

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2013

課題番号：22540438

研究課題名(和文) 稍深発地震の物理プロセスに関する地震学的研究

研究課題名(英文) Seismological study about the physical process of intermediate-depth earthquakes

研究代表者

久家 慶子 (Kuge, Keiko)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50234414

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円、(間接経費) 810,000円

研究成果の概要(和文)：海洋プレート内で発生する稍深発地震の活動は、沈み込み帯によらず、ほぼ同じ深さで低調になり、温度に支配されている可能性を示す。温度を左右する、プレートと高温マントルが接する位置は、稍深発地震のP・S波の後続波から推測できる。観測地震波形のモデリングからみえる稍深発大地震のすべり伝播はS波より遅いみかけ破壊伝播速度を好む。脱水反応で放出される水の存在は動的弱化により動的破壊伝播を加速する。遅い破壊速度には、可塑性空隙増加のように破壊フロントが通過する最中に作用する機構が必要である。

研究成果の概要(英文)：The number of intermediate-depth earthquakes has locally the minimum in the depth range of 75-100 km, irrespective of subduction zones. This implies that the seismic activity can depend on thermal structure affected by the location where the subducting oceanic plate and high-temperature wedge mantle meet. The location can be estimated by observing later arrivals of P and S waves from intermediate-depth earthquakes. Well resolved slip propagation of a large intermediate-depth earthquake shows that the apparent rupture propagation velocity can be slower than the S-wave speed. The existence of water released from dehydration reactions can accelerate earthquake dynamic rupture due to dynamic weakening. To slow down the rupture, some process should act efficiently at the rupture front, such as plastic change in porosity.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：稍深発地震 海洋プレート 温度 水

## 1. 研究開始当初の背景

沈み込み帯では、沈み込む海洋プレートにそって深さ数十 km を超えるところでも地震が多数起きている。一方、地球の内部は深くなると温度・圧力が高くなり、浅い地震の発生を説明するような岩石の脆性破壊やすべりは期待できない。ではなぜ深いところで地震が起こるのか？この問題は今なお解決していない。

深さ 400km 程度までの稍深発地震（やや深い地震）の発生には、沈み込む海洋プレートを構成する地殻・マンテルの含水鉱物の脱水反応が関与しているといわれる。地震波速度構造や岩石実験などから有力視される脱水反応であるが、脱水反応やその反応で鉱物から放出される水が、どのようなプロセスや場を通して実際に起きている稍深発地震に関与しえるのか、わかっていない。

## 2. 研究の目的

本研究は、脱水反応の関与を念頭におきながら、稍深発地震に関わるべき物理プロセスの特性と条件を地震学的に明らかにすることを目的とする。稍深発地震のすべり伝播特性を地震波形データ解析から決定し、それを拘束条件に動的な破壊伝播の特性などに踏み込みながら、物理プロセスを調べる。稍深発地震を通して、プレート内外の不均質構造や沈み込み帯のダイナミクスの理解への寄与も試みる。

## 3. 研究の方法

### (1) 稍深発地震の地震活動の深さ依存性

沈み込む海洋プレートの表層や内部における地震活動の深さに対する特性を明らかにすることによって、稍深発地震に関わるべき物理プロセスの特性と環境の条件を調査した。本研究では、Engdahl et al. (1998) の再決定震源カタログとグローバル CMT カタログを用いて、世界のさまざまな沈み込み帯における地震の深さ分布を調べ、沈み込み帯間の特徴の比較を実施した。調査の対象とした領域は、Wada and Wang (1999) に準じた。

### (2) 稍深発地震の後続波で推定するマンテルウェッジ周辺の構造

稍深発地震が発生する海洋プレート内の温度は、海洋プレートがどこで高温のマンテルウェッジと接するかに依存する。稍深発地震の発生領域の温度を議論するためにこの知識が重要であるが、実際には、マンテルウェッジ周辺の構造は推定しにくい。

本研究では、稍深発地震から放射される P 波や S 波に遅いみかけ速度をもつ後続波が観測されるか否かを調査することにより、マンテルウェッジ周辺の構造に関する知見を得ることを試みた。ここでは、豊富な数と密

度の地震波形データが利用できることから、フィリピン海プレートが沈み込む西南日本を対象事例とした。

### (3) 稍深発地震のすべり伝播過程の特性

海洋プレート内部で実際に発生した稍深発大地震のすべり伝播過程の時空間的特性を調べた。遠地地震波波形データのみから、破壊伝播速度を含む詳細なすべり伝播過程を推定することは困難なことから、ここでは、近い距離の広帯域地震波形データが利用できたインドネシア・ジャワ島下およびバンダ海下の稍深発大地震のすべり伝播特性を調べた。日本・インドネシア広帯域地震観測網および IRIS で収集された広帯域地震観測網の P 波波形データを解析した。

### (4) 水と摩擦熱を考慮した地震の動的破壊伝播シミュレーション

稍深発地震への関与が指摘される脱水反応を念頭に、地震の動的破壊伝播がどのような要因から影響を受けるか、数値シミュレーションから調査した。

沈み込む海洋プレート中の含水鉱物が脱水反応を起こすと、水が放出される。本研究では簡単のため、放出された水を間隙水として扱い、間隙水と摩擦熱を考慮した地震の動的破壊伝播シミュレーションを実施した。水は脱水反応により既に放出されていると仮定し、放出する過程は扱わない。地震発生領域が高圧下にあるため、間隙水としてではなく、脱水反応自体による動的弱화가地震に関与している可能性がある。しかし、このような動的弱化的効果も、間隙水が起こす動的弱化的効果による本シミュレーションの結果をもとに、定性的には推測できると判断した。

## 4. 研究成果

### (1) 稍深発地震の地震活動の深さ依存性

深さ 50km より深い地震の数は、深さとともに指数関数的に減るが、そのような深さ 75-100km を境に変わることがわかった。地震活動が変化する深さは、熱パラメータが 800km を超える沈み込み帯では、場所によらずほぼ同じである。一方、深さ 75-100km より深い地震活動は、低調な活動が継続したり、活発化し顕著な地震数のピークを示したりと、沈み込み帯によってばらつく。これらの特徴は、Engdahl et al. (1998) の再決定震源カタログでもグローバル CMT カタログでも見られる。

グローバル CMT カタログを用いてメカニズム解の深さ依存性を調べた結果、深さ 75-100km は水平圧縮逆断層や低角逆断層型地震の下限付近にあたるということがわかった。GCMT カタログで深さ 55km 以深の低角逆断層と報告されている地震のうち、遠地波形データが利用可能である地震の深さを波形モデリングで調査したところ、深さが 50km を超えることはなかった。

深さに対して地震数が減少する傾向が、深さ 75-100km を境に変わって見えるには、プレート境界地震と考えられる低角逆断層型地震がこの深さで起こらなくなるとともに、プレート内の稍深発地震の活動もこの深さで低いことが必要である。これは、深さ約 75km で、プレート表層付近の温度や物質が変化していることで説明できる。沈み込むプレートによるウェッジマントルの引き込みが、沈み込み帯にかかわらず、深さ約 75km 以深でのみ起こる Wada and Wang (2009) のモデルと調和的にみえる。海洋プレート表層の稍深発地震が脱水反応によって発生している場合、高温のウェッジマントルと出会う深さ約 75km で脱水反応が急速に進行し、その結果、地震活動が減衰すると予想できる。

#### (2) 稍深発地震の後続波で推定するマントルウェッジ周辺の構造

(1) より、稍深発地震の発生頻度を支配する物理的要因として、沈み込む海洋プレートと高温のウェッジマントルの位置関係が重要であることが示唆された。フィリピン海プレートが沈み込む西南日本の稍深発地震の地震波形データを調査したところ、地震発生域直上のマントルウェッジと思われる領域を伝播する P 波に、低速度領域内だけを伝播してきた証拠と思われる明瞭な後続波をみつけた。そして、この遅いみかけ速度をもつ後続波が海洋プレートとウェッジマントルの位置関係を知る上で有用であることがわかった。

稍深発地震から放射される P 波と S 波に遅いみかけ速度をもつ後続波が観測されることは、稍深発地震が発生する海洋プレートに接して、その上部に地震波低速度領域があることを示している。この低速度領域は厚い大陸地殻の存在もしくはマントルウェッジの蛇紋岩化等によって説明できる。

この構造はいずれも、海洋プレート内部の稍深発地震発生領域の温度を左右する。厚い大陸地殻あるいは低温の蛇紋岩が海洋プレート上部に存在すると、稍深発地震が発生する海洋プレート内の温度は、高温のマントルが海洋プレート上部に張り出している場合より低くなる。海洋プレート内の温度勾配も異なる。稍深発地震から放射される P 波と S 波にみかけ速度の遅い後続波が見られないところでは、逆に、高温のマントルが海洋プレート上部に張り出していると考えられ、相対的に海洋プレート内の温度は高いと予想される。そして、実際にそのようなところでは稍深発地震の活動がより浅部で消失しているようにみえる。

西南日本の沈み込み帯は新しいために (1) の結果と直接は結びつけられないが、十分な数の地震観測点があれば、同様な手法で、沈み込む海洋プレートと高温のマントルウェッジの位置関係を調べることができる成功事例となった。

#### (3) 稍深発地震のすべり伝播過程の特性

インドネシア・ジャワ島およびバングラ海下で発生した稍深発大地震のすべり伝播を、日本・インドネシア広帯域地震観測網および IRIS で収集された広帯域地震観測網の波形データから調べた。これらの地震の波形には、先駆すべりからの明瞭な先駆 P 波がみえる。

特に前者のジャワ島下の地震については、近い距離にある豊富な広帯域データが使用でき、高い信頼度で精度よく、先駆すべりと主要すべりの相対位置およびすべりの時空間伝播を決定できた。その結果、震源付近で小さなすべりが生じた約 6.4 秒後に、大きな主要すべりが、西約 26km 離れたほぼ同じ深さで発生したことがわかった。このすべりの伝播方向は、沈み込む海洋プレートの走行方向と一致する。観測された地震波形からすべりの時空間発展をモデリングすると、S 波速度よりも遅いみかけ破壊伝播速度を好む。

同ジャワ島稍深発大地震の直達 P 波に対して、日本の Hi-net 観測網データをアレイデータとしてバックプロジェクション法を実施し、先駆すべりと主要すべりの相対位置を推定した。得られた結果は、上記の波形モデリング等の結果と調和的であった。しかし、バックプロジェクション法で決めた位置の空間精度は、近い観測点を含めて実施した上記の波形解析にくらべて低いこともわかった。詳細な位置関係を議論するには、近い観測点を含む波形データの解析結果の方がよい。また、ここで得た結果は、pP・sP 波をあわせて用いた Kiser and Ishii (2011) の結果と異なっている。pP・sP 波のデータを使用することに問題がある可能性がある。

バングラ海下の稍深発地震については、近い広帯域観測点の数が少なく、先駆すべりと主要すべりの相対位置関係やすべり伝播の特性は、ジャワ島下の地震のように精度よく決めることはできなかった。

#### (4) 水と摩擦熱を考慮した地震の動的破壊伝播シミュレーション

間隙水は摩擦熱による間隙圧上昇 (thermal pressurization) で摩擦力に動的弱化を起こし、地震の動的破壊伝播を顕著に加速する効果をもつ。脱水反応も似た効果を予想する。(3) において稍深発地震のすべり伝播を調べた結果、遅い破壊伝播速度を好むことがわかったため、本研究では、稍深発地震の動的モデルとして、特に、破壊伝播速度を抑制しうる要因を検討した。間隙水の相変化による物性値の変化、空隙率の変化が破壊伝播速度を抑制できるか、調べた。

地球内部は深さが深くなると、圧力と温度が高くなる。圧力と温度の上昇により、水は液体から超臨界水に相変化することが予想され、この相変化に関係して水の物性値は大きく変わる。超臨界水への相変化に伴う物性値の変化を考慮した上で地震の動的破壊へ

の影響を調べたが、この相変化が破壊伝播速度へ与える効果は小さいことがわかった。

一方、可塑性空隙率変化は破壊伝播速度を抑制しうる可能性があることがわかった。ここでは可塑性空隙率の増加係数および透水係数と空隙率のべき乗則の影響を調べた。透水係数と空隙率のべき乗則の違いは最終すべり量に変化を与えるものの、破壊伝播速度には影響を及ぼさなかった。べき乗則が、破壊フロントが通過した後のすべり過程に主に影響するためである。しかし、可塑性空隙率の増加係数は、破壊伝播速度に影響を与えることができることがわかった。可塑性空隙率の変化は、破壊フロントが通過し大きな応力降下を起こしている最中に効果を発揮するためである。これらのことは、可塑性空隙率の増加係数が破壊伝播速度を左右する要因として有効であるだけでなく、破壊伝播速度の抑制には、破壊フロントが通過しつつある最中に作用する機構が不可欠であることを示唆する。破壊フロント通過後に効果がある現象は、破壊伝播速度を支配する要因にはならない。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2件)

Y. Urata, K. Kuge, and Y. Kase, Suppression of slip and rupture velocity increased by thermal pressurization: Effect of dilatancy, *J. Geophys. Res.*, 118, 5827-5837, doi:10.1002/2013JB010640, 2013.

K. Kuge, Structure downdip of deep low-frequency earthquakes in western Shikoku, Japan, revealed by P and S waves propagating at slow apparent velocities from intraslab earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 5646-5651, doi: 10.1002/2013GL057781, 2013.

〔学会発表〕(計 6件)

Kuge, K., Structure downdip of deep low-frequency earthquakes in Shikoku, western Japan, revealed by later P and S arrivals with slow apparent velocities, IASPEI, S503S2.06, Gothenburg, Sweden, 23 July, 2013.

久家慶子, P波の後続波でみる四国深部低周波地震の沈み込み下方側の地下構造、日本地震学会 2012 年秋季大会、B21-05, 函館、2012 年 10 月 18 日。

浦田優美・久家慶子・加瀬祐子, Thermal pressurization を考慮した動的破壊伝播：空隙水の相変化に伴う水物性の変化の効果、日本地球惑星科学連合 2012 年大会、SSS28-04、幕張、2012 年 5 月 24 日。  
久家慶子、瀬戸内海下を伝播する P・S 波

とフィリピン海プレートの形状、日本地球惑星科学連合 2012 年大会、SCG72-P08、幕張、2012 年 5 月 22 日。

浦田優美・久家慶子・加瀬祐子, Thermal pressurization によって増加するすべり量と破壊伝播速度の抑制：ダイラタンシーの効果、日本地球惑星科学連合 2012 年大会、SSS29-04、幕張、2012 年 5 月 21 日。

久家慶子、沈み込み帯における地震活動の深さ分布とその類似性、日本地球惑星科学連合 2011 年大会、SCG060-P02、幕張、2011 年 5 月 25 日。

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0件)

取得状況 (計 0件)

〔その他〕

なし

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

久家 慶子 (KUGE, Keiko)

京都大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：5 0 2 3 4 4 1 4

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし