

気候モデルを対象とした結合ソフトウェアの性能評価

荒川 隆^{†1} 吉村 裕正^{†2}

気候シミュレーションモデルを対象とした結合ソフトウェア(カップラ)を作成し、実行性能を測定した。用いた気候モデルは東京大学、国立環境研究所、地球環境フロンティア研究センターなどが共同開発している MIROC である。MIROC の大気モデル・海洋モデルをカップラで結合し、地球シミュレータで実行性能を測定した。その結果、オリジナルの結合方法と比較して、高解像度の条件では補間計算に要した時間はほぼ無視しうる程度まで減少しおよそ 5% 実行時間が短縮した。また、メモリ消費量の最大値も 3~4.6% 減少した。

Performance Evaluation of a Coupling Software for Climate Models

TAKASHI ARAKAWA^{†1} and HIROMASA YOSHIMURA^{†2}

A coupling software (coupler) for climate simulation models was made and its performance was measured. A climate model used in this study is MIROC by Univ. of Tokyo, NEIS, FRCGC. After coupling the atmosphere model and the ocean model of MIROC with the coupler, performance measurement was done on the Earth Simulator. As a result, the computation time for interpolation was decreased to negligible level and the total execution time has been shortened about 5% compared with an original code at high resolution. Moreover, the maximum value of the memory consumption has 3~4.6% decreased.

^{†1} 財団法人高度情報科学技術研究機構

Research Organizaion for Information Science and Technology

^{†2} 気象庁気象研究所

Meteorological Research Institute

1. はじめに

1.1 研究の背景と目的

High Performance Computing (HPC) の研究・応用領域は近年大きく広がり、科学技術分野だけでなく金融や画像処理、自然言語処理など様々な分野でその成果が利用されているが、なかでもシミュレーション技術は HPC の黎明期から主要な研究・応用領域であり続けている。シミュレーション技術の目的の 1 つは解析的に求めることの難しい複雑な現象を再現・予測することであり、複雑性はシミュレーション技術、シミュレーションソフトウェアの重要な特性であるといえる。たとえば、山崎らは小論「シミュレーション技術が先導する未来社会」において、シミュレーション技術開発のロードマップを検討しているが、その方向性として「多様化、大規模化」、「高精度化、高信頼性」、「可用性、適用性」の 3 軸を設定している¹⁾。同論文で大規模、多様なシミュレーションとして例示されている分野は半導体システムシミュレーション、物質シミュレーション、地球シミュレーション、1000 年行動シミュレーションなど多岐にわたる。また、理化学研究所が開発実施部門となり開発が進められている次世代スーパーコンピュータでは、グランドチャレンジアプリケーションとして次世代生命体統合シミュレーションソフトウェアと次世代ナノ統合シミュレーションソフトウェアの 2 分野のソフトウェア研究開発が行われている²⁾。これら大規模複雑系シミュレーションの中でも地球環境、特に気候変動シミュレーションは「気候変動に関する政府間パネル (IPCC)」が 2007 年のノーベル平和賞を受賞したことに象徴されるように社会的要請や関心が高く、国際的に広く研究開発が行われている領域であり、気候モデルは各種大規模複雑系シミュレーションモデルの中でも高レベルの実用化が進んだものの 1 つと考えられる。本研究では、気候シミュレーションモデルを対象として、

- 現代の並列計算機で高効率に計算を実行し
- モデルの改良や開発を容易にする

ような結合ソフトウェアの設計実装・性能の実例を示すことで、ソフトウェア開発の側面から大規模複雑系シミュレーション研究全体の進展に寄与することを目的とする。

1.2 気候モデルとカップラ

ここでは気候モデルの概要、現在の気候モデルがかかえる問題点と、その解決法としてのカップラについて述べる。

地球の気候は大気・海洋・陸水・海水・植生など地球表層を取り巻く様々な自然あるいは人為現象の非線形相互作用の結果として形成されている。したがって気候現象の研究や気候

変動予測に用いられるシミュレーションモデル（以下気候モデル）は、これらの現象を表現する個々のモデルの集合体として構成されるのが普通である。本論文ではこれら個々のモデルを要素モデルと呼ぶ。

気候シミュレーションでは、複数の要素モデルが相互に必要な情報を交換しながら時間積分を進めてゆく。これらの要素モデルは、表現する現象に応じて独自の時空間解像度を持つ。たとえば、気候モデルを構成する主要な要素モデルである大気モデルと海洋モデルでは、渦スケールの違いから海洋モデルの空間解像度を細かくするのが一般的である。この場合、要素モデル間のデータ交換時には、格子点の位置関係や海陸分布、あるいは積分時刻に応じて適切な補間計算を施す必要がある。複数の要素モデルを接続しデータ交換を行うためのソフトウェアをカップラと呼ぶ。

カップラ開発の今日的意義は、物理的（気象/気候学的）意義と計算科学的意義の2つの側面を持つ。以下それぞれについて述べる。

物理的意義 要素モデル内で表現されている物理プロセスの多くは、計算能力の制約にともなう簡略化や、プロセスそのものの解明が不十分であるなどの理由で不確実性を含む。気候シミュレーションにおいて、どのプロセスがどの程度不確実性に影響を及ぼすかを解析的に求めることは、相互作用の非線形性により困難である。したがってその定量的評価には、ある要素モデルや物理プロセスを、同種の別のモデルに置き換えて結果を比較する手法が有効である。しかし、要素モデルのプログラム構造や要素モデル間のデータ交換の方法、座標変換方法などは気候モデルごとに異なっており、要素モデルの交換は必ずしも容易ではない。

この問題を解決するためには、要素モデル相互の結合インタフェースを標準化することが有効な手段である。この、「結合インタフェースの標準化」という機能を実現するソフトウェアがカップラである。したがって、複数の気候モデルが同じカップラを用いることにより、要素モデルの交換が容易となり、気候モデルの持つ不確実性の定量的評価、ひいては気候現象のより精密な理解や予測が可能になると期待される。

計算科学的意義 現代のHPCにおいて並列計算は本質的であり、気候モデルも並列計算に適応していなければならない。しかし、前述のように要素モデルはそれぞれ独自の時空間解像度を持ち、また並列効率もまちまちである。したがって、効率的なシミュレーションのためにはモデル全体をMPMD化し、要素モデルごとに最適なプロセッサ数を割り当てる必要がある。要素モデルのMPMD化はグリッドコンピューティング環境で特に有効であり、また、MPMD化によりスカラプロセッサとベクトルプロセッサ

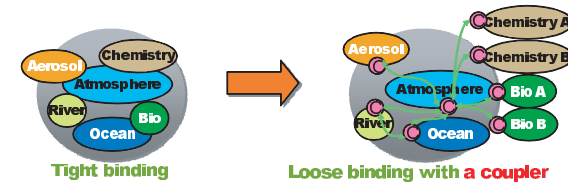


図1 カップラ概念

Fig. 1 Conceptual figure of a coupler.

が混在した計算機において、流体計算はベクトルプロセッサで、植生などの計算はスカラプロセッサで行うというような、物理現象を自然に表現したコードを高効率に実行することが可能となる。

他方、MPMDプログラムでデータ送受信や補間計算を十分な性能で行うには相応の専門的/技術的知見が要求される。データ送受信や補間計算をカップラが受け持つことにより、気候/気象研究者はソフトウェア制作上の複雑さを免れ、アイデアを容易にモデル化することが可能となる。

プログラム構造の側面から見たカップラの機能は、図1の左側のように（主に大気モデルの一サブルーチンとして）ソフトウェア的に強く結び付いた要素モデルの結合を、図1右側のように弱い結合に置き換えることにある。このことにより、先に記した物理・ソフトウェア両面での性能・機能向上が得られる。

1.3 カップラ開発の現状

前述のような知見に基づき、国内外の機関でカップラ開発が行われてきた。欧州ではフランスのCERFACS (European Centre for Research and Advanced Training in Scientific Computation) が中心となってOASISカップラを開発し、実用化されている³⁾。アメリカではNCAR (The National Center for Atmospheric Research) のCCSM (Community Climate System Model) カップラがNCARモデル用に開発されており⁴⁾、またより汎用的なカップリングフレームワークとしてESMF (Earth System Modeling Framework) の開発も行われている⁵⁾。国内では「風神」⁶⁾が、汎用性を意識した結合ソフトウェアとしては最初期のものである。これらのうち、ESMFと風神は単なるカップラではなく、複数の要素モデルに対して共通の制御構造・データ構造を与え統一的にハンドリングできるようにするためのソフトウェアフレームワークというべきものである。このようなフレームワークは、効率的なモデル開発のための強力なツールとなりうるが、一方、既存モデルを適用す

るには、フレームワークの使用方法やインタフェースを理解しモデルのコードをフレームワークにあわせて改修する必要がある。たとえば ESMF のマニュアルに記載されている適用手順は、1) モデルが用いているデータで ESMF の管理下に置くものを定めたうえで、2) それ以外のグローバルデータを他のモデルから隠蔽し、3) モデルの実行フェーズを初期化、メイン、終了の 3 つのフェーズに分割したうえで、4) ESMF のデータフィールドを生成する、などである^{7)*1}。同様に風神もモデル内のグローバル変数を風神固有の形式で再定義し、モデルをサブルーチン単位に分解したうえで風神が用意した実行コントロールコードの適切な場所でコールするという手順が要求される。具体的なコード修正量は 4 章で検討するが、既存の気候モデルをこれらのフレームワークに適用し、コード修正が正しく行われたことを確認するのに要する労力と時間を考えると、日本の気候研究コミュニティにおいてこのようなフレームワークを導入することは（少なくとも現時点では）現実的ではない。一方 OASIS カップラは汎用的に用いられることを前提として作られており、OASIS がサポートしている格子系のモデルを OASIS がサポートしている補間アルゴリズムで用いる場合には有用である。しかし、OASIS がサポートしている格子系は、水平方向が Regular, irregular, Gaussian reduced, 鉛直方向が regular のみであり、補間アルゴリズムは nearest neighbour, trilinear, bilinear, bicubic に限られている⁸⁾。このため、OASIS がサポートしていない補間アルゴリズムを持ったモデル（本研究で結合の対象としたモデルがこれに該当する）に OASIS を適用することは困難であり、また、次世代気候モデルとして開発が進められている NICAM⁹⁾ のような、従来の全球大気モデルとは異なる格子構造を持つモデルにも適用できない。このように適用範囲の限られたカップラをシステムの中核に据えることは、モデル開発の将来にとって重大な障害となる懸念がある。

これらの理由から、日本の気候研究コミュニティにおいても、各コミュニティ独自のカップラ開発が行われてきた。地球シミュレータセンターでは、センター開発の大気モデル AFES と海洋モデル OFES を結合するカップラを開発し大気・海洋結合シミュレーションを実施している¹⁰⁾。また、気象庁気象研究所では、気象庁気象研究所の気候モデル（JMA/MRI ESM）を対象としたカップラ Scup を開発した¹¹⁾。Scup は大気モデルと大気化学物質モデルの結合を第 1 目標として開発されたものである。大気モデルと大気化学物質モデルはそれぞれ 3 次元の場における量を計算し、結果を交換する必要がある。したがって、Scup は大気・海洋結合のような 2 次元のデータ交換だけでなく、3 次元データの交換が可能であり、

*1 マニュアルには 9 段階の手順が記されている。

シンプルで扱いやすいインタフェースを特徴とする。また、東京大学気候システム研究センター（CCSR）、地球環境フロンティア研究センター（FRGC）、国立環境研究所（NIES）などが共同で開発している気候モデル MIROC¹²⁾ には大気モデルと海洋モデルを結合するためのソフトウェアが組み込まれている。しかしこれらの結合ソフトウェアはいずれも、特定の気候モデルに特化されたものであり、複数の気候モデル間で要素モデルを交換するようなカップラは国内では存在しない。

1.4 本研究の位置づけ

上に述べたような現況に鑑み、平成 18 年度より始まった「21 世紀気候変動予測革新プログラム」の一部として、新たなカップラの開発が進捗している。この開発の目標は、Scup のアルゴリズムや開発経験を発展させる形で、国内の気候モデル間、特に JMA/MRI ESM と MIROC の 2 つの気候モデル間での相互運用を可能とするような、日本標準となるカップラを作ることである。このカップラを本論文では Jcup と表記する。

カップラの主要な機能は要素モデル間の結合・交換を容易にすることであり、実行性能の向上は第一義ではない。しかし、気候シミュレーションは大きな計算資源を必要とし、計算性能が研究推進上のボトルネックの 1 つとなっているため、カップラを用いることで実行性能の向上が得られれば、気候研究にとっては大きな意義を持つことになる。逆に、少なくとも実行性能の大幅な低下を来すことがあってはならない。したがって、作成したカップラを実モデルに適用し実行性能を評価することは、カップラ開発の重要なステップの 1 つである。また、気候モデルのように大規模かつ複雑なソフトウェアを MPMD で実行し性能を評価することは、計算技術的側面からも重要な情報を与えるものと考えられる。そこで本研究では、IPCC 第 4 次報告書の温暖化予測に用いられた気候モデル MIROC の後継バージョンを Jcup で結合し、実行性能を測定・評価した。

2. 対象モデル

本研究で結合の対象としたのは前述の気候モデル MIROC である。MIROC は大気モデル（FRGC/CCSR/NIES AGCM）、海洋モデル（COCO）、陸面モデル、植生モデルなどの要素モデルから構成される。大気モデル、海洋モデルはコンパイルオプションによって MPMD での実行が可能になっている。この場合、大気モデル（他の要素モデルを含む）と海洋モデルはそれぞれ領域分割によって並列化された個別のプロセスとして実行され、一定時間間隔でデータ交換を行う。MPMD モードでのデータの流れを図 2 に示す。

大気-海洋間のデータ交換は時間積分ループの冒頭で行われる。大気から海洋へのデータ

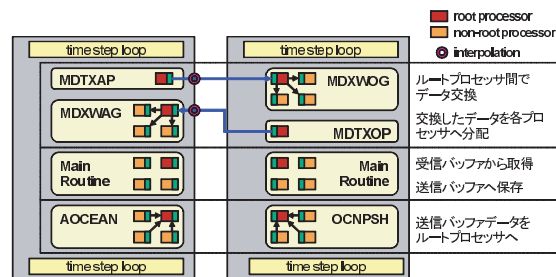


図 2 大気海洋モデル間のデータフロー
Fig. 2 Data flow between the Atmosphere and the Ocean model.

交換は

- (1) 大気モデルのルートプロセッサで海洋モデルへの座標変換
- (2) 大気モデルのルートプロセッサから海洋モデルのルートプロセッサへデータ送受信
- (3) 海洋モデルのルートプロセッサから各プロセッサへ Scatter

という手順で行われる。一方、海洋から大気へは

- (1) 海洋モデルのルートプロセッサから大気モデルのルートプロセッサへデータ送受信
- (2) 大気モデルのルートプロセッサで大気モデルへの座標変換
- (3) 大気モデルのルートプロセッサから各プロセッサへ Scatter

という手順になる。

個々のプロセッサに分配されるデータはバッファ用変数に保持され、時間積分中の任意の場所で参照される。また、次ステップで送信されるべきデータは、時間積分の任意の場所でバッファ変数に代入されるようになっている。各プロセッサが保持する送信データは時間積分ループの最後に大気海洋モデル各々のルートプロセッサに Gather され、次ステップの冒頭で交換される。ここで注目すべきは、

- データ交換は Gather, Send/Receive, Scatter という 3 段階の過程を経て行われる、
- 座標変換は大気モデルのルートプロセッサが行う、

という 2 点である。これらはいずれもルートプロセッサによる非並列処理であり、高並列計算時における性能向上の阻害要因となりうる。

3. カプラの設計と実装

3.1 設計の基本方針

2 で述べた点を考慮し、以下のような方針でカプラの設計・実装を行った。

(1) 並列性能の確保

モデル結合時に並列性能の阻害要因となるのは、データ交換、座標変換の 2 つの手続きである。データ送受信については各モデルの個々のプロセッサが、対応するモデルの個々のプロセッサと直接送受信を行うようにする。また座標変換は、受信側モデルの各プロセッサが自領域についてのみ行うようにする。

(2) 要素モデル独立性の確保

「要素モデルが独立である」とは、それぞれの要素モデルが他の要素モデルの格子情報や時間ステップの情報を持たなくても、データ交換が可能であることである。したがって、これらの情報はカプラが保持し、カプラ内部に隠蔽されるようにする。

(3) データ交換柔軟性の確保

ここでいうデータ交換の柔軟性とは、プログラムの任意の場所でデータの送受信が可能であることを指す。MPI-I では Send と Receive は 1 対 1 に対応している必要があり、つねに受信側/送信側の同期が必要となる。このことは、データ交換の柔軟性、および要素モデルの独立性を阻害する。MPI によるこの制約を回避するために、送信データ、受信データはカプラ内部のデータバッファに保持され、MPI によるデータ交換はプログラムの特定の場所でいっせに行われるようにする。

(4) 単純性の維持

要素モデルの複雑性を増加させないために、結合に関する情報はカプラに隠蔽し、できる限り少数かつ単純なサブルーチンコールと設定ファイルのみで結合できるようにする。

(5) 多様性(自由度)の確保

個々の要素モデルは独自の座標系、グリッドの定義を持つ。また同種のモデルであっても座標系やグリッドの定義は同一ではない。たとえば海洋モデルで陸と海の境界がグリッドポイント上にあるのか、グリッド間にあるのか、という相違である。これらの相違は座標変換、補間計算に影響し、したがってシミュレーション結果に直接影響を及ぼすゆえ、きわめて重要であり、座標変換、補間計算のアルゴリズムは気候研究者にとって大きな関心事の 1 つである。しかしながらカプラプログラム内にあらゆる座標系に対応する計算アルゴリズムを実装しておくことは現実的ではなく、また将来新しい座標表現を持ったモデルが現れた場合

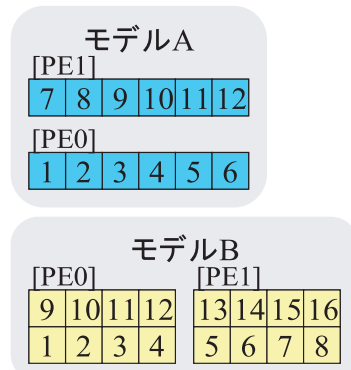


図3 モデルのグリッドインデックス例
Fig. 3 Example of model grid index.

に対応できないという問題がある。したがって、カップラコードのうち、座標変換，補間計算に関わる部分についてはグラスボックスとし，使用者がそれぞれの計算コードを実装できるようにする。

3.2 設計と実装

3.1 節で述べた各項目の中で，本カップラに特徴的な項目は多様性の確保，すなわち座標変換や補間計算に関わるコードを利用者が自由に実装できるようにしたことである。補間計算の自由度を保証するために，カップラは補間計算時の送信側モデルのグリッドインデックスと受信側モデルのグリッドインデックスの対応情報のみを保持し，この情報に従って，送受信先のプロセッサ番号と送受信すべきデータを決定するようにした。以下，その詳細についてカップラの初期化からデータ送受信，結合終了までを簡単な具体例を示しながら述べる^{*1}。ここでは図3に示すように送信モデルとしてモデルA，受信モデルとしてモデルBの2つのモデルを想定する。モデルAは水平方向を，モデルBは垂直方向をそれぞれ断面とする1次元分割によってPE0とPE1の2プロセッサに並列化されており，グリッドインデックスは図3のように与えられているとする。

*1 カップラの特徴を簡潔に説明するため，いくつかのサブルーチンについては簡略化して例示した。また本節の記述はカップラの全機能を網羅したものではない。

```
do p = 1, Np
  do i = 1, N(p)
    r(p) = r(p) + F(Cr(Ir(p,i)),
                  Cs(Is(p,i)), S(Is(p,i)),
                  Co(p,i))
  end do
end do
```

図4 補間計算のコード
Fig. 4 Idealized interpolation code.

```
do i = 1, N_G
  r(recv_grid_index_G(i))=r(recv_grid_index_G(i))
  +F(Cr(recv_grid_index_G(i)),
    Cs(send_grid_index_G(i)),
    S(send_grid_index_G(i)), Co(i))
end do
```

図5 1次元化した補間計算のアルゴリズム
Fig. 5 Idealized interpolation code modified to one-dimensional operation.

3.2.1 初期化とグリッド情報の設定

今，送信側格子点上の値を S とする。ある点 r の値は複数の送信側格子点上の値と格子点ごとの係数，受信側格子点上の値と係数，およびそれ以外の係数の演算によって求めることができる。このとき，データ交換にともなう補間計算のコードは一般的に図4のように記述できる。

ここで， N_p は求める点の数， $r(p)$ は求める点の値， $N(p)$ は $r(p)$ の値を求めるための演算の回数を表す。 Cr は受信側の補間係数， Cs ， S は送信側の補間係数と点の値， Co はその他の係数である。 Ir ， Is は点 p における演算 i に対応する受信グリッドポイントインデックス，送信グリッドポイントインデックスを表す。ある点 p に対する演算の数 $N(p)$ は一定とは限らないので， Ir ， Is を二次元配列とするのは一般性を欠く。より一般的には，図5に示されるように，演算に対して一次元化したループで記述される^{*2}。ここで， $recv_grid_index_G$ ， $send_grid_index_G$ は演算番号 i に対応する受信モデルのグリッドインデックス，送信モデ

*2 MIROC の大気海洋結合における補間計算はオリジナルの状態で一次元化されている。

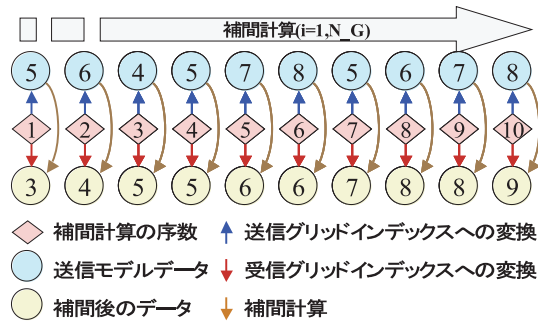


図 6 補間計算の模式図
Fig. 6 Schematic image of interpolation computation.

ルのグリッドインデックスを保持するテーブルである。

この様子を模式的に表すと図 6 のようになる。図中の青矢印が `send_grid_index_G` に、赤矢印が `recv_grid_index_G` に相当する。補間計算を受信モデルの個々のプロセッサでローカルに行うには、まず、各プロセッサが担当するグリッドのインデックス（図 6 中の黄に相当）が必要である。このインデックス情報に従って、各プロセッサが行うべき補間計算の順序（図 6 中の ）が決まり、対応する送信データのグリッドインデックス（図 6 中の青），すなわち受信モデルが受信すべき = 送信モデルが送信すべきグリッドインデックスが決まる。図 3 の例に沿って、プロセッサごとに分割された補間計算の流れを受信モデルの [PE1] について示したのが図 7 である。受信モデルの [PE1] が補間計算に使用する送信モデルのグリッドインデックスは 4, 5, 6, 7, 8 である。したがってこれらのグリッドインデックスに対応するデータを送信モデルの [PE0] と [PE1] から受信する。このデータを用いて、自 PE のインデックス 5, 6, 7, 8 に対応する値が補間計算により得られる。

個々のプロセッサが担当するグリッドインデックスはインタフェースサブルーチン `jcup_SetGrid` で、補間計算に用いる送信・受信グリッドインデックスは `jcup_SetMappingTable` で設定する。インデックスの設定から通信相手の特定と通信すべきインデックスの設定までの流れを図 8 に示す。図で水色のボックスはインタフェースサブルーチンのコール、黄色のボックスはカップラ内部の動作を表す。また斜体字で表記したサブルーチンコールはルートプロセッサのみ意味を持つサブルーチンである。はじめにサブルーチン `jcup_Initialize` でカップラの初期化を行う。引数は自モデルの名称である。次に、`jcup_SetGrid` で自プロセッサが担当する領域のグリッドを指定する。引数は自領域の *i* 方向, *j* 方向, *k* 方向の

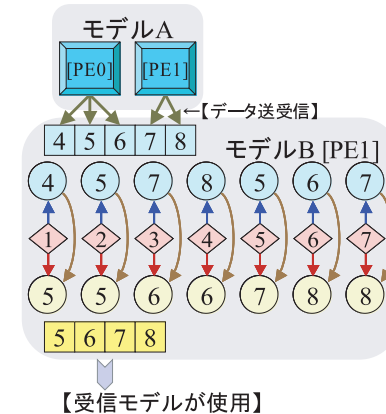


図 7 ローカルな補間計算の模式図
Fig. 7 Schematic image of localized interpolation computation.

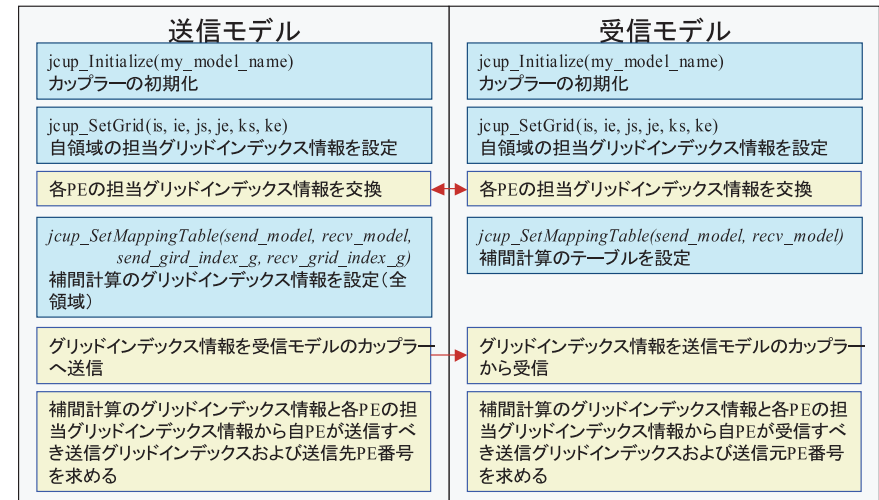


図 8 インデックス情報設定のフロー
Fig. 8 Schematic image of grid index setting flow.

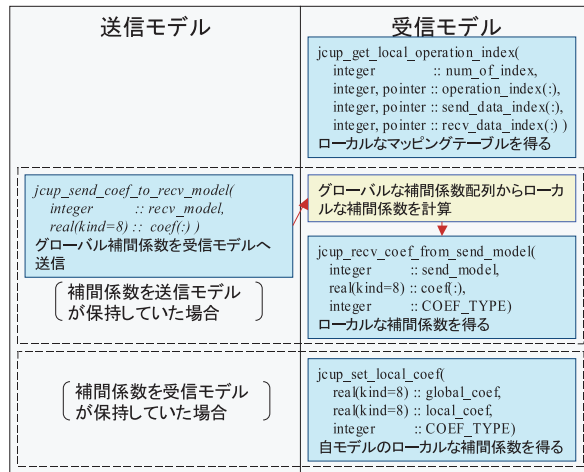


図 9 補間計算情報取得サブルーチン

Fig. 9 Subroutines for getting the variables used for interpolation operation.

開始・終了グリッド番号である。この情報はカップラ内部で図 3 に示したような 1 次元のインデックスに変換される。次いでサブルーチン `jcup_SetMappingTable` で補間計算における送信モデルグリッドインデックスと受信モデルグリッドインデックスの変換テーブルを設定する。引数 `send_model`, `recv_model` は送信・受信モデル名, `send_grid_index_g`, `recv_grid_index_g` は送信側データ, 受信側データのグリッドインデックスへの変換テーブルである。`jcup_SetMappingTable` はルートプロセッサによる呼び出しのみが意味を持ち, また変換テーブルは送信モデルか受信モデルか, どちらか一方が与えればよい。図 8 では送信モデルが与える例を示している。これらの情報から, 送信モデルにおいては送信先のプロセッサ番号と送信すべきグリッドが, 受信モデルにおいては送信元プロセッサ番号と受信すべきグリッドがそれぞれ求められる。

3.2.2 補間計算コードの実装

Jcup の特徴は補間計算コードを使用者が実装できることである。逆にいえば補間計算コードは使用者が実装することが要請される。以下, 補間計算コード実装手順の概要を示す。分割されたローカルな領域で個別に補間計算を行うのに必要な情報は, 図 5 にある諸計算要素についての自プロセッサ担当分, すなわち, 自プロセッサが行うべき補間演算の数 `N.L` と送信, 受信グリッドに対するマッピングテーブル `send_grid_index_L`, `recv_grid_index_L`, および

```

jcup_Interpolation(send_model, send_data,
                  recv_data,
                  num_of_data,
                  data_tag)

integer :: send_model
integer :: num_of_data
real(kind=8) :: send_data(:, num_of_data)
real(kind=8) :: recv_data(:, num_of_data)
integer :: data_tag(num_of_data)

do n = 1, num_of_data
  select case(data_tag(n))
  case( )
    do i = 1, num_of_index
      send_index = send_grid_index_L(i)
      recv_index = recv_grid_index_L(i)
      recv_data(recv_index, n) =
        recv_data(recv_index, n)
        +F(Cr(recv_index),
          Cs(send_index),
          send_data(send_index, n),
          Co(i))
    end do
  end select
end do
                    
```

図 10 補間計算のインタフェースサブルーチン

Fig. 10 Example of interface subroutine for interpolation.

ローカルな補間係数配列 `Cr.L`, `Cs.Ll`, `Co.L` である。これらの情報を得るためのサブルーチンが図 9 に示した 4 サブルーチンである。`jcup_get_operation_index` は自プロセッサの補間演算数とグリッドマッピングテーブルを得るためのサブルーチン, 残り 3 サブルーチンはローカルな補間係数を得るためのサブルーチンである。`jcup_send_coef_to_recv_model` と `jcup_recv_coef_from_send_model` は送信モデル側が補間係数を保持していた場合に, `jcup_set_local_coef` は受信モデルのルートプロセッサが補間係数を保持していた場合に用いる。`integer` 型の引数 `COEF_TYPE` は送信グリッドに関する係数 (`Cs`) か受信グリッドに関する係数 (`Cr`) かその他の係数 (`Co`) かを識別する定数である。

補間計算コードを実装するサブルーチンは `jcup_interpolation` である。このサブルーチン

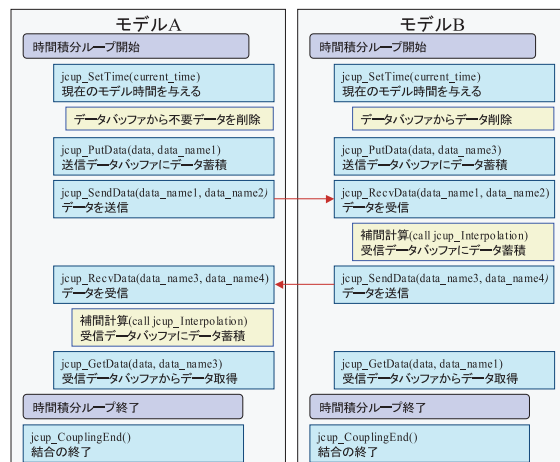


図 11 データ交換の流れ

Fig. 11 Schematic image of data exchange flow.

はカップラ内部から呼び出されるため、サブルーチン名と引数は決まった形でなければならない。使用者の利便性のために、これらを記述したテンプレートが用意されている。サブルーチンを図 10 に示す。引数 `num_of_data` はサブルーチンに渡されるデータ数を表す。この数は後述する `jcup_SendData`, `jcup_RecvData` で送受信されるデータの数に対応する。複数のデータを 1 度に処理できるようにしたのは、複数のデータ（たとえばベクトル量である東西風速、南北風速）の組で補間処理を行う場合に対応するためである。`data_tag` は各データに固有の ID 番号である。この番号によって、処理するデータの種別を判別し、補間計算法を場合分けする。

3.2.3 データ送受信

最後に、データの送受信処理の流れを図 11 に示す。時間積分ループ内でサブルーチン `jcup_SetTime` によって、モデル内の現在時刻を与える。この情報により、カップラはデータバッファの不要なデータを削除する。次いで、サブルーチン `jcup_PutData` を用いて送信するデータをカップラ内部の送信データバッファに格納する。第 2 引数の `data_name` はデータごとに固有のデータ名である。`jcup_PutData` は `jcup_SendData` の前であれば任意の場所で複数回コールできる。`jcup_SendData`, `jcup_RecvData` でデータの送受信を行う。引数は送信、受信を行うデータ名であり、任意の複数個の名前を記述することができる（図 11 の例では 2

つ）。引数によって複数個記述されたデータが補間サブルーチン `jcup_Interpolation` に複数個のデータ配列として渡される。`jcup_SendData` と `jcup_RecvData` は送信モデル受信モデルで 1 対 1 に対応していなければならない。また、複数回コールすることも可能である。補間計算を終えたデータはカップラ内部の受信データバッファに保持され、サブルーチン `jcup_GetData` によって取り出すことができる。最後に最後にサブルーチン `jcup_CouplingEnd` を呼び、結合を終了する。なお、現行の Jcup では補間計算は受信モデルが行うようになっている。これは一般的に処理の重い大気→海洋の補間計算を大気に比べて計算量の少ない（また MIROC については領域分割数の多い）海洋モデルで行うためである^{*1}。

4. MIROC への適用

作成したカップラを MIROC に適用するに際して、大気モデル・海洋モデルそれぞれにカップラのサブルーチンをコールする簡単なサブルーチン群を作成し、モデル本体はこれらのサブルーチン呼び出すようにした。これは大気モデル・海洋モデルとカップラの相互独立性を高め、コードの理解・改変を容易にするためである。また現行の結合方式との性能比較を容易にするため、カップラによるデータ送受信は現行のプログラムと同じ場所で行うようにした。作業にはインテルコンパイラを搭載した Linux クラスタを用いた。交換されるデータの値が変わるのは補間計算の部分のみであるため、計算コードが現行のコードと同じであれば、最適化による副作用がない限り、結果はバイナリレベルで一致しなければならない。そこで、カップラの組み込み時にバグが混入していないことを確認するため、随時結果を出力し、オリジナルとバイナリレベルで一致することを確認した。

この作業において MIROC のプログラムに追加されたコードは 132 行、削除（コメントアウト）されたコードは 184 行である。また、MIROC とカップラ間のインタフェースとして新たに作成したサブルーチン群の行数は 583 行、補間計算コードを実装したサブルーチンの行数は 480 行である。MIROC の行数は 91,349 行なので、全体に対するプログラムの追加・削除量は約 1.7%、MIROC のコードにそのものに対する修正量は約 0.35% となる。比較のために、ESMF におけるコード修正量のデータを Web 上の資料から表 1 に転記する^{13),*2}。表 1 のモデルのうち、COAMPS はメソスケール大気海洋結合モデル、WASH は地表面モデル、HAF は太陽風モデル、他は海洋・波浪モデルである。MIROC のモデル構

*1 補間計算を行うモデルを選択できるようにすることは困難ではない。しかし現段階では利用者の便を考え単純性を優先した。

*2 表のうち修正量は著者による。

表 1 ESMF におけるコード修正量
Table 1 Code change metrics of ESMF.

Model	Total	Deleted	Added	修正量 (%)
ADCIRC	19,782	462	826	6.5
COAMPS	95,815	5,992	7,295	13.9
HYCOM	27,422	727	1,114	6.7
NCOM	36,996	775	1,553	6.3
WASH	28,716	18	434	1.6
SWAN	33,146	67	1,252	4.0
HAF	12,306	1,320	2,516	31.2

```

DO M = 1, IJ_AMAX
  LO = IJRECOV_A2M(M)
  LA = IJC20(M)

  FATM = SATM(M)/BFAOCNG(LO)*FCA2OG(LA)
  BFAxxG(LO,1) = BFAxxG(LO,1)-BFAyyG(LA,1)*FATM
  BFAxxG(LO,2) = BFAxxG(LO,2)-BFAyyG(LA,2)*FATM
END DO

DO LO = 1, NXYGDM
  UFACT = BFAxxG(LO,1)*FACTM*DT1SAV
  VFACT = BFAxxG(LO,2)*FACTM*DT1SAV
  BFAxxG(LO,1) = RU(LO)*UFACT+RV(LO)*VFACT
  BFAxxG(LO,2) = -RV(LO)*UFACT+RU(LO)*VFACT
END DO

```

図 12 オリジナルの補間計算コード
Fig. 12 Original interpolation code.

成に最も近く（大気モデルが含まれる）、コード量も同程度な COAMPS と比較すると、本研究におけるオリジナルコードに対する修正量の比は ESMF のおよそ 1/8 である。プログラムの行数はコード記述の方法によって異なるうえに、MIROC についてはインタフェースサブルーチンを作成するなど利便性を優先した冗長な記述となっているため厳密な定量的評価は困難であるが、既存コードに対する影響度に関する Jcup の優位性は明らかである。

次に、既存の補間計算コードがどのようにカップラに実装されたかを示す。はじめに、オリジナルの補間計算コードの一部を図 12 に示す。図に示したのは大気モデルから海洋モデルへ

```

do i = 1, size(index_s)
  send_point = send_data_index(i)
  recv_point = recv_data_index(i)

  fatm = satm(i)/bfaocn(recv_point)*fca2o(send_point)
  recv_data(recv_point,1) = recv_data(recv_point,1)
                        -send_data(send_point,1)*fatm
  recv_data(recv_point,2) = recv_data(recv_point,2)
                        -send_data(send_point,2)*fatm
end do

do i = 1, maxval(recv_data_index)
  ufact = recv_data(i,1)*factm*dt1sav
  vfact = recv_data(i,2)*factm*dt1sav
  recv_data(i,1) = ru(i)*ufact+rv(i)*vfact
  recv_data(i,2) = -rv(i)*ufact+ru(i)*vfact
end do

```

図 13 新たに作成した補間計算コード
Fig. 13 Converted interpolation code.

風ベクトルを与える部分のコードの一部である。ここで、SATM, BFAOCNG, FCA2OG, RU, RV は補間係数である。図 5 に掲げた例において、SATM は C_0 （その他の係数）に、BFAOCNG と RU, RV は C_r （受信側補間係数）に、FCA2OG は C_s （送信側補間係数）にそれぞれ対応する。また FACTM, DT1SAV は定数である。2 番目のループで 2 つの変数 BFAxxG(LO,1) と BFAxxG(LO,2) が UFACT と VFACT を通して相互に影響しており、補間計算ではこれら 2 変数が同時に必要である。

このコードをカップラに移植したときの補間計算コードは図 13 のようになる。カップラにおける補間計算コードはオリジナルコードと同じ形を保って移植されていることが分かる。

カップラ適用後のデータ交換フローを示したのが図 14 である。図に示すように、モデル間のデータ交換は Gather, Scatter の過程がなくなり、各モデルの個々のプロセッサが直接相手プロセッサとデータ交換を行うよう変更された。また補間計算については、従来すべての計算を大気モデルのルートプロセッサで行っていたものが受信側モデルの個々のプロセッサで行うように変更された。

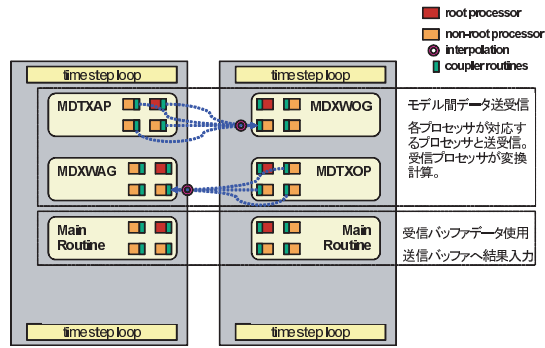


図 14 カップラを介した大気海洋モデル間のデータフロー
Fig. 14 Data flow between AGCM and OGCM by the Coupler.

5. 性能評価

5.1 測定条件

性能評価は地球シミュレータを用いた。地球シミュレータはノード内を自動並列または OpenMP で並列化できるが、今回の評価ではノード内もノード間と同様 MPI で並列化した。MIROC のシミュレーションで通常用いられる格子数（解像度）には幾通りかのパターンがあるが、今回の測定に用いたのは表 2 に示す 2 つのケースである^{*1}。この 2 ケースをここではそれぞれ「中解像度」、「高解像度」と呼ぶ。大気モデルは下部境界に 2 次元の地表面（海表面）格子を持っており、海洋モデルとのデータ交換はこの地表面（海表面）格子と海洋モデルの最上層格子との間で行われる。大気モデル最下層の 2 次元格子は上層の格子をさらに分割したより細かい格子にすることができる。この最下層の格子数が表 2 の括弧（ ）内の値である。したがってデータ交換に関わる実質的な格子数はこれらの値となる。以下では括弧内の数値を議論の対象とする。交換されるデータ数は大気→海洋が 15 要素、海洋→大気が 5 要素である。

大気モデルは東西・鉛直を断面とする 1 次元分割、海洋モデルは東西・鉛直と南北・鉛直を断面とする 2 次元分割により並列化されている。MIROC では、大気モデルは南北最低 2 グリッド、海洋モデルは最低 3 グリッドを 1PE が保持していなければならない。した

*1 通常、気候シミュレーションに用いる全球大気モデルの解像度は波数で表すが、ここでは格子数で表記した。

表 2 性能評価に用いた格子数

Table 2 Resolution used for performance measurement.

解像度	格子数	
	大気モデル	海洋モデル
中解像度	128 × 64 (128 × 64)	256 × 192
高解像度	320 × 160 (1280 × 960)	1280 × 912

表 3 性能評価に用いた PE 数

Table 3 Number of processors used for performance measurement.

解像度	ケース名	PE 数 (大気+海洋)
		東西 × 南北
中解像度	ケース 1	1 × 32 + 1 × 64
高解像度	ケース 2	1 × 40 + 1 × 304
	ケース 3	1 × 80 + 2 × 304

がって大気モデルの最大 PE 数は中解像度で 32、高解像度で 80 となる。試験に用いた PE の数と対応するケース名は表 3 のとおりである。ケース 1、ケース 2 では大気モデル海洋モデルともに東西・鉛直を断面とする南北 1 次元分割、ケース 3 の海洋モデルのみ南北分割に東西 2 分割を加えた 2 次元分割となる。ケース 3 を例とした大気モデル (AGCM) と海洋モデル (OGCM) における領域分割パターンと海岸線を図 15 に示す。大気モデルは北→南に領域番号（およびグリッド番号）が振られているのに対し、海洋モデルは南→北に領域番号（およびグリッド番号）が振られている。また海洋モデルの高解像度のケースでは、モデルの地軸を回転し北極点をグリーンランドに移動する（同時に南極点も移動する）処理が行われている。これは格子点の集中する極域を陸に移動することで CFL 条件を緩和するためである。この処理により、海岸線は図 15 に示すように、緯度経度で表した地図とは異なる形状になる。

性能測定は地球シミュレータの性能測定ツールである ftrace を用いた。測定した項目は、サブルーチンごとの実行時間、ベクトル化率、FLOPS 値、通信データ量などである。

5.2 実行時間

初めに中解像度であるケース 1 の結果について述べる。MIROC オリジナルの結合方法と、カップラを用いた結合方法での時間積分ループにおける実行時間を図 16 に示す。値は大気モデル・海洋モデルそれぞれのプロセッサの平均値である。大気モデル・海洋モデルともに、オリジナルの結合方法とカップラを用いた結合方法で、実行時間に大きな違いは見ら

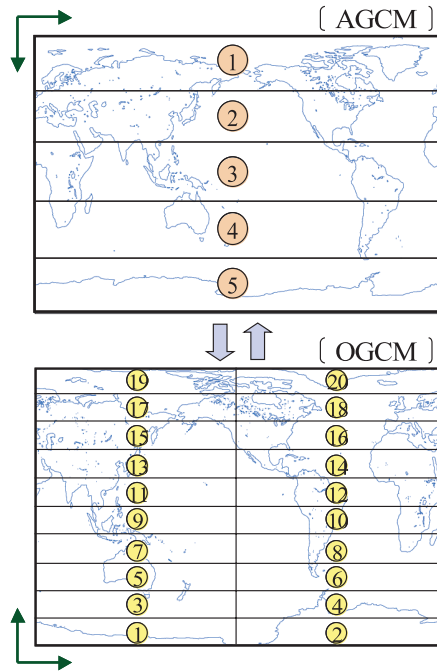


図 15 大気モデルと海洋モデルの海岸線と領域分割パターン

Fig. 15 Coastal line and domain decomposition pattern of AGCM and OGCM.

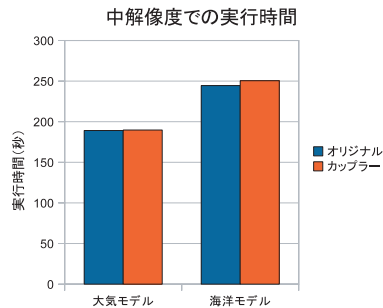


図 16 中解像度での実行時間 (秒)

Fig. 16 Elapse time at medium resolution (sec).

表 4 中解像度での補間計算に要する時間 (秒)

Table 4 Elapse time for interpolation at medium resolution (sec).

	オリジナル		カップラ	
	大気→海洋	海洋→大気	大気→海洋	海洋→大気
ケース 1	0.705	0.240	0.045	0.019

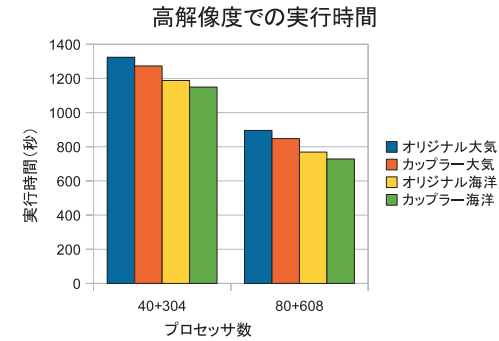


図 17 高解像度時の大気モデルと海洋モデルの実行時間

Fig. 17 Elaps time of AGCM and OGCM at high resolution.

れない。補間計算に要する時間を表 4 に示す。オリジナルの結合の場合に大気モデルのルートプロセッサが行っている補間計算に要する時間は、大気モデルから海洋モデルへの補間に 0.705 秒、海洋モデルから大気モデルへの補間に 0.240 秒となっており、全体の実行時間に対して短く、カップラを用いた結合の優位性がないことが分かる。カップラを用いた場合の実行時間が、特に海洋モデルにおいてオリジナルに比べわずかに（海洋モデルで約 2.2%）長くなっているのは、カップラ内部でのデータ検索やデータバッファに対するデータの保存・取り出し処理に起因するものである。これらの処理はベクトル計算が利かず、かつデータサイズへの依存性が小さいため、解像度の低い計算では相対的に実行時間割合が高くなる。

次に高解像度のケース 2、ケース 3 について、オリジナルの結合方法とカップラを用いた結合方法での実行時間を図 17 に示す。時間積分ループの実行時間はカップラを用いた場合の方が、オリジナルの結合方法に比して大気モデルでおよそ 50 秒、海洋モデルでおよそ 40 秒短い。この差は、用いたプロセッサ数によらずほぼ一定である。高解像度での補間計算に要した時間を表 5 に示す。オリジナルの補間計算では大気モデル→海洋モデルが約 50 秒、海洋モデル→大気モデルが約 23 秒の時間を要しているのに対し、カップラを用いた計算で

表 5 高解像度での補間計算に要する時間 (秒)

Table 5 Elapse time for interpolation at high resolution (sec).

	オリジナル		カップラ	
	大気→海洋	海洋→大気	大気→海洋	海洋→大気
ケース 2	49.49	23.34	0.683	0.067
ケース 3	49.53	23.37	0.347	0.041

はほぼ無視できる程度まで減少している．このことが実行時間の短縮に大きく寄与していると考えられる．なお，カップラを用いた補間計算の時間のうち，海洋モデル→大気モデルが並列計算の領域比以上に小さくなっているのは（結果に影響しない範囲での）補間アルゴリズムの改良によるものである．一方，大気モデル→海洋モデルの補間計算に要する時間が領域比に比して大きいのは，1) 領域が細分化されたことによってベクトル長が短くなったこと（オリジナル：251.3，カップラ：219.2），2) 1 回の補間計算における計算ループ内の計算量が少なくなった（オリジナルでは 15 データをループ内で 1 度に計算，カップラは 1 度の計算で 1~2 データ）ためメモリアクセスに対する演算比が低下したこと，の 2 つが主因で演算効率が低下したためと考えられる．この性能低下はベクトル計算機である地球シミュレータの特性に依拠するところが大きい．一方，筑波大学・東京大学・京都大学に導入された T2K オープンスーパーコンピュータ¹⁴⁾ のようなスカラプロセッサを用いたマシンでは，実行時間は単純に演算量で決まる比重が高い．そこで問題規模に対する実行時間の変化を演算量の変化に置き換えて考察する．Jcup の特徴は，既存の補間コードをほとんど形を変えずにカップラに組み込むことができる点であり，コードの変形にともなう演算量の変化は無視しうると仮定する．また問題規模 N は東西方向の格子数を基準とし，南北方向の格子数も同じ割合で変化するものとする．初めに大気モデルについて考える．MIROC の大気モデルは 1 次元分割で並列化されており，1 つのプロセッサが担当する南北方向のグリッド数は n で固定とする．この場合，1 グリッドあたりの全演算に対する補間計算の割合を α とすると，オリジナルの大気モデル（ルートプロセッサ）における演算量は $(1 - \alpha)nN + \alpha N^2$ となる．一方，カップラを用いた場合，補間計算は各プロセッサでローカルになるため，演算量の変化は $(1 - \alpha)nN + \alpha nN$ となる．すなわち，オリジナルでは補間計算以外の演算量は問題規模に対して直線に変化するのに対し，補間計算部分は 2 乗で変化する．カップラを用いた場合はいずれの量も直線に変化することになる．これらの関係を， $\alpha = 0.1$ かつ $n = 1$ の場合について図 18 に示す．一方海洋モデルの場合，2 次元分割で並列化されておりプロセッサ数は N^2 に比例して増えると仮定できる．この場合カップラを用いたときの演

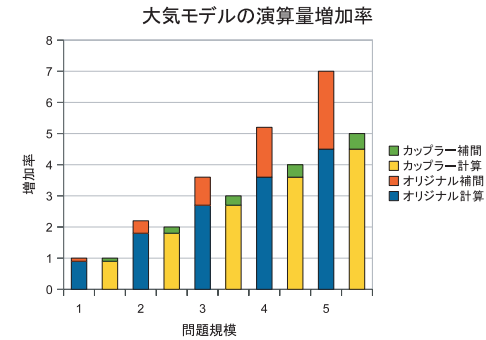


図 18 問題規模に対する大気モデルの演算量の変化

Fig. 18 Ratio of calculation to problem size of AGCM and OGCM.

算量の変化は $(1 - \alpha) + \alpha$ となって，問題規模によらず一定となる．また，仮にオリジナルの海洋モデルで補間計算を行っていた場合，問題規模に対して補間計算以外は一定であるのに対し，補間計算は 2 乗で変化することになる．

5.3 データ通信量

データ通信に要する時間を f_{trace} の情報から正確に把握するのは，モデル内・モデル間のロードインバランスや通信にともなう同期などの要因によって困難である．したがってここでは通信量について理論的な計算に基づいて考察する．想定したのは表 3 におけるケース 3 の場合である．オリジナルでのモデル間データ交換は Gather，補間計算，データ送受信，Scatter の順に行われる．1PE あたりの格子数は大気モデル 1280×20 ，海洋モデル 640×3 となる．また，大気→海洋では大気モデルは 17 種類のデータを Gather し補間後 15 種類のデータを海洋モデルに送る．海洋→大気の場合は Gather，送受信，Scatter の過程でいずれのプロセスでもデータの種類の数は 5 種類である．これらの条件から 1 回のデータ交換ステップにおけるモデル間のデータ通信量を求めると，大気モデルのルートから海洋モデルのルートへは 140 MByte，海洋モデルのルートから大気モデルのルートへは 46.7 MByte のデータが送受信される．また各モデルで Gather，Scatter されるデータ量は表 6 のようになる．

次にカップラを用いた場合のデータ通信量について述べる．カップラを用いた場合の通信量は，補間計算における送信モデル受信モデルの格子点の対応と各モデルの領域分割パターンから求めることができる．オリジナルの解析と同様 1 回のデータ交換ステップにおける送受信データ量を図 19 に示す．図の横軸はプロセッサ番号，縦軸は送信・受信したデータ

表 6 モデル間のデータ交換量 (byte)
Table 6 Exchange data amount of original code (byte).

		Gather	Scatter
大気	ルート	165,027,840	48,537,600
モデル	非ルート	2,088,960	614,400
海洋	ルート	46,617,600	139,852,800
モデル	非ルート	76,800	230,400

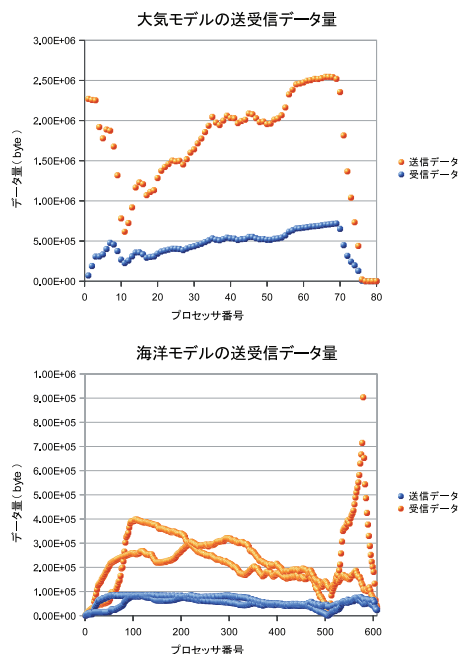


図 19 大気モデルと海洋モデルの送受信データ量
Fig. 19 Exchange data amount of coupled models.

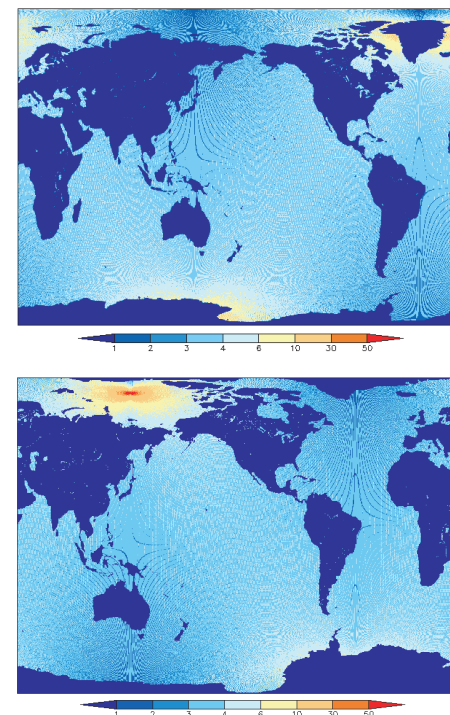


図 20 受信モデルの各格子で用いる送信モデルの格子数 (上図: 海洋モデル→大気モデル, 下図: 大気モデル→海洋モデル)
Fig. 20 A number of grid points of SEND model used for interpolation on RECV model (Upper: OGCM → AGCM, Lower: AGCM → OGCM).

量 (byte) である。カップラを用いたデータ通信では、個々のプロセッサが個々の相手プロセッサと必要なデータのみを交換するため、プロセッサによってデータ通信量が異なる。特徴的なのは大気モデルの 77 番目以降のプロセッサで送受信データ量が 0 であることと海洋モデルの 570 番前後のプロセッサで局部的に受信データ量が多いことである。図 15 に示し

たとおり大気モデルではプロセッサは北から南へ 1 次元に配置されており、番号の大きいプロセッサは南極域を計算することになる。したがって、最下層は陸面のみとなり海洋モデルとの間にデータ通信は行われない。これが大気モデルの 77 番以降のプロセッサでデータ送受信量が 0 となる理由である。一方、海洋モデルは南から北へプロセッサが配置され、また偶数番号のプロセッサと奇数番号のプロセッサで東西方向に分かれている。MIROC に実装されている補間計算では、受信モデルの各格子点において補間計算に用いられる送信モデルの格子点数は場所によって異なっている。この様子を表したのが図 20 である。図の左上部分で特に使用格子点数が多いことが分かる。高解像度時の海洋モデルは極を移動しており、

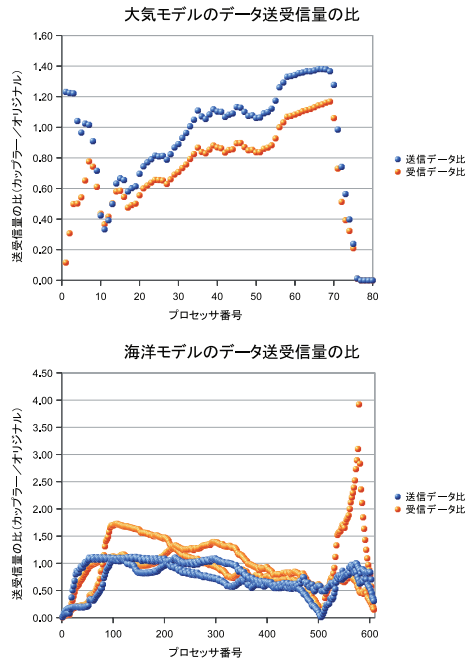


図 21 オリジナルとカップラのデータ送受信量の比

Fig. 21 Data amount ratio between coupled model and original model.

当該部分は実際の北極点に対応する．大気モデルの格子は緯度経度に沿っており極は格子が集中している．そのために海洋モデルの補間計算において多数の大気モデル格子が用いられ，結果として当該領域を担当するプロセッサではデータ受信量が多くなっている．なお，海洋モデルの送受信データ量を示す線がそれぞれ 2 本に見えるのは，ケース 3 において海洋モデルの領域が東西に 2 分割されていることを反映しており，偶数番号のプロセッサと奇数番号のプロセッサで 1 本ずつの線となって見えている．

個々のプロセッサの通信データ量がオリジナルの場合に比してどの程度変化したかは，(各プロセッサのデータ通信量)/(オリジナルのルート以外の Gather, Scatter 通信量) で求められる．これを示したのが図 21 である．補間計算に用いる格子数が多く，受信データ量の大きい海洋モデルの一部のプロセッサで 4 倍近い増加となっているなど，プロセッサによる差が大きい．これは海陸分布の影響および補間計算に用いる格子数が格子間隔の小さい高緯

表 7 データ通信量比の平均値

Table 7 Average value of exchange data amount ratio.

	送信	受信
大気モデル	0.92041	0.70799
海洋モデル	0.74526	0.96885

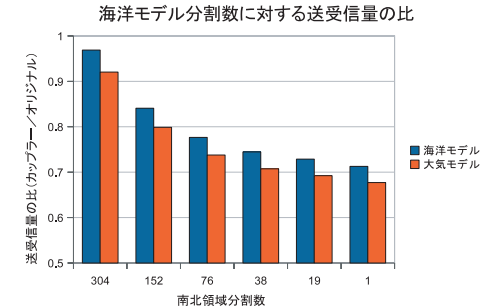


図 22 海洋モデルの領域分割数に対する送受信データ量の比

Fig. 22 Data amount ratio in relation to OGCM domain decomposition.

度で多くなっていることによるものである．

通信量比の全プロセッサ平均値は表 7 に示すとおり，海洋モデル→大気モデルが 0.71 ~ 0.75，大気モデル→海洋モデルが 0.92 ~ 0.97 である．海洋モデル→大気モデルの値は陸域のデータ通信がなくなった効果を反映していると考えられる．一方，大気モデル→海洋モデルの場合，陸域の通信がなくなったにもかかわらず，データ通信量の減少幅が小さい．これは，補間計算をローカルに行うために，同一の送信モデル側格子点データを複数の受信モデル側プロセッサが必要とする場合が生じるためである．このことを確かめるために，海洋モデルの領域分割数を変化させて送受信データ量の比の変化を調べた．結果を図 22 に示す．304 分割では海洋モデル大気モデルともに 0.9 以上だった送受信量の比が，分割数が少なくなるにつれて減少し 0.7 前後の値に収束しており，上記の推定が正しいことが分かる．同様のことは海洋モデル→大気モデルの場合にもいえるが，本ケースでは海洋モデルの領域分割数が大気モデルの領域分割数より多く，よって大気モデル→海洋モデルの場合に顕著に影響が現れたと考えられる．なお，これらの解析で大気モデルの比が海洋モデルの比より小さいのは，オリジナルの場合に，大気モデルは 1280 × 960 グリッドのデータを Gather, Scatter しているのに対し，海洋モデルが Gather, Scatter するグリッド数は 1280 × 912

表 8 メモリ使用量 (MByte)
Table 8 Memory usage (MByte).

	平均値		最大値	
	オリジナル	カップラ	オリジナル	カップラ
ケース 1	849.455	850.974	1,295.897	1,297.421
ケース 2	1,647.472	1,634.945	6,050.598	5,867.855
ケース 3	1,466.398	1,462.473	5,533.892	5,280.788

であること、すなわち比の計算において大気モデルの計算に用いた分母の方が大きいことを反映している。

5.4 メモリ使用量

メモリ使用量の変化については、プログラムから理論的に求めるのが困難である。したがって、実測された値について表 8 に示す。表は ftrace によって得られた各 PE の平均値と最大値である。中解像度（ケース 1）では平均値、最大値ともにカップラを用いた場合の方がオリジナルよりわずかに増加している。一方、高解像度（ケース 2, ケース 3）では平均値、最大値ともにカップラを用いた場合のメモリ使用量の方が小さい。メモリ使用量は最大値がボトルネックとなるため最大値に着目すると、メモリ使用量の減少率はケース 2 で約 3.0%, ケース 3 で約 4.6% である。これは補間計算に関わる 2 次元データについて、オリジナルがルートプロセッサに全領域のデータを保持するのに対し、カップラを用いた場合は各プロセッサが自領域のデータのみを保持すればよいからである。そのため、解像度が高かつプロセッサあたりの格子数が少ないほど両者の差は大きくなる。

6. まとめと今後の課題

気候モデル MIROC を用いて、カップラの性能を評価した。その結果、中解像度では従来の方法に対する実行性能上の優位性は認められなかったが、高解像度では実行速度、データ通信量、メモリ使用量ともに性能向上が得られた。気候モデルの解像度は計算機の能力と必要な計算量（時間積分の期間や計算回数など）によって決められる。計算能力の向上につれて、より高い解像度での気候シミュレーションが求められることから、カップラを用いた計算の優位性、カップラの重要性は今後さらに大きくなるものと考えられる。

Jcup の重要な設計思想であり特徴は、補間計算プログラムを利用者が実装できる、あるいは実装しなければならないことである。この方法の利点は前述したが、逆に、要素モデル間でのグリッドの対応関係（マッピングテーブル）が事前に与えられていなければならない

という制約が生じた。これは、「利用者は双方のモデルの座標系について知っていなければならない」ということを意味し、ひいては要素モデルのモジュラリティ低下につながる。また、全球モデルの中で領域モデルが台風をトレースして移動する計算のような、グリッドの対応関係が変化する場合にも対応できない。この問題に対応するには、カップラとは別にグリッドの対応関係を計算するソフトウェアを開発し、プリプロセッサとする、あるいはカップラに組み込む必要がある。

本論文では、気候モデルにおいて最も基本的な要素モデルである大気モデルと海洋モデルを対象として結合試験を行い性能を評価した。今後は、適用する要素モデルの範囲を広げて開発を継続する必要がある。ここで重要な要素モデルと考えられるのは、現在大気モデルに組み込まれているサブプロセスである。その理由は、

- 大気モデル（あるいは他のモデル）で計算される様々なプロセスは必ずしもすべて同じ時空間解像度である必要はない。したがって、計算負荷が高く、かつ他のプロセスよりも粗い時空間解像度でも十分な精度が得られるようなプロセスを大気モデルから切り離し、カップラを介して大気モデルと並列に計算することにより、全体の実行性能を向上させることができる。
- 気候モデルの予測不確実性を評価し、気候現象の理解・再現性能の向上を得るうえで、着目するプロセスを別の気候モデルの同様のプロセスと置き換えることはきわめて有効な手法である。

からである。

JMA/MRI ESM では Scup を用いて大気モデルと大気化学輸送モデルが結合されている。一方、MIROC では大気化学輸送モデルは大気モデルの一部としてモデルに組み込まれている。よって、このプロセスを大気モデルから切り離し、別プログラムとしたうえで、Jcup を用いて再結合すること、さらには JMA/MRI ESM のモデルを MIROC に結合し、計算性能やシミュレーションの結果に及ぼす影響を評価することが次の課題である。

さらに、次世代気候モデルとして静水圧近似を用いず積雲対流を直接表現できる全球大気モデルが国内の複数機関で開発されている。たとえば、CCSR/FRCGC による NICAM⁹⁾ や地球シミュレーションセンターによる MSSG¹⁵⁾ である。これらのモデルは極域での格子集中をさけるため、正二十面体格子 (NICAM) や陰陽格子 (MSSG) といった、従来結合計算の対象となってきた全球大気モデルとは異なる格子構造を持つ。これらのモデルを他のモデルと結合できるようにすることは、次世代、次々世代 HPC 上でのより精緻な気候シミュレーションに不可欠であり、またカップラ開発にとっても大きなチャレンジである。今後は、

これらのモデルをも視野に入れた開発を進める予定である。

謝辞 本研究は文部科学省「21世紀気候変動予測革新プログラム」の支援により実施された。また計算には地球シミュレータを利用した。

参 考 文 献

- 1) 山崎 憲, 大石進一, 小山田耕二: シミュレーション技術が先導する未来社会, シミュレーション, Vol.27, pp.80-125 (2008).
- 2) 理化学研究所: パンフレット「次世代スーパーコンピュータの開発と利用」(2006).
- 3) Valcke, S., Declat, D., Redler, R., Ritzdorf, H., Schoenemeyer, T. and Vogelsang, R.: The PRISM Coupling and I/O System, *Proc. 6th International Meeting of high performance computing for computational science*, Spain (2004).
- 4) Drake, J.B., Jones, P.W. and Carr, G.R.: Overview of the software design of the Community Climate System Model, *International Journal of High Performance Computing Applications*, Vol.19, pp.177-186 (2005).
- 5) Hill, C., DeLuca, C., Balaji, V., Suarez, M., da Silva, A. and the ESMF Joint Specification Team: The Architecture of the Earth System Modeling Framework, *Comp. in Science and Engineering*, Vol.6, pp.12-28 (2004).
- 6) Arakawa, T.: Design concept of the Framework for the Next-Generation Atmosphere Simulation Model, *Proc. 4th International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications*, Tokyo (2000).
- 7) ESMF Joint Specification Team: *ESMF User Guide* (2009).
- 8) Valcke, S. and Redler, R.: *OASIS4 User Guide* (2006).
- 9) Tomita, H., Goto, K. and Satoh, M.: A new approach to atmospheric general circulation model: Global cloud resolving model NICAM and its computational performance, *Journal on Scientific Computing*, Vol.30, pp.2755-2776 (2008).
- 10) Takahashi, K., Azami, A., Abe, T., Sakuma, H. and Sato, T.: Developing coupled ocean-atmosphere global climate model for the Earth Simulator and its computational/physical validation, *NEC Research and Development*, Vol.44, pp.109-114 (2003).
- 11) Yoshimura, H. and Yukimoto, S.: Development of a Simple Coupler (Scup) for Earth System Modeling, *Pap. Met. Geophys*, Vol.59, pp.19-29 (2008).

- 12) K-1MODELDEVELOPERS: K-1 Coupled GCM (MIROC) Description Teck. report1, The Center for Climate System Research, University of Tokyo (2004).
- 13) ESMF Joint Specification Team: Code Change Metrics.
http://www.esmf.ucar.edu/metrics/code_change.shtml
- 14) 石川 裕, 片桐孝洋, 吉廣 保: T2K オープンスーパーコンピュータと共用イノベーション, 電気学会誌, Vol.129, pp.28-31 (2009).
- 15) Takahashi, K., Xindong, P., Kenji, K., Mitsuru, O., Koji, G., Masayuki, Y., Fuchigami, H. and Takeshi, S.: Non-hydrostatic atmospheric GCM development and its computational performance, *Use of High Performance computing in meteorology*, Zwiefelhofer, W. and Mozdynski, G. (Eds.), pp.50-62, World Scientific (2005).

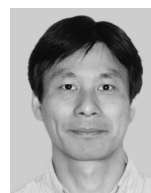
(平成 21 年 5 月 11 日受付)

(平成 21 年 8 月 24 日採録)



荒川 隆 (正会員)

平成元年東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻修了。平成元年～9年(財)日本気象協会。平成9年から(財)高度情報科学技術研究機構。



吉村 裕正

京都大学理学部卒業。平成3年気象庁入庁。平成7年4月～21年3月気象研究所気候研究部。平成21年4月から気象研究所予報研究部。