

海洋大循環モデルの高速並列計算法

(Highly Parallel Computation Method for an Ocean General Circulation Model)

三村裕一 (Yuichi Mimura)、 田中幸夫 (Yukio Tanaka)、

津川元彦 (Motohiko Tsugawa)、 鈴木立郎 (Tatsuo Suzuki)

地球フロンティア研究システム (Frontier Research System for Global Change)

1. はじめに

地球フロンティア研究システムモデル統合化領域では、高速海洋大循環モデルの開発を行っている。本稿では、このモデルの地球シミュレータでの計算性能を報告する。

2. プログラムの概要

本モデルは、地球全体の海水循環を高速にシミュレーションする事を目的としたプログラムであり、地球温暖化等の気候変動を予測に用いられる。基礎方程式系¹は、運動量、温度、塩分を従属変数とするプリミティブ方程式系である。

この方程式系は、時間スケールの短い表面重力波と比較的時間スケールの長い内部重力波を含んでいるため、そのまま計算すると時間ステップ幅が時間スケールの短い表面重力波の時間スケールで決まってしまう、計算効率が良くない。そこで本プログラムでは計算時間を節約するために、運動量方程式を、時間スケールの短い空間二次元方程式 (バロトロピック方程式) と、時間スケールの長い空間三次元方程式 (バロクリニック方程式) に分離して、バロトロピック方程式を短い時間幅で、バロクリニック方程式を長い時間幅で解く、いわゆるタイムスプリッティング法²を用いている。図1にこの両方程式で用いている分離タイムステップの関係を示す。

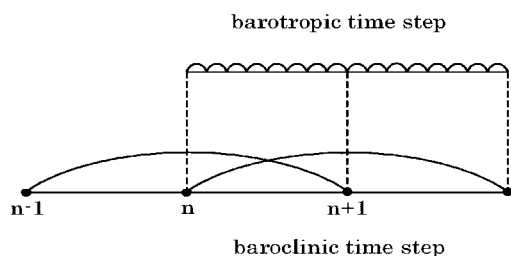


図1 分離タイムステップ

3. 地球シミュレータの特性

地球シミュレータ³は、640 台の演算ノードを高速ネットワークでつないだ、並列コンピュータである。1 台のノードは、16GB の共有メモリ

を持ち、8 GFLOPS のピーク性能を持つ 8 台のベクトル型演算プロセッサからなっている。

4. 本モデルの並列計算特性

地球シミュレータでの本モデルの並列計算性能については、参考文献4に示されているように、バロクリニック方程式、温度、塩分方程式の経過時間は、プロセッサ数を増加させると線形に減少しているが、バロトロピック方程式の経過時間はプロセッサ数を増加させても、バロクリニック方程式ほどには経過時間が減少しない。これは、バロクリニック方程式が空間三次元であるのに対して、バロトロピック方程式が空間二次元の方程式であることに起因する。両方程式ともに、プロセッサの増加とともに 1 プロセッサ当たりの計算量、通信量は減少するが、バロトロピック方程式では通信データサイズが小さくなり、通信時間はレイテンシー時間で決まってしまう、通信データサイズ減少の効果が現れない。

5. バロトロピック方程式ソルバーの高速化

前節で述べたように、バロトロピック方程式ソルバーの通信時間はハードウェアのレイテンシー時間で決まり、1 プロセッサ当たりの計算量及び通信量を減らしたとしても、全体の経過時間の減少には効果が出ない。しかし、地球シミュレータ上で更なるプログラム全体の高速化を図るためには、このバロトロピックソルバーの通信時間を減らす必要がある。そこで本報告では、通信頻度を減らす方法を用いて高速化を図ったので、本節ではその概要を報告する。

まず、本モデルのバロトロピック方程式ソルバーの概要を記す。ある時刻($tn+1$)でのグリッド(xi,yj)の物理量は、時刻(tn)での隣接4点のデータを参照して計算されている。このグリッドが計算領域の端にある場合には、隣接計算領域のグリッドの値が必要となるのだが、これは、あらかじめオーバーラップ領域で受け渡しておく。オーバーラップ領域が1グリッドの場合、1タイムステップごとに新しいデータを受け渡す必要が生じるので、データ通信が毎時刻発生するこ

とになる。図2にその計算領域の関係図を示す。この通信を減らすために、本モデルでは以下に述べる手法を取り入れることとした。

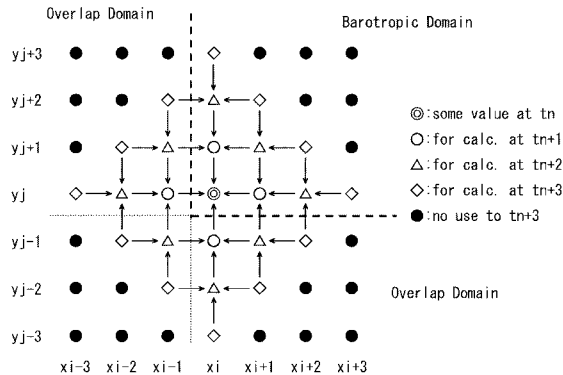


図2 バロトロピック計算領域

多くの海洋計算プログラムでは、あらかじめいくつかの隣接領域データをオーバーラップ領域に受け渡しておいて、毎時刻ごとのデータ更新を省く方法が良くとられている。たとえば、オーバーラップ領域を3グリッド用意しておけば、時間履歴(n+3)まで必要となる隣接計算領域の物理量がオーバーラップ領域に存在しているので、時間(n+1),(n+2)ではデータ更新を行う必要がなくなるので、通信頻度を少なくすることができる。

本モデルでのオーバーラップ領域の最適値を求めるために、3840台のプロセッサを使い、オーバーラップ領域を1~4グリッドまで変化させて並列計算性能を評価した。図3にバロトロピックソルバーの処理性能の変化を示す。オーバーラップ領域が増加すればデータ通信の頻度が減り、通信時間は減少している事が見て取れる。しかしその反面、計算量とデータ通信量が増えるため、経過時間の減少は徐々に頭打ちになる傾向にある。

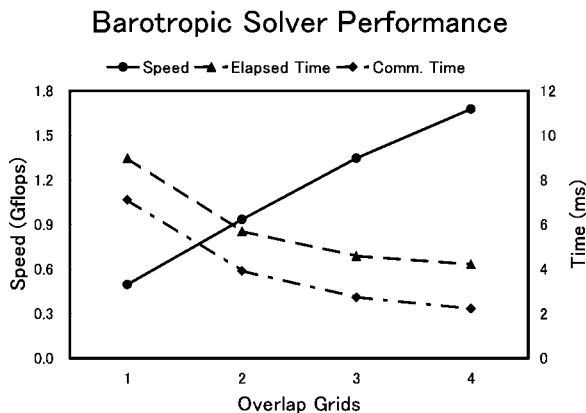


図3 オーバーラップ領域数.vs.計算性能 <3840プロセッサ使用>

6. 本プログラムの計算性能

バロトロピック方程式ソルバーのオーバーラップ領域を4として、使用するプロセッサ数が960、1820、3840台の場合の計算性能を図4に示す。プロセッサ数の増加とともに、計算性能がほぼ線形に向上している。

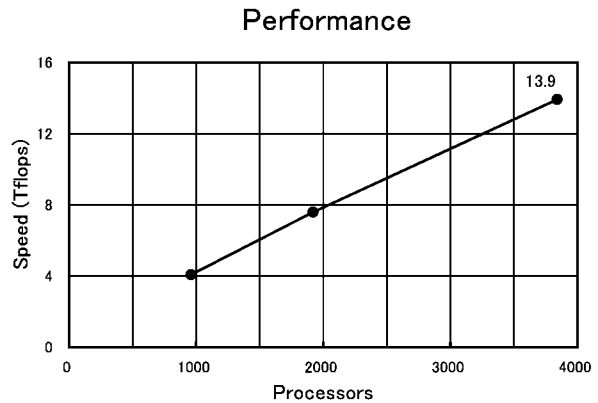


図4 使用プロセッサ数.vs.計算性能

表1に3840プロセッサ使用時の経過時間の長い上位3ソルバルーチンの個別性能を示す。

表1 ソルバー個別の計算性能 <3840プロセッサ使用>

	GFLOPS	経過時間 (ms)	通信時間 (ms)
バロトロピック方程式	1.677	4.215	2.266
運動量方程式	4.083	5.330	0.000
温度・塩分方程式	4.540	3.867	0.000
バロクリニックデータ通信	0.000	1.566	1.393
全体 (TFLOPS,ms)	(13.884)	(17.820)	(3.659)

上記のバロトロピック方程式の経過時間には、通信時間も含まれている。

運動量方程式、温度・塩分方程式ともに、計算ピーク性能に対して50%以上の性能を得ている。それに対してバロトロピック方程式は前節で説明した方法を用いて高速化を図ったものの、計算ピーク性能の20%にとどまっている。

¹ Bryan, K., A Numerical Method for the Study of the Circulation of the World Ocean. J. Comp. Phy., 3, (1969) 347-376

² Simons, T.J., Verification of Numerical Models of Lake Ontario. Part I, circulation in spring and early summer. J. Phys. Oceanogr., 4, (1974) 507-523

³ Yokokawa, M., Present Status on the Earth Simulator, Parallel CFD 2002, (2002)

⁴ Tanaka, Y., Yoon, S., Tsugawa, M., Design and Performance Analysis of an Ocean General Circulation Model Optimized for the Earth Simulator, Parallel CFD 2002, (2002)