

NAGARE

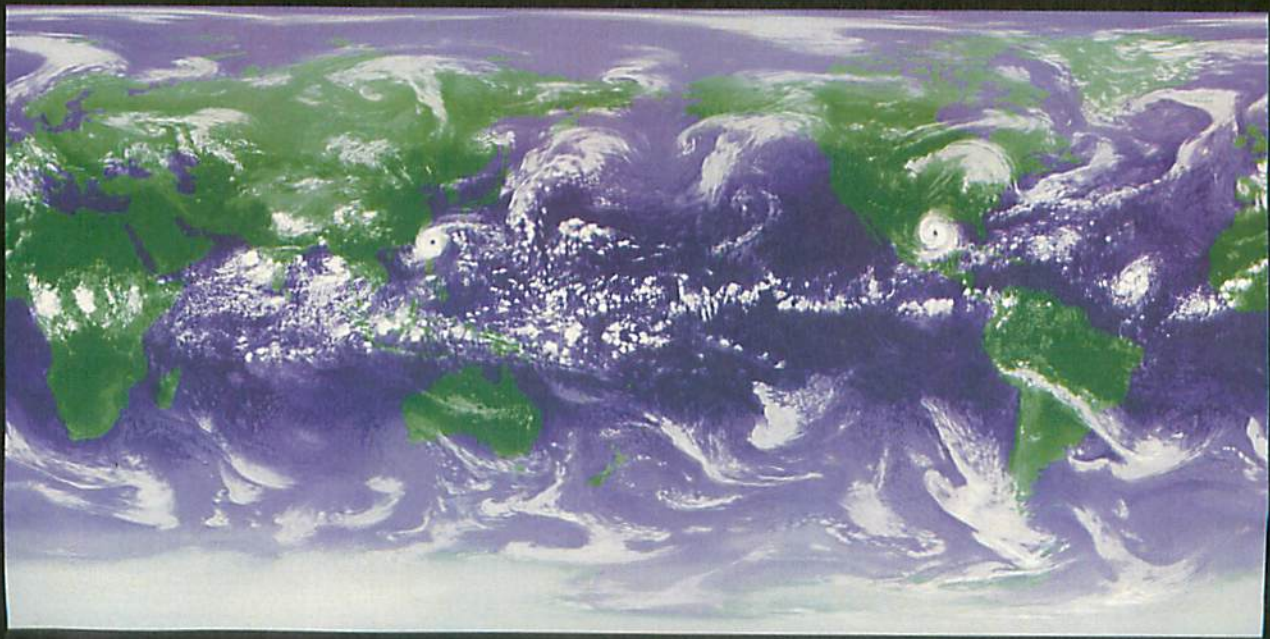
ISSN 0286-3154 Journal of Japan Society of Fluid Mechanics

ながれ

2010 FEB. 第29巻
No.1

- 特 集 大規模数値計算の現状と今後の展開 - その1
特集の企画にあたって/都市における風の乱流構造に関するLES/都市
建築空間の広域熱環境解析における工学モデルの適用/気象庁非静力学
モデル (NHM) の並列化について/大気大循環モデル力学コアの変遷に
ついて/太陽活動の基礎プロセス 磁気リコネクションのシミュレーシ
ョン/銀河形成の流体力学模型
- 原著論文 メソスケール流体解析のための粒子法の開発
- 研究ノート 非負係数を保証する3次精度移流項計算スキーム

NICAM glevel-10
2008091300 Z



〔特集〕大規模数値計算の現状と今後の展開 - その1

大気大循環モデル力学コアの変遷について

*筑波大学計算科学研究センター

田中 博†

筑波大学計算科学研究センター

朴 泰祐

東京大学気候システム研究センター

佐藤 正樹

Historical Progress of the Dynamical Core of the General Circulation Model of the Atmosphere

Hiroshi L. TANAKA, Center for Computational Science, University of Tsukuba

Taisuke BOKU, Center for Computational Science, University of Tsukuba

Masaki SATOH, Center for Climate System Research, The University of Tokyo

1 はじめに

1950年代の大気大循環モデルの黎明期から50年が経過し、その間、大気大循環モデルの主流は、コンピュータ技術の発展に伴い格子モデルからスペクトルモデルへと発展した。波数切断で決まるモデルの解像度は、初期の約500kmから200km, 100km, 50km, 20kmと年々向上し、高解像度化に比例するように天気予報の予報精度も向上した。しかし、単体のCPU演算速度に上限が見え始め、それ以上の高速化が望めないようになると、計算機科学の主流は並列化への道を歩み始めることになった。すると、大量通信を必要とするスペクトルモデルの開発は頭打ちとなり、これ以上解像度を上げられないという上限が見え始めたのである。

大気大循環モデルの力学コアは、これまで静力学平衡を仮定したプリミティブ方程式系が主流であったが、格子間隔を20kmから10kmに細かくすると、対流圏の厚さが10kmであるため、静力学平衡の仮定が困難となる。したがって、力学コアも、必然的にこれまでのプリミティブ方程式系から、静力学平衡を仮定しない非静力学モデルへと発展させる必要性が生じるようになった。

さらに、放射伝達や降水過程といった物理過程も、

鉛直流の加速度を直接計算することにより、これまでの各種積雲対流パラメタリゼーション（当然、誤差が大きい）から、雲や雨、雪などの形成を直接計算する雲解像モデルにシフトする時代に突入した。

このように、モデルの水平解像度を現行の20kmから10km以下に向上させるには、非静力学モデルの開発、雲微物理過程の導入、そして並列計算機への移行といった3つの大きな壁を乗り越える必要があった。大気大循環モデルを非静力化し、雲微物理過程を直接計算する全球雲解像モデルに発展させるためには、スペクトルモデルに基礎を置いたこれまでの力学コアを根本から見直す必要性に迫られたのである。

この問題を解決するために、当時、建設開始が決まった地球シミュレータ(ES)のアプリケーションソフトのひとつとして開発が進められたのが、次世代型大気大循環モデルNICAM (Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model)である。開発を担当したのは東京大学気候システム研究センター(CCSR)の佐藤と海洋研究開発機構地球フロンティア研究システム(JAMSTEC)の富田が率いる研究グループである¹⁾。超並列化に対応したNICAMは、ベクトル計算機の地球シミュレータ(40Tフロップス)を用いることで、前人未踏の全球3.5km格子による非静力学雲解像モデルを実現した。そこに見られる大気大循環は、温帯低気圧の細部構造、熱帯低気圧(台風)やマッデン・ジュリアン振動(MJO)をリア

*〒305-8577 つくば市天王台1-1-1

† E-mail: tanaka@ccs.tsukuba.ac.jp

ルに再現し、その雲画像の動画は人工衛星ひまわりからの画像と区別がつかないほどの圧巻である。

筑波大学計算科学研究センター(CCS)では、1996年に世界最速を記録した CP-PACS の後継機である PACS-CS (14.8T フロップス) や、筑波大学、東京大学、京都大学で連携調達した T2K-Tsukuba (95T フロップス) の 2 台の超並列計算機システムを稼働しており、計算科学と計算機科学の融合による先端科学技術開発の推進を精力的に行っている。このたび、CCS の地球環境部門では、次世代型雲解像モデル NICAM を PACS-CS と T2K-Tsukuba の両システムに移植し、全球 7.0km 格子の大気大循環モデルによる研究を開始した。

本稿では、これを機会に、過去 50 年間の大気大循環モデルの力学コアの変遷と、動き出した次世代型大気大循環モデル NICAM について紹介したい。

2 緯度経度グリッドモデル

大気大循環モデルが 1956 年に N. Philips²⁾ により開発されて以来、50 年以上の歳月が流れた。当時、モデル開発の主導的役割を果たしたのは米国プリンストン大学にある GFDL (地球流体力学研究所)、ボールドーにある NCAR (国立大気科学研究所)、西海岸の UCLA (カリフォルニア大学)、そして東海岸の NMC (連邦気象局) の研究者達であった。GFDL には真鍋、都田、栗原が、NCAR には笠原、笹森、UCLA には荒川、そして NMC には金光が中心的な日本人若手研究者として開発に取り組んでいた。

当時の東京大学で気象学を学んだ正野学派の日本人若手研究者の水準は世界的なレベルにあり、優秀な日本の頭脳がアメリカに流れた時代であった。彼らの活躍ぶりは新田尚による名著「大気大循環論」³⁾ によりまとめられ、国内に紹介されている。

黎明期の大気大循環モデルは、地球大気を緯度、経度、鉛直方向のグリッドに分割し、それぞれの格子点に気象要素を定義して、プリミティブ方程式系に現れる空間微分を差分で近似して方程式を代数的に解くというグリッドモデルである (図 1)。たとえば、以下の Navier-Stokes の方程式に現れる微分は、空間差分で近似する。

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -V \cdot \nabla V - \frac{1}{\rho} \nabla p - 2\Omega \times V + K \nabla^2 V$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} \approx \frac{p(x + \Delta x) - p(x - \Delta x)}{2\Delta x} \quad (1)$$

ここで、変数は通常の流体力学の表記であり、気圧傾度力の東西成分を例に偏微分の中央差分近似を示したが、他の方向も、また他の変数も同様にして微分は差分で近似される。

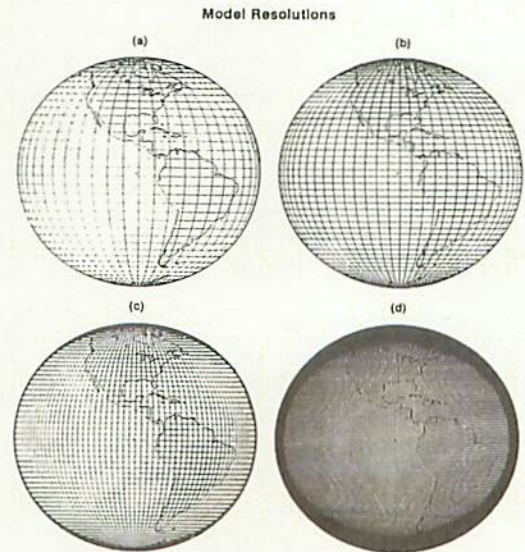


図 1 高解像度化するモデルの水平グリッド

鉛直方向には幾何学的な高度に代えて気圧を座標軸に取ったものが気圧座標系によるプリミティブ方程式系であり、地形を考慮して気圧を地上気圧で割ることで鉛直軸を 0 から 1 に正規化したものが σ 座標系である。緯度経度で表わした地球に対し、動径方向を σ で表わした半径 1 の球は大気球と呼ばれ、 σ が 0 の原点が大気上端、半径 1 の球表面が地表を表す。大気球は、幾何学的に最も単純化された大気大循環の研究領域となる。

緯度経度格子を用いた差分による微分の近似では、テラ展開の高次の項が無視されており、正確ではない。また、極に近づくほど格子間隔が狭くなるため、時間積分のタイムステップも Courant Friedrichs Levy (CFL) 条件を満たすためには限りなく小さく取る必要がある。これを極問題という。そのため、極付近では格子を間引くなどの工夫がなされたが、誤差が大きく、正しく方程式を近似していないという問題は常に付きまとうことになる。

3 2次元スペクトルモデル

開発初期の大気大循環モデルは上述の緯度経度の格子モデルが主流であったが、差分近似による誤差を解消するために、水平方向には球面調和関数 (Spherical Surface Harmonics) に展開するスペクトルモデルが格子モデルに取って代わるようになる。ス

ベクトルモデルでは、方程式に含まれる微分を解析的に誤差なく求めることができるため差分近似より優れており、波数切断による最小スケール以上の力学方程式の記述は完璧なものとなる。

たとえば気圧を例にとると、東西方向に周期的な連続関数は収束する複素フーリエ級数展開が可能である。そして、その東西方向の微分を紙の上で解析的に行うことができる。

$$p = \sum_{n=-\infty}^{\infty} p_n \exp(inx) \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} in p_n \exp(inx)$$

ここで n は東西波数であり、 p_n は波数 n のフーリエ展開係数である。実際には無限個の波数で展開することはできないので、有限の波数 N で波数切断が行われる。式が煩雑になるので詳細は省略するが、球面で定義される気象要素について、東西方向には複素フーリエ関数、南北方向にはルジャンドル倍関数 P を用いた球面調和関数 Y に展開することで、東西微分と南北微分を紙の上で解析的に行うことができる。

$$Y_l^n(\lambda, \theta) = P_l^n(\theta) \exp(in\lambda) \quad (3)$$

$$p(\lambda, \theta) = \sum_{n=-N}^N \sum_{l=|n|}^L p_{nl} Y_l^n(\lambda, \theta)$$

上の例では経度 λ 、緯度 θ で定義される気圧 p が球面調和関数 Y に展開され、その展開係数が p_{nl} である。ここで、球面調和関数の性質により、東西波数 n は N で波数切断され、南北波数を合わせた全波数 l が L で波数切断される。 $L=N$ の時、全波数 l は $|n|$ から始まるので、 $n-l$ 平面での計算領域は三角形となることから、これを三角切断という。南北波数を東西波数と同じ数だけ取るとすれば $n-l$ 平面での計算領域は菱形になるので、これを菱形切断という。

このように、すべての気象要素を球面調和関数に展開し、その展開係数の時間発展の式に変換したモデルの事をスペクトルモデルという。この場合、水平2次元のスペクトルモデルであり、水平微分は解析的に処理されるが、鉛直方向だけは依然として差分近似が用いられる。現業の天気予報モデルの波数切断は 959 の三角切断で格子点間隔は約 20km であるが、IPCC AR4 で用いられた気象研究所の気候モデルの三角切断波数は 42 で格子間隔は 280km である。

4 3次元スペクトルモデル

スペクトルモデルが大気大循環モデルの標準となった頃、NCAR の笠原⁴⁾は 1976 年の論文で、鉛直方向にもスペクトル表示を導入することを試みた。プリミティブ方程式系から導かれる鉛直構造方程式の解析解である鉛直構造関数(鉛直ノーマルモード)を計算し、3次元スペクトルモデルへの道を切り開いた(図2)。鉛直構造関数は、密度成層により決まる包絡線に沿って三角関数の振幅が上層で増幅する正規直交基底となる。寺崎⁵⁾は解析的な鉛直構造関数展開を用いて、大気大循環のエネルギースペクトルが鉛直波数の-3乗に従うことを見出している。

Vertical Structure Function

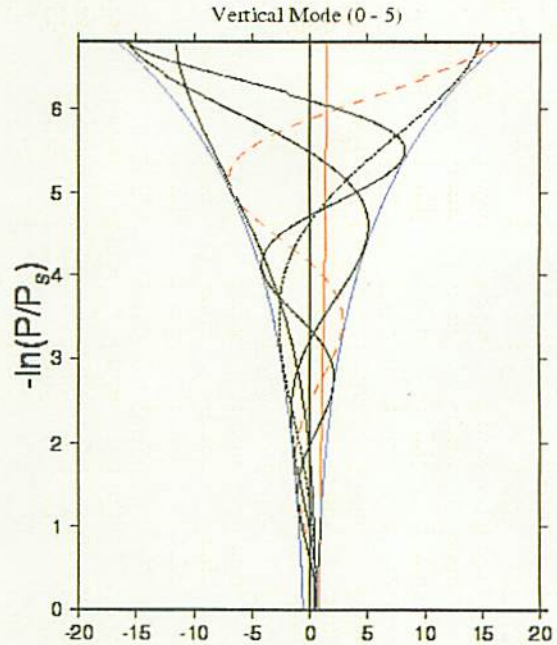


図2 鉛直構造関数 G_m^5

笠原による3次元スペクトルモデルは、東西方向には複素フーリエ関数、鉛直に鉛直構造関数 G_m 、そして南北方向には Hough ベクトル関数 Θ_{nlm} が展開基底として導入され、そのテンソル積として正規直交基底の3次元ノーマルモード Π_{nlm} が定義される。

$$\Pi_{nlm}(\lambda, \theta, \sigma) = \Theta_{nlm}(\theta) G_m(\sigma) \exp(in\lambda) \quad (4)$$

$$U(\lambda, \theta, \sigma) = \sum_{n=-N}^N \sum_{l=0}^L \sum_{m=0}^M w_{nlm} X_m \Pi_{nlm}(\lambda, \theta, \sigma)$$

ここで、 U は変数ベクトル、 nlm はそれぞれ東西、南北、鉛直波数、 w_{nlm} は3次元展開係数で時間のみ

の関数となり、 X_m は次元行列である。このように3次元のフーリエ展開を施すことで、プリミティブ方程式系の3次元スペクトル表記は以下ようになる。

$$\frac{dw_i}{d\tau} = -i\sigma_i w_i - i \sum_{jk} r_{ijk} w_j w_k + f_i, \quad i=1,2,3,\dots \quad (5)$$

ここで、 τ は無次元時間、 σ_i はラプラス潮汐振動数、 r_{ijk} は非線形相互作用係数、 f_i は粘性と非断熱加熱からなる外力である。簡単のために3次元波数 nlm を1文字の i で表記した (j と k も同様)。力学コアは単純な連立常微分方程式となり、空間微分はすべて解析的に処理される

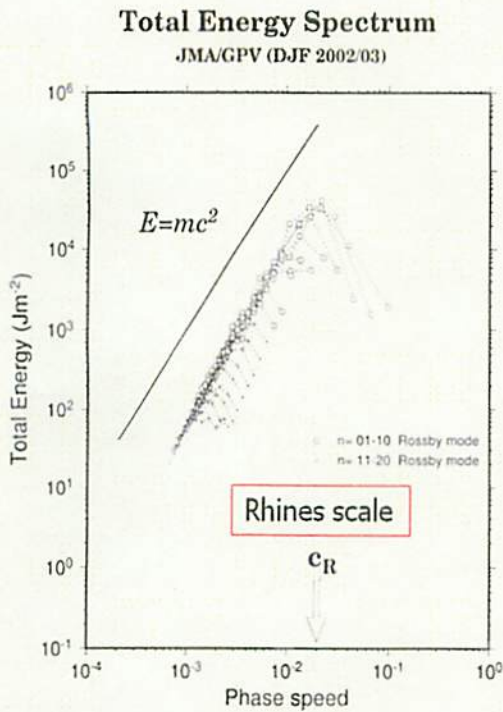


図3 3次元エネルギースペクトル⁷⁾

筆者は⁶⁾、方程式に現れるラプラス潮汐振動数を東西波数で割ったロスビー波の位相速度 c が、3次元スケールを表す指標となることに注目し、初めて位相速度空間における大気大循環の3次元エネルギースペクトル E を明らかにした(図3)。この結果は順圧成分に対する全エネルギースペクトルで、ロスビー波の分散関係式により、横軸の位相速度が小さいほど波のスケールが小さい。観測から得られたエネルギースペクトル E は c の2乗に従い、中央に明瞭なスペクトルピークを形成する。このスペクトル

ピークはエネルギーの逆カスケードが止まるラインズスケールであり、このピークを挟んで左側は(5)式非線形項が支配的な乱流領域、右側は線形項が支配的な波動領域となる。 $E=mc^2$ に従うスペクトルの傾きはロスビー波の碎波と飽和理論⁷⁾で説明される。つまり、傾圧不安定によるエネルギー供給で指数関数的に増幅するロスビー波は、渦位の南北勾配が負となる碎波条件を満たすレベルで碎波し、飽和に達する。この飽和条件から理論的に導かれるエネルギースペクトルが $E=mc^2$ に従うことを明らかにした。ここで、定数の m は単位面積当たりの大気の質量である。地衡風乱流として、カオス的に一見無秩序に生起する温帯低気圧の渦が、実は $E=mc^2$ の飽和スペクトルという美しい秩序のもとで制御されている新事実を見出した。

3次元スペクトルモデルはひとつの有力な力学コアであるが、物理過程が複雑になり、計算量も差分モデルと比べて膨大になる。多くの真実が明らかになる一方で、やがて計算機は超並列の時代を迎え、膨大な通信を必要とする3次元スペクトルモデルの開発は時代と逆行するようになった。(5)式からも明らかのように、変数の時間変化の計算に、すべての変数の積和計算が必要であるが、これが超並列計算に向かないのである。

5 全球雲解像モデル NICAM

大気大循環モデルの力学コアの変遷は、理論の発展というよりはむしろ、計算機科学の制約の中で大きく路線変更を強いられることになった。今日でも、日本や欧米諸国の大気大循環モデルのほとんどは、球面調和関数展開によるスペクトルモデルが主流である。しかし、計算機の演算速度の向上に並列化が必須となった今日、時間積分に大量のデータ通信を必要とするスペクトルモデルに対して、現行モデル以上に解像度を上げることはほとんど不可能になった。気象庁の現業モデルも、気象研究所のMRIモデルも、気候システム研究センター・国立環境研究所・JAMSTECのMIROCモデルも、水平解像度としては20kmが限界なのである。地球シミュレータを用いても、スペクトルモデルによるこれ以上の高解像度化は困難とされた。

この計算機事情による時代の流れを先取りして、地球シミュレータの稼働開始と並行して開発が進められてきたのが全球非静力雲解像モデル NICAM である。これまで大きな壁とされた20kmから10km

への解像度の向上のために、力学フレームを静力モデルから非静力モデルに改良し、雲微物理過程を導入し、正 20 面体格子の分割という手法で自動並列化を可能にした。これは気象学の歴史の中で特筆すべきブレークスルーと言える。そして、このような背景の中で、これまで地球シミュレータでしか走らなかった全球雲解像モデル NICAM が、筑波大学 CCS の PACS-CS や T2K-Tsukuba 超並列クラスター計算機でも実行可能になった。

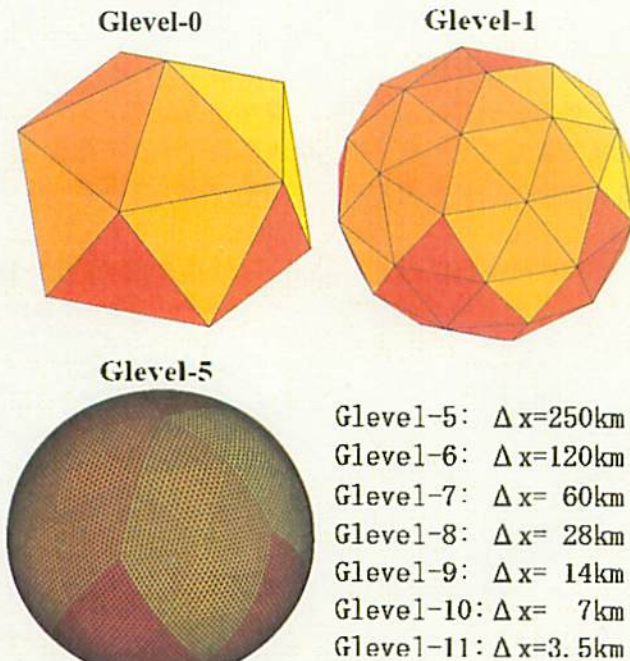


図4 NICAMの正20面体格子とその分割¹⁾

この次世代型モデルは、来るべき超並列計算機の時代に対応して、正 20 面体格子の分割という方法で自動並列化を行う力学フレームを採用している(図4)。これは、上述の緯度経度格子による極問題を回避したグリッドモデルである。雲微物理過程を含んだ方程式系は、三角形を基本とした六角形または五角形の領域をコントロールボリュームに選び、フラックス表示のバランス方程式に基づいた力学コアを採用している。

はじめに、正 20 面体格子を Glevel=0 と命名し、そのひとつの三角形を 4 つに分割した格子を Glevel=1 のように呼ぶことにすると、Glevel=5 で全球を 250km の格子、Glevel=11 で全球を 3.5km の格子で覆う力学コアが作られる。図4には Glevel と格子間隔の関係を表に示した。地球シミュレータを用いることで、現在、Glevel=11 の全球 3.5km 格子の雲解像モデルの時間積分が可能となっている。

並列化に関しては、正 20 面体の 2 つの三角形を合

わせた4角形でデータ行列としての (i, j) 領域を定義する。すると正 20 面体は 10 領域に分割されるのでこれを Rlevel=0 と命名する。この場合、10 領域を 10 コアで並列化すると最も効率が良いが、その約数の 5, 2, 1 コアで並列化することも可能である。以下同様に一つの三角形を 4 分割することで Rlevel=1 は 40 領域、Rlevel=2 は 160 領域、Rlevel=4 は 2560 領域のように分割される。格子と領域の細分化は Glevel と Rlevel の 2 つのパラメータで決定し、分割された領域に対して並列数を指定すれば自動並列化が行われる。

筑波大学 CCS では、格子間隔 250km の Glevel=5 のモデルを Rlevel=0 の 10 領域に分割し、単体の PC で実行することから始め、順次、1, 2, 5, 10 コアに並列化し、実行結果を確認しながら Glevel と Rlevel を段階的に高めていった。低解像度の 250km 格子モデルを単体 CPU で 1 日時間積分するには約 1 時間必要である。NICAM は全球雲解像が売りであるが、雲微物理過程は Glevel=9 の 14km 格子から導入される。一般的な積雲対流パラメタリゼーションによる低解像モデルのオプションもあり、初心者や学生にも大変親切にプログラムされている。

筑波大学 CCS に設置された T2K-Tsukuba (図5) は Quad-Core AMD Opteron プロセッサ搭載、648 ノード(10368 コア)の超並列機で、総主記憶容量 20TB、理論ピーク性能が 95T フロップス、新規開発 4-way 計算ノードを 4 本の 4xDDR Infiniband で結合し、ノード間通信性能 8GB/秒(単方向)を実現している。その内の 160 ノード(2560 コア)を使うことで、Rlevel=4 の 2560 領域に 2560 コアの CPU を効率良く充てることが出来る。この計算機環境で、Glevel=10 の 7km 格子の実行が可能となった。1 日の時間積分に要した時間は IO も含めて約 10 時間である。演算速度の実行効率はピーク性能比 3.3% と推定された。ベクトル機の地球シミュレータではピーク性能比が



図5 筑波大学 CCS の T2K-Tsukuba システム

30~40%ということなので、特にチューニングを行っていない現時点では、地球シミュレータの10分の1程度である。ただし、フルバイセクションバンド幅の Fat-Tree 構造の並列通信ネットワーク上に統合された、最大アクセスバンド幅 12GB/s の Lustre 共有ファイルシステムが全ての計算ノードからいつでも均等にアクセス可能なため、2560 領域で準備された初期条件や境界条件のステージングが不要であり、待ち時間がない時はジョブ投入と同時に時間積分が開始される。この点は大変便利である。

筑波大学 CCS の T2K-Tsukuba システムで実行された NICAM Glevel-10 の雲画像を図 6 に示した。赤道付近の積雲対流クラスターは偏東風に流されて西進し、時折、その中から台風が発生し北上する。中高緯度の温帯低気圧は偏西風に流されながら大きな渦巻となり、梅雨前線の上空でジェット気流が形成される。連続動画にすることで、大気中で生起する様々な現象が、超並列計算機の中で緻密に再現されてゆく、その様は圧巻であり、大気科学における新しい時代の幕開けを感じさせる。

我々の研究グループでは、NICAM の大気中で発生した熱帯低気圧（台風）やブロッキング、温帯的圧、そして、北極海上で長期間迷走する北極低気圧に注目しながら、現在解析を進めているところである。また、新たに得られた水平風と鉛直流の全球データを解析することで、寺崎⁸⁾は運動エネルギーの波数スペクトルが総観規模では3乗則に従い、それ

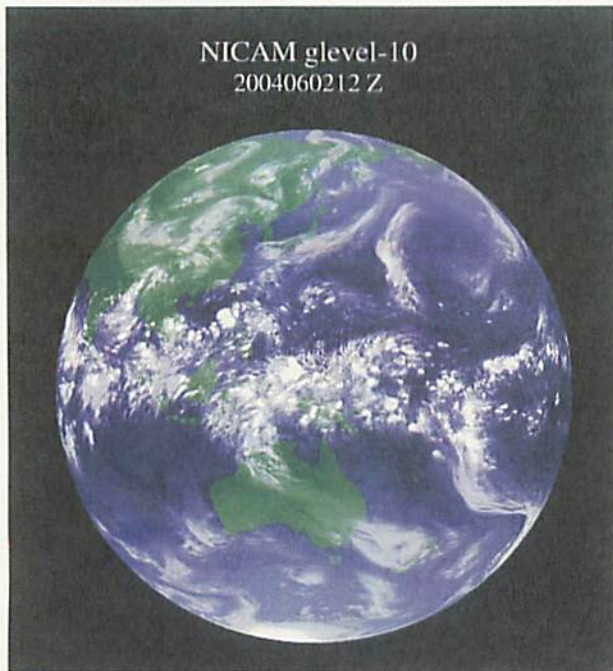


図 6 筑波大学 CCS の NICAM による全球雲画像

がメソスケールでは $-5/3$ 乗則にシフトする事を示した。そして、鉛直流の運動エネルギースペクトルは白色スペクトルとなることを見出している。これは全球の雲量をコントロールする重要な発見である。

6 おわりに

大気大循環モデルの力学コアは、スペクトルモデルの時代から、正 20 面体分割格子モデルの時代に移りつつある。水平解像度 10km の壁が NICAM の登場で打ち破られ、大きなブレークスルーが成し遂げられた。今後、神戸で完成する京速コンピュータでは、多くの研究計画の準備が着々と進んでいる。これまで見たこともないような大気大循環の映像が、この計画により実現することであろう。この度、筑波大学 CCS のスカラー計算機により実行された NICAM は、時代の流れを追いかけるように、次世代型大気大循環モデルの普及に貢献している。今後の NICAM のさらなる発展が期待される。

引用文献

- 1) Satoh, M., Matsuno, T., Tomita, H., Miura, H., & Nasuno, T.: Nonhydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM) for global cloud resolving simulation. *J. Computational Physics*, 227 (2007) 3486-3514.
- 2) Phillips, N. A.: The general circulation of the atmosphere: A numerical experiment. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 82 (1956) 132-164.
- 3) 新田尚: 大気大循環論, 東京堂出版 (1980) 439 pp.
- 4) Kasahara, A.: Normal modes of ultra-long waves in the atmosphere. *Mon. Wea. Rev.*, 104 (1976) 669-690.
- 5) Terasaki, K. & Tanaka, H. L.: An analysis of the 3-D atmospheric energy spectra and interactions using analytical vertical structure functions and two re-analyses. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85 (2007) 758-796.
- 6) Tanaka, H.L. & Kung, E. C.: Normal mode energetic of the general circulation during the FGGE year. *J. Atmos. Sci.*, 45 (1988) 3723-3736.
- 7) Tanaka, H. L., Watarai, Y. & Kanda, T.: Energy spectrum proportional to the squared phase speed of Rossby modes in the general circulation of the atmosphere. *Geophys. Res. Letters*, 31(13) (2004) 13109.
- 8) Terasaki, K., Tanaka, H. L. & Satoh, M.: Characteristics of kinetic energy spectrum of NICAM. *SOLA*, 5 (2009) 180-183.