

3. 1. 4 房総半島での自然地震観測による構造調査（首都圏）

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 房総半島での自然地震観測による構造調査

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
東京大学地震研究所	教授	平田 直	hirata@eri.u-tokyo.ac.jp
東京大学地震研究所	助教授	卜部 卓	urabe@eri.u-tokyo.ac.jp
東京大学地震研究所	助手	酒井慎一	coco@eri.u-tokyo.ac.jp
東京大学地震研究所	助手	五十嵐俊博	igarashi@eri.u-tokyo.ac.jp
東京大学地震研究所	助手	萩原弘子	hagiwara@eri.u-tokyo.ac.jp

(c) 業務の目的

制御震源による地震探査は、火薬による発破、パイロサイス、エアガンなどにより非常に多くの点で弾性波を放射し、その反射波・屈折波を非常に密なアレイ観測網で記録することによって、プレート境界などの顕著な反射面や、詳細な二次元速度構造の推定を行っている。しかし、震源が地表面近くにあるため、弾性波は地殻の深部までは到達しにくい。そのため、地殻浅部の構造は詳細に求められるが、より深部の構造、沈み込むプレート近傍の地震発生層の構造については高い解像度で推定することが難しい。

一方、自然地震による地殻構造探査は、観測点到達時刻の不確かさや構造とのトレードオフによる発震時刻・震源位置の不確かさがあり、また、地震は非一様に分布するため、解像度は制御震源には及ばないものの、より深部の情報、震源断層そのものの情報をもたらすことに利点がある。

そこで、本業務においては、制御震源では明らかにすることができない地殻深部の弾性波速度構造、フィリピン海プレートと関東地方を形成するプレートとの境界近傍の構造を、自然地震を用いて明らかにし、首都圏に被害を発生させる地震の震源断層のイメージングを行うことを目的としている。

(d) 5カ年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

- 1) 平成14年度：房総半島を縦断する測線配置を計画し、測線全体の下見および9点の設置工事を完了した。また、東京大学地震研究所内に、南関東周辺で発生している地震および遠地地震の地震波形を切り出し、収録するシステムを構築した。また、既存の地震観測網のデータを用いて小繰り返し地震活動の解析を行った。
- 2) 平成15年度：昨年度に引き続き新規観測点の設置作業を行い、計画30点全点の設置を完了した。新規設置点で得られた近地および遠地地震の波形記録は、周辺の既存観測点のデータを併せて蓄積している。
- 3) 平成16年度：本計画により設置された地震観測点の維持・管理およびデータ収録を継続

して行った。また、得られた遠地地震記録に対してレシーバー関数の予備解析を行った。

4) 平成17年度：隣接地域のデータの品質を考慮して1観測点を新設し、全31観測点の維持・管理およびデータ収録を行った。レシーバー関数法および二重走時差トモグラフィ法を適用することにより、房総半島下の地殻深部構造を明らかにした。

5) 平成18年度：新規に設置した地震観測点の維持・管理およびデータ収録を継続し、年度末までに撤収する。トモグラフィ法およびレシーバー関数法により得られた地震波速度構造をまとめ、震源断層のイメージングを行う。

(e) 平成17年度業務目的

本研究では、制御震源では明らかにすることができない地殻深部・上部マントルの弾性波速度構造を自然地震データによって調べ、フィリピン海プレートと関東地方を形成するプレートとの境界近傍の構造を明らかにし、首都圏に被害を発生させる地震の震源断層のイメージングを行うことを目的としている。平成17年度も引き続き房総半島稠密地震観測アレイとその周辺観測点で観測された波形記録を収録する。収録されたデータを基に、まず、近地および遠地地震波形を用いたレシーバー関数解析を行う。また、近地地震記録からP波およびS波の到達時刻を読み取り、二重走時差トモグラフィ法を適用して房総半島下の深部地殻構造を推定し、震源断層のイメージングに資する研究を推進する。

(2) 平成17年度の成果

(a) 業務の要約

平成17年度は、既設30点に1観測点を新たに加え、計31観測点からなる房総アレイの維持管理およびデータ収録を実施した。本業務では、関東地方とその周辺に設置されている既存観測点で得られたデータを含めて、近地・遠地地震のデータを蓄積しており、これまで2年に及ぶ地震波形データが蓄積された。

本アレイが設置されている房総半島下は、陸側プレートの下に南方からフィリピン海プレートが沈み込み、東方から太平洋プレートが沈み込んでいる。とりわけ、沈み込むフィリピン海プレートの上境界では1923年関東地震など、M8クラスの巨大地震が繰り返し発生していることが知られており、この地域の地殻構造を調べることは、震源断層のイメージングを行う際にも重要である。本プロジェクトによって制御震源を用いた地殻構造探査が行われ、フィリピン海プレート上面の形状が明らかにされたが、プレート内部の高解像度な弾性波速度構造は得られていない。この地域での詳細な深部地殻速度構造、とりわけ、沈み込むフィリピン海プレートの速度構造を推定するため、レシーバー関数解析および、二重走時差トモグラフィ法 (Double-difference tomography) によるP波およびS波の走時インバージョン解析を行った。その結果、制御震源では明らかにできなかった深さ20km以深の地殻構造が明らかとなり、とりわけ、北方に向かって沈み込むフィリピン海プレートの上境界位置が明瞭に推定された。また、フィリピン海プレート内に低速度層を持つ

弱面の存在が示唆された。

(b) 業務の成果

本業務では、房総半島地域に平成 15 年度までに 30 地震観測点、今年度初めに 1 観測点からなる稠密アレイ観測点を新設し、既存の観測網データも併用した自然地震観測を行っている。これらは平成 14 年度に実施された制御震源による地殻構造探査測線に沿うように、千葉県安房郡白浜町（2006 年 3 月 20 日より南房総市）から佐原市（2006 年 3 月 27 日より香取市）にかけて房総半島を縦断する測線に配置した。測線長は約 125km、周期 30 秒から 0.02 秒の間で振幅・位相特性が平坦な中周期地震計（CMG-40T）を約 10～15km 間隔で 10 点設置し、その間を埋めるように、固有周期 1 秒の短周期地震計（L-4G-3D）を 21 点、計 31 点を設置している。観測点間隔は最近接部分で約 2km、最も広い所で約 10km である（図 1）。また、本観測では、測線上に独立行政法人防災科学技術研究所によって設置されている高感度地震観測点が 3 点（嶺岡 N.MINH、市原 N.ICHH、八日市場 N.YKIH）あるため、これらの観測点も考慮した測線配置となっている。

得られた波形記録は、房総半島で発生している地震については気象庁等による一元化震源カタログの速報値を、遠地地震記録についてはアメリカ地質調査所で決定された精密震源カタログあるいは速報震源カタログを基に切り出しを行っている。

本業務の主な目的は、房総半島下の深部地殻構造、とりわけ沈み込むフィリピン海プレート¹の速度構造を推定することである。そこで、レーシーバー関数解析¹および二重走時差トモグラフィ法（Double-difference tomography）²による、P波およびS波の走時インバージョン解析を行い、深部地殻構造の推定を行った。

1) レシーバー関数法による地殻構造探査

レーシーバー関数は、観測点で得られた地動の水平動動径成分を上下動成分でデコンボリューションすることによって得られる。この処理により、ある速度境界面でP波からS波に変換して観測点に到達した波を抽出でき、観測点近傍下の速度構造が推定可能となる。ここでは、デコンボリューション処理時に、マルチテーパー法³、⁴を用いたレーシーバー関数解析⁵を行った。

レーシーバー関数から弾性波速度構造を推定する方法としては、1)相対時間のある標準速度構造を基に深度に変換する方法、2)いくつかの多重変換波の到達時刻を併せて境界面の深さとそこから地表面までの平均速度を推定する方法、3)フォワードモデリング、インバージョンによる観測レーシーバー関数と計算レーシーバー関数とのフィッティングによる速度構造の推定法等がある。1)は各変換相がある速度境界面でのP S変換であると仮定して境界面の位置を推定する方法である。仮定している速度構造がその領域全体で1次元成層構造として近似できる場合は、簡単な手続きによって構造を推定することが可能であるが、構造の不均質性が強くなった場合、速度勾配の大きさや多重変換の影響などにより、必ずしも明瞭

な変換相が現れるとは限らない。2)は境界面の深度に加えて、地表面から境界面までの平均速度および平均 V_p/V_s 比も推定することが可能である。しかし、1)と同様に構造が不均質だった場合の相の同定に問題が残る。3)は速度勾配、速度境界面を考慮した多層モデルが構築可能であるが、解の一意性を満足するために困難を伴う。

房総半島下は水平方向に短波長に変化する、非常に複雑な速度構造を持つ可能性が高い。そこで本解析では、まず、堆積層、上部地殻、下部地殻および上部マントルを想定した4層からなる単純な1次元成層構造を仮定してレシーバー関数を計算し、観測から得られたレシーバー関数に最も適合する速度構造モデルを推定した。

レシーバー関数解析に使用した観測点を図2に、使用した地震を図3に示す。房総アレイのデータは2004年2月以降約1.5年間、防災科学技術研究所、気象庁および大学による既存観測点は2002年8月以降の約2.5年の間に記録された、M5.5以上、震央距離30度～90度の範囲内のデータを使用した。

推定された地表面から深さ5kmまでの平均S波速度を図4に示す。房総半島周辺には広範囲にわたって厚い堆積層に対応すると考えられる低速度域が推定された。次に、モホ面の深度分布を推定した(図5)。ここで得られる値は正の速度勾配が最も大きい所であると考えられるが、房総半島下においては、陸側モホ面、沈み込むフィリピン海プレートのモホ面、沈み込む太平洋プレートのモホ面、その他、の4通り考えられる。4層構造を仮定した結果は、推定された深度は概ね沈み込むフィリピン海プレートのモホ面を表すものが多いとは考えられるが、観測点間のばらつきが大きく、変換点をより詳細に検討する必要がある。

2) 二重走時差トモグラフィ法による弾性波速度構造の推定

二重走時差トモグラフィ法は精密震源決定法の一つである二重走時差震源決定法のアルゴリズムを利用した走時インバージョン法であり、走時の絶対値と走時差の両方を利用した震源位置決定とともに三次元速度構造モデルを推定している。ここで、二重走時差とは、ある観測点で検出された2つのイベントの観測走時と計算走時の間の差のことである。二重走時差データを用いることにより、震源の相対位置の精度を上げ、地震の集中している領域の速度構造の分解能をあげることが可能となっている。

図6に本解析に用いた観測点分布を示す。使用観測点は房総アレイ30点、防災科学技術研究所、気象庁および東京大学地震研究所による既設点96点、および制御震源探査における57の受振点からなる、計183観測点である。図7に使用イベントを示す。本解析では2004年2月から2006年3月に房総半島周辺で発生した540個の自然地震、および2002年に実施された本プロジェクトによる弾性波探査(房総2002)による12箇所の爆破震源を使用した。房総2002では、最大オフセット約140kmの測線上の2437箇所の観測点で、50m(1737箇所)ないし100m(700箇所)間隔で爆破震源が記録されている(詳細は、本プロジェクト平成14年度報告書1.大深度弾性波探査 1.2 房総半島縦断地殻構造探査(房総2002))

を参照)。この観測点内、約 2km 間隔で計 57 箇所を選んで、P 波到着時刻を読み取りトモグラフィ法のデータとした。

二重走時差トモグラフィ法のグリッド間隔は、水平方向はXグリッド (E30S) が 20km間隔、Yグリッド (N30E) が 10km間隔であり、深さ方向 (Zグリッド) は、深さ 50kmまでが 5km間隔 (12 グリッド) で、さらに、60、70、80、100kmにグリッドを置いた (図 8)。初期構造は関東地方の標準的な 1 次元速度構造モデル⁷⁾の浅部を平成 14 年度に房総半島で実施された広角反射法地震探査から得られた速度構造を平均化した 1 次元速度構造に置き換えて使用した (図 9)。インバージョンに使用した絶対走時数は 72,779、走時差データはP波で 198,289、S波で 135,877 である。6 回の繰り返し計算後の走時残差は 0.54 秒から 0.33 秒へと減少した。

平成14年度に房総半島で実施された制御震源探査測線および房総アレイの測線に位置しているY5断面を含む、北東-南西方向の断面図を図10に示す。最上部地殻のP波速度構造は、北部および南部で高速度である一方、中央部は厚い堆積層に対応した低速度層が見られている。その下には、南から北へ沈み込んでいるフィリピン海プレートが高速度として明瞭に見られる。また、高速度帯のスラブの上部には、海洋性地殻と考えられる低速度帯が見られる。このようなフィリピン海プレートの速度構造は、西側ほど明瞭に見られるが、東側ではより複雑になっている。

沈み込むフィリピン海プレートの上境界は反射法地震探査からも得られている⁸⁾。南部については両者とも30度の傾斜角で深さ20kmまで沈み込んでおり、概ね調和的な結果を示している。しかしながら、房総半島下ではその後も北に向かって約20度の傾斜角で深さ35km程度まで沈み込んでイメージングされており、深さ20km程度でほぼ平坦になる反射法地震探査の結果とは異なっていた。房総半島下の中央部では、フィリピン海プレートの上境界は従来の結果よりも約10km深い位置にあることが本解析によって明らかとなった。

次に、北西-南東断面の一例としてX9測線の断面図を図11に示す。太平洋プレートの海洋性地殻からフィリピン海プレート上境界まで、深さ40kmから90kmにわたって低速度域が広がっている。この低速度域は、太平洋プレートの海洋性地殻における脱水によって生じたものかもしれない。

以上の結果から得られたフィリピン海プレートの上境界深度を図12に示す。新しく得られたフィリピン海プレートの上境界深度は、Sato et al. (2005)⁸⁾と房総半島より西側では一致している。従来のモデルでは、房総半島の下でプレートの上表面がほぼ水平に近かったが、新しいモデルでは、プレートの沈み込み角度がモデルの西側と同程度になっている。

(d) 結論ならびに今後の課題

房総アレイを含む房総半島周辺に設置された観測点にレーザー関数法を適用し、大まかな地下の境界面深度を明らかにし、震源断層をイメージングするための基礎資料を得た。また、房総半島下で二重走時差法による走時インバージョン解析 (Double-difference

tomography) を行い、沈み込むフィリピン海プレートの上境界とその内部構造を明らかにすることができた。なお、本研究は、平成 18 年度に得られるデータも加えて継続して行う予定である。本解析によって得られた速度構造を用いて、房総 2002 の広角反射法データの再解析を行う必要があり、これも平成 18 年度の課題である。さらに、今後、レーシーバ関数法、トモグラフィ法、反射法地震探査の結果を比較し、より詳細に震源断層をイメージする予定である。

(e) 引用文献

- 1) Ammon, C. J., The isolation of receiver effects from teleseismic P waveforms, Bull. Seism. Soc. Am., 81, 2504-2510, 1991.
- 2) Zhang, H., and C. Thurber, Double-difference tomography: The method and its application to the Hayward fault, California, Bull. Seismol. Soc. Am, 93, 1875-1889, 2003.
- 3) Thomson, D. J., Spectrum estimation and harmonic analysis, IEEE Proc, 70, 1055-1096, 1982.
- 4) Park, J., Lindberg, C. R., and F. L. Vernon III, Multitaper spectral analysis of high-frequency seismograms, J. Geophys. Res., 92, 12675-12684, 1987.
- 5) Park, J., and V. Levin, Receiver functions from multi-taper spectral correlation estimates, Bull. Seism. Soc. Am., 90, 1507-1520, 2000.
- 6) Waldhauser, F., HypoDD – A program to compute double-difference hypocenter locations, U. S. G. S. Open File Report, 01-113, 25pp., 2001.
- 7) Mikumo, T., A study on crustal structure in Japan by the use of seismic and gravity data, Bull. Earthq. Res. Inst., 44, 965-1007, 1966.
- 8) Sato, H., N. Hirata, K. Koketsu, D. Okaya, S. Abe, R. Kobayashi, M. Matsubara, T. Iwasaki, T. Ito, T. Ikawa, T. Kawanaka, K. Kasahara, S. Harder, Earthquake source fault beneath Tokyo, Science, 309, 462-464, 2005.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
五十嵐 俊博	関東地方の相似地震活動	日本地震学会秋季大会	平成 17 年 10 月 20 日
Toshihiro Igarashi and Naoshi Hirata	Crustal structure beneath the Kanto-Koshinetsu region, central Japan inferred from receiver functions	American Geophysical Union Fall Meeting, American Geophysical Union, San Francisco	平成 17 年 12 月 9 日

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定
なし

(2) 平成 18 年度業務計画案

維持・管理を行っている房総アレイ観測点のデータ収録を継続し、年度末に撤収作業を行う。また、多層構造を仮定したレシーバー関数解析および、二重走時差法による走時インバージョン解析を平成 18 年度に得られるデータも加えて継続して行い、沈み込むフィリピン海プレートの上境界とその内部構造を明らかにする。さらに、これらの結果と反射法地震探査の結果を比較し、より詳細な震源断層のイメージングを行う。

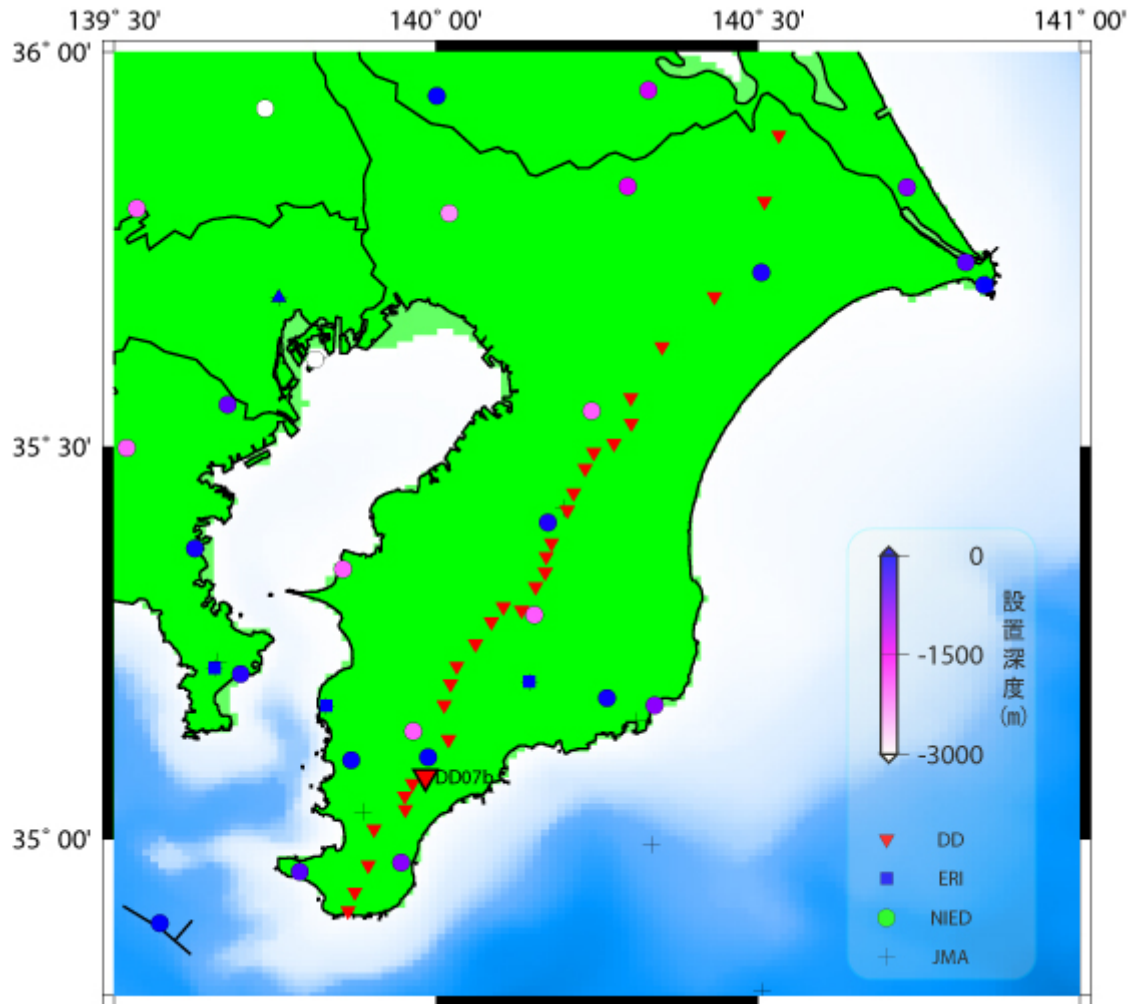


図1 房総半島周辺の地震観測点配置図（2006年3月31日現在）。本研究で新規に設置した稠密アレイを赤色の逆三角印で表し、本年度新規設置点を大きく記した。東京大学地震研究所、防災科学技術研究所、気象庁の既存点をそれぞれ四角、丸、十字印で示し、設置深度でスケールしている。

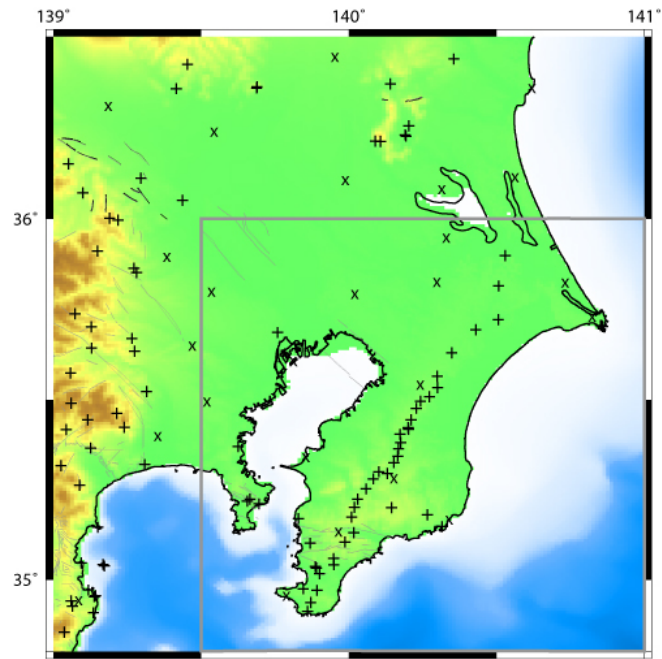


図 2 レシーバー関数解析に使用した観測点。図 4、図 5 では灰色枠内のみを示す。

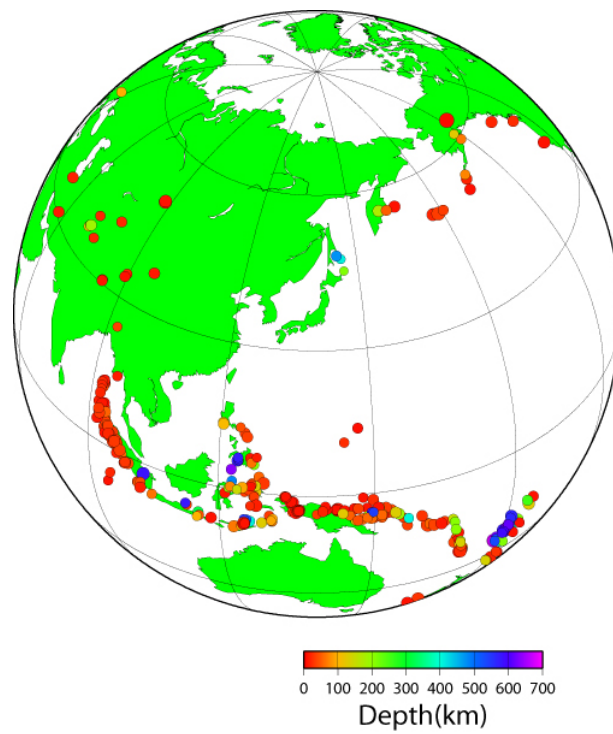


図 3 レシーバー関数解析に使用した地震。

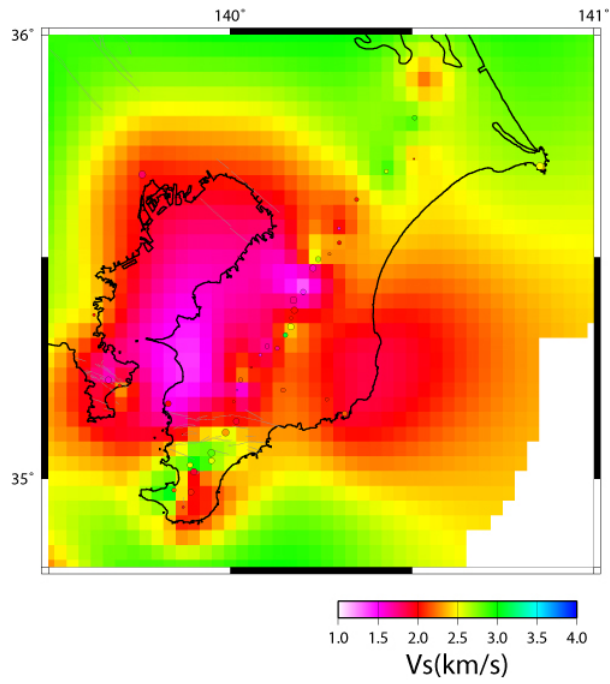


図4 深さ 5km までの平均 S 波速度分布図。

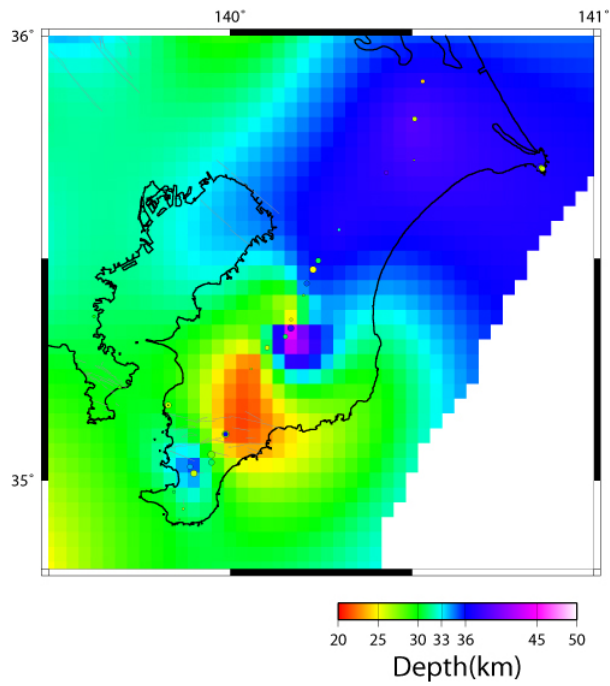


図5 モホ面深度分布。

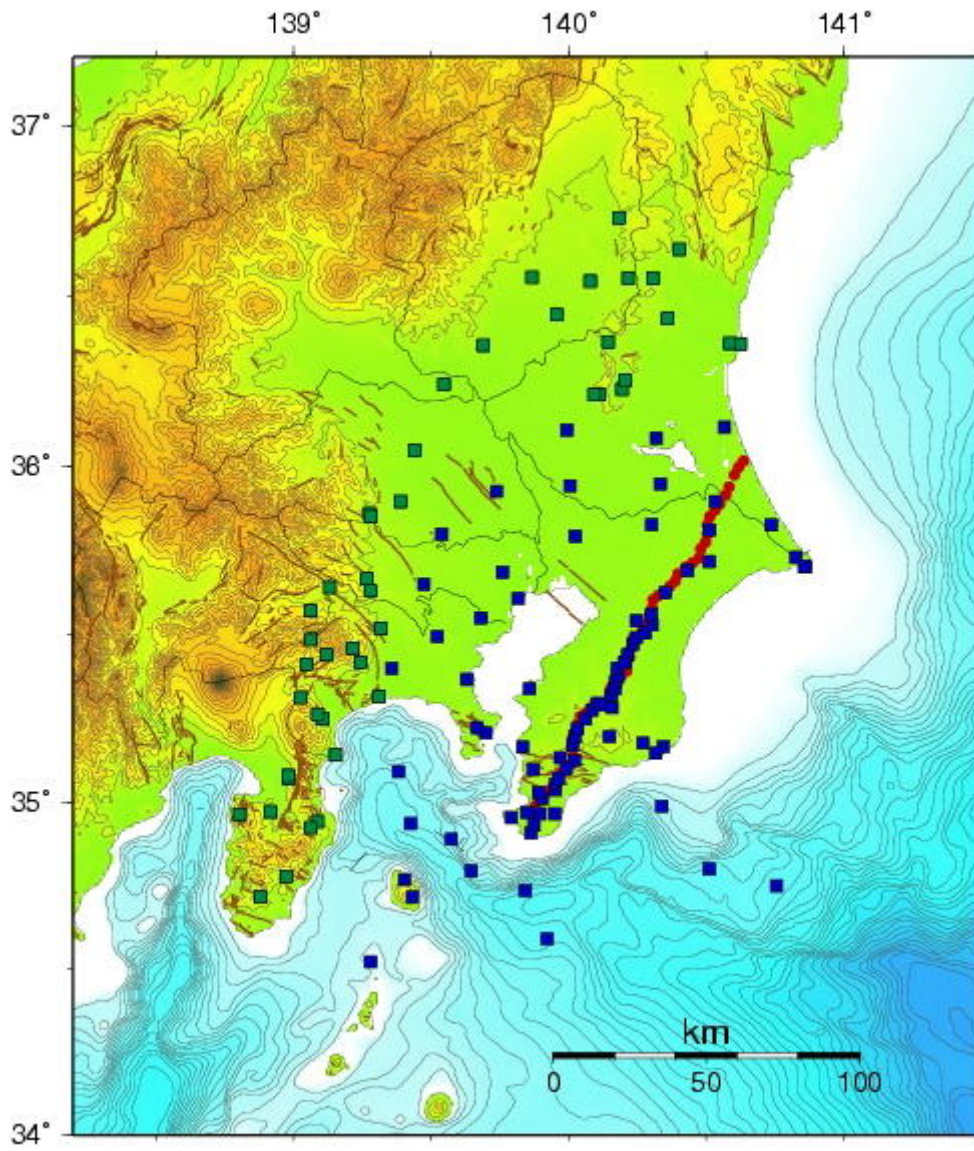


図 6 本研究で使用了観測点分布。

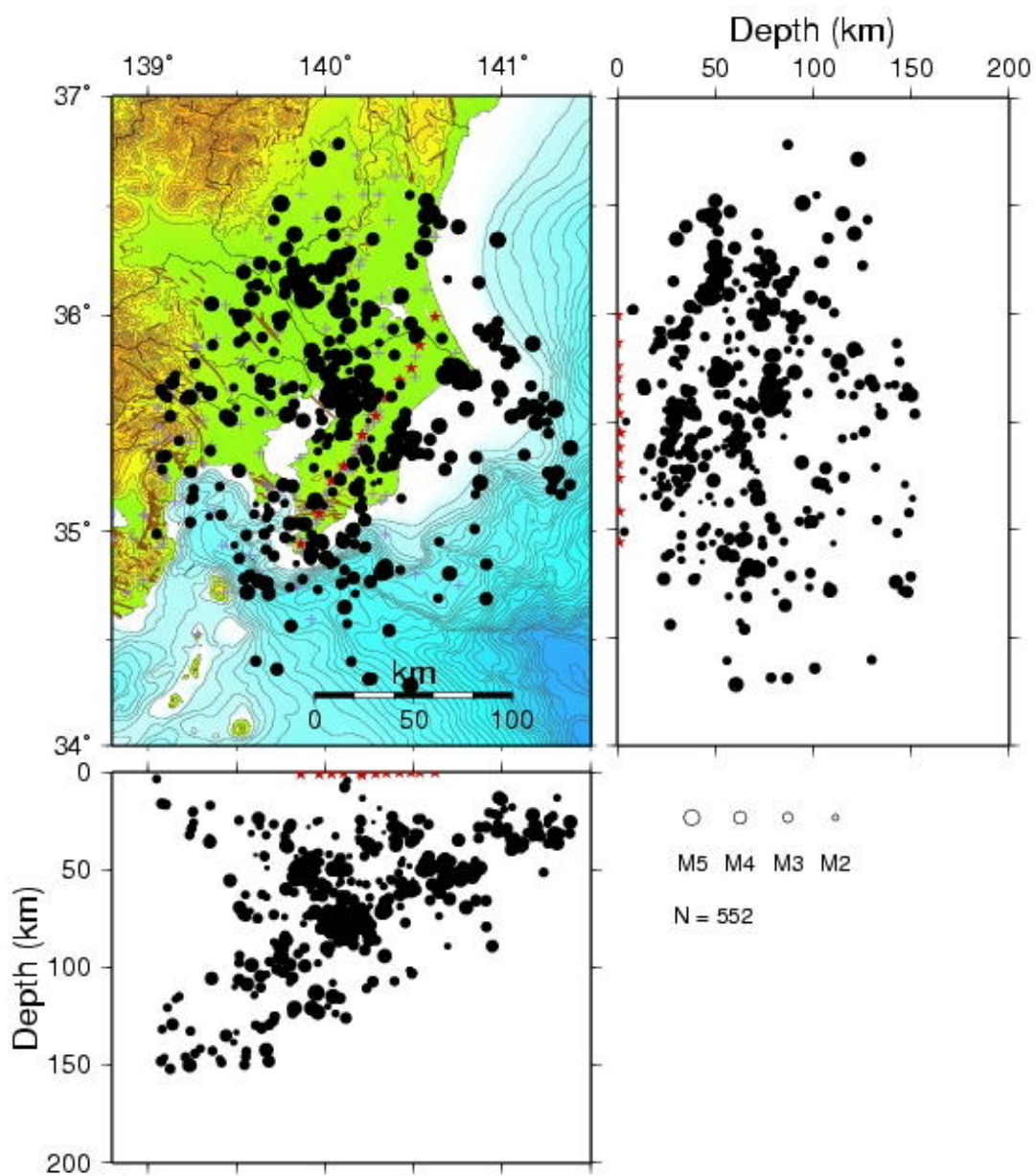


図7 インバージョンに使用した震源の分布。赤い星印は発破点を示す。

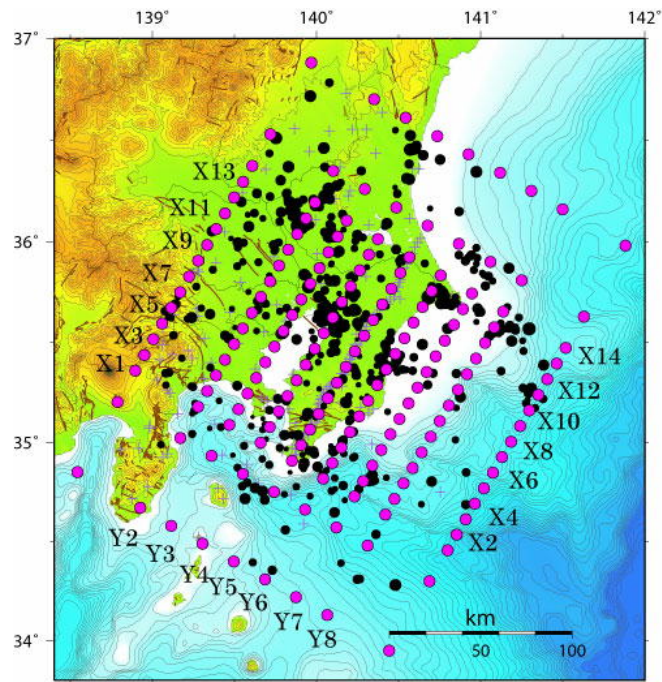


図 8. インバージョンのグリッド位置。

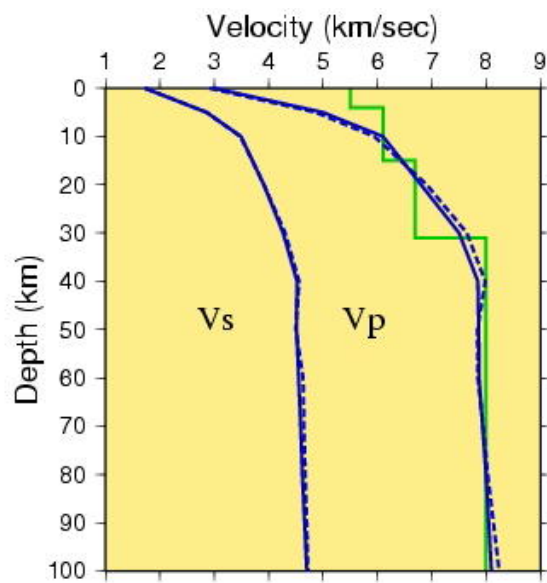


図 9 本研究で使した P 波および S 波の初期速度構造モデル (青線) と最終モデルを平均化した構造 (青破線)。関東地方のルーチン構造を緑色で示す。

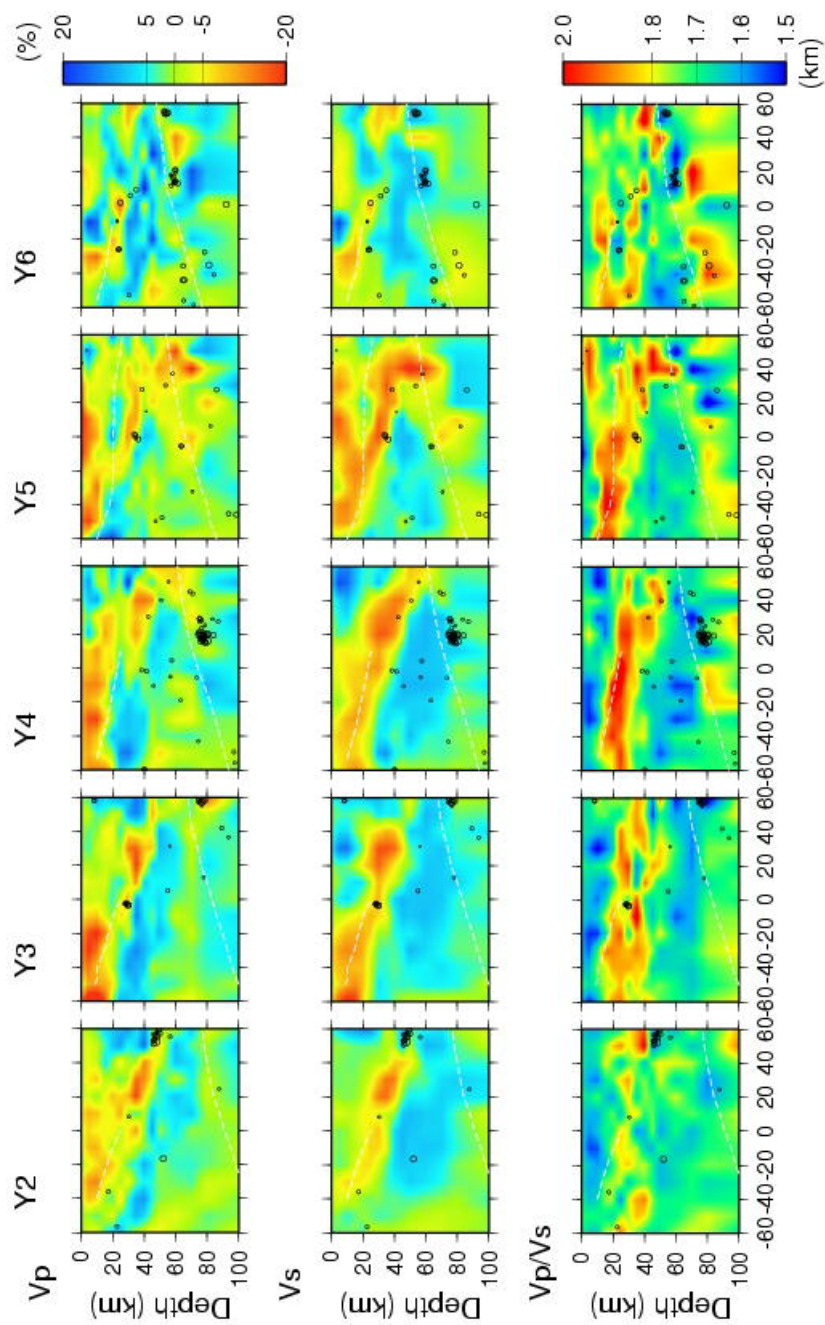


図 10 図 8 で示した Y2 から Y6 測線の P 波、S 波の速度パータバージョンおよび、 V_p/V_s 構造。白破線は Sato et al.(2005)によって推定されたフィリピン海プレートの上部境界および Ishida(1992)による太平洋プレートの上部境界を示す。

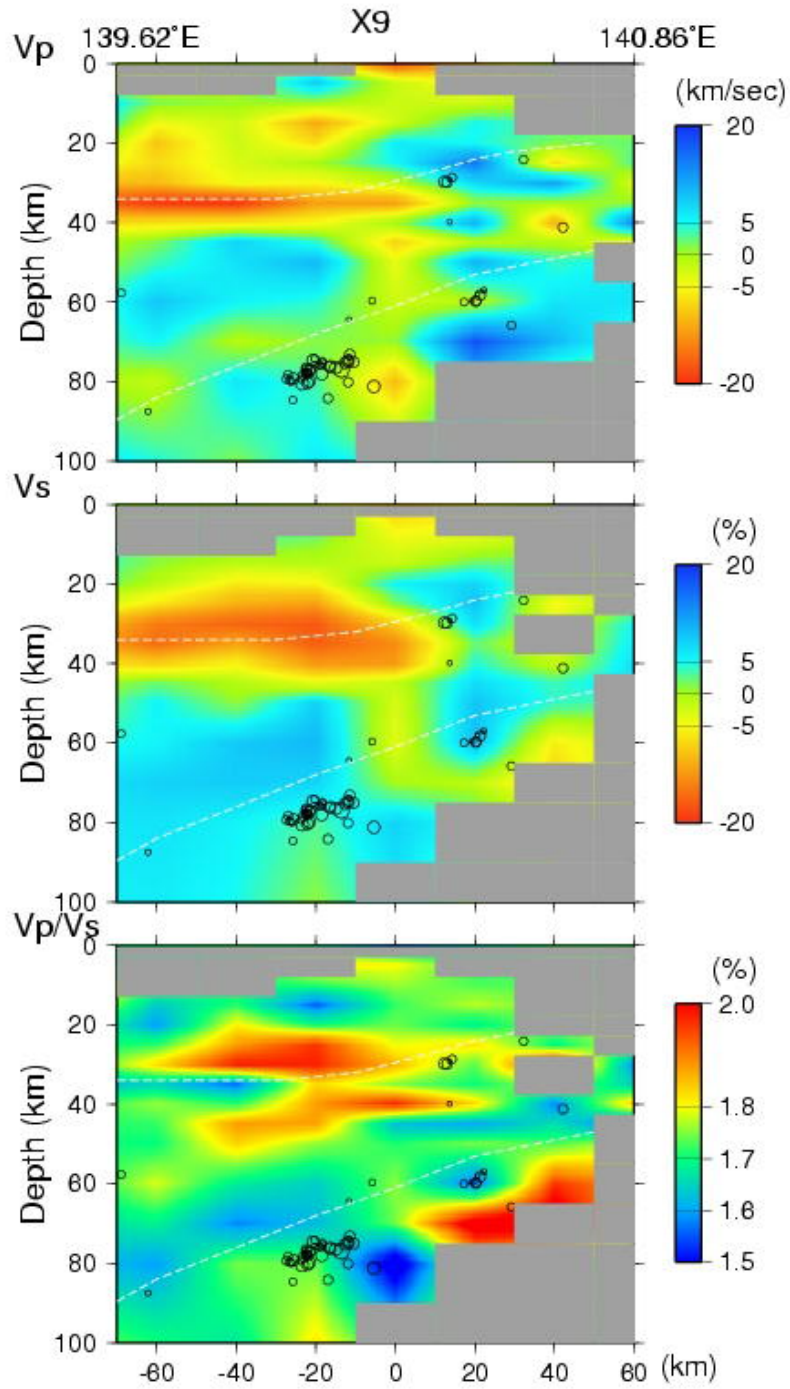


図 11 X9 測線における P 波、S 波の速度パータベーションおよび V_p/V_s 比。

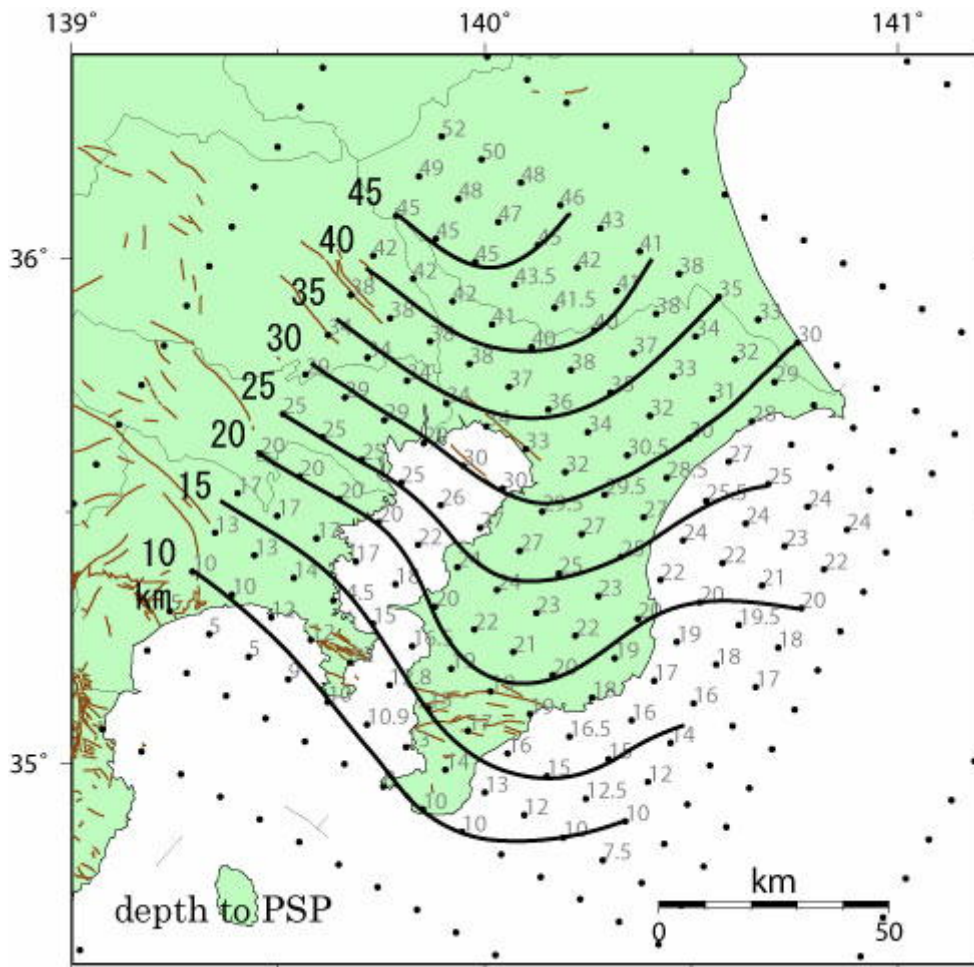


図 12 本解析で得られたフィリピン海プレートの上部境界深度。