

# 全球地震波伝播シミュレーション

課題責任者

坪井 誠司 海洋研究開発機構 地球情報基盤センター

著者

坪井 誠司 海洋研究開発機構 地球情報基盤センター

スペクトル要素法を用いた地球の全球に対する理論地震波形記録は、地球シミュレータの 1944 ノードを用いた周期 3.8 秒の精度での計算が実現している。しかしながら、地球内部を伝播する地震波は周期 1 秒の実体波が卓越することが知られており、この精度での計算が課題である。全球を伝播する地震波の計算を周期 1 秒で行うことは現在の地球シミュレータでは困難だが、領域を分割することにより周期 1 秒の精度での計算が可能か試みた。その結果、40 度×40 度の領域に限定し地球シミュレータの 2025 ノードを用いることで周期 1.5 秒の精度で計算できることを確認できた。

キーワード：スペクトル要素法、理論地震波形計算、爆発的震源

## 1. 理論地震波形計算

これまで、現実的な地球モデルに対して全球を伝播する理論波形の計算にはスペクトル要素法 (Komatitsch et al., 2005) [1] を用い、地球シミュレータで効率よく計算ができるように改良した SPEC-FEM3D GLOBE (V6) を使用してきた。地球を伝播する地震波の実体波は周期 1 秒の波が卓越するので、理論地震波形も周期 1 秒の精度で計算できることが望ましい。地球シミュレータの 7776 コア (1944 ノード) を用いて flat MPI により計算した場合、モデルの精度を表すパラメータである NEX は 1152 で、計算の精度は周期 3.8 秒であった。一方、京コンピュータを用いた最大規模の計算では、京コンピュータの 82,134 ノード (657,072 コア) を用いた Hybrid 並列により周期 1.2 秒の精度での計算が可能となっている。(Tsuboi et al., 2016a) [2]。この計算は、総格子点数 6652 億、地表における格子点間隔 0.67km、メモリ 200Tbyte という大規模な計算であり、7 分間の理論地震波形を 6 時間で計算できた。計算性能は 1.24PFLOPS (ピーク性能比 11.84%)、ストロングスケリングは 99.54% となった。同じ規模の計算を地球シミュレータで実行することは現状では困難なので、領域を限定したモデルに対して周期 1 秒の精度が実現できるかを検討した。SPEC-FEM3D\_GLOBE では地球を 6 個のチャンク (chunk) とよばれる領域に分割し、それぞれをさらに細かい領域に分割する。1 個のチャンクは全球の場合 90 度×90 度の大きさとなる。この 1 個のチャンクのみを用い、境界面では吸収境界条件を課すことにより、領域を限定した計算を実行することが出来る。ここでは、1 個のチャンクを 40 度×40 度の領域に限定した場合について計算を実行した。計算は地球シミュレータの 8100 コア (2025 ノード) による flatMPI で行い、モデルの精度を表すパラメータである NEX は 2880 で格子点数は 1100 億個、地表における格子点間隔は 0.87km である。理論地震波形の精度は 1.5 秒であり、5 分間の理論地震波形を計算するために約 9 時間の計算時間が必要であった。

## 2. 震源モデル

地球シミュレータの 2025 ノードを用いて計算した周期 1.5 秒の精度の理論地震波形を観測波形と比較するためには地震の震源モデルが必要となる。地震の規模が大きくなると断層の破壊過程は複雑になり、観測波形と比較するためには詳細な震源過程モデルが必要となる。ここでは、震源の規模が小さく震源過程も単純である、人工的な爆発的事象に対して理論地震波形を計算し観測と比較することを試みた。計算に用いた事象は 2013 年 2 月 12 日 11:57:51 (日本時間) と 2016 年 1 月 6 日 10:30:00 (日本時間) に朝鮮半島北部で起きた爆発的事象である。それぞれのマグニチュードは米国地質調査所 (USGS) により 5.1 と決定されている。図 1 に二つの事象の位置と理論地震波形を計算した観測点を示した。それぞれの事象の起きた位置はほぼ同位置と考えられる。また理論地震波

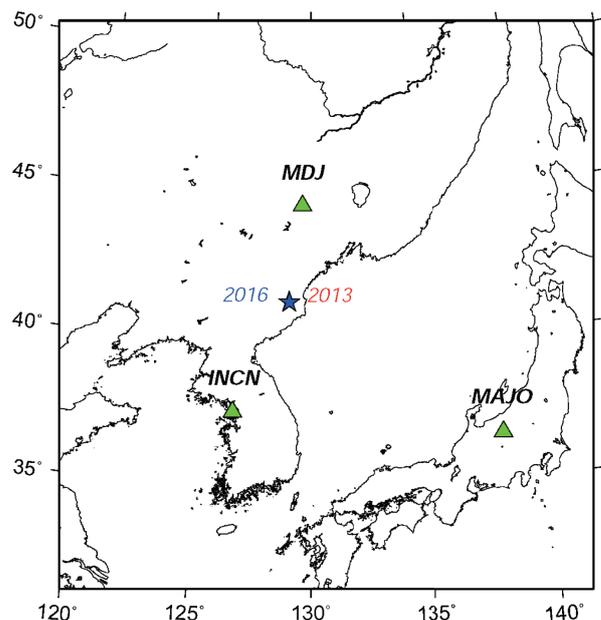


図1 理論地震波形計算に用いた爆発的事象 (青星印) と観測点分布 (緑三角)。事象は 2013 年と 2016 年に発生したもので、二つの事象はほぼ同じ場所で発生している。

形の結果については、観測波形のノイズが少なかった中国のMDJ (Mudanjiang) について示すことにする (Tsuboi et al., 2016b) [3]。MDJ における観測波形記録は米国の地震観測網である IRIS により公開されているものを用いた。

図2にそれぞれの事象に対する震源モデルを示した。震源モデルは Rozhkov et al., (2016)[4] が表面波の解析などにより求めたものを用いている。それぞれの事象では約80%の等方成分がある一方で、断層でのすべりに対応するダブルカップル成分が約20%あることが特徴的となっている。

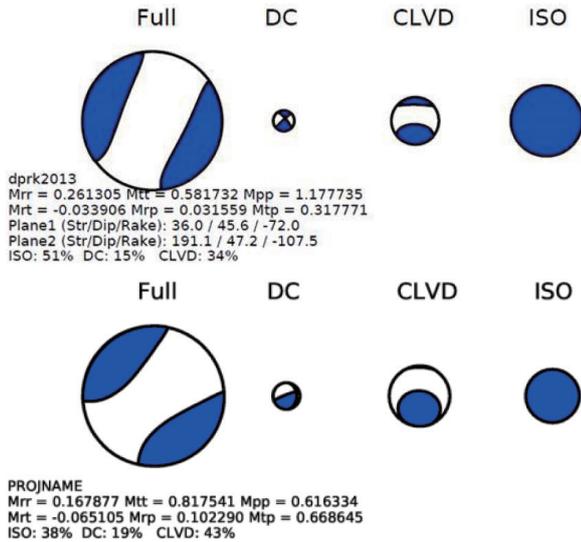


図2 理論地震波形計算に用いた(上)2013年2月12日 11:57:51(日本時間)と(下)2016年1月6日 10:30:00(日本時間)に朝鮮半島北部で起きた爆発的事象の震源メカニズム (Rozhkov et al., 2016) [3]。それぞれ、左から全モーメントテンソル解、ダブルカップル成分、CLVD成分、等方成分を表す。

### 3. 理論地震波形記録

前節で示した爆発的事象の震源モデルに対して、理論地震波形記録を計算し、観測波形と比較した。図3には、MDJ 広帯域地震観測点における3成分観測波形と、理論地震波形との比較を示した。観測波形に見られる表面波はほぼ理論地震波形でも見ることができ、周期1.5秒の精度での理論地震波形計算が問題なく実現できていることを示している。用いた震源モデルでは約20%のダブルカップル成分があることが特徴となっているが、観測波形では水平動東西成分の表面波は大きな振幅を示しており、ダブルカップル成分の大きさを無視することが出来ないことが分かる。図4には、2016年1月6日の事象についてダブルカップル成分を含まない震源モデルに対して計算した理論地震波形と観測波形との比較を示した。この場合、東西成分に現れる表面波は明らかに理論地震波形が観測波形よりも小さくなっており、やはり、これらの爆発的事象では20%程度のダブルカップル成分が存在することを示唆している。このようなダブルカップル成分は震源周辺の地質学的構造に起因する可能性があるが、その原因についてはよく分かっていない。

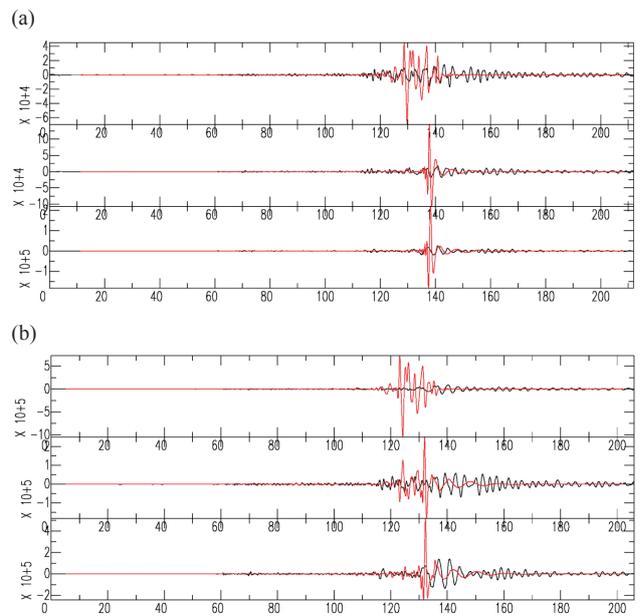


図3 MDJの観測波形と理論波形の比較。上からEW、NS、およびZ成分の200秒間の速度記録を示す。黒線が観測波形で赤線が理論地震波形。0.1Hzから0.5Hzのバンドパスフィルターを適用。(a) 2013年の事象。(b) 2016年の事象。

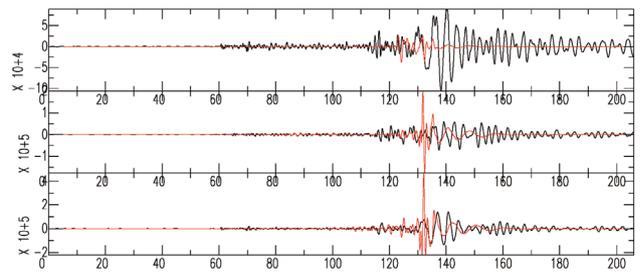


図4 MDJの観測波形と理論波形の比較。上からEW、NS、およびZ成分の200秒間の速度記録を示す。黒線が観測波形で赤線が理論地震波形。0.1Hzから0.5Hzのバンドパスフィルターを適用。理論地震波形は、CLVD成分と等方成分のみを使用している。

### 4. まとめ

本研究では、スペクトル要素法で地球を領域に分割する際の1個のチャンクを40度×40度の領域に限定した場合について、地球シミュレータの8100コア(2025ノード)を用いたflatMPIにより精度1.5秒で理論地震波形を計算できることを示した。モデルの精度を表すパラメータであるNEXは2880で格子点数は1100億個、地表における格子点間隔は0.87kmである。5分間の理論地震波形を計算するために約9時間の計算時間が必要であった。計算した理論地震波形を観測波形と比較するために、最近発生した爆発的事象に対して理論地震波形を計算した。爆発的事象に対して計算した理論地震波形はほぼ観測を説明出来ており、周期1.5秒の精度での理論地震波形計算が問題なく実現できていることを示している。震源モデルの特徴であるダブルカップル成分は、観測波形との比較からその大きさを無視することが出来ないことが分かるが、原因についてはさらなる研究が必要である。

## 文献

- [1] D. Komatitsch, S. Tsuboi, and J. Tromp. The spectral-element in seismology, in *Seismic Earth: Array analysis of broadband seismograms*, Geophys. Monograph 157, AGU, pp. 205–227, 2005.
- [2] S. Tsuboi, K. Ando, T. Miyoshi, D. Peter, D. Komatitsch, and J. Tromp, A 1.8 trillion degrees-of-freedom, 1.24 petaflops global seismic wave simulation on the K computer, *Int. J. High Performance Comp. App.*, 30, No.4, 411-422, 2016.
- [3] S. Tsuboi, H. Matsumoto, M. Rozhkov, J. Stachnik, and B. Baker, Synthetic seismograms of Jan. 6, 2016 DPRK event calculated by the Earth Simulator, AGU Fall meeting 2016, S33E-05 San Francisco, CA, USA, December 14, 2016.
- [4] M. Rozhkov, J. Stachnik, B. Baker, A. Epiphansky, and D. Bobrov, Nuclear test depth determination with synthetic modelling: global analysis from PNEs to DPRK-2016, EGU General Assembly 2016, 6823, Vienna, Austria, April 21, 2016.

# Global Seismic Wave Propagation Simulation

Project Representative

**Seiji Tsuboi** Center for Earth Information Science and Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Author

**Seiji Tsuboi** Center for Earth Information Science and Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

We have calculated broadband synthetic seismograms using the spectral-element method with 8,100 processors, which require 2,025 nodes of the Earth Simulator. We use one chunk with the angular distance 40 degrees to compute synthetic seismograms. Synthetic seismograms computed for explosive sources show that the surface waves are modeled.

**Keywords:** Spectral Element Method, Theoretical seismograms, explosive source

We have calculated broadband synthetic seismograms using the spectral-element method (Komatitsch et al., 2005)[1] for realistic Earth model. Recent progress in supercomputers makes it possible to compute the synthetic seismograms with the accuracy of 1.2 second and longer (Tsuboi et al., 2016a) [2]. Here we have used one chunk of spectral element method to compute synthetics with 1.5 second accuracy using the Earth Simulator. We calculate synthetics for Feb. 12, 2013 (Mw(USGS) 5.1) and Jan. 6 2016 DPRK event (Mw(USGS) 5.1). The simulations are performed on 8,100 processors, which require 2,025 nodes of the Earth Simulator. We use one chunk with the angular distance 40 degrees to compute synthetic seismograms. On this number of nodes, a simulation of 5 minutes of wave propagation accurate at periods of 1.5 seconds and longer requires about 9 hours of CPU time (Tsuboi et al., 2016b) [3]. We use CMT solution of Rozhkov et al (2016) [4] as a source model for this event. This source model has 43% CLVD component, 19% double couple component and 38% isotropic component. The hypocenter depth of this solution is 1.4 km but we put the hypocenter at the surface for this computation. Comparisons of the synthetic waveforms with the observation at station MDJ(Mudanjiang) in China show that the arrival time of Pn and Pg waves matches well with the observation, which demonstrates that the crustal structure we have used for this computation models the actual structure well. The surface waves observed at this station are also modeled well in the synthetics, which shows that the CMT solution we have used for this computation correctly grasps the source characteristics of this event. However, the amplitudes of Pn and Pg waves in the synthetics are smaller than the observations, which indicates that the amplitude of short period components is not enough in this computation.

## References

- [1] D. Komatitsch, S. Tsuboi, and J. Tromp. The spectral-element in seismology, in *Seismic Earth: Array analysis of broadband seismograms*, Geophys. Monograph 157, AGU, pp. 205–227, 2005.
- [2] S. Tsuboi, K. Ando, T. Miyoshi, D. Peter, D. Komatitsch, and J. Tromp, A 1.8 trillion degrees-of-freedom, 1.24 petaflops global seismic wave simulation on the K computer, *Int. J. High Performance Comp. App.*, 30, No.4, 411-422, 2016a.
- [3] S. Tsuboi, H. Matsumoto, M. Rozhkov, J. Stachnik, and B. Baker, Synthetic seismograms of Jan. 6, 2016 DPRK event calculated by the Earth Simulator, AGU Fall meeting 2016, S33E-05 San Francisco, CA, USA, December 14, 2016b.
- [4] M. Rozhkov, J. Stachnik, B. Baker, A. Epiphansky, and D. Bobrov, Nuclear test depth determination with synthetic modelling: global analysis from PNEs to DPRK-2016, EGU General Assembly 2016, 6823, Vienna, Austria, April 21, 2016.