

沈み込む太平洋プレートの反導波効果と 2013 年オホーツク海深発地震 (深さ 610 km, Mw8.3) による特異な震度分布

課題責任者

古村孝志 東京大学地震研究所

著者

古村孝志 東京大学地震研究所

オホーツク海下で 2013 年 5 月 24 日に発生した、巨大(Mw6.3)で非常に深い(610 km)深発地震において、日本列島全域にわたって強い揺れが広がった。日本列島に沈み込む太平洋プレート(スラブ)内で地震が起きた際に、太平洋プレートの南北走行に沿って、北海道～東北～関東の太平洋側の数百キロメートルの広い範囲で震度が大きくなる現象は「異常震域」として良く知られている。これは、スラブ内に放射された高周波数(> 2 Hz)地震波が、不均質なスラブ内で強い前方散乱を起こして誘導されるように伝わる、スラブの導波効果によるものである。ところが、2013 年オホーツク海深発地震では、異常震域とは逆に、日本海側に最大震度が出現、そして太平洋プレートの走行に沿って日本海側と太平洋側に裂けるように震度分布が二極化した。地殻・マンツルの 3 次元不均質構造を用いた地震波伝播の 3 次元差分法シミュレーションにより、観測された特異な震度分布は、地震波速度が大きい太平洋スラブにおける、低周波数(< 1 Hz)地震動の反導波効果により起きたことが確認された。反導波効果は、低周波数地震動が卓越する巨大地震において特に顕著であり、高周波数地震動の導波効果に打ち勝って特徴的な震度分布が形成されたと結論づけられる。

キーワード：深発地震、FDMシミュレーション、太平洋スラブ、導波/反導波

1. はじめに

2013 年 5 月 24 日、カムチャッカ半島西方のオホーツク海の下の深さ 610 km で発生した、Mw 8.3 の巨大地震(以下、「オホーツク海深発地震」という。)では、震源距離が数百 km 以上離れた北海道北部と東北北部で最大震度 3 の強い揺れが観測され、さらに有感の範囲は 3500 km 離れた南九州まで拡大した(図 1a)。

一般に、沈み込む太平洋スラブ内で深発地震(深さ 100 ~ 200 km)が起きると、大きな震度が北海道～東北～関東の太平洋側に広範囲に発生する現象は、異常震域と呼ばれる。これは、スラブ内の短波長不均質構造により高周波数(> 2 Hz)地震動が強い前方散乱を繰り返し、スラブに閉じ込め・誘導されるように遠地まで伝わるためである。ところが、オホーツク深発地震で見られた震度分布は、通常の太平洋スラブ内で起きた深発地震(例えば、図 1b)と形状が大きく異なっており、日本海側に大きな震度が出現したほか、また深さ 100 km のプレート等深線に沿って日本海側と太平洋側の 2 つのゾーンに大きな震度域が現れた。

2. 2013 年オホーツク深発地震の地震波伝播シミュレーション

本研究では、2013 年のオホーツク海深発地震から日本列島への特異な地震波伝播とな震度パターンの成因を、太平洋スラブ沈み込み帯の地殻とマンツルの不均質構造をモデル化した 3 次元差分法(3D FDM)計算に基づき検討した。

2.1 計算モデル

3D FDM 計算の範囲は、カムチャッカ半島南端～九州をカバーする、水平方向 3,360 km \times 1,536 km、深さ方向 1,200 km とし、水平方向に 0.5 km、垂直方向に 0.25 km の格子間隔で離散化して、周波数 2 Hz までの地震波伝播を計算した。3D FDM 計算は、OpenSWPC コード(Maeda et al., 2017) [1]を用いてデカルト座標系で行ない、球殻地球の影響は、Earth flattening 法を用いて地震波速度の深さ分布を補正することで計算に組み込んだ。

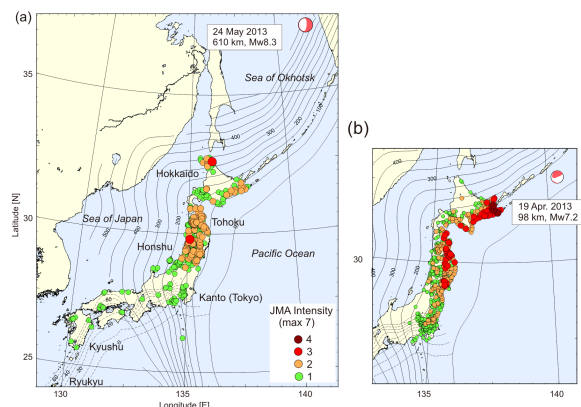


図 1. 太平洋スラブの深発地震による震度分布 (a) 2013 年 5 月 24 日オホーツク海深発地震 (610 km, Mw8.3), (b) 2000 年 12 月 22 日千島列島の深発地震(150 km, Mw6.1)。曲線は沈み込む太平洋プレートの等震度線(50 km 間隔)を表す。

地殻/マントル構造はCRUST 1.0モデル (Laske et al., 2013) [2]により設定した。太平洋のスラブの上面深度にはYokota et al. (2017) [3]のモデルを用い、プレートの厚さを100 kmに設定した。沈み込む太平洋スラブの海洋地殻と海洋マントルの速度・減衰構造、そしてスラブ内の短波長不均質構造は、Kennett and Furumura (2015) [4]に基づいて与えた。2013年オホーツク海深発地震の震源モデルには、Wei et al. (2013) [5]の有限断層モデルを用い、これを391個の点震源の形で計算に取り入れた。

3D FDM 計算は、地球シミュレータの2,106ノードを用いたMPI/OpenMP ハイブリッド並列計算により実行した。100,000 タイムステップによる900秒間の波動伝播の評価には、22.8 TBのメモリと8.9時間の時間を要した。

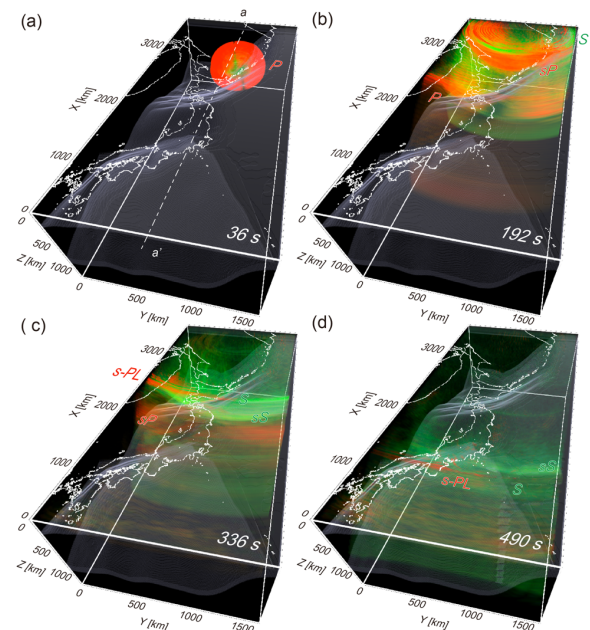


図2. 2013年オホーツク海深発地震の3D FDM 計算から求められた、3次元波動場のスナップショット。地震発生から36秒、192秒、336秒、490秒後の波動場を、P波を赤、S波を緑色で可視化。

2.2 計算結果

計算から求められた3次元地震波動場のスナップショットを図2に、地表面での最大速度分布 (PGV) とF-net 観測点の地動速度波形 Radial 成分を図3に示す。

地震発生から36秒、192秒、336秒、490秒後の地震波伝播の3D可視化画像(図3)は、P波を赤、S波を緑色で表している。太平洋スラブの610 kmの深さの震源~放射された地震波がスラブ内を伝わり地表に到達し、これが地殻内を伝わって九州へ伝播する様子がわかる。日本列島の厚い地殻に入射したS波は地殻を伝わるP変換波(s-PL波)を生成し、これがS波に後続する長い波群を作る様子もわかる。

計算から求められたPGV分布(図4b)とF-net観測点での波形記録の特色は、観測値(図4c)と良く対応することが確認できる。

ここで、太平洋スラブが地震波伝播に与える影響は、太平洋スラブなし(図3a)とスラブあり(図3b)のPGVの比較から見る事ができる。太平洋スラブが存在することで、2013年オホーツク海深発地震で見られたように日本海側(秋田県付近)に大きな地動が現れ、そして太平洋スラブの100 kmの等深線を境に日本海側と太平洋側に分かれて大きな地動が広がることが分かる。このことは、二つのPGV分布の比(スラブ有り/スラブ無し)を取ることで良く見ることが出来る(図5)。

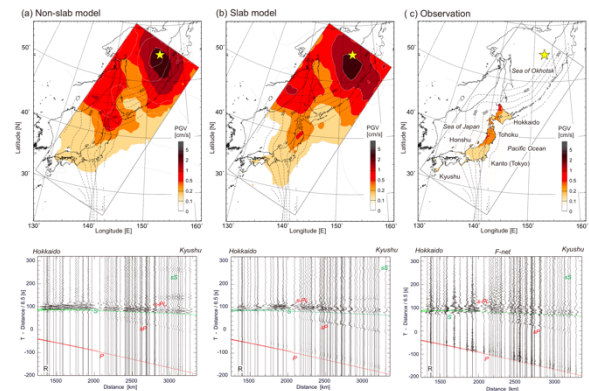


図4. 計算から求められた最大速度分布 (PGV)。(a) 太平洋スラブなしの場合、(b)ありの場合。図下は、F-net 観測点における地震波形 Radial 成分、(c)観測されたPGV分布とF-net地震波形記録。

3. 結論

図4、5に見られた、太平洋スラブによる地震波伝播と地動分布 (PGV) の大きな変化は、スラブ深部の巨大地震の震源から放射された地震波成分のうち、低周波数 (< 1 Hz)成分が、高速度のスラブから低速度のマントルに屈折して抜け出すことが原因である。

一般に、スラブは強い不均質構造による散乱により高周波数地震動を内部に閉じ込め、スラブに沿ってガイド(導波)する効果が知られている。これに対して、高速度スラブが生み出す反導波路効果は、これまでVidale(1987) [5]らにより議論されてきたが、近地波動場において観測される機会は少なかった。

高周波数地震波と低周波数地震波に対してスラブは逆の働きを持つが、2013年オホーツク海深発地震は、日本から遠く離れた巨大地震であり、震源からの放射地震波の卓越周期が長く(周波数が低く)、かつ日本列島までの長い伝播距離が長いために高周波数の減衰が大きいことからスラブの反導波路効果が顕著に見られたと結論づけられる。

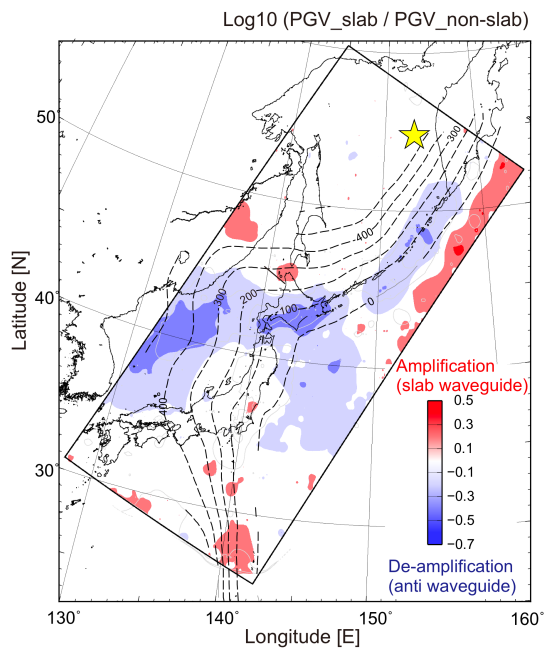


図5. 最大速度分布(PGV)の比率 (太平洋スラブあり/スラブなしの場合を対数で表示)。赤は、太平洋スラブによる導波効果を、青は反導波効果を表す。

謝辞

本研究結果は、JGR Solid Earth (Furumura and Kennett, 2019) [6]に掲載されました。本研究は、日本学術振興会の助成金 (No. 17K01322) の支援を受けました。計算は、JAMSTECの地球シミュレーターと、東京大学地震研究所地震情報センターの EIC 並列コンピューターを使用して行いました。

文献

- [1] Maeda, T., S. Takemura, and T. Furumura, (2017). OpenSWPC: An open-source integrated parallel simulation code for modeling seismic wave propagation in 3D heterogeneous viscoelastic media. *Earth Planets Space*, 69, 102, <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0687-2>.
- [2] Laske, G., G. Masters, Z. Ma, and M. Pasyanos, (2013). Update on CRUST1.0 - A 1-degree Global Model of Earth's Crust, *Geophys. Res. Abstracts*, 15, Abstract EGU2013-2658.
- [3] Yokota, T., M. Nemoto, K. Matsusue, S. Takase, K., Takata, and M. Ikeda, (2017). Study on the plate model of the Pacific plate. Abstract of JpGU-AGU Joint Meeting, 2017, SSS13-P04.
- [4] Kennett, B. L. N., and T. Furumura (2019). Significant P wave conversion from upgoing S waves generated by very deep earthquakes around

- Japan, *Progress in Earth and Planetary Science*, 6:49. [tps://doi.org/10.1186/s40645-019-0292-z](https://doi.org/10.1186/s40645-019-0292-z).
- [5] Vidale, J.E. (1987). Waveform effects of a high-velocity, subducted slab. *J. Geophys. Res. Lett.*, 14(5), 542-545, <https://doi.org/10.1029/GL014i005p00542>.
 - [6] Furumura, T. and BLN Kennett, (2019). The significance of long-period ground motion at regional to teleseismic distances from the 610-km deep Mw8.3 Sea of Okhotsu earthquake of 25 May 2013, *J. Geophys. Res.*, 124, <https://doi.org/10.1029/2019JB018147>.

Anti-waveguide Effect of Subducting Pacific Slab and Anomalous Intensity Distribution of 610 km Deep Mw8.3 Sea of Okhotsk Earthquake of 24 May 2013

Project Representative

Takashi Furumura, Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Author

Takashi Furumura, Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

A large, very deep (610 km, Mw 8.3) earthquake occurred beneath the Sea of Okhotsk (24 May 2013) produced large round motion across Japan. The largest shaking was concentrated along the Sea of Japan side, which is the opposite of the normal pattern for deep earthquakes in the Pacific plate. 3-D finite-difference-method simulations of seismic wave propagation confirm that the anti-waveguide effect of the high-wavespeed Pacific plate push the zone of larger intensity 300 km further to south than might be expected.

Keywords : Deep-focus earthquake, FDM simulation, Pacific slab, waveguide/anti-waveguide

1. Introduction

The largest known very-deep earthquake occurred in the Pacific slab beneath the Sea of Okhotsk, west of Kamchatka on May 24, 2013 (610 km, Mw 8.3) and produced large shaking across the Japanese islands (Fig. 1a). The largest shaking intensity 3 on the Japan Meteorological Agency (JMA) scale was reported in northern Hokkaido and in northern Tohoku. The area of felt reports (intensity ≥ 1) extends to southern Kyushu 3,500 km away from the epicenter (Fig.1a).

Usually, deep (100-200 km) earthquakes in the subducting Pacific slab, observed in the epicentral distance range out to 2,000 km, produce larger intensity over the fore-arc side of the Japan trench subduction zone, extending from Hokkaido to Kanto (Tokyo) (see Figs. 1b). However, the intensity pattern for the 2013 Sea of Okhotsk earthquake was different. There was larger intensity along the Japan Sea side, which is the opposite of the normal pattern for deep earthquakes in the Pacific slab (Fig. 1a). There are two separate zones of larger ground motion in northern Hokkaido and in Tohoku.

2. Simulation of ground motions for the 2013 Sea of Okhotsk earthquake

In this study, we investigate the cause of the peculiar low-frequency (long-period) wavefield and the unusual pattern of intensity developed by this large and very deep 2013 Sea of Okhotsk event. We use the 3-D finite-difference method (FDM) simulations of seismic wave propagation with heterogeneous crust and mantle structure including the Pacific Plate subduction zone.

The volume used for the 3-D FDM simulation is 3,360 km by 1,536 km in the horizontal direction, and 1,200 km in depth. The model covers the area from the south of Kamchatka to Kyushu, discretized with a grid interval of 0.5 km in horizontal

direction and 0.25 km in vertical. The FDM simulation was performed in a cartesian-coordinate system using the OpenSWPC code (Maeda et al., 2017)[1]. Earth flattening is applied to compensate for the sphericity of the earth.

We use the CRUST 1.0 model (Laske et al., 2013)[2] and the depth to the Pacific slab is based on the work of Yokota et al. (2017)[3]. The distribution of velocity and stochastic random heterogeneities in the oceanic crust and lithosphere of the subducting slabs are taken from Kennett and Furumura (2015)[4]. A finite source-rupture model for the 2013 Sea of Okhotsk earthquake of Wei et al. (2013)[5] described by 391 double-couple point sources over the fault plane was used.

The 3-D simulation requires 22.8 Tbyte of computer memory in single precision calculations and wall-clock time of 8.9 hours for modeling wave propagation to 900 s with 100,000 time-steps ($\Delta t=0.009$ s) using 2,106 nodes of the Earth Simulator supercomputer.

The result of the 3-D FDM simulation with subducting Pacific slabs is shown with a 3-D visualization of the seismic wavefield (Fig.2). The distribution of the simulated PGV and record section is compared with the observation in Fig.3.

The result of the PGV distribution across Japan with the Pacific slab (Fig.3a) is greatly modified from the situation without a slab (Fig.3b). The areas of larger ground motions spread to north and south around the 100 km isodepth marker for the Pacific slab. This explains the peculiar PGV and intensity pattern caused by the 2013 Sea of Okhotsk earthquake (Fig. 1a). with a separation of intense ground motions in northern Hokkaido and in Tohoku at the Sea of Japan side.

3. Conclusions

The modification of the ground shaking occurs due to the bending of the wavefronts for low-frequency (<1 Hz) seismic

waves away from the high-wavespeed slab. Such an anti-waveguide effect of a high-wavespeed subducting slab is very efficient for low-frequency waves (e.g., Vidale, 1987)[5] in contrast to the waveguide effect for high-frequency (> 1 Hz) seismic waves as a result of strong forward scattering in heterogeneous slab. Thus, for large and distant earthquakes with dominance of low-frequency signals, the anti-waveguide process can be expected to override the high-frequency waveguiding. This combination produces the peculiar PGV distribution of the 2013 Sea of Okhotsk earthquake at regional distances.

Acknowledgement

The result of this study was published in the *JGR Solid Earth* (Furumura and Kennett, 2019)[6]. This study was conducted with support from Grants-in-Aid from the Japan Society of Promotion Sciences (No. 17K01322). The computations were conducted using the Earth Simulator at Japan Marine Science and Technology Center (JAMSTEC), and the EIC parallel computer at the Earthquake Information Center at the Earthquake Research Institute, the University of Tokyo.

References

- [1] Maeda, T., S. Takemura, and T. Furumura, (2017). OpenSWPC: An open-source integrated parallel simulation code for modeling seismic wave propagation in 3D heterogeneous viscoelastic media. *Earth Planets Space*, 69, 102, <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0687-2>.
- [2] Laske, G., G. Masters, Z. Ma, and M. Pasyanos, (2013). Update on CRUST1.0 - A 1-degree Global Model of Earth's Crust, *Geophys. Res. Abstracts*, 15, Abstract EGU2013-2658.
- [3] Yokota, T., M. Nemoto, K. Matsusue, S. Takase, K., Takata, and M. Ikeda, (2017). Study on the plate model of the Pacific plate. Abstract of JpGU-AGU Joint Meeting, 2017, SSS13-P04.
- [4] Kennett, B. L. N., and T. Furumura (2019). Significant P wave conversion from upgoing S waves generated by very deep earthquakes around Japan, *Progress in Earth and Planetary Science*, 6:49. [tps://doi.org/10.1186/s40645-019-0292-z](https://doi.org/10.1186/s40645-019-0292-z).
- [5] Vidale, J.E. (1987). Waveform effects of a high-velocity, subducted slab. *J. Geophys. Res. Lett.*, 14(5), 542-545, <https://doi.org/10.1029/GL014i005p00542>.
- [6] Furumura, T. and BLN Kennett, (2019). The significance of long-period ground motion at regional to teleseismic distances from the 610-km deep Mw8.3 Sea of Okhotsk earthquake of 25 May 2013, *J. Geophys. Res.*, 124, <https://doi.org/10.1029/2019JB018147>.

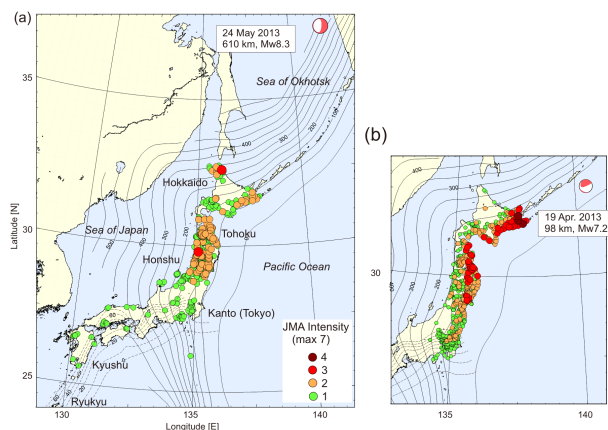


Fig. 1 Shaking intensity on the JMA scale for (a) 24 May 2013 Sea of Okhotsk earthquake (610 km, Mw8.3), (b) 22 Dec. 2000 Kurile islands earthquake (150 km, Mw6.1). The isodepth contours of the subducting Pacific slab is plotted.

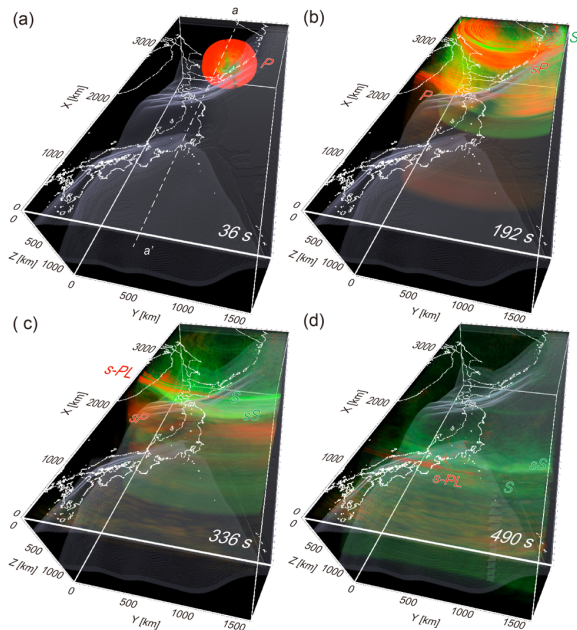


Fig. 2. Snapshots of 3-D seismic wavefield for the 2013 Sea of Okhotsk earthquake derived by the simulation using a point double-couple source, displaying the P and S wavefield in red and green, respectively, at 36 s, 192 s, 336 s, and 490 s after earthquake initiation.