

# 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

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、全球理論地震波形計算はこの精度での計算が課題である。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では、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となることがわかっている。今回は、40 度×40 度の領域に限定し地球シミュレータの 2025 ノードを用いた計算により、2017 年に起きた爆発的震源による地震波を周期 1.5 秒の精度でシミュレーションし観測波形と比較することを試みた。

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

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。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]; Tsuboi et al., 2016a) [2] 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 SPECFEM3D GLOBE (V6) を使用してきた。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。SPECFEM3D\_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。これまで、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結果、周期約 1 秒の理論地震波形計算を行うことが可能であることを示してきた。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る。

## 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、人工的な爆発的震源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。計算では 2017 年 9 月 3 日 12:30:00 (日

本時間) に朝鮮半島北部で起きた爆発的震源を選んだ。この震源のマグニチュードは米国地質調査所 (USGS) により 6.3 と決定されている。この地域では過去に 2013 年と 2016 年に同様な爆発的震源が起きているが、2017 年の震源はマグニチュードがそれまでの震源と比べて顕著に大きいという特徴がある。図 1 には、これまでに起きた二つの震源の位置と理論地震波形を計算した観測点を示してある。2017 年の震源についてもその起きた位置は、これまでの震源の起きた位置とほぼ同位置と考えられる。また理論地震波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。

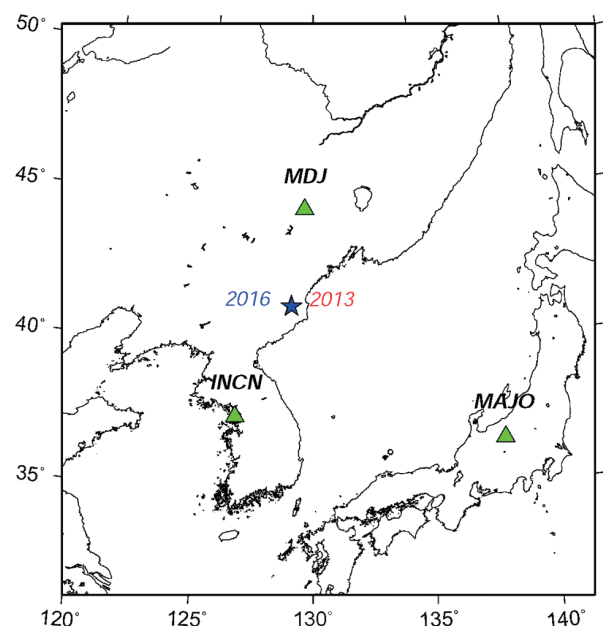


図 1 理論地震波形計算に用いた爆発的震源 (青星印) と観測点分布 (緑三角)。震源は 2013 年と 2016 年に発生したものとほぼ同じ場所で発生している。

図2には2017年9月3日の事象に対する震源モデルを示した。この事象に対しては様々な震源モデルが発表されているが、ここではDreger (2017)[4]が表面波の解析などにより求めたものを用いた。この事象では約66%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34%あることが特徴的となっている。米国地質調査所によるマグニチュードは実体波マグニチュード(MB)で6.3であるが、モーメントマグニチュード(Mw)は5.2となっており、顕著にMBがMwよりも大きく爆発的震源の特徴となっている。その一方で、ダブルカップル成分はこれまでの事象よりも大きく、この原因について震源付近にある既存の断層の影響によるものかはよく分かっていない。

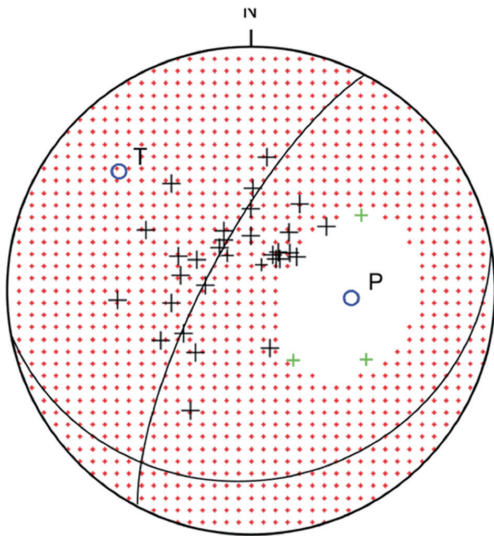


図2 理論地震波形計算に用いた2017年9月3日12:30:00(日本時間)に朝鮮半島北部で起きた爆発的事象の震源メカニズム(Dreger, 2017)。

### 3. 理論地震波形記録

2017年9月3日の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。鉛直成分では理論地震波形の振幅が観測より大きくなっており、やや震源モデルが過大評価となっている可能性を示している。用いた震源モデルでは約34%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。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、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4には、MDJ観測点における理論地震波形と観測波形との比較をP波到着時付近について示した。地殻内を伝播するPg波と地殻底部を伝播するPn波の走時は、ほぼ理論地震波形が観測波形を説明しているが、振幅は観測波形を説明しておらず、地殻内の地震波速度構造について改善が必要であることを示唆している。図5は、この事象の理論地震波形と観測波形を日本国内の松代地震観測点(MAJO)で比較した結果である。これまでの事象では、松代における観測波形は振幅が小さく理論地震波形との比較は困難であったが、2017年9月3日の爆発的事象では明らかに規模が大きくMAJOでも理論地震波形記録と比較できるほどの振幅となっている。MAJOではPn波等の到着時があつておらず、地殻内の地震波速度構造モデルを適切に選択する必要があることが分かる。

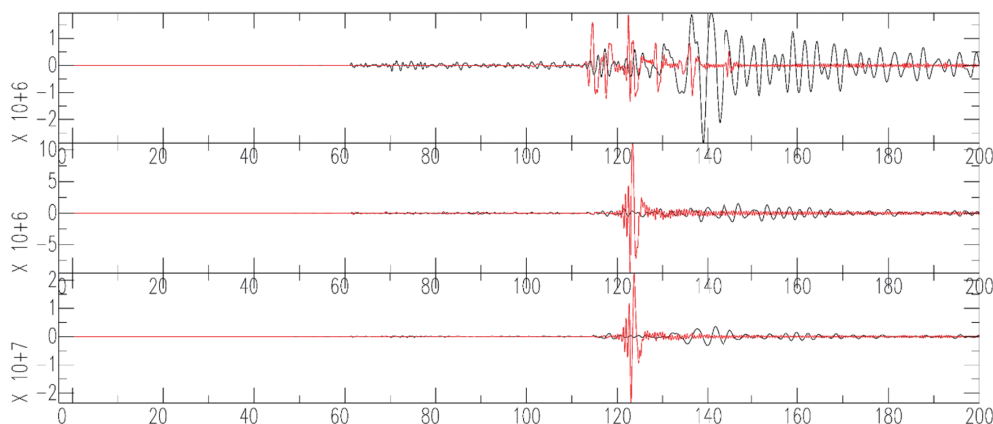


図3 MDJの観測波形と理論波形の比較。上からEW、NS、およびZ成分の200秒間の速度記録を示す。黒線が観測波形で赤線が理論地震波形。0.1Hzから0.5Hzのバンドパスフィルターを適用。

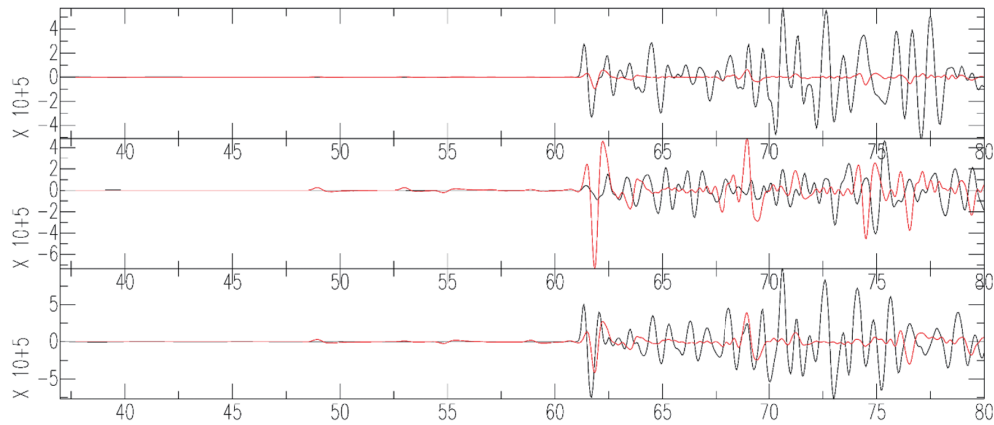


図4 MDJの観測波形と理論波形の比較。上からEW、NS、およびZ成分の200秒間の速度記録を示す。黒線が観測波形で赤線が理論地震波形。0.1Hzから0.5Hzのバンドパスフィルターを適用。

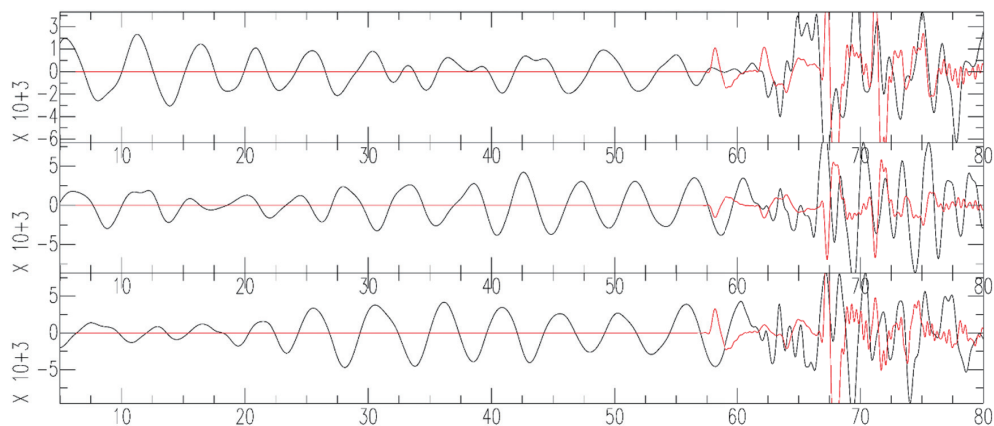


図5 MAJOの観測波形と理論波形の比較。上からEW、NS、およびZ成分の200秒間の速度記録を示す。黒線が観測波形で赤線が理論地震波形。0.1Hzから0.5Hzのバンドパスフィルターを適用

#### 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る。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。地殻内を伝播する地震波の走時は、ほぼ理論地震波形が観測波形を説明しているが、振幅は観測波形を説明しておらず、地殻内の地震波速度構造について改善が必要であることが分かった。

#### 文献

- [1] D. Komatitsch, S. Tsuboi, 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, 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, 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] [https://ds.iris.edu/media/specialevent/2017/09/03/2017-north-korean-nuclear-test/dreger\\_dprk09032017\\_moment\\_tensor.png](https://ds.iris.edu/media/specialevent/2017/09/03/2017-north-korean-nuclear-test/dreger_dprk09032017_moment_tensor.png)

# 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 calculate synthetic seismograms for Sep. 3, 2017 (MB(USGS) 6.3) explosive event, which occurred in Northern part of Korean Peninsula. We have used one chunk of mesh of the spectral element method to compute synthetics with 1.5 second accuracy using the Earth Simulator. The results 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 comparison of the synthetics with the observation show that the double component of the source is not negligible. The origin of the double couple component is not resolved yet.

**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 Sep. 3, 2017 (MB(USGS) 6.3). 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 Dreger (2017) [4] as a source model for this event. This source model has 24% CLVD component, 34% double couple component and 42% 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. The result also shows that crustal structure around source region should be improved to get better agreement between the synthetics and observation.

## References

- [1] D. Komatitsch, S. Tsuboi, 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, 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, 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] [https://ds.iris.edu/media/specialevent/2017/09/03/2017-north-korean-nuclear-test/dreger\\_dprk09032017\\_moment\\_tensor.png](https://ds.iris.edu/media/specialevent/2017/09/03/2017-north-korean-nuclear-test/dreger_dprk09032017_moment_tensor.png)