

差分法による三次元地震波動シミュレーションにおける PC クラスタの利用

Using PC-cluster for 3D finite-difference seismic modeling

林 宏一[1], 斎藤 秀樹[1], 引間 和人[2]

Koichi Hayashi[1], Hideki Saito[2], Kazuhito Hikima[3]

[1] 応用地質, [2] 応用地質(株)技術本部

[1] OYO, [2] Oyo Corp., [3] Oyo Corporation, Technical Center

<http://www.oyo.co.jp/>

1. はじめに

筆者らは強震動予測のための数値シミュレーション手法の 1 つとして、三次元粘弾性差分法を開発している。差分法を用いてより高い周波数の波動を計算するためには格子サイズを小さくする必要があるが、このような計算を大きなモデルに対して行おうとすると計算量が膨大となり、計算時間とメモリー容量も大変大きくなる。この問題を解決する一つの方法は、計算を複数の CPU に分散する並列計算機を導入することである。従来、並列計算を行うためには大変高価な計算機が必要であった。しかし近年は、複数の廉価な PC を接続した PC クラスタが実用的となり、従来に比べて低いコストで大規模な計算を行うことが可能となってきた。そこで筆者らは、最大 20CPU の PC クラスタを構築し三次元粘弾性差分法による強震動シミュレーションを行うことを試み、期待したとおりの計算能力を得ることができた。以下にその要点をまとめる。

2. PC クラスタの概要

筆者らの構築した PC クラスタは、Dual-CPU のパーソナル・コンピューター 8 台を 100BASE のネットワークで接続したものであり必要に応じて PC を追加して計算している。OS は Windows2000、ハブはスイッチング・ハブ、メッセージ・パッシング・ライブラリーは MPI を用いた。廉価な PC や Windows を用いることにより安定性が懸念されたが、ハードおよび OS が原因で計算が途中で止まるようなトラブルは、これまでのところほとんど発生していない。

構築した PC クラスタの性能を評価する目的で、「姫野ベンチマークテスト」を行った。このベンチマークテストに用いられているプログラムは、3次元ポアソン方程式を有限差分近似で解く際に生じる連立一次方程式をヤコビの反復解法で解くものである。表 - 1 に実測の演算速度を、使用した CPU 数ごとに示す。表中には参考のため、他の計算機による同一テストの結果をあわせて示す。ベンチマークテストの結果、本システムにおいて 16CPU を使用した場合、1.1GFLOPS の実行速度が達成されることがわかった。

3. 空間四次近似のスタガード・グリッド差分法における並列計算

筆者らの採用した差分法は、時間二次 - 空間四次近似の速度 - 応力のスタガード・グリッドを基本とし SLS により粘弾性を考慮している。図 - 1 に示すとおり空間四次近似の計算を行う場合、並列化のために分割した領域の間でデータを交換するためには 3 個の格子を重ねれば良い。したがってある 1 つの方向にのみ領域を分割する場合、領域を分割する方向の辺の格子数は、(CPU の数 - 1) × 3 だけ増加する。したがって分割方向の辺の格子数に対してある程度以上に CPU 数が増えると、並列化のために多くなる格子数の割合が大きくなりすぎ非効率となる。図 - 2 に CPU 数と格子数による、並列化による総格子数の増加量を割合で示した。例えば、分割方向の辺の格子数が 1000 である場合、CPU 数が 20 であれば増加する計算量は 5.7%、CPU 数が 100 であれば 29.7%となる。

4. 差分法の計算時間

筆者らがこれまでに行った強震動のシミュレーションの計算時間例を図 - 3 にまとめる。計算は粘弾性で行い緩和メカニズムは 1 つである。図 - 3 において横軸は CPU 数であり、縦軸は 1 つのセルの計算に要した時間を 1CPU あたりに換算した値 (dt とする) である。つまり、

$$dt = \text{総計算時間} \times \text{CPU 数} / \text{セル数} / \text{時間ステップ数}$$

である。図 - 3 から、ばらつきはあるものの dt はセル数や CPU 数によらず 4micro-sec 前後で一定していることがわかる。このことは、ある程度の規模の計算であれば通信時間による計算時間の増加はそれほど大きくないことを示唆していると言える。

この dt を使えば、さらに大きな計算であっても計算時間を見積もることができる。すなわち、

$$\text{総計算時間} = dt \times \text{セル数} \times \text{ステップ数} / \text{CPU 数}$$

となる。dt = 4micro-sec は緩和メカニズムが 1 つの粘弾性の計算を 1 GHz の CPU で計算した場合であり、弾性体であればこの約半分となる。また 2GHz の CPU を使用しても約半分の計算時間となると思われる。

例えば自然地震の計算において、450×900×70km のモデルを 200m 格子で計算した場合、深度方向の格子サイズを可変とすれば、格子数は概ね 2250×4500×100 程度となり総格子数はおよそ 1G となる。この場合必要メモリー量は約 80GB となるが、Windows の場合 1CPU あたりの最大メモリー量は 2GB であるため、この計算は 40 台以上の CPU で行う必要がある。したがって、約 200 秒 (16384 ステップ) の計算時間は、上記の式より約 19 日となる。格子数 4500 の辺を 40 台の CPU で分割すれば、並列計算に伴う格子数の増加は、図 - 2 から 3 % 以下となり重大な問題とはならない。

表-1 姫野ベンチマークテスト実行結果と参考値

使用した CPU 数	計算時間	実測速度	参考値
1 CPU	38.53 秒	130.92 MFLOPS	NEC SX4/2C (1 CPU) 1237.80 MFLOPS
2 CPU	26.64 秒	189.33 MFLOPS	SGI Origin2000 (16 CPU) 3399.00 MFLOPS
4 CPU	14.39 秒	350.59 MFLOPS	日立 SR2201 (64 CPU) 3586.95 MFLOPS
8 CPU	8.15 秒	619.19 MFLOPS	富士通 VPP700E (16 CPU) 7986.84 MFLOPS
16CPU	4.55 秒	1108.43 MFLOPS	Compaq Alpha (64 CPU) 10644.58 MFLOPS

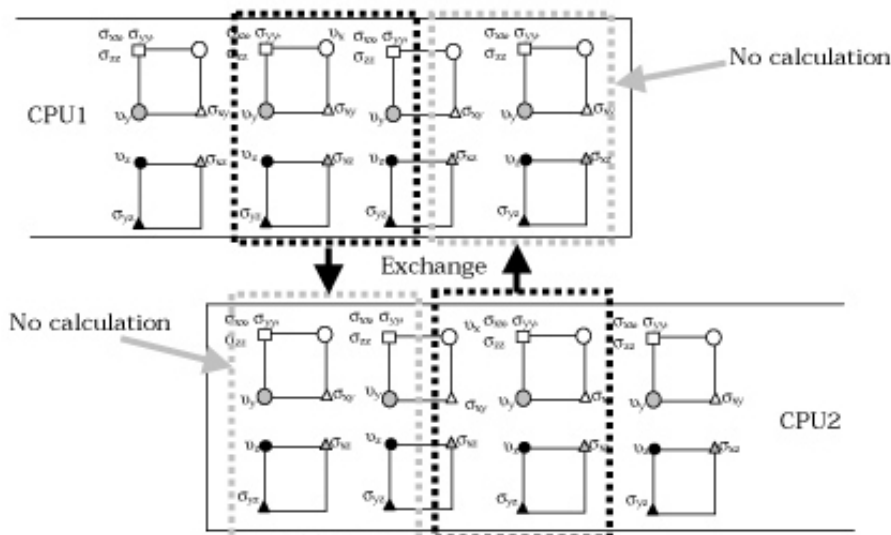


図-1 並列計算におけるデータ交換の概念図 (空間四次近似の場合)。灰色の点線で囲んだ範囲は計算を行わない。

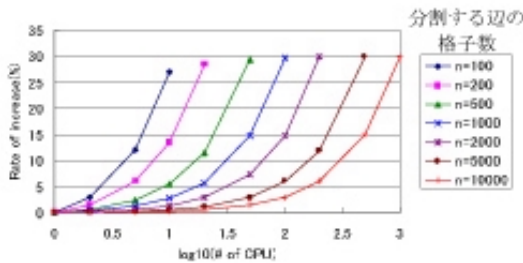


図-2 並列計算による総格子数の増加割合

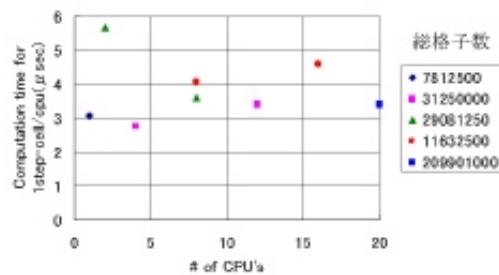


図-3 1セル・1ステップの計算時間 (1CPU 換算)