

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 30 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21340131

研究課題名（和文） スペクトル要素法を用いた波形インバージョンによる日本列島深部構造の決定

研究課題名（英文） Determination of deep structure under Japan using waveform inversion and Spectral-Element Method

研究代表者

坪井 誠司 (TSUBOI SEIJI)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球情報研究センター・部長

研究者番号：90183871

研究成果の概要（和文）：日本列島下の地球深部地震波速度構造モデルを地震波形のインバージョン解析により、深さ約 2000km まで、地震波の周期約 20 秒の精度で決定した。解析の際には数値地震波形をスペクトル要素法という数値解析手法により求めた。決定した地震波速度構造モデルは、地震波の P 波の構造と S 波の構造が異なった空間分布をしており、それぞれの地震波速度構造をもたらす原因が異なっている可能性があることを示唆している。

研究成果の概要（英文）：We obtained seismic velocity structure model under the Japanese Island using waveform inversion technique up to depth 2000km and the precision of about 20 seconds. To calculate synthetic seismograms, we used Spectral-Element Method. The obtained model shows different spatial distribution for P-wave and S-wave structure respectively, which may imply that the velocity structure is derived from different origins.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2010 年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2011 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
年度			
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

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：地球・惑星内部構造

1. 研究開始当初の背景

日本列島下の 3 次元地震波速度構造は、日本付近で起きる地震の性質を研究する上で基礎的なデータとなるために、これまでに多くの研究が行われ、様々な 3 次元モデルが得られている。これらのモデルは、そのほとんどすべてが実体波の走時読み取りを元にしたインバージョンにより求めたものである。しかし、日本列島下には複雑な形状で沈み込むプレートがあり、これらの構造による地震波線経路の 1 次元モデルからのずれを正しく

評価する必要があることは、すでに多くの研究により指摘されていた。しかし、このような影響を波動理論に基づいて考慮した研究はなかった。それは、日本列島下のような複雑な 3 次元構造の元で、理論地震波形記録を厳密に計算する手段がなかったことが主な理由であった。

2. 研究の目的

本研究では、複雑な 3 次元構造を考慮に入れた厳密な理論地震波形記録を計算可能なス

ベクトル要素法を用い、Adjoint 法により地震波速度パラメータのカーネルを計算して、波動理論に基づいたインバージョンを実施することを目的とする。地球内部構造を決定する領域は日本列島下部のマントル全体とする。地震波形は主に P 波と S 波を用い、これらからそれぞれの地震波速度構造を周期約 20 秒の精度で決定することを目的とする。

3. 研究の方法

研究方法は 2 段階に分かれる。それは、(1) 初期モデルに対する理論地震波形記録と地震波速度パラメータに対するカーネルの計算、(2) カーネルを用いた 3 次元地震波速度構造インバージョンの実行、である。(1) では適切な初期モデルの設定と、理論記録を計算するために用いる領域と理論記録の精度の決定が必要である。これらは、計算に利用可能な計算機資源の量によりその上限が決まる。(1)により理論記録を計算する領域が決まると、(2)のインバージョンを実行するための地震と観測点の組み合わせが決まり、領域内で起きた地震の中から、研究期間内にどこまでインバージョンに組み込むことが出来るかを定めることが出来る。これらの方針が決まると、地震と観測点の組み合わせに対してカーネルを計算し、インバージョンを実行して 3 次元地震波速度構造モデルを決定することになる。

4. 研究成果

日本列島規模の領域における地球内部地震波速度構造に対するカーネルを計算し、波形インバージョンにより地球内部地震波速度構造推定を実施した。ここでは、PC クラスターの 256 コアを用いて日本列島を含むアジア・太平洋地域下の地殻マントル地震波速度構造を P 波と S 波の周期 15 秒の精度で決定することを目標としたインバージョンを計画した。地震数は 100 個、観測点はそれぞれに対して 50 点以上用いた。図 1 には解析に用いた領域と地震震源と観測点分布を示した。

図 2 には計算したカーネルの例を示した。ここで示したカーネルは、P 波の traveltime misfit kernel と呼ばれるもので、図で青色、赤色の部分は、初期モデルに対して地震波速度異常を正負のどちらに修正しようとしているかを表している (たとえば、青色は高速側へのシフトを表す)。震源から観測点に向かう地震波線に沿って、カーネルは紡錘形の形状を示している。波線の周りでの速度構造に対する感度の空間的解像度はかなり粗いように見える。これは、ここで計算したカーネルの精度が 15-20 秒程度と実体波としては長周期であることによる。将来的には、計算の規模を考慮しつつ、より周期の短い地震波を用いることで分解能の向上を図ることが

必要である。

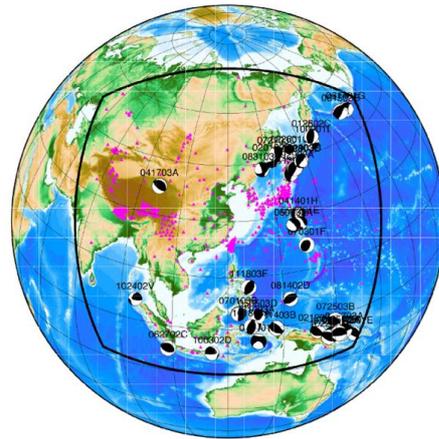


図 1. インバージョンに用いた地震の震央分布と観測点分布。黒い実線で囲った領域のマントル内部地震波速度構造をインバージョンにより求めている。地震の震央に重ねて震源メカニズムを表示してある。地震観測点は赤い点で示している。

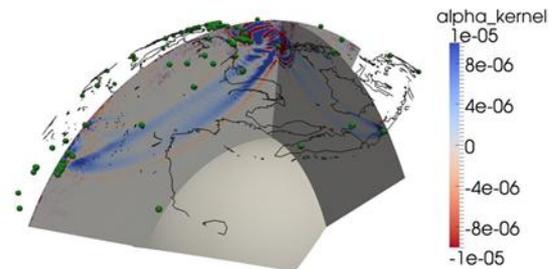


図 2. P 波のカーネルを鉛直断面で示した。ここで示したカーネルは、P 波の traveltime misfit kernel と呼ばれるもので、図で青色、赤色の部分は、初期モデルに対して地震波速度異常を正負のどちらに修正しようとしているかを表している (たとえば、青色は高速側へのシフトを表す)

図 3 にはインバージョンにより求めたマントル内部地震波速度構造を示した。波形インバージョンは、図 1 で示したカーネルを地震毎に重ねあわせたカーネルを計算し、観測波形と計算波形の一致が改善されるように地球内部構造モデルを修正する。インバージョンを行うときは、初期モデルに対して、反復的にインバージョンを実施してモデルを改善していくが、今回は反復は 1 回のみとなり、インバージョンを実施していくための第一段階の結果が得られたという解釈である。反復は 1 回のみであるために、モデルの

修正量は小さく、観測波形に対する計算波形の一致の改善はあまり顕著とは言えない。しかしながら、モデルの修正がP波とS波モデルに対して異なった分布を示していることは十分興味深いと言える。これは、インバージョンに用いた初期モデルがP波地震波速度構造モデルに基づいて得られたものとなっており、S波速度構造モデルはP波速度構造モデルからのスケール則によって得られたものとなっているからである。スケール則が地球内部構造の実態に即したものとなっているならばモデルの修正量もP波とS波で同じ分布となることが期待できるが、これが異なる分布を示すことは必ずしもスケール則が適用できない可能性があることを示すことになる。

本研究では、日本列島下の地球内部構造を決定するために、地震波形に基づいたインバージョン手法により地震波速度構造モデルを求めた。このような厳密な手法で日本列島下の地球内部構造を求めた研究はまだない。今後は、より短周期の地震波を用いることで分解能の高いインバージョンを実施し、より高精度な地球内部構造モデルを求めることが必要であるが、そのための波形インバージョン手法は確立できた。さらに多くの地震データセットと理論地震波形計算を実施することにより、高精度の地球内部構造モデル決定を目指す予定である。

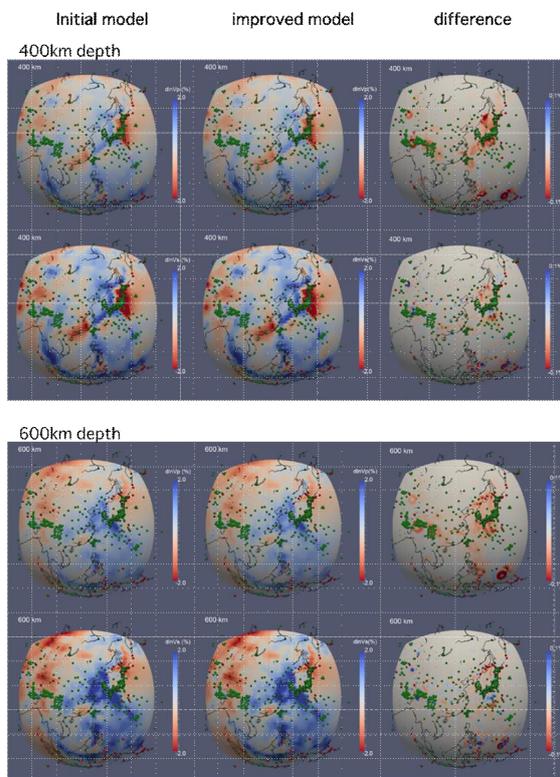


図 3. 波形インバージョンの結果。マントル内部深さ 400km(上)及び深さ 600km (下)の地

震波速度モデル。それぞれ、図の上側がP波速度構造モデル、下側がS波速度構造モデルを示す。また、図の左から、初期モデル、インバージョンによる修正モデル、モデルの修正量をあらわしている。緑色の丸は用いた地震の震央分布、赤い丸印は用いた観測点分布を表している。地震波速度構造モデルは青色が平均的なモデルよりも地震波速度が速い領域を、赤い色は平均的なモデルよりも地震波速度が遅い領域を表している。

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 8 件)

① To A., Fukao Y., Tsuboi, S., Evidence of a thick localized ultra low velocity zone inside the Pacific slow region at the base of the mantle, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 査読有, 184, pp. 119-133, 2011 <http://dx.doi.org/10.1016/j.pepi.2010.10.015>

② Butler, R., Tsuboi, S., Antipodal seismic observation of temporal and global variation at Earth's inner-outer core boundary, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, vol. 37, L11301, doi:10.1029/2010GL042908, 2010.

③ Nakamura, T., Tsuboi, S., Kaneda, Y., Yamanaka, Y., Rupture process of the 2008 Wenchuan, China earthquake inferred from teleseismic waveform inversion and forward modeling of broadband seismic waves, *Tectonophysics*, 査読有, vol. 491, 72-84, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2009.09.020>

④ Y. Yamagishi, H. Yanaka, K. Suzuki, S. Tsuboi, T. Isse, M. Obayashi, H. Tamura, H. Nagao, Visualization of geoscience data on Google Earth: development of a data converter system for seismic tomographic models, *Computers & Geosciences*, 査読有, 36, 373-382, doi:10.1016/j.cageo.2009.08.007 2010.

⑤ Y. Tono, Y. Fukao, T. Kunugi, S. Tsuboi, Seismic anisotropy of the Pacific slab and mantle wedge beneath the Japanese islands, *J. Geophys. Res.*, 査読有, vol. 114, B07307, doi:10.1029/2009JB006290- 2009.

⑥ T. Tanimoto, S. Tsuboi, Variational

principle for Rayleigh wave ellipticity, Geophys. J. Int., 査読有, 179, 1658-1668, 2009.
doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04360.x

〔学会発表〕(計9件)

① Seiji Tsuboi, Determination of Earth structure using waveform inversion and Spectral-Element Method for Eastern Asian region, American Geophysical Union, 2011年12月8日, アメリカ、サンフランシスコ市モスコニー会議場

② Seiji Tsuboi, Determination of Earth Structure using waveform inversion and Spectral-Element Method, Asia Oceania Geosciences Society, 2011年8月12日、中華民国、台北市国際会議場

③ Seiji Tsuboi, Source Process and Broadband Waveform Modeling of 2011 Tohoku earthquake using Spectral-Element Method, Asia Oceania Geosciences Society, 2011年8月11日、中華民国、台北市国際会議場

④ Masayuki Obayashi, Adjoint Tomography of East Asia, International Union of Geodesy and Geophysics, 2011年7月2日, オーストラリア、メルボルン市メルボルン会議場

⑤ Masayuki Obayashi, Determination of Earth structure using waveform inversion and Spectral-Element Method, American Geophysical Union, 2010年12月15日, アメリカ、サンフランシスコ市モスコニー会議場

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坪井 誠司 (TSUBOI SEIJI)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球情報
研究センター・部長

研究者番号: 90183871

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

大林 政行 (OBAYASHI MASAYUKI)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部
ダイナミクス領域・主任研究員

研究者番号: 30359179

東野 陽子 (TONO YOKO)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部
ダイナミクス領域・研究技術専任スタッフ

研究者番号: 90359183