

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K03802

研究課題名（和文）プレートの地震波速度構造と断層ずれ伝播特性から探る深発地震の発生機構

研究課題名（英文）Mechanism of deep-focus earthquakes explored from plate structure and rupture characteristics

研究代表者

久家 慶子（Kuge, Keiko）

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：50234414

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、深さ400kmをこえる深発地震からの高周波P波と低周波P波の到来時間差を、東北日本に限らず、マリアナ諸島とトンガ-フィジー-ケルマデック諸島において観測することに成功した。沈み込むプレート内の準安定オリビンにあたる地震波低速領域が世界的に存在する可能性を暗示する。また、準安定オリビンを含むオリビンの相分解が想定される深さ660kmの地震波不連続が二重構造をもち、単純な1つの不連続面ではないことを示す観測も発見した。マントル遷移層底部での現象や構造が単純なものではない可能性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

深さ数百kmで深発地震が発生するメカニズムは未だ明らかではなく、本研究の成果はその理解に貢献するものである。1つの説は、沈み込むプレート内に存在が提案される準安定オリビンの関与である。過去の根拠は東北日本に限定されていたが、本研究の成果は、世界の他の地域においても類似する物質の存在を示唆し、深発地震との一般的な関係につながるものである。また、この説では、オリビンの分解が起こる深さで深発地震がないことを予測するが、本研究で新たにみつけた660km地震波不連続の複雑な構造は、深発地震の下限や位置が、オリビンの分解以外から影響を受けている可能性も含むものである。

研究成果の概要（英文）：Arrival time differences between high- and low-frequency signals of regional P waves from earthquakes deeper than 400 km were found in not only the northeastern Japan but also Mariana and Tonga-Fiji-Kermadec islands. The observations imply the global existence of a metastable olivine wedge that is a low velocity anomaly in subducting plate. In addition, it was found by using regional P waves from a part of the deep earthquakes that 660-km seismic discontinuity, which has been considered as phase change of olivine including metastable phase, is not simple. The lower limit and location of deep earthquakes may be affected by the other characteristics than the olivine phase change.

研究分野：地震学

キーワード：深発地震 内部構造

## 1. 研究開始当初の背景

地球では、地表付近の浅発地震に限らず、沈み込む海洋プレート内で深さ約 700km まで深発地震が発生する。深発地震は、観測される地震波の特性から、浅発地震と同じように、断層運動で起きていると考えられる。しかし、地球深部の高温高压な環境は断層ずれやせん断破壊を妨げるため、「地球深部で断層運動がなぜ起きるのか」、その仕組みはいまだ地球科学の謎である。深発地震が発生する海洋プレート内の岩石の脱水反応、相変化、熔融、せん断不安定などの関与が言われてきた。

本研究で着目する深さ 350km を超える深発地震については、マンツルの主要鉱物 olivine (オリビン、かんらん石) が低温の海洋プレート中心部に相変化せずに metastable olivine wedge (MOW; 準安定オリビンの楔領域) として残り、その相変化が断層運動を引き起こすという考えが、ここ数十年、主に岩石実験の結果から有力視されてきた [Green and Burnley, Nature 1989; Schubnel et al., Science 2013]。

しかし、2015 年 5 月 30 日に発生した小笠原諸島西方沖の深発大地震 (Mw7.9) が、「深発地震は metastable olivine に起因する」という考えに疑問を呈した。この地震は、従来深発地震が発生していた領域から 100km 以上離れた深部で発生した。気象庁が決めた震源の深さは 682km。olivine が spinel を経て perovskite (pv) と magnesiowustite (mw) に相分解する平均的な深さと考えられる 660km よりも深い。自身が実施した地震波形データの解析結果 [Kuge, GRL 2017]は、この地震の震源域がオリビンの相分解による地震波速度不連続 (“660km 不連続” と呼ばれる) にくらべて深部にあることを示唆していた。

## 2. 研究の目的

本研究は、「深発地震は本当に metastable olivine が原因か」の問いに対する答えに貢献するため、深発地震から数千 km 程度以内の地域的距離で取得される地震波波形データの解析と波形モデリングを中心にして、MOW の議論につながる沈み込む海洋プレートの地震波速度構造の特性、深発地震の破壊過程推定への経験的グリーン関数法適用の可能性の検討、660km 不連続より深部での深発地震の発生に関係するかもしれない 660km 不連続の特性を調査した。

## 3. 研究の方法

### (1) 沈み込む海洋プレートの地震波速度構造の特性

東北日本下では、先行研究で、深発地震から前弧側に到達する P 波に低周波と高周波の時刻差が指摘され、MOW と思われる低速域をもつプレートの地震波速度不均質構造で説明できることが示唆されていた [Furumura et al., JGR 2016]。本研究では、このことに着目し、東北日本・南千島諸島、小笠原諸島、およびトンガ・フィジー・ケルマデック諸島で起こる深発地震の P 波波形データを、低周波 P 波と高周波 P 波の到来時間差を指標にして系統的に調査した。

また、地震波速度構造の異方性に関する特性を検出する可能性から、小笠原諸島の深発地震の S 波振動の時間変化について日本の地震波形データから調査した。

### (2) 660km 不連続の地震波形への効果と 660km 不連続の新たな特性の発見

数千 km 程度内の地震波形データを活用することによって、サハリンの深発地震の高速破壊伝播が検知できたことが自身の過去の成果で分かっていた [Kuge, JGR 1990]。これを踏まえ、その後発生した深発地震の波形データを使って、詳細な破壊特性を推定するために経験的グリーン関数法の適用が可能か否かを、同じ地域の深発地震を対象にして観測データと地震波動場の数値計算から検討した。

一方で、その検討結果を活用して、660km 不連続の影響を顕著に観測できると予想される深発地震について、観測される地震波形の特徴から 660km 不連続の特性を推定し、その意義を議論した。

## 4. 研究成果

### (1) 沈み込む海洋プレートの地震波速度構造の特性

#### (a) 深発地震からの高周波 P 波と低周波 P 波の到来時間差

本研究では、高周波 P 波と低周波 P 波の到来時間差を指標にして、深発地震から前弧側に到達する P 波を、南千島・東北日本弧、小笠原諸島弧、トンガ・フィジー・ケルマデック諸島弧で調査した。

東北日本・南千島弧では、MOW の影響が Furumura et al. [2016]で指摘されていた深発地震と

観測点の側線に近いデータについて、高周波 P 波と低周波 P 波の到達時間差の指標が機能することが確認できた。一方で、対象範囲を広げ、沈み込むプレートの形状が変わる領域を含むより広い東北日本・南千島弧域の観測結果からは、その MOW の影響の観測が限定的な空間範囲にとどまる可能性があることがわかった。

小笠原諸島周辺の深発地震について、父島の広帯域地震計で観測された P 波を系統的に調べたところ、東北日本で指摘されていたものと同程度の、高周波 P 波と低周波 P 波の顕著な時間差が、限られた場所の深発地震に対してみつかった。その当該地震から地震の場所が南北に離れると、観測される時間差は小さくなる。Obayashi et al [GRL 2013]や Fukao & Obayashi [JGR 2013]の P 波速度トモグラフィーの結果によると、顕著な時間差がみられる地震と観測点を結ぶプレートの形状は、プレートのたわみの変換部にあたり、平面的である。このプレートの形状が顕著な時間差を観測できた一因と思われる。そして、東北日本と同程度の時間差の観測は、小笠原諸島下にも、東北日本下と類似した太平洋プレート構造の存在を示唆する。

これらの観測結果を踏まえ、トンガ・フィジー・ケルマデック諸島の深発地震についても調べたところ、同じ様に、プレート形状の単純な南方向の観測点で、類似する高周波 P 波と低周波 P 波の顕著な到来時間差の観測をみつけた。深さ 200 - 400km の地震にはみられず、およそ 500km 以深の地震に限って観測される。このような地震の深さに対する依存性は、東北日本の深発地震に対するものに類する。

よって、本研究で調査した南千島・東北日本弧、小笠原諸島弧、トンガ・フィジー・ケルマデック諸島弧のすべての地域で、先行研究で MOW の存在の根拠とされていた東北日本の観測と類似した観測が存在することをみつけた。このことは、MOW に相当すると思われる類似するプレート内低速域が、他の地域にもあること、つまり世界的に存在する可能性を示唆する。一方で、その観測は常に見られるわけではなく、観測点と震源にわたるプレート形状に依存する。このことは、高周波 P 波と低周波 P 波の到達時間差の観測が見られないことが MOW の低速域の存在を否定できないことも示している。

#### (b) 深発地震からの S 波振動の時間変化

小笠原諸島の深発地震から西日本で観測された S 波に、系統的な振動方向の時間変化をみつけた。深発地震周辺のプレート構造の影響を受けている可能性があるため、その性質と原因を調べた。遠地の深発地震に類似した時間変化を定常的に観測することができないことから、原因となる領域は、観測点直下よりは深発地震の震源域に近い方がよいと考えられる。一方で、地震波動の数値計算の結果から、長周期帯の観測には、地殻での変換波の影響が顕著に含まれる可能性があることが推察された。異方性の調査に使用する周期帯を、数値実験から慎重に選ぶ必要があり、短周期の周期帯を用いると、地殻での変換波の影響は空間的に限定できることがわかった。この周期帯の観測で、水平位置に近いが深さの違う深発地震に異なる結果がみられ、これがマントルの異方性の深さによる違いを反映しているかもしれない。

#### (2) 660km 不連続の地震波形への影響と 660km 不連続の新たな特性の発見

過去に自身の研究から、サハリンで S 波速度超破壊伝播の深発地震をみつけていた。そこで、本研究では、その深発地震より後に発生した南千島地域の深発地震を対象に日本での地震波形データの特性を調べ、深発地震の断層ずれ伝播をより詳細に推定する可能性を探った。S 波速度超破壊伝播の証拠となった P 波の 2 つのパルスは、同地域の他のどの深発地震にもみられず、2 つのパルスがプレート内外の構造起源でないことが改めて裏付けられた。同地域の深発地震に対してグローバル CMT 解をもとに日本での理論地震波波形を計算したところ、本州の観測点での P 波波形は、660km 不連続の影響を受けながら、地震のメカニズム解に依存して変化することがわかった。経験的グリーン関数法を使用する場合には、地震のメカニズム解による違いがあまり予測されない北海道や小笠原などの観測点に限る必要があることがわかった。これは当該地震の詳細な破壊伝播決定に経験的グリーン関数法の適用は難しいことを示している。

一方で、同地域の深発地震の理論波形の計算結果と観測波形のデータ解析は、本研究に別の重要な発見を導いた。同地域の深発地震に対して、日本の観測網では、660km 不連続による P 波の triplication が予想され実際に観測される。特筆すべきは、その後に別の triplication とされる P 波を検出したことである。その P 波が観測される場所は特定の地域に限られない。アレイ解析の結果からは、その P 波が 660km よりやや深部から伝播してきた波であることを示している。この P 波の存在は 660km 不連続が二重構造をもつことを示唆する。マントルの化学組成や 660km 不連続周辺での現象を拘束する可能性がある。660km 不連続がオリビンの相分解による場合、それ以深に MOW を予想しない。最深の深発地震がどこでどの深さで起きるかに関係する可能性もある。

660km 不連続が複数面として存在する可能性は、トンガ、マリアナ諸島などの沈み込んだプレート近傍で指摘されている。中国大陸下へ沈み込んだ太平洋プレートの滞留部の海側（東側）近傍で複数にみえることも指摘されていた[e.g., Niu&Kawakatsu, JPE 1996]。本研究の結果から、その中国大陸東側の 660km 不連続の特性が、さらに東にまで広がっているかもしれない。2015 年の小笠原諸島西方沖深発地震のような、660km 不連続よりも深くで、通常の深発地震帯（和達 ベニオフ帯）から離れておこる地震が、このような 660km 不連続の構造と関係している可能性もある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 久家慶子
2. 発表標題 日本列島下のマントル遷移層底部における二重不連続面か？
3. 学会等名 日本地震学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Keiko Kuge
2. 発表標題 Configuration of slab beneath Ogasawara Islands and P-wave time differences between high and low frequencies
3. 学会等名 Japan Geoscience Union (JpGU) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keiko Kuge
2. 発表標題 Regional shear waves from an unusually deep earthquake beneath Ogasawara Islands: 660 km discontinuity and anisotropy
3. 学会等名 Japan Geoscience Union (JpGU) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keiko Kuge
2. 発表標題 Deep Earthquakes beneath Ogasawara (Bonin) Islands and their Surrounding Structure as Inferred from Regional Seismic Waves
3. 学会等名 IUGG 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keiko Kuge and Yuki Ohata
2. 発表標題 Frequency dependent arrivals of regional P waves from deep earthquakes and their implication for slab structure and configuration
3. 学会等名 American Geophysical Union (AGU) 2019 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keiko Kuge
2. 発表標題 Examination of double seismic discontinuities at the base of the mantle transition zone beneath the northern Japan
3. 学会等名 IUGG 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Keiko Kuge
2. 発表標題 Examination of Double Seismic Discontinuities at the Base of the Mantle Transition Zone beneath the Northern Japan Sea
3. 学会等名 American Geophysical Union (AGU) 2023 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2023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
---------	---------