

# 超並列スカラー機での全球雲解像モデル NICAM の性能評価

山田 洋平<sup>1)</sup> 富田浩文<sup>1)</sup> 佐藤正樹<sup>1) 2)</sup>

(1) (独)海洋研究開発機構/地球環境フロンティア研究センター

(2) 東京大学気候システム研究センター

## 1. はじめに

大気大循環モデル (AGCM: Atmospheric General Circulation Model) は大気現象の理解や日々の天気予報や気候変動予測に用いられており、気候研究には欠かせないものである。従来の AGCM では水平方向の格子解像度が数十～百 km であり、大気の鉛直方向の運動は水平方向の運動に対して十分に小さいので静力学近似を認めたプリミティブ方程式系が用いられていた。しかし静力学近似を適用した方程式系では深い対流による個々の積雲を表現することができない。静力学近似を用いた従来型の AGCM では深い対流を統計的な手法によって再現していた。このような手法を積雲パラメタリゼーションと呼ぶ。こうした積雲パラメタリゼーションには不確実性が含まれるため、予測結果の信頼性を減少させてしまうおそれがある。AGCM によるシミュレーションの信頼性を向上させるための方法の一つとして積雲パラメタリゼーションによる不確実性を除去する必要がある。特に熱帯の積雲活動は地球規模の大気大循環に大きな役割を果たしており、個々の積雲対流システムを陽に表現することは重要である。これらの現象をシミュレーションするためには数 km スケールの水平格子を用いてシミュレーションをおこなう必要がある。

正 20 面体非静力学大気モデル (NICAM: Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model) は一つ一つの雲を表現するのに積雲パラメタリゼーションを用いずに陽に表現する全球雲解像モデルとして開発された。そのため従来の AGCM が有した不確実性を除去し、より精緻なシミュレーションが可能となり、図 1 に示すような現実的な大気現象を再現することが可能となった。NICAM を用いたシミュレーションではメソスケールの対流システム、クラウドクラスター、スーパークラウドクラスター、MJO (マッデンジュリアン振動) などの階層構造が精緻に再現された (Miura et al, 2007)。これらの現象は熱帯の対流活動に大きな寄与を持ち、シミュレーションの信頼性を向上させることができるようになった。それだけでなく全球を水平格子スケール数 km で覆ったシミュレーションは個々の積雲を陽に取り扱うことができるので現象の議論や理解を深めることが可能となる。

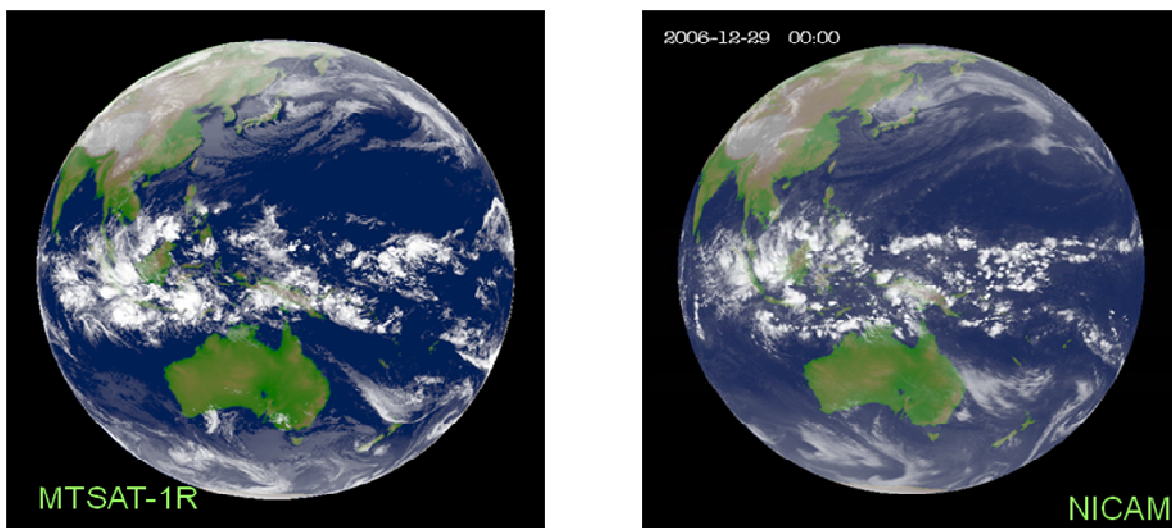


図1：衛星画像とNICAMによるシミュレーション結果

左図がMTSATを示し、右図がNICAMによるシミュレーション結果を示す。

こうした全球の大気現象を高解像度でシミュレーションすることが可能になった一つの要因は近年までの大型計算機の発達が挙げられる。NICAMは東京大学気候システム研究センター(CCSR)と(独)海洋研究開発気候/地球環境フロンティア研究センター(JAMSTEC/FRCGC)の協力の下で、(独)海洋研究開発機構/地球シミュレータセンター(JAMSTEC/ESC)の地球シミュレータ上で開発がおこなわれてきた。地球シミュレータはベクトル型演算機を有しているため、NICAMはベクトル型計算機向けに最適化が施されている。しかし近年のスーパーコンピュータの動向は膨大な数のスカラ型演算機をもつクラスタ型マシンが主流となっている。次世代のAGCMであるNICAMは物理的なパフォーマンスはもとより、計算効率においても有望でなければならない。ところがスカラ型計算機とベクトル型計算機は互いにアーキテクチャが異なるため、ベクトル型計算機に向けて最適化された現状のNICAMはスカラ型計算機上では高い計算効率での運用には適していないという問題があり、スカラ型計算機に向けた最適化を施す必要がある。

現在、次世代10ペタフロップスコンピュータ(京速計算機)の開発が進められている。NICAMは京速計算機のターゲットアプリケーションの一つに選定されており、京速計算機上でさらなる知見を得ることが期待されている。我々は京速計算機の計算機資源を生かして全球で400m格子の実験を目標としている。また京速計算機上で数km格子の全球雲解像実験を現在おこなっている積分期間よりも長期にわたる実施やアンサンブル実験を実施する予定である。これらの実験を京速計算機のスカラ部分で高い計算効率で実施するためにはスカラ型計算機に向けた最適化は必要不可欠なものといえる。

本研究ではスカラ型計算機向けに最適化されていない現状のNICAMの計算効率をスカラ型計算機上で性能計測を実施する。そこで既存の大型スカラ型計算機(T2K東大・T2K筑波)を京速計算機と見做してNICAMの現状でのスカラ型計算機上での演算性能を測定した。また地球シミュレータでも同じ条件の実験を実施して演算性能を計測し、スカラ型計算機とベクトル型計算機での演算性能を比較した。

本稿では、2章でNICAMの計算手法の概要を述べる。3章では計測を実施した時の実行環境を述べる。4章ではそれぞれの計算機における計測結果とスカラ型計算機とベクトル型計算機の比較を示す。5章で計測結果のまとめと今後の展望を述べる。

## 2. NICAMの概要

NICAMの詳細は参考文献(Tomita and Satoh, 2004, Satoh et al, 2008, Tomita et al, 2008)に譲るがここでは簡単に概要を述べる。支配方程式は音波を含んだ完全圧縮な非静力学方程式系を用い、質量と全エネルギーの保存を考慮に入れたスキームを採用している。空間方向には有限体積法を用いて離散化を施している。時間積分には伝搬の遅い波と速い波を分けたtime-splitting methodを用いる。遅い波は2 or 3次のルンゲクッタ法を用いており、早い波は水平方向に陽解法を用い、鉛直方向には陰解法を用いる HEVI 法に基づき forward-backward 法を採用している。この手法では鉛直方向に1次元のヘルムホルツ方程式を解く必要がある。地形を表現するために地形に沿った座標系を適用し、鉛直方向にはローレンツグリッドを採用している。水平方向には修正型正二十面体格子系(Tomita et al, 2001, 2002)を用いている。

ここでは二十面体格子の生成方法を簡単に説明する。全球を20個の正三角形で覆った状態が図2(a)に示す状態でG-Level 0と称している。計算格子点は三角形の頂点に定義されている。20個の正三角形を各々4分割することによって生成される状態(図2(b))がG-Level 1と呼ばれ、さらに4分割することによって得られる格子系(図2(c))がG-Level 2と呼ばれる。上述の様に再起的に三角形を分割することにより水平格子解像度を向上させることができ、分割数に応じてG-Level nと定義している。表1にG-Levelに対応した全球での格子点数と水平格子間隔を示す。

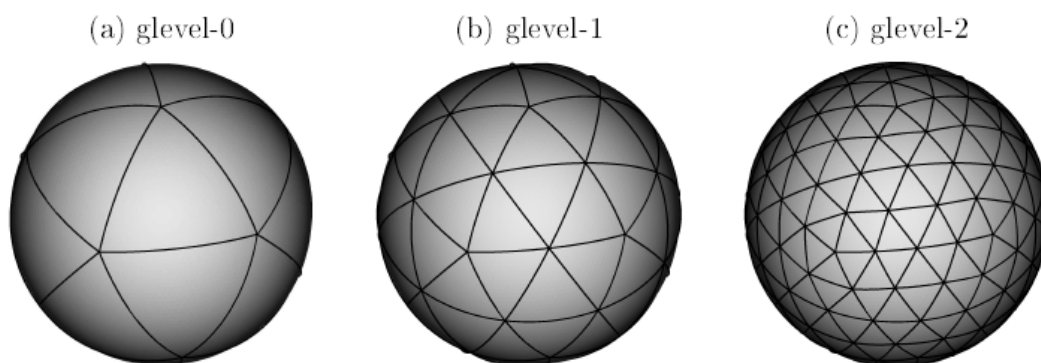


図2：水平格子点の概念図

(a)はG-Level 0を示し、全球での水平格子点は12個存在する。(b)はG-Level 1を示し、全球での水平格子点は42個存在する。(c)はG-Level 2を示し、全体での水平格子点は162個存在する。

表 1 :G-Level と水平格子数及び水平格子間隔

G-Level	水平格子点数	水平格子間隔 [m]
0	12	6000000
1	42	1500000
2	162	750000
.....	.....	.....
8	655362	28000
9	2621442	14000
10	10485762	7000
11	41943042	3500
..	..	..
14	2684354562	400

次に計算領域の形成方法について解説する。球面を図 3(a)に示されるように 10 個の矩形領域に分割する。この矩形領域を図 3(b)のように 4 分割し、さらに 4 分割することにより図 3(c)のような矩形領域を生成する。初期の状態(図 3(a))を R-Level 0 と称し、水平格子分割と同様に分割数 n に応じて R-Level n と定義している。矩形領域がそれぞれ計算領域となり、通常は単一のコアが単一の計算領域を処理する。また各計算領域上の水平格子は 2 次元の配列ではなく 1 次元の配列として定義してループ長を得られるようなコーディングとなっている。R-Level に対応した計算領域の数を表 2 に示す。

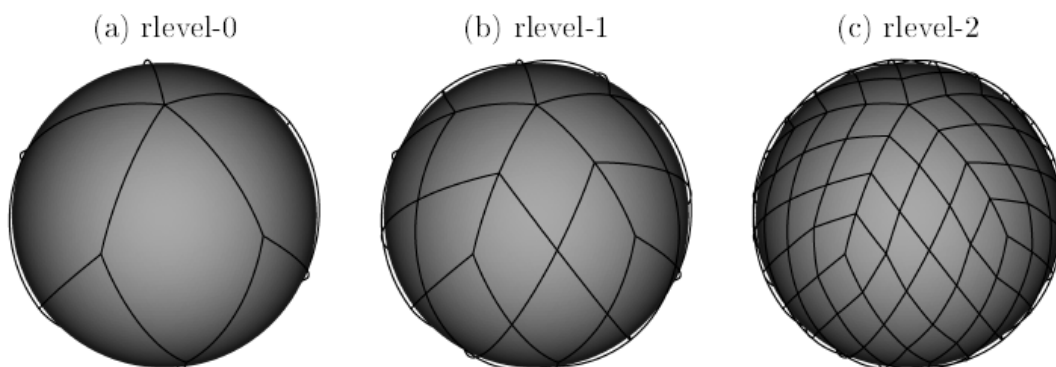


図 3 : 計算領域分割の概念図

(a)は R-Level 0 を示し、計算領域は全球で 10 個存在する。(b)は R-Level 1 を示し、計算領域は全球で 40 個存在する。(c)は R-Level 2 を示し、計算領域は全球で 160 個存在する。

表 3 : R-Level と計算領域数

R-Level	計算領域数
0	10
1	40
2	160
3	640
4	2560

### 3. 計測実行環境

今回の計測ではベクトル型計算機として(独)海洋研究開発機構/地球シミュレータセンターの地球シミュレータを用いた, スカラ型計算機は東京大学情報基盤センターの T2K オープンスーパーコンピュータ(東大)・HA8000 クラスタシステム(以下 T2K-東大)と筑波大学計算機科学研究センターの T2K-Tsukuba システム(T2K- Tsukuba)を利用した。

スカラ型計算機ではキャッシュメモリを有効に利用することによって計算効率を向上させる必要がある。そこで今回の計測では水平方向の解像度を G-Level17 で固定して, R-Level を 1 から 4 まで変化させることにより 1 コア当たりの問題規模を変化させた。利用可能な計算機資源を考慮した結果, 1 コア当たりの問題規模を上述のように決定した。各 R-Level に対応した利用コア数と水平方向の格子点数を表 4 に示す。ただし T2K- Tsukuba の場合はメモリ使用量の制約のため R-Level0 の計測は実施していない。

表 4 : G-Level 7 の時の R-Level に対応したコア数と水平格子点数

R-Level	0	1	2	3	4
コア数	10	40	160	640	2560
水平格子点数	16384	4096	1024	256	64

計算時間の計測には MPI の関数である MPI\_WTIME を用いて, NICAM のソースコードの必要な部分に適宜挿入した。今回の計測では時間刻みを 30 秒として 121STEP(約 1 時間)の積分を実施して計測を実施した。ただし, T2K-Tsukuba にはステージング機能が存在しないためデータの入出力を除去して計測を実施する必要がある。NICAM の計算過程には毎 STEP 計算せず, 数 STEP 度に計算を実施するプロセスがある。このプロセスを今回は 12STEP 度に計算するとしていたため初期条件の読み込みを含む 12STEP 分を 121STEP から除去することによって計測結果を評価した。

また T2K-東大では通信部分を取り除いたスカラ型計算機の単体性能を評価し, T2K-Tsukuba では通信部分を含んだ性能の評価を実施した。

#### 4. 計測結果

はじめに通信を除去した1step 分の計算時間のR-Levelへの依存性を地球シミュレータ と T2K-東大 についての計測結果を表5 に示す。表5は横方向に地球シミュレータのR-Levelを示し、縦方向にT2K-東大のR-Levelを示す。地球シミュレータがR-Level 0の時にT2K-東大がR-Level 0の時の計算時間は8.58倍を示し、T2K-東大がR-Level 4の時には0.06倍の計算時間を要したことを示している。同表より、地球シミュレータのR-LevelよりT2K-東大のR-Levelが2以上大きい時、つまり1プロセス当たり割り当てられる問題のサイズが16分の1になった場合には1step当たりの演算時間は地球シミュレータよりもT2K-東大の方が短いということが示された。

表5：地球シミュレータとT2K-東大の1STEP当たりの計算時間の比率

		地球シミュレータ				
R-level		0	1	2	3	4
T2K-東大	0	8.58	30.41	109.3	286.12	648.51
	1	2.97	10.53	37.85	99.08	224.57
	2	0.49	1.73	6.22	16.29	36.91
	3	0.20	0.71	2.54	6.64	15.06
	4	0.06	0.22	0.78	2.05	4.64

次にプロセス間の通信を考慮したT2K-Tsukubaの計測結果を示す。利用するコア数が40個の時の計算時間を基準としてR-Levelが上昇した時の計算時間の減少率を図4に示した。ここでR-Levelが上昇するごとに水平格子点の数は4分の1に減少するので理論的には計算時間の減少率は4分の1になることが期待される。図4より地球シミュレータは利用するコア数が640個を超えると演算効率が極端に悪化する様子がわかる。これベクトル型計算機である地球シミュレータのベクトル長(256)を有効に利用できていないためと考えられる。各R-Levelにおける平均ベクトル長を示す。

表6：G-Level 7の時のR-Levelに対応した平均ベクトル長

R-Level	0	1	2	3	4
平均ベクトル長	247.66	236.52	217.98	147.74	89.55

一方でT2K-Tsukubaの場合は利用するコアが2560個から演算効率が悪化する様子が見て取れるが、この原因の一つとして通信の影響が挙げられる。

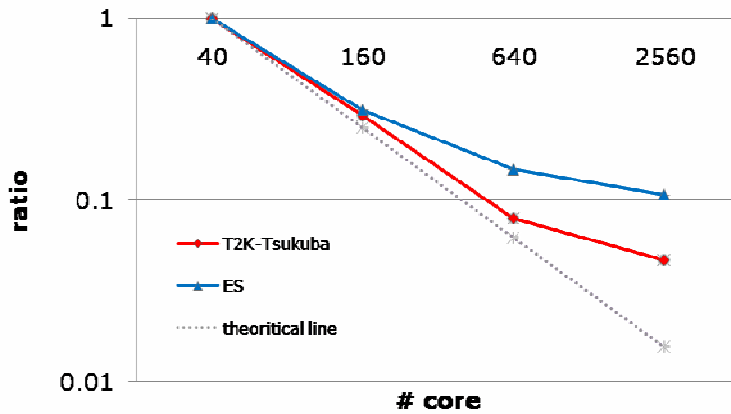


図4：計算過程全体のスケーラビリティ

縦軸はコア数40を基準とした場合の計算時間の減少率を示し(対数目盛), 横軸は利用したコア数を示す。赤線はT2K-Tsukubaのスケーラビリティを示し, 青線は地球シミュレータ (ES) のスケーラビリティを示す。点線は理論値を示す。

NICAMの計算過程の中には通信を含まない過程が存在するので, 力学過程(通信を含む)・放射過程・雲物理過程・乱流過程を抜き出して地球シミュレータとT2K-Tsukubaのスケーラビリティをそれぞれ図5と図6に示す。地球シミュレータの場合は利用するコア数が640個を超えると計算効率が悪化する様子が示されており計算過程全体の場合と同様の傾向が得られた。またT2K-Tsukubaの場合も利用コア数が2560個を超えると計算効率が悪化しており, 計算過程全体のスケーラビリティと同様の傾向を示しているが, プロセス間の通信を含む力学過程より通信を含まない雲物理過程や乱流過程の計算効率が悪化している様子がわかる。一方で放射過程は利用するコア数が640個の時にわずかながら理論値より計算効率が向上していることがわかり, キャッシュメモリの有効利用がおこなわれていることが示唆される。しかし放射過程の計算効率も2560個のコアを使用した場合には効率が悪化していることがわかる。

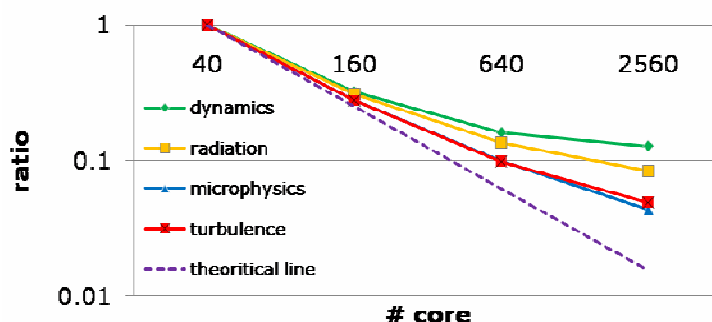


図5：地球シミュレータにおける各計算過程のスケーラビリティ

縦軸はコア数40を基準とした場合の計算時間の減少率を示し(対数目盛), 横軸は利用したコア数を示す。緑線は力学過程のスケーラビリティを示し, 黄線は放射過程のスケーラビリティを示し, 青線は雲物理過程のスケーラビリティを示し, 赤線は乱流過程のスケーラビリティを示す。点線は理論値を示す。

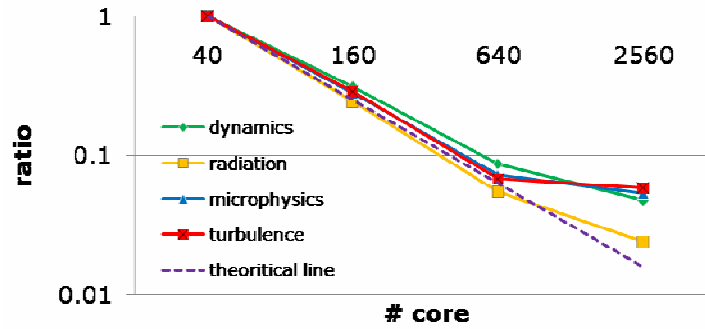


図 6 : T2K-Tsukubaにおける各計算過程のスケラビリティ

縦軸はコア数40を基準とした場合の計算時間の減少率を示し(対数目盛), 横軸は利用したコア数を示す。緑線は力学過程のスケラビリティを示し, 黄線は放射過程のスケラビリティを示し, 青線は雲物理過程のスケラビリティを示し, 赤線は乱流過程のスケラビリティを示す。点線は理論値を示す。

利用コアが2560個で計算効率が悪化する通信以外の原因のとしてハロリージョンの取り扱いが挙げられる。ハロリージョンとは計算格子の最外側に存在し(図7の赤丸)隣接する計算領域とのプロセス間通信によって取得されるが, 通信の回数を減らすためにハロリージョン自体でも計算がおこなわれている。計算領域当りの格子点数が多い場合にはハロリージョンの量は無視することができるが, 格子点数が小さくなるとハロリージョンが無視できなくなる。

計算領域当りの水平格子点数とハロリージョンの数には表7に示すような関係がある。表7に示すようにR-Levelが上がるごとに計算格子自体は4分の1に減少するのに対してハロリージョンの数は2分の1に減少する。このためG-Level7の場合にはR-Level4の時に計算格子に対するハロリージョンの比が2:1となり, ハロリージョンの数が無視できなくなるため計算効率が悪化すると考えられる。

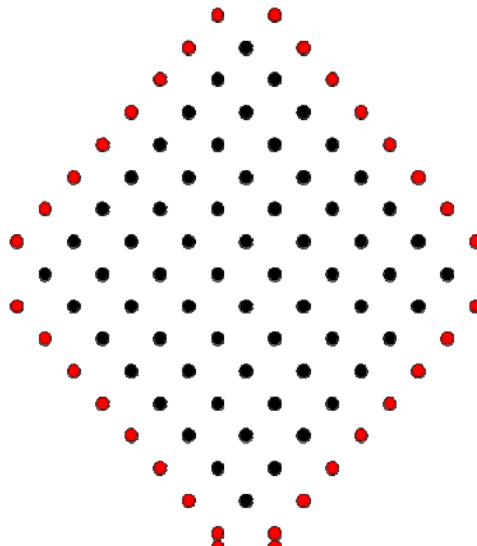


図 7 : 計算領域上の構成の概念図

赤丸・黒丸が計算おこなう格子を示す。ただし, 赤丸は隣接する計算領域との通信をおこなう格子(ハロリージョン)を示す。



表 7 : R-level と対応するハロリージョンの数

Rlevel	1	2	3	4
格子点数	4096	1024	256	64
ハロリージョン	258	130	66	34
計算格子	4354	1154	322	98

前述したとおりハロリージョンの取り扱いの他に計算効率を悪化させる原因として、1 プロセス当たりの問題規模の縮小により通信量は減少するにも関わらず、通信の回数は変わらないので通信のオーバーヘッドの比率が増加することが挙げられる。図 8 には計算時間に対するプロセス間の通信に要する時間の増加率を利用したコア数が 40 (R-Level=1) の時を基準としてコア数への依存性を示している。図 8 より地球シミュレータの場合には平均ベクトル長の減少のために、演算量に対する通信に要する時間の比率の増加が隠されてしまうことが考えられが、T2K-Tsukuba と地球シミュレータのいずれの場合でも計算時間に対する通信時間の割合は増加していることがわかる。

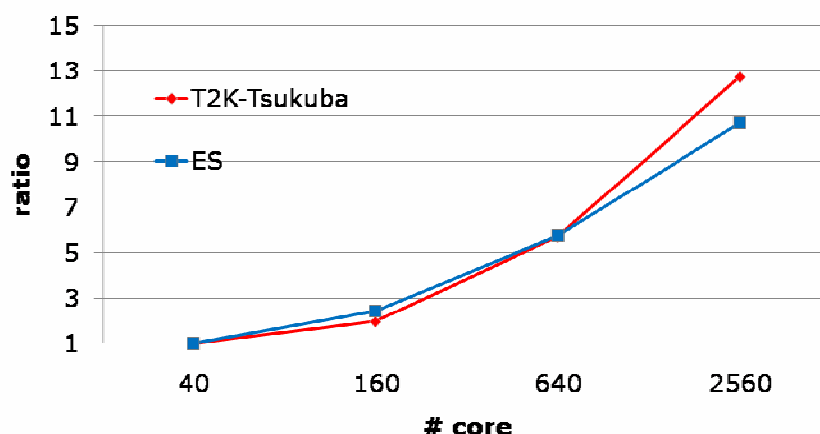


図 8 : 計算時間に対する通信時間の上昇率

縦軸はコア数40を基準とした場合の計算時間の増加率を示し(対数目盛)、横軸は利用したコア数を示す。赤線はT2K-Tsukubaの結果を示し、青線は地球シミュレータ (ES) の結果を示す。

## 5. まとめと今後の展望

本研究では既存の大型スカラ型計算機である T2K-東大及び T2K-Tsukuba を京速計算機と見做して NICAM の計算時間を計測し、ベクトル型計算機である地球シミュレータでの計算性能との比較を行った。

今回の計測では単体性能だけを比較した場合、利用するコア数が同数でループ長がベクトル計算機のベクトル長に適切な場合には、スカラ型計算機の 1step 当たりの計算時間はベクトル型計算機の 6 倍から 10 倍程度となる。しかしスカラ型計算機で利用するコアの数がベクトル型計算機の 16 以上になるとスカラ型計算機の計算時間がベクトル型計算機よりも短くなることがわかった。

またプロセス間の通信を含んだ計速結果を比較すると、スカラ型計算機では 1 プロセス当たりの水平方向の格子数が 256 個でキャッシュ利用による計算効率の向上が見られ、コア数が

2560 個で演算性能が悪化することがわかった。コア数が 2560 個で計算効率が悪化する原因として、ハロリージョンが計算領域の格子数に占める割合が大きくなり、ハロリージョンの計算量が 1 プロセス当たりの計算量に対して無視できなくなっているということが挙げられることと小規模なプロセス間の増大による通信のオーバーヘッドの増加が原因の一部として挙げられる。

京速計算機では G-Level 14 の水平格子間隔 400m を用いた超高解像度実験が可能となる(佐藤他, 2008)。そこで理論性能が 10 ペタフロップス計算機の京速計算機で半分のノードを使用したと仮定して NICAM がそのピーク性能比率の 10%をだせた場合、計算時間が 4 時間で一日分の積分が実行可能だと見積もることができる。

図 8 に現状の NICAM の地球シミュレータと T2K-Tsukuba の R-level に対応したピーク性能比率を示す。ベクトル型計算機(地球シミュレータ)では平均ベクトル長を稼ぐことができる R-Level の低い状態では 35%程度となっているが、スカラ型計算機(T2K-Tsukuba)では今回計測を実施した水平格子解像度の範囲ではピーク性能比率が 5%未満の値となっている。部分的にキャッシュメモリ有効利用しだしたコア数が 640 個の場合では 2.5%程度となっており、今回見積もったピーク性能比率 10%の 4 分の 1 程度となっている。しかし 1 計算領域当りの水平格子点数は 64 よりも少なくしてしまうとハロリージョンとプロセス間の通信の制約により計算効率を悪化させてしまう結果となることが分かっている。

スカラ型計算機では CPU の性能に依存するがベクトル型計算機よりも多くのコア数を使用して計算効率を上げる必要がある。この条件はキャッシュメモリを有効利用することとは整合性が取れているが、NICAM 固有のハロリージョンの制約とは逆のセンスとなっている。今後はハロリージョンの取り扱いとキャッシュメモリの有効利用を目指した最適化が必要といえる。

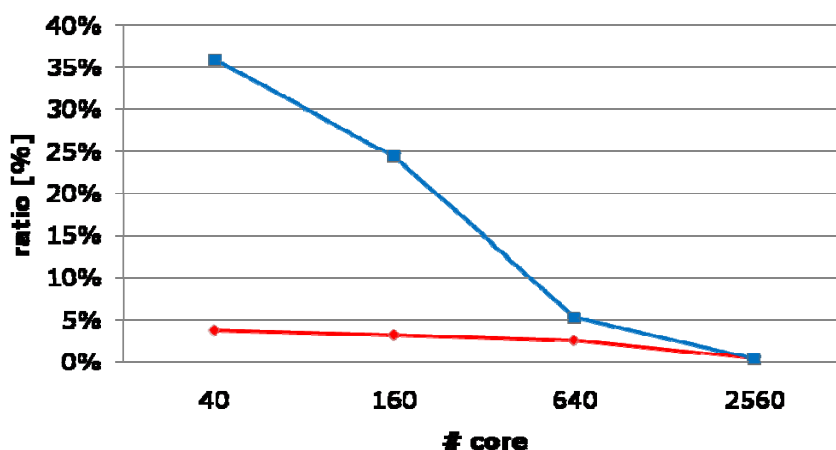


図 8 : 計算時間に対する通信時間の上昇率

縦軸はピーク性の比率を示し、横軸は利用したコア数を示す。赤線は T2K-Tsukuba の結果を示し、青線は地球シミュレータの結果を示す。

## 6. 謝辞

本研究の一部は独立行政法人科学技術振興機構(JST)の“戦略的推進事業 (CREST)”の御支援を承った。計速には海洋研究開発機構/地球シミュレータセンターの地球シミュレータと「HPC 特別プロジェクト」及び「T2K オープンスパコン(東大)共同研究」のご支援の下、東京大学情報基盤センターの T2K オープンスパコン(東大)プロジェクトコード: H94 と筑波大学計算科

学研究センター学際共同利用プログラムのご支援の下、筑波大学情報科学センターのT2K-Tsukuba を利用させていただいた。この場をお借りして感謝の意を表す。

### 参 考 文 献

- 佐藤正樹, 富田浩文, 準一様格子を用いた全球雲解像大気モデルの開発とそれによる熱帯対流雲集団のシミュレーション—2007年度日本気象学会賞受賞記念講演—, *天気*, 55:451–456, 2008
- Satoh, M. Conservative Scheme for the Compressible Nonhydrostatic Models with the Horizontally Explicit and Vertically Implicit Time Integration Scheme. *Mon. Wea. Rev.*, 130:1227–1245, 2002
- Satoh, M., Conservative Scheme for the Compressible Nonhydrostatic Models with Moist Process, *Mon. Wea. Rev.*, 131:1033–1049, 2003
- Satoh, M., T. Matsuno, H. Tomita, H. Miura, T. Nasuno, S. Iga, Nonhydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM) for global cloud resolving simulations, *J. Comput. Phys.*, 227:3486–3514, 2008
- Miura, H., M. Satoh, T. Nasuno, A. T. Noda, and K. Oouchi, A Madden–Julian Oscillation event realistically simulated by a global cloud-resolving model, *Science*, 318, 1763–1765
- Tomita, H., M. Tsugawa, M. Satoh, and K. Goto. Shallow Water Model on a Modified Icosahedral Geodesic Grid by Using Spring Dynamics, *J. Comput. Phys.*, 174:579–613, 2001
- Tomita, H., M. Tsugawa, M. Satoh, and K. Goto, An optimization of the icosahedral grid modified by spring dynamics, *J. Comput. Phys.*, 174:307–331, 2002
- Tomita, H. and Satoh, M, A new dynamical framework of nonhydrostatic global model using the icosahedral grid, *Fluid Dyn. Res.* 34:356, 2004
- Tomita, H., K. Goto, and M. satoh. A NEW APPROACH OF ATMOSPHERIC GENERAL CIRCULATION MODEL GLOBAL CLOUD RESOLVING MODEL NICAM AND ITS COMPUTATIONAL PERFORMANCE– *SIAM J. Sci. Comput.*, 30, 2755–2776; DOI. 10.1137/070692273.4