

太平洋スラブ内の準安定オリビンウエッジによる深発地震の導波効果の強化

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

プレート深部 (>400 km) に存在する、低速度の準安定オリビンウエッジ (MOW) が高周波数地震波の導波効果を強める働きについて、F-net 広帯域地震波記録の解析と、地震波伝播の3次元差分法 (3-D FDM) シミュレーションに基づき検討した。太平洋プレート内で発生した、深さ 400 以深の地震の波形には、プレート内の短波長不均質構造による散乱・導波により生まれた高周波数 ($f > 1$ Hz) の P 波と S 波とともに、弱い分散性を示す低周波数 ($f < 1$ Hz) の地震波が先行する。この先駆波の生成メカニズムを確認するために、太平洋プレート内部不均質構造をモデル化し、2010 年 2 月 18 日のウラジオストック深発地震 (深さ 578 km, $M_w=6.8$) の高周波数地震動シミュレーションを行った。シミュレーション結果より、プレート深部にある MOW 内で地震が発生すると、その低速度層内に地震波が閉じ込められプレート上部方向に強く放射される効果が確認された。そして、プレートの導波効果が強められることで、地表に大振幅かつ長時間の揺れが生成されることがわかった。シミュレーションから求められた地震波形と地表の加速度分布は、ウラジオストック深発地震の特性 (異常震域) 良く説明することを確認した。

キーワード：深発地震, 震度, 異常震域, 差分法計算, 準安定オリビンウエッジ, 太平洋プレート

1. はじめに

大陸下に沈み込む、冷たく堅い太平洋プレートは地震波を良く伝える特徴がある。深発地震が起きるとプレート内部を高周波数 ($f > 1$ Hz) の地震波が伝わることで、関東～東北～北海道の太平洋岸で震度が大きくなる現象は「異常震域」としてよく知られている (Utsu, 1967[1]; Utsu and Okada, 1968[2])。異常震域を作り出す地震波は高周波数成分に富んでおり、揺れが何分も長く継続する特徴がある。これは、プレート内部の強い不均質構造により、波長の短い高周波数地震波が強い前方散乱を起こしながら伝わった結果である (Furumura and Kennett, 2005[3]; 2008[4])。こうした、プレート内不均質構造による散乱・導波効果に加え本研究ではプレート深部 (>400 km) の準安定オリビンウエッジが作り出す、薄いくさび型の低速度層 (Metastable Olivine Wedge; MOW) が高周波数地震波の導波効果を強める効果を、広帯域地震観測記録の解析と、3次元差分法に基づく地震波伝播シミュレーションにより検討した。計算の結果、MOW 内部で深発地震が起きることで、MOW 内部に地震波の閉じ込めがおき、プレートの上方に焦点を結ぶように地震波放射に指向性が生まれることがわかった。結果、地表には強くかつ継続時間が長い高周波数地震波が生じ、異常震域の特徴が強められることが確認できた。

2. 深発地震の揺れの観測記録

図 1 に東北沖～ウラジオストック下で発生した、深さ $h=215 \sim 578$ km の深発地震の広帯域地震波形記録 (地動速度、Transverse 成分) の例を示す。地震波形記録には、

不均質プレートの散乱・導波効果により強められた、高周波数 ($f > 1$ Hz) で継続時間が長い P 波と S 波の特徴が確認できる。震源の深さが 400 km を超えると、P 波と S 波の到来前に、低周波数 ($f < 1$ Hz) で分散性を示す先駆波が現れることもわかる。なお、先駆波の到着時間は震源の深さとともに早まることから、プレート深部に低速度層の存在が考えられ、先駆波は低速度層の境界を高速

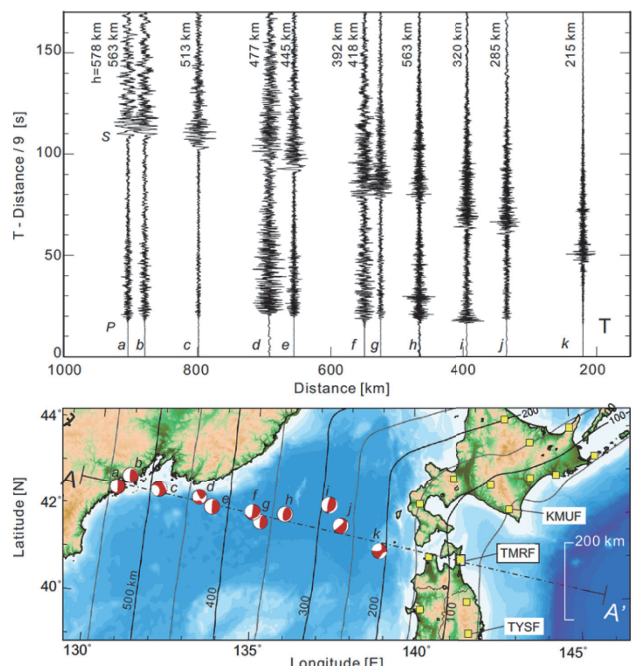


図 1 東北～ウラジオストックにかけて発生した深発地震と地震波形記録 (地動速度 Transverse 成分)。震源の深さを地震波形の左側に表示。

度で伝わる屈折波と考えることができる。

日本列島下に沈み込む、冷たい太平洋プレート深部(400-660km)には、低温により岩石物性の相転移が遅れ、地震波速度が遅いまま深部に沈み込む領域が、薄いくさび形で存在 (Metastable Olivine Wedge; MOW; たとえば、Kawakatsu and yoshioka, 2001[5]) することが考えられ、これが深発地震の地震波伝播に影響を与える可能性が指摘されている (Vidale 1991 [6]; Yoshioka and Murakami, 2002[7])。上述の深発地震 (>400km) に見られる地震波形の大きな変化は、太平洋プレート深部の MOW の存在を示唆するものである。

3. 深発地震の地震波伝播シミュレーション

そこで、太平洋プレート内部の不均質構造を詳細にモデル化した地震波伝播シミュレーションを行い、MOW が高周波数地震波の伝播に与える影響を確認するとともに、観測記録の特徴の再現性を確認した。計算対象領域(1728km*1400km*800km)を0.25kmの細かな格子間隔で離散化し、地殻、マントル、太平洋プレートの物性 (V_p , V_s , R_o , Q_p , Q_s) を与え、2010年2月18日にウラジオストック下で発生した深発地震 ($h=578\text{km}$; $M_w=6.8$) の地震波伝播を評価した。プレート内部の岩石物性は、先行研究 (Yoshioka and Murakami, 2002[7] 等) を参考に、MOW 内

部では周囲のマントルより P 波速度と S 波速度がそれぞれ 5% と 7% 遅い条件を設定した。深さ 410km において MOW の頭部の厚さを 100km に設定し、深さ 610km で厚さが 10km となるくさび型の低速度層を置いた。本シミュレーションでは、地殻の最小 S 波速度を $V_s=3.2\text{ km/s}$ と設定し、3 Hz までの高周波数地震波を評価した。

図 2 に、ウラジオストックの深発地震の地震波伝播シミュレーション結果 (地震発生から 15、75、240 秒後の 3 次元波動場) を示す。太平洋プレート深部で放射された地震波は、プレート内に閉じ込められ、強い揺れが遠地まで良く伝わる様子が確認できる。不均質プレート内を伝播するにつれて、散乱により長い波群が形成される様子もわかる。一方、プレートの外に向かう地震波は、高温で地震波の減衰が大きいマントルにおいて急激に弱まる。この結果、プレートに沿って地震波が伝わった太平洋岸では揺れが大きく、プレートの外を伝わった日本海側では揺れが小さい「異常震域」が生まれる。異常震域で記録される地震の揺れは、振幅が大きいだけでなく、長い波群を持つことも確認できる。

計算により求められた、地表の最大加速度 (PGA) 分布と北海道を東西に横切る測線での地震波形 (地動加速度、Radial 成分) を図 3 に示す。比較のために、地震観測から得られた PGA 分布と加速度波形も図示する。なお、

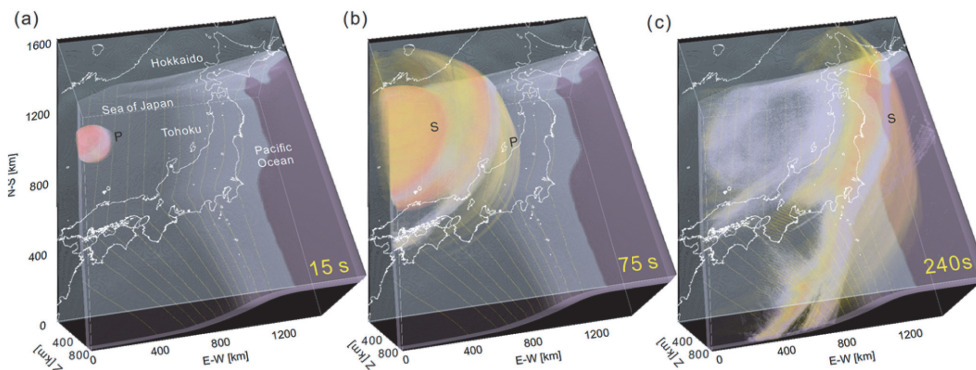


図 2 3次元 FDM シミュレーションにより得られた、ウラジオストックの深発地震 ($h=578\text{ km}$) の地震波伝播。地震発生から 15、75、240 秒後の揺れの伝わる様子。

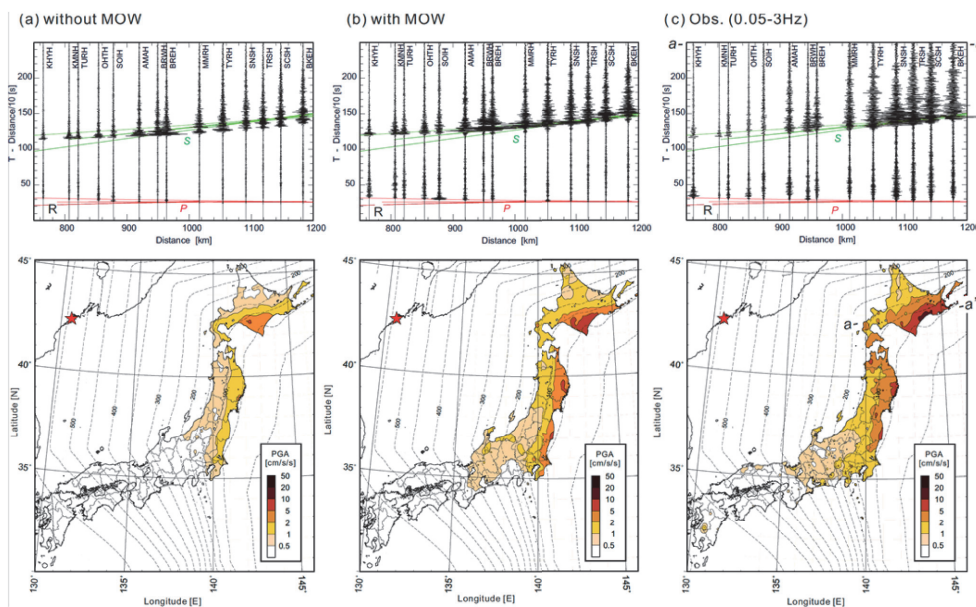


図 3 計算から求められた最大加速度分布 (下) と北海道を東西に横断する Hi-net 観測点で記録された地震波形 Radial 成分 (上) の比較。(a) MOW のないプレートモデル、(b) MOW をプレート深部に置いたモデル、(c) Hi-net 観測記録。

観測波形には計算との比較のために $f=0.1 \sim 3$ Hz のバンドパスフィルタをかけてある。結果を見ると、NOW を組み込まないプレートモデルでは、地震波での伝播効果が弱く、太平洋岸での強い震度（異常震域）が十分再現できていない。揺れの継続時間も観測よりずっと短い。これに対して、プレート深部に MOW を置いたモデルによる計算結果は、地震波の振幅および継続時間が大きく伸び、観測された異常震域の特徴を良く再現できた。

次に、MOW 内部の低速度異常の強度を 1～9% と変えて波動伝播計算を行い、観測波形との比較を行った。MOW 内部の物性が地震波形に与える影響は大きく、低速度異常が強まるほど、導波効果が強化され、大振幅かつ長い波群が形成される効果が確認できた。観測波形の特徴との比較から、MOW 内部は周囲のマントルより 5% 程度低速度であることが確認でき、プレート深部の物性の先行研究から示された結果を地震波伝播の観点から確認・強化することができた。

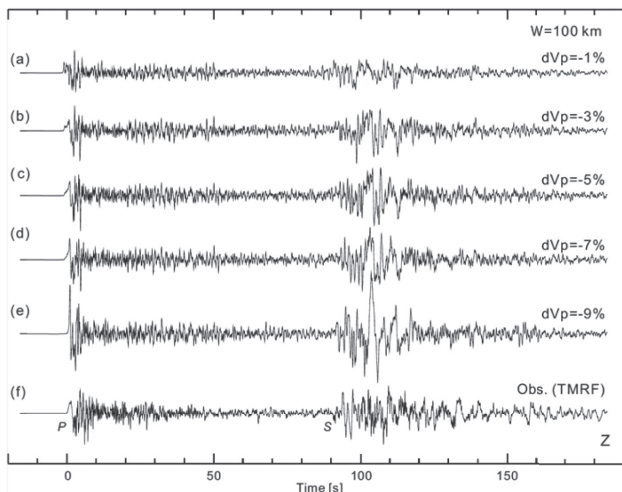


図4 MOW 内の低速度異常の強さ ($dV_p=1\% \sim 9\%$) を変えて行った地震波伝播シミュレーション結果 (a-e) と、広帯域地震観測点 (TMRF: 青森県六ヶ所村泊地点) での地震波形記録 (f) との比較。

4. 結論

太平洋プレートの深発地震で見られる異常震域は、プレート内部の短波長不均質構造に加え、プレート深部の MOW による、マルチスケール不均質が強く影響していることが広帯域地震観測記録解析と地震波伝播シミュレーションから確認できた。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費 (No. 26400444) の補助を受けて行われました。防災科学技術研究所 (NIED) の Hi-net と F-net 地震観測記録を使用しました。本研究で使用した地震観測波形データは、NIED の Hi-net データ公開ページ (<http://www.hinet.bosai.go.jp>) から入手できます。本研究成果は、Furumura et al. (2016) [8] として出版されました。

文献

- [1] Utsu, T. (1967), Anomalies in seismic wave velocity and attenuation associated with a deep earthquake zone (I), *J. Fac. Sci. Hokkaido Univ.*, Ser. VII, 3, 1–25.
- [2] Utsu, T., and H. Okada (1968), Anomalies in seismic wave velocity and attenuation associated with a deep earthquake zone (II), *J. Fac. Sci. Hokkaido Univ.*, Ser. VII, 3, 65–84.
- [3] Furumura, T., and B. L. N. Kennett (2005), Subduction zone guided waves and the heterogeneity structure of the subducted plate: Intensity anomalies in northern Japan, *J. Geophys. Res.*, 110, B10302, doi:10.1029/2004JB003486.
- [4] Furumura, T., and B. L. N. Kennett (2008), A scattering waveguide in the heterogeneous subducting plate, in *Earth Heterogeneity and Scattering Effects on Seismic Waves*, *Adv. Geophys.*, vol. 50, edited by R. Dmowska, pp. 195–217, Elsevier, Amsterdam, doi:10.1016/s0065-2687(08)00007-1.
- [5] Kawakatsu H., and S. Yoshioka (2011), Metastable olivine wedge and deep dry cold slab beneath southwest Japan, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 258, 219–227, doi:10.1016/j.epsl.2007.03.035
- [6] Vidale J. (1991), Waveform effects of a metastable olivine tongue in subducting slabs, *Geophys. Res. Lett.*, 18, 2201–2204, doi:10.1029/1991GL02588.
- [7] Yoshioka S., and T. Murakami (2002), The effects of metastable olivine (α) wedge in subducted slabs on theoretical seismic waveforms of deep earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 107, B2, 2365, doi:10.1029/2001JB001223.
- [8] Furumura, T., B. L. N. Kennett, and S. Padhy (2016), Enhanced waveguide effect for deep-focus earthquakes in the subducting Pacific slab produced by a metastable olivine wedge, *J Geophys Res-Sol Ea*, 121(9), 6779–6796, doi:10.1002/2016jb013300.

The Effect of a Metastable Olivine Wedge for Enhancing Wave Guide Effect of the Pacific Slab for Deep Earthquakes

Project Representative

Takashi Furumura Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Author

Takashi Furumura Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

We presented the evidence for the presence of the low-wavespeed metastable olivine wedge (MOW) from analysis of broadband waveforms of deep-focus earthquakes in the Pacific slab descending beneath the Sea of Japan as for events below 400 km depth showing low-frequency and slightly-dispersed P- and S-phases arrive ahead of the most energetic high-frequency direct phases. Numerical FDM simulations of high-frequency seismic wave propagation for 3-D heterogeneous subduction zone models demonstrate a strong waveguide effect from the MOW due to focusing of high-frequency seismic waves towards the up-dip direction in the slab. The presence of the metastable olivine in slabs allows the development of very large and lengthy ground motion for stations on the fore-arc side of Northern Japan in good agreement with the observations of anomalously large and lengthy ground motions during very deep ($h=578$ km) $M_w=6.8$ earthquake which occurred beneath Vladivostok of 18 Feb. 2010.

Keywords: Deep-focus earthquake, metastable olivine wedge, FDM simulation Pacific slab, seismic intensity

1. Introduction

It has long been recognized that cold subducted slabs with low attenuation (high-Q) can act as an efficient waveguide to transport high-frequency ($f > 1$ Hz) signals from intermediate to deep-focus earthquakes within the slab to the surface (Utsu, 1967[1]; Utsu and Okada, 1968[2]). In Japan, such a slab-induced waveguide effect is often noticed for large deep-focus earthquakes in the Pacific slab for depths down to about 600 km over a widespread large intensity area in the eastern fore-arc (Pacific Ocean) side of northern Japan. This anomalous intensity zone is associated with very lengthy high-frequency ground motions lasting several minutes (Furumura and Kennett, 2005[3]; 2008[4]). In the present study, we demonstrate an additional contribution to the slab waveguide effect for very deep earthquakes occurring in the Pacific slab ($h > 400$ km). Metastable olivine, below the phase transition to wadsleyite adds a wedge-like lowered wavespeed zone (metastable olivine wedge; MOW) in the core of the subducting slab, at depths between 400 and 560 km due to a delayed phase transformation from olivine to spinel in the cold slab (Kawakatsu and Yoshioka, 2001[5]; Vidale 1991 [6]; Yoshioka and Murakami, 2002[7]). We confirm the behavior by the FDM simulation of high-frequency wave propagation for different class of heterogeneous slab structure, and show that we are able to explain the distinctive seismograms for very deep events in the Pacific slab with a MOW. The numerical simulations demonstrate that lowered wave speed in the MOW in the deep Pacific slab enhances the slab guiding effect. The MOW induces focusing of seismic wave in the up-dip direction of the slab, thereby

producing larger and longer ground motions from very deep events in the Pacific slab.

2. Numerical simulation of slab guided wave

We conducted FDM simulation of seismic wave propagation in 3-D to examine the distribution of ground motion across Japan from the deep-focus earthquake beneath Vladivostok on 18 Feb. 2010. The volume used for the 3-D simulation for the deep Vladivostok event covers an area of 1728 km by 1400 km in the horizontal directions and 800 km in depth, with a grid discretization of 0.25 km. We have assumed a velocity anomaly of $dV_p = -5\%$ for P waves and $dV_s = -7\%$ for S waves and a maximum width of 100 km at the top of the MOW anomaly. The MOW is placed 5 km below the top of the Pacific slab for depths between 400 and 610 km. The present simulation is restricted to a maximum frequency of 3 Hz with a resolution of 4 grid-points per minimum S-wave length ($V_s=3.2$ km/s).

Figure 1 illustrates snapshots of seismic wave propagation from the deep Vladivostok event at 15 s, 75 s, and 240 s after earthquake initiation in the descending Pacific slab. The wavefield develops a widespread area of large intensity along the fore-arc side associated with the efficient slab-induced waveguide for higher-frequency waves. Figure 2 shows the peak ground acceleration (PGA) for horizontal ground motion derived from the simulation. For comparison purposes, simulation results without a MOW (Fig. 2a) and the pattern of observed PGA from the Hi-net stations of NIED are shown in Fig. 2c. For both simulation and observed ground motions, we apply a band-pass filter with pass band between $f=0.1$ and 3 Hz, so

that it allows us to compare the relative changes in the shaking intensity pattern between the observations and the simulations with and without a MOW.

The result of the FDM simulation using the heterogeneous Pacific slab model with a MOW produces an extended area with large PGA from Hokkaido to Tokyo along the Pacific Ocean side of Japan. The maximum ground acceleration in the pass band ($f=0.1$ to 3 Hz) is over 5 cm/s/s. The guiding of the higher frequencies through the scattering waveguide effect of the high-Q Pacific plate combined with the additional waveguide effect of the MOW produces an asymmetric PGA pattern between the fore-arc and back-arc sides across the volcanic front, and is quite similar to the observed features of the anomalous PGA pattern from the deep Vladivostok event

shown in Figure 11c. The simulated waveforms show elongated high-frequency P- and S-wave coda for stations on the fore-arc side, which is almost comparable to the observed Hi-net records for this deep event.

In contrast, the simulated PGA pattern shown in Figure 2a using the slab model without a MOW shows much weaker PGA over northern Japan, even though both scattering and high-Q waveguide effects are considered in this model. The amplitude of the PGA in Tohoku and Hokkaido is about 1/2 to 1/5 of that for the MOW model. Further, the duration of the P and S wave coda in the simulated waveform is much shorter than that of the MOW model and observation. The 3-D simulations confirm the significance of the enhanced waveguide effect from the MOW in the core of the slab.

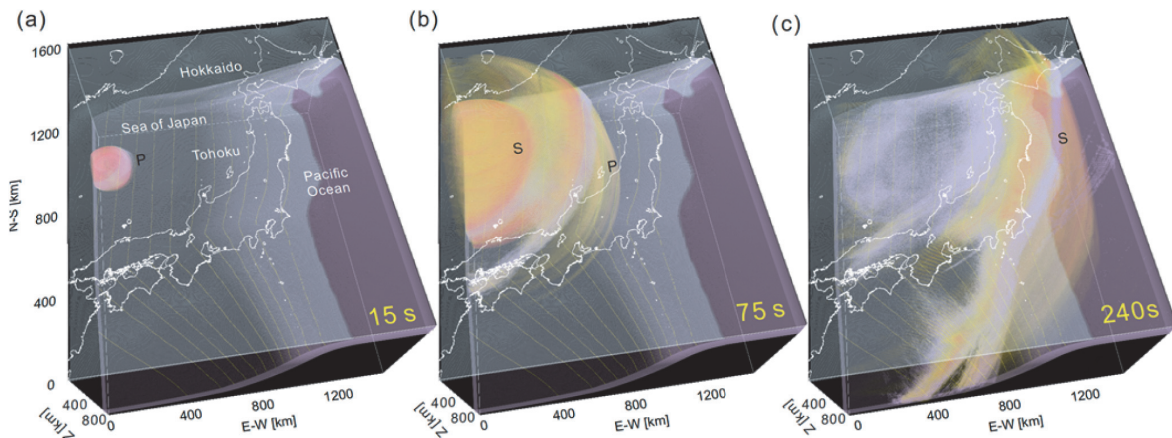


Fig. 1 Configuration of the Pacific slab and area of 3-D FDM simulation of seismic wave propagation for the deep Vladivostok earthquake, displaying snapshots of seismic wavefield at (a) 15 s, (b) 75 s, and (c) 240 s after event initiation. The P and S wavefronts are marked.

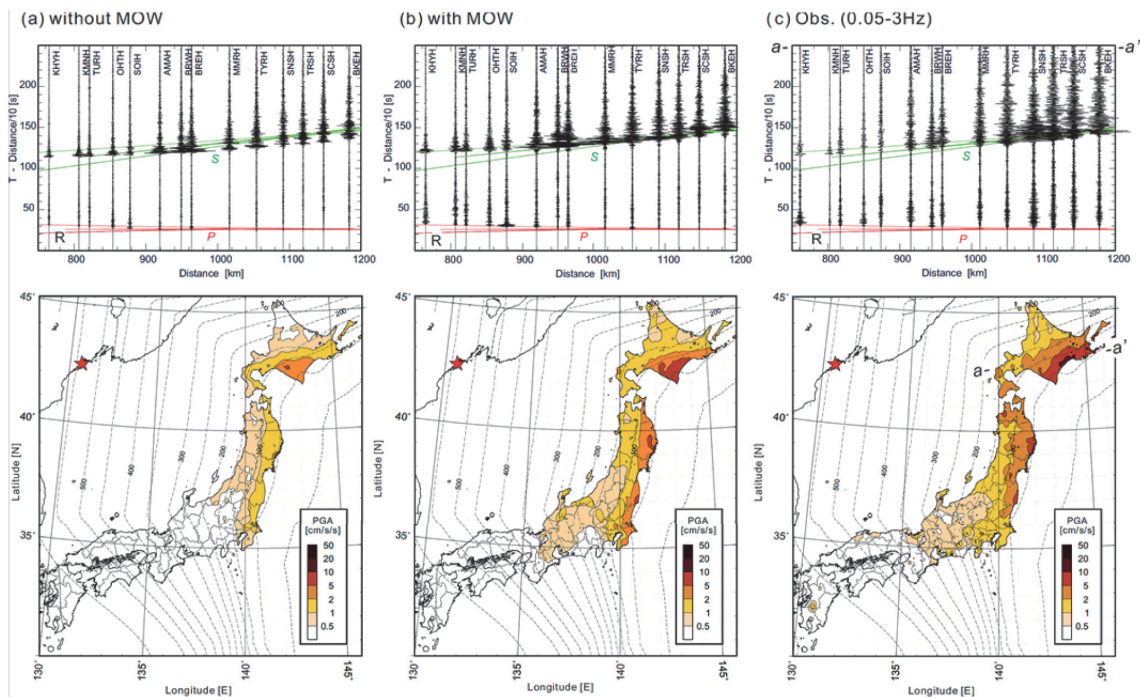


Fig. 2 Comparison of 3-D FDM simulation results for the deep-focus 2010 Vladivostok event with observed Hi-net seismograms along a profile through Hokkaido from west to east for the radial component of acceleration, and the ground motion patterns across Japan for peak ground acceleration (PGA): (a) Model without MOW; (b) model with MOW; (c) observations. A band-pass filter in the band 0.1-3 Hz is applied to all seismograms and to make the PGA map.

3. Conclusion

From the 3-D FDM simulations, we see that the presence of a MOW makes a considerable contribution to the guiding of high-frequency energy from the deepest seismic events in the Pacific slab, so that stronger amplitudes are injected into the scattering waveguide above the 400 km depth. Both effects are underpinned by the low attenuation (high-Q) in the subducting slab, which must be sustained in the MOW. The lowered wavespeed of the MOW in the core of the slab duct waves and counteract the tendency for the high-V subducting slab to shed energy into the lower wavespeed mantle outside the slab. The enhanced waves can then be carried to the surface in the stochastic waveguide formed by the heterogeneous slab internal structure of quasi-laminar feathers with elongation along the slab dip.

Acknowledgements

This study was conducted with support from Grants-in-Aid from the Japan Society of Promotion Sciences (No. 26400444). We acknowledge National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED) for the use of Hi-net and F-net records. The Hi-net and the F-net data used in this study are available at the NIED Hi-net page (<http://www.hinet.bosai.go.jp>). This work was published as Furumura et al. (2016) [8] in JGR Solid Earth.

Reference

- [1] Utsu, T. (1967), Anomalies in seismic wave velocity and attenuation associated with a deep earthquake zone (I), *J. Fac. Sci. Hokkaido Univ., Ser. VII*, 3, 1–25.
- [2] Utsu, T., and H. Okada (1968), Anomalies in seismic wave velocity and attenuation associated with a deep earthquake zone (II), *J. Fac. Sci. Hokkaido Univ., Ser. VII*, 3, 65–84.
- [3] Furumura, T., and B. L. N. Kennett (2005), Subduction zone guided waves and the heterogeneity structure of the subducted plate: Intensity anomalies in northern Japan, *J. Geophys. Res.*, 110, B10302, doi:10.1029/2004JB003486.
- [4] Furumura, T., and B. L. N. Kennett (2008), A scattering waveguide in the heterogeneous subducting plate, in *Earth Heterogeneity and Scattering Effects on Seismic Waves*, *Adv. Geophys.*, vol. 50, edited by R. Dmowska, pp. 195–217, Elsevier, Amsterdam, doi:10.1016/s0065-2687(08)00007-1.
- [5] Kawakatsu H., and S. Yoshioka (2011), Metastable olivine wedge and deep dry cold slab beneath southwest Japan, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 258, 219–227, doi:10.1016/j.epsl.2007.03.035.
- [6] Vidale J. (1991), Waveform effects of a metastable olivine tongue in subducting slabs, *Geophys. Res. Lett.*, 18, 2201–2204, doi:10.1029/1991GL025888.
- [7] Yoshioka S., and T. Murakami (2002), The effects of metastable olivine (α) wedge in subducted slabs on theoretical seismic waveforms of deep earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 107, B2, 2365, doi:10.1029/2001JB001223.
- [8] Furumura, T., B. L. N. Kennett, and S. Padhy (2016), Enhanced waveguide effect for deep-focus earthquakes in the subducting Pacific slab produced by a metastable olivine wedge, *J Geophys Res-Sol Ea*, 121(9), 6779–6796, doi:10.1002/2016jb013300.