

令和 4 年 5 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2021

課題番号：17K01322

研究課題名（和文）M9超巨大地震の長周期地震動一観測・計算融合の波動物理に基づく統合モデル構築

研究課題名（英文）Long-period ground motion of M9 megathrust earthquake: Construction of integrated model based on wave physics and fusion of observation and computation

研究代表者

古村 孝志 (Furumura, Takashi)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：80241404

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：M9規模の超巨大地震の長周期地震動のリスク評価のために、2011年東北地方太平洋沖地震の長周期地震動の生成過程を、強震観測データ解析と地震波伝播シミュレーションにから評価した。東北沖の地震では内陸地震や南海トラフの地震に対して関東平野の長周期地震動レベルが小さくなること、その原因が東北沖の地震のS波の放射特性と関東平野の3次元基盤構造の方位的特徴によることを確認した。2008年オホーツク海深発地震や2015年小笠原諸島西方沖地震のように、M8規模の深発巨大地震においても長周期地震動が生成すること、これが地表に臨界角で入射したS波から生成される大振幅のsP変換とsS反射波によることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、南海トラフ沿いや日本海溝沿いで発生が心配されるM9規模の海溝型の超巨大地震や、太平洋プレート内で発生するM8規模の巨大深発地震による長周期地震動の生成過程が明らかとなり、そして地殻・マントル不均質構造を組み込んだ地震波伝播シミュレーションによる予測手法が確立されたことで、M9超巨大地震のリスク評価と災害軽減に大きく貢献することが期待できる。

研究成果の概要（英文）：In order to evaluate the risk of long-period ground motions of M9-scale large earthquakes, the generation process of long-period ground motions of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake was evaluated from strong motion observation data analysis and seismic wave propagation simulation. During the off Tohoku earthquake, the long-period ground motion level of the Kanto basin becomes smaller than the inland earthquake and the Nankai Trough earthquake, and the cause is the S-wave radiation characteristics of the off Tohoku earthquake and the directional characteristics of the three-dimensional basement structure of the Kanto basin. It was confirmed that Long-period ground motion can be also generated even in deep-focus M8-class earthquakes such as the 2008 Okhotsk Sea Deep Earthquake and the 2015 Ogasawara Earthquake, which are generated from S waves incident on the ground surface at a critical angle, and sP conversion and sS reflected wave generated at large distances.

研究分野：地震学

キーワード：長周期地震動 巨大地震 深発地震 2011年東北地方太平洋沖地震 南海トラフ巨大地震

1. 研究開始当初の背景

大地震の震源から放射される長周期地震動は、遠く離れた平野に伝播・増幅することで、超高層ビルや大型石油タンクと共振して大きく長時間揺ることで被害を起こす恐れがある。将来の南海トラフ地震や日本海溝～千島海溝沿いの大地震の発生が心配される中、M8～9規模の超巨大地震による長周期地震動の発生・伝播・増幅過程の詳細な理解と予測技術の確立は、長大構造物を多数有する近年の都市防災における重要課題である。

2. 研究の目的

長周期地震動は、地震の規模(M)とともにレベルが増大すると考えられる。ところが、2011年東北地方太平洋沖地震(M9)の際に、関東平野で観測された周期6秒前後の長周期地震動の応答レベルは、2003年十勝沖地震(M8)において北海道や東北で観測された応答レベルを下回った(図1)。超巨大地震による長周期地震動のリスク評価に向け、相対的に小さかった長周期地震動が東北地方太平洋沖地震固有の特徴か、あるいは南海トラフ沿いの巨大地震など、他地域のM9地震でも成立する一般的な現象か明確化する必要がある。長周期地震動は、表面波を強く生成させる、浅い内陸地震やプレート境界地震で強く生成し、震源が深いプレート内(スラブ内)地震では生成が小さいことがこれまで知られてきた。ところが、近年、深さ600kmを超える太平洋プレート内のM8級の巨大地震において、日本列島で長周期地震動が観測される事例が報告され、さらに数千キロ離れた遠地での長周期地震動の被害が報告されるようになった。本研究では、こうした巨大深発地震による長周期地震動の生成メカニズムについても観測データ解析と地震波伝播シミュレーションから検討した。

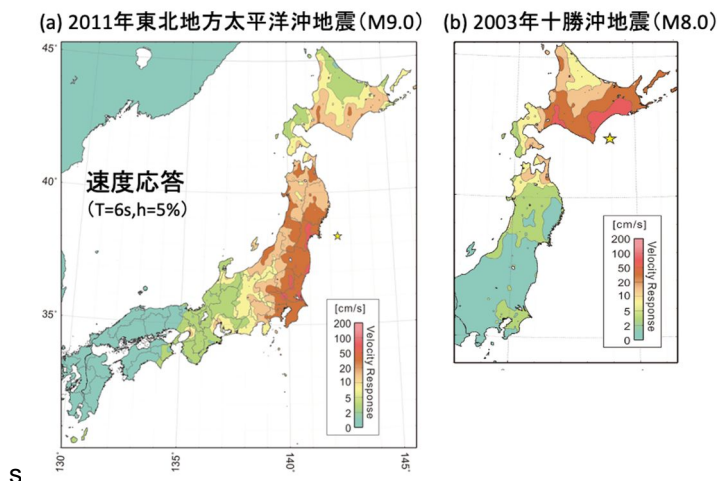


図1 M8/M9地震における長周期地震動の生成レベル(速度応答スペクトル、固有周期6秒、減衰定数h=5%)の比較(a)2011年東北地方太平洋沖地震(M9)、(b)2003年十勝沖地震(M8)。

3. 研究の方法

2011年東北地方太平洋沖地震の際に関東平野で観測された長周期地震動のレベルが地震規模(M9)の割に小さかった原因を、関東平野周辺で発生したM7規模の強震波形解析と、関東平野の3次元地下構造モデルを用いた地震波伝播シミュレーションから評価した。そして、異なる震源モデルを用いた計算や、計算結果のアレイ解析により、関東平野における長周期地震動増幅の方位性の生成原因を、1)震源からの地震波放射特性、2)非対称な堆積平野の基盤形状における地震波の増幅特性、の2つの観点から検討した。また、2015年小笠原諸島西方沖地震(Mj8.5;深さ681km)の際に、数百km以上離れた関東～東北地方で発生した長周期地震動の特徴とその成因、及び2018年オホーツク海深発地震(Mj8.3,深さ598km)において、数千km以上離れたモスクワやカザフスタンの高層ビルに被害を起こした長周期地震動の成因を広帯域地震観測データ解析と地震波伝播シミュレーションに基づき検討した。

4. 研究成果

(1) 関東平野における長周期地震動生成の方位変動

関東平野における長周期地震動の生成・増幅には強い方位依存性があることがこれまで指摘されてきた(例えば、植竹、2012)。関東の北側で起きた2004年新潟県中越(Mw6.6)や南西側で起きた紀伊半島南東沖地震(Mw7.4)に比べ、福島県沖や宮城県沖など、東北側で発生した地震では、都心で卓説する周期6～8秒程度の長周期地震動が観測されず、速度応答スペクトル

は1～10秒でフラットになる特徴がある(古村, 2014; Furumura, 2014)。同様の長周期地震動生成の方位依存性は、濃尾平野(平井・福和, 2016)でも指摘されている。

その原因として、まず震源放射特性の影響を考えるために、2004年新潟県中越地震の震源断層モデルに対して、断層の走行を変えた別の震源モデルを用いて3次元差分法(Maeda et al., 2017)とJIVSM地下構造モデル(Koketsu et al., 2012)による地震波動伝播シミュレーションを実施した、都心部での長周期地震動(6～8秒)の生成と速度応答スペクトルのレベルを比較した(図2)。複数の震源モデルによる計算結果の比較から、2004年新潟県中越地震の断層走行(北西-南東)において関東平野へのRayleigh波の放射が強くなることで、長周期地震動レベルが最大となることがわかった。一方、2011年福島県浜通りの地震の地震波伝播シミュレーションでは、関東平野へのRayleigh波の放射が弱く長周期地震動の生成レベルが低くなることがわかった。また、新潟県中越地震の方位の地震では、断層走行が数十度変化しても都心の長周期地震動のレベルの変化は小さいことが分かった。これは、群馬から高崎にかけての基盤の深い溝構造により、表面波が吸い込まれるように都心方向に誘導されるためである。一方、福島県浜通りの地震では関東までの伝播経路がほぼ均質構造であるため、長周期地震動の生成レベルは震源メカニズムとRayleigh波の放射特性の影響を受け、メカニズムにより数倍の変動が生まれることが確認できた(向井・他, 2018)。

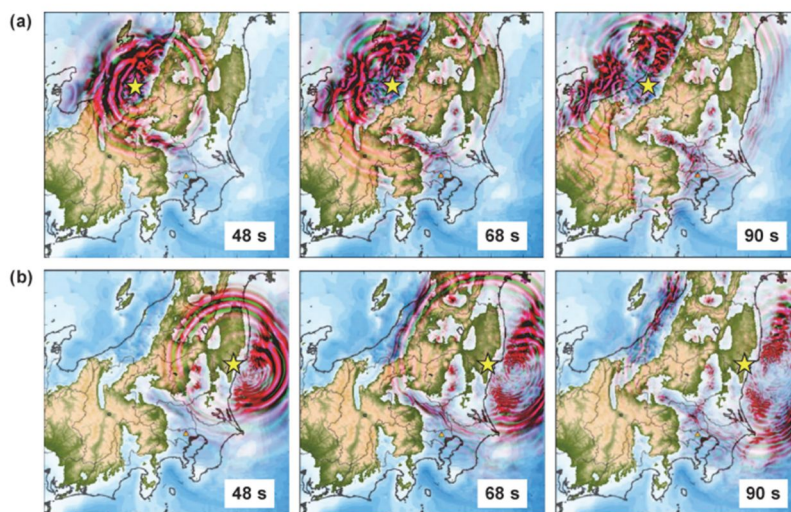


図2 (a) 2004年新潟県中越地震、及び(b)2011年福島県浜通りの地震の地震波伝播シミュレーション。地震発生から48, 68, 90秒後の地動速度、背景は、基盤岩($V_s=2.4$ km/s)の地形を表す。

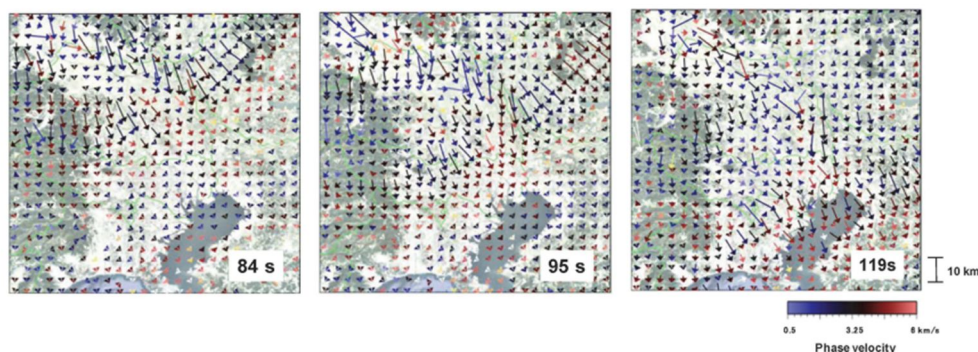


図3 2004年新潟県中越地震の地震波伝播シミュレーション結果のWave Gradiometry解析から得られた地震波伝播方向と位相速度の分布(地震発生から84, 95, 119秒後)。

次に、関東平野の3次元堆積層構造における、入射方位の違いによる長周期地震動の伝播・増幅特性を調べるために、新潟県中越地震と福島県浜通りの地震のシミュレーション結果をもとに、Particle motionとWave Gradiometry解析(Langston, 2007; Maeda, 2016)に基づき、平野内のRayleigh波の伝播方向と位相速度の時空間変動を調査した(図3)。その結果、新潟県中越地震では、関東平野の北東の熊谷～高崎周辺の深い溝状構造に表面波が焦点を結ぶように集まり、これが遅い伝播速度で都心に向かって溝構造に沿って誘導されるように伝播するとともに、関東の東側の山地を高速に伝わり都心方向に向けて屈折する別の表面波とが合流することで、振幅が大きく長い波群を持つ特徴的な表面波の生成過程が確認できた。一方、福島県浜通りの地震では、表面波が筑波山周辺の緩い傾斜を持つ基盤を通過して関東平野

に入射する際に、表面波の波面が Defocus するように広がることで、大きく減衰することが確認できた。この結果、都心の長周期地震動のレベルは小さく、揺れの継続時間も短くなることがわかった（向井・他、2018）。

以上より、関東平野における長周期地震動増幅の方位的特徴は、1) 震源から平野に向けた表面波の放射特性と、2) 平野の3次元堆積層構造における表面波の伝播・増幅特性、の相乗効果によるものと結論づけられた。新潟県中越地震の震源モデル（Hikima and Koketsu, 2005）を福島県東部に置いた、仮想地震のシミュレーションと新潟中越地震のシミュレーション結果の比較から、東北沖の地震では都心部（新宿地点）の長周期地震動のレベルは弱く、揺れの継続時間が短くなることが確認できた（図4）。

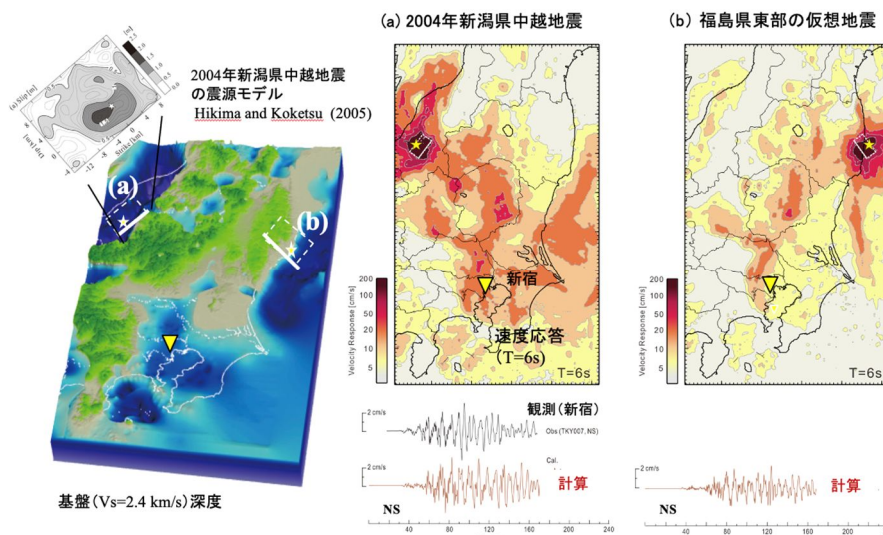


図4 (a) 2004年新潟県中越地震の地震波伝播シミュレーションによる、長周期地震動の速度応答スペクトルの空間分布（周期6秒、 $h=5\%$ ）と新宿地点での計算波形（赤）、及びK-NET新宿観測点での観測波形（黒）との比較。(b)新潟県中越地震の震源モデルを福島県沖東部に置いた仮想地震での長周期地震動の計算結果。

(2) 南海トラフ仮想 M9 地震による長周期地震動

東北沖の地震の震源メカニズムによる関東平野方向への表面波の放射特性、及び関東平野の3次元基盤（堆積層）構造の特性により、東北沖の巨大地震では関東平野の長周期地震動レベルが高まらない特徴に対し、南海トラフ沿いで起きる地震では、フィリピン海プレートの緩い傾斜角（浅い震源）や付加体での表面波の強い増幅・ガイド効果、そして関東平野の南西側の急峻な基盤面変化に伴う表面波の強い増幅とマルチパス効果により、長周期地震動レベルが高くなる可能性が高い。

将来、南海トラフ沿いで心配される M9 級の超巨大地震による長周期地震動を評価するために、2011年東北地方太平洋沖地震の震源モデル（Lee et al., 2013）を南海トラフ沿いに置いた、「仮想南海トラフ M9 地震」の長周期地震動を3次元差分法計算（OpenSWPC; Maeda et al., 2017）に基づき評価した。東北地方太平洋沖地震と仮想南海トラフ地震の断層面からの断層最短距離がほぼ等しい、K-NET 新宿地点での計算波形を比較したところ、仮想南海トラフ M9 地震による周期6～10秒の速度応答スペクトルのレベルが、東北地方太平洋沖地震の2倍を超えることがわかった。また、南海トラフに近い大阪地点（KiK-net 此花観測点）では、東北地方太平洋沖地震の際の応答レベルの5倍程度以上の長周期地震動が発生する可能性が分かった。断層面積の大きく破壊伝播感の長い巨大地震では、震源（破壊開始点）と破壊伝播方向の違いによるディレクティビティ効果が地震動に与える影響が大きいと考えられる。南海トラフ沿いの超巨大地震の長周期地震動の予測では、地震シナリオの違いによる震幅と継続時間の大きな変動にも注意が必要である。

(3) 巨大深発地震による長周期地震動の生成

2015年5月30日に伊豆・小笠原海溝に沈み込む太平洋スラブ深部で発生した小笠原諸島西方沖の地震（Mj8.1; 682 km）では、小笠原と神奈川で最大震度5強を観測したほか47都道府県が有感となった。また、関東では長周期地震動震度階2が、そして近畿から東北にかけて階級1が観測された。図5に示すF-net広帯域地震計記録の速度波形NS成分のレコードセクションには、震央距離1000 km以遠（東北地方より北側）の観測点には、異常震域を作る短周期（ <0.5 秒）のプレートガイド波に先行して、やや長周期（1～2秒）の大振幅の波群が認められ、これが大きな地動と東北での長周期地震動の原因であることが確認できる。この長周期地

震動の波群は速い見かけ速度（約 6.5 km/s）を持つことから、深発地震から臨界角で地表に入射した S 波より生成した sP 変換波であると判断できた。大振幅の sP 変換波の生成は東北～北海道にかけての震央距離 1500 km まで継続し、これが地殻内を広角反射により伝播（sPmP 波）する様子が確認できた。伝播に伴い、sPmP 波と入射 S 波が干渉（カップリング）を起こした結果、sPL 波（Shear-coupled PL wave）が生成し、これが遠地での大きな長周期地震動の成因であることがわかった（Furumura and Kennett, 2019）。深発地震では表面波の励起が弱く、一般に長周期地震動は発生しない。しかし、巨大深発地震では、震央距離数百 km 以遠において、S 波が sPmP 波や sPL 波による長周期地震動を生成することに注意が必要である。

また、2013 年 5 月 24 日のオホーツク海深発地震（610 km, Mw8.3）では、上部 / 下部マントル境界（深さ 660 km）付近の深さの震源から放射された S 波の 660 km 境界での反射・屈折波の重なり合い（caustics）、地表での sP 変換波と sPL 波、そして地表で反射した sS 反射波が震央距離 1000 km 以上に大きな地動と長周期地震動を生成したことが F-net 広帯域地震波形解析から確認された（Kennett and Furumura, 2019; Furumura and Kennett, 2019）。この深発地震の際に、震央距離 4000～8000 km のカザフスタンやモスクワが有感となり、高層ビルからの避難騒ぎが起きたほか天井材の落下等の被害が報告されている。IRIS 広帯域記録の解析と地震波伝播シミュレーションから、遠地の大きな揺れの原因が、地球深部の外殻・内殻境界からの反射 ScS 波と、地表で反射を繰り返しながら伝播する sS 波と sSS 波により生じた周期 3～10 秒の長周期地震動であったことが確認された（図 6）。このように、巨大深発地震の際には、数百～数千キロ離れた遠地で長周期地震動が発生することにも注意が必要である。

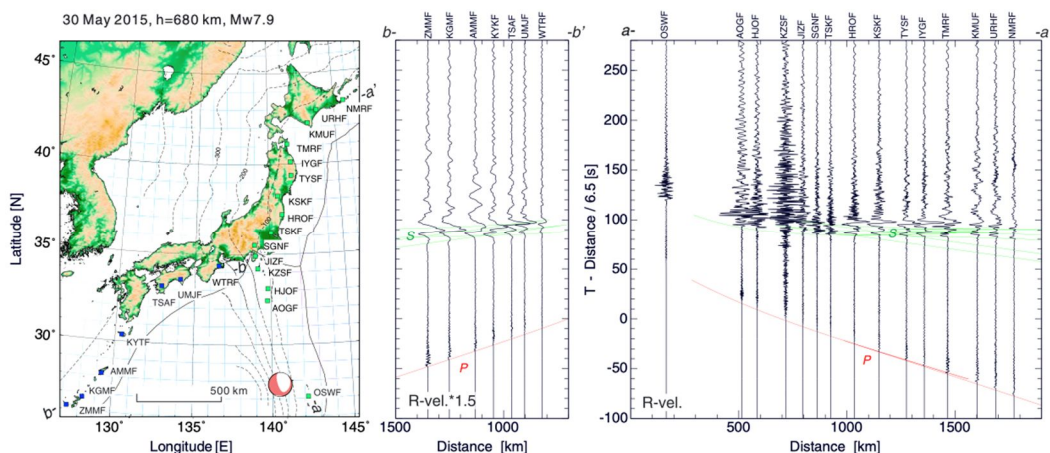


図 5 2015 年小笠原諸島西方沖地震による日本列島の揺れの特徴。F-net 広帯域速度波形 Radial 成分。観測点の位置は地図中の青と緑四角で示す。

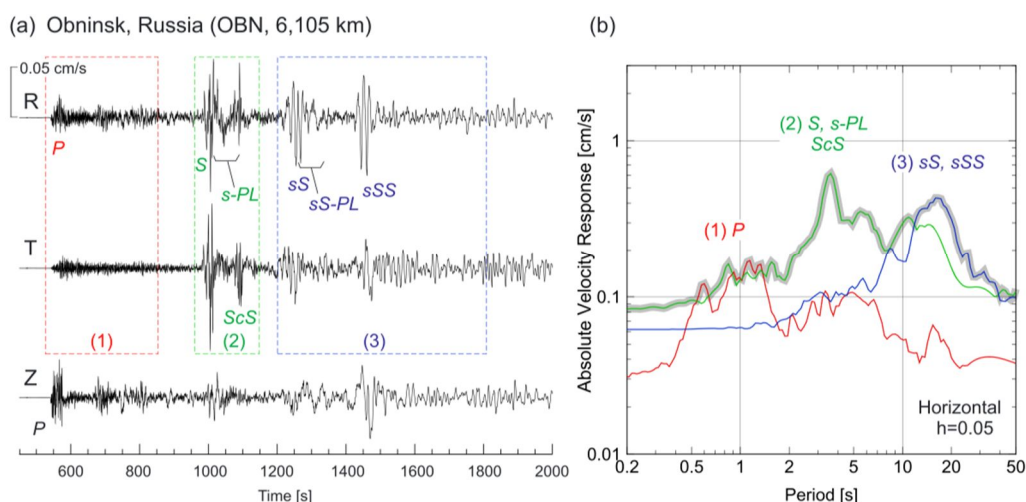


図 6 (a) 2008 年オホーツク海深発地震（610 km, Mw8.3）の際に、ロシアのオビンスクで観測された速度波形記録（Radial, Transverse, Vertical 成分）と、ScS 波、sS、sSS により生成された長周期地震動。(b) 長周期地震動の速度応答スペクトル（絶対速度応答、減衰定数 $h=5\%$ ）。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Furumura, T. and BLN Kennett	4. 巻 221
2. 論文標題 Propagation of distinct Love-wave pulses from regional to teleseismic distances in continental and oceanic environments	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 665-692
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/gji/ggaa028, 2020.	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Furumura, T. and B.L.N. Kennett	4. 巻 24
2. 論文標題 The Significance of Long Period Ground Motion at Regional to Teleseismic Distances From the 610 km Deep Mw 8.3 Sea of Okhotsk Earthquake of 24 May 2013	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research	6. 最初と最後の頁 9075-9094
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2019JB018147	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kennett, B.L.N. and T. Furumura	4. 巻 6
2. 論文標題 Significant P wave conversions from upgoing S waves generated by very deep earthquakes around Japa	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40645-019-0292-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Furumura T. and B.L.N. Kennett	4. 巻 123
2. 論文標題 egional distance PL phase in the crustal waveguide - An analog to the teleseismic W phase in the upper-mantle waveguide	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Geophys. Res.	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2018JB015717	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 向井優理恵・古村孝志・前田 拓人	4. 巻 93
2. 論文標題 関東平野における長周期地震動強度の特徴的方位依存性とその要因	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 東京大学地震研究所彙報	6. 最初と最後の頁 32-48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計6件(うち招待講演 0件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Furumura, T. and B.L.N. Kennett
2. 発表標題 Regional to teleseismic strong ground motions from a 610 km deep 24 May 2013 Sea of Okhotsk earthquake
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古村孝志、ブライアン・ケネット
2. 発表標題 Propagation of distinctive Love-wave pulses in continental and oceanic environment
3. 学会等名 日本地震学会2019年秋期大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Furumura, T. and B.L.N. Kennett
2. 発表標題 Regional to teleseismic distance propagation of distinctive Love-wave pulses in continental and oceanic environments
3. 学会等名 AGU 2019 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古村孝志・Brian Kennett
2. 発表標題 Similarity of the regional PL waves in the crustal waveguide and the teleseismic W-phase in the upper-mantle waveguide,
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古村孝志・Brian LN Kennett
2. 発表標題 地殻内地震のPL波がもたらす大振幅の長周期地震動
3. 学会等名 日本地震学会2017年秋期大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Furumura, T. and BLN Kennett
2. 発表標題 Long-period ground motions at near-regional distances caused by the PL wave from, inland earthquakes: Observation and numerical simulation of the 2004 Mid-Niigata, Japan, Mw6.6 earthquake
3. 学会等名 AGU 2017 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------