

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

2015年5月30日に小笠原諸島西方沖を震源とする深発地震が発生した。この地震は震源の深さが678kmと極めて深く、これまで観測された深発地震の中でも最深の地震の一つとなっている。さらに、この地震の震源はこれまでの地震活動とは離れた場所で起きており、沈み込む太平洋プレートの境界か、あるいはマントル内で起きているかは議論となっている。ここでは、この震源過程モデルを遠地実体波解析により求め、スペクトル要素法を用いて計算した全球広帯域理論地震波形との比較を試みた。遠地観測点におけるpP波の比較から震源の深さはUSGSによる約678kmにより説明出来ることが分かった。

キーワード：2015年小笠原諸島西方沖地震、深発地震、スペクトル要素法

1. 震源過程モデル

2015年5月30日20:23:08（日本時間）に小笠原諸島西方沖で深発地震が発生した（緯度27.86N 経度140.50E 深さ679.9kmUSGS）。Global CMT解によるマグニチュードはMw7.9で、これまで観測された深発地震の中でも最深の地震の一つである。この地震の震源地域では、沈み込む太平洋プレートに沿った地震活動が顕著であるが、この地震の震源はそのような地震活動からは離れた場所で起きており、地震が発生した場所がプレート境界なのか、あるいはマントル内なのかは議論となっている。通常の地震は、断層面上で破壊が高速で伝播することにより発生する。この破壊が発生した断層面を決定することは、地震を起こした応力場の情報を得るために重要である。地震の震源がどのような断層面で起きたかについては、CMT（Centroid Moment Tensor）解を決定することでその情報が得られるが、断層面は直交する2枚の面が求まるので、そのどちらが実際の断層面であるかは、地震波形の解析から決定することが一般的である。

ここでは、震源過程モデルはNakamura et al. (2009)[1]

にしたがって、複数の点震源を断層上に配置してモデル化した。震源過程は、IRISで公開されている観測データのうち、明瞭な立ち上がりをもつP波およびSH波を用いて、遠地実体波の波形インバージョン（Kikuchi and Kanamori 2003）[2]によって推定した。震源の深さはPDEによる677.6kmを用い、GlobalCMT解の二つの節面それぞれですべり量分布を求めた（Tsuboi et al., 2015）[3]。インバージョンの結果は、それぞれの節面を断層面と仮定した場合のどちらでもモーメントマグニチュードは約7.8と推定された。平面波近似の理論波形計算によりP波に対して観測との比較を、高角傾斜の断層面（高角モデル）と低角傾斜の断層面（低角モデル）のそれぞれに対して行った。図1には低角モデルの震源過程解を示した。二つのモデルとも断層面上での破壊の広がりはおおよそ20kmと小さく、最大滑り量は12m、破壊速度は4.25km/sである。波形の残差は低角モデルの方が小さく、震源過程解析からは水平の断層面で破壊が生じたことが示唆されるが、残差の差異は有意ではなく、どちらの断層面で破壊が起きたかを定めることは困難である。

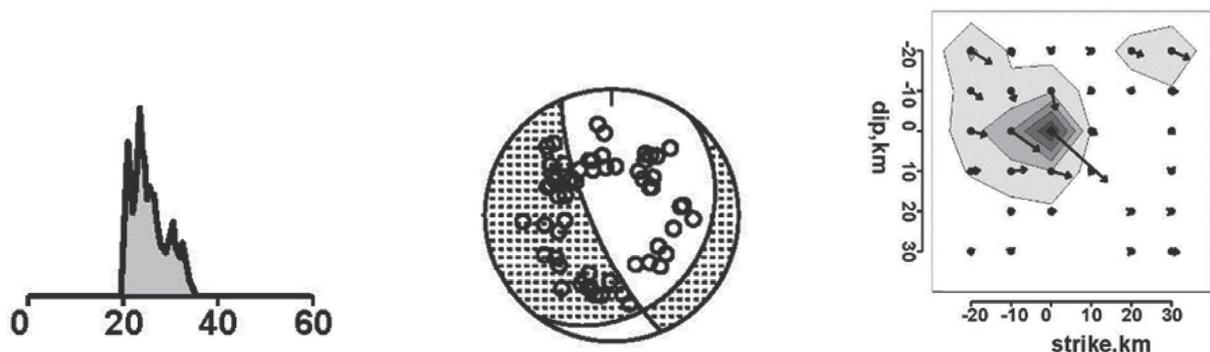


図1 2015年小笠原深発地震の震源過程モデル。左から、震源時間間数、結果の発震機構解と観測点分布、および低角傾斜断層面上の滑り分布。

2. 理論地震波形記録

次に、前節で求めた二つの断層モデルに対して、理論地震波形記録を計算し、観測波形と比較することにより二つの断層モデルを区別できるか検討した。理論波形計算にはスペクトル要素法 (Komatitsch et al., 2005) [4] を用いた SPECFEM3D GLOBE (V6) を使用し、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。ここでは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。この計算の場合、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 秒である。地球内部構造モデルは PREM 等方モデルを使用し、楕円体形状および減衰を考慮している。1944 ノードで測定したベクトル化率は 99%、486 ノードで同規模の計算をした場合との比較により並列化率は 99.99% となった。1944 ノードでは、周期 3.8 秒の精度の理論地震波形 20 分を約 5 時間で計算することが出来、ピーク性能比は約 19% である。

図 2 には、震央距離 83.7 度の KONO 広帯域地震観測点における 3 成分観測波形と、低角モデルと高角モデルを用いて計算した理論地震波形との比較を示した。KONO 観測点では震源の深さが 678km の場合、P 波の到着後 140 後に地表で反射した pP 波が到着すると推定されるが、pP 波の理論波形と観測波形との一致は良く、震源の深さは約 678km とすることで観測を良く説明出来ることが分かった。一方、高角モデルと低角モデルの理論波形に大

きな差異はなく、観測波形との一致の違いからどちらの断層面で破壊が起きたかを決定することは難しいことが分かった。

図 3 には、タイの CHTO 観測点における 3 成分観測波形と、低角モデルと高角モデルを用いて計算した理論地震波形との比較を示した。図 3(a) は周期 8 秒でのローパスフィルター、図 3(b) は周期 50 秒のローパスフィルターを適用したものである。これらの結果からは、周期 50 秒以上の帯域では、断層面の違いによる理論波形の差異は小さく、断層面を決定するには周期 1 秒程度までの短周期の精度を持つ理論地震波形記録が必要となることが分かった。

3. まとめ

2015 年 5 月 30 日小笠原諸島西方沖深発震源の震源過程モデルを遠地実体波解析により求め、スペクトル要素法を用いて計算した全球広帯域理論地震波形との比較を試みた。pP 波の理論波形と観測波形との一致は良く、震源の深さは約 678km とすることで観測を良く説明出来ることが分かった。しかし、高角モデルと低角モデルの理論波形に大きな差異はなく、観測波形との一致の違いからどちらの断層面で破壊が起きたかを決定することは難しいことが分かった。断層面を決定するには周期 1 秒程度までの短周期の精度を持つ理論地震波形記録が必要となるため、より大規模な数値計算を実行する計算機環境が望まれる。

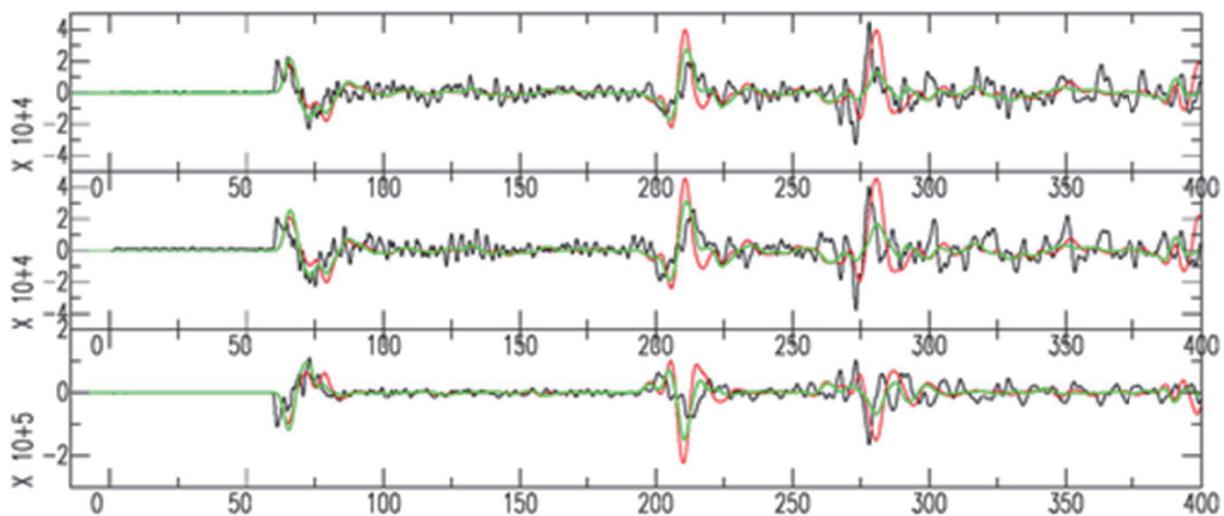


図 2 KONO の観測波形と理論波形の比較。上から EW、NS、および Z 成分の 400 秒間の速度記録を示す。8 秒の low pass filter を適用した。黒線が観測波形で赤線が低角モデル、緑線が高角モデルの理論波形を示す。

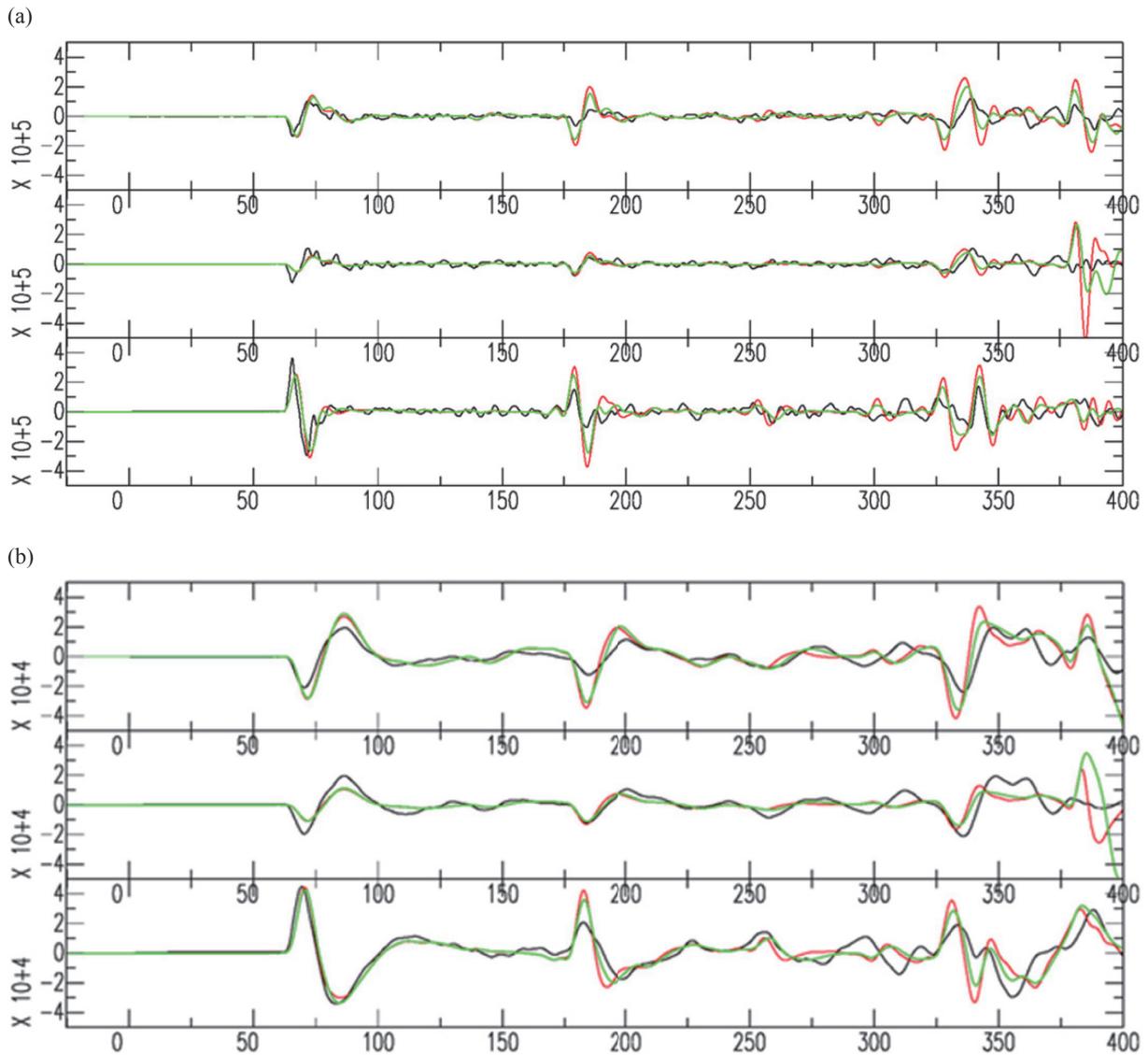


図3 CHTOの観測波形と理論波形の比較。上からEW、NS、およびZ成分の400秒間の速度記録を示す。黒線が観測波形で赤線が低角モデル、緑線が高角モデルの理論波形を示す。(a)8秒のlow pass filterを適用。(b)50秒のlow pass filterを適用。

文献

- [1] T. Nakamura, S. Tsuboi, Y. Kaneda, and Y. Yamanaka. Rupture process of the 2008 Wenchuan, China earthquake inferred from teleseismic waveform inversion and forward modeling of broadband seismic waves. *Tectonophysics*, 2009, 491, p. 72-84, 2009.
- [2] M. Kikuchi and H. Kanamori, Note on Teleseismic Body-Wave Inversion Program, <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/ETAL/KIKUCHI/>, 2003.
- [3] S. Tsuboi, T. Nakamura, and T. Miyoshi. Source mechanism of May 30, 2015 Bonin Islands, Japan deep earthquake (Mw7.8) estimated by broadband waveform modeling, AGU Fall meeting 2015, S13D-02, San Francisco, CA, USA, December 14, 2015.
- [4] 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

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

Keywords: 2014 Bonin earthquake, Deep earthquake, Spectral Element Method

May 30, 2015 Bonin Islands, Japan earthquake (Mw 7.8, depth 679.9 km GCMT) was one of the deepest earthquakes ever recorded. Because the location and depth of this event are unusual, it is still a controversial issue if this event happened at the subducting plate interface or inside the mantle. We perform the waveform inversion in the same manner as our previous work (Nakamura et al., 2009) [1] to obtain slip distribution in the source fault of this earthquake. We use 60 broadband seismograms of IRIS GSN seismic stations with epicentral distance between 30 and 90 degrees. The broadband original data are integrated into ground displacement and band-pass filtered in the frequency band 0.002-1 Hz. We use the velocity structure model IASP91 to calculate the wavefield near source and stations. We assume that the fault is squared with the length 50 km. We use the waveform inversion technique of Kikuchi and Kanamori (2003)[2]. We obtain source rupture model for both nodal planes with high dip angle (74 degree) and low dip angle (26 degree) and compare the synthetic seismograms with the observations to determine which source rupture model would explain the observations better (Tsuboi et al., 2015)[3]. We calculate broadband synthetic seismograms with these source propagation models using the spectral-element method (Komatitsch et al., 2005) [4]. We use new Earth Simulator system in JAMSTEC to compute synthetic seismograms using the spectral-element method. The simulations are performed on 7,776 processors, which require 1,944 nodes of the Earth Simulator. On this number of nodes, a simulation of 50 minutes of wave propagation accurate at periods of 3.8 seconds and longer requires about 5 hours of CPU time. Comparisons of the synthetic waveforms with the observation at teleseismic stations show that the arrival time of pP wave calculated for depth 679 km matches well with the observation, which demonstrates that the earthquake really happened below the 660 km discontinuity. In our present forward simulations, the source rupture model with the low-angle fault dipping is likely to better explain the observations but it is difficult to determine in which fault plane the actual fault rupture occurred, because the differences in variance reduction for both fault plane solutions are minimal.

References

- [1] T. Nakamura, S. Tsuboi, and Y. Kaneda, and Y. Yamanaka. Rupture process of the 2008 Wenchuan, China earthquake inferred from teleseismic waveform inversion and forward modeling of broadband seismic waves. *Tectonophysics*, 2009, 491, p. 72-84, 2009.
- [2] M. Kikuchi and H. Kanamori, Note on Teleseismic Body-Wave Inversion Program, <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/ETAL/KIKUCHI/>, 2003.
- [3] S. Tsuboi, T. Nakamura, and T. Miyoshi. Source mechanism of May 30, 2015 Bonin Islands, Japan deep earthquake (Mw7.8) estimated by broadband waveform modeling, AGU Fall meeting 2015, S13D-02, San Francisco, CA, USA, December 14, 2015
- [4] 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