

任意のモーメントテンソル震源から励起される地震波の準球座標系差分モデリング

豊国, 源知
九州大学大学院理学府

<https://doi.org/10.15017/6617992>

出版情報：九州大学情報基盤センター広報：学内共同利用版. 6 (2), pp.51-55, 2006. Research Institute for Information Technology

バージョン：

権利関係：



任意のモーメントテンソル震源から励起される地震波の準球座標系差分モデリング

豊国 源知 (九州大学大学院理学府)

概 要

筆者らは少ない計算資源で、任意の不均質地球モデル中を伝播する地震波を精度よくモデリングする手法、「準球座標系アプローチ」の開発を行っている。今回は本手法を、断層型震源を含む任意の震源 (= モーメントテンソル震源) が取り扱えるよう拡張した。計算資源はこれまでの計算の 5 倍必要となるため、「春の研究奨励キャンペーン」で高性能演算サーバを利用させていただいた。本稿では準球座標系アプローチの理論や差分法を用いた計算例と併せ、作成した計算コードの高性能演算サーバにおける自動並列化効率を報告する。

1 背景

地球の内部構造は地震波を用いて調べられる。地震波記録の持つすべての情報 (走時・振幅・波形) を活用して現在の地球内部構造を詳細に知るためには、観測された地震波形とシミュレーションで得られた理論波形とを比較して、その差が最小になるように構造を決定していく手法、「波形インバージョン」を用いる必要がある。ところが波形インバージョンでは理論波形の繰り返し計算が必要となるため、ここで使う理論波形計算手法には精度に加え、効率の良さが望まれる。

既存の手法でこの条件を満たすものとして、震源を置いた軸の周りに軸対称な構造を仮定し、その構造の断面について球座標系での地震波の支配方程式を解く、「軸対称モデリング」が挙げられる。軸対称モデリングは計算時間や計算メモリは 2 次元モデリング (= 2 次元構造について 2 次元の波動場を計算する手法) 並みである上、3 次元波動の幾何減衰やパルス形状を正しく評価できる。軸対称モデリングは精度と効率の良い理論波形計算手法として、グローバルな地震波伝播の研究でもこれまでよく用いられてきた [1, 2, 3, 4, 5]。ところが軸対称モデリングでは、(i) 軸を挟んで非対称な現実的な構造が扱えない。またこれまでの軸対称モデリングを用いた研究では (ii) 断層型のような非対称な震源は扱われていなかった。筆者らは従来の軸対称モデリングで用いられてきた通常の球座標領域と領域の取り方を変えた「準球座標領域」を導入して支配方程式を解く「準球座標系アプローチ」を提案し、問題 (i) の解決に成功した [6]。

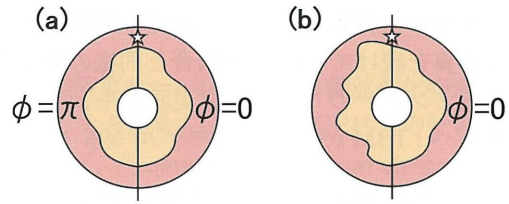
2 目的

これまでの準球座標系アプローチによる計算では、軸対称震源の 1 つである爆破型震源のみを用いてきた。しかし実際の地震のほとんどは断層によって引き起こされるため、観測波形を用いた波形インバージョンのためには、断層型震源を含むモーメントテンソル震源の取り扱いが不可欠である。従って今回は準球座標系アプローチに任意のモーメントテンソル震源を組み込んだ波動計算スキームの開発を目的とし、問題 (ii) の解決を試みた。

3 理論

3.1 準球座標系アプローチ

ここでは準球座標系アプローチの概略を述べる．従来の軸対称モデリングで非対称な構造が扱えない問題は，球座標系での地震波の支配方程式を解く際に，通常の球座標領域 ($0 < r < \infty$, $0 \leq \theta \leq \pi$, $-\pi \leq \phi \leq \pi$) を用いてい



領域 [6]．

ために引き起こされていた．通常の球座標領域では，地球の大円に沿った構造断面は $\phi = 0$ と $\phi = \pi$ におかれた 2 枚の半円板で表される．よって $\phi = 0$ の面にある任意の構造を適用すると，軸対称性により $\phi = \pi$ の面における構造は $\phi = 0$ のものと対称にならざるを得なかった (図 1a)．準球座標系アプローチは通常の球座標領域の替わりに，新たに定義した準球座標領域 ($0 < r < \infty$, $-\pi \leq \theta \leq \pi$, $-\pi/2 \leq \phi \leq \pi/2$) を用いる手法である．準球座標領域では，地球の大円に沿った構造断面は $\phi = 0$ における円板 1 枚のみで表され，この面には任意の不均質構造モデルが入力できる (図 1b)．従って準球座標系アプローチは従来の軸対称モデリングと同様の計算資源で効率良く，任意の不均質地球モデルの 2 次元断面中を伝播する地震波をモデリングできる．

3.2 任意のモーメントテンソル震源による波動場の計算

3 次元の地震波の支配方程式に現れる粒子速度と応力の各成分を ϕ 方向にフーリエ級数展開し，これらを元の方程式に代入し整理すると，展開係数についての 5 組の閉じた方程式系ができる．この操作は任意のモーメントテンソル震源を 5 つの基本モーメントテンソル (= 軸対称震源，2 タイプのピュアな縦ずれ型震源，および 2 タイプのピュアな横ずれ型震源) に分解することに等しい．任意のモーメントテンソル震源による波動場の計算は，これらの基本モーメントテンソルをコードに組み込み展開係数を計算した後，元のフーリエ級数展開の式に代入することで実現できる [7]．

4 計算

速度-応力型スタガード格子差分法を準球座標系アプローチに適用して，それぞれの基本モーメントテンソルについて展開係数を計算するスキームを開発し，計算を行った．展開係数の計算は 5 つの基本モーメントテンソル

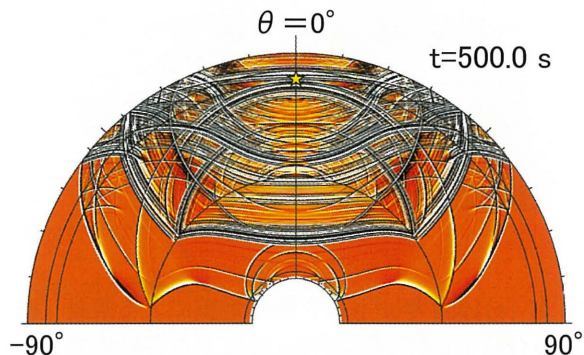


図 2: 爆破型震源 (パルス幅 5 秒) による励起後 500 秒のスナップショット (粒子速度の r 成分)．

ルについて行われるため、全ての展開係数を計算するためには、従来の爆破型震源の計算を続けて5回行う場合と同様の計算資源が必要となる。今回は九州大学情報基盤センターの「春の研究奨励キャンペーン」を利用させていただき、高性能演算サーバ：IBM eServer p5 モデル 595 を用いた自動並列計算を実行した。

5 結果

5.1 計算例

最初に前回(第3回「波と数値計算」合同セミナー), 16CPU を用いて行った震源時間関数のパルス幅5秒の爆破型震源による計算結果を示す。計算は $1050 \text{ km} \leq r \leq 6371 \text{ km}$ (地表), $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$ の領域を $8142 (r) \times 21600 (\theta)$ の格子に分割して行った。時間間隔は 0.0083 秒とした。図2は構造に球対称構造モデル (IASP91) を用いた場合の、励起後500秒の地震波伝播のスナップショットである。要したメモリは24 GBで、励起後1100秒までの計算時間は1週間であった。この結果は準球座標系差分法を用いた並列計算が、十分に現実的な周波数帯域で地震波伝播をシミュレーションできることを示した。

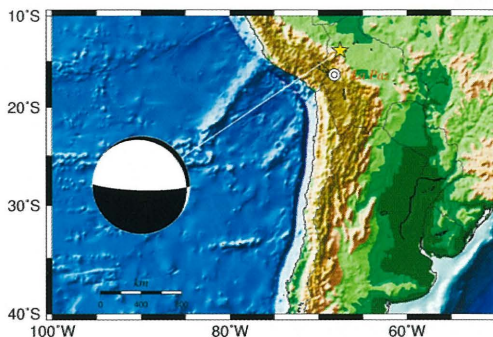


図3: 1994年ボリビア深発地震の震央とメカニズム解。

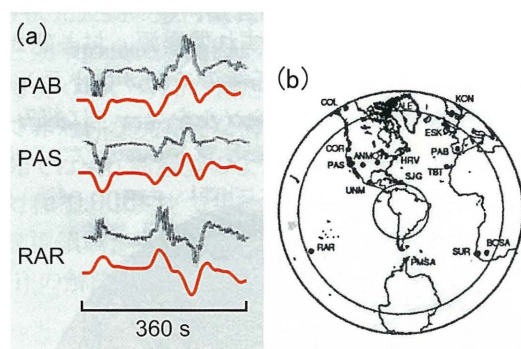


図4: (a)1994年ボリビア深発地震による観測波形(黒)と準球座標系差分法による理論波形(赤). 観測点位置は(b)に示す。観測波形と観測点配置図は文献[8]による。

次に今回の、現実的なモーメントテンソル震源を与えた計算例を示す。1994年ボリビア深発地震 ($M_W = 8.2$, 深さ 631 km) で得られたメカニズム(図3; 走向 311° , 傾斜 11° , すべり角 -51°)[8]を用いて計算を行った。計算には球対称構造モデル (IASP91) を用い, $1050 \text{ km} \leq r \leq 6371 \text{ km}$, $-\pi \leq \theta \leq \pi$ の領域を $678 (r) \times 3600 (\theta)$ の格子に分割した。時間間隔は 0.05 秒, 震源時間関数のパルス幅は 60 秒とした。図4はこの地震の観測波形[8]と今回得られた理論波形を並べた図である。今回の計算では地震波の減衰を考慮していないにもかかわらず、波形はよく一致しており、本手法による計算で十分に観測波形を説明できることが示された。

5.2 自動並列化効率

今回は準球座標系差分法プログラムの高性能演算サーバにおける自動並列化の効率を調べるため、自動並列計算をCPU数を2, 4, 8と変えて実行し、1CPUでの計算時間と比較した。コンパイルオプションには“-O3”, “-qsmp=auto”, “-qarch=pwr5”, および“-qtune=pwr5”を用いた。スレッド数の指定は環境変数“OMP_NUM_THREADS”により行った。表1にそれぞれのケースでの経過時間と1CPUでの計算に対する速度向上率・並列化効率を示す。速度向上率は各々のCPU数について計算を2回行って得られた経過時間の平均値から算出したが、2回の計算での差異はわずかであった。この結果から算出される並列化効率は全てのCPU数で1を超えており、理想的な並列性能を上回る処理速度が得られていることがわかる。前回の軸対称震源による計算では最大でも並列化効率は0.94であった(図5参照)。本研究ではプログラミング言語にはFORTRAN77を利用しており、これまでのコードで多用していたIF文を今回DO文で書き換えたことが並列化効率アップの理由と考えられる。

表 1: 準球座標系差分法プログラムの自動並列化効率

	1CPU	2CPU	4CPU	8CPU
計算時間 (s)	13417.93	6707.90	3244.21	1590.38
速度向上率	–	2.0003	4.1360	8.4369
並列化効率	–	1.0002	1.0340	1.0546

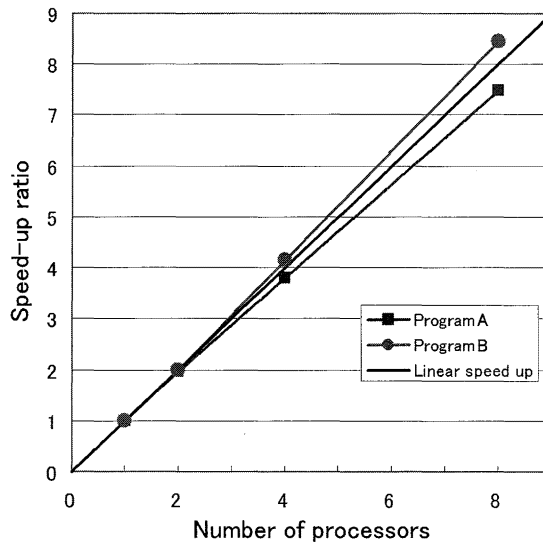


図 5: 前回(第3回「波と数値計算」合同セミナー)用いたコード(Program A, 青線)と今回作成したコード(Program B, 赤線)の、高性能演算サーバによる自動並列計算での速度向上率の比較

6 結論

準球座標系差分法のプログラムに任意のモーメントテンソル震源を組み込み計算を行った。本手法により、従来の軸対称モデリングの問題点は解決され、現実的な構造と震源を用いた精度と効率の良い理論地震波形計算が可能となった。また今回開発したコードが非常に高い並列化効率を有していることを確認した。

謝辞

本研究は九州大学大学院理学研究院の竹中博士先生の御指導のもと行いました。九州大学情報基盤センターの藤野清次先生、南里豪志先生、渡部善隆先生には高性能演算サーバの使用を御許可いただきました上、貴重な御助言を賜りました。記して感謝いたします。

参考文献

- [1] Igel, H. and Weber, M.: *Geophys. Res. Lett.*, **22**(6), 731–734, 1995.
- [2] Igel, H. and Weber, M.: *Geophys. Res. Lett.*, **23**(5), 415–418, 1996.
- [3] Chaljub, E. and Tarantola, A.: *Geophys. Res. Lett.*, **24**(21), 2613–2616, 1997.
- [4] Igel, H. and Gudmundsson, O.: *Phys. Earth Planet. Int.*, **104**, 229–246, 1997.
- [5] Thomas, Ch., Igel, H., Weber, M. and Scherbaum, F.: *Geophys. J. Int.*, **141**, 307–320, 2000.
- [6] Toyokuni, G., Takenaka, H., Wang, Y. and Kennett, B.L.N.: *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L09305, doi:10.1029/2004GL022180, 2005.
- [7] Toyokuni, G. and Takenaka, H.: *Earth Planets Space*, **58**, e29–e32, 2006.
- [8] Lundgren, P. and Giardini, D.: *Geophys. Res. Lett.*, **22**(16), 2241–2244, 1995.