

気候シミュレーションにおける 結合ソフトウェアの開発

A Developing Program of a Coupling Software for Climate Simulation

(財)高度情報科学技術研究機構 計算科学技術部*¹

気象庁 気象研究所*²

荒川 隆*¹, 吉村 裕正*²

気候シミュレーションは、地球温暖化が国際的な問題となっている現代社会において極めて重要な技術である。現実の気候は様々なスケールの多様な現象が複雑に相互作用しており、それをシミュレートするモデルも個々の物理現象を表現するサブモデルの集合として構築されている。サブモデルの不確実性を評価し予測精度を向上させるには、サブモデルのモジュラリティを高め、サブモデルの改修や交換を容易にするようなソフトウェア（カップラー）が有用である。このような背景の下、国内外の複数の機関でカップラーの研究・開発が行われている。しかし国内においては複数の気候モデルを対象とした汎用的なカップラーは存在しない。そこで現在、「21世紀気候変動予測革新プログラム」の一部として、日本の気候モデルを主な対象とした汎用的なカップラー開発計画が進展している。本稿では開発の背景とカップラーの構造を概説し、日本を代表する気候モデルであるMIROCに対してカップラーを適用した事例について紹介する。

1 研究の背景と目的

気候と気候シミュレーション

天気予報や気候変動予測など気象現象のシミュレーションは、シミュレーション技術が適用される様々な科学技術分野の中でも重要な位置を占める。TOP500の統計情報から、利用分野の割合をみると、図1に示すように Geophysics および Weather and Climate Researchがそれぞれ独立したカテゴリとして存在し、その割合は9.8%と1.8%になっている[1]。この割合は個別にはResearchの13%、Financeの11.2%には及ばないものの、合計するとFinanceを上回り、Research全体の割合に近くなる¹。

一方、気象学にとってもシミュレーションは極めて重要な技術であり、欠くことのできない研究手法である。これは、1) 天気や気

候変動の将来予測に対する社会的要請が大きいこと、2) 実験や観測では十分なデータが得られないため現象の解析にはシミュレーションの結果が不可欠であることによる。

気象現象を扱うシミュレーションモデルの中でも気候シミュレーションモデル（以下気候モデル）は複雑かつ大規模なモデルである。これは気候形成に関与する物理現象が極めて

¹ ただしTOP500に現れるGeophysicsは石油探査に関わる固体地球シミュレーションが主であり気象現象のシミュレーションは含まれないと思われる。一方、Researchカテゴリの中でも気象現象のシミュレーション研究がある程度のウェイトを占めると推測される。このような理由からTOP500の統計からは気象シミュレーションが全体に占める割合を正確に見積もることはできない。

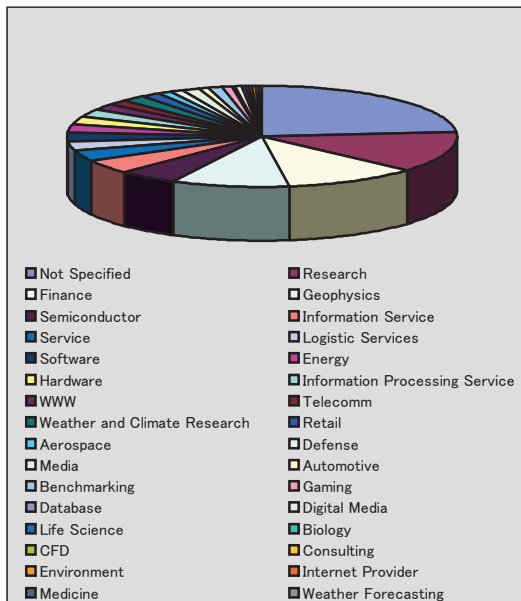


図1 計算機利用分野の割合

多岐にわたるためである。大気に関わる諸現象（の一部）を模式的に表したのが図2である。図では太陽からの短波放射、雲や地表面からの長波放射、降水現象や積雲対流、潜熱、顕熱輸送などが例示されている。もちろん、気候形成や変動に影響を与える要因はこれだけではない。どのような現象が主因となるかは、着目する時間スケールや現象によって異なる。例えば、氷期間氷期のような百万年単位の現象では大陸の配置とそれに伴う海流の変化、山脈の隆起などを考慮する必要がある。一方、現在国際的に問題となっている大気中のCO₂増加に伴う温暖化では、陸上生態系、海洋生態系によるCO₂の放出・吸収や海洋によるCO₂吸収量の変動が重要である。

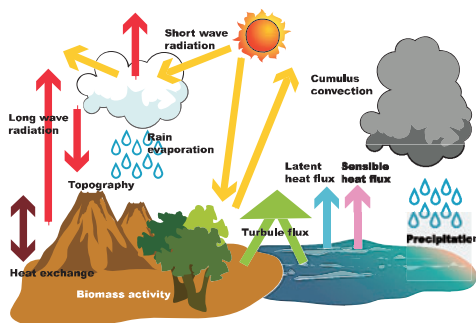


図2 気候形成に關与する諸現象

従って気候モデルは、必要に応じてこれらの現象をモデル内で適切に表現しなければならない。図3はIPCC第5次報告書に向けた気候変動予測に用いられる（予定の）気候モデルの構成例を表す。モデルは大きく大気・海洋・陸面の3つのブロックに分けられる。それぞれのブロックは更に、大気大循環モデル・大気化学モデル・エアロゾルモデル、海洋大循環モデル・海洋生物地球化学モデル、陸面過程モデル・陸域炭素循環モデル・動的植生モデルからなる²。以下、気候モデルを構成するこれらのサブモデルを要素モデルと呼ぶ。

個々の要素モデルは1) 対象とする現象の解明が十分ではない、2) 計算時間やメモリの制約による方程式の簡略化、などの要因により不確実性を持つ。より正確な再現・予測のためには、要素モデルの不確実性を定量的に評価し、改良しなければならない。しかし、気候現象は極めて複雑な非線形システムであり、ある要素モデルの不確実性が系全体に与える影響を正確に評価することは容易ではない。不確実性評価の一つの手法として、着目するプロセスに関する要素モデルを同様な別の要素モデルと交換し、応答をみるとい

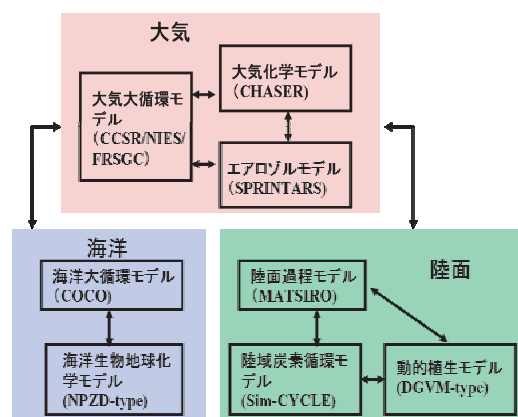


図3 気候モデルの構成要素

² モデルの構成や呼称は個々の気候モデルで異なる。また、本稿に掲げた構成が最終的な形であるとは限らない。

う方法が考えられる。この場合に問題となるのは、気候モデルのソフトウェア構造である。

ある物理プロセスや要素モデルがプログラムとしてどのように組み込まれているか、またどのようにして物理量を交換しているかは気候モデルによってまちまちであり、一意には決められない。また変数の型、座標の表現方法も多様である。このために、ある要素モデルを別の要素モデルと入れ替えるには、これらの相違を適切に処理する必要がある。しかし、気候モデルは複雑かつ大規模なプログラムであり、一研究者がこれを行うのは時間においても労力においても負荷が大きく、現実的ではない。この問題を解決するには図4に示すように、座標表現の相違を解消し、物理用の交換に統一的なインターフェースを与えるソフトウェアを開発し、それぞれの要素モデルはこのソフトウェアを介して結びつくようにすることが有効である。このソフトウェアはカップラーと呼ばれる。カップラーは世界の複数の機関で開発され実用化されている。米国ではESMF (Earth System Modeling Framework) プロジェクト[2]、欧州ではPRISM (Programme for Integrated Earth System Modeling) プロジェクトにおいてモデルカップリングソフトウェアの研究開発を行っている[3]。特にESMFは米国NITRD(The Networking and Information

Technology Research and Development Program) のSupplement to the President's FY 2007 Budgetにおいて、推進すべき重要課題の一つと位置づけられている。一方、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ー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AFASと海洋モデルOFESを結合するカップラーを開発し大気・海洋結合シミュレーションを実施している[4]。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ーScupを開発した[5]。Scupは大気モデルと大気化学物質モデルの結合を第一目標として開発されたものであり、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次元データの交換を可能としたシンプルで扱いやすいインター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(FRCGC)、国立環境研究所(NIES)などが共同開発している気候モデルMIROC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ーは存在せず、

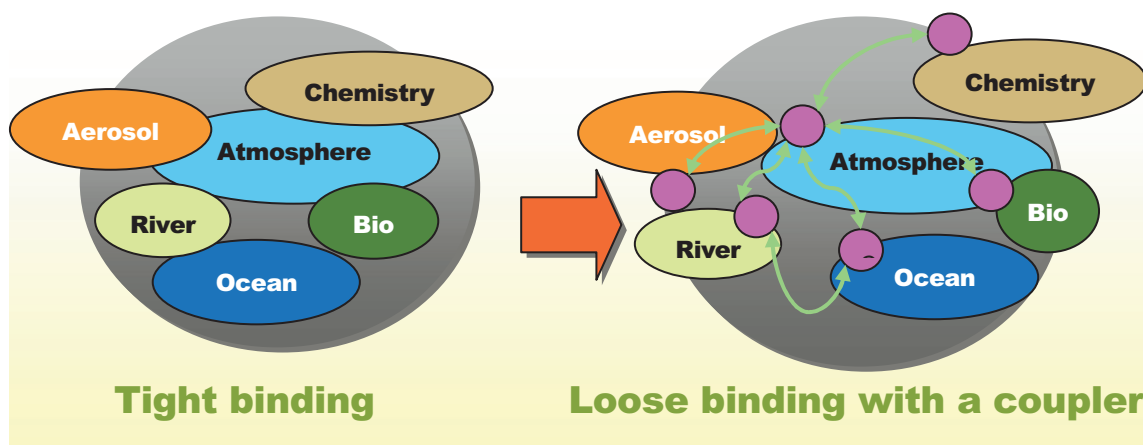


図4 カップラーの概念

日本の気候研究コミュニティにおいては、その開発が急務となっている。

21世紀気候変動予測革新プログラム

前項に述べた背景に基づき、文部科学省「21世紀気候変動予測革新プログラム」の一環として、国内の気候モデルを対象としたカップラー開発が行われている[6]。「21世紀気候変動予測革新プログラム（以下、革新プログラムと呼ぶ）」は平成14年度から18年度にかけて実施された「人・自然・地球共生プロジェクト」に引き続き、平成19年度から23年度にかけて実施されるプロジェクトである。人・地球・自然共生プロジェクトの主たる目標はIPCC第4次評価報告書を対象として温暖化予測を行うことであり、地球シミュレータの能力をフル活用することにより大きな成果を上げた。革新プログラムでは次のIPCC第5次評価報告書への貢献を目的とし、より精緻な温暖化予測を行うことが計画されている。温暖化予測モデルの高度化および予測、不確実性の定量化・低減、自然災害に関する影響評価の3項目の研究領域について、長期気候変動予測、近未来気候変動予測、極端現象の変化予測の3つのチームが取り組む体制になっている³。3チームの中心組織、および用いる気候モデルは概要以下の様になっている。3チームのうち2チームはMIROCおよびMIROCをベースとしたモデルを用い、1チームは気象庁・気象研究所のモデルを用いていることになっている。このうち、JMA/MRI GCMには先述したScupが対応している。

本カップラー開発においては、MIROCおよびMIROCをベースとした地球システムモデルを第一の開発ターゲットとし、Scupのアルゴリズムや開発経験を発展させつつ、Scupとインターフェースの共通化を計る。

³ 正確には3つのチームに加えて、雲解像モデリングと海洋微物理過程の2チームがある。

それにより国内の気候モデル、特にJMA/MRI GCMとMIROCの2つの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ーを作成することを目的とする。

開発計画は現在進行中でありカップラーも完成途上である。本稿ではカップラーの設計について概説し、ついでMIROCの大気モデルと海洋モデルを結合した事例について紹介する。

表1 革新プログラムのチーム概要

チーム	長期気候変動予測	近未来気候変動予測	極端現象変化予測
中心組織	FRCGC	CCSR	JMA/MRI
モデル	MIROC ベースの地球システムモデル	MIROC	JMA/MRI GCM

2 カップラーの設計と実装

カップラーの主要な機能は、並列計算機上で動作する複数の要素モデル間でデータ交換を行うことである。ここで問題となるのは、各要素モデルは1) 独自の座標系・座標表現、2) 独自の時空間解像度を持ち、3) 他の要素モデルのデータを必要とする場所もまちまちである、ということである。従って、カップラーは「任意の座標、時刻のデータ」を「プログラムの任意の場所で」、「高速に」交換することが求められる。言い換えれば、空間上（任意の座標）、時間上（任意の時刻、任意の箇所）の自由度を確保しつつ、高速に処理を行うことが要求される。これらを踏まえて、以下にカップラーの設計方針について述べる。

カップラーの実行形態

カップラーの実行は、1) 独立したプロセスとして実行される、2) 各要素モデルの一部として実行される、という2つのパターンがある。独立したプロセスとして実行される

場合、図5に示すように、モデルはある積分時間ステップの任意の場所で、データ送受信の命令を発することができる。この場合、カップラーは要素モデルから送られてきたデータを蓄積し、各モデルの受信要求にあわせてデータをモデルへ送る。個々のモデルは、他のモデルの時刻や送受信要求の対応を気にすることなしに送信・受信コマンドを発行できる。反面、データ送受信に際し、送信モデル→カップラー→受信モデルと2段階のパスを経なくてはならなくなるため、モデル同士が直接送受信する場合に比べて通信効率が低下する恐れがある。

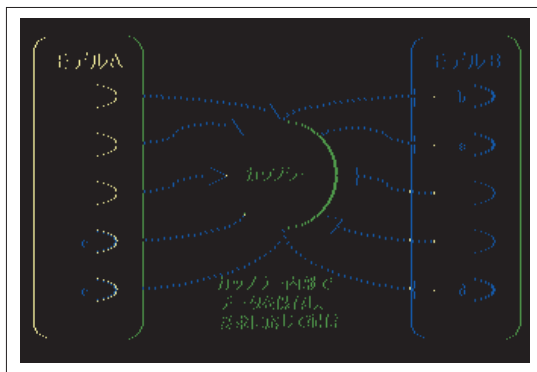


図5 独立プロセスでのデータ通信

一方、カップラーをモデルの一部として実行する場合、データパスは1段階ですむが、MPIルーチンを直接用いるだけでは送信受信の対応関係に制約が生じ、図5のような柔軟な送受信はできなくなる。そこで、図6に示すように、カップラー内部にバッファを設けることで送受信の柔軟性を確保した。ただし、この方法では図5のように完全に柔軟な通信はできず、赤線で示した2カ所で明示的にデータ交換を指示する必要がある。

座標変換

異なる座標系への補間など交換するデータの変換については、カップラーが行うべき計算であり、例えばPRISMカップラーは代表的な補間アルゴリズムをカップラー内部に実

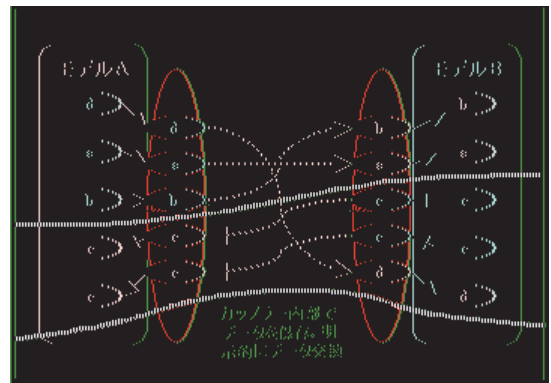


図6 モデルプロセスでのデータ通信

装している。しかし、起こりうる全ての座標系や単位系の変換をカップラーに実装するのはプログラムの肥大化・複雑化を招き、またサポートされていない座標系のモデルへの対応も困難となる。さらに既存の同種モデルでも物理量の扱いが異なっている場合があり（例えば海洋モデルの陸地の扱いなど）、座標変換コードをカップラー内部に隠蔽することは、カップラーの拡張性・汎用性を著しく損ねる可能性がある。従って図7に示すとおり、カップラーコードのうち座標変換に係わる部分はGlass Boxとし、利用者が自由に改修できるように設計する。

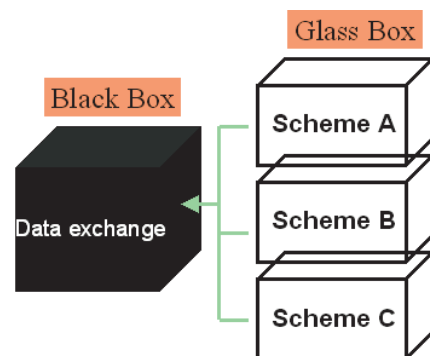


図7 座標変換コードのイメージ

カップラーの実装

カップラープログラムはFortran90で記述した。Fortran90で導入された新たな概念であるmoduleを基本単位とし、プログラム全体は機能に応じて分割された複数のモジュール

ルから構成される。それぞれのモジュールは、複数のサブルーチンと関数、モジュール内で共有される変数群、および複数の定数で構成される。これら構成要素のうち、モジュール内で共有される変数群はすべてprivate属性をもち、モジュールの外からアクセスする事はできないようになっている。また、定数およびサブルーチン、関数についても必要最小限のものだけが外部からアクセス可能なpublic属性を持ち、それ以外はすべてprivateとなっている。このことによって、モジュールの独立性を高め、プログラムの改修を容易にしている。カップラープログラム全体は12のモジュールから成り、総行数はおよそ10000行、サブルーチンの数は360である。モジュール相互の関係を図8に示す。茶色の四角内の5つのモジュールは定数やI/Oサブルーチン、MPIサブルーチンなどを定義した汎用モジュールである。これら5つは他のモジュールの任意の場所で自由に用いられる。それ以外のモジュールは矢印で表した関係性を持つ。図の中でinterfaceモジュールとinterpolation_interfaceモジュールの2つが、カップラーを使用する際にモデルが用いるサブルーチン群を定義しているモジュールである。

このうちinterpolation_interfaceモジュールは補間計算に関わるサブルーチン群を、interfaceモジュールは初期化やデータ交換など補間計算以外のすべての操作を行うためのサブルーチン群を定義している。従って、カップラー使用者はこれら2つのモジュールを参照するだけで、データ交換や補間計算に関わるすべての操作が可能になる。

3 MIROCへの適用

ここでは、MIROCの大気モデルと海洋モデルをカップラーで結合した事例について述べる。MIROCの大気モデルと海洋モデルは既存の結合プログラムで結合されている。こ

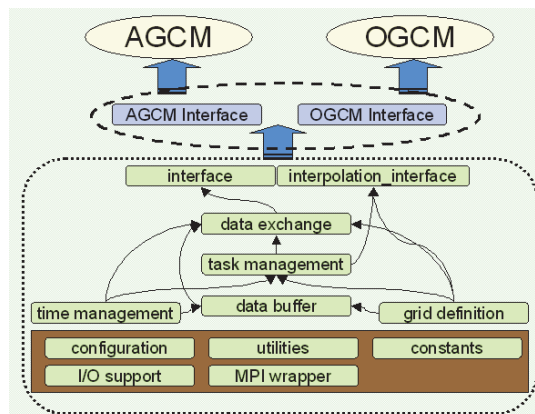


図8 モジュールの関係

の結合プログラムにおけるデータの流れを図9に示す。図で左側のボックスが大気モデル、右側のボックスが海洋モデルを表す。白いボックスがサブルーチン、オレンジと赤の四角はプロセッサである。赤い四角はルートプロセッサを意味する。時間積分ループの冒頭で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が送られる。ついで、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が送られる。補間計算はいずれの場合も、大気モデルのルートプロセッサが行う。ルートプロセッサが受信したデータは、各プロセッサにScatterされ、時間積分内で計算に使われる。時間積分ループの最後に、各プロセッサが保持しているデータをルートプロセッサにGatherする。交換されるデータ数は大気→海洋が14変数、海洋→大気が5変数である。

カップラーを用いた場合、時間積分最後のGatherプロセスは不要となり、両モデルの各プロセッサは直接相手モデルのプロセッサとデータ交換を行う。また大気モデルが行っていた補間計算は、受信側モデルが行うようになる。この変更により、1) ルートプロセッサで行っていた補間計算を各プロセッサで並列に行うことによる計算効率の向上、2) データのGather, Scatter過程がなくなることによる通信効率の向上、が期待される。

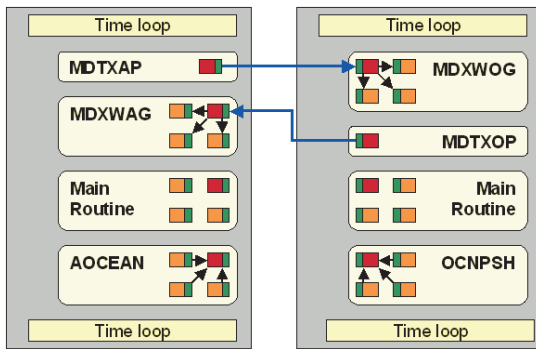


図9 大気海洋モデル間のデータ交換

4 性能評価

MIROCでの性能評価に用いた解像度は表2の2パターンである。大気モデルが海洋モデルとデータ交換を行う最下層グリッドは海洋モデルの格子数にあわせて、上層の大気グリッドより細くなっている。それが表2のカッコ内の値である。従って、結合計算を論じる場合のグリッド数はカッコ内の値を用いる必要がある。

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

表2 性能評価に用いた格子数

	大気モデル	海洋モデル
中解像度	128x64 (128x64)	256x192
高解像度	320x160 (1280x960)	1280x912

低2グリッド、海洋モデルは最低3グリッドを一つのプロセッサ内で保持していなければならない。従って大気モデルが取りうる最大PE数は中解像度で32、高解像度で80となる。ここでは、中解像度を1x32+1x64(大気+海洋)、高解像度を1x80+2x304(同)分割で計算した場合の性能について述べる。

始めに中解像度の結果について述べる。MIROCオリジナルの結合方法と、カップラーを用いた結合方法での時間積分ループに

おける実行時間を測定したところ、オリジナル197秒、カップラー307秒と大幅に性能が低下した。原因を調べるために性能測定ツールVampirでプロセッサ毎の計算プロファイル測定した。測定は大気8PE、海洋8PEで行った。結果が図10である。図のうち上半分が大気モデル、下半分が海洋モデルを表す。また薄緑が計算を、赤はMPIでの待ち時間を表している。図に示されるとおり、海洋モデルで計算時間が大きく、これが全体のボトルネックになっていることがわかる。そこで、海洋モデルについて詳しくパフォーマンスを調査したところ、カップラー内で保持している変数を1次元から2次元に変換するサブルーチンで実行時間の大きいことがわかった。そこで、この部分のチューニングを行い、実行時間を無視できる程度まで短縮した。その結果が図11である。図下段の右側でわかるとおり、海洋モデルでの演算時間が大幅に短縮しボトルネックが解消されている。

修正後の実行時間を表3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ーを用いた結合方法で、実行時間に大きな違いは見られない。

次に高解像度のケースについて、ftraceの出力結果を図12に示す。全体の実行時間は平均値で1595.027秒から1560.235秒とおおよそ35秒短くなっている。対応してMFLOPS値も862.511から883.234と性能向上が得られた。図に示したのは前処理も含めた全体の実行プロファイルである。カップラーを用いた場合、補間係数を海洋モデルへ送信するなど前処理の実行時間が長くなるので、時間積分部だけに着目すればより性能が向上していると考えられる。メモリ使用量の最大値についても5534Mbyteから5280Mbyteと5%程度減少しており、全体として、カップラーを用いてデータ通信や座標変換計算方法を改良した効

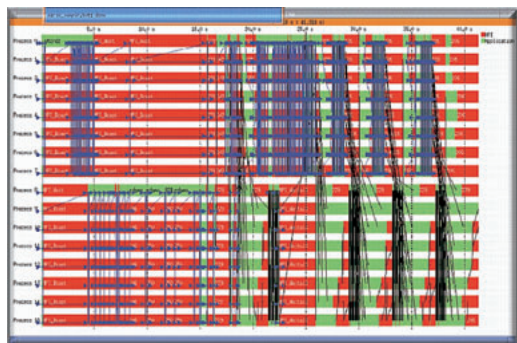


図10 実行プロファイル (修正前)

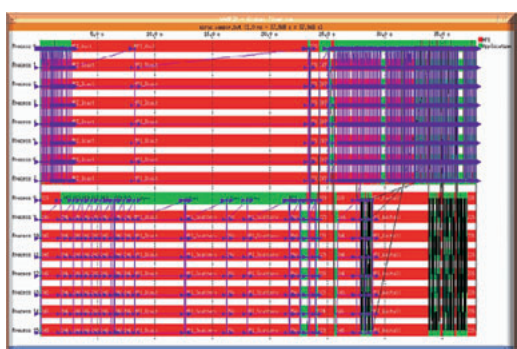


図11 実行プロファイル (修正後)

表3 中解像度での実行時間 (秒)

	オリジナル	カップラー
大気モデル	189.1454	189.7546
海洋モデル	244.4606	250.4403

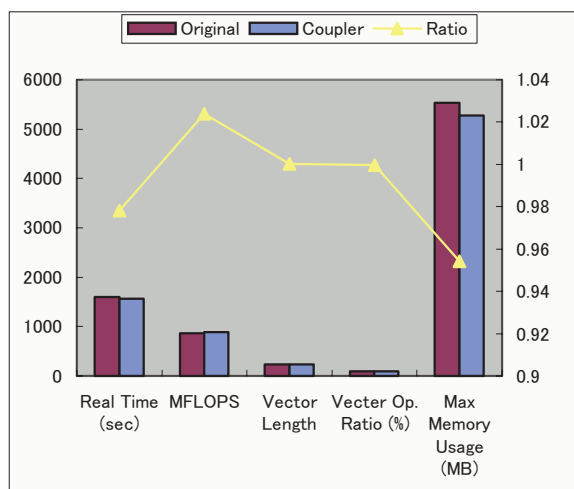


図12 高解像度での実行プロファイル

果が得られた。

5 まとめと今後の課題

平成19年度より開始された「21世紀気候変動予測革新プログラム」におけるカップラー開発は平成21年度で3年目に入る。初年度、2年度でカップラーの設計・実装を終え既存の大気モデル・海洋モデルをカップラーで結合した。その結果、高解像度においては一定の性能向上が得られた。モデルの解像度は計算機の発達に伴い今後も高解像度化し、それに伴いカップラーの優位性・有用性はますます大きくなるものと考えられる。今後は大気・海洋モデルの結合のみならず、大気モデルの様々な物理プロセス(要素モデル)に対してカップラーを適用できるように改良を進める予定である。また、CCSR/FRCGCで研究・開発が進められている非静力学モデルNICAMの正二十面体格子の様な従来とは異なる格子系を持つモデルの結合も重要な課題である。

参考文献

- [1] http://top500.org/lists/2008/11/TOP500_200811.xls
- [2] Hill, C., C. DeLuca, V. Balaji, M. Suarez, A. da Silva, and the ESMF Joint Specification Team (2004), The Architecture of the Earth System Modeling Framework, *Comp. in Science and Engineering*, 6, 12-28
- [3] Valcke, S., D. Declat, R. Redler, H. Ritzdorf, T. Schoenemeyer and R.Vogelsang (2004a), The PRISM Coupling and I/O System, *VECPAR'04, Proceedings of the 6th International Meeting, VOL. 1 : High performance computing for computational science*, Universidad 27 Politecnica de Valencia, Valencia, Spain.

- [4] K Takahashi, A Azami, T Abe, H Sakuma, and T Sato. 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.
- [5] H Yoshimura and S Yukimoto. Development of a simple coupler (scup) for earth system modeling. *Pap Met Geophys*, Vol. 59, pp. 19-29, 2008.
- [6] <http://www.kakushin21.jp/jp>
- [7] H Tomita, K Goto, and M Satoh. 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.