

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2008

課題番号：18540418

研究課題名（和文） 沈み込み帯の地震はどこで起きているのか？

研究課題名（英文） Source location and slip distribution of the subduction zone earthquakes

研究代表者

岡元 太郎（OKAMOTO TARO）

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：40270920

研究成果の概要：

沈み込み帯の地震からの遠地実体波波形には震源付近の不均質構造に起因する強い後続波が現れるため、地震の詳細な解析が困難になる場合がある。本研究では不均質構造のもとでの波動計算を非常に効率良く実行できる独自の手法によって理論波形を計算し、小規模地震の地震発生場所・発震機構解を推定する手法と、大規模地震の断層すべり分布を決定する手法とを開発した。これらの手法を2006年ジャワ津波地震と2007年南スマトラ地震とに適用して、震源域の不均質構造と地震発生場所や断層すべり分布との関係を詳しく考察した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,400,000	0	2,400,000
2007年度	500,000	150,000	650,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	300,000	3,700,000

研究分野：地震学

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：沈み込み帯、地震、津波、地球・惑星内部構造、震源過程、地震波理論

1. 研究開始当初の背景

沈み込み帯の地震について、発生場所を精密に推定することや地震の断層面上のすべり分布を詳細に決定することには次のような意義があると考えられる。(1) 地震が発生するための条件と地球内部の温度・応力・物性等との関係を探ること。地球内部は温度・応力や物性の異なる物質が不均質に分布しており、その結果として地震発生に関係する剪断強度等も不均質になっていると考えられる。特にプレートの収束境界である沈み込み帯では不均質性が強くなっている。そのため、地震発

生場所を詳細に推定することは、沈み込み帯での地震発生の力学的な条件を研究するうえで強い制約条件を与える。(2) 地震発生のたびに同じ場所で同じような断層すべりが起こるのか、それとも震源域はほぼ同じでも断層すべり分布は地震のたびに異なっているのかを推定すること。これは「アスペリティ」（断層すべりの大きい場所）の実体を考える上で重要である。また、想定される地震による強震動を予測する上でもこの知見を欠かすことはできない。この答えは自明ではなく、詳細な震源過程解析が必要である。

沈み込み帯の地震は、陸上の観測網の外側にあるため通常の方法では正確な震源決定が困難である。一方、波形解析の場合には震源近くの横方向不均質構造（傾斜海底、厚い堆積物など）の影響が地震波波形に強く現れる（例えば Wiens 1990; Okamoto 1994; Okamoto 2002）。

さらに不均質構造の影響は一様ではないため、震源位置が横方向や深さ方向にわずかにずれただけでも波形は大きく変化する（これは浅い地震ほど顕著である）。この現象を利用すれば非常に精密な地震の解析が可能となる。しかも、不均質構造モデルを用いた解析では構造と地震の位置との関係を直接的に示すことができる。一方、横方向に均質な構造を使うと理論波形は簡便に計算できるが、それは現実を反映しておらず、構造と地震の場所との関係も2次的にしか推定できない。これらの意義や知見を背景とし、特に上記の(1)のテーマを中心に本研究を進めることとした。

2. 研究の目的

上に述べたように、沈み込み帯には深くて急傾斜した海水層・厚い堆積物・沈み込む海洋地殻・プレートなどのような、大規模な横方向不均質構造が存在している。沈み込み帯の地震の発震機構や震源過程はこれらの不均質構造と深く関係していると考えられる。また、地震波波形はこれらの不均質構造の影響を受けて、標準的な横方向均質構造から予想される波形とは異なるものとなる。本研究では、不均質構造を仮定した解析によって、地震の発生場所がどこであるかを精密に決定することを試みる。その解析結果をもとにして、地震発生場所に関する知識と地球内部構造の微細構造との両方を精密化し、沈み込み帯浅部の地震活動や内部構造の実像にせまることを目指す。

なお、本研究開始直後に2006年ジャワ津波地震という特異な地震が発生した。さらに2年目の2007年には、Mw8.5以上の巨大地震として今世紀3個目となる地震がスマトラ島沖に発生した。これらは本研究の中心課題である不均質構造と地震との関係を探るうえで非常に重要な地震であると考えたため、本研究ではこれらの地震の遠地実体波波形解析に取り組むこととした。そのため、当初計画にあった過去の地震の解析や表面波波形を用いた解析は今後の課題とした。

3. 研究の方法

(1) 波形データ

本研究で用いたデータは広帯域の遠地実体波波形である。全世界の広帯域地震計観測

網の波形データを IRIS データマネジメンシステムの WEB 機能を利用して収集し、下限が周期数秒、上限が数十秒から200秒までの帯域通過フィルター（解析した地震ごとに特性が異なる）をかけて地動変位波形に変換したものを利用した。

(2) 小規模地震の解析

小規模地震（M6程度）の場合、解析に利用する周期帯では震源の広がり効果が小さいので点震源を仮定することができる。そこで、点震源のパラメータを推定する非線形逆問題解析手法と、格子探索手法とを組み合わせた解析を実施する。つまり、震源域（沈み込み帯）の不均質構造モデル内に点震源を仮定して、波形インバージョンによって発震機構解（モーメントテンソル）と震源時間関数を推定する。さらにこの解析を多数の点震源について実施し（格子探索）、理論波形と観測波形の残差が最少になる場所を最適点震源の位置とするものである。震源時間関数の推定には非負の条件を課しており、人工的な振動を抑制している。この方法は我々がこれまでの一連の研究で確立したものであり、Waveform Relocation Method と呼んでいる（Okamoto & Takenaka, in *Advances in Geosciences*, in press）。

小規模地震の解析例として、横方向不均質構造の例を図1に、実際の地震からの観測波形と対応する理論波形との比較を図2に示した。不均質構造の効果を取り入れた理論波形は、観測波形の特徴を良く再現できていることがわかる。

(3) 大規模地震の解析

大規模な地震（M7程度以上）では点震源の仮定は成立せず、断層面の大きさを考慮しなければならない。我々は破壊が一点から始まって断層面上を拡大していくモデルをもとに、断層面上の格子点でのすべり量と破壊時刻の分布を推定する非線形の波形インバージョン手法を開発した。本手法でも(1)の手法と同様にパラメータに非負の条件を課す。また、各格子点でのすべり履歴を表す震源時間関数も推定する。本研究ではいまのところ震源時間関数はすべての格子点で同一の形状を持つように設定している。

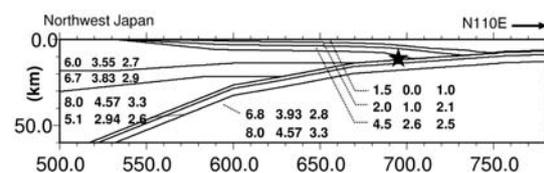


図1 宮城県沖の日本海溝について仮定した横方向不均質構造の断面図。数値は各層のP波速度(km/s)、S波速度(km/s)、密

度(g/cm^3)を示す。海水層での S 波速度はゼロである。星印は 2003 年 11 月 1 日に発生した地震 ($M_w 5.8$) の推定震源位置を示す。海底地形は Kishimoto (1999) による。岡元 (2009) の図を引用した。

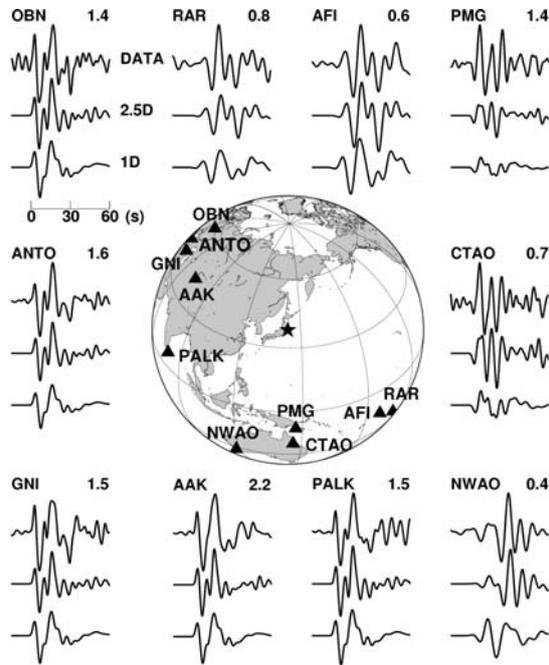


図2 2003年11月1日に宮城県沖で発生した小規模地震 ($M_w 5.8$) の観測変位波形 (上下動成分: P 波) と理論波形との比較。DATA は観測波形、2.5D は震源域の速度構造として図1のモデルを用いた場合の理論波形、1D は標準地球構造 (横方向均質構造) に平坦な海水層 (厚さ 3km) と堆積物層 (厚さ 2km) を追加したモデルによる理論波形。数値は観測波形の最大振幅 (μm) である。中央の地図には震源 (星) と観測点 (三角) の位置を描いた。震源メカニズムには Global CMT 解を用いた。岡元 (2009) の図を引用した。

4. 研究成果

(1) 地震解析手法の開発

上に述べたように、小規模地震の震源パラメータを推定する手法を完成させ、また大規模地震の断層すべり量分布と破壊開始時刻分布を推定する波形インバージョン手法を新たに開発した。

(2) 2006年ジャワ津波地震の解析

津波地震とは、同程度の表面波マグニチュードを持つ他の地震に比べて異常に大きな津波を生じた地震のことである (Kanamori

1972)。津波地震は地震発生帯の上端に位置することが特徴の一つであり、その特殊性の原因をめぐって多くの研究がなされている。本研究では 2006 年にジャワ島沖で発生した津波地震 ($M_w 7.8$) について詳細な解析を行った。この地震ではジャワ島沿岸を 6-7m に達する津波が襲い、500 名以上の犠牲をもたらした。

なお、以下にまとめた成果は Okamoto & Takenaka, *EPS* (2009) および Okamoto & Takenaka, in *Advances in Geosciences* (in press) の 2 つの論文に発表した内容に基づく。

① 余震の解析

ジャワ海溝の地殻構造モデルの検証と、不均質構造の影響評価のために、小規模地震 (2006 年ジャワ津波地震の余震) を対象として Waveform Relocation Method を用いた解析を行った。震源域の構造として不均質地殻構造モデルを用いて計算した理論波形は、余震からの遠地実体波に現れている大振幅の後続波波形を良く再現することが明らかになった。一方、横方向に均質な標準地球モデルを用いた場合には観測波形の特徴を再現できなかった。このことから、ジャワ海溝においても波形に現れる不均質構造の影響は大きいことと、遠地実体波波形計算という目的において、仮定した不均質構造モデルが有効なものであることが示された。また、波形インバージョンのシミュレーションも実施し、解析手法の精度等の確認も行った。

② 断層すべり量分布解析

震源付近の不均質構造の効果을考慮して計算したグリーン関数 (遠地実体波波形) を適用して本震の断層すべり分布の解析を行った。これは、不均質構造にもとづくグリーン関数を津波地震に適用した初めての解析例である (図3、4)。その結果、平均的な破壊伝播速度が $1.25\text{km}/\text{s}$ 程度であり、普通の地震の場合 ($2.5\text{--}3.5\text{km}/\text{s}$) よりも非常に遅いことや、破壊継続時間 (約 165 秒) が同一マグニチュードの普通の地震 (30-60 秒) に比べて非常に長いことなどの、津波地震としての特徴を確認できた。

さらに本研究では海溝軸に非常に近い場所にはほぼ孤立したすべり領域を見出した。この領域はバックストップ構造よりも海溝軸に近い可能性がある。つまり、通常であれば剪断強度が非常に弱くなっている可能性のある領域である。この結果は津波地震発生域のプレート境界における摩擦特性が空間的に強い不均質を持つことを示唆し、沈み込み帯での地震発生を研究する上での重要な制約を与えると考えられる。なお、波形解析のシミュレーションによって、横方向均質構造モデルを用いて計算した通常のグリーン関

数による解析では、このような海溝軸に近い（非常に浅い）部分のすべり分布に関する分解能が低くなっていることも本研究では明らかにした。そのため、通常のグリーン関数では浅い部分に関する詳細な考察をすることが困難であると考えられる。

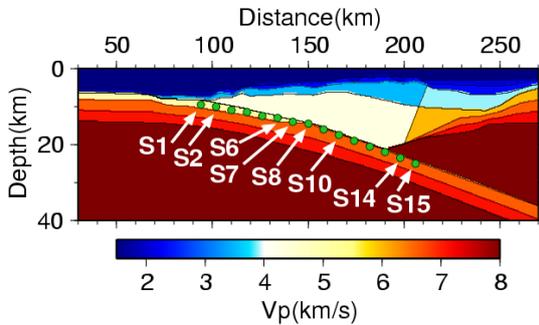


図3 ジャワ海溝の地殻構造モデル断面図。P波速度をカラーで示した。緑色の点はジャワ津波地震の断層モデルを構成する格子点を示す。格子点は傾斜方向に15個、走行方向（紙面と垂直方向）に28個を置いている。Okamoto and Takenaka, *EPS*, (2009) の図を引用した。

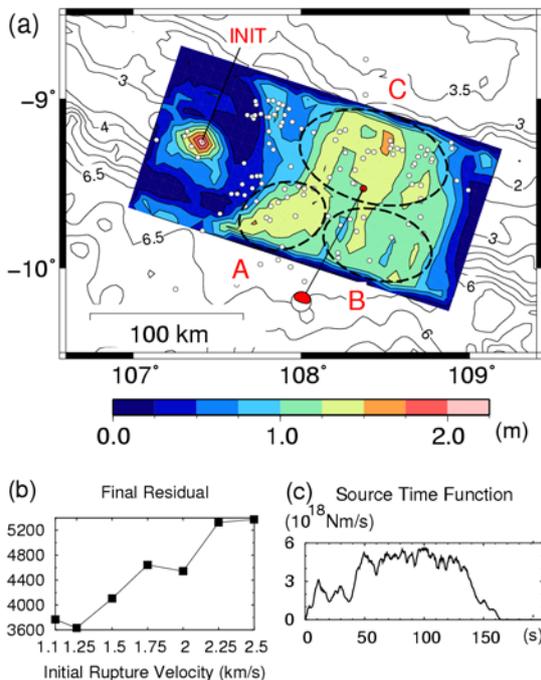


図4 (a) 2006年ジャワ津波地震について推定された断層すべり量分布を海底地形の上に投影して描いたもの。カラーで断層すべり量を示す。INITは破壊開始点、領域Aが海溝軸に近いすべり領域を示す。2003年に発生した小地震のGlobal CMT解も示してある。海底地形(水

深)は0.5kmおきの等値線で描いてある。(b) インバージョンの初期値として設定した破壊伝播速度と最終的な残差との関係。初期値1.25km/sで残差は最少となる。(c) 断層面全体からの寄与を総合した震源時間関数。継続時間が約165秒である。Okamoto & Takenaka, *EPS* (2009)の図を引用した。

(3) 2007年南スマトラ地震

上に津波地震について述べたように、プレート境界で接触している物質とすべり特性との間の関係を調べることは地震発生物理を研究する上で重要であると考えられる。津波地震はプレート境界の「地震発生帯」の上限に位置していると考えられるが、我々は下限についても考察するために、2007年南スマトラ地震の解析も実施した。2007年9月12日に発生した南スマトラ地震(Mw8.5)は、20万人以上の犠牲者を出した2004年スマトラ・アンダマン地震(Mw9.0)、それに隣接する地域に発生した2005年北スマトラ地震(Mw8.6)の2つの巨大地震に引き続いてこの地域に発生した3つ目の巨大地震である。21世紀に入ってから、Mw8.5以上の巨大地震のすべてがこの地域に発生していることも特筆すべきであろう。

なお、以下にまとめた成果はOkamoto & Takenaka, *AGU* (2007), 日本地球惑星連合大会(2008), *ASC and SSJ* (2008)での発表内容に基づくものである。

① 余震の解析

余震の分布は地震の断層面の広がりにはほぼ対応していると考えられる。そこで、この地震の断層面の広がりと位置を推定するために、余震の解析をWaveform Relocation Methodによって行った。その結果、以下のことが明らかになった(図5を参照)。(i) 解析した余震分布の上限は海溝軸から約180km、深さ約15kmに位置する。(ii) 余震分布の下限は海溝軸からおおよそ300km、深さ約40km程度に位置する。(iii) 浅い地震(分布の上限の地震)では、観測波形に大きな後続波が認められる。これは、仮定した不均質速度構造モデルで再現できるが、横方向均質構造モデルでは再現できない。(iv) 推定した余震位置は、本研究で仮定したプレート境界の近傍になる。余震はすべてプレート境界型地震と考えられることと、余震分布面の傾斜角が本震の断層面解の傾斜角(つまりプレート境界の傾斜角)にほぼ一致することから、解析結果に内部的な矛盾はないと考えられる。ただし、深い余震の断層面解の傾斜角は本震の断層面解の傾斜角よりも大きい。このことは、深い余震位置付近からプレート境界の傾斜角が変化していることを意味するのかもしれない。

れない。(v) これらの余震に関する Global CMT 解の位置は、我々の推定した位置から系統的に海側にずれている。特に、深い地震についてずれの量が多い。このことの原因は今のところ不明であるが、余震分布は地震の力学を考える上で重要であることから、今後の詳細な研究が必要である。

なお、図5の構造モデルは数回の試行錯誤による改良の結果として得られているものであることを付記しておく。より系統的に構造モデルを改良していくことが今後の重要な課題の一つであると考え。

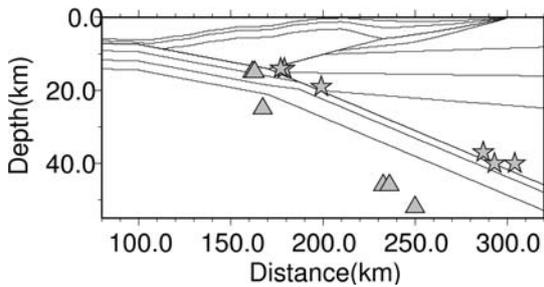


図5 2009年南スマトラ地震の余震の解析結果。震源域について仮定した地殻構造モデル(層の境界のみを示す)に地震の発生場所を投影したものである。星印が本研究の結果、三角印がGlobal CMT解である。本研究による推定位置は仮定したプレート境界(左上から右下に続く斜めの線で示される)近傍に位置する。仮定したプレート境界の傾斜角は約12度である。これは、本震の断層面解の傾斜角にほぼ一致するように設定したものである。一方、Global CMT解の位置は我々の推定位置よりも系統的に海側に決定されていることがわかる。Okamoto & Takenaka, ASC and SSJ (2008)の講演予稿集の図を引用した。

② 本震の断層すべり分布解析

上に述べた余震分布をもとにして断層面の位置と広がりを設定し、本震の断層すべり分布について予備的な解析を行った。その結果によると、3つの特徴的な(大きな)断層すべり領域が見出されている。すなわち、(i)地震発生後10-20秒の震央付近のすべり、(ii)発生後40-50秒の間の深い場所にあるすべり領域、(iii)50-70秒の間の浅いすべり領域、である。とくに(ii)のすべり領域は深さ30kmよりも深くに位置している可能性がある。これは、沈み込むプレートが陸側プレートのマントル部分と接している部分にこの断層すべり領域が位置している可能性を示す。このような(モホ面よりも)深い部分では、沈み込むプレートによってもたらさ

れた水分によって陸側マントル物質の剪断強度が低下して非地震領域になっているとの考えもある(例えばHyndmann et al., 1997)。我々の結果はそのような領域でも地震時の断層すべりが発生している可能性を示しており、地震発生の条件を詳しく考察するうえで重要な材料となる可能性がある。

現在、2007南スマトラ地震に関係するこれらの研究成果をまとめた論文を準備中である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3件)

① T. Okamoto and H. Takenaka, Effect of near-source trench structure on teleseismic body waveforms: an application of a 2.5D FDM to the Java trench, in *Advances in Geosciences*, vol. 13 (Solid Earth), edited by Kenji Satake, World Scientific Publishing Company, Singapore, 2009 (in press). (査読有)

② Taro Okamoto and Hiroshi Takenaka, Waveform inversion for slip distribution of the 2006 Java tsunami earthquake by using 2.5D finite-difference Green's function, *Earth Planets and Space*, **61**, e17-e20, 2009. (査読有)

③ 岡元太郎、震源を探る一地震の震源解析について一、玉川大学工学部紀要、第44号、23-34、2009. (査読無)

[学会発表] (計 9件)

① Taro Okamoto & Hiroshi Takenaka, Teleseismic Body Waveform Analysis of The 2007 Southern Sumatra Earthquakes With a 2.5D FDM (2), The 7th General Assembly of Asian Seismological Commission and The 2008 Fall Meeting of Seismological Society of Japan, November 25, 2008, Tsukuba International Congress Center (Tsukuba).

② Taro Okamoto and Hiroshi Takenaka, Teleseismic Body Waveform Analysis of The 2007 Southern Sumatra Earthquake With a 2.5D Finite-Difference Method, 日本地球惑星科学連合2008年大会、2008年5月29日、幕張メッセ国際会議場(千葉市)

③ Taro Okamoto and Hiroshi Takenaka, Resolution Analysis of Teleseismic Waveform Inversion of Rupture Process of Tsunami Earthquake Using 1D and 2.5D Green's

Functions, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会、2008 年 5 月 30 日、幕張メッセ国際会議場（千葉市）

④ Okamoto, T., and Takenaka, H., Effect of The Heterogeneous Structure Near The Source on The Teleseismic Body Waveforms From The Sunda Trench Earthquakes Analyzed by a 2.5D Finite-Difference Method, American Geophysical Union, 2007 Fall Meeting, December 14, 2007, The Moscone Center, San Francisco, U.S.A.

⑤ Okamoto, T., and Takenaka, H., Resolution Analysis of Teleseismic Waveform Inversion of Rupture Process of Tsunami Earthquake Using 1D and 2.5D Green's Functions, American Geophysical Union, 2007 Fall Meeting, December 14, 2007, The Moscone Center, San Francisco, U.S.A.

⑥ Taro Okamoto and Hiroshi Takenaka, Source Process of The July 17, 2006 Off Java Island Earthquake Analyzed by 2.5D FDM Computations, Asia Oceania Geosciences Society 4th Annual Meeting, August 4, 2007, Queen Sirikit National Convention Centre, Bangkok, Thailand.

⑦ Taro Okamoto and Hiroshi Takenaka, Source Process of The July 17, 2006 Off Java Island Earthquake by Using a 2.5D FDM Computations (2), 日本地球惑星科学連合 2007 年大会、2007 年 5 月 22 日、幕張メッセ国際会議場（千葉市）

⑧ Okamoto, T., and Takenaka, H., Source Process of The July 17, 2006 Java Earthquake by Using a Fine Crustal Structure Model of The Java Trench And a 2.5D FDM Computations, American Geophysical Union, 2006 Fall Meeting, December 12, 2006, The Moscone Center, San Francisco, U.S.A.

⑨ 岡元太郎・竹中博士、ジャワ海溝の微細地殻構造モデルと 2.5 次元差分法を用いた 2006 年 7 月 17 日ジャワ島沖地震の震源過程解析、日本地震学会 2006 年度秋季大会、2006 年 11 月 2 日、名古屋国際会議場（名古屋市）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡元 太郎 (OKAMOTO TARO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：40270920

(2) 研究分担者

竹中 博士 (TAKENAKA HIROSHI)

九州大学・理学研究院・准教授

研究者番号：30253397

(3) 連携研究者

なし