

3. 1. 1. 2. プレート境界及びその周辺域の3次元地殻不均質構造の推定

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

プレート境界及びその周辺域の3次元地殻不均質構造の推定

(b) 担当者

| 所属機関 | 役職 | 氏名 | メールアドレス |
|------------------------|-----|------|----------------------------------|
| 国立大学法人東北大学 大学院理学研究科 | 准教授 | 日野亮太 | hino@aob.geopys.tohoku.ac.jp |
| | 准教授 | 松澤暢 | matuzawa@aob.geopys.tohoku.ac.jp |
| | 助教 | 中島淳一 | nakajima@aob.geopys.tohoku.ac.jp |
| | 助教 | 伊藤喜宏 | yito@aob.geopys.tohoku.ac.jp |

(c) 業務の目的

海溝型地震発生予測の高度化のためには、その震源となるプレート境界面における海陸プレート間固着強度の空間分布を知ることが決定的な役割を果たすものと考えられるが、固着度の空間変化を高い精度で直接推定するのは困難である。しかし、プレート間固着強度は、プレート境界周囲の不均質構造の影響を強く受けたものである可能性が高く、カップリング強度と不均質構造との対応関係を解明できれば、地震学的な構造イメージングを通してプレート間の結合の強さの空間分布の把握が飛躍的に進むものと期待できる。そこで、本研究は、プレート境界及びその周辺域の3次元構造の解析により、プレート境界における固着度の分布に対比されるような不均質パターンを見いだすことが可能か否かの検証を目的とする。さらに、深部地下構造を把握することによって強震動予測の高精度化に資することも本研究の目的に含まれる。

(d) 5ヵ年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成16年度

三陸沖北部において長期観測型海底地震計による長期観測を行うとともに、既存海底地震観測データを活用してプレート境界域の3次元地震波速度不均質構造を推定した。さらに、日本海溝・千島海溝周辺における相似地震活動の時空間的な分布を求めた。

2) 平成17年度

平成16年度に設置した海底地震計を回収してそのデータ処理・解析に着手し、根室沖で長期観測型海底地震計による長期観測を実施した。また、既存データを活用した地震波速度不均質構造の推定および推定技術の向上に関する研究、ならびに日本海溝・千島海溝周辺における相似地震活動の時空間的な分布に関する研究を継続して実施した。

3) 平成18年度

平成17年度に設置した海底地震計を回収してそのデータ処理・解析に着手し、三陸沖

3. 1. 1. 2. プレート境界及びその周辺域の3次元地殻不均質構造の推定

北部から十勝沖にかけての領域で長期観測型海底地震計による長期観測を実施する。また、三陸沖北部において得られた海底地震観測データによる地震波速度不均質構造の推定を行うとともに、日本海溝・千島海溝周辺における相似地震活動の時空間的な分布に関する研究を継続して実施した。

4) 平成19年度

平成18年度に設置した海底地震計を回収してそのデータ処理・解析に着手し、岩手県沖から宮城県沖にかけての領域で長期観測型海底地震計による長期観測を開始した。また、根室沖において得られた海底地震観測データによる地震波速度不均質構造の推定を行うとともに、日本海溝・千島海溝周辺における相似地震活動の時空間的な分布に関する研究を継続して実施した。

5) 平成20年度

平成19年度に設置した海底地震計を回収してそのデータ処理・解析を行った。また、福島県沖から茨城県沖にかけての領域で長期観測型海底地震計による長期観測を実施し、この観測についてもデータの処理・解析を行った。さらに、平成19年度までの観測で得られたデータを用いて、北海道～青森沖の海域における地震波速度不均質構造の推定を行うとともに、日本海溝・千島海溝周辺における相似地震活動の時空間的な分布に関する研究を継続して実施し、地震波速度構造の不均質性と準静的すべりの空間分布との関連を明らかにした。

(e) 平成20年度業務目的

日本海溝陸側斜面下のプレート境界型地震発生領域における地震波速度構造の解明を目的として、東京大学・北海道大学とともに三陸沖および茨城沖において長期海底地震観測を実施した。また、東北日本―千島弧会合部にあたる北海道～青森沖の海域における地震波速度不均質構造の解明を行うために、平成16～19年度に実施された海底地震観測のデータを用いた3次元地震波速度構造トモグラフィ解析を行った。

(2) 平成20年度の成果

(a) 業務の要約

平成16～19年度に三陸沖北部から釧路・根室沖に至る海域で実施した海底地震観測データを用いて東北日本―千島弧会合部とその周辺の地震波速度構造を推定した。その結果、日高山脈直下に千島弧と東北日本弧の衝突の結果剥落した下部地殻物質に対応すると考えられる顕著な低速度体の存在が認められる。この低速度体が沈み込む太平洋スラブと接触する範囲を避けるようにプレート間大地震の震源域が広がっている一方、2003年十勝沖地震後の余効すべりが卓越した領域の一つはこの接触域と対応する。また、東北日本弧南端部の太平洋プレート上面で発生している相似地震の解析により、プレート境界でのカップリング率は、上盤側のプレートが北米プレートであるかフィリピン海プレートであるかで大きく異なっていることが明らかとなった。これらのことは、上盤側のプレート内部の不均質構造がプレート間地震の発生様式に大きな影響を及ぼしていることを示す。

(b) 業務の実施方法

本年度の下記の5項目からなる業務を下記の要領で実施した。

1) 観測点配置に関する調整

東京大学とともに当該海域における地震活動状況および陸上の既設地震観測網の配置を考慮して研究遂行上最適な観測点配置について検討し、観測実施にあたり関係各機関・団体等との調整を行った。

2) 海底地震計の設置・回収

東京大学、北海道大学とともに三陸沖の海域に展開した海底地震計を回収したほか、茨城沖における長期海底地震観測を実施した。

3) 海底地震観測データの処理

本事業で実施した海底地震観測データにより得られたデータの処理を進めるとともに、既存の海陸観測データとの統合を行い相似地震やトモグラフィ解析に利用できるようにした。

4) 陸域観測網データの収集

本事業で実施した海底地震観測データの観測範囲およびその周辺を震源とする地震をリストアップし、これらの地震の陸上観測点における波形データの収録・保存を行った。

5) データ解析

上記3) および4) で処理・収集を行ったデータを用いることにより、海陸地震観測点における地震波到達時刻の検出を進め、そのデータを用いて北海道～青森沖の範囲における3次元地殻不均質構造の推定を行った。また、相似地震解析を、北海道から東北沖の太平洋側で発生する地震に対して行い、プレート境界面における非地震性すべりの時間的な分布の評価を行った。

(c) 業務の成果

1) 観測点配置に関する調整

2) 海底地震計の設置

これら2つ業務については、東京大学とともに実施したものであり、成果については3.1.1.1.に報告されている通りであるので、ここでは省略する。

3) 海底地震観測データの処理

平成16年以来実施された海底地震観測により得られた波形データおよび観測点情報を整理し、任意の日時における任意の観測点の波形データが容易に閲覧できるようなデータサーバを構築した。4)により陸上観測点で得られる波形データについても同様のデータサーバの構築が行われており、これらのデータを統合することにより、5)の解析で実施するのに必要な海陸観測点における地震波到達時刻の検出作業を実施した。検出は、海底地震観測網直下で発生する地震については東京大学と分担して進めたほか、地震波速度構造解析のために必要な陸域直下の稍深発・深発地震については、海底地震観測網から離れたものも含め可能な限り多くの地震・観測点組み合わせについて作業を実施した。

4) 陸域観測網データの収集

東北大学では従来から、地震・噴火予知研究観測センターにおいて、東北大学をはじめ北海道大学・弘前大学・東京大学・気象庁・防災科学技術研究所が運営する陸上地震観測点の波形データを実時間収録し、これを気象庁一元化震源リストに従ってイベント毎のファイルとして編集を行っている。一方で、海底地震観測で得られるデータは観測期間中の連続データとして保存されている。そこで、一元化震源リストに掲載されたものを対象にP・S波の到達時刻検出作業を行う際に、海陸の波形統合を行うことにより、検出値と対応する地震波形イベントファイルを作成して、統合イベント波形ファイルとして保存し、再検出等の作業が効率よく行えるようにした。

5) データの解析

今年度は、平成16～19年度にかけて、三陸沖北部、釧路・根室沖、えりも沖の3海域で実施した海底地震観測により得られたデータを用いて、北海道から東北地方北部の太平洋側地域の地震波速度構造を地震波トモグラフィ解析により推定した。トモグラフィ解析に使用したP波およびS波の読み取り値データは、気象庁一元化処理によって震源が決定されているものに対する、OBSおよび陸上地震観測点（北緯40度以北）でのものである。図1に解析に用いた地震と地震観測点の分布を示す。

トモグラフィ解析を行う際に必要な初期震源の位置は、OBSと陸上観測点でのPおよびS波の到達時刻から、トモグラフィ解析の初期構造として用いたのと同様な1次元速度構造を仮定した震源決定により求めた。このとき、OBS観測点での到達時刻データについては、表層堆積層の厚さに比例する走時遅れがあるものと考え、OBSの波形記録にみられる堆積基盤でのPS変換波とP波初動との到達時刻差を利用して走時おくれを推定し、OBS

観測点ごとに補正を行った。OBSで観測される到達時刻データに対するこの補正は、トモグラフィ解析で使用するデータにも同様にして与えた。この方法は、平成18年度および19年度に実施した解析と同じであり、平成18~19年度に実施したえりも沖のOBS観測点については、PS変換波とP波初動との到達時刻差を新たに読み取って解析に用いた。

トモグラフィ解析には、Zhang and Turber [2003] 1) により開発されたダブル・ディファレンス・トモグラフィ (DDT) 法を用いた。この解析法は、多数の震源-観測点組み合わせに対するPおよびS波の到達時刻データを用いるだけでなく、観測点ごとに異なる地震に対する到達時刻の差を計測して、それをあわせて解析に用いることにより、震源付近の構造の推定精度を向上させることが可能な点に特徴がある。到達時刻差を計測する地震の組み合わせは、初期震源間の距離が50km以下となったものとした。

図2にトモグラフィ解析において地震波速度を表現するための格子点の配置を示した。トモグラフィ解析に各格子点に与える初期速度は、格子点の深さにのみ依存するものとし、初期震源の決定の際に用いた1次元速度構造モデルと同じ深さ分布とした。合計で313観測点、2,514個の地震を解析に使用した。格子点は水平方向には千島海溝とほぼ平行・直交する2方向に配置し、格子点間隔は、海溝の走向に平行する方向には25km、直交する方向には20kmとした。深さ方向の格子間隔は10kmとした。

図3と4は、モデル空間内における解像度を調べるために行った checkerboard resolution test (CRT) の結果をしめす鉛直断面図である。CRTでは、速度を与える格子点に対して初期速度の $\pm 5\%$ の擾乱を交互に与え、そのモデルから計算される走時データをテストデータとして、これを用いたトモグラフィ解析を行い、推定された速度構造モデルとテストデータを計算するために与えたモデルとを比較する。テストデータは、実際の観測データと同じ震源と観測点の組み合わせについてのみ求め、P波については0.1秒、S波については0.3秒の標準偏差を持つランダム誤差を与えた。

図3、4のカラーパターンはP波速度 (V_p) とS波速度 (V_s) に対してトモグラフィで推定された擾乱パターンを示す。図をみてもわかるように、 V_p と V_s とともに広い範囲で checkerboard パターンが回復されていることがわかる。ただし、テストデータ生成のために与えた速度擾乱の大きさと比べると、トモグラフィ解析の結果得られた速度擾乱の大きさは60%程度であり、本研究で推定される地震波速度については、不均質構造が示す速度増減の空間変化パターンは信頼できるが、速度の絶対値の信頼度はそれに比べるとやや劣る。モデル中の速度構造の推定精度は、トモグラフィ解析に使用した地震-観測点を結ぶ波線の密度に依存する。そこで、モデル空間中の任意の点における波線密度を速度パラメタの推定に寄与する重みを考慮して計算したDWS (Derivative Weighted Sum) 値の大きさを求め、CRTの結果と比較した。すると、DWS値が3000を超える範囲では、checkerboardパターンが良く回復していることがわかったため、トモグラフィ解析の結果得られた地震波速度分布は、DWS値が3000を超えた範囲のみを示すこととする。

図5~7および8~10は、推定された V_p 及び V_s 構造を示す鉛直断面で、いずれも島弧に直交する方向にとったものである。速度構造と同時に推定された震源を白丸で示している。襟裳岬よりも東側の断面 ($X < 0$ の範囲) では、再決定された震源のほとんどは、プレート境界地震あるいは、二重深発地震面の上面及び下面で発生する地震に対応して、各断面で陸側 (図中左側) に向かって傾き下がる分布を示す。こうした震源分布に沿う

ように、 V_p 、 V_s ともに周囲より低速度の帯状領域を認めることができる。これらは、沈み込む太平洋プレートの海洋性地殻に対応するものと解釈され、その上下の高速度域は、上盤（千島海溝）側プレートの前弧マントルおよび太平洋プレートのマントル（スラブマントル）に対応する。特に、海洋性地殻とスラブマントル間の速度コントラストが明瞭にイメージされており、太平洋プレートのモホ面に対応するものである。

この太平洋プレートのモホ面に対応する、陸側に傾斜する地震波速度急変域は、襟裳岬よりも西側（ $X > 0$ ）の断面でも明瞭であるが、それより浅い側の構造は東側の領域と大きく異なる特徴を示す。特に、日高山脈や襟裳岬を通る断面周辺（ $0 < X < 75$ ）では、海洋性地殻に対応する低速度帯の上側にあるべき千島島弧の前弧マントルに対応する高速度域がきわめて小さいかほとんど見られない。さらに西側（ $X > 100$ ）では、再び前弧マントルに対応する高速度域と海洋性地殻に対応する低速度帯が分離して認められるようになるため、海洋性地殻の上側に低速度領域が広く存在するのは、日高山脈周辺に限られることが推測される。

こうした、千島島弧の走向に沿う地下構造の変化は、島弧の走向に沿う方向にとった断面でみると明瞭である。日高山脈南部を西南西－東北東に横切る断面をみると（図 11）、深さ 60 km 付近に沈み込んだ海洋性地殻に対応する $V_p < 7$ km/s、 $V_s < 4$ km/s という低地震波速度をもつ層が連続して分布することが特徴的である。その上側の速度は、日高山脈周辺（ $0 < X < 75$ ）の範囲を除いては前弧マントルに対応する高速度を示すのに対して、日高山脈下では、海洋性地殻とほとんど変わらない地震波速度を示し、局所的に地殻が厚くなってことを示唆する。

図 12 および 13 は、 V_p および V_s の深さごとの水平分布である。深さ 20～60 km の範囲ではプレート境界地震の震源や、その直下に存在する海洋性地殻に対応する低速度域が海岸線にほぼ平行するような帯状の分布を示す。これらの帯状領域の形状は、沈み込む太平洋プレート上面の各深さにおける等深線に平行となっているはずであり、こうした帯状構造の形状から沈み込む太平洋プレートの形状を推定ことが可能である。

ただし、上盤地殻が局所的に厚くなっている日高山脈域では、プレート境界の上下で地震波速度の違いが不明瞭であるだけでなく、再決定された地震の震源が深さ方向に広く分布していて、震源分布からもプレート境界の位置の特定が難しい。他の領域では、プレート境界近傍に震源が集中し、その上下での地震活動が低調であり、また地震活動帯と海洋性地殻に対応する低速度帯の上面とが一致するために、震源分布からプレート境界面の位置・形状を推測することが容易であるが、日高山脈下では、プレート境界面の位置の特定が難しい。しかし、上で述べたように、海洋性地殻とスラブマントルとの間の速度急変域は、こうした領域でも明瞭にイメージされている。そこで、日高山脈下の領域においては、この速度急変帯がスラブモホ面に対応するとし、プレート境界面は、それよりも海洋性地殻の厚さである 10 km 程度上側であると仮定して、プレート境界面の位置を推定した。最終的には、日高山脈を含む全領域で滑らかに連続するような形状となるように、プレート境界面の深さと形状を求めた（図 14）。

推定されたプレート境界面の等深線は、大局的には海溝軸あるいは北海道・東北地方の海岸線にほぼ平行する。こうした地形に見られる千島島弧と東北日本弧の走向は、北海道の日高山脈の西側から本州の下北半島東側の間の領域で急激に変化するが、推定さ

れたプレート境界面の等深線の走向も、この領域で大きく変化する。この変化は、北海道側から東北日本側に徐々に変化するというよりは、襟裳岬の南西側の2カ所で屈折しているような複雑な形状を示す。

図15は、このようにして定義されたプレート境界面を基準に、5 km上側での V_p の分布を示したものであり、これをプレート境界に沿ってその直上の地震波速度の変化を反映したものと考えて、その特徴を解釈する。日高山脈下の地域を除いては、プレート境界面の40 kmの等深線よりも深部側(down dip側)では V_p が8 km/sを上回っており、プレート境界の上側がマントルかんらん岩で占められていることを示す。本研究ではモホ面はプレート境界面の形状あるいはそこでの速度不連続を仮定していないため、上盤側のモホ面とプレート境界面との深さの差が、鉛直方向のgrid間隔である10 km程度より小さい範囲では、上下盤双方の地殻の低速度が染み出す可能性があるために、プレート境界面の直上に高速度のマントルが存在するかは確認できない。過去の地震探査の結果2)、3)を参照すると、北海道・東北地方ともに海域での島弧地殻の厚さは20 km以上あることから、高速度の前弧マントルがプレート境界面の深さ30 kmより浅い範囲まで広がっているかどうかは、本研究の結果から断定することは難しい。

一方で、日高山脈下ではプレート境界の深さが60 km以上の範囲にまで、プレート境界の直上に低速度の物質が存在する。こうした低速度域は、島弧地殻から下側に垂れ下がるような形状をしており、その東縁は前弧域の地殻深部の剥落が起こっていると考えられている領域と一致する。この地殻深部の剥落は、千島弧の前弧域が東北日本弧に衝突することによって生じていると考えられている4)。千島弧の前弧は、太平洋プレートの千島島弧下への沈み込みが斜め沈み込みであることにより、東北日本弧側への運動成分をもち、これが前弧衝突の原動力と説明されている。図16の模式図に示すように、東北日本弧との衝突によって千島弧前弧域の地殻深部が剥落するとすれば、それは結果として深部側へ押し出されてプレート境界に接触するようになることが予想される。従って、日高山脈下のプレート境界面の直上に分布する低速度異常域は、こうした剥落した地殻深部の物質が太平洋スラブ上に滞留しているものに対応すると考えられる。上で述べたように、北海道-東北日本間でのプレート境界面の走向変化は、2カ所の屈折で表現されるような複雑な形状を示す。この2カ所の屈折部は、剥落した地殻下部の物質がプレート境界面上に滞留する領域の広がり両端とほぼ一致していることは興味深い。上盤側から垂れ下がってきた地殻物質がプレート境界面(結果的にスラブ)の形状に影響を及ぼしている可能性がある。

図17は、プレート境界面直上の V_p 分布に、プレート境界型大地震のすべり量分布を重ねたものである。1968年十勝沖地震の北西側のアスペリティや2003年および2004年にM7級のプレート境界地震を起こした領域は、明らかに高速度の前弧マントルの直下に位置している。前弧マントルは、沈み込むスラブの脱水によりもたらされる水により含水化されることにより、低地震波速度化するとともに、その直下でのプレート間カップリング強度が低下すると考えられているが5)、本研究の結果は、東北北部から北海道の太平洋側では、前弧マントルの含水化がほとんど起こっていないことを示唆するものである。2003年十勝沖地震や1973年根室半島沖地震のアスペリティと高速度前弧マントルとの対応関係は明瞭ではないが、これは、これらの地震のアスペリティの多くの部分が、

島弧地殻と海洋性地殻との接触域にあるためと考えられる。しかし、アスペリティの深部はわずかに高速度異常域にかかっており、これらの地震の破壊域も含水化していない高速度の前弧マンツルの下側にまで広がっているものと推測される。

一方で、千島弧前弧から剥落した地殻下部物質が太平洋プレートと接触する領域が、2003年十勝沖地震の破壊域と、1968年十勝沖地震あるいは1994年三陸はるか沖地震の震源域とのギャップにほぼ対応することは注目に値する。この領域では、2003年十勝沖地震の際、地震時すべりはほとんど見られなかったが、顕著な余効すべりがあったことが示されている(文献)。剥落した地殻下部物質がプレート境界に接触することによって、その周囲とは異なる摩擦特性が実現しているのかもしれない。島弧地殻内部にも水が含まれている可能性があり、その剥落は、海洋性プレートの沈み込みと同様に水を地下深部へ運搬する過程になりうる。こうした過程により局所的に水が輸送されてくることにより、周囲の含水されていない前弧マンツルと接触しているプレート境界と異なる摩擦特性を有するようになった可能性がある。剥落した地殻物質との接触域が、それ以外のプレート境界面と異なる性質を持つことは、相似地震の分布(図17)からも予想される。接触域においては、ほとんど相似地震が起こっていない。大地震時のすべりも見られないことと併せて考えると、この領域ではプレート境界での地震性すべりはほとんど起こらないのかもしれない。

次に、本研究で推定したプレート境界形状を用いて、それよりも下側の構造変化について試みる。図18は、プレート境界面に沿ってその5 km下側における V_p の分布を示したものであり、沈み込む海洋性地殻内の V_p の分布と考えて良い。鉛直断面図で示されるように、沈み込む海洋性地殻は、地震波速度構造モデル上では、陸側に傾斜したプレート境界面の下側に平行する約7 km/s程度の V_p をもつ層としてイメージされる。しかし、その層内の速度は沈み込み帯の走向に沿う方向で変化している。図18からは、プレート境界型の大地震の破壊域の海洋性地殻は、その周囲に比べて高速度異常を示していることがわかる。同様の対応関係は、1978年および2005年宮城県沖地震の破壊域においても認めることができ6)、海洋性地殻がもつ構造の不均質性もまた、プレート間の固着・すべり状態に影響を及ぼし、その結果として大地震の破壊域と高速度異常との対応関係が成り立っている可能性が指摘できる。

以上のように、北海道から東北日本北部にかけてのプレート境界地震発生域の地震波速度構造に関する研究とともに、プレート境界における小繰り返し地震を用いたプレート間すべり速度の分布に関する研究の対象を拡げ、今年度は東北日本弧の最南部についての調査を行った。

東北日本弧の最南部では、南側から沈み込んでいるフィリピン海プレートが、太平洋プレートと東北日本弧が属する北米プレートとの間に入り込むように存在する。したがって、太平洋プレートの上面における地震活動は、北米プレートとの境界面に沿って発生するものと、フィリピン海プレートとの境界面に沿って発生するものとに区別されるはずである(図19)。太平洋プレート-北米プレート間および太平洋プレート-フィリピン海プレート間の相対運動の方向は異なるため、太平洋プレートの上面に沿って発生する地震の発震機構は、いずれのプレート境界面で発生しているかによって異なることが予想される。図20はこの地域で発生した相似地震を含む低角逆断層型地震の発震機構か

ら求めた地震時すべりベクトルの空間分布を示したものであるが、水戸市 (Mito) と房総三重会合点 (Triple Junction) を結ぶ線を境にして南北で、すべり方向が明らかに異なっている。南部領域 (領域 I) では、すべりベクトルは方位角にして $75 \sim 100^\circ$ 方向を向くものが卓越しているのに対して、北部 (領域 II) で発生する地震のベクトルは $100 \sim 130^\circ$ を向いている。それぞれの領域で卓越するベクトルの方位角は、太平洋プレートとフィリピン海プレート間の相対運動方向あるいは太平洋プレートと北米プレート間の相対運動の方向と良い一致を示しており、領域 I では、太平洋プレートとフィリピン海プレート間の境界で地震が発生している一方で、領域 II では太平洋プレートと北米プレートとの間の境界で地震が発生していることがわかる。従って、領域 I と II との境界は、沈み込んだフィリピン海プレートの先端の位置に対応していると解釈される。

このように異なるプレート間相互作用の影響を受けている領域 I と II のいずれの領域においても、相似地震活動がみられる。そこで、相似地震の活動履歴からプレート間すべり速度を推定した。相似地震のすべり量は、これまで北海道～東北日本における相似地震解析で用いたのと同じ Nadeau and Johnson の相似則 7) を用いて、地震モーメントから推定した。さらに、領域 I と II とでは、プレート間相対運動の速度が異なることを考慮し、

$$\chi = \frac{v_{slip}}{v_{pl}} \quad (1)$$

と定義されるカップリング率 χ に換算してその空間分布を示したのが、図 21 である。

(1) 式で、 v_{slip} は 1993 年から 2007 年 3 月の期間に発生した相似地震の解析から推定されたプレート間すべり速度、 v_{pl} は Salles et al. のプレート運動モデル 8) による、プレート間相対速度で、領域 I では 5.1 cm/a 、領域 II では 7.2 cm/a である。推定されたカップリング率は、領域 I で 0.3 程度であるのに対して、領域 II では 0.7 程度の大きな値を取っており、沈み込む太平洋プレートの上盤側をなすプレートの違いによって、カップリング率が大きく異なっている。これは、北海道から東北日本北部における地震波速度構造と大地震破壊域との対応関係と同様に、プレート境界面上盤側を占める物質の違いが、プレート間の固着状態に大きな影響を及ぼすことを示す、重要な結果である。

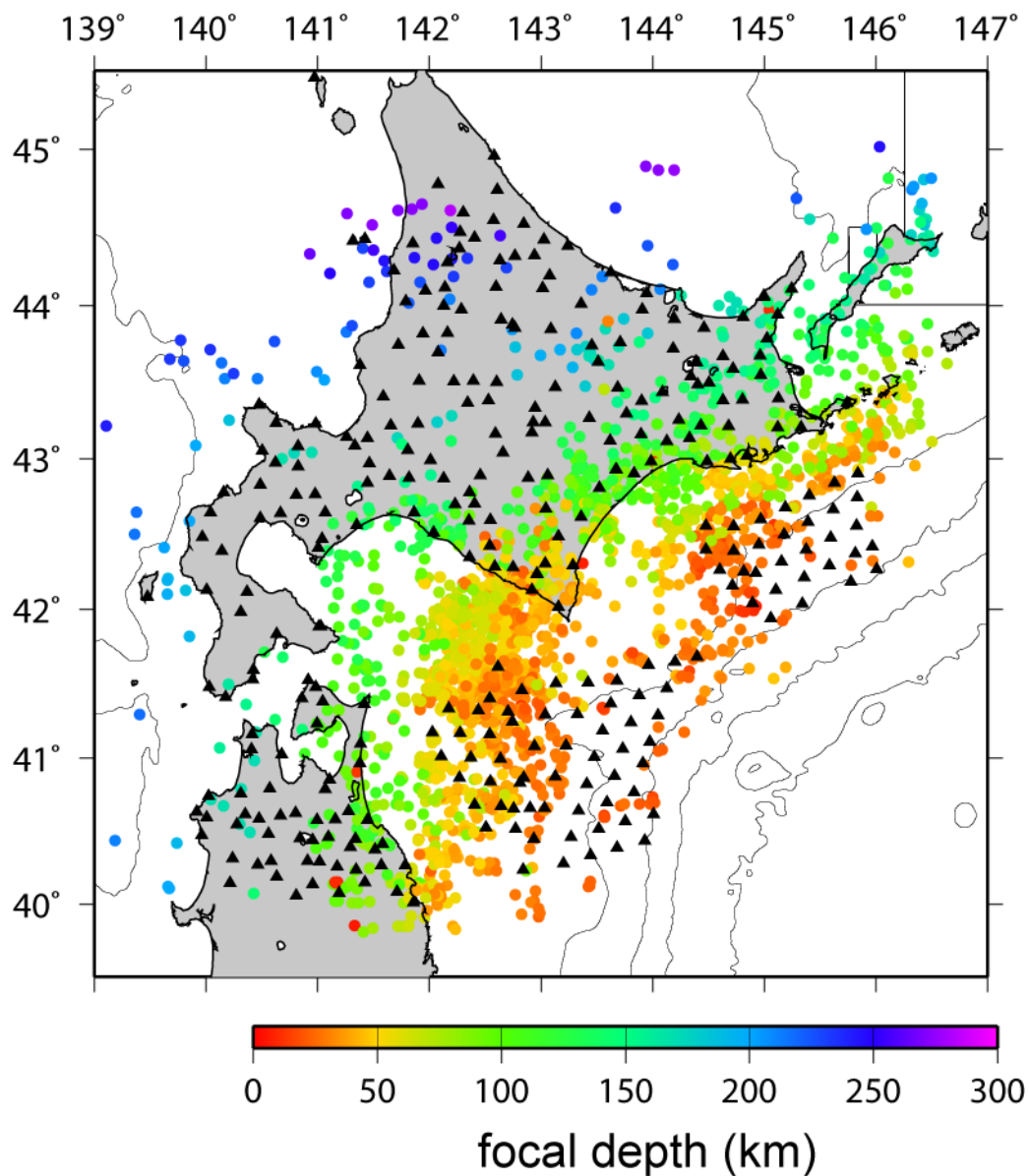


図 1 北海道から東北地方北部の太平洋側地域の地震波速度構造を推定するために使用した地震および地震観測点の分布
観測点を▲印で示す。震源は初期震源決定の結果で、震源深さに応じた色をつけたシンボルで震央位置を示す。

3. 1. 1. 2. プレート境界及びその周辺域の3次元地殻不均質構造の推定

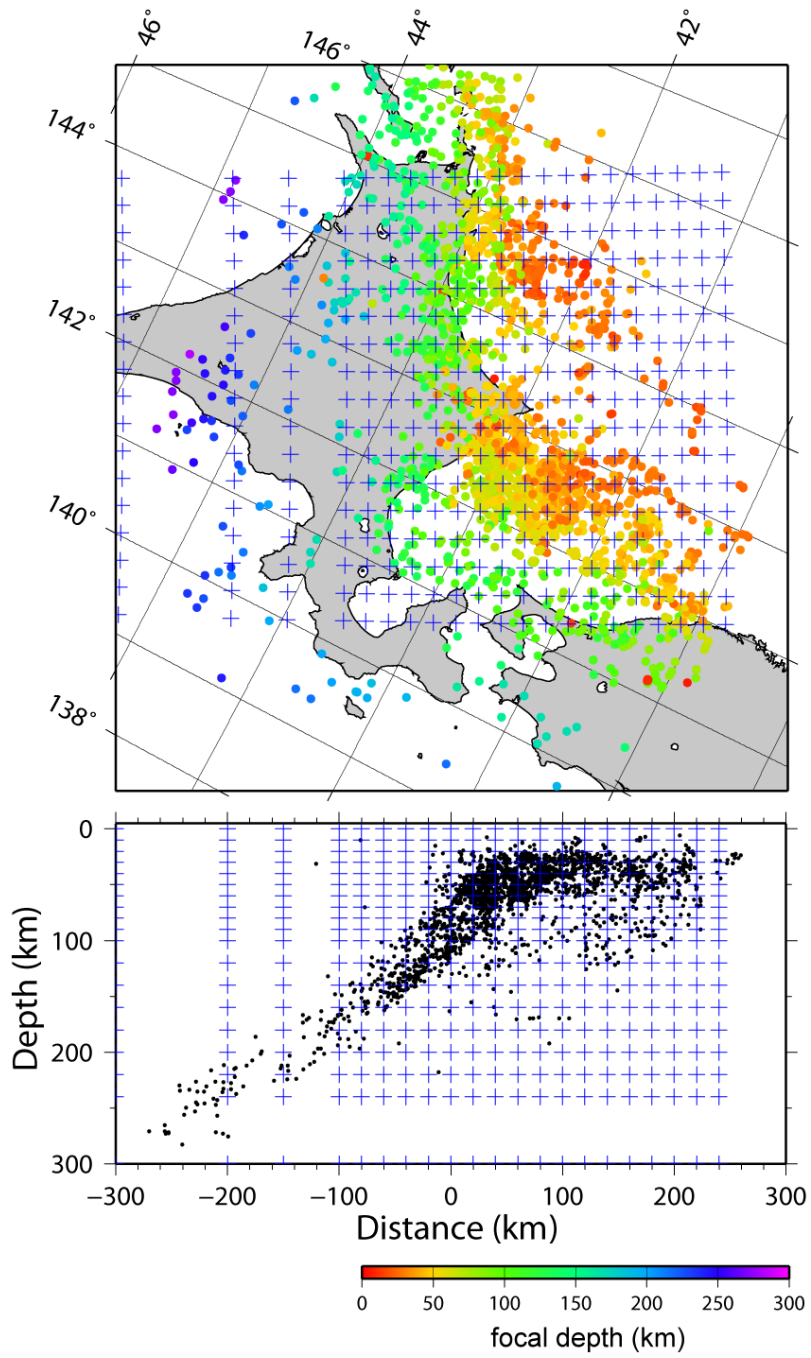


図2 トモグラフィ解析の際に設定した格子点の配置

3. 1. 1. 2. プレート境界及びその周辺域の3次元地殻不均質構造の推定

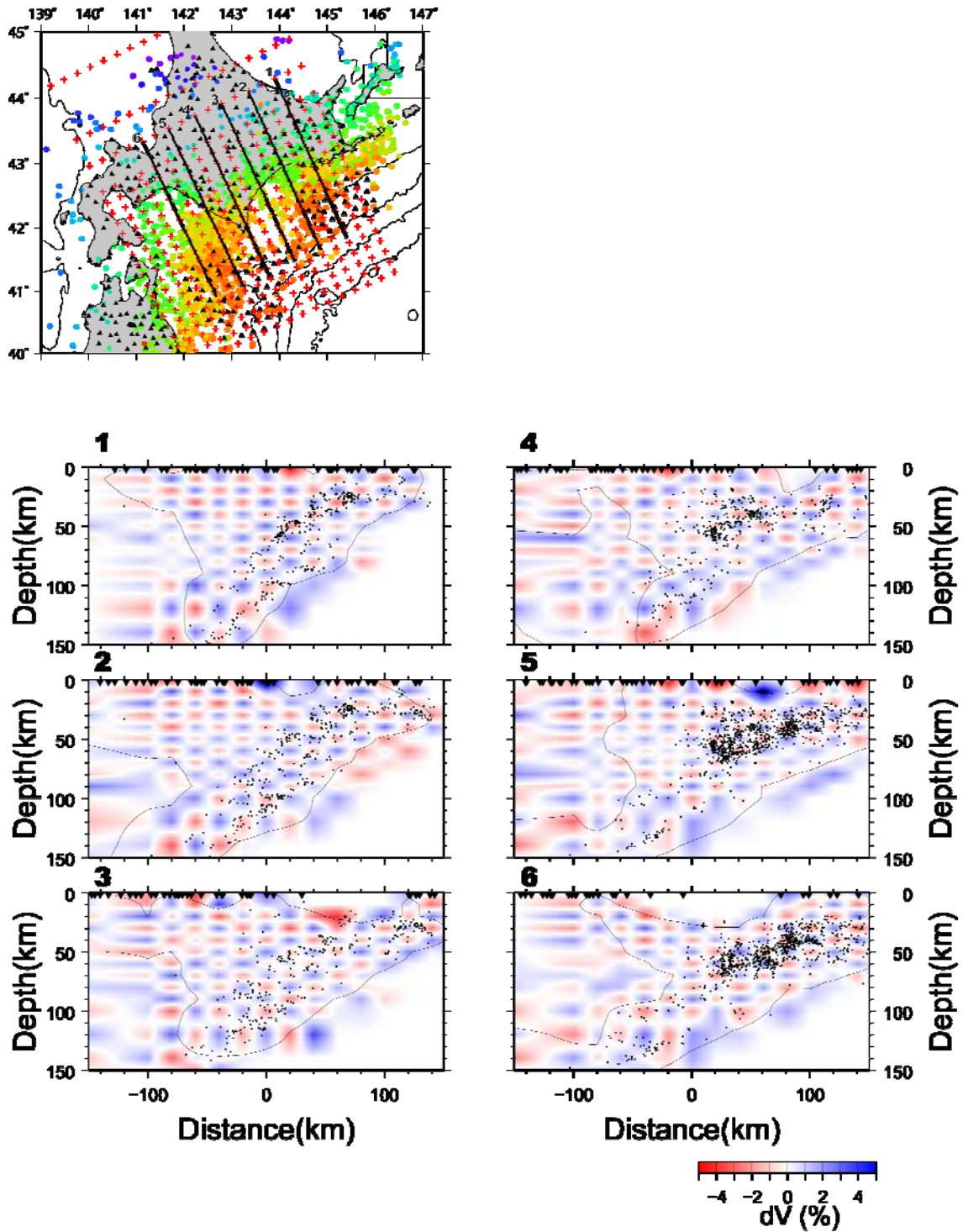


図3 チェッカーボード・レゾリューション・テスト (CRT) の結果

V_p に対するもの。各格子点に $\pm 5\%$ の速度擾乱を交互にあたえて計算した到達時刻データをもちいてインヴァージョンを行って得られた結果を示す。

3. 1. 1. 2. プレート境界及びその周辺域の3次元地殻不均質構造の推定

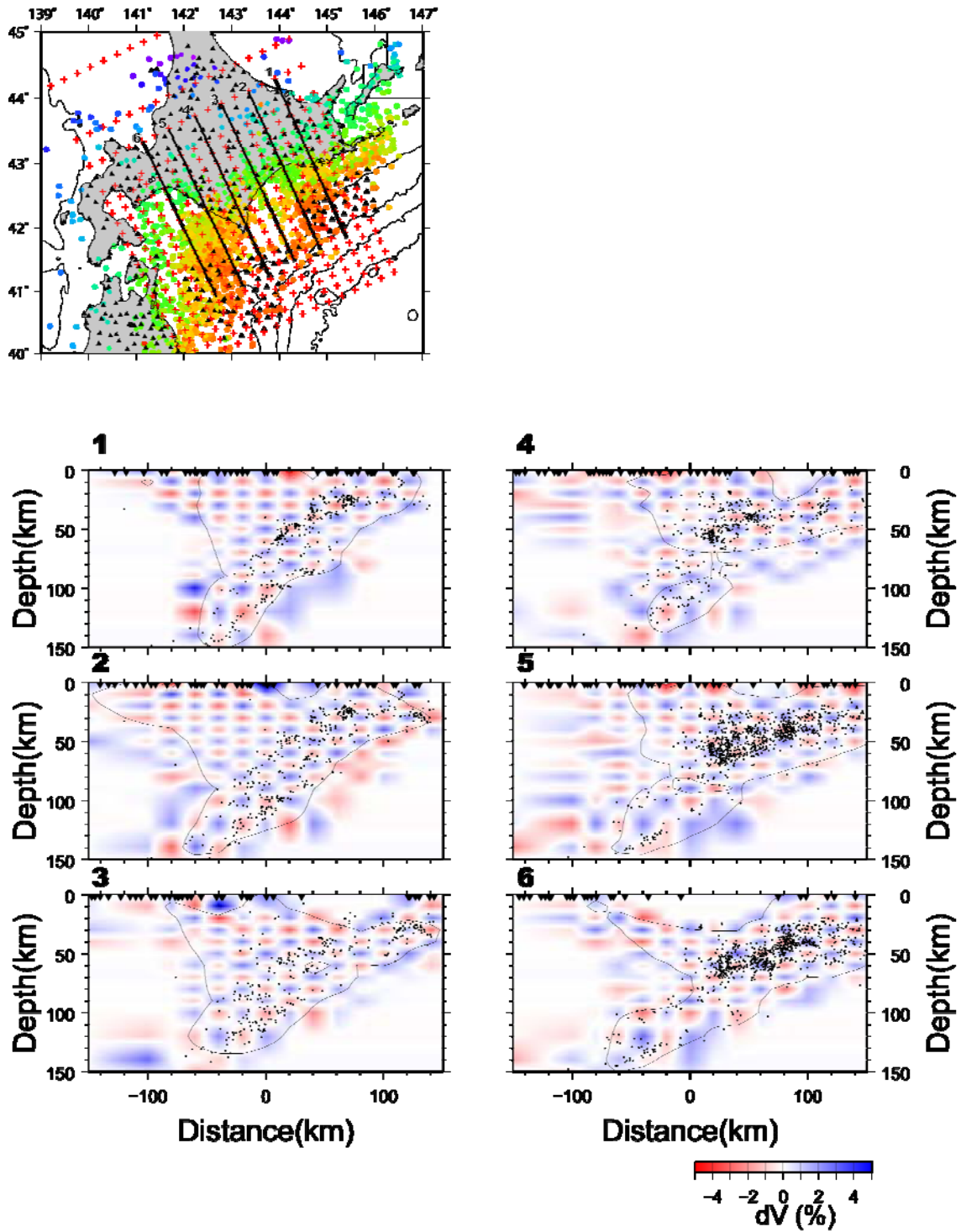


図4 チェッカーボード・レゾリューション・テスト (CRT) の結果

V_s に対するもの。各格子点に $\pm 5\%$ の速度擾乱を交互にあたえて計算した到達時刻データをもちいてインヴァージョンを行って得られた結果を示す。

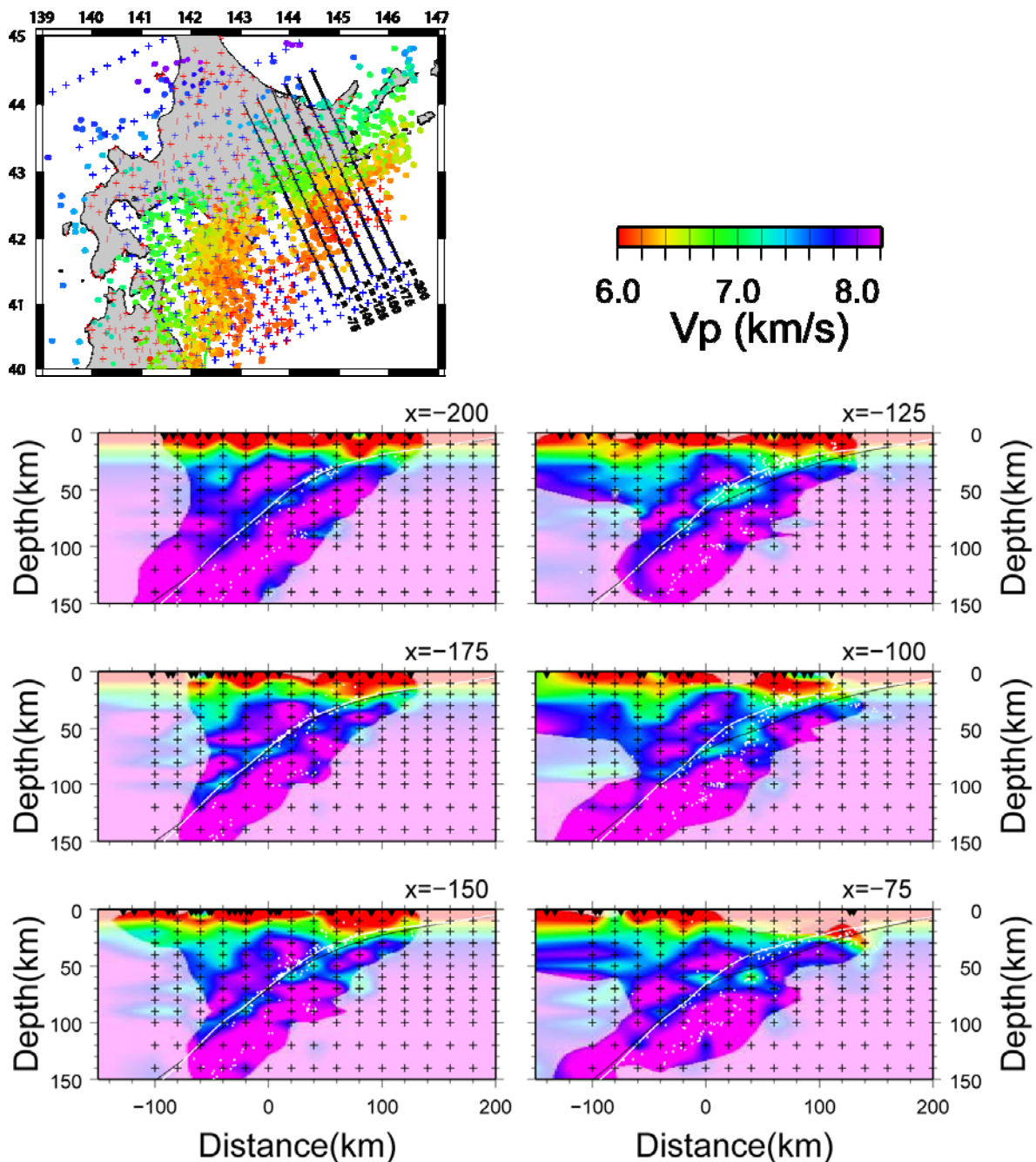


図5 推定された V_p 構造

白丸は再決定された震源。黒実線は震源分布と速度分布から推定したプレート境界の位置。白実線は、陸上観測点のデータのみを使用して行った震源分布から推定されたプレート境界（北、私信）。DWS 値が 3000 より小さい領域については、速度値を示すカラーパターンを薄く表示している（以下同様）。

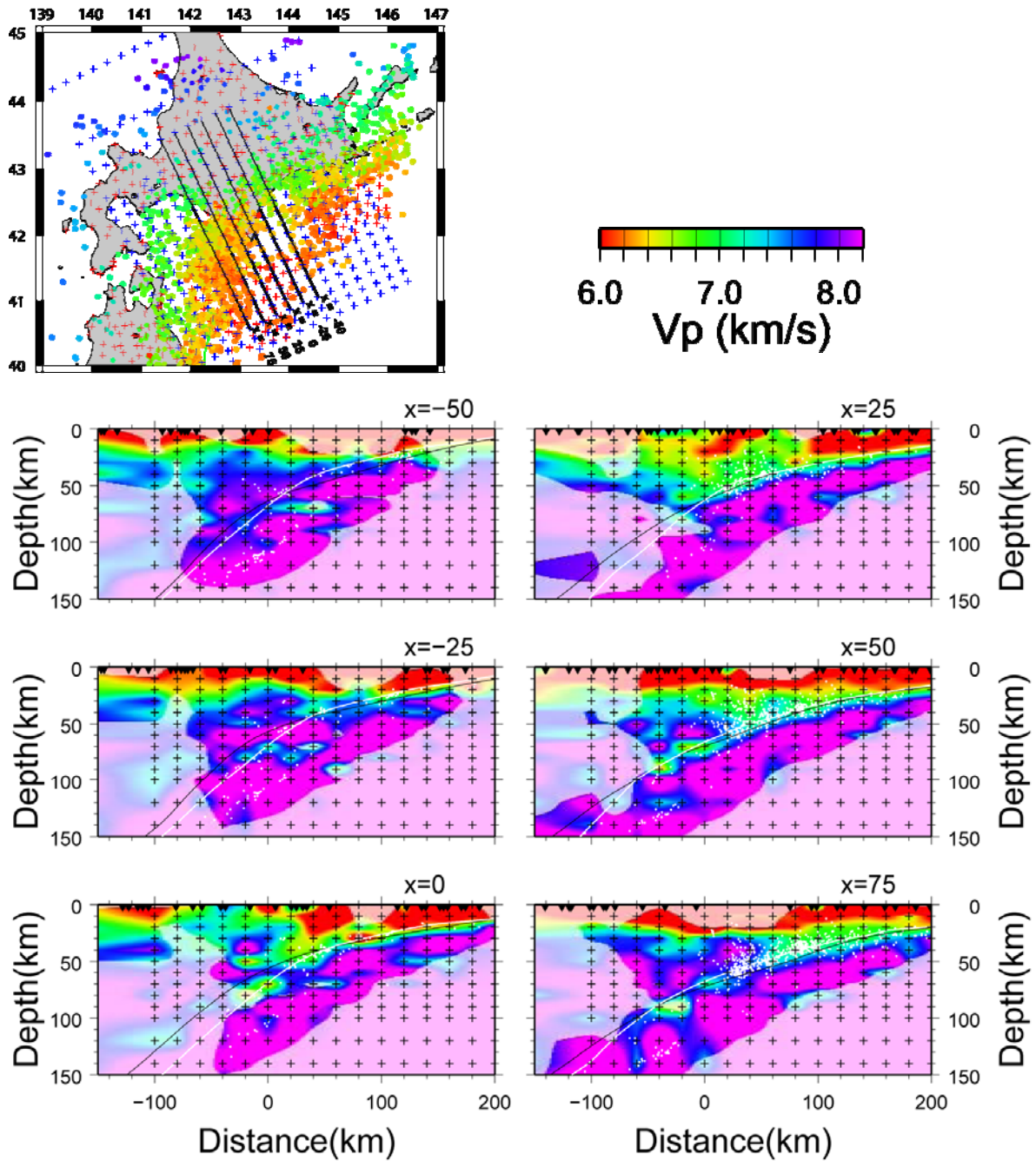


図6 推定された V_p 構造

白丸は再決定された震源。黒実線は震源分布と速度分布から推定したプレート境界の位置。白実線は、陸上観測点のデータのみを使用して行った震源分布から推定されたプレート境界（北、私信）。

3. 1. 1. 2. プレート境界及びその周辺域の3次元地殻不均質構造の推定

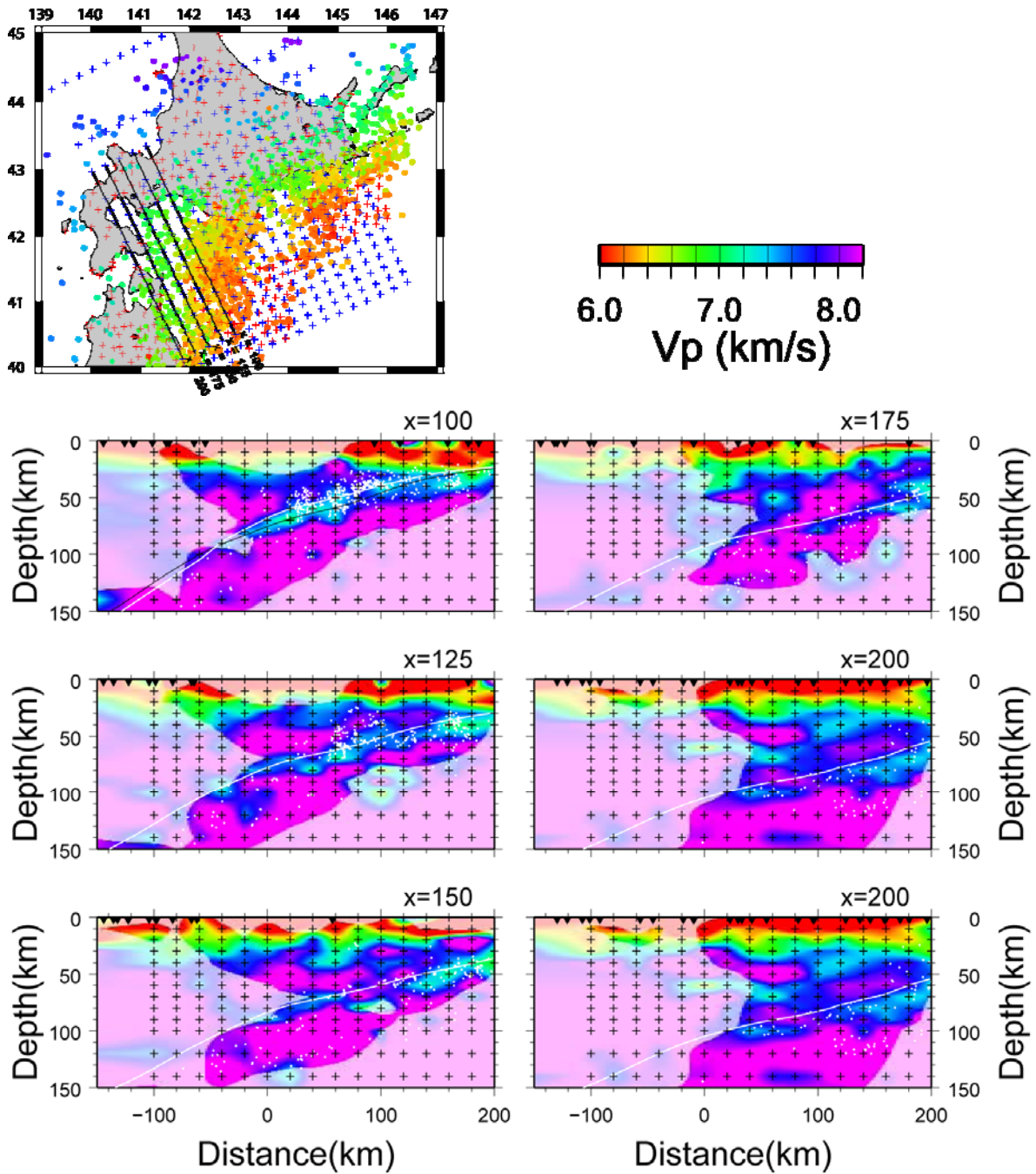


図7 推定された V_p 構造

白丸は再決定された震源。黒実線は震源分布と速度分布から推定したプレート境界の位置。白実線は、陸上観測点のデータのみを使用して行った震源分布から推定されたプレート境界（北、私信）。

3. 1. 1. 2. プレート境界及びその周辺域の3次元地殻不均質構造の推定

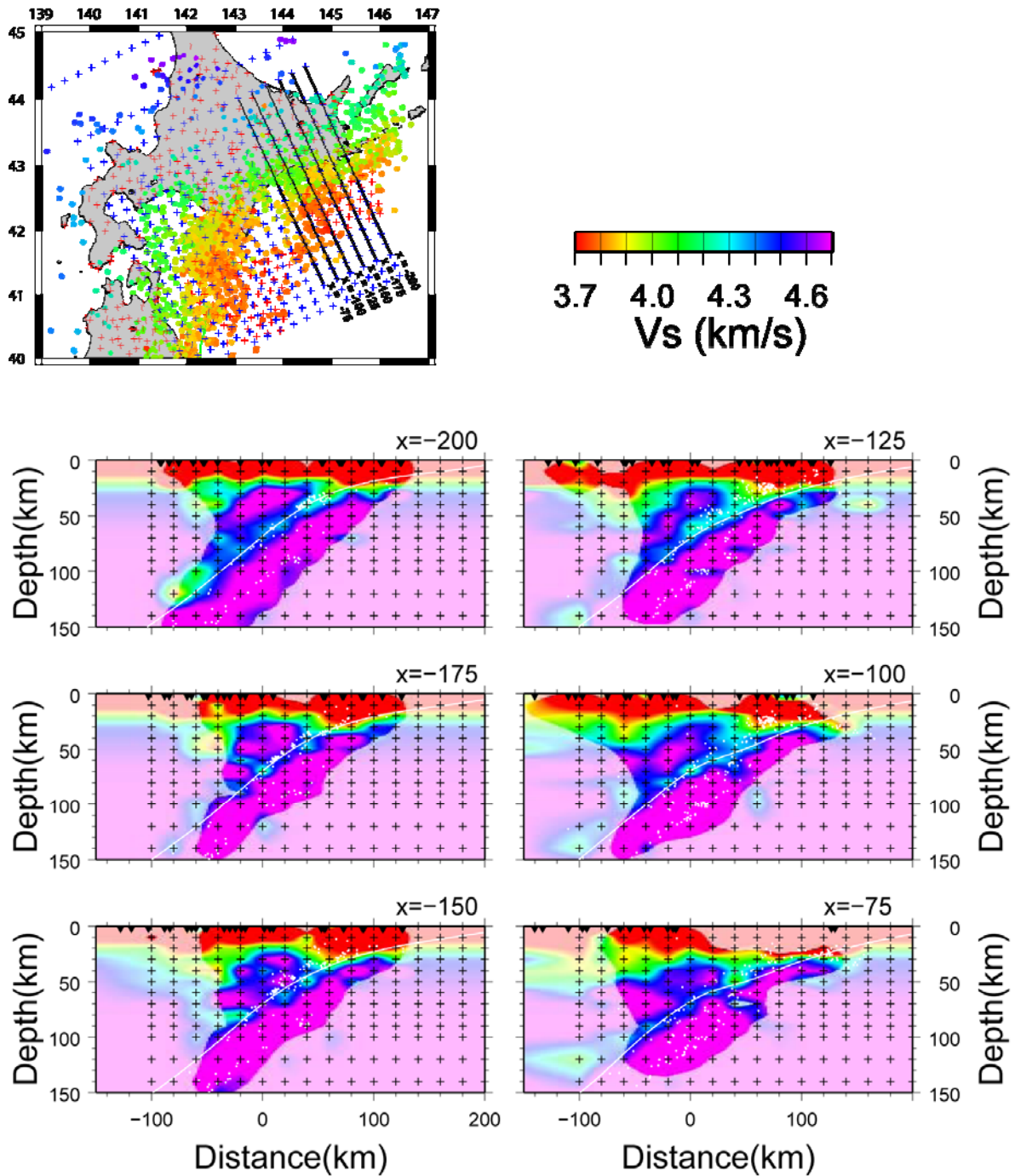


図8 推定されたVs構造

白丸は再決定された震源。黒実線は震源分布と速度分布から推定したプレート境界の位置。白実線は、陸上観測点のデータのみを使用して行った震源分布から推定されたプレート境界（北、私信）。

3. 1. 1. 2. プレート境界及びその周辺域の3次元地殻不均質構造の推定

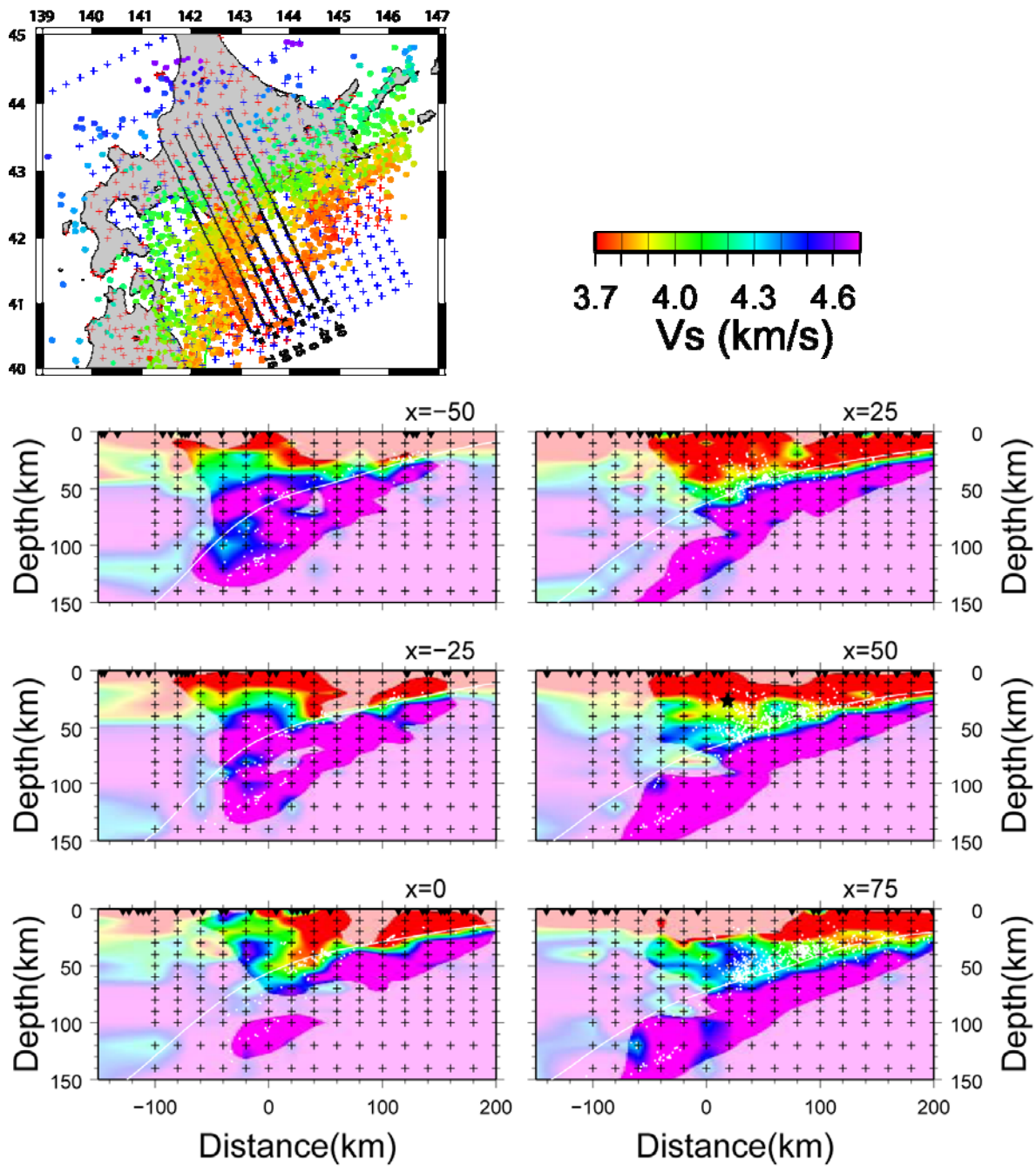


図9 推定された Vs 構造

白丸は再決定された震源。黒実線は震源分布と速度分布から推定したプレート境界の位置。白実線は、陸上観測点のデータのみを使用して行った震源分布から推定されたプレート境界（北、私信）。

3. 1. 1. 2. プレート境界及びその周辺域の3次元地殻不均質構造の推定

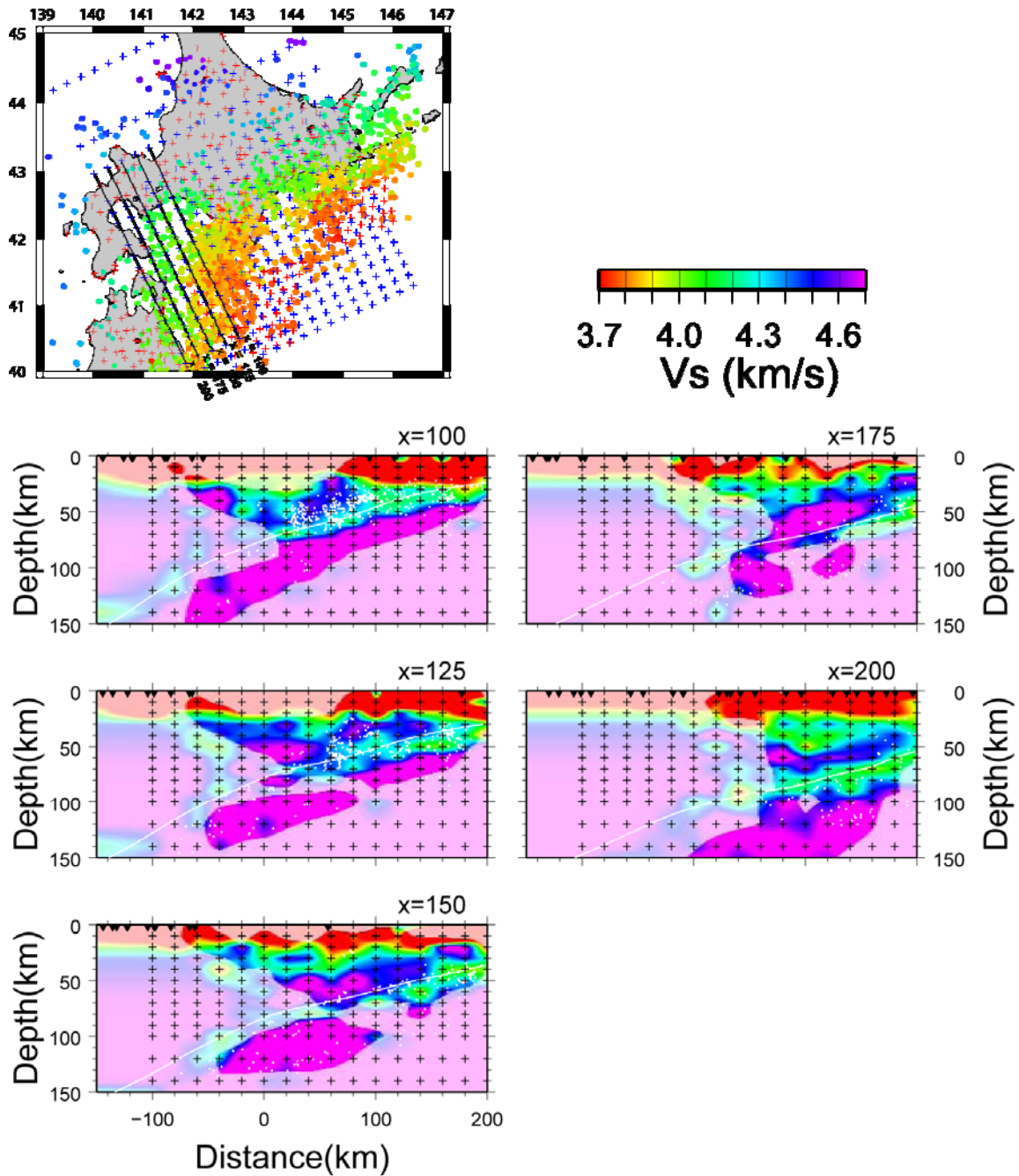


図10 推定された Vs 構造

白丸は再決定された震源。黒実線は震源分布と速度分布から推定したプレート境界の位置。白実線は、陸上観測点のデータのみを使用して行った震源分布から推定されたプレート境界（北、私信）。

3. 1. 1. 2. プレート境界及びその周辺域の3次元地殻不均質構造の推定

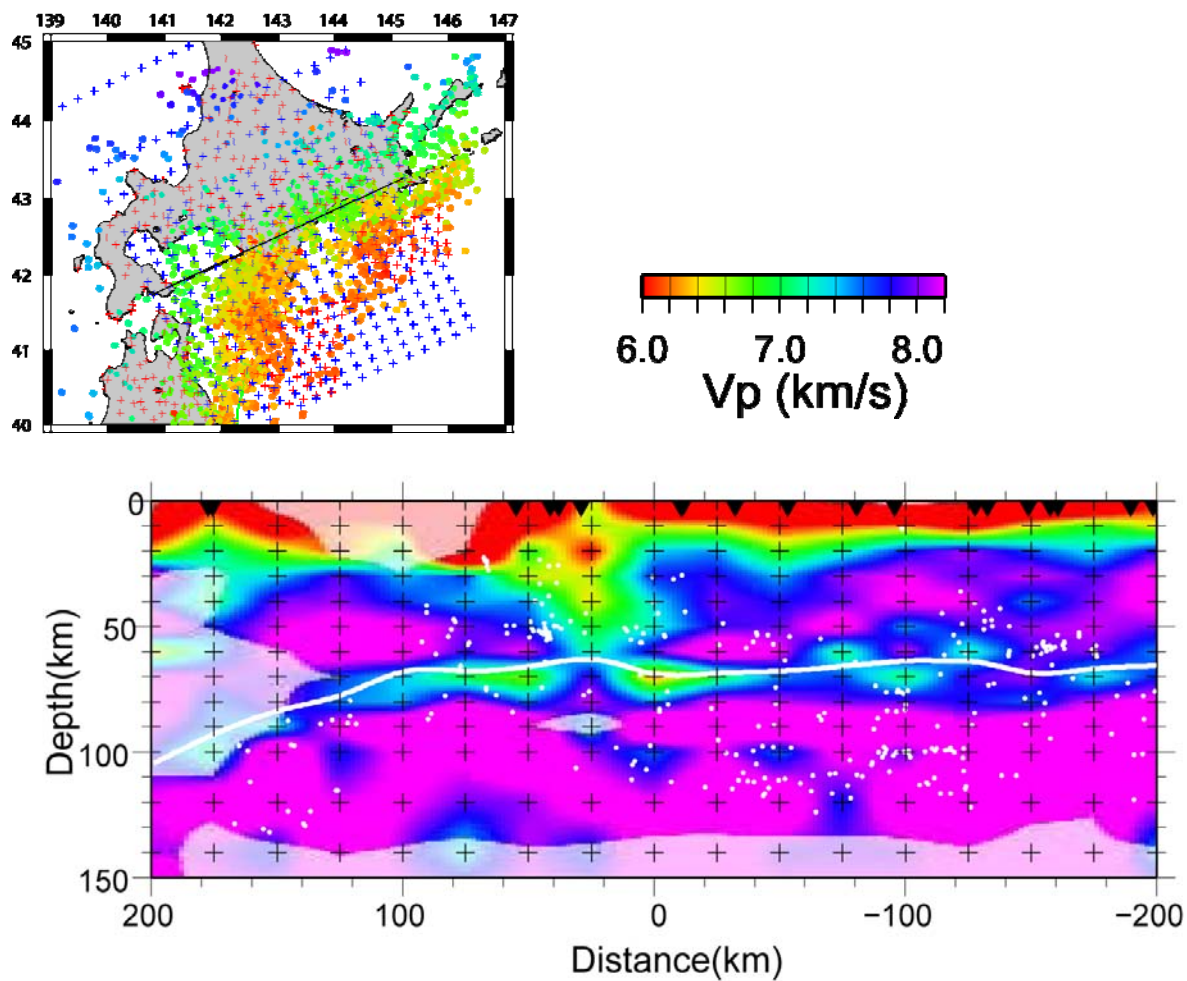


図 11 日高山脈を西南西－東北東に横切る断面での V_p 構造
白丸は再決定された震源。白実線は本研究で推定したプレート境界の位置。

3. 1. 1. 2. プレート境界及びその周辺域の3次元地殻不均質構造の推定

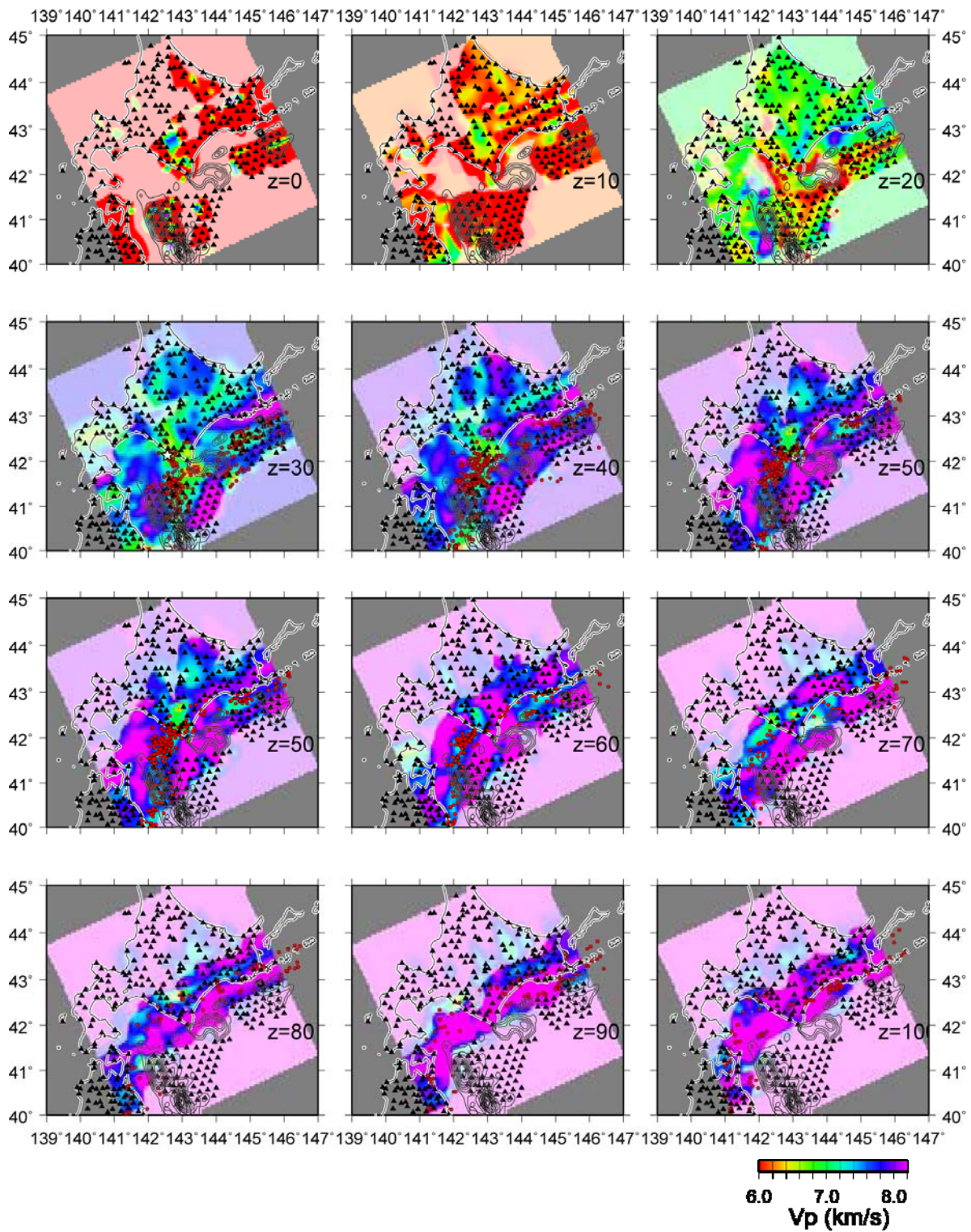


図 12 深さ 10 km ごとにとった V_p の水平分布
 ▲は観測点分布。赤丸は各深さレベルでの震央分布。

3. 1. 1. 2. プレート境界及びその周辺域の3次元地殻不均質構造の推定

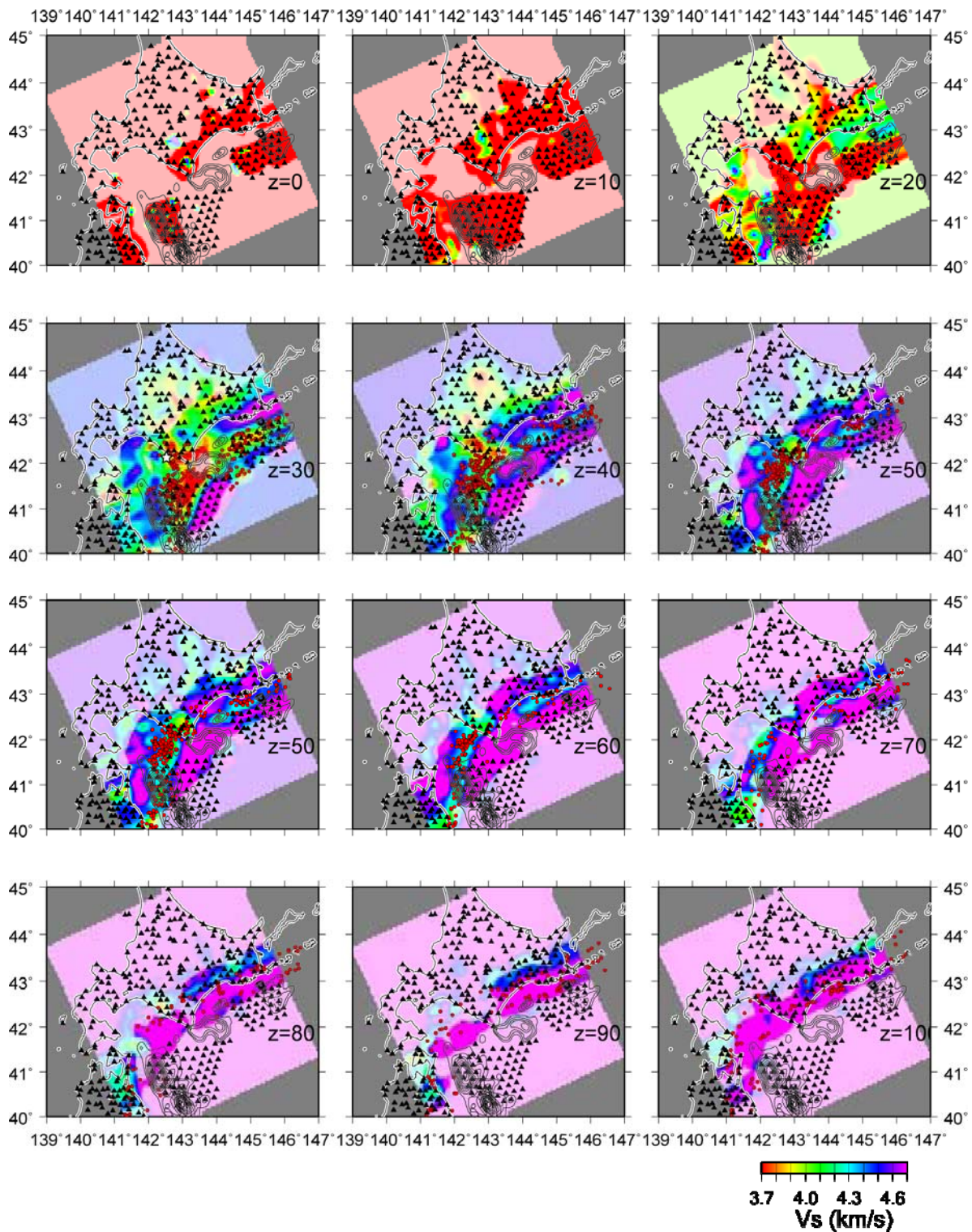


図 13 深さ 10 km ごとにとった V_s の水平分布
 ▲は観測点分布。赤丸は各深さレベルでの震央分布。

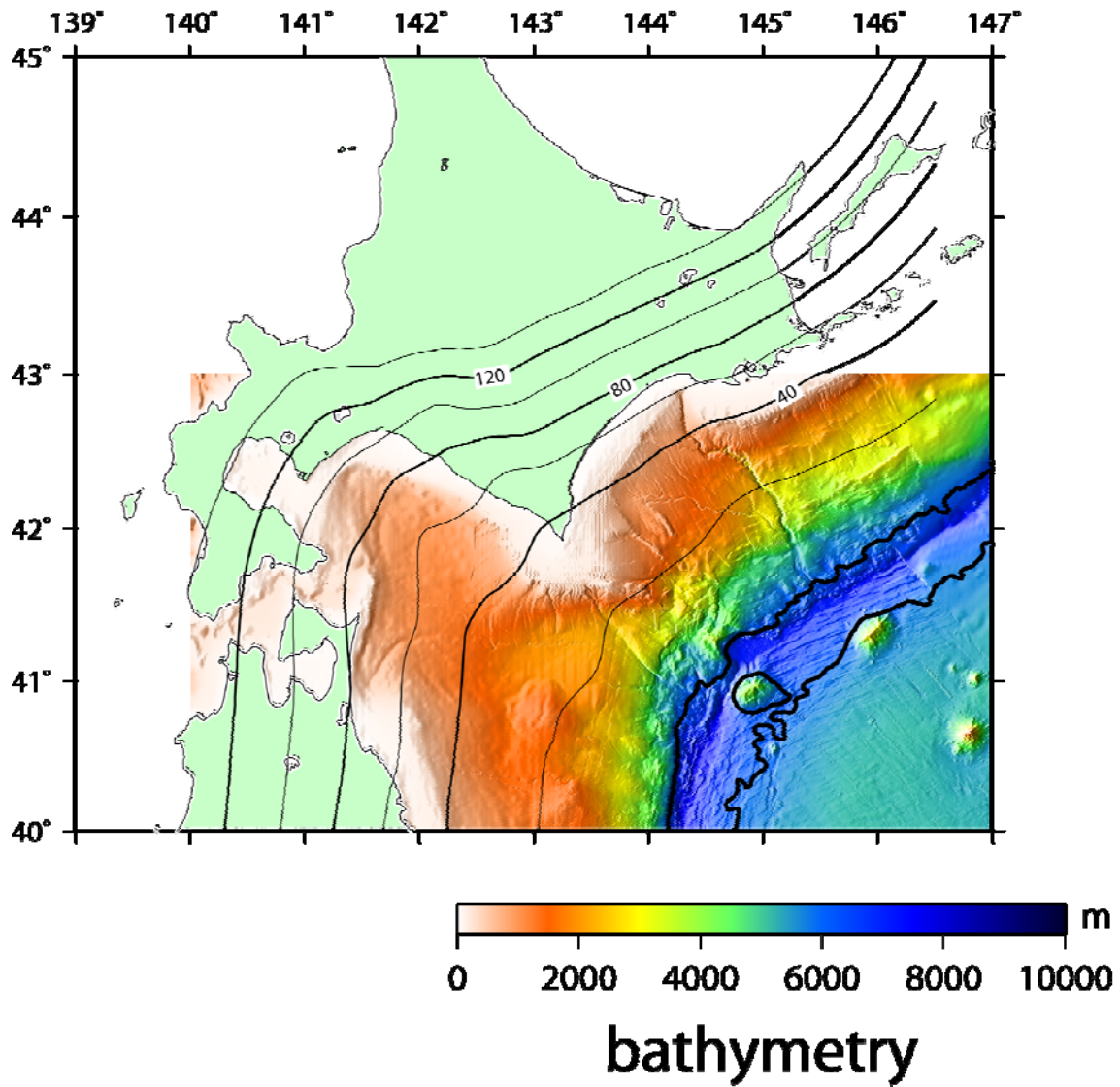


図 14 本研究で推定したプレート境界面の形状
20 km 間隔の等深線で示す。

3. 1. 1. 2. プレート境界及びその周辺域の3次元地殻不均質構造の推定

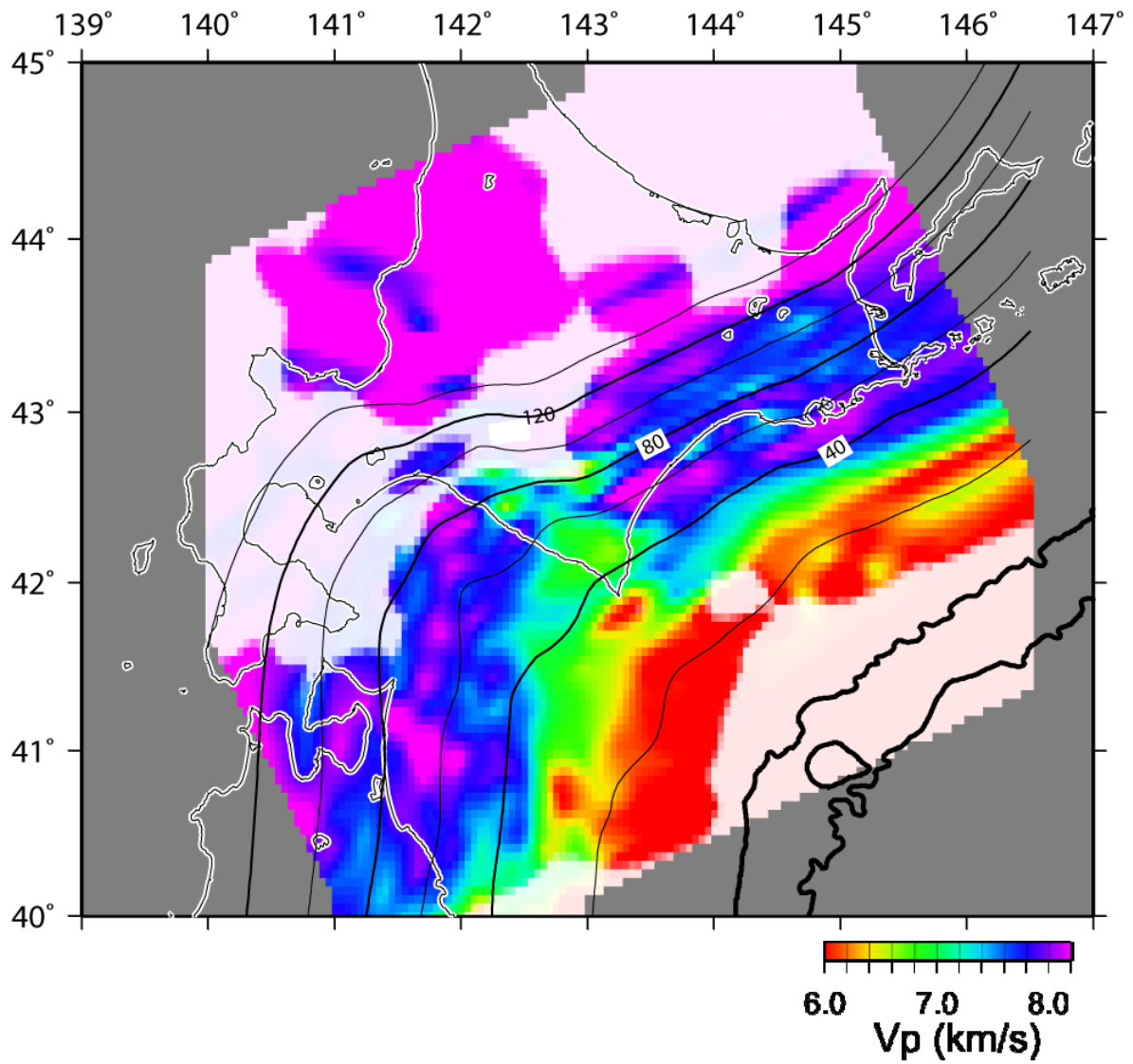


図 15 プレート境界面から 5 km 上方における V_p の分布

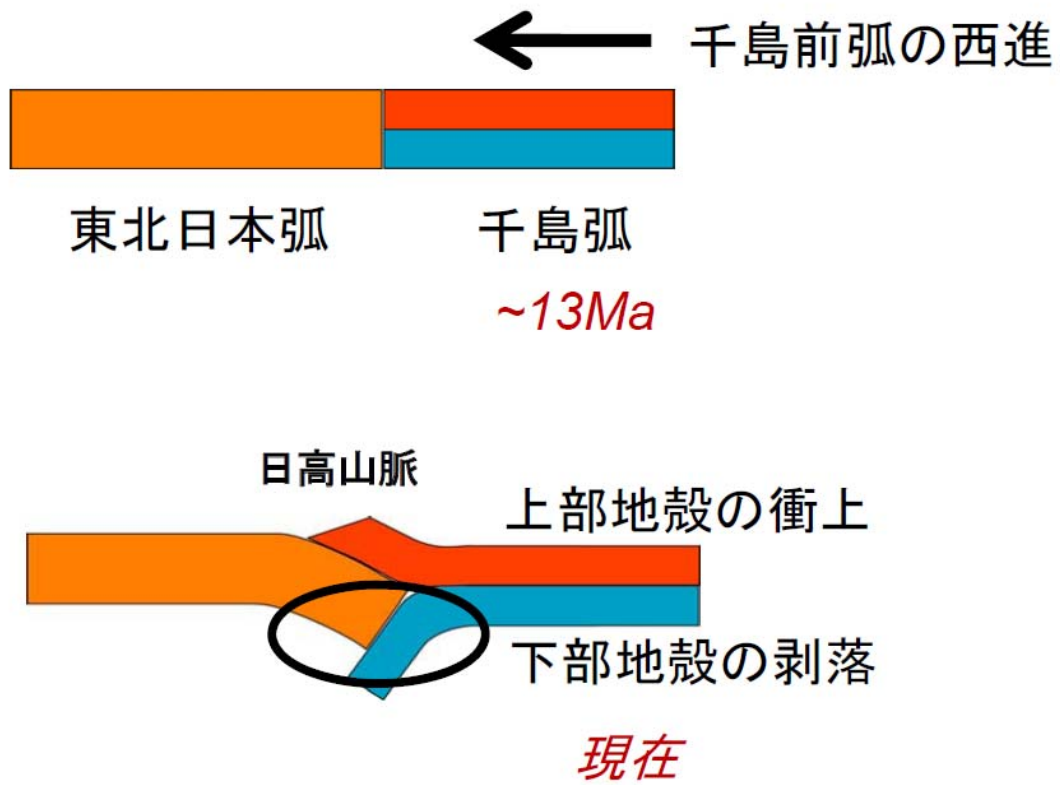


図 16 千島弧の前弧スリバーの西進、東北日本弧との衝突による日高山脈形成過程の模式図

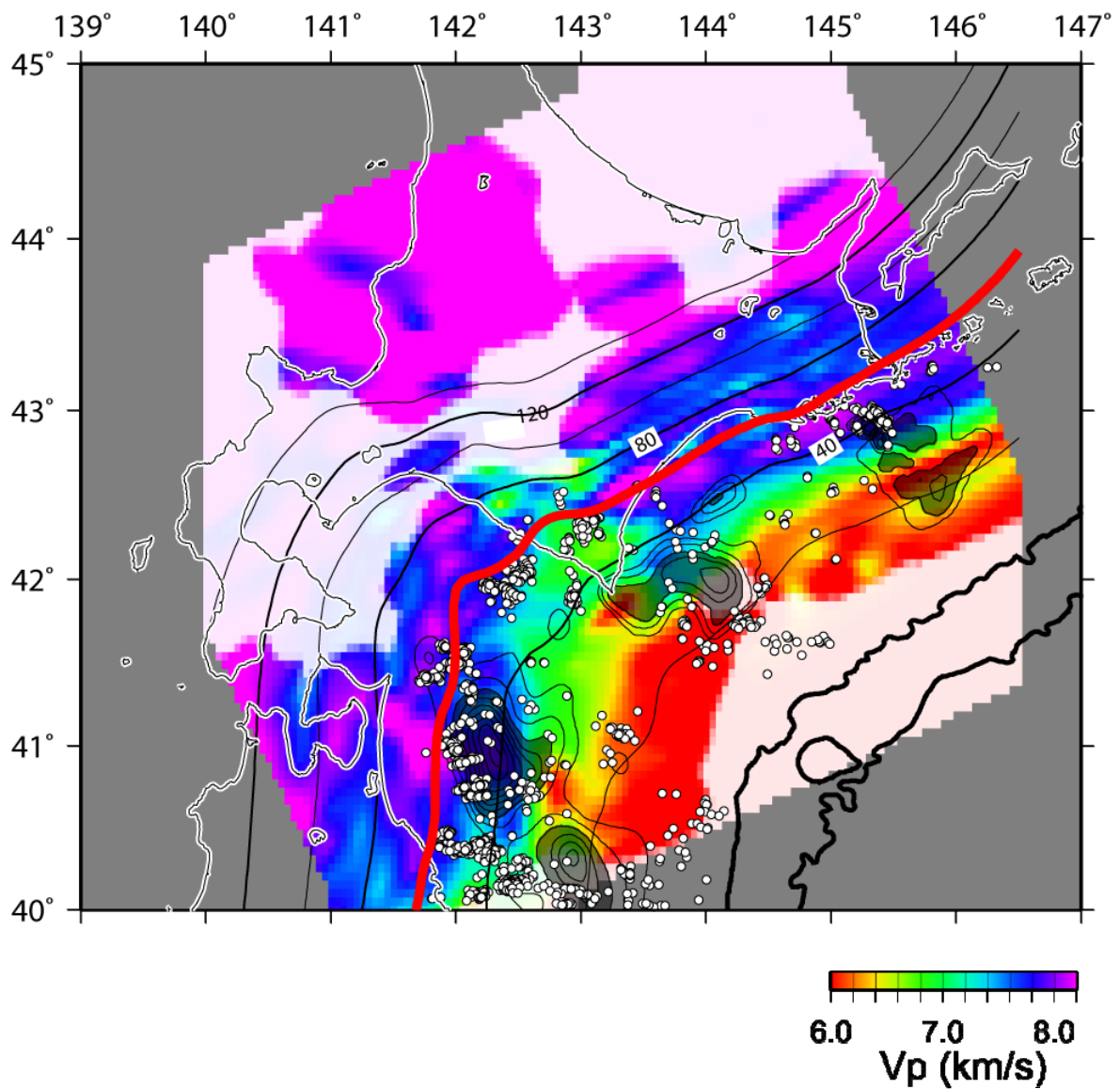


図 17 プレート境界面直上 5 km における V_p の分布と、プレート境界型大地震の破壊域(コンターで示す)、相似地震の震央の分布との比較

大地震の震源域は、文献 9)、10)、11) による。赤線は、プレート境界面の 60 km の等深線。

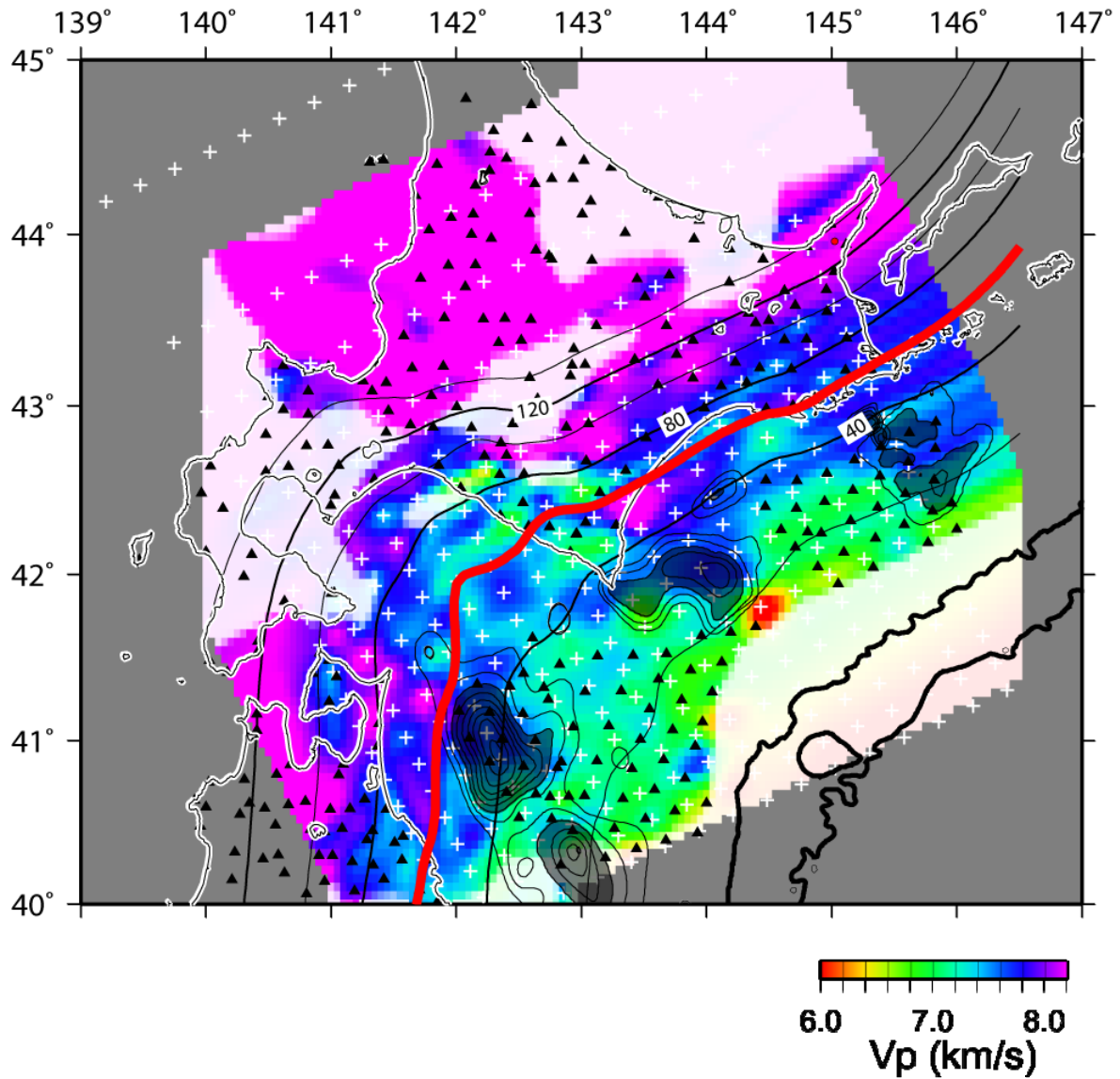


図 18 プレート境界面直下 5 km における V_p の分布と、プレート境界型大地震の破壊域(コンターで示す) との比較

大地震の震源域は、文献 9)、10)、11)による。赤線は、プレート境界面の 60 km の等深線。

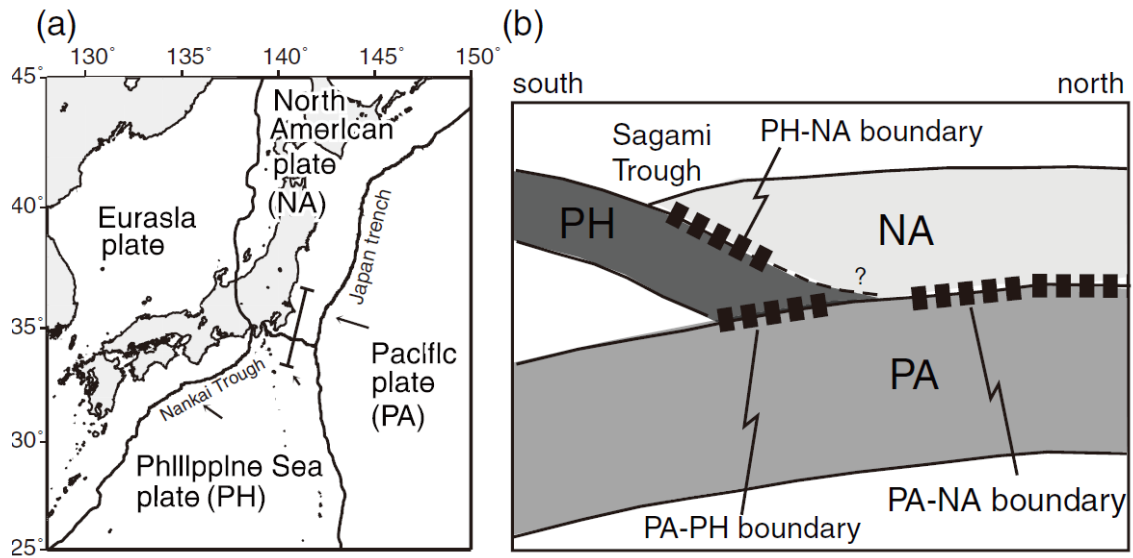


図 19 (a) 東北日本弧周辺のプレート配置

(b) 東北日本弧南端部におけるプレートの位置関係を示す断面図

(a) 中に断面のーを示した。

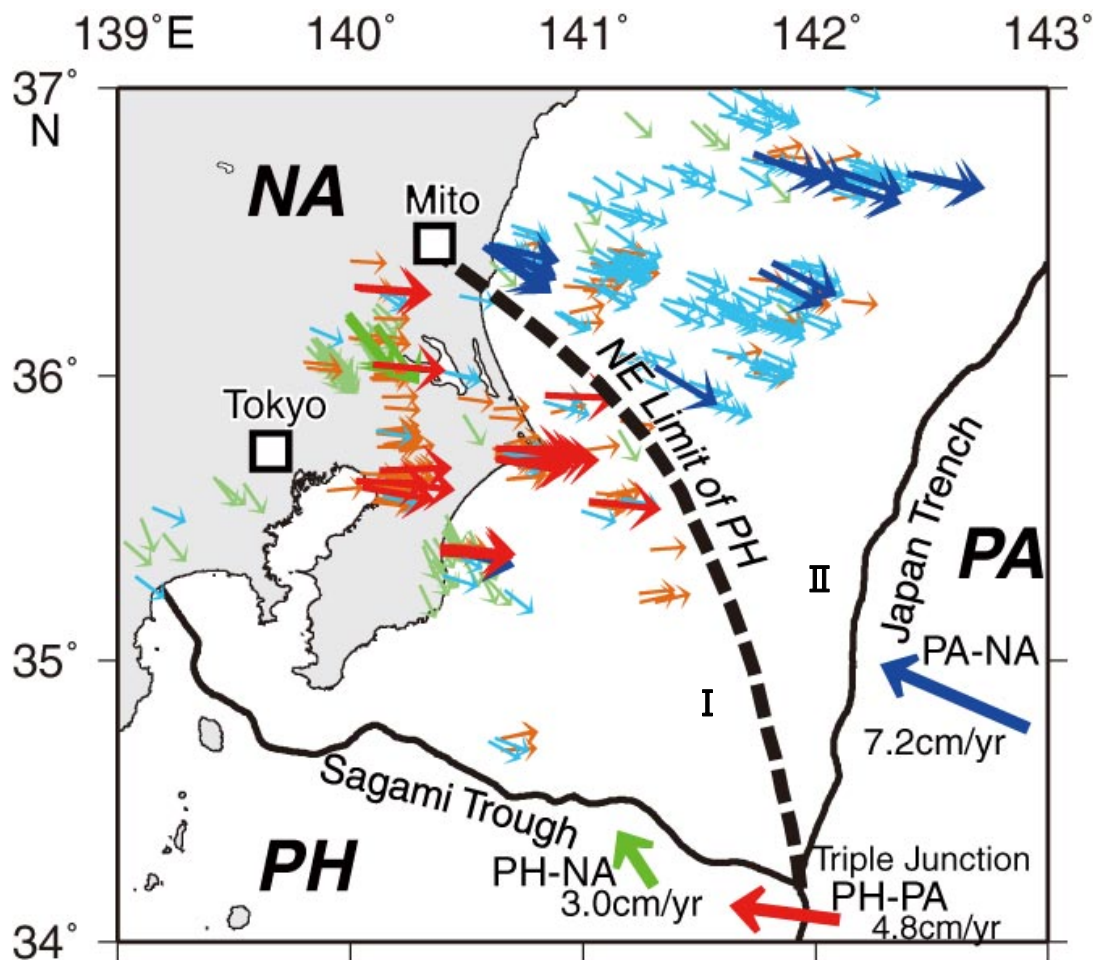


図 20 東北日本弧南端部のプレート境界面に沿って発生する低角逆断層型の発震機構解を持つ地震のすべりベクトルの分布

相似地震についてはベクトルを矢印で示した。すべりベクトルは、方位角によって3種類に分類し、異なる色で示した。赤/橙：方位角 $75 \sim 100^\circ$ 、青/水色： $100 \sim 130^\circ$ 、緑： $130 \sim 160^\circ$ 。フィリピン海プレート-太平洋プレート (PH-PA)、フィリピン海プレート-北米プレート (PH-NA)、太平洋プレート-北米プレート (PA-NA) それぞれの間の相対運動の方向と速さを、緑、赤、青の矢印で示した。プレート運動モデルは、Salles et al. (2002) による。領域 I ではプレート境界を境にフィリピン海プレートと太平洋プレートが接し、領域 II ではプレート境界を境に北米と太平洋プレートが接する。

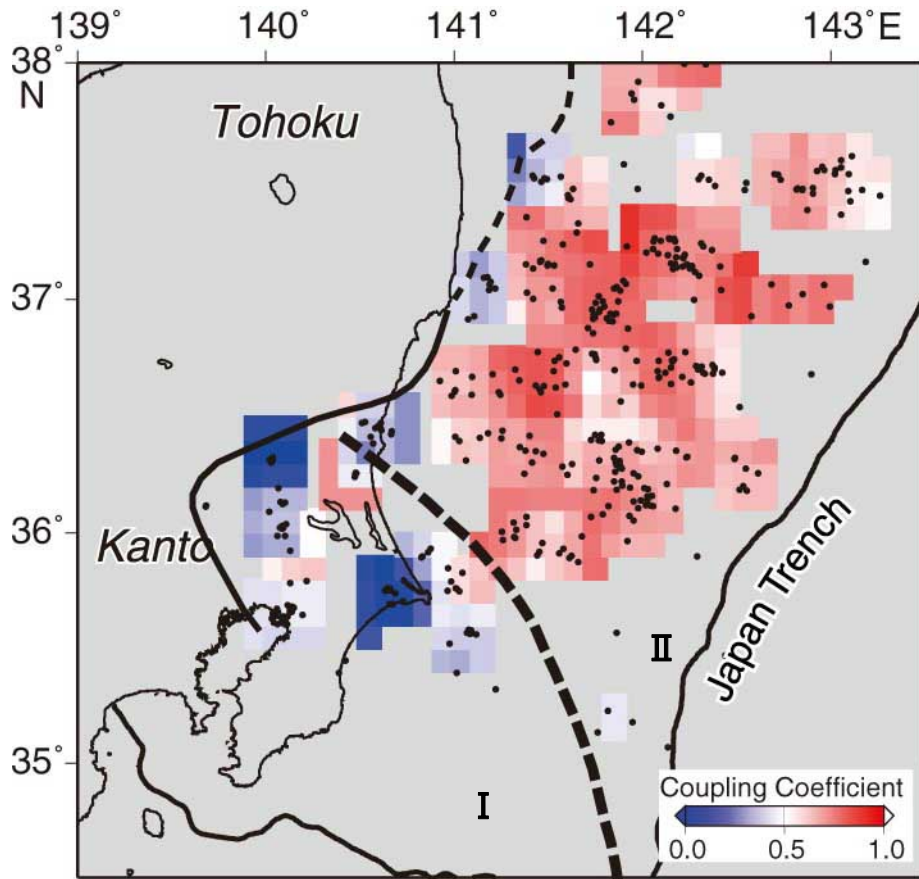


図 21 東北日本弧最南部での太平洋プレート上のカップリング率の分布
黒丸はすべりレートの計算に用いた相似地震グループの分布。

(d) 結論ならびに今後の課題

平成 20 年度には、

- 1) 観測点配置に関する調整
- 2) 海底地震計の設置・回収
- 3) 海底地震観測データの処理
- 4) 陸域観測網データの収集
- 5) データの解析

の業務を実施した。

5 カ年間で予定していたすべての海域において長期海底地震計による海底地震観測データを取得し、陸上地震観測網により得られる地震波形とともに一括処理を行い、北海道から東北地方の太平洋側のプレート境界地震発生域の地震波速度構造を推定するのに必要な P および S 波の到達時刻の検出作業を実施した。

平成 16～19 年度にかけて、三陸沖北部、釧路・根室沖、えりも沖の 3 海域で実施した海底地震観測により得られたデータを用いて、北海道から東北地方北部の太平洋側地域の地震波速度構造を地震波トモグラフィ解析により推定した。日高山脈の直下から襟裳岬沖にかけての千島海溝-日本海溝会合部では、千島前弧と東北日本弧の衝突による地殻の厚化がみられ、剥落した千島前弧の地殻下部物質がプレート境界面と接触している。1968 年十勝沖地震と 2003 年十勝沖地震の震源域は、この接触領域によって隔てられていること、接触領域と 2003 年の地震後に発生した非地震性の余効すべりのすべり域とが対応することは、上盤側の不均質構造が海陸プレート間カップリング状態に強い影響を及ぼしていることを示す。

一方で、東北日本弧最南部のプレート境界で発生する相似地震を含む低角逆断層型地震の発震機構解を詳細に調べることにより、プレート間地震のすべりベクトルが顕著な空間変化を示すことを明らかにした。これは、太平洋プレートが北米プレートと接触する領域とフィリピン海プレートと接触する領域とで、それぞれの組み合わせでのプレート間相対運動の方向に対応した方向をプレート間地震のすべりベクトルが向くことで説明でき、すべりベクトルが急変する位置によって、南側から沈み込むフィリピン海プレートの先端の位置を定義した。また、太平洋プレートと北米プレートが接触する領域と太平洋プレートとフィリピン海プレートとが接触する領域のそれぞれで、相似地震活動を解析することによってカップリング率を推定し、これらの領域の間でカップリング率に大きな違いがあることを示した。このことは、北海道～東北日本弧北部におけるトモグラフィ解析の結果とあわせて、プレート境界面上盤側の構造不均質がプレート間固着状態に強く影響を及ぼしていることを示す証拠である。

(e) 引用文献

- 1) Zhang H., and C. Thurber, Double-Difference Tomography: the method and its

3. 1. 1. 2. プレート境界及びその周辺域の3次元地殻不均質構造の推定

- application to the Hayward Fault, California, Bull. Seism. Soc. Am., 93, 1875-1889, 2003.
- 2) Nakanishi, A. A. J. Smith, S. Miura, T. Tsuru, S. Kodaira, K. Obana, N. Takahashi, P. R. Cummins and Y. Kaneda, Structural factors controlling the coseismic rupture zone of the 1973 Nemuro-Oki earthquake, the southern Kuril Trench seismogenic zone, J. Geophys. Res., 109, doi:10.1029/2003JB002574, 2004.
- 3) Ito, A., G. Fujie, T. Tsuru, S. Kodaira, A. Nakanishi and Y. Kaneda, Fault plane geometry in the source region of the 1994 Sanriku-oki earthquake, Earth Planet. Sci. Lett., 223, 163-175, 2004.
- 4) 木村学, プレート収束帯のテクトニクス学, 東京大学出版会, 271pp, 2002.
- 5) Peacock, S. M. and R. D. Hyndman, Hydrous minerals in the mantle wedge and the maximum depth of subduction thrust earthquakes, Geophys. Res. Lett., 26, 2, 517-2, 520.
- 6) 山本揚二郎, 東北日本前弧域の地震波速度不均質とその地震テクトニクスの意義, 東北大学博士論文, pp127, 2007.
- 7) Nadeau, R. M. and L. R. Johnson, Seismological studies at Parkfield VI, Moment release rates and estimates of source parameters for small repeating earthquakes, Bull. Seismol. Soc. Am., 88, 790-814, 1998.
- 8) Sella G.F., Dixon, T.H., Mao, A., REVEL: A model for recent plate velocities from space geodesy, J. Geophys. Res. 107 (B4), 2081, doi:10.1029/2000JB000033, 2002.
- 9) 山中佳子・菊池正幸, アスペリティマップー北海道編(その1)ー, 日本地震学会講演予稿集, B52, 2002.
- 10) EIC 地震学ノート, 2004年12月6日釧路沖の地震(Mj6.9), http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/2004/EIC159.html, 2004.
- 11) Yamanaka, Y. and M. Kikuchi, Asperity map along the subduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data, J. Geophys. Res., 109, doi10.1029/2003JB002683, 2004.

(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 |
|---|-------------------------------------|---------------------|---------|
| 内田直希, 松澤暢, 岡田知己, 島村浩平, 長谷川昭, 今西和俊, Ellsworth William L. | 2008年の繰り返し釜石沖地震とその周辺の地震活動 | 地球惑星科学連合 2008年大会 | 2008年5月 |
| 米原みずき, 岡田知己, 八木勇治, 対馬弘晃, 日野亮太, 長谷川昭 | 2003年福島県沖に発生した地震(M6.8)の地震時すべり分布 - 海 | 地球惑星科学連合 2008年大会 | 2008年5月 |

3. 1. 1. 2. プレート境界及びその周辺域の3次元地殻不均質構造の推定

| | | | |
|--|---|---------------------|---------|
| | 山・アスペリティ仮説の検討 | | |
| 荒尾正克, 松澤暢, 内田直希, 有吉慶介, 長谷川昭 | 小繰り返し地震のすべり様式の揺らぎとその規則性 | 地球惑星科学連合 2008年大会 | 2008年5月 |
| 山本揚二郎, 日野亮太, 伊藤喜宏, 鈴木健介, 山田知朗, 篠原雅尚, 金沢敏彦, 金沢敏彦, 田中昌之, 高波鐵夫・植平賢司・金田義行 | Three-dimensional seismic velocity structure in the off-Miyagi and off-Fukushima forearc region | 地球惑星科学連合 2008年大会 | 2008年5月 |
| 山本揚二郎, 日野亮太, 伊藤喜宏, 藤本博己 | Tomographic imaging of seismic velocity structure in the NE Japan forearc region | 地球惑星科学連合 2008年大会 | 2008年5月 |
| 松澤暢, 島村浩平, 内田直希, 岡田知己, 伊藤喜宏, 河野俊夫, 長谷川昭 | 岩手県釜石沖の固有地震的活動の長期予知について | 地球惑星科学連合 2008年大会 | 2008年5月 |
| 島村浩平, 岡田知己, 松澤暢, 長谷川昭 | 2005年10月22日にいわき沖で発生した地震の破壊域の推定 | 地球惑星科学連合 2008年大会 | 2008年5月 |
| 島村浩平, 岡田知己, 内田直希, 松澤暢, 河野俊夫, 長谷川昭 | 2008年1月11日に釜石沖で発生した地震と過去の釜石沖の繰り返し地震の破壊域の比較 | 地球惑星科学連合 2008年大会 | 2008年5月 |
| 内田直希, Kirby Stephen, 岡田知己, 北佐枝子, 辻優介, 山本揚二郎, Shantha S. N. Gamage, 日野亮太, 松澤暢, 長谷川昭 | 東北日本三陸沖の太平洋スラブ直上の地震活動 | 地球惑星科学連合 2008年大会 | 2008年5月 |
| 東龍介, 日野亮太, 伊藤喜宏, 高波鐵夫, 三浦亮, 一條和宏, 望月公廣, 五十嵐俊博, 植平賢司, 佐藤利典・篠原雅尚・金沢敏彦 | Vp velocity structure of the crust and the slab mantle of the subducted Pacific Plate near the Japan Trench by airgun-OBS | 地球惑星科学連合 2008年大会 | 2008年5月 |

3. 1. 1. 2. プレート境界及びその周辺域の3次元地殻不均質構造の推定

| | | | |
|--|--|---------------------|---------|
| | survey | | |
| 丸山友章, 佐藤利典, 中東和夫, 山田知朗, 望月公廣, 桑野亜佐子, 山下幹也, 酒井慎一, 篠原雅尚, 金沢敏彦・高波鐵夫・村井芳夫・雨宮晋一郎・日野亮太・山本揚二郎 | 東北日本青森沖地震波速度構造の解析 | 地球惑星科学連合 2008年大会 | 2008年5月 |
| 中東和夫, 桑野亜佐子, 山田知朗, 望月公廣, 篠原雅尚, 酒井慎一, 八木健夫, 橋本信一, 金沢敏彦, 町田祐弥・三浦亮・雨宮晋一郎・村井芳夫・高波鐵夫・東龍介・日野亮太 | 青森沖東部における地殻構造 | 地球惑星科学連合 2008年大会 | 2008年5月 |
| 桑野亜佐子, 篠原雅尚, 山田知朗, 望月公廣, 中東和夫, 酒井慎一, 橋本信一, 八木健夫, 金沢敏彦, 東龍介・日野亮太・町田祐弥・雨宮晋一郎・三浦亮・村井芳夫・高波鐵夫 | 長期観測型海底地震計を用いた日本・千島海溝会合部の微小地震活動 | 地球惑星科学連合 2008年大会 | 2008年5月 |
| 町田祐弥, 高波鐵夫, 村井芳夫, 雨宮晋一郎, 西村裕一, 中東和夫, 桑野亜佐子, 山田知朗, 望月公廣, 篠原雅尚・金沢敏彦・日野亮太・東龍介 | Seismic crustal structure of the southernmost Kuril trench by Airgun-OBS seismic profiling | 地球惑星科学連合 2008年大会 | 2008年5月 |
| 篠原雅尚, 大久保忠博, 渡邊いづみ, 中東和夫, 望月公廣, 山田知朗, 金沢敏彦, 日野亮太, 高波鐵夫, 佐藤利典・植平賢司 | 制御震源と海底地震計を用いた日本海溝陸側斜面下のP波速度構造-三陸沖から茨城沖にかけての島弧下マントル構造の空間変化- | 地球惑星科学連合 2008年大会 | 2008年5月 |

3. 1. 1. 2. プレート境界及びその周辺域の3次元地殻不均質構造の推定

| | | | |
|--|---|--|----------|
| 日野亮太, 山本揚二郎, 伊藤喜宏, 長谷川昭, 東龍介, 山田知朗, 中東和夫, 桑野亜佐子, 望月公廣, 酒井慎一・篠原雅尚・金沢敏彦・高波鐵夫・村井芳夫・村井芳夫・町田祐弥 | 海陸地震観測データを用いた北海道南東部の地殻・上部マントル構造 | 地球惑星科学連合 2008年大会 | 2008年5月 |
| 有吉慶介, 松澤暢, 堀高峰, 日野亮太, 金田義行, 長谷川昭 | 余効すべり伝播速度から推定される摩擦特性 | 地球惑星科学連合 2008年大会 | 2008年5月 |
| 日野亮太 | 高密度地震観測ネットワーク時代における海底地震観測 | 地球惑星科学連合 2008年大会 | 2008年5月 |
| 有吉慶介, AmpueroJean-Paul, 堀高峰, 金田義行, 松澤暢, 日野亮太, 長谷川昭 | 数値シミュレーションによる深部低周波微動活動の再現の試み小平秀一, 日野亮太, 阿部なつ江 | 地球惑星科学連合 2008年大会 | 2008年5月 |
| 伊藤喜宏, 飯沼卓史, 松原誠, 小原一成 | ハイブリッドモーメントテンソル解析による日本海溝陸側斜面下の地震活動 | 地球惑星科学連合 2008年大会 | 2008年5月 |
| TORU MATSUZAWA, KOUHEI SHIMAMURA, NAOKI UCHIDA, TOMOMI OKADA, YOSHIHIRO ITO, TOSHIO KONO, AKIRA HASEGAWA | Characteristic Earthquake Activity Off Kamaishi, Iwate Prefecture, Japan | AOGS2008 | 2008年6月 |
| Uchida, N., J. Nakajima, A. Hasegawa, T. Matsuzawa | Abrupt change in interplate coupling on the Pacific plate across a border of two overlying plates east off Kanto, Japan | The 7th General Assembly of Asian Seismological Commission | 2008年11月 |
| Yamamoto, Y., R. Hino, M. Shinohara, K. | Tomographic imaging in the off-Miyagi | The 7th General Assembly of Asian | 2008年11月 |

3. 1. 1. 2. プレート境界及びその周辺域の3次元地殻不均質構造の推定

| | | | |
|--|--|--|----------|
| Suzuki, T. Yamada, T. Kanazawa | forearc region by joint inversion using both active and passive source data | Seismological Commission | |
| Uchida, N., M. Mishina, T. Matsuzawa | Afterslip of the 2008 off Ibaraki (M7.0) and off Fukushima (M6.9) earthquakes estimated from small repeating earthquakes | The 7th General Assembly of Asian Seismological Commission | 2008年11月 |
| Shimamura, K., T. Matsuzawa, T. Okada, N. Uchida, T. Kono, A. Hasegawa | A Detailed analysis of the off-Kamaishi earthquake sequence | The 7th General Assembly of Asian Seismological Commission | 2008年11月 |
| Azuma, R., R. Hino, Y. Ito, T. Takanami, R. Miura, K. Ichijo, K. Mochizuki, T. Igarashi, K. Uehira, T. Sato, M. Shinohara and T. Kanazawa | Seismic velocity structure of the subducting Pacific Ocean slab near the Japan trench deduced by airgun-OBS surveys | The 7th General Assembly of Asian Seismological Commission | 2008年11月 |
| Hino, R., R. Azuma, Y. Yamamoto, Y. Ito, A. Kuwano, K. Nakahigashi, T. Yamada, K. Mochizuki, T. Yagi, S. Hashimoto, M. Shinohara, T. Kanazawa, Y. Murai, S. Amamiya Y. Machida and T. Takanami | 3D Seismic Velocity Structure along the southwestern Kuril Trench | The 7th General Assembly of Asian Seismological Commission | 2008年11月 |
| Uchida, N., A. Hasegawa, J. Nakajima, T. Matsuzawa | What controls interplate coupling? Implications from abrupt changes in coupling on the Pacific plate across a border between two | AGU 2008 Fall meeting | 2008年12月 |

3. 1. 1. 2. プレート境界及びその周辺域の3次元地殻不均質構造の推定

| | | | |
|---|---|-------------------------|----------------|
| | overlying plates in the southernmost extent of the NE Japan subduction zone | | |
| Azuma, R., R. Hino, Y. Ito, T. Takanami, R. Miura, K. Ichijo, K. Mochizuki, T. Igarashi, K. Uehira, T. Sato, M. Shinohara and T. Kanazawa | Seismic velocity structure of subducting Pacific Ocean slab near Japan trench deduced by airgun-OBS surveys | AGU 2008 Fall meeting | 2008年12月 |
| Uchida, N. J. Nakajima, A. Hasegawa, and T. Matsuzawa | What controls interplate coupling? :Evidence for abrupt change in coupling across a border between two overlying plates in the NE Japan subduction zone | Earth Planet. Sci Lett. | 2009年 in press |
| Ariyoshi, K., T. Hori, J. Ampuero, Y. Kaneda, T. Matsuzawa, R. Hino and A. Hasegawa | Influence of interaction between small asperities on various types of slow earthquakes in a 3-D simulation for a subduction plate boundary | Gondwana Research | 2009年 in press |
| Yamamoto, Y., R. Hino, K. Suzuki, Y. Ito, T. Yamada, M. Shinohara, T. Kanazawa, G. Aoki and M. Tanaka, K. Uehira, G. Fujie, Y. Kaneda, T. Takanami, and T. Sato | Spatial heterogeneity of the mantle wedge structure and interplate coupling in the NE Japan forearc region | Geophys. Res. Lett. | 2009年 |

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定なし。