

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 17 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400444

研究課題名(和文) 深発地震の異常震域の成因解明に向けた、波形解析・モデル・シミュレーション統合研究

研究課題名(英文) Comprehensive study on waveform analysis, model, and simulations for understanding the mechanism of anomalously large intensity caused by deep earthquakes

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：日本海下で起きる深発地震の広帯域地震波形を調査し、深さ400 km以深の地震においてS波初動部の波形が変化し、低周波数の先駆波が見られることを明らかにした。これをスラブ内部に相転移遅れにより生じた薄い、くさび形状の低速度層(MOW)によるものと考え、2010年2月12日に発生したウラジオストクの深発地震(578 km, Mw6.8)の地震波形を差分法に基づき計算し、MOWの存在を確認するとともに、その物性(低速度異常)を明確化した。スラブ深部のMOWは、周波数2-4 Hzの地震波をスラブ上部に向け強く放射することで、MOWが無い場合の3倍の導波効果を生み出していることを確認した。

研究成果の概要(英文)：We examined the broadband waveform of deep-focus earthquakes occurring beneath Sea of Japan and find that the S waveforms suddenly change to show low-frequency precursor as the source depth increase over 400 km. Since it is anticipated to be occur due to the effect of wedge-shaped low-wavespeed MOW, we conducted finite-difference method simulation of seismic wave for the deep Vladivostok earthquake (578 km, Mw6.8) of 12 Feb. 2010. The result of simulation demonstrated that the effect of low-wavespeed anomaly of MOW for guiding seismic wave in frequency between 2 to 4 Hz towards upward along the slab. Due to this, the slab-waveguide effect becomes 3 times larger than that without MOW.

研究分野：地震学

キーワード：地震 深発地震 異常震域 MOW 地震波伝播シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

太平洋プレートで地震が発生すると、北海道～関東にかけての太平洋岸の広い範囲に強い揺れが広がり、時には震央から何百キロも離れた場所が最大震度となることがある。これは、太平洋下に沈み込むプレートが固く低温であるために、地震動が遠くまで弱まらずに伝わるためである。異常震域で記録される地震波には高周波数 (>1Hz) 成分が強く含まれ、揺れの継続時間が長い特徴がある。これは、前述のメカニズムに加え、プレート内部に固い/柔らかい物質が互層状態で存在することにより(ラミナ構図)、短波長(高周波数)の地震波がラミナ構造中を前方散乱を起こしながら閉じ込められ、遠地まで良く伝わるためである(ラミナプレートモデル)。

2. 研究の目的

以上のこれまで知られた異常震域の生成メカニズムだけでは、400km 以深の深発地震に見られる「強烈な」異常震域の成因を完全に説明することはできない。

たとえば、2013年4月に発生したオホーツク下 609 km の深発地震 (M8.3) では、北海道～九州にかけての最大 3000 km が有感の範囲となり、さらに 7000 km 離れたモスクワでも避難騒ぎが起きた。こうした「強烈な」異常震域は、400 km 以深の地震に限り起きることから、従来のプレートモデルに加え、プレート深部の構造異常が高周波数地震動の伝播に影響していることが考えられる。

近年、世界各地に展開された広帯域の地震計データを用いた地球深部構造の研究(レーバ関数解析や地震波トモグラフィなど)、プレート深部の熱力学的研究、及び高温高压物性研究から、プレートの 400 km 以深に、マンテル物性の相転移の遅れにより生じた、地震波速度が遅い(-5~10%)「くさび状」の物性(準安定オリビンウエッジ; MOW)が存在することが議論されている。プレート内部は低温が保たれているほか、含水率が高いために相転移の遅れを起こすことが考えられる。こうしたくさび状の構造は、地震波に対して凸レンズのように働いて、地震波をプレート上方に集中させる効果が期待される。

本研究では、この MOW 構造が深さ 400 km 以深の地震に強烈な異常震域を作り出している可能性を、地震波形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。

3. 研究の方法

日本列島と東アジアに展開された広帯域地震観測網(F-net, GSN)の地震計データの解析と、地震波伝播の3次元差分法シミュレーションを実施した。

ーションを実施した。

400 km 以深の深発地震に見られる強烈な異常震域の特徴を、やや深発地震(<400 km)による通常の異常震域の特徴(地動速度分布、強震波形等)と比較した。高周波数地震波を閉じ込め、遠方に伝えるプレート内部構造以上して、従来のプレート内部構造のマクロ的視点(宇津モデル)とミクロ的視点(ラミナ構造モデル)に基づくモデルに加え、1) プレート沈み込み帯の熱力学的研究、2) プレート内部高温高压物性研究(相転移、脱水など)、3) 地震波アレイデータ解析によるプレート内部構造研究(地震波速度トモグラフィ、レーバ関数解析など)などの最新の知見を取り入れてた、新しい「プレート深部総合モデル」を整備した。

本モデルの有効性を検証するために、プレート内(スラブ内)地震による高周波数(>3 Hz)波動伝播計算を理化学研究所の「京」コンピュータと海洋研究開発機構の地球シミュレータを用いて実施した。

4. 研究成果

(1) 深発地震の広帯域波形解析

東北沖～ウラジオストック下で発生した深さ 215~578 km の地震波形記録を詳細に調査し、震源深さが 400 km を超えると、P波とS波の主要動の前に、低周波数(<1 Hz)で弱い分散性を示す「先駆波」が現れることを確認した(図1)。先駆波の到着時間は震源深さとともに早まることから、プレート内部の速度構造異常により生成した可能性が示唆された。

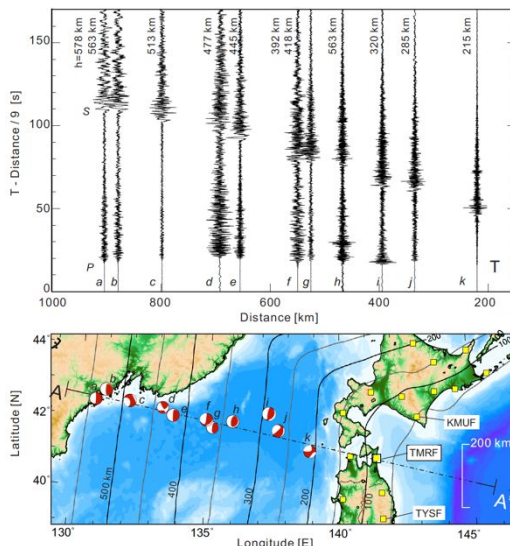


図1 深発地震(a-k)の深さと波形の変化(TMRF観測点、Transverse成分速度波形)。

(2) 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 (MOW) をモデル化した深発地震の地震波伝播シミュレーションを実施し、MOW が高周波数地震波伝播に与える影響を確認した。計算対象領域 1728km*1400km*800km を 0.25 km の格子間隔で離散化し、2010 年 2 月 18 日にウラジオストックの深さ 578 km の地震 (Mw6.8) の地震波伝播を 3 時限差分法計算により評価した。

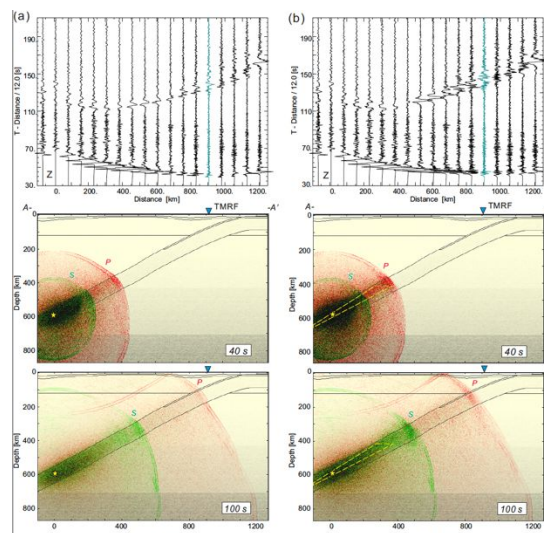


図2 深発地震の地震波伝播シミュレーション (a) 従来のプレートモデル、(b) プレート深部に低速度の MOW (点線) を置いたモデル。

岩石の科学物性と温度に関する先行研究を参考にして MOW 内部は、周囲のマントルより P 波速度が 5%遅く、S 波速度が 7%遅い状態を仮定した。また MOW の厚さは 100 km (深さ 410 km) ~ 20 km (深さ 660 km) に設定した。

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 40、140 秒後の地下断面) を示す。太平洋プレート深部で発生した地震波は、プレート内部を伝わり、遠地まで良く伝わる様子がわかる。一方、プレートの外に出た地震波は減衰マントルを伝わることで減衰が大きく、伝播・減衰特性の強いコントラストにより、太平洋側に異常震域が形成される過程が再現された (図2a)。

そして、プレート深部に低速度の MOW を置くことで、高周波数地震波が内部に閉じ込められ誘導され、大振幅の高周波数地震動がプレートに沿って太平洋側に良く誘導される様子が再現できた (図2b)。

求められた最大加速度 (PGA) 分布と加速度波形 Radial 成分のレコードセクション比較した (図3)。NOW を含まない従来のプレートモデルでは、太平洋岸の強烈な異常震域をよく再現することができず、揺れの継続時間も観測より短かった (図3a)。新たにプレート深部に MOW を設定したモデルでは、プレート内部に誘導された地震波振幅と継続時間

が大きく伸び、(図3b) 観測の特徴を良く再現することが確認された (図3c)。

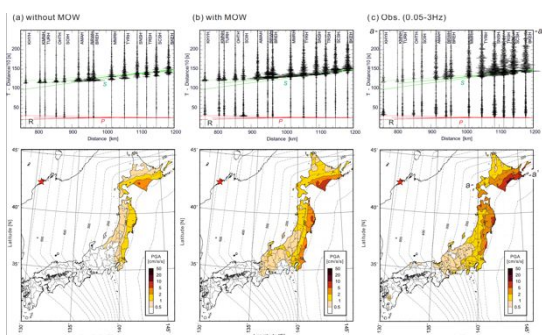


図3 シミュレーションから求められた最大加速度分布と地震波形、(a)従来のプレートモデル、(b)MOW を含むモデル、(c) 観測記録、の比較。

(3) 2015 年小笠原深発地震の異常震域シミュレーション

本研究で整備した、詳細プレート深部モデルを用いて、2015 年 5 月 30 日に発生した小笠原諸島西方沖の地震 (深さ 682 km, Mw7.8) の地震波伝播シミュレーションを行った。

この地震の深さは、深発地震の等深度面より 50 km 程度深い、太平洋スラブの下面付近であることが特徴的である。

また、震度分布は過去の太平洋スラブの深発地震 (鳥島近海や、紀伊半島沖の深さ 400km 前後のもの) で見られる東北~北海道に長く延びた形状から離れた、ほぼ同心円状のものであった。-NET, KiK-net 強震観測データから加速度の距離減衰を評価すると、前弧側 (太平洋側) 観測点で記録された加速度は地震動予測式の 2 倍の範囲に収まっており、背弧側 (日本海側) 観測点と比べても揺れの差が小さいことがわかった。

前弧側の F-net 観測点での地震波形を調べると、見かけ速度の速い (6.5 km/s 程度) 低周波数 (<0.5 Hz) の S 波の先駆波と、大振幅かつ高周波数 (>1 Hz) の S 波後続層 (4.5 km/程度) の 2 つに分離した、この地震の特異性も確認できた。

そこで、本地震の震源の位置と観測された地震波形の特異現象との関係を調べるために、本研究で整備したプレート深部モデルを用いた地震波伝播シミュレーションに基づき、震源をスラブの下面付近とスラブ内部とした場合の波動伝播特性を評価した (図4)。

スラブの下面付近の震源では、地動速度分布が強震観測記録と良く整合し、関東~東北に広がる「緩やかな」異常震域が再現できた。また、低周波数の先駆波と高周波数 S 波の後続相も特徴もよく再現された。他方、震源を太平洋スラブの中 (MOW 内) に置いた場合には、MOW の導波効果により異常震域が広域に発生し、関東~東北の強震動レベルが観測の 2 倍以上大きくなることや、前述の地震波形の特色が消失するなど、観測との不一致が顕著となった。

2015年小笠原諸島西方沖の深発地震は、スラブ外（スラブ下面）で起きた地震である可能性が高いことが裏付けられた。

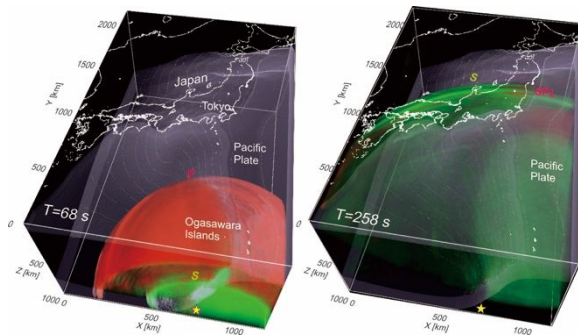


図4 2015年小笠原諸島西方沖の地震の地震波伝播シミュレーション。地震発生から68秒、258秒後の波動伝播（赤はP波、緑がS波を表す）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

Furumura, T. and B.L.N. Kennett, Unusual strong ground motion across Japan from the 680 km deep 30 May 2015 Ogasawara Islands Earthquake, *J. Geophys. Res.*, 122, 1-20, 2017, doi: 10.1002/2017JB014519. 査読有.

Furumura, T., B. L. N. Kennett and S. Padhy, Enhanced waveguide effect for deep-focus earthquakes in the subducting Pacific slab produced by a metastable olivine wedge, *J. Geophys. Res.*, 121, 6779-6796, 2016, doi:10.1002/2016jb013300. 査読有.

Takemura, S., T. Maeda, T. Furumura, and K. Obara, Constraining the source location of the 30 May 2015 (Mw 7.9) Bonin deep-focus earthquake using seismogram envelopes of high-frequency P waveforms: occurrence of deep-focus earthquake at the bottom of a subducting slab, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 4297-4302, 2016, doi:10.1002/2016GL068437. 査読有.

Padhy, S., T. Furumura and T. Maeda, Decoupling of Pacific subduction zone guided waves beneath central Japan: Evidence for thin slab, *J. Geophys. Res.*, 119, 8478-8501, 2014, doi: 10.1002/2014JB011562. 査読有.

Kennett, B.L.N., T. Furumura and Y. Zhao, High-frequency Po/So guided waves in the oceanic lithosphere: II heterogeneity and attenuation, *Geophys. J. Int.*, 199, 614-630, 2014, doi: 10.1093/gji/ggu286. 査読有.

〔学会発表〕(計5件)

Furumura, T. and BLN Kennett, Peculiar strong ground motions from the very deep (h=680 km) Mw 7.9 Ogasawara Islands earthquake of 2015 May 30, IAGU-IASPEI 2017 Meeting, 2017, Kobe.

Furumura, T. and BLN Kennett, Observation and simulation of the regional-distance S-PL wave from the very deep (h=680 km) Mw 7.9 Ogasawara Islands earthquake of 2015 May 30, JpGU-AGU Joint Meeting. 2017, Chiba.

Furumura, T., S. Padhy and BLN Kennett, The waveguide/anti-waveguide effect of the subducting Pacific slab for deep-focus Earthquakes, Japan Geoscience Union Meeting AGU Joint Session, 24 May 2016, Chiba.

古村孝志, 深発地震と異常震域: 2015年5月30日小笠原諸島西方沖の地震, 日本地震学会 2015年秋期大会, 2015年10月26日, 神戸市.

古村孝志・Simanchal PADHY, 深発地震の波形が示す太平洋スラブ内深部の低速度異常, 日本地震学会 2014年秋期大会, 2014年11月26日, 新潟市.

6. 研究組織

(1) 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