

並列Pseudospectral法による大規模な地震波動伝播の計算

Large scale numerical simulation of seismic wave propagation by using a parallel pseudospectral method

古村 孝志 [1], 纈纈 一起 [2]

Takashi Furumura [1], Kazuki Koketsu [2]

[1] 北海道教育大, [2] 東大・地震研

[1] Hokkaido Univ. Edu., [2] Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo

疑似スペクトル法 (Pseudospectral法; PSM) は、不均質媒質中の波動伝播の数値計算のための高精度の差分法である。このPSMを大規模な3次元波動場の計算に適用するために、私たちは2つの並列PSM法を開発した。一つは計算領域を分割する「領域分割型PSM」、そしてもう一つは3次元波動場の成分分割に基づく「成分分割型PSM」である。並列化率はCPUの演算速度と、プロセッサ間の通信速度の比に大きく依存するので、私たちは理論並列化率を予測するとともに、各種の専用計算機やネットワーク化されたワークステーション群を用いて並列速度の実測を行なうことにより、これらの並列PSMの有効性を示した。

1. はじめに

不均質媒質中を伝播する地震波動場の数値計算法の一つに疑似スペクトル法 (Pseudospectral法: PSM, たとえば、古村・竹中・纈纈 1996を参照) がある。PSMは計算領域を離散化し、各格子点上の波動場を運動方程式を数値的に解く領域型解法である。このとき、方程式の空間微分演算を高速Fourier変換 (FFT) を用いて波数空間で行なうため、他の計算手法に比べて、格子間隔が粗くとも (すなわち、少ないメモリと計算時間のもとで) 精度良く波動計算ができるという利点がある。この長所を利用して、1980年代後半からPSMを3次元地震波動場の計算に適用するための研究が積極的に進められてきた。

2. 並列PSM

PSMによる大規模な波動伝播の数値シミュレーションの実現には、複数の演算プロセッサを用いた並列計算が不可欠であることは言うまでもない。また、これまでに各種の並列化PSMコードが開発されている (たとえば、Liao & McMechan 1996, Furumura, Kennett & Takenaka 1998, Hung & Forsyth, 1998)。これらの並列コードでは、3次元計算モデルを分割し、各小領域中の波動場の計算を複数の演算プロセッサに割り当てられる (領域分割型並列PSM)。この時、各CPUはプロセッサ間通信によって計算領域全体のデータを共有しながらも、各自が独立して波動計算を進めることができる。たとえば、Furumura et al. (1998)はこれを32個のCPUを持つCM-5並列計算機に適用し、26倍の速度向上率を確認している。

これとは別の並列化手法として、3次元波動場をX, Y, Z成分に分割し、それぞれを3台のCPUを用いて独立に計算する小規模な並列化も考えられる (成分分割型PSM)。これは、少数のワークステーションを結合した研究室レベルでの並列計算環境を想定したものである。このアルゴリズムでは、並列化率Rは、CPUの演算速度Vdと通信速度Vcを用いて $R=1/(4Vd/Vc+1/3)$ と書くことができる。すなわち、並列化により1CPUあたりの演算量は1/3に減るのに対し、新たにプロセッサ間通信の時間 (合計 $4Vd/Vc$) の考慮が必要になる。したがって、前アルゴリズムと同様に演算速度と通信速度の比 (Vd/Vc) が並列化の効果に大きく寄与する。

この新しい並列PSMコードの有効性を確認するためにFast Ethernet (100Mbit/s) で結ばれた3台のDEC Alphaワークステーション (EV5, 500MHz) 上で実験を行った。この結果、格子数が $256 \times 256 \times 128$ の波動計算において $R=1.8$ の性能が得られた。これは理論値 ($R=2.2$) よりもやや小さいが、データパケットサイズの変更や計算順序の変更による通信待ち時間の縮小など、簡単な並列コードの最適化によって $R=2$ 程度までには高めらると期待できる。

3. 地球シミュレータに向けて

このワークステーションクラスタ並列システムではメモリの合計が3GByte, ピーク演算速度が約2Gflopsになるので、たとえば $512 \times 256 \times 256$ 格子モデルの波動計算 (すなわち、 $256 \times 128 \times 128$ 波長程度) が1週間程度の時間で可能である。現在本システムを用いて、大規模計算に不可欠な各種の数値計算技法 (たとえば、境界条件や断層モデルの導入法など) の高精度化や、計算結果の可視化技法の開発を進めている。また、高精度計算に用いる高分解能の地下構造モデル (関東平野, 大阪平野) を構築中である。

「地球シミュレータ」(1024CPU, SIMD/MIMD型, 4TByte, 32TFlops) では、上述した「領域分割型PSM」と「成分分割型PSM」の2つの並列アルゴリズムを組み合わせることにより、その特異な並列システムに適用した最適化を図る予定である。このマシンの性能のもとでは、たとえば上述のモデル計算が1時間以内に、またこの10倍のスケール (すなわち、格子数は $10^3=1,000$ 倍) の波動計算が1日程度のCPU時間で実効可能と期待される。

4. 文献

[1] 古村・竹中・纈纈, 1996, 物理探査, V49, 536-548. [2] Furumura, Kennett & Takenaka, 1998, Geophysics,

V63, 279-288. [3] Hung & Forsyth, 1998, GJI, V133, 726-740. [4] Liao & McMechan, 1993, BSSA, V83, 1345-1354.