

厳密な理論波形計算を用いた高解像度地球内部構造推定

竹内 希

東京大学地震研究所

1. 本研究の背景

地球内部を伝播する地震波を解析しグローバル地球内部構造を推定する研究は、地震学の中心的課題の一つと考えられている。これまでの研究では、計算機資源の限界から (1) (P波やS波の到達時刻など)観測地震波形データから抽出された一部の情報をデータとし、(2) (無限小波長近似などの) 近似を用いて、内部構造モデルパラメータ推定を実施していた。近年、(1) 観測地震波形データそのものをデータとし、(2) これと厳密な (有限波長の効果を厳密に考慮して計算された) 理論波形を直接比較することにより内部構造パラメータを推定する、「波形インバージョン」が注目されている。地震波形データに含まれる全情報を正確に抽出できるようになるため、内部構造モデルの精度と解像度の改善が期待できる。しかし膨大な計算量が問題となるため、従来の研究では理論波形計算の際に粗い近似を導入していて、厳密な理論波形を用いた「波形インバージョン」はまだ実現されていなかった。

2. 本研究の目的・意義

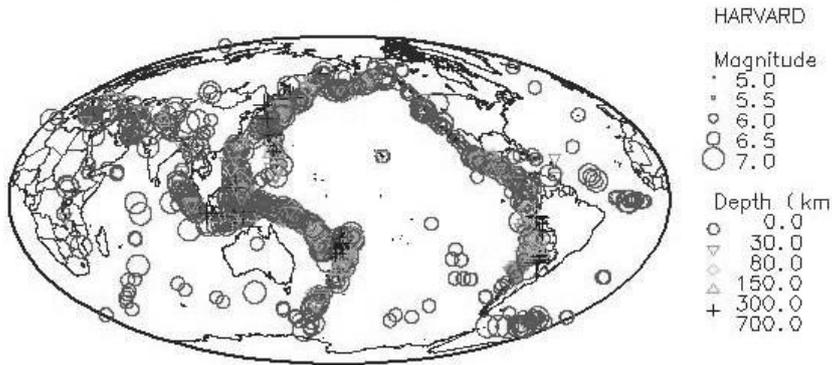
本研究では、HA8000 クラスターシステム及び地球シミュレーターを駆使し、厳密な理論波形を用いた波形インバージョンを実現する。また、得られた地球内部構造モデルから、マンテル対流上昇流の様式を制約する特徴的な不均質構造を検出する。

波形インバージョンは、これまでサンプリングの乏しかった地域のモデル解像度を改善することに大いに役に立つ。大きな地震の大部分はプレート境界で発生 (第1図) し、観測点の大部分は陸域に存在する。このため地震波のサンプリングには、必然的に大きな偏りが生じる (第2図右)。太平洋の下や、インド洋・アフリカの下は、地震・観測点数ともに乏しい領域なので、これまでの内部構造モデルの解像度が低かった。これらの領域は偶然にもマンテル対流上昇流域にあたるので、上昇流のダイナミクスを制約するような内部構造の情報が乏しかったとも言える。

実体波の到達時刻は(他のフェーズとの干渉のない)孤立した実体波フェーズ以外は計測が困難である。地震波には様々なフェーズがあり、後続波になるほど到達するフェーズの種類が多くなる。このため走時解析による内部構造推定では、初動P波及びその近傍のフェーズのみをデータとして用いてきた。従って得られた内部構造モデルでは、使用可能な情報量の限界から、上昇流域の解像度は乏しかった。一方で波形インバージョンを実施すれば、フェーズの干渉があっても解析上の困難は生じず、後続波の徹底活用が可能になり、上昇流域におけるサンプリングが改善される (第2図左)。実際に本研究の解析では、地震発生から約4時間長のデータを活用できており、同種の解析では類を見ない時間長のデータを活用できている。

上昇流ダイナミクスを制約するために特に注目すべき特徴は、上昇流に起因すると思われる高温異常域 (地震波速度構造では低速度異常域に対応する) の広がり、深さ 670 km の地球

1977/01/01 00:00-2007/09/30 24:00 N= 1423
H : 0.0-700.0km M: 6.5-9.5

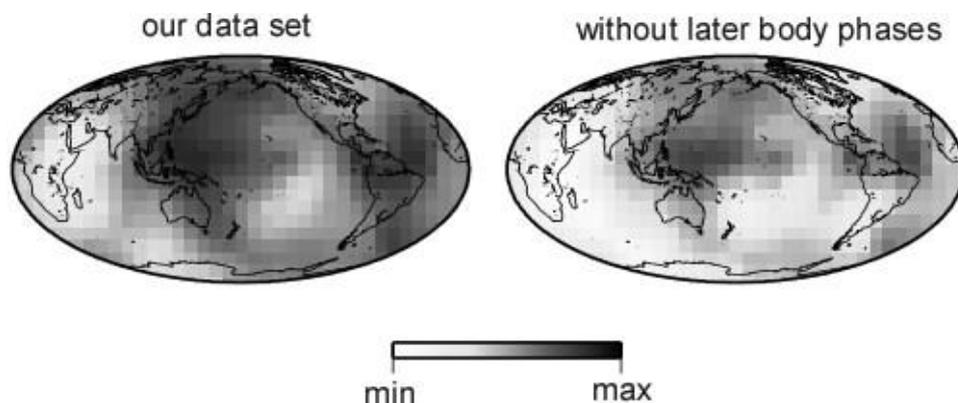


第1図：大地震の発生する地域。

世界の標準地震カタログの1つである，Harvard 地震カタログの中で，モーメントマグニチュードが6.5以上のイベントの分布. 1977/01/01-2007/09/30 に起こったイベントをプロットしてある.

内部不連続面の上下でどのようになっているかである. 670 km 不連続面は，マントルを構成する主要鉱物が相変化を起こしている面であり，この面によってマントル対流上昇流・下降流がともに抵抗力を受けると考えられている. 実際（比較的高い解像度の内部構造モデルが得られている）下降流域では，670 km において下降流（つまり沈み込むスラブ）が抵抗力を受け，不連続面上で一旦横たわるといふ描像が確立されている. それに対し，上昇流が670km不連続面で抵抗力を受け不連続面直下で停滞するのか，あるいは抵抗力を受けつつも不連続面を突き抜けるのかは，未だ良くわかっていない.

本研究では，後続波を徹底活用した波形インバージョンを実施することにより，上昇流域のモデル解像度を改善した. 得られたモデルから，670 km 不連続面を突き抜ける筒状の低速度異



第2図：後続波データを徹底活用した場合としない場合のサンプリングの比較。

我々のデータセット（地震発生から約4時間長のデータ）のマントル最下部におけるサンプリング（左）と，我々のデータセットから後続実体波（G1フェーズ以降のフェーズ）を除いたデータセットのサンプリング（右）の比較.

常が確認された。さらに、670 km 不連続面の上下で、筒の傾きが大きく変化することが確認された（第7図；後述）。このことは、上昇流は 670 km 不連続面で抵抗力を受け、その流れの向きを大きく変えつつも、そのまま突き抜けているという描像を示唆する。

3. 波形インバージョンによる内部構造推定問題の概要

波形インバージョンによる内部構造推定の中で、最も計算時間を要するのは、理論波形のモデルパラメータに対する偏微分係数計算である。詳細の説明は省略するものの、偏微分係数計算の主要部分は、非零要素をおよそ 5×10^{11} 個もつ疎行列の掛け算である。実際に内部構造推定を実現するには、この掛け算をそれぞれの周波数及び地震に対して（本研究では 512×191 回）実施する必要がある。

「厳密な理論波形計算」とは、この疎行列の掛け算を近似なしで計算することに対応している。この膨大な掛け算が計算機資源の限界から困難であったことが、波形インバージョンの実現を困難にしていた理由の1つである。（本研究ではこの他にも、適切な基底関数の選定や、微分演算の離散化手法を工夫により計算時間の短縮を実現している。）

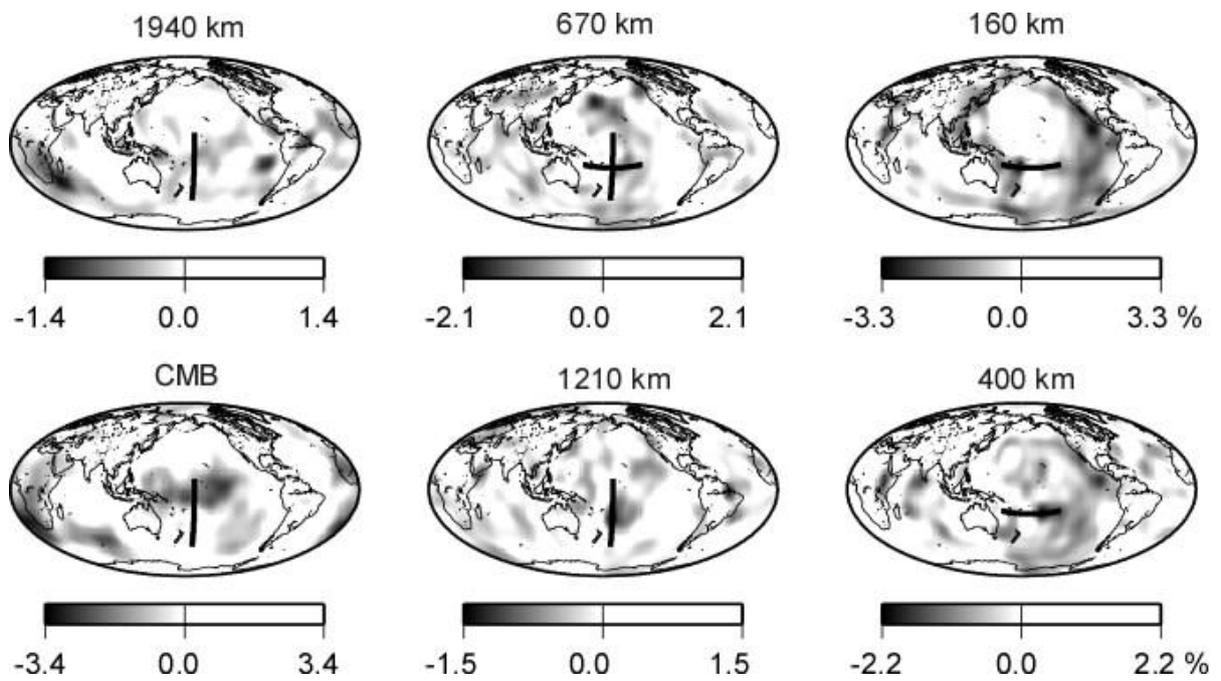
並列化手法は単純であり、疎行列を行毎に分割・グループ分けし、それぞれの行グループの掛け算を別々のCPUに割り振って計算する。各行グループ内の非零成分の個数がほぼ等しくなるように行の分割を実施する。本計算に要する時間は1地震あたり、地球シミュレーターでは8時間（実時間、8ノード64CPUを使用）、HA8000では7時間（実時間、64CPU 256コアを使用）であった。地球シミュレーターでは平均ベクトル長をできるだけ長くするように、HA8000ではメモリ参照ができるだけ連続になるようにループの順番を入れ替えてあるが、計算に必要な演算回数は同じである。

4. 平成20年度の成果

平成19年度の研究で、波形インバージョンによる全マントルS波速度構造推定を実施し、南西太平洋の下の特徴的な上昇流域の低速度異常構造を検出していた（Takeuchi, 2007によるモデルSH18CE；第3図及び第7図左）。本年度はこの描像の妥当性を、特異値分解（Wiggins, 1972）を用いて検証した。具体的には、全マントル速度構造を表現するのに用いる基底の数を様々に変化させてモデル推定を実施し、注目している構造が、用いる基底の数によらず普遍的にみられる特徴であるかどうかを検討する。多くの基底を用いて推定される構造モデルは、解像度は高いが精度は低いモデルであり、少ない基底を用いて推定されるモデルは、解像度は低い精度は高いモデル（ロバスト成分を表したモデル）である。基底の数によらず見られる特徴は、解像度・精度ともに十分な信頼性の高い特徴であると言える。

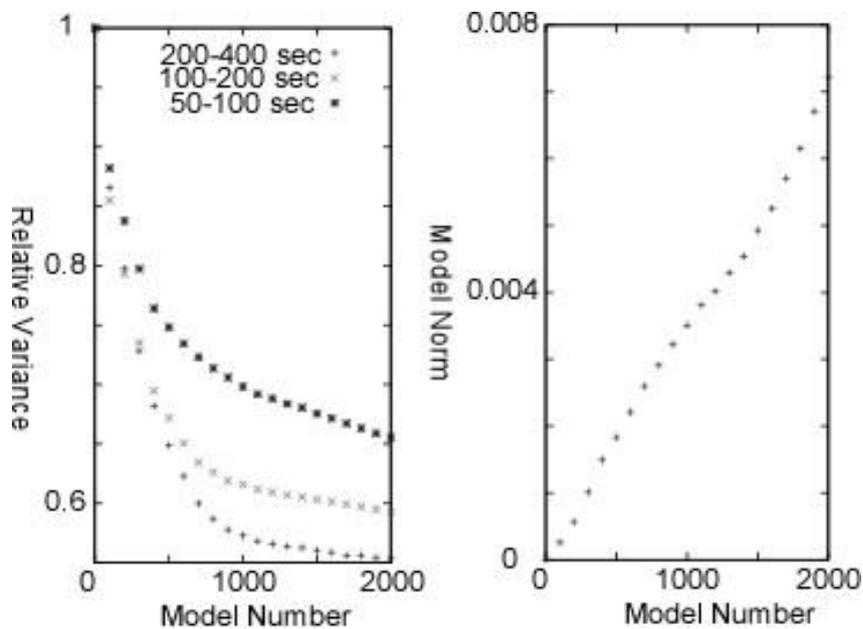
基底の数とデータ残差の関係をプロットしてみると、全体的な傾向として、基底の数を増やせば増やすほど残差は相対的に改善されるが、モデルのノルム（不均質構造のRMS振幅に対応する）は増大するという特徴が見られる（第4図）。つまり、基底の数を増やすほど、大きな不均質を導入しつつ残差を改善していると言える。

第4図をさらに良く見てみると、基底の数が800から1200のモデルにかけて、モデルのノルムの増大が緩やかであるのに、残差が改善され続けることがわかる。これから、ノルムをあまり増やさずに大きな残差改善を実現するモデルとして、基底の数が1200の時のモデルを最適モデル（MODEL-1200；第5図）として選定することとする。



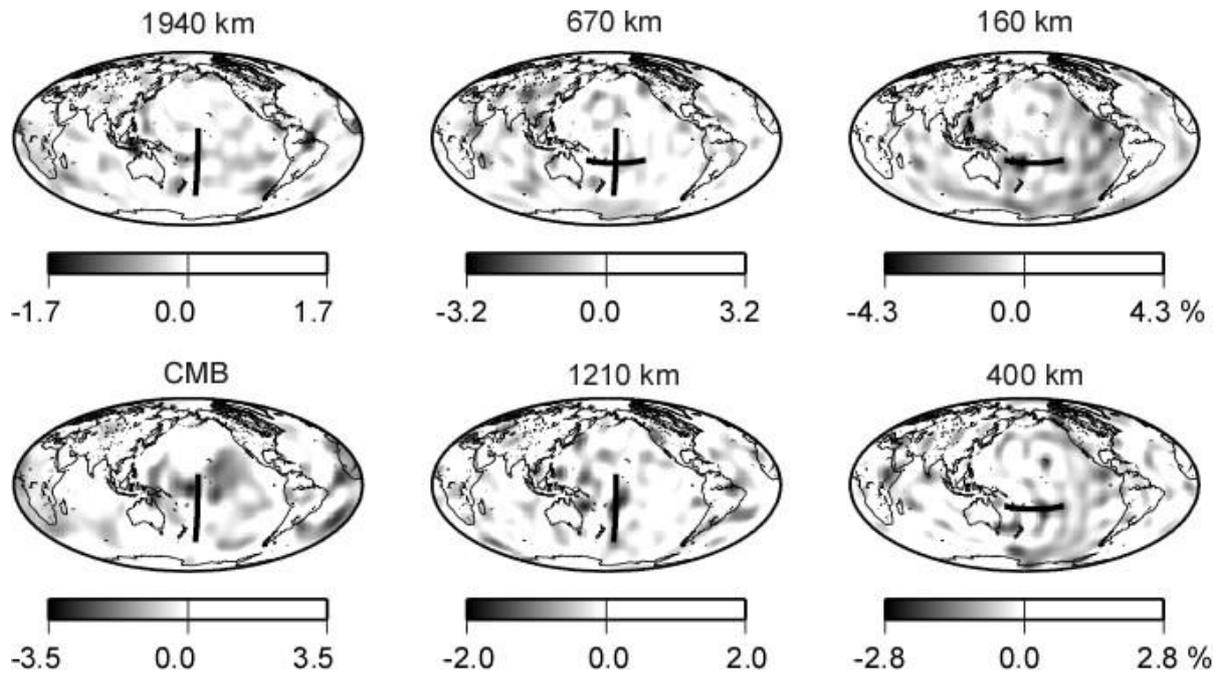
第3図:平成19年度に推定された構造モデル(SH18CE)。

Takeuchi (2007) によって推定された全マントルS波速度構造モデル (SH18CE). CMB 及び様々な深さにおける標準球対称モデル(PREM)からのずれをプロットしてある. 色がついている領域が高温異常に対応すると思われる低速度異常域を表す. 太い実線における断面図を第7図に示してある.



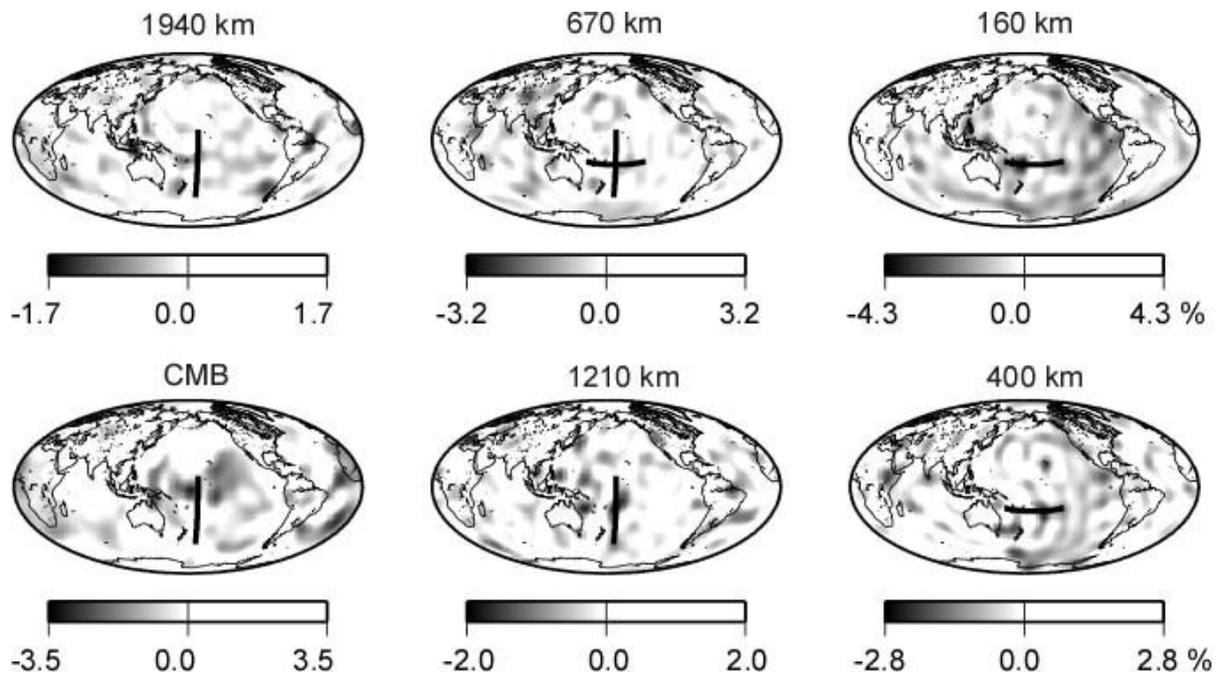
第4図: 基底数(Model Number)と残差及びモデルノルムの関係。

用いる基底数を様々に変化させて推定した場合の, それぞれの構造モデルに対するデータ残差(Variance)とモデルノルム(Model Norm). Variance は周波数帯域毎に別々に計算し, 初期モデル(Model Number = 0)に対する残差により規格化した値をプロットしてある.



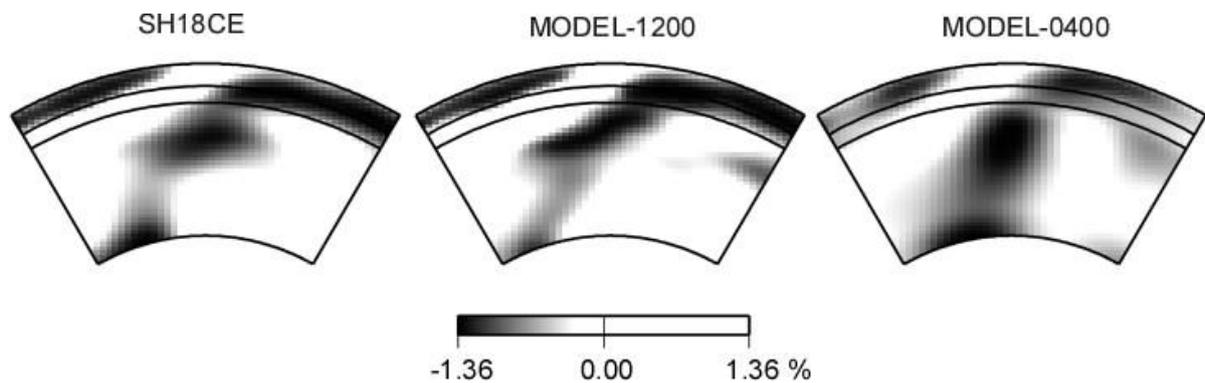
第5図：平成20年度に推定された最適モデル(MODEL-1200)。

1200の基底を用いて推定された最適モデル。その他の詳細は第3図と同様。



第6図：平成20年度に推定されたロバストモデル(MODEL-0400)。

400の基底を用いて推定されたロバストモデル。その他の詳細は第3図と同様。



第7図：本研究で推定されたモデル間の南西太平洋下低速度異常構造の比較。
SH18CE(第3図), MODEL-1200(第5図), MODEL-0400(第6図)における太線における断面図の比較。各断面図中の太い実線は、深さ400km及び670kmにある不連続面の位置を表す。

一方で、データの残差を周波数別に見てみると、長周期データ(200-400 sec)では400程度の基底数でデータ残差を大きく減らすことが、それ以上基底数を増やしても残差のさらなる改善はあまりない。短周期データ(50-100 sec)では、400程度の基底数でデータの残差は相当減るが、それ以降も緩やかな残差改善が見られることがわかる。このことから、すべての周波数帯域のデータに対して相当の残差改善を実現する最低限のモデルとして、基底数400のモデルをロバストモデル(MODEL-0400; 第6図)として選定する。

平成19年度のモデル(SH18CE; 第3図)及び、今回推定した最適モデル(MODEL-1200; 第5図)、ロバストモデル(MODEL-0400; 第6図)を比較すると、前者2つのモデルは高い相関を持つが、ロバストモデルは他の2つのモデルと相関が低いことがわかる。実際にSH18CEとMODEL-1200の相関係数は0.72であるが、SH18CEとMODEL-0400の相関係数は0.42に過ぎない。しかしながら南西太平洋の下の着目している低速度異常域は、どのモデルでも同様な広がりが見られる(第7図)。このことからこの特徴は信頼性の高い特徴であると言える。

5. まとめと今後の課題

平成19年度の研究で、波形インバージョンによる全マントルS波速度構造推定を実施し、南西太平洋の下に、筒状の低速度異常構造を検出した。平成20年度にHA8000を用い、着目している低速度異常域の信頼性について検討し、データから良く制約された信頼性の高い特徴であるとの結論を得た。

地球シミュレーター上で開発した内部構造推定ソフトウェアをHA8000に移植をし、正しく動かすことには成功した。現状では、各CPUあたり(4コアあたり)およそ 10^{14} 回の浮動小数点演算を要する計に約7時間要している。つまり実行性能は4GFLOPS程度であり、理論上のピーク性能(36.8GFLOPS)の10%強であり、まだ性能改善が可能であると考えられる。メモリ参照の衝突が性能劣化の主たる原因であると考えられるので、今後改善に努めたいと思う。

本研究で実施したのはS波速度構造推定であり、3成分ある地震波形記録のうちS波速度に敏感な1成分(トランスバース成分)のみを用いている。3成分波形記録を用いたP波速度・S波速度構造の同時推定が次なる課題となるが、現在の計算よりもさらに1桁以上多くの計算

量を要する。今後コーディングの改善とともに、さらなる計算機の性能改善に期待して、同時推定を実現したい。

参 考 文 献

Takeuchi, N. 『Whole mantle SH velocity model constrained by waveform inversion based on three-dimensional Born kernels』, Geophysical Journal International, vol.169, 1153-1163, 2007

Wiggins, R.A. 『The general linear inverse problem: implication of surface waves and free oscillations for earth structure』, Rev. Geophys. Space Phys., vol.10, 251-285, 1972