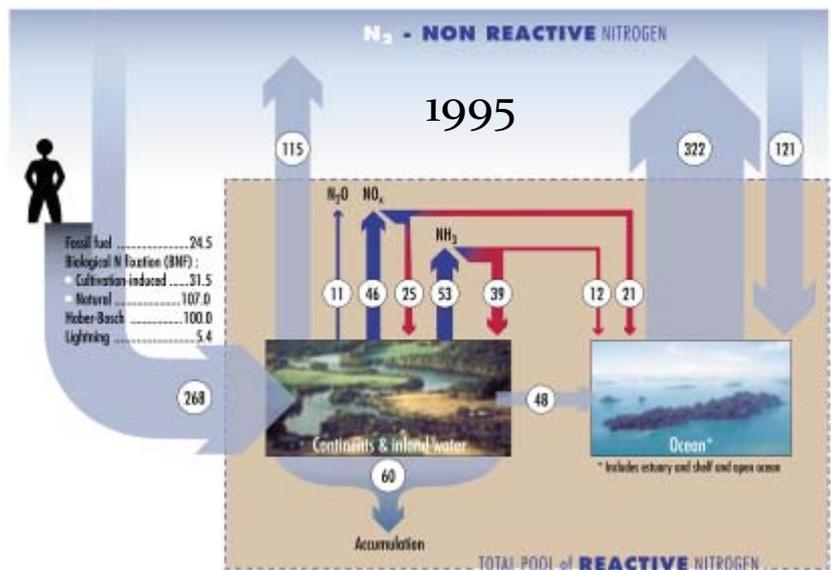
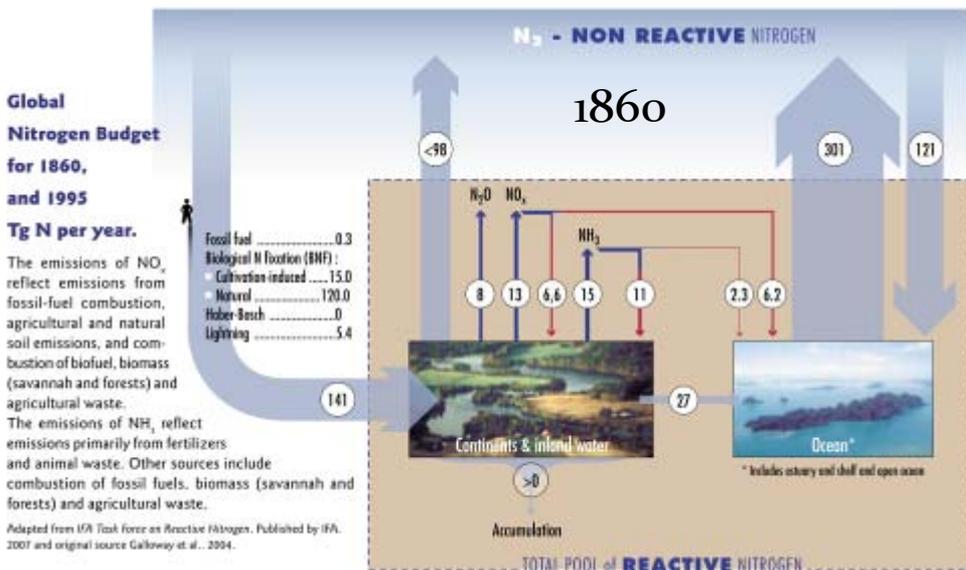


地球統合モデルの方向性

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
1Moment Bulk	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

- 放射モデル

- 3次元放射

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、効率が出やすい。

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
効率が出しやすい。
=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。
 - そうはいつでも、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重要。(解像したい。)
- BF比、相対的ネットワーク速度の向上