

# 地球シミュレータ計画と大気海洋モデル開発の現状

## Current status of Earth Simulator project and development of atmosphere-ocean model

谷 啓二, 地球シミュレータ開発特別チーム, 日本原子力研究所, 横浜市金沢区昭和町 3173 番 25, 海洋科学技術センター 横浜研究所内, tanik@fusion.naka.jaeri.go.jp  
高橋桂子, 地球IT研究システム, 横浜市金沢区昭和町 3173 番 25, Takahashi.Keiko@nasda.go.jp  
Keiji Tani, Research and Development Team for Earth Simulator, Japan Atomic Energy Research Institute  
Keiko Takahashi, Frontier Research System for Global Change,  
3173-25 Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama, 236-0001 Japan

The Science and Technology Agency of Japan has proposed a project to promote studies for global change prediction by an integrated three-in-one research and development approach: earth observation, basic research, and computer simulation. As part of the project, an ultra-fast computer, the "Earth Simulator (ES)", with a sustained speed of more than 5 TFLOPS for an atmospheric circulation code, is being developed. Current status and preliminary results of the ES system are described. The most important application for the ES is an atmosphere-ocean coupled model. Current status of the model development at the Frontier Research System for Global Change is also summarized.

### 1. 地球シミュレータ計画の現状

(谷 啓二)

#### 1. 地球シミュレータ計画とは

国連環境計画 (UNEP) と世界気象機関 (WMO) によって 1988 年に設立された「気候変動に関する政府間パネル (IPCC)」は、1995 年の第二次レポートで

- ・人類の活動による地球温暖化が既に始まっている。
- ・このままでは、21 世紀末には平均気温が 1 ~

3.5 上昇し、海面は 50cm 上昇する。

と衝撃的な予測を発表した。さらに、2000 年 3 月には、上昇温度を 1.8~3.8 に上方修正した。地球環境の変動は、自然災害からの国民の尊い命や財産の保全から、グローバルな大気汚染や地球温暖化など人類の持続的発展の可能性に至るまで極めて重大な問題としてクローズアップされている。

この地球環境変動の「予測」が可能になれば、自然災害に対して適切な対策を事前に講じることでその被害を最小限に食い止める事が出来るばかりでなく、地球 (ガイア) と如何に共生し人類の持続的発展を実現するかの指針が得られ、それに沿った水資源、エネルギー資源の適切な管理や農林、水産、流通など、我々の安定的な社会経済活動に対しても計り知れない恩恵となる。その実現に向けて、1996 年 7 月の科学技術庁の航空・電子等技術審議会において、地球温暖化予測等の戦略目標とそれらの目標を達成するため、「プロセス (基礎科学) 研究」、「観測」及び「計算機シミュレーション」の三位一体の研究展開の重要性が報告された。地球シミュレータ計画

は、このシミュレーション研究に不可欠な超高速計算機と応用ソフトウェアを整備するプロジェクトとして平成 9 年度に開始されたものである。

#### 2. 地球環境シミュレーションのターゲット

前述の航空・電子等技術審議会の報告を受け、1997 年に同じく科学技術庁において計算科学技術推進会議の地球シミュレータ部会が開催された。その中で、省庁を越えた計算地球科学分野の多数の研究者により、地球シミュレータの開発とその利用について議論された。その応用の主要なものとして、以下のものが挙げられている。

##### (1) 大気・海洋科学への応用

- 1) 高分解能グローバルモデルによる地球温暖化やオゾンホール等のグローバルな環境変動の高精度予測。
- 2) 高分解能リージョナルモデルによるエルニーニョやアジアモンスーン等の地域的な気候変動の高精度予測。
- 3) 高分解能ローカルモデルによる台風、集中豪雨、マイクロバースト、タンカー事故時の重油拡散等の気象災害発生の高精度予測。

##### (2) 固体地球への応用

- 1) グローバルダイナミックモデルによるコア・マントル・地殻の固体地球全体の挙動の解明。
- 2) 日本列島域の地殻・マントルの挙動の解明。
- 3) 地震発生シミュレーション。

#### 3. 地球シミュレータの具備すべき要件

### 3.1 計算機性能

ここで、大気大循環モデルを例に、地球シミュレータに求められる種々の要件について考えてみる。

従来、地球温暖化予測のグローバルモデルでは、数100kmのメッシュで全球を分割していたのに対して、予測の高精度化のためには、10km程度のメッシュに分解能を高くする必要があることが数多くの気候シミュレーション研究者から指摘されている。また、地域モデルで集中豪雨などの気象災害を予測する場合、従来の20-30kmメッシュから1kmメッシュ程度まで高分解能化しなければ、気象災害に重要な役割を果たす数kmのスケールの積雲を十分シミュレーションできない。

これらの場合、経度、緯度両方向に一桁以上、鉛直方向に数倍、それぞれ分解能を向上させるとして、全体では、数百倍のメッシュ数になる。さらに、物理モデルの高度化に伴ないメッシュ点上で取り扱う変数も増大することから、必要主記憶量は現行の1000倍以上となる。また、一般的に、空間メッシュが細くなるに伴ない、時間積分間隔も1桁程度短くする必要があることから、計算時間も全体で現行の数千倍必要となる。

以上から総合的に判断して、地球シミュレータ計画開始当時の気候・気象分野の典型的な現用計算機(CRAY C90)と比べ、**主記憶容量、計算速度のいずれも1000倍以上の能力**が求められているものと考えられる。CRAY C90の大気大循環モデルでの実効速度は4-6GFLOPSであることから、地球シミュレータの実効性能としては、5TFLOPS以上である必要がある。

### 3.2 計算機タイプ

地球シミュレータの完成時期である2002年の半導体技術をもってしても上述のような現用計算機の1000倍以上の能力を持つ計算機を単一のプロセッサで構成することは不可能であり並列計算機とならざるを得ない。世界の並列計算機は、並列計算機を構成する要素計算機のタイプにより、2つに大別される。一つは、汎用のキャッシュベースのマイクロプロセッサを非常に数多く用いるスカラ超並列計算機と、ベクトル計算機を比較的に中小規模に並列化するベクトル並列計算機である。

米国立大気研究センター(NCAR)では、これらタイプの異なる種々の並列計算機上で彼らの大気大循環モデル(CCM2)の実効効率(ピーク性能に対する実効性能の比)を比較した<sup>(1)</sup>。その結果は、

ベクトル並列計算機で30~40%。

スカラ超並列計算機で2~7%程度。

これは、大気大循環シミュレーションのような流体モデルにおいては、ベクトル計算機がスカラ計算機にくらべ優位である事を如実に示しているものである。以上のことから、**地球シミュレータはベクトル計算機を要素計算機とする並列計算機**であることが求められていると判

断された。

## 4. 地球シミュレータ・システム

地球シミュレータ・システムは、ハードウェアとOS、コンパイラ、運用・管理ソフトウェア(センタルーチン)等からなる基本ソフトウェアから主として構成される。以下、各システムの概要をまとめる。

### 4.1 地球シミュレータのハードウェア

前述の様に、NCARのCCM2を用いた検討結果では、当時のベクトル並列計算機で30%程度の実効効率が得られているが、地球シミュレータは、それに比べ並列数も格段に多くなる事から、実効効率は15~20%に低下すると仮定して、実効速度5TFLOPSを実現するために必要なピーク性能として、30TFLOPS以上は必要となる。一方、シミュレーションモデルの高分解能化のために必要な主記憶容量としては、全球大気10kmメッシュでは、経度方向4000点、緯度方向2000点、鉛直方向150点、各メッシュ点上の変数は問題にも依存するが倍精度で200-400個、海洋もほぼ同程度を仮定して、

$4000 \times 2000 \times 150 \times (200 - 400) \times 2 (\text{大気} + \text{海洋}) \times 8 (\text{倍精度}) = 4 \sim 8 \text{ TB}$

が必要になる。

地球シミュレータの完成が見込まれる2002年においても、ピーク性能30TFLOPS以上、主記憶(メモリ)8TB以上を単一プロセッサで実現する事は到底不可能であり、分散並列化せざるを得ない。問題は、これらCPUとメモリをどのように分散並列化するかにある。計算機の並列化方式は以下の2つに大別される。

共有メモリ方式：大容量のメモリを複数のプロセッサで共有する方式。

分散メモリ方式：小容量のメモリとプロセッサで独立した計算機(計算ノード)を構成し、複数の計算ノードを相互に高速ネットワークで結合、一体化する方式。

共有メモリ方式は、メモリのプロセッサへのデータ供給能力でシステム全体の大きさが制限され、最新の半導体技術を用いても、100GFLOPS程度が限界である。一方、分散メモリ方式のシステム全体の理論性能(ピーク性能)は、要素計算機のピーク性能×並列数であるため、原理的にはネットワークで接続する計算ノードの数(並列数)を増やしていけば幾らでもシステムを大きくできる。しかし、並列数が多くなり過ぎると、システムのピーク性能に対して、実効性能はあまり伸びなくなる。これは、並列計算機の計算ノード間のデータ通信時間や負荷のアンバランス等に起因する計算機のアイドル時間の増大によるものである。これらの問題に対する並列処理技術の進展から判断して、分散メモリ方式の並列数は1000未満が現実的である。

計算ノードを並列に接続するためのネットワークには、メッシュ型、トラス型、クロスバ・スイッチ型など種々の方式が提案されている。地球シミュレータでは、クロスバ・スイッチ型の一つである、単段クロスバ・ネットワークを採用する。その内容は後述するが、この方式は、他の方式に比べ非常に高性能である一方、非常に多くの高速スイッチ（約並列数の二乗）を必要とする。この単段クロスバ・ネットワークに必要な半導体技術から判断して、並列数は、やはり高々1000程度である。分散メモリの並列数を1000以下とした場合、

$$1 \text{ 並列当たりの計算ノード性能} \geq 30\text{TFLOPS} / 1000 \\ = 30\text{GFLOPS}$$

が必要となる。これまで、ベクトル計算機は、クロックサイクルを小さくすると共に、ベクトル演算器のセット数を多重化することにより高性能化を図ってきた。従来のベクトル計算機では、この多重度は多数のLSIチップ（数十個）を用いて実現されて来たが、これがベクトル計算機の高性能化の障害の1つになっていた。地球シミュレータでは、最新のLSIの高密度化技術を用いて、数十個のLSIを1つの超集積回路(ULSI)に収める1チップの高性能ベクトル計算機の開発に成功した。しかし、あまり多くのセットの演算器を1チップに詰め込むことの半導体技術上の制限から、単一のベクトルプロセッサとしては10GFLOPS程度（現在、~2GFLOPS）が限界であり、単一プロセッサで計算ノード（PN：Processor Node）を構成することは困難であった。そこで、地球シミュレータでは、複数のベクトル型要素計算機を共有メモリで密に結合させ1つのPNを構成し、そのPN数百台を結合ネットワーク（IN：Interconnection Network）で粗に結合させた（分散メモリ型）システムを採用する事にした。以上、ハードウェアの概要をまとめると、

- (1) **アーキテクチャ**：ベクトル計算機を要素計算機とし、8台の要素計算機を共有メモリで密結合して計算ノードを構成。その計算ノード640台をネットワークで粗結合した、システム全体では分散メモリ型並列計算機。
- (2) **処理性能**：ピーク性能40TFLOPS、（実効性能は大気大循環シミュレーションで5TFLOPS以上。）
  - ・要素計算機性能：8GFLOPS
- (3) **主記憶容量**：10TB
  - ・ノード内共有メモリ：16GB
- (4) **結合ネットワーク**：単段クロスバ・ネットワーク。

これらの地球シミュレータのハードウェアの概要を表わしたものがFig.1である。

地球シミュレータは、多様な応用ソフトウェアに利用される。このような多種のソフトウェアの並列化に柔軟に対応するため、また、多数のユーザに効率よくシス

テムを提供するためには、全てのノードが平等にネットワーク接続される（任意のノード間が中継ノードを経ることなく直接的に接続される）必要がある。このため、地球シミュレータでは、これらの条件を満足する結合ネットワークとして単段クロスバ・ネットワークを採用する。これは、Fig.1に示すように、各ノードからの入出力ライン（バー）を交差させ、各交点に高速スイッチを設けたものである。任意の2つのノード間のデータ転送は、データ出力のバーとデータ入力バーの交点のスイッチ一つをオンにするだけでデータ転送路が開ける。また、すべてのノードが平等でネットワークの中の接続位置に差異がないことから、必要ノード数を確保する場合、どのようなノードの組み合わせも可能であり、システムの運用に極めて柔軟に対応できる。そのデータスループットは、1ノード、1方向（IN、或いはOUT）あたり16GB/s（ギガビットEthernetの128倍、1ノードの処理速度の1/32）の高速性能の実現を目指している。このように、このネットワークは、膨大なハードウェアのリソースを必要とする。

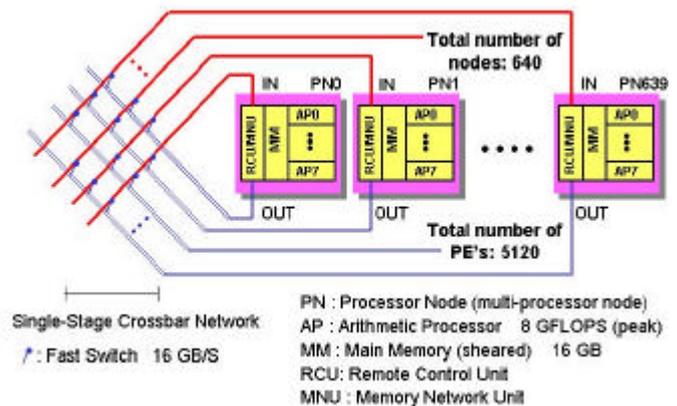


Fig1 Hardware system of the Earth Simulator.

#### 4.2 地球シミュレータの基本ソフトウェア

基本ソフトウェアは、ハードウェアとユーザの間を取り持つものであり、ハードウェアから近い順に、オペレーティング・システム（OS）、コンパイラ、運用・管理ソフトウェア（セントラレーチン）と階層構造を成している。地球シミュレータにおいては、基本ソフトウェアの開発は、既存のベクトル型並列スーパーコンピュータ用の標準機能をベースに、地球シミュレータに特有な機能を付加することで開発を進めた。以下、その開発の重要課題に触れる。

- (1) OS（UNIXベース）：地球シミュレータでは、メーカーが自社製品のために開発を行っているものを極力流用し、地球シミュレータに特有な機能に限定して開発する。地球シミュレータでは640台のノードに磁気ディスク装置が分散接続されるため、計算の入出力（I/O）も並列処理となる。これらの並列ファイルユーザになる

べく意識させることなく、単一ファイルイメージで利用できるようにするための並列 I/O 機能が最重要開発項目である。

(2)コンパイラ：地球シミュレータは、Fig.2に示すように、ベクトルレジスタ - 共有メモリ - 分散メモリとメモリに階層構造を持っている。システムの性能を最大限引き出すためには、このメモリ構造を十分考慮した並列処理が必要になる。このため、地球シミュレータでは、並列プログラミング言語として、

- 共有メモリ並列化：自動並列化（マイクロタスク）  
OpenMP、MPI（Message Passing Interface）  
HPF（High Performance Fortran）
- 分散メモリ並列化：MPI、HPF

が用意される。Fig.2にこれらの可能な組み合わせをまとめる。特に、HPFについては、我国では計算機ベンダーとユーザの合同検討会（JAHPF：Japan Association for HPF<sup>(2)</sup>）において拡張仕様を検討し、HPF フォーラムに対してその標準化を提言していく活動を行なっているが、地球シミュレータでは、この JAHPF 拡張仕様さらに計算地球科学に必要な機能を追加する。

(3)運用センタールーチン：地球シミュレータは数千台の全計算機を同時に1つのジョブで使用することもできるし、また、計算機を複数の中小グループに分割してそれらを多数のユーザで同時に利用することもできる。このように、必要並列数や CPU 時間の異なる多数のジョブを、遊んでいるプロセッサ数を極力少なくし、システム全体の利用効率を良く制御するための高機能スケジューラや、システムの稼動状況、ユーザのジョブの現況（実行待ち、実行中など）のモニタ機能など新規に開発した。

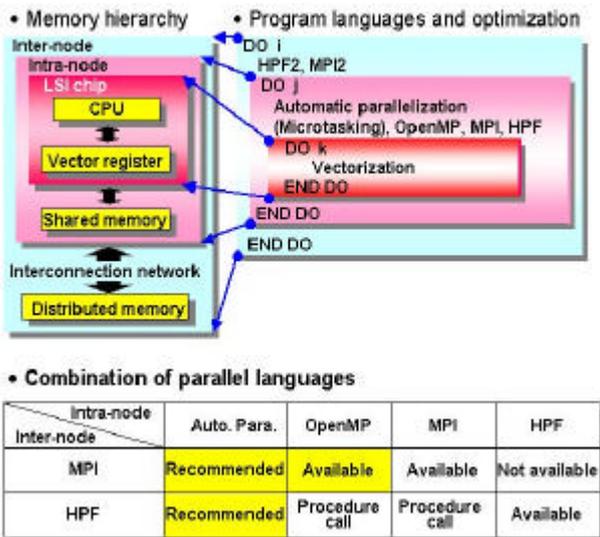


Fig.2 Memory hierarchy and parallel programming language for the Earth Simulator.

## 5 . 地球シミュレータ開発の現状

### 5.1 地球シミュレータ開発スケジュール

1997年度から1999年度にかけ、ハードウェア、基本ソフトウェアの設計、試作が実施された。これまで、建家、電源、空調機などの周辺設備の整備、結合ネットワークケーブルの布設と大容量記憶装置の据付けが完了した。現在(2001年12月)2002年2月末の完成を目指し、ハードウェアの製作、基本ソフトウェアの開発・試験、プロセッサの性能評価及び応用ソフトウェア開発が併行して進められている。2001年から2002年にかけての開発スケジュールの概要をTable 1に示す。

Table 1 Schedule of the ES development in 2001 and 2002

Items	2001				2002
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q
1 Functional evaluation of OS, compiler and hardware systems by using a single CPU, a single node, multi-nodes	[Timeline bars]				
2 Performance evaluation a single CPU, a single node, multi-nodes	[Timeline bars]				
3 Installation of mass-storage system	[Timeline bars]				
4 Installation of IN cables	[Timeline bars]				
5 System disks, SCCS/CCS, IDCS	[Timeline bars]				
6 Installation of PN's and IN's	[Timeline bars]				
7 Test of PN's and IN's	[Timeline bars]				
8 Start of operation					★

### 5.2 ハードウェア試作開発

地球シミュレータ開発の最大の課題は、省スペース、省エネルギー、省コストである。それには、要素計算機の高性能化と複数の要素計算機で構成される計算ノードのコンパクト化が不可欠であり、半導体技術、パッケージング技術、実装技術、冷却技術の全てに亘り21世紀初頭の最先端技術が要求される。このため、主として、以下の5項目にわたり試作開発が実施された。その概要を纏める。

(1)LSI 試作

- ・クロックサイクルの改善 150MHz 500MHz
- ・高密度 LSI の開発：0.15 μm の CMOS 技術と8層の銅配線。1千万トランジスタ/cm<sup>2</sup>の高密度化。
- ・チップサイズ的大型化（約 2cm x 2cm）

これらの技術開発を行い、1チップの高速ベクトルプロセッサ（OCVP：One-Chip Vector Processor）を開発した（これまで、地球シミュレータの1プロセッサと同じ計算機性能を実現するためには、SX-4で148個、SX-5でも32個のLSIチップが必要であった。）Fig.3に1チップで構成される地球シミュレータのベクトルプロセッサボードとその写真を示す。

(2)パッケージ技術

LSIチップのトランジスタ密度の増大に関連し、LSIチップの基盤へのパッケージが次の重要な課題

となる。地球シミュレータでは、線幅と線間が各々 25  $\mu\text{m}$  でコア 6 層、その両側に 4 層のビルドアップ基盤を開発した。上記の LSI はこの基盤に約 5000 本のピンで埋め込まれる。

(3) LSI 冷却技術

上記の LSI からは、最大約 170W の発熱がある。地球シミュレータでは、計算機システム整備の容易性から空冷方式を採用する。このため、高密度の発熱を空气中に効率よく放出するために、沸騰冷却技術を用いた新しい熱シンクを開発した。Fig.3 にその外形を示す。

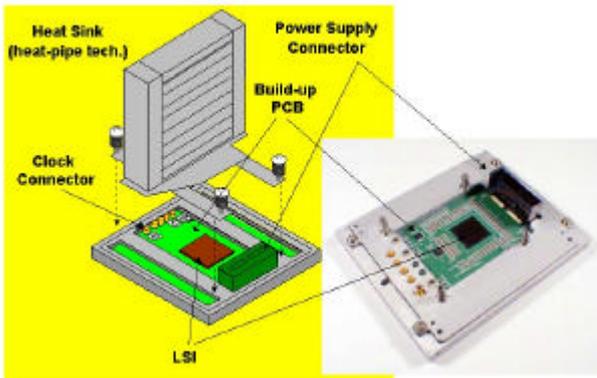


Fig.3 New vector board for the ES

(4) ボード間接続

ノード当たりの 8 個の CPU と 32 個のメインメモリユニット (256 ポート) 間のデータの高スループットを実現するために、両者間を直径約 0.7mm の細径同軸ケーブル約 15,000 本で接続する。このため、細ピッチ、弱い力で脱着できる新しい多ピンコネクタとケーブルを新たに開発した。

(5) ノード間結合

前述のように、ノード間は 1.6GB/s の超ブロードバンドのネットワークで結合される。この高速性能は、最新の技術をもってしても、1 個のスイッチで実現する事は不可能であるため、129 本のケーブルと同数のスイッチを用いて並列データ転送する事により実現する。その結合形態を Fig.4 に示す。ノード / IN スwitch 間は、最大 40m の 2 ペアのメタルケーブルで接続される。この長距離データ通信に十分な SN 比を確保するため、逆位相信号によるノイズのCOMMONモードカットの手法と信号の低減衰ケーブルの開発を行った。ケーブルの総本数は  $640 \times 129 = 82,560$  本、総ケーブル長は約 2,890km、ケーブルだけの総重量でも 217t に及ぶ。因みに、この総ケーブル長は、北は知床から南は石垣島までの、日本の南北両端間の距離にほぼ匹敵する。

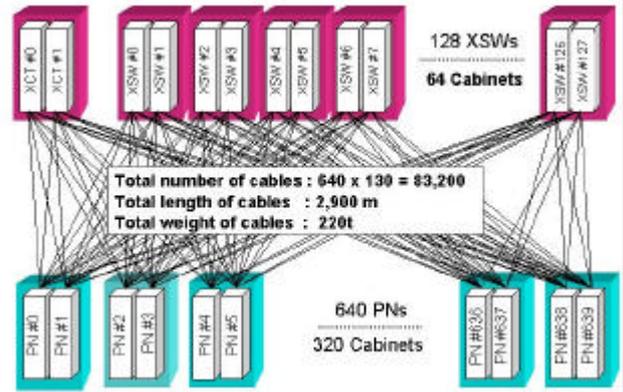


Fig.4 Configuration of IN-PN connection.

5.3 地球シミュレータ用単一ロセッサの性能評価

地球シミュレータ用ワンチップベクトルプロセッサ (OCVP-ES) の単一CPUの性能を以下の一連のテストで評価した。

(1) カーネルループテスト : AGCM 5.4 (Atmospheric General Circulation Model V. 5.4)<sup>(3)</sup> および POM (Princeton Ocean Model)<sup>(4)</sup> から以下の 3 グループ 25 のカーネルループを抽出した。

- 1) グループ A : 6つの単純カーネル・ループ
- 2) グループ B : 8つのIF 分岐およびintrinsic function callを含むカーネル・ループ
- 3) グループ C : 11つの間接アレーアクセスを含むカーネル・ループ

テスト結果をFig.5に示す。結果は、概念設計の一環で地球シミュレータの性能評価のため開発されたソフトウェア・シミュレータGSSS<sup>(5)</sup>を用いて行われた基本設計における予測性能との比較で示されている。今回行われた実測結果は、殆どのケースで基本設計の予測性能を最大20%程度上回る。特に、グループB、C等の複雑なカーネルループで良い結果が出ている。

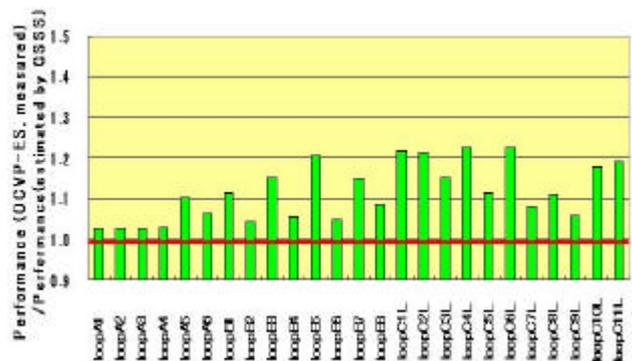


Fig.5 Results on kernel loop test for OCVP-ES.

(2) LINPACK ベンチマークテスト;

- 1) N=100,
- 2) N=1000,

### 3) Parallel

テストの結果を既存のベクトルプロセッサの結果と共にTable 2に示す。全てのケースでOCVP-ESは他のプロセッサの性能を上回っている事が分かった。概して、ほぼ予想通りの結果が得られている。

Table 2 Results on LIMPACK Benchmark test for single OCVP-ES.

vector processor	N=100			N=1000			parallel		
	P.P. (Gflops)	S.P. (Gflops)	eff. (%)	S.P. (Gflops)	eff. (%)	S.P. (Gflops)	eff. (%)		
SX-5	8.0	9.87	10.7	7.28	91.9				
VPP5000	9.6	1.16	12.0	8.78	91.5	9.48	98.7		
OCVP-ES	8.0	1.34	16.7	7.62	95.2	7.98	99.8		

P.P.: Peak performance  
S.P.: Sustained performance  
eff.: efficiency = S.P./P.P.

### (3) 実アプリケーションテスト

以下の3つの実アプリケーションを用いた。

#### 1) NJR-SAGCM :

- CCSR/NIES AGCM5.4 を参考に開発した大気大循環モデル。
- 基本方程式：プリミティブ方程式。
- 座標系：球座標，座標。
- 水平方向離散化：スペクトル法 (FFT 及びルジャンドル変換)。
- 垂直方向離散化：Arakawa and Suarez(1983)。
- 時間積分：セミ・インプリシット法、リーブ・フロッグ法、Asselin時間フィルタ。

#### 2) 白山モデル：

- 回転環状流中の非正常バロクリニック波シミュレーション。
- 3次元非圧縮・非定常ナビアーストックス方程式 (含む温度方程式)。
- 時間積分：オイラー・インプリシット法。

#### 3) vdb (or STATE) :

- LD(Local Density)近似あるいは GG(Generalized Gradient) 近似密度汎関数による第一原理分子動力学法。
- ウルトラ・ソフト擬似ポテンシャル法による平面波展開。

上記の実アプリケーションに関する OCVP-ES と SX-5 性能比をベクトル化率に対してプロットしたものが Fig.6 である。NJR-SAGCM と vdb は、ベクトルチューニングレベルが高い。これらの場合、OCVP-ES の性能は SX-5 と同程度のとなる結果が得られている。一方、白山モデルは、ベクトル化率が比較的低い。この場合、OCVP-ES の性能は SX-5 に比べ 50%ほど良好な結果が得られている。

以上、SX-5に比べOCVP-ESは同じピーク性能 ( 8 GFLOPS )

であるが、全般に良い結果が得られている。これは、OCVP-ESのクロックサイクルが2ナノ秒とSX-5のそれ ( 4 ナノ秒 ) の半分になっており、そのベクトル化による高性能化が改善されているためと考えられる。

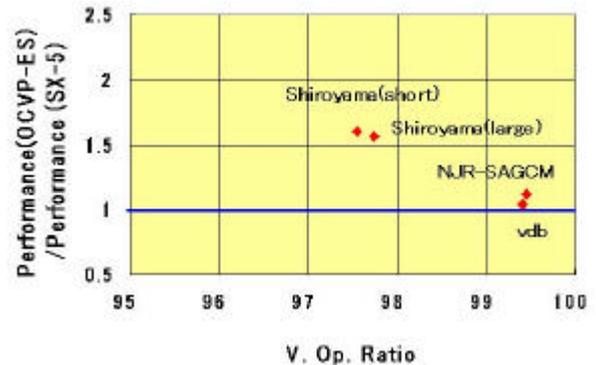


Fig.6 Results on real applications for OCVP-ES.

### 5.4 地球シミュレータ用単一ノードの性能評価

地球シミュレータのノード内並列の性能を以下の2つのテストで評価した。

#### (1)LINPACK ベンチマークテスト

N=1000。

比較のため SX-5 のデータとともに 1、2、4、8 PE (プロセッサエレメント) に関するそれぞれの結果を Table 3 に示す。

Table 3 Results on LIMPACK Benchmark test for 1 node.

N=1000	1CPU		2CPU		4CPU		8CPU		
	P.P. (Gflops/CPU)	S.P. (Gflops)	eff. (%)	S.P. (Gflops)	eff. (%)	S.P. (Gflops)	eff. (%)		
SX-5	8	7.3	91	11.2	70	19.2	60	32.6	51
E.S.	8	7.6	95	13.6	85	24.3	76	43.2	68

P.P.: Peak performance  
S.P.: Sustained performance  
eff.: efficiency = S.P./P.P.

#### (2)実アプリケーションテスト

地球シミュレータの実効性能 5 TFLOPS を実証するために前述の NJR-SAGCM を地球シミュレータのアーキテクチャに最適化した AFES/5TF (AGCM for ES) 空間分解能 T79L24、T159L24、T319L24 に関して 1、4、8 PE の各結果を示したのが Table 4 である。いずれの場合も、ノード内並列化は良く、PE 数の増加による性能劣化は非常に小さい。T79L24 では効率率は 35% と小さいが、これは問題規模が小さいためベクトル長が 100 以下と短いためである。問題規模が大きくなると共に、ベクトル長が長くなり、T319L24 では、効率が 60%まで改善されている。なお、地球シミュレータ

の最適ベクトル長は250程度であるため、まだ効率の改善の余地は残されている。

単一CPUと同様に、SX-5に比べ、地球シミュレータでは、クロックサイクルの改善、メモリアクセスレイテンシーの改善等で、全般的に良好な結果が得られている。

Table 4 Results on real application Afes/5TF for 1 node.

T79124 [sec]				(%)		(%)	
No. of PE	User Time	Speed-up	GFLOPS	eff.	Para. ratio	VLEN	
1	66.81	1.00	2.96	37.03	-	96.6	
4	17.32	3.88	11.42	35.70	98.76	94.7	
8	9.03	7.40	21.52	34.26	98.85	92.6	

T159124 [sec]				(%)		(%)	
No. of PE	User Time	Speed-up	GFLOPS	eff.	Para. ratio	VLEN	
1	208.32	1.00	3.88	48.53	-	118.9	
4	68.80	3.90	15.14	47.32	99.14	117.8	
8	35.28	7.61	29.53	46.14	99.26	117.1	

T319124 [sec]				(%)		(%)	
No. of PE	User Time	Speed-up	GFLOPS	eff.	Para. ratio	VLEN	
1	1253.42	1.00	4.87	60.93	-	160.0	
4	318.46	3.94	19.18	59.95	99.46	159.3	
8	162.16	7.73	37.68	58.07	99.50	158.2	

### 5.5 地球シミュレータの据付調整の現状

昨年末の建家の完成を待って、前述の8万本、総延長3,000kmに達するINケーブルの敷設を開始し、5月末に完了した。9月から、PN、IN筐体の搬入が開始された。IN筐体の据付は10月末に完了した。PN筐体の据付調整は12月末に完了の予定である。Fig.7に、9月のPN筐体搬入直後の写真を、Fig.8に10月末にIN筐体の搬入をほぼ完了した時点での写真を示す。



Fig.7 Installation of PN cabinets in Sept. 2001.



Fig.8 Installation of IN cabinets in the end of Oct. 2001.

また、Fig.9に想定される地球シミュレータ完成のイ

メージを示す。地球シミュレータ建家は3層から成る。第1層に空調機器、無停電電源が設置される。第2層部はフリーアクセスとして、前述の全長3,000kmに達するネットワークケーブルを納めるとともに計算機システムに冷気を分配する空調ダクトスペースとしても利用される。第3層部には、計算ノード筐体、単段クロスバ・ネットワークの高速スイッチを収納した結合ネットワーク筐体、磁気ディスクシステムおよび大容量記憶装置(カートリッジテープライブラリシステム)を設置する。建家の大きさは、約50m×65mである。

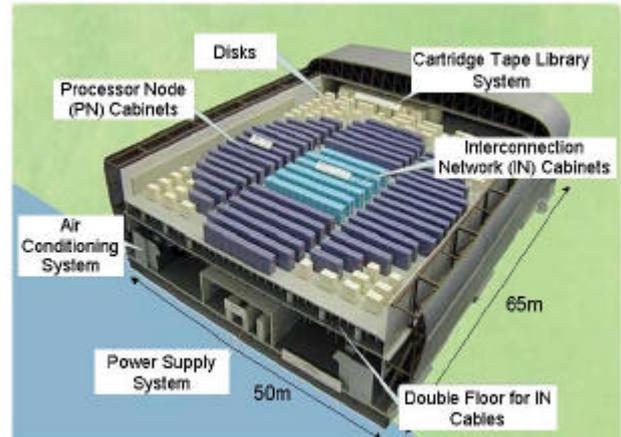


Fig.9 Bird's-eye view of the Earth Simulator system

### 7. まとめ

- (1) 地球環境変動の高精度予測を目的とした、現用計算機(開発開始時)の1000倍の処理能力を持つ「地球シミュレータ」が2002年2月末の完成を目指して開発されている。現時点では、ほぼスケジュール通りである。
- (2) 地球シミュレータ用に世界で初めてワンチップのベクトルプロセッサ(OCVP-ES)が開発された。
- (4) 単一プロセッサ(OCVP-ES)と単一ノードの性能が行われた。
  - ・単一プロセッサの性能は、基本設計の予想値を多少上回る。
  - ・単一ノードの性能は、SX-5に比べ全般的に良い結果がえられた。それは、主としてクロックサイクルと、メモリアクセスレイテンシーの改善によるものと考えられる。

地球シミュレータは、米国のASCI<sup>(6)</sup>、IT<sup>2</sup>計画のマイクロプロセッサベースの超並列計算機とはタイプの異なるもう一方のベクトル型並列計算機の頂点として、世界中の気象・気候研究者だけでなく、

- 1) 輸送システム、輸送推進システム分野
- 2) エネルギー科学技術分野

- 3) 計算宇宙物理学分野
- 4) バイオ分野
- 5) 新材料開発分野 等

のあらゆる分野の大規模シミュレーション研究の研究者から熱い期待が寄せられている。地球シミュレータ計画の計算地球科学に対するインパクトだけでなく、日米のスーパーコンピュータ産業界、高度計算科学全体に与えるインパクトの大きさの認識を新たにするものである。

#### 謝辞

本テキストをまとめるにあたり、宇宙開発事業団、旧動力炉・核燃料開発事業団（平成9年度のみ）及び日本原子力研究所（平成10年度以降）からの委託により（株）日本電気において実施された地球シミュレータの概念設計、基本設計及び要素技術設計を参考にさせて頂いた。ここに、ご尽力、ご協力をいただいた関係各位に感謝いたします。

#### 参考文献

- (1) J. Drake et al., :Design and performance of a scalable parallel community climate model, Parallel Computing, Vol. 21, pp.1571-1591 (1995)
- (2) (財)高度情報科学技術研究機構編「High Performance Fortran 2.0 公式マニュアル」、(株)シブリンガー・フェアラーク東京、1999年6月
- (3) <http://www.ccsr.u-tokyo.ac.jp/ehhtml/eccsr.shtml>
- (4) <http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom/>
- (5) Yokokawa, M., et al., : Performance Estimation of the Earth Simulator, in Proceedings of the Eight ECMWF Workshop on the Use of Parallel Processors in Meteorology Towards Teracomputing, November, 1998
- (6) ASCI 計画 <http://www.llnl.gov.asci/>

## ・大気・海洋結合モデル 開発の現状と計画

(高橋 桂子)

### 1. はじめに

2002年3月に稼働開始予定である地球シミュレータにむけた超高解像度な大気・海洋結合モデル (Coupled General Circulation Model: CGCM) の開発が、地球加減圧、地球シミュレータ研究開発センター、東京大学気候システム研究センターの協力のもとに開発が進められている。大気および海洋の相互作用が、気候変動の要因のいくつかに非常に重要な役割を果たしていることは、これまでの多くの知見から疑う余地はない。この大気・海洋相互作用を直接扱うことが可能である大気・海洋結合モデルは、気候システムの機構解明のためには不可欠であり、すでに世界には約40の大気・海洋結合モデルが存在しているといわれている。地球シミュレータ上では、その非常にパワフルな計算機資源を有効に利用して、従来手がけることができなかった超高解像度かつ長期の積分を行なうことが可能となり、気候システムの機構変動解明のための大きなイノベーションが期待されている。本稿では、この非常に大規模なシミュレーションを可能にするための大気・海洋結合モデル開発デザインの概略と現状、これからの計画を報告する。

### 2. 大気・海洋結合モデルの開発デザイン

大気・海洋結合モデルの開発には、いくつかの克服すべき課題がある。ひとつは、結合モデルを構成する大気および海洋大循環モデルそれぞれの物理的パラメータが、対象とす

る時間スケールの変動を、十分に再現可能である必要がある。大気大循環モデルを例にとると、通常、大気大循環モデル単独では、境界条件として与えられる海洋のデータは観測値であり、大気・海洋の相互作用は、その境界値の正しさゆえに、大気大循環モデルの脆弱さは現れにくい。同様の状況は、海洋大循環モデルにもあてはまり、さらに、一旦結合をしてしまうと、大気大循環モデルの脆弱さが海洋大循環モデルの振る舞いに大きな影響を与え、それが大気大循環モデルに跳ね返って大きな気候ドリフトを生み、モデルとして破綻しかねない。

二つ目の課題は、大気・海洋結合モデルが、地球シミュレータの仕様に合致したコードで書かれている必要がある。これまで私達が扱ってきたモデルを例にとると、単一CPUで計算を実行した場合、大気大循環モデルでは、現在、目標としている解像度であるT216L52で、海洋大循環モデルでは水平0.1度鉛直50層で、いずれも100年積分に約30年のCPU時間が必要であり、現実問題として考えるには、とうていかけ離れたレベルにある。この非現実的な計算時間を、超並列ベクトルマシンによる計算で乗り越えなければならない。

以上の課題を克服するためには、気候システムの再現検証のために、各コンピュータの物理過程およびデータ処理を詳しく検証するグループと、地球シミュレータの各仕様に精通したグループによる緊密な協力関係のもとに、結合モデルを開発することが不可欠となる。気候再現のための検証は、東京大学気候システム研究センターの協力のもとに加減圧研究システムが担当し、大気および海洋、さらに結合モデルについての複数のプロジェクトが、同時並行で進んでいる。計算効率について

は、主に、地球シミュレーション研究開発センターにおいて検討が重ねられており、既に現実的な時間内での計算の見通しが見えてきている。次節では、これらの取り組みの中から、紙面の制約から既に得られている結果の一部と現状を報告する。

### 3. 大気および海洋モデル・海洋結合モデルの検証

現在開発が進められている大気・海洋結合モデルを構成する各モデルは、大気大循環モデルとしては、東京大学気候システム研究センターと国立環境研究所により開発されたCCSR/NIES 大気大循環モデル (AGCM)、海洋大循環モデル (OGCM) としては、GFDL で開発された MOM3 および東京大学気候システム研究センターで開発された海洋大循環モデルである。CCSR/NIES AGCM は陸面モデルおよび河川モデルを、OGCM はいずれも海水モデルを付随している。

目標は AGCM では T213 (水平約 500km) L50 (鉛直 50 層)、OGCM では水平 0.1 度 (約 10 km) 鉛直約 50 層の全球領域の大気・海洋結合モデルであり、その 100 ~ 1000 年スケールの気候変動シミュレーションである。このスケールでのシミュレーションは、大気では、梅雨や台風などの局所的な現象を再現することが可能であり、海洋では、熱的エネルギー輸送に大きな役割を果たす eddy を陽に扱うことができる。このことから大気・海洋相互作用およびその応答機構に関する知見が、局所的な観点とグローバルな観点の両面から得られることが期待できる。地球温暖化研究のための様々な検証実験も、上記シミュレーションの範疇に入る。

#### 3.1 大気大循環モデル

現状では、計算機資源による制約から、T106 (水平約 100 km) L20 (鉛直 20 層) AGCM に関する物理的検証が現実的である。T213L50 による再現実験との比較から、T106L20 の解像度でも、気候再現に関する主要な現象が、ほぼ同程度に再現できることを確認していることから、T106L20 に対する詳細検討が進められている。

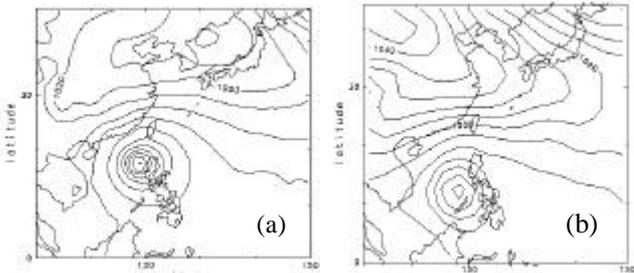


Fig.1 The distribution of Typhoon.: (a) T106, (b) T42.

Fig. 1 (a) は、T106L20 による台風の再現である。より低い解像度 T42 で再現された台風 (Fig.1(b)) に比べて、中心気圧およびその形状がより現実に近い値で再現されていることがわかる。Fig.2 は、解像度による降水分布の違いを示している。Fig.2(a) T106 の解像度のほうが、降水がある地域の分布がより観測値 (Fig.2(c)) に近い。(Fig. 1, 2 は、地球シミュレーション研究システム・地球温暖化研究領域 西村

照幸氏提供)

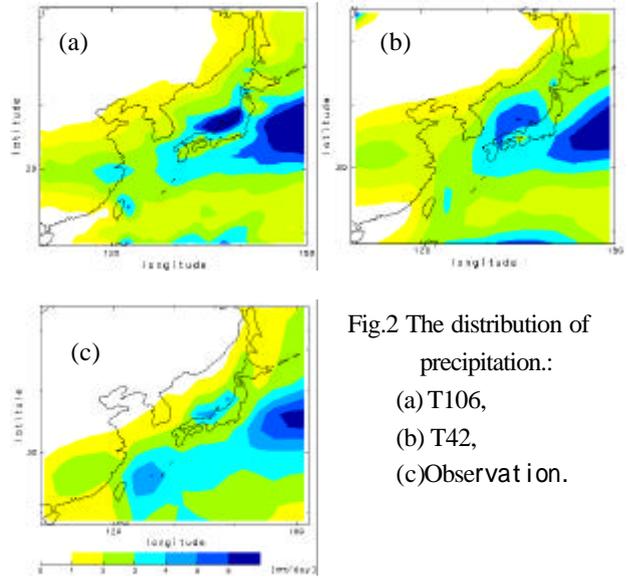


Fig.2 The distribution of precipitation.:  
(a) T106,  
(b) T42,  
(c) Observation.

#### 3.2 海洋大循環モデル

AGCM に比べ OGCM は解像度がより高い。これは海洋の変形半径が約 100 km 程度であることに起因するが、このことは、数値計算上では CFL 条件がより厳しくなることを意味する。そこで、海洋大循環モデルの検証では、通常の設定によるモデルの検証と共に、地軸を大陸上に設定することで、CFL 条件を緩和する試みを併せて検証している。Fig.3 は武漢・アルゼンチンに地軸を回転させた topography である。この地軸を用いることにより、グリッドサイズが非常に小さくなる領域を大陸にすることが可能であり、CFL 条件を緩和できる。この回転させた軸の設定下で、比較的低い解像度 (水平 2.8 度鉛直 18 層) で 1000 年積分した結果が、Fig.4(a) と Fig.4(b) である。緯度方向に平均した鉛直分布で、回転前と後でほとんど差は無く、得られた結果は観測値をほぼ再現している (Fig.3, 4 は、地球気候研究システム・モデル統合化領域 津川元彦氏提供)。

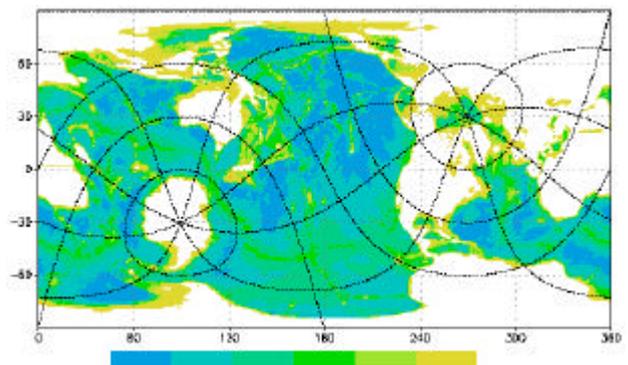


Fig.3 Topography with rotated axis.

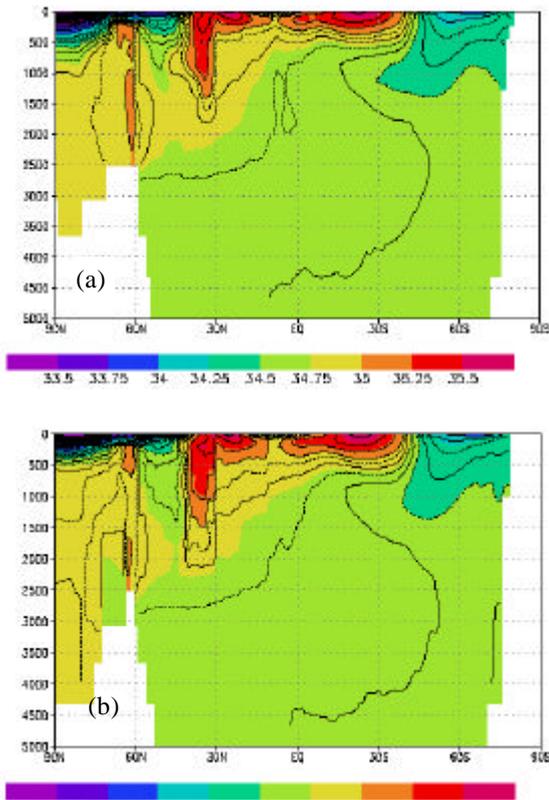


Fig.4 Zonal mean of salinity after 1000 years integration:  
(a) with rotated axis, (b) without rotated axis

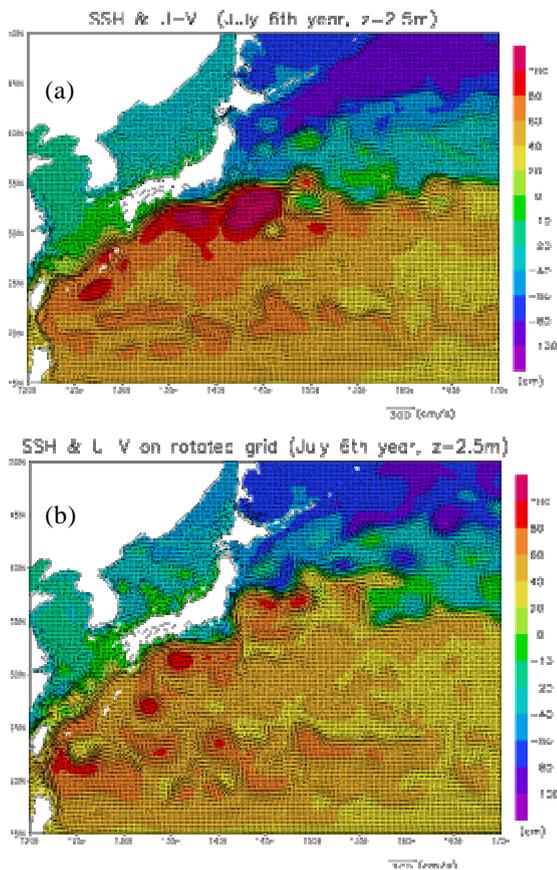


Fig.5 Distribution u-v velocity and sea surface height:  
(a) with rotated axis (b) without rotated axis

Fig.5(a) は、地軸を回転させる前の、水平解像度を 6 分の 1 度の高解像度にしたときの海洋表面の流速分布と海洋表面の高度である。ほぼ観測値に近い結果が得られており、シミュレーションの対象となる eddy もよく再現されている。特に、黒潮の流れの分布は観測値に近い。Fig.5(b) は、地軸回転後の結果である。この結果も観測値に遜色ないものであるが、黒潮の離岸が回転前に比べて北にシフトしている。この原因の究明と検証は、現在も進行中である (Fig.5 は、地球大気イノベーション・プログラム統合化領域 佐々木英治氏提供)。

さらに OGCM では移流スキームが非常に重要な役割を果たすが、その精度を向上させる手法のひとつとして、CPI 法の導入が開始されている。

### 3.3 大気・海洋結合モデル

結合モデルの検証は、先にも述べたように、コホーネットとなる各モデルの単独の検証では現れることがない特性が顕在化する可能性があるため、低解像度からの詳細な検証が必要となる。本稿では、紙面の制約から、気候システム研究センターと国立環境研究所により開発された CCSR/NIES AGCM と MOM3 を結合した結合モデルの検証結果の一部を報告する。

結合モデルは、AGCM ; T21 鉛直 11 層と OGCM ; 水平 5.6° 鉛直 37 層で構成され、大気海洋相互作用に影響の大きい海深 500m までの鉛直層を約 10~50m に細かく刻んだモデルである。海洋と大気のグリッド対応は 1 対 1 であり、海洋は自由表面を陽に扱い、大気からの降水は、直接、海面高度および塩分に反映させている。全球において flux adjustment を行わず、また、高緯度領域における海面高度および tracer に対するフィルタリングは行わず、軸回転をせずに、3 時間のインターバルで大気・海洋を結合した。混合層は Pacanowski/Philander スキーム、渦混合に Gent/McWilliams スキームを使用している。

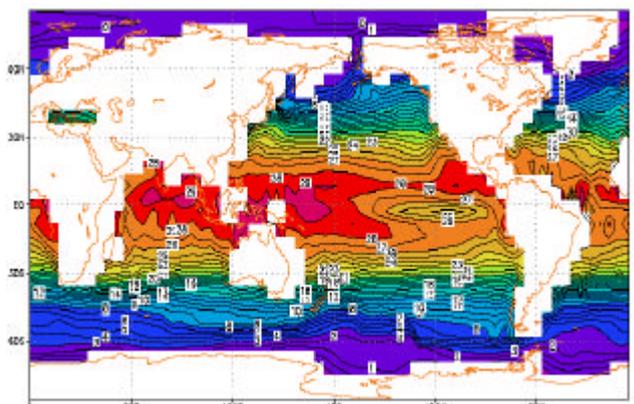


Fig.6 Annual mean of SST ( )

Fig.6 は、35 年積分した積分最終年の海面温度 (SST) の年平均分布である。低解像度であることに特徴的な黒潮領

域や gulf stream 領域の勾配が弱い、定性的に観測値を再現しており、許容範囲の。特に、西太平洋の warm pool (29 度で囲まれる領域)や、東太平洋の cold tongue の強い変動はよく再現されている。SST に大きな影響を与える海洋鉛直構造を Fig.7 に示す。鉛直構造は乱流構造を反映するべきものであり、再現には注意深い工夫が必要であることが知られている。本結果では、特に太平洋領域の東西鉛直勾配は比較的よく再現されているものの、特に西太平洋熱帯赤道上の warm pool の鉛直構造、および東太平洋上の鉛直構造の再現には、課題が残る。Fig.8 は、赤道 SST(2.5S-2.5N)における季節変動を示している。太平洋東部の赤道における SST の規則的な季節変動をよく再現しており、その変動の伝播速度もほぼ観測値に一致している。Fig.9 は、SST の分布に大きな影響を受ける均降水分布である。Fig.9(a)は夏、Fig.9(b)は冬の降水分布である。夏の the intertropical convergence zone, ITCZ の表現が弱い、これも低解像度で共通に見られる傾向であり、観測値に比べて降水量は少ない傾向にあるが、概ね妥当である。

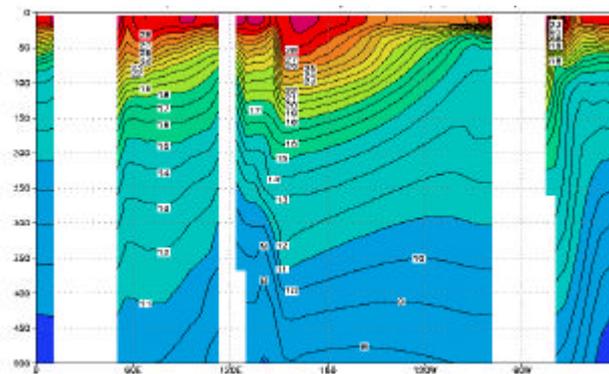


Fig.7 Annual mean of vertical temperature in 2.7S-2.7N band.

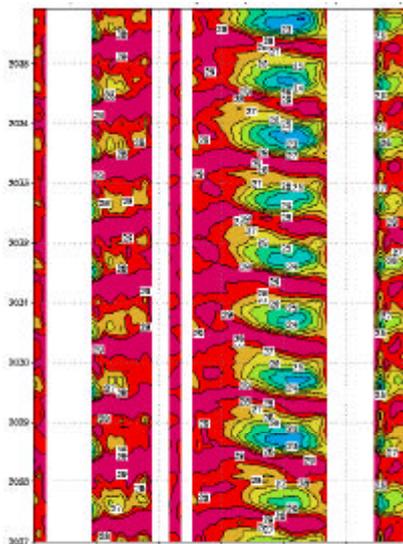


Fig.8 Seasonal cycle of equatorial SST in 2.7S-2.7N band.

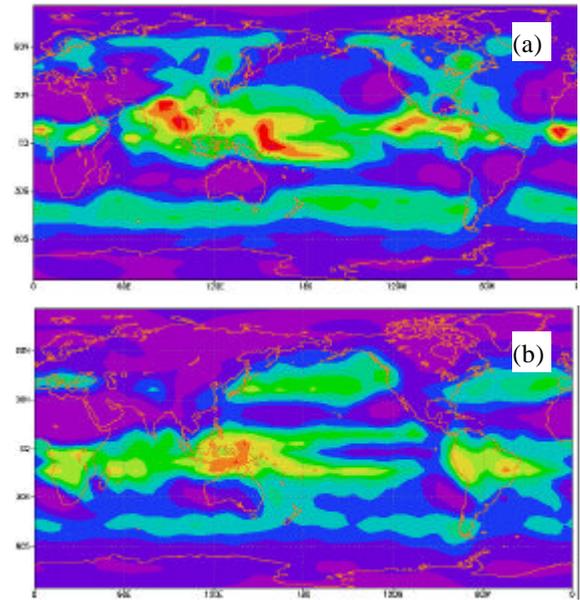


Fig.9 The distribution of precipitation (mm/day):  
(a) summer season: average during JJA  
(b) winter season: average during DJF

### 3. 地球シミュレーション上での計算効率向上にむけて

これまで AGCM, OGCM それぞれに地球シミュレーションに向けた並列化・最適化が行われてきた。各モデルの並列化・最適化は、coding 変更に伴う変更情報の共有化、および誤差評価を含む物理的の結果の検証を 1 サイクルとして開発されている。本稿では、開発の一例として、地球シミュレーション研究開発センターと共同開発しているシミュレーション仕様海洋大循環モデル MOM3 の並列化・最適化の結果を紹介する。

MOM3 は、多くのユーザと広範な研究目的を網羅するために、非常に多くの物理的スキームが組み込まれている。その全てを最適化することは現実的でない、解像度依存のスキームを選択し、中解像度(水平 2.8 度、鉛直 18 層)と超高解像度(水平 0.1 度、鉛直 50 層)の 2 つの場合に対応する最適化を行った。いずれの場合も通信は MPI により記述され、ノード内外の区別なく通信を行なう。

中解像度対応では、地球シミュレーションの構成単位である 1 ノード内(8 AP)で並列計算すれば、1000 年積分を約 5 日 CPU 時間で完了できる。超高解像度対応では、北緯、南緯ともに 70 度までの領域で、地球シミュレーション上での実行を待たなければならないが、現状の計算効率からの予測より、60 ノードを使用して 100 年積分を約 20 日で完了できる見込みである。

### 4. 今後の計画

計算資源のこれまでの検証結果から、大気、海洋各大循環モデル、および結合モデル共に、気候変動をほぼ再現しているとしてよい結果を得た。この結果をふまえ、さら

に詳細な物理的検証を行なう。AGCMにおける降雨分布やOGCMの海洋混合層の再現、結合モデルにおける結合方式の検討など、課題は多い。目標としている高解像度計算の多くは、地球シミュラ上でのみ現実的な計算となるため、地球シミュラの稼動開始時点からの、本格的な検証実験を待たざるをえない。しかし、そこまでの過程で得られる低～中解像度モデルでの検証事項と知見は、意味あるものであり、モデルをチューニングする方針決定には、欠かせない検

討事項である。また、時間ステップをよ長くするための新たなスキームの導入の検討、さらに最適化・並列化のチューニングも継続し、海洋モデルに対しては、現状の約3倍の計算効率を目指す。結合モデルについては、さらに結合手法の検討に加え、計算効率を向上するための最適化・並列化を進める予定である。