

周期帯別の震源過程逆解析から推定される 2011 年東北地震の広帯域震源特性  
 Broadband source characteristics of the 2011 Tohoku-oki earthquake  
 estimated by multi period-band source inversion analysis

○久保久彦・浅野公之・岩田知孝・青井 真

○Hisahiko Kubo, Tomotaka Iwata, Kimiyuki Asano, Shin Aoi

In this study, we constructed source models for the 2011 Tohoku-oki earthquake ( $M_w$  9.1) in multi successive period-bands (5—10 s, 10—25 s, 25—50 s, and 50—100 s) using strong-motion data, and revealed the broadband source characteristics for this event. The comparison of the source models for the different period-bands indicates that the shallow off-Miyagi region, which has a huge slip (approximately 30 m), strongly radiated long-period (50—100 s) waves but weakly radiated relatively short-period (5—25 s) waves, which could be explained by the scenario that the slip with the thermal pressurization occurred in the velocity-strengthening area. In the deep off-Miyagi region, twice ruptures were observed in all the period-bands, indicating that this region radiated not only short period (5—25 s) but also long-period (25—100 s) seismic waves. In addition, a difference in the dominant period of the seismic-wave radiation between the twice ruptures was discovered, which might be caused by the rupture of the hierarchical asperity.

### 1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震 ( $M_w$  9.1, 以下 2011 年東北地震) の震源過程に関しては, 長周期 (概ね 10 秒以上) の地震波を用いた震源インバージョンや短周期 (0.1–10 秒) の地震波を用いた種々の研究によって調べられてきた。それらの解析結果の比較から, 2011 年東北地震の地震波放射特性は空間的な周期依存性を有していると指摘されている (例えば Ide et al., 2011; Koper et al., 2011; Lay et al., 2012)。本研究は連続的に異なる複数の周期帯域 (5–10 秒・10–25 秒・25–50 秒・50–100 秒) の強震波形記録を用いて, これらの周期帯域における 2011 年東北地震の時空間すべりモデルの構築を図った。そして, 周期帯別の空間的なすべり速度時間関数の違いに基づいて, 同地震の地震波放射特性の詳細及び広帯域震源特性を調べた。

### 2. 解析方法

震源過程解析にはフルベイジアン手法とマルチタイムウィンドウ法 (Hartzell and Heaton, 1983) を組み合わせた震源インバージョン手法 (久保ら, 2014) を用いた。この解析には防災科学技術研究所 K-NET・KiK-net・F-net の 25 観測点における強震速度波形三成分を用いた。グリーン関数は, 三次元地下速度構造モデル (全国 1 次地下構造モデ

ル, Koketsu et al., 2012) を仮定した上で, 三次元差分法プログラム GMS (Aoi and Fujiwara, 1999) によって計算した。解析周期帯における三次元地下速度構造モデルの妥当性に関しては, 2011 年東北地震の震源域で発生した M6 クラスの地震の実地震記録を用いて検証した。震源断層面は全国 1 次地下構造モデルの太平洋プレート上面の形状を参考に構築し (断層面積は約 98,000 km<sup>2</sup>), 約 16 km × 16 km の大きさを持つサブフォルト 384 個に分割した。各サブフォルトの震源時間関数は 4 秒幅のスムーズドランプ関数を 2 秒ずらして 49 個並べることで表現した。

### 3. 結果及び議論

異なる解析周期帯の震源モデル間の比較から, 30m を超える非常に大きなすべりを持つ宮城県沖浅部は長周期 (50–100 秒) の地震波を非常に強く励起したが, 短周期 (5–10 秒) の地震波の励起は弱かったことが分かった。この特徴は海溝軸付近から深さ 20 km までの約 18,000 km<sup>2</sup> の領域で見られ, 特に海溝軸付近の領域で顕著に見られる。また宮城県沖深部 (深さ 20–50 km) では, ほぼ同じ場所で約 40 秒の時間間隔をおいて発生した二度の破壊が全ての解析周期帯域で見られた。このことは宮城県沖深部が 2011 年東北地震において短

周期 (5–25 s) の地震波だけでなく長周期の (25–100 s) の地震波も励起していたことを示す (ただし宮城県沖浅部に比べると宮城県沖深部での長周期地震波の放射強度は強くない). これらの結果は, 長周期と短周期の地震波はそれぞれ震源域浅部と深部から強く励起していたという 2011 年東北地震における地震波励起に関する空間的な周期依存性が連続的に変化していたことを示す. また, 宮城県沖深部からも長周期地震波がある程度放射されていたということから, 2011 年東北地震の地震波放射特性は深さ (傾斜) 方向に励起地震波の周期が異なるといった単純なものではないことが分かる.

宮城県沖浅部で見られた特徴 (30m を超える巨大な滑り及び短周期地震波の弱い励起) に関しては, Noda and Lapusta (2013) による動的破壊シミュレーションの結果を参考にすると, thermal pressurization を伴ったすべりが速度強化領域で生じていたと考えると説明することができる. 宮城県沖浅部が速度強化領域であり, かつ thermal pressurization が発生する可能性を持つことは, Yamamoto et al. (2014) などの先行研究によって指摘されている.

宮城県沖深部での二度の破壊において励起地震波の卓越周期に違いがあることが解析結果から分かっている: 長周期 (25–100 秒) の地震波に関しては二度目の破壊の方が一度目に比べより強く励起した一方で, 短周期 (5–25 秒) の地震波に関しては一度目の破壊による地震波励起は二度目の破壊による地震波励起とほぼ同じもしくはやや大きかった. この励起地震波の卓越周期の違い及び二度の破壊における破壊領域の違い (1 回目: 約 6000 km<sup>2</sup>, 2 回目: 約 9000 km<sup>2</sup>) から, 2011 年東北地震時の宮城県沖深部では階層型アスペリティ (例えば Seno, 2003) の破壊が生じていた可能性が示唆される.

#### 4. 謝辞

本研究では防災科学技術研究所 K-NET, KiK-net, F-net で観測された近地強震波形記録を使用しました. 記して感謝申し上げます.

#### 5. 参考文献

久保久彦・浅野公之・岩田知孝・青井真 (2014), ベイジアンインバージョンとマルチタイムウ

インドウ法を組み合わせた震源過程解析, 日本地震学会 2014 年度秋季大会, A32-04, 新潟, 10 月 26–28 日.

Aoi, S. and H. Fujiwara (1999), 3-D finite difference method using discontinuous grids, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **89**, 918–930.

Hartzell, S. H. and T. Heaton (1983), Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **73**, 1553–1583.

Ide, S., A. Baltay, and G. C. Beroza (2011), Shallow dynamic overshoot and energetic deep rupture in the 2011  $M_w$  9.0 Tohoku-oki earthquake, *Science*, **332**, 6036, 1426–1429, doi:10.1126/science.1207020.

Koketsu, K., H. Miyake, and H. Suzuki (2012), Japan Integrated Velocity Structure Model Version 1, Paper No. 1773 presented at 15th World Conference on Earthquake Engineering, Int. Assoc. for Earthquake Eng., Lisbon, 24–28 Sep.

Koper, K. D., A. R. Hutko, T. Lay, C. J. Ammon, and H. Kanamori (2011), Frequency-dependent rupture process of the 2011  $M_w$  9.0 Tohoku Earthquake: Comparison of short-period P wave backprojection images and broadband seismic rupture models, *Earth Planets Space*, **63**, 599–602.

Lay, T., H. Kanamori, C. J. Ammon, H. Yue, K. D. Koper, A. R. Hutko, and E. E. Brodsky (2012), Depth-varying rupture properties of subduction zone megathrust faults, *J. Geophys. Res.*, **117**, B04311, doi:10.1029/2011JB009133.

Noda, H. and N. Lapusta (2013), Stable creeping fault segments can become destructive as a result of dynamic weakening, *Nature*, **493**, 518–521, doi:10.1038/nature11703.

Seno, T. (2003), Fractal asperities, invasion of barriers, and interplate earthquakes, *Earth Planets Space*, **55**, 649–665.

Yamamoto, Y., K. Obana, S. Kodaira, R. Hino, and M. Shinohara (2014), Structural heterogeneities around the megathrust zone of the 2011 Tohoku earthquake from tomographic inversion of onshore and offshore seismic observations, *J. Geophys. Res.*, **119**, 1165–1180, doi:10.1002/2013JB010582.