

東北沖アウターライズ地震の際の継続時間の長い長周期地震動： 海水層が地震動に及ぼす影響

課題責任者

古村 孝志 東京大学 地震研究所

著者

野口 科子 地震予知総合研究振興会

前田 拓人 東京大学 地震研究所

古村 孝志 東京大学 地震研究所

東北地方の沖合の太平洋上で起こるアウターライズ地震の際に観測される150秒以上続く長周期地震動(周期13-14秒)の成因を、地震波動伝播シミュレーションにより評価した。観測記録を調べた結果、この長周期地震動は約100秒の時間差で到達する2つのレイリー波の波群からなる事が分かった。この現象はアウターライズ地震でのみ観測され、日本海溝より陸側で起こる同規模のプレート間地震などの際には観測されなかった。この現象の成因を探るため、3次元速度構造、地形および海水層を考慮した3次元差分法による波動伝播シミュレーションを行った。その結果、海水層により震央付近の深海底で生成する海洋レイリー波、これが長時間継続する長周期地震動の原因であることがわかった。ここでは、まず、高次モードの海洋レイリー波が海底斜面で基本モードのレイリー波に変換され、陸域でレイリー波群として観測される。次いで、基本モードの海洋レイリー波がより遅い速度で伝播し、同様に基本モードのレイリー波に変換され、2つ目の波群として観測されることで、長い波群が形成される。地下構造モデルの海水層を空気層に置き換え、海水がないものとしてシミュレーションを行うと、海洋レイリー波は生成されず、長周期地震動の継続時間は短くなった。この結果から、特に長周期の地震動評価にあたって海水層を考慮する事の重要性が強く示唆された。

キーワード：長周期地震動, アウターライズ地震, レイリー波, 地震波動伝播, シミュレーション地震学

1. はじめに

東北地方太平洋沖のアウターライズ地震の際に、150秒以上続く大振幅の長周期地震動が観測された。この現象はアウターライズ地震の際にのみ見られ、付近の同規模のプレート間地震では見られなかった。アウターライズ地震による被害では、陸上での揺れに比して大きな津波が主に考

えられてきたが、長周期地震動が長時間続くことは、石油タンクのスロッシングなどの被害に大きく影響する可能性がある。本研究では、東北沖のアウターライズ地震について、3次元差分法を用いた波動伝播シミュレーションを行い、長時間の長周期地震動の成因を解明する。

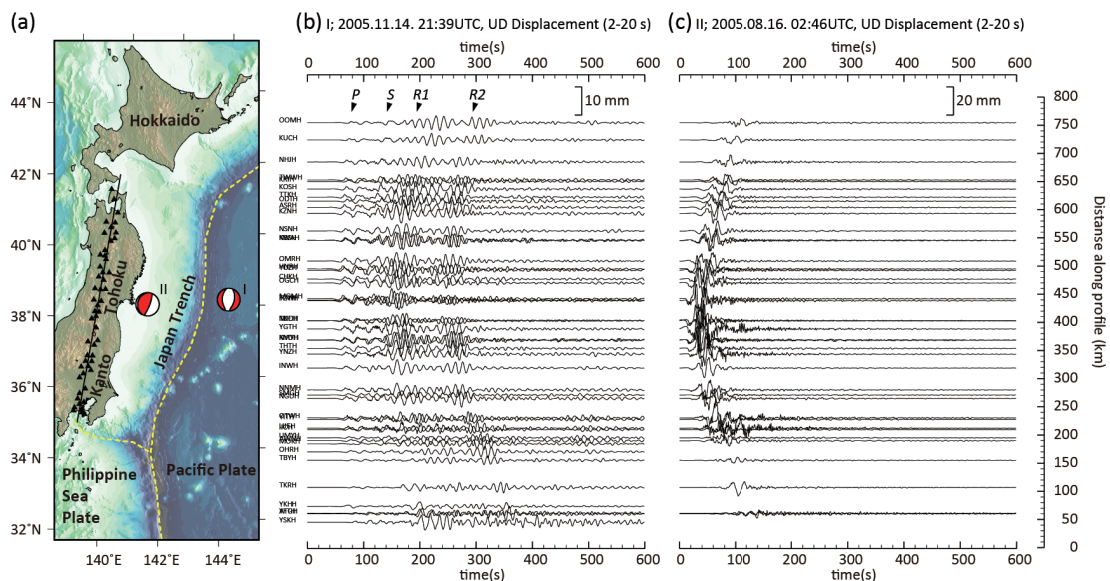


図1 (a) 関東から東北にかけてのプロファイルに沿った、(b) アウターライズ地震 ((a); I) および (c) プレート間地震 ((a); II) の際の Hi-net 観測点 ((a) 黒三角) での上下動変位 (周期2~20秒) の観測波形。P, S, R1, R2 はそれぞれ P 波、S 波と 2 つのレイリー波を示す。

2. 観測記録

2005年11月15日に起きた東北沖のアウターライズ地震 (Mw7, 深さ18km) の際に、東北地方から関東地方にかけての広い範囲で、150秒以上続く大振幅の長周期地震動が観測された (図1(b))。図1に示した広帯域かつ稠密な地震記録は、防災科研による微小地震観測網 Hi-net (Okada *et al.*, 2004[1]) の記録に、計器特性を取り除くデジタルフィルタ (Maeda *et al.*, 2011[2]) をかけることによって得た。このアウターライズ地震と同等の規模のプレート間地震 (2005年8月16日, Mw7.2, 深さ37km) の際には、長く続く長周期地震動は見られず、震動継続時間は短かった (図1(c))。アウターライズ地震の際に見られた長周期地震動は、約100秒の時間差で到達する2つの波群から構成されており、これら波群は共に周期13-14秒に卓越し西へ伝播するレイリー波であった。付近の他の地震についても同様に調べたところ、他のアウターライズ地震でも特徴的な2つの波群により震動継続時間が長くなる現象が見られたが、日本海溝より西側で起こるプレート間地震や上盤内の地震の際には見られなかった。このことから、震動継続時間を長くする2つの波群の成因は、海洋底 (東北沖太平洋では水深約6km) から海溝を横断して陸域に至る伝播経路にある可能性が考えられる。

3. シミュレーション

アウターライズ地震の際に見られる2つの波群の成因を解明するため、3次元差分法を用いた波動伝播シミュレーションを行う。使用する構造モデルでは実際の地形、水深を考慮する。堆積層および地殻・マントルの地下構造は JIVSM (Koketsu *et al.*, 2012[3], Maeda *et al.*, 2014[4]) の一部を補外したものを使用する。また、海水の影響を適切に考慮するため、地表・海底面に岡本・竹中 (2005)

[5], Nakamura *et al.* (2012)[6] による固体・流体境界条件を使用する。海水の物性値はP波速度1.5km/s、S波速度0km/s、密度1000kg/m³とする。固体の弾性波速度は最小で0.8km/sとし、解析対象周期は10秒以上とする。震源はダブルカップルで継続時間10秒の点震源とし、深さとメカニズムについては、2005年11月15日のアウターライズ地震についての Harvard CMT solution (Ekström *et al.*, 2012[7]) による値を使用する。なお、深さ18kmは海面からの深さとしたため、海底からは12kmとなる。手法の詳細は Noguchi *et al.* (2016)[8] にある。

シミュレーション結果のスナップショットを図2に示す。まず、震源からP波とS波が広がるが、その後から震央付近の深海底で顕著な相O1が広がる (図2(a), (b))。O1の伝播速度は3km/s弱である。O1相は海溝を横切ってすぐにR1相に変換し (図2(b))、陸域に伝播する (図2(c), (d))。R1相の伝播速度も3km/s程度である。一方、震央付近ではO1相の後からO2相が広がっていく (図2(c), (d))。O2相の伝播速度は非常に遅く、1km/s以下である。O2相も海溝を横切るとR2相に変換されるが (図2(c))、この時、伝播速度が劇的に変化する。R2相の伝播速度は約3km/sであり、R1相と同じである。R2相もR1相と同様に陸域全体に伝播する (図2(e))。このシミュレーションにおいて陸域で合成された波形を観測波形と比較すると、2つの後続波群とその特徴が極めてよく再現されている (図3(a), 図1(b))。

O1およびO2相の成因を探るため、モデル構造の海水層を空気層に置き換え、海水がないものとして同様にシミュレーションを行った結果、O1・O2相とR1・R2相は生成されず、震動継続時間も短くなった。P・S相の後には、約3km/sで伝播する分散性のレイリー波群 (R相) のみが続いた (図3(b))。また、プレート間地震に対して海水層

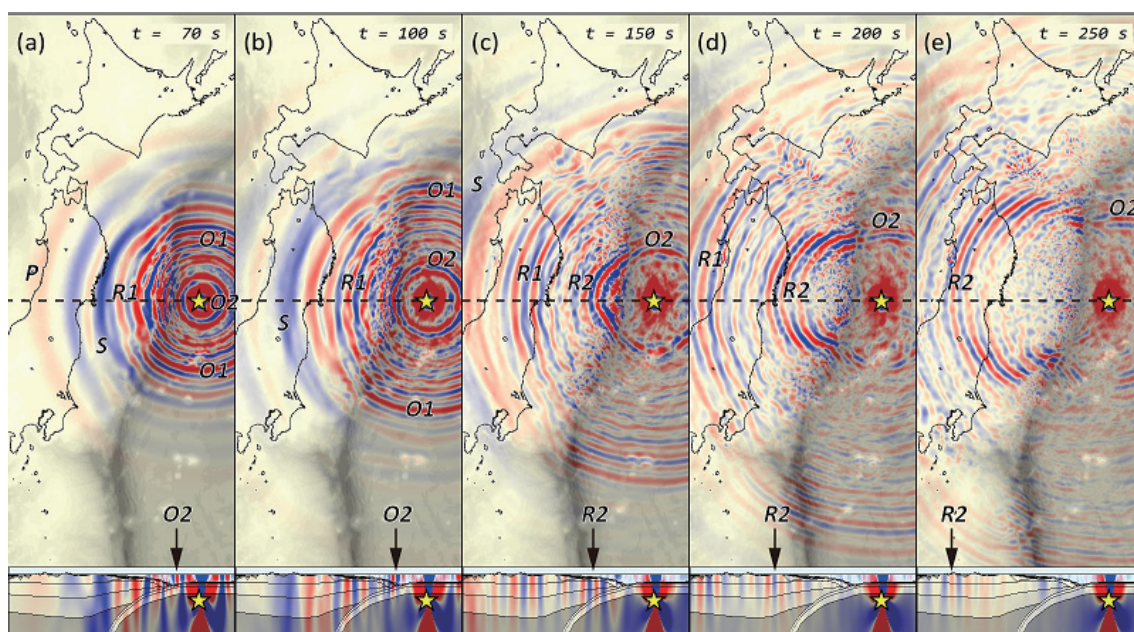


図2 海水層を考慮した東北沖アウターライズ地震の波動伝播シミュレーションで、地上および海底での上下動変位振幅のスナップショット。下段は震源を通るプロファイル (上段の点線) の断面図。赤が上向き変位、青が下向き変位、星は震源の位置を示す。P, S, O1, O2, R1, R2 はそれぞれP波、S波、2つの海洋レイリー波と2つのレイリー波を示す。

を想定してシミュレーションを行ったところ、O1・O2相は東側(海側)には生成され伝播したが西側には伝播せず、陸域でR1・R2相が観測される事はなかった(図3(c))。

4. 考察

海水層がある場合の基本モードのレイリー波の分散曲線を図4(a)に示す。海洋プレートの構造の上に6kmの海水層がある時、レイリー波の群速度は周期14秒付近で約

0.9km/sの最小値を示す。この値は、シミュレーションで見られたO2相と一致する。このことから、O2相は深海底で一種のエアリー相のようなメカニズムで発達したとみられる。この遅い速度は、このレイリー波のエネルギーの大部分が海水層中にあるためである(図4(c))。図4(a)を見ると、海水がある時の群速度の最小値は、3kmの場合は7~8秒など、水深が浅いほど短周期側に現れる。長周期側については、水深が浅くなると長周期の波動の

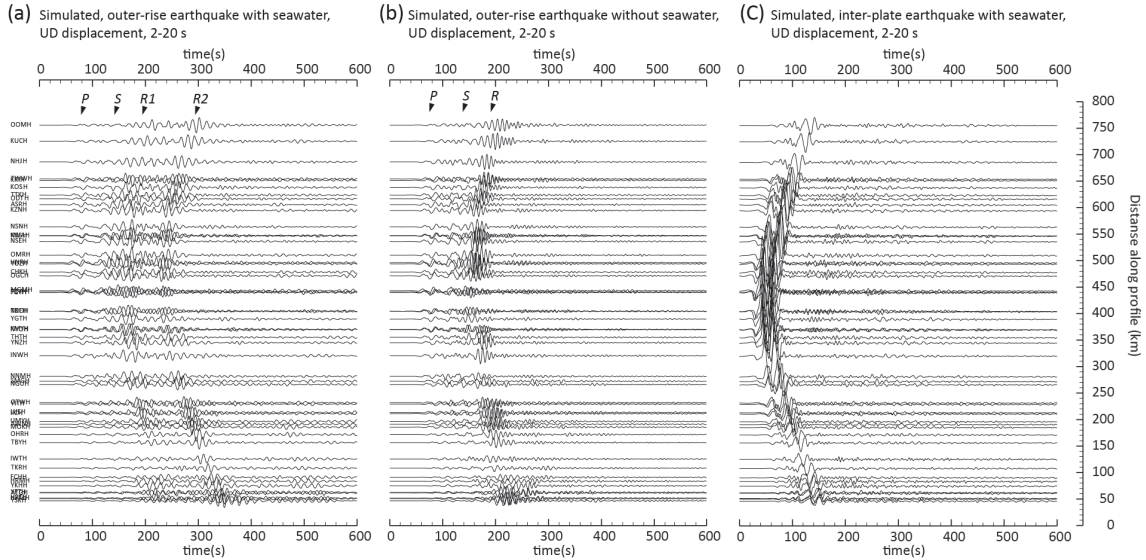


図3 波動伝播シミュレーションによる合成波形。波形出力点の位置は図1(a)と同じ。上下動変位波形(2~20秒)で全点の最大値で規格化されている。(a)アウターライズ地震で海水層を考慮した場合、(b)アウターライズ地震で海水層を考慮しない場合、(c)プレート間地震で海水層を考慮した場合。

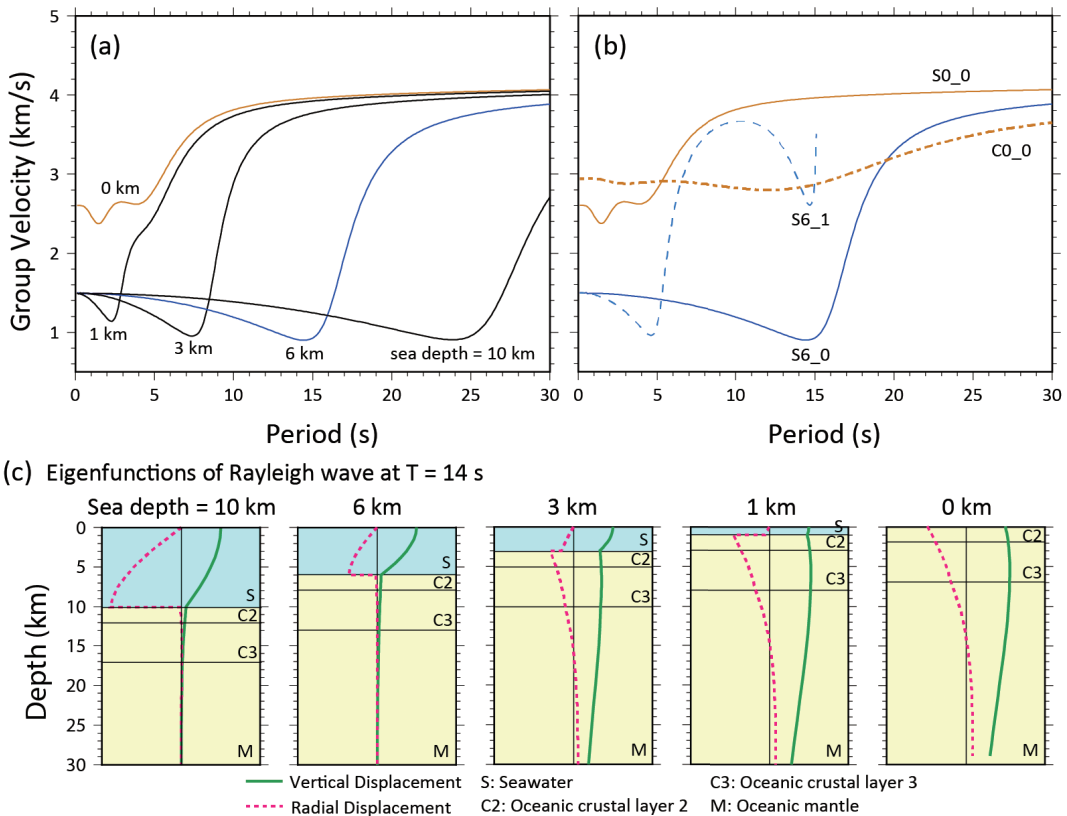


図4 海水層が存在する場合のレイリー波について、DISPER80 (Saito, 1988[10]) を用いて計算した (a) 基本モードの群速度の分散曲線、(b) S6_0 海洋の構造と6kmの海水層の場合の基本モード、S6_1 同じく1次高次モード、S0_0 海洋の構造で海水がない場合の基本モード、C0_0 大陸の構造で海水がない場合の基本モードの群速度の分散曲線、(c) 基本モードの周期14秒での固有関数。

エネルギーは海水層の中にとどまらずに地中に移り、陸域のレイリー波と同様となる(図4(c))。さらに、海水層がない場合には群速度の最小値は小さくならず、周期10秒以上では4km/s弱と海洋マントルのS波速度に近づく。これは海水層を考慮しないシミュレーションで、深海底であった部分を伝播するレイリー波に相当する。一方、海水層の有無によらず陸域(大陸の構造)を伝播する基本モードのレイリー波の分散曲線は図4(b)のC0_0として示してある。周期14秒付近での群速度は3km/s弱であり、R1・R2相および海水がないシミュレーションのR相に一致する。また、海洋プレートに水深6kmの場合の1次高次モードの群速度の分散曲線が図4(b)のS6_1に示してあるが、やはり周期14秒付近で約2.6km/sの極小値をもつ。この値はO1相に相当する。すなわち、O1相とO2相は海水がある場合のみ存在する海洋レイリー波であり、基本モードと高次モードの群速度の違いにより2つの波群に分かれ、結果として震動継続時間を長くしている、という解釈ができる。この基本モードと高次モードの海洋レイリー波については、大洋底に設置した海底地震計の微動記録を解析したTakeo *et al.* (2014)[9]で詳しく報告されている。

5. まとめ

東北地方太平洋沖のアウトライズ地震の際に観測される、長時間続く長周期地震動の成因を、3次元差分法による地震波動伝播シミュレーションにより解明した。アウトライズ地震の際には、共に大振幅の基本モードおよび1次高次モードの海洋レイリー波が生成されるが、これらの群速度が異なるため海底で2つの波群に分かれ、それぞれが海底斜面で陸域のレイリー波に変換されて陸地に到達するため、2つの波群が震動継続時間を長くしていた。海洋レイリー波は海水層がないと生成されないため、海水層を考慮しないシミュレーションではこの現象は再現されず、合成波形の震動継続時間はより短くなった。この結果は、海域の地震による地震動には海水層そのものが無視できない影響を及ぼしているという事を示している。この影響の及ぶ周期帯域は、水深に依存することが理論的解析により示唆された。このことから、特に長周期地震動については海水の影響を考慮することが重要であるといえる。長周期地震動による石油タンクのスロッシングなど、震動継続時間は振幅と共に被害を左右する要素と考えられるため、継続時間に影響する海洋レイリー波と海水層の存在は、地震動評価の際には適切に考慮されるべきである。

謝辞

本研究では、国立研究開発法人防災科学技術研究所が運用する高感度地震観測網Hi-netによる観測データを使用しています。本研究でのシミュレーションには、国立研究開発法人海洋研究開発機構が運用する地球シミュレータ、および東京大学地震研究所が運用するEIC計算機システムを使用しています。記して感謝いたします。

文献

- [1] T. Maeda, K. Obara, T. Furumura, and T. Saito, "Interference of long-period seismic wavefield observed by the dense Hi-net array in Japan," *J. Geophys. Res.*, vol.116, B10303, doi:10.1029/2011JB008464, 2011.
- [2] Y. Okada, K. Kasahara, S. Hori, K. Obara, S. Sekiguchi, H. Fujiwara, and A. Yamamoto, "Recent progress of seismic observation networks in Japan—Hi-net, F-net, K-NET and KiK-net," *Earth Planets Space*, vol.56, no.8, xv-xxviii, 2004.
- [3] K. Koketsu, H. Miyake, and H. Suzuki, "Japan integrated velocity structure model version 1," *Proc. 15th WCEE*, No. 1773, Lisbon, September 2012.
- [4] T. Maeda, T. Furumura, and K. Obara, "Scattering of teleseismic P-waves by the Japan Trench: A significant effect of reverberation in the seawater column," *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol.397, no.1, pp.101-110, doi:10.1016/j.epsl.2014.04.037, 2014.
- [5] 岡元太郎, 竹中博士, "速度・応力型差分法での固体・流体境界の扱いについて", *地震* 2, vol.57, pp.355-364, 2005.
- [6] T. Nakamura, H. Takenaka, T. Okamoto, and Y. Kaneda, "FDM Simulation of seismic-wave propagation for an aftershock of the 2009 Suruga Bay Earthquake: Effects of ocean-bottom topography and seawater layer", *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol.102, no.6, pp.2420-2435, doi: 10.1785/0120110356, 2012.
- [7] G. Ekström, M. Nettles, and A.M. Dziewoński, "The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes", *Phys. Earth. Planet. Inter.*, vol.200-201, pp.1-9, ISSN 0031-9201, doi:10.1016/j.pepi.2012.04.002,2012.
- [8] S. Noguchi, T. Maeda, and T. Furumura, "Ocean-influenced Rayleigh waves from outer-rise earthquakes and their effects on durations of long-period ground motion," *Geophys. J. Int.*, vol.205, no.2, pp.1099-1107, doi: 10.1093/gji/ggw074, 2016.
- [9] A. Takeo, D. W. Forsyth, D. S. Weeraratne, and K. Nishida, "Estimation of azimuthal anisotropy in the NW Pacific from seismic ambient noise in seafloor records," *Geophys. J. Int.*, vol. 199, no.1, pp.11-22, doi: 10.1093/gji/ggu240, 2014.
- [10] M. Saito, "DISPER80: a subroutine package for the calculation of seismic normal-mode solutions", in *Seismological Algorithms*, pp. 293-319, ed. Doornbos, D.J., Academic Press, 1988.

Long-duration Long-period Ground Motion Developed by Seawater during Off-Tohoku Outer-rise Earthquakes

Project Representative

Takashi Furumura Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Authors

Shinako Noguchi Association for the Development of Earthquake Prediction

Takuto Maeda Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Takashi Furumura Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

We investigate the cause of anomalously long lasting (>150 s) long-period ground motion ($T=13\sim 14$ s) observed during outer-rise earthquakes occurring off-Tohoku by means of seismic wave propagation simulation. The observed long-period ground motion consists of two Rayleigh wave packets arriving with a time interval of ~ 100 s. The two packets do not appear during interplate earthquakes. We conduct the simulation for wave propagation during the outer-rise earthquake by means of 3D finite difference method using 3D model structure considering sediments, subducting plate, topography and seawater. It is shown that ocean-influenced Rayleigh waves are generated around the epicenter located deep sea area. The higher mode oceanic Rayleigh wave is converted to the fundamental mode Rayleigh wave at seafloor slope and appears as the first packet at land. The fundamental mode oceanic Rayleigh wave propagates much slowly through deep sea, converted similarly and appears delayed as a second packet at land. This phenomenon does not occur in the simulation ignoring seawater because oceanic Rayleigh wave is not generated. This result indicates that we should take seawater into account appropriately in the estimation of long-period ground motion during earthquakes in sea area.

Keywords: Long-period ground motion, Outer-rise earthquake, Computational seismology, Rayleigh wave, Seismic wave propagation

1. Introduction

We found an anomalously long-lasting long-period ground motion during outer-rise earthquakes occurring off-Tohoku. For ground motion, not only the amplitude but the duration is important because it could influence on the damage of large structures, the sloshing of oil tank for example. We investigate the observed long-duration long-period ground motion in detail

and reveal the mechanism of the phenomenon by means of ground motion simulation.

2. Observation

We found the long-duration long-period ground motion with large amplitude during M7 outer-rise earthquake occurred November 15th, 2005 (Fig. 1(b)). We investigated broad-band

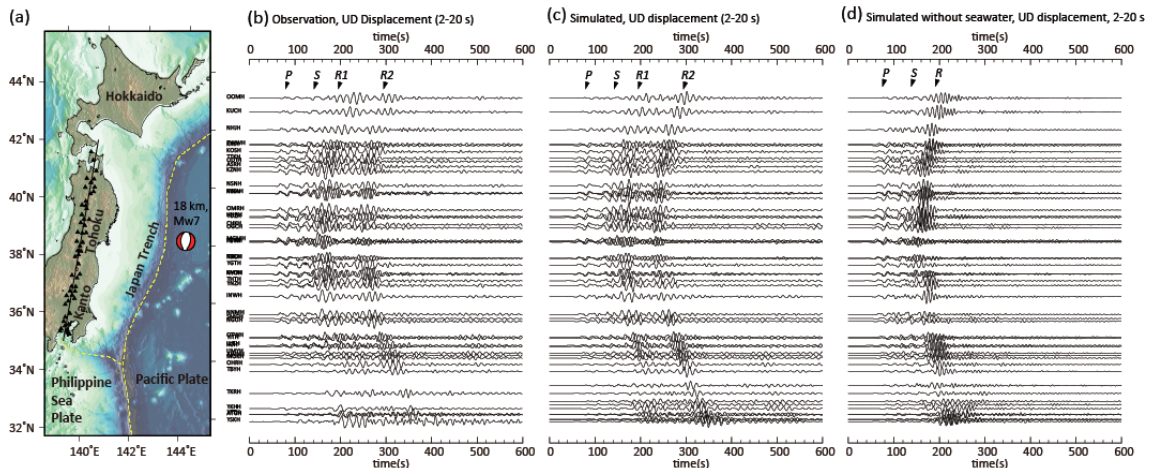


Fig. 1 Vertical component displacement seismograms: (b) observed during the outer-rise earthquake shown in (a), (c) simulated considering seawater and (d) simulated without seawater along a profile (straight black line in (a)), with Hi-net stations indicated by black triangles. All waveforms are normalized by the maximum of all waves during each event. P, S, R1 and R2 show P-wave, S-wave and Rayleigh wave packets respectively.

wave field using dense pseudo broad-band records which are derived by applying a time-domain digital filter (Maeda *et al.*, 2011[1]) on the seismic records by Hi-net, short-period high-sensitivity observation network operated by NIED (Okada *et al.*, 2004[2]). It is clearly shown that the long-lasting ground motion consists of two wave packets (R1 and R2 in Fig. 1(b)) in the record section. The two packets are dominant at a period of 13-14 s and show characteristics as a retrograde Rayleigh wave propagating westward. We checked other earthquakes occurring around off-Tohoku and found that such typical wave packets are observed during outer-rise earthquakes only, while they do not appear during the other earthquakes occurring at the west side of Japan Trench. It indicates that the long-duration due to typical two packets could be attributed to the propagation path including deep sea (~6 km depth), trench and seafloor slope.

3. Simulation

We conduct the simulation for wave propagation during outer-rise earthquake by means of 3D finite-difference method using realistic model structure including sediments, subducting plate, topography, bathymetry and seawater. For subsurface structure, we use the model structure derived by extending JIVSM model (Koketsu *et al.*, 2012[3], Maeda *et al.*, 2014[4]). We apply a solid-liquid boundary condition (Nakamura *et al.*, 2012[5]) to take the seawater into account in the simulation. Further details are reported in Noguchi *et al.* (2016)[6].

The result is shown in Fig. 2. We can see that the oceanic Rayleigh waves (O1 and O2 in Fig. 2) are generated in deep sea area following P and S wave. The O1 phase propagates at ~3 km/s in deep sea (Fig. 2(a), (b)), converted to R1 at seafloor

slope between the trench and land (Fig. 2(b)) and spreads over Tohoku and Kanto region (Fig. 2(c), (d)). Following O1 phase, the O2 phase propagates slowly (<1 km/s) in deep sea area (Fig. 2(a)~(e)) and converted into R2 phase similar to the O1 (Fig. 2(c), (d)). The conversion can be recognized clearly seeing the propagation speed increasing obviously as the O2 crosses the trench. This simulation reproduces the observation at land very well (Fig. 1(c)). We confirmed that the O1 phase is the first higher mode of oceanic Rayleigh wave, which is the Rayleigh wave which exists in the case with liquid layer. Similarly, the O2 phase is the fundamental mode of oceanic Rayleigh wave. The slow propagation speed of O1 phase is confirmed by dispersion curve analysis considering 6 km deep water layer. Such oceanic Rayleigh waves are also reported in the analysis of ambient noise recorded by ocean bottom seismometers by Takeo *et al.* (2014)[7].

We also conducted another simulation in the case without seawater replacing seawater layer with air layer. The two Rayleigh wave packets and oceanic Rayleigh waves did not appear (Fig. 1(d)). In the case of interplate earthquake, the oceanic Rayleigh waves were also generated, but it propagated toward the Pacific only and did not reach at land. It would be due to shallower bathymetry of epicenter and the geometry of seafloor slope.

4. Conclusions

We revealed the cause of long-duration long-period ground motion observed during outer-rise earthquakes by means of the simulation for wave propagation using 3D realistic model structure including seawater. The simulation result represents

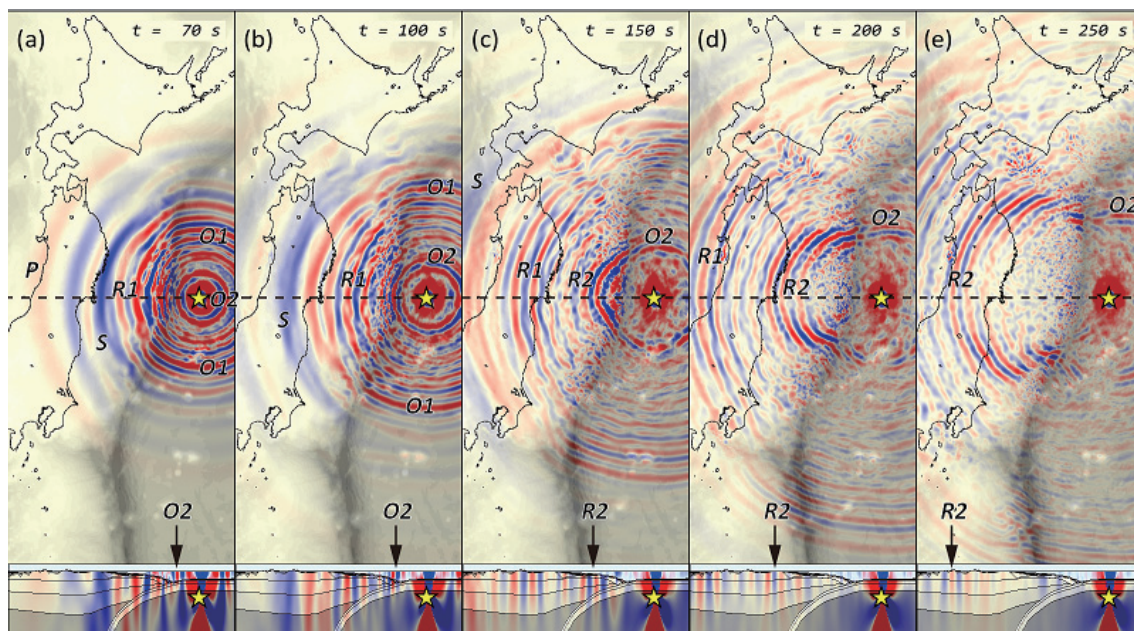


Fig. 2 Snapshots of vertical component displacement motions at the surface and seafloor taken from FDM simulation with a model that includes water. Lower panels show cross sections along the dashed line in the upper panels. Up- and downgoing motions are shown in red and blue, respectively. The yellow star in each plot shows the hypocenter. P, S, O1, O2, R1 and R2 show P-wave, S-wave, oceanic Rayleigh waves and Rayleigh wave packets respectively.

clearly the mechanism of the long-period ground motion; the fundamental mode and first higher mode of oceanic Rayleigh waves which propagate with different speed are separated in deep sea and appear as two Rayleigh wave packets at land lengthening the duration of long-period ground motion. This phenomenon could not be represented by simulation without seawater. The duration of long-period ground motion is also important to estimate the damage on huge structures, the sloshing of oil tanks for example. Our result shows that considering seawater and realistic structure in the estimation of ground motion and damage brought by earthquakes in sea area is quite important.

Acknowledgements

We used waveform data from the Hi-net seismic network operated by the National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED), Japan. The numerical simulations presented in this study were performed by the Earth Simulator managed by the Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), and the EIC computer system operated by the Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, Japan.

References

- [1] T. Maeda, K. Obara, T. Furumura, and T. Saito, “Interference of long-period seismic wavefield observed by the dense Hi-net array in Japan,” *J. Geophys. Res.*, vol.116, B10303, doi:10.1029/2011JB008464, 2011.
- [2] Y. Okada, K. Kasahara, S. Hori, K. Obara, S. Sekiguchi, H. Fujiwara, and A. Yamamoto, “Recent progress of seismic observation networks in Japan-Hi-net, F-net, K-NET and KiK-net,” *Earth Planets Space*, vol.56, no.8, xv-xxviii, 2004.
- [3] K. Koketsu, H. Miyake, and H. Suzuki, “Japan integrated velocity structure model version 1,” *Proc. 15th WCEE*, No. 1773, Lisbon, September 2012.
- [4] T. Maeda, T. Furumura, and K. Obara, “Scattering of teleseismic P-waves by the Japan Trench: A significant effect of reverberation in the seawater column,” *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol.397, , no.1, pp.101-110, doi:10.1016/j.epsl.2014.04.037, 2014.
- [5] T. Nakamura, H. Takenaka, T. Okamoto, and Y. Kaneda, “FDM Simulation of seismic-wave propagation for an aftershock of the 2009 Suruga Bay Earthquake: Effects of ocean-bottom topography and seawater layer”, *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol.102, no.6, pp.2420-2435, doi: 10.1785/0120110356, 2012.
- [6] S. Noguchi, T. Maeda, and T. Furumura, “Ocean-influenced Rayleigh waves from outer-rise earthquakes and their effects on durations of long-period ground motion,” *Geophys. J. Int.*, vol.205, no.2, pp.1099-1107, doi: 10.1093/gji/ggw074, 2016.
- [7] A. Takeo, D. W. Forsyth, D. S. Weeraratne, and K. Nishida, “Estimation of azimuthal anisotropy in the NW Pacific from seismic ambient noise in seafloor records,” *Geophys. J. Int.*, vol. 199, no.1, pp.11-22, doi: 10.1093/gji/ggu240, 2014.

