３．１　断層帯の三次元的計状・断層帯周辺の地殻構造解明のための調査観測

ｂ．自然地震観測に基づく断層周辺の広域的３次元構造調査

(1) 業務の内容

(a) 業務題目　自然地震観測に基づく断層周辺の広域的３次元構造調査

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
独立行政法人	主任研究員	松原　誠	mkmatsu@bosai.go.jp
防災科学技術研究所	主任研究員	浅野　陽一	asano@bosai.go.jp
観測予測研究領域	主任研究員	汐見　勝彦	shiomi@bosai.go.jp
地震・火山防災研究ユニット	主任研究員	木村　尚紀	kimura@bosai.go.jp
同	主任研究員	武田　哲也	ttakeda@bosai.go.jp
同	研究員	齊藤　竜彦	saito-ta@bosai.go.jp
同	研究員	松澤　孝紀	tkmatsu@bosai.go.jp
同	主任研究員	藤田　英輔	fujita@bosai.go.jp
同	主任研究員	上田　英樹	ueda@bosai.go.jp

(c)業務の目的

神縄・国府津－松田断層帯を取り囲む丹沢山地－富士山周辺部は、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う多重衝突によって、いくつかの断層帯と複雑なブロック的地殻構造を形成している。本業務では、本断層帯およびその周辺域の全体像を把握するため、機動的地震観測点を設置し、観測により得られたデータを用いて地震波トモグラフィー等の解析を行い、地殻・プレート境界周辺における微小地震活動及び陸域の断層周辺の３次元地震波速度構造を解明し、不明の点が多く残されている断層北縁部及び西方延長部の詳細な構造を求める。

(d) ３ヵ年の年次実施業務の要約

1) 平成 21 年度：

既存の基盤的地震観測網および火山観測網のデータに基づき、これまでの地震活動の震源・発震機構解再決定、地震波トモグラフィー等の予備的解析を実施し、神縄・国府津－松田断層帯周辺の地殻・プレート構造に関する概観的モデルを得た。また、機動的地震観測点を２点程度設置してノイズ環境等を調査し、また、震源決定やトモグラフィー解析の分解能向上を評価し、翌年度に展開する機動的地震観測点の配置を検討した。

2) 平成 22 年度：

機動的地震観測点を 28 点設置し、平成 21 年度に設置した 2 点とあわせて 30 観測

点の観測網を構築した。データ回収・バッテリー交換などの保守によって、３月までに約７ヶ月分のデータを取得した。また、これらの機動観測点のデータと既存観測網のデータとを併合処理するシステムを構築し、試験的な処理を行った。

3) 平成 23 年度：

機動的地震観測点を維持しつつ、得られたデータについて、既存観測網のデータと統合処理を行った。平成23年11月に機動的地震観測を終了し、データ回収と観測点の撤収を実施した。機動的地震観測で得られたデータを既存観測網のデータと併合処理するシステムに適用し、広域的な地震波速度解析に資するデータを生産し、解析を行った。その結果と元に、断層の形状や地震活動との関係を明らかにした。

(2) 平成 21～23 年度の成果

(a) 業務の要約

1) 機動的地震観測

神縄・国府津－松田断層帯周辺域における地震活動およびやや広域の地殻構造を明らかにするために、オフライン機動観測点 30 点からなる観測網を整備した。平成 21 年度に２点設置し平成 22 年度に 28 点設置した。この間、平成 23 年３月にデータの回収・電池交換等を行った。平成 23 年 11 月に撤収し、機動観測は修了した。

2) 観測データとデータ処理

機動観測により得られたデータは、記録回収の度に多量のデータを含む多数の記録媒体がデータセンターに集まる。それらのデータを既存の防災科学技術研究所の高感度地震観測網のデータや神奈川県温泉地額研究所等の既存の観測網のデータと滞りなく併合処理するための処理システムを構築した。このシステムでは、データの統合に加えて、記録波形から地震や発破などのイベント検出・自動震源決定を行うとともに、そのイベントに該当する時間帯の記録波形を切り出してイベント波形ファイルを作成する処理を実施した。

3) 地震波速度構造解析

前節により得られたデータと、既存の観測網のデータにより得られた 2011 年８月以前の読取りデータをあわせて、地震波の P 波・S 波の到達時刻の読取り作業を行った。それにより生産されたデータを用いて、広域的な地震波速度構造トモグラフィー解析を実施した。その結果、国府津－松田断層に沿って低速度領域が存在する一方、断層の下盤は特に高速度領域であり、北部の衝突帯では高速度な下盤と低速度な上盤を分ける位置に断層が存在することなどが明瞭になった。

(b) 業務の成果

1) 機動的地震観測

神縄・国府津－松田断層帯周辺域における地震活動およびやや広域の地殻構造を明ら

かにするために、本業務ではオフライン機動観測点 30 点からなる観測網の整備を進めた。平成 21 年度に２点、平成 22 年８月には 28 点の観測点を設置した。平成 22 年 11 月～12 月にかけて、および３月に保守を実施し、コンパクトフラッシュ（CF）カードの交換によってデータを回収するとともに、バッテリー交換や故障した地震計の交換などによって観測点の維持管理に努めた。

全 30 点を選ぶにあたっては､やや広域の地殻構造を明らかにするのに適した配置とするために、既存観測点の間を埋めるように、神奈川県（16 点）のみならず、山梨県（８点）および静岡県（６点）にも観測点を設置した（図１および表１）。これらの観測点の設置によって、浅発微小地震活動が活発な断層周辺域では、観測点間隔が 10 km 以下の高密度の観測網が実現した。また、より北側の観測点密度が低い領域においても、観測点間隔が約 15 km 程度と向上した。

2）観測データとデータ処理

全機動観測点が稼動中の平成 22 年（2010 年）8 月 15 日から平成 23 年（2011 年）11 月 20 日までの間に、観測対象領域（北緯 35～36 度、東経 138.5～139.5 度）で検出された浅発微小地震（深さ 30 km 以浅）は防災科研 Hi-net の定常処理によると 3444 個である（図１）。

本業務で実施されるような多点での長期にわたるオフライン観測では、記録回収の度に多量のデータを含む多数の記録媒体がデータセンターに集まる。そのため、それらのデータ処理を滞ることなく進めることは解析結果と成果を速やかに得る上で決定的に重要である。そこで本業務では、30 点のオフライン観測点の連続記録を既存観測網（Hi-net や神奈川県温泉地学研究所等の観測網）の記録と滞りなく併合（マージ）処理するための処理システムを構築した（図２）。

現地観測点の連続記録が収録された CF カードは､保守作業によって回収された後にデータセンターに持ち込まれ、カードリーダーを備えたデータ収集用 PC 波形データ蓄積用ディスクサーバー（図２：蓄積装置）にコピーされる。この時点では、データは 60 分の記録長を持つ観測点毎のファイルによって構成されているが、解析により適した全観測点分のデータを収めた記録長１分のファイルへと編集され、併せて蓄積装置に蓄積される。

次に、この記録波形から地震や発破などのイベント検出や自動震源決定を行うとともに、そのイベントに該当する時間帯の記録波形を切り出してイベント波形ファイルを作成する処理を行う。本システムにおいては、既存のシステムである Hi-net のデータ処理システム（以下、Hi-net システム）に登録されたイベント情報を元にイベントファイルを生成する方法を採用した。この方法では、本システムと Hi-net システムの双方で検出したイベントを照合し、同一のイベントについては検測値をマージして震源決定を再び行うとともに、イベント波形ファイル作成する。この一連の処理は計算処理サーバー（図２：解析装置）によって行われる。こうして作成されたイベント波形ファイルは、Hi-net システムの一部である再検測 PC によって読み込むことが可能である。オペレターはこの再検測 PC 上で手動検測作業を行い、その検測値に基づく震源計算と結果のデ

ータベース（DB）への書き込みを解析装置に指示することができる。データベース（DB）上には、震源や検測値のみならず観測点や機器に関する情報が登録され、その登録、閲覧、および修正は、観測点・機器情報管理PCによって行うことができる。このように、データ編集に始まり、イベント波形作成、手動再検測および震源再計算を効率よく進めることができるシステムを本業務によって整備することができた。

機動的地震観測期間中に発生した地震のうち、692個の地震について、P波及びS波の到達時刻の手動検測作業を行った。

3）地震波速度構造解析

a)データ・手法

前節により得られたデータと、既存の観測網のデータにより得られた2011年８月以前の読取りデータをあわせて、広域的な地震波速度構造トモグラフィー解析を実施した。解析には、Zhao et al.（1992)のトモグラフィ法にスムージングを導入し観測点補正値も考慮する手法(Matsubara et al., 2005, 2008)を用いた。トモグラフィー解析の解析領域は、解析に使用する波線数を考慮して、東経138～140°、北緯34.5～36.5°である。チェッカーボードテストの結果を図３に示す。解析領域全体では、水平方向に0.1°（約10km）の分解能があることが明らかになった。深さ方向においては深さ 20km までは５kmの分解能が確かめられた。本領域はMatsubara et al.（2005)における解析領域の西端に位置するが、浅部では、水平方向の分解能が0.25°（約25km)、深さ10km以深での深さ方向の分解能が10kmであったので、それぞれ解像度が向上したことが分かる。

b）結果

深さ０、５、10、15、20、25、30、35、40kmの断面を図４～６に示す。深さ５kmより深いところでは、地震活動は高速度域で活発なことが分かる。

国府津－松田断層を横切る断面を図７～９に示す。南側では、断層に沿った低速度領域がイメージングされている。一方、その下には高速度領域が存在することが明らかになった。断層に沿って沈み込むように見える低速度領域は、フィリピン海プレート最上部の低速度海洋性地殻の可能性も考えられる（図７、８）。一方、北部では国府津－松田断層は下盤の高速度領域と上盤の低速度領域を分ける位置に存在していると考えられる（図９）。

平成21年に実施された相模湾重合測線に沿った断面を図10に示す。この領域では、海域への延長した国府津－松田断層が横切っている。この範囲では、沈み込むフィリピン海プレートが高速度領域としてイメージングされている。

平成23年に断層西方延長に位置する箱根－富士吉田測線に沿った断面を図11に示す。この測線では、電磁気探査の側線にも近接している。電磁気探査では、丹沢山地の高比抵抗ブロックが顕著であった。この領域は、その両側の領域に比べて高速度領域である。一方、神縄断層の西方延長では低比抵抗領域がイメージングされている。この低比抵抗領域は、顕著な低速度領域に一致する。さらに、箱根カルデラの低比抵抗領域も低速度領域と調和的である。

大都市圏大震災軽減化特別プロジェクトにおいて平成１５年に実施された小田原－桐生側線および Asano et al. （1982, 1985）の伊豆半島縦断測線に沿った断面を図 12 に示す。ここでは、屈折波トモグラフィー解析が行われている(Arai et al., 2009)。藤ノ木愛川構造線を境に、南の伊豆・小笠原弧の低速度領域、北側の本州弧の高速度領域が調和的である。断層北縁部においては、北傾斜の神縄断層から伊豆・小笠原弧の上部・中部地殻が沈み込み、若干低速度になっている。

大都市圏大震災軽減化特別プロジェクトにおいて平成１７ 年に実施された小田原－山梨側線に沿った断面を図１３に示す。ここでは、屈折波トモグラフィー解析が行われている(Arai et al., 2009)。断層北縁部の神縄断層付近の低速度領域低速度領域が調和的である。

(c) 結論ならびに今後の課題

30 観測点の機動的地震観測点の設置により約 1 年 3 ヶ月のデータを収集することができた。これらの機動観測点のデータと独立行政法人防災科学技術研究所の高感度地震観測網や神奈川県温泉地学研究所等の既存観測網のデータとを併合処理を行い、深さ方向の分解能を向上させることが可能になった。図１４は、トモグラフィー解析で得られた神縄・国府津－松田断層の模式図である。断層北縁部については、伊豆弧と丹沢ブロックとの衝突帯に位置し、神縄断層に沿った領域で顕著な低速度域が存在することが分かった。その北側の丹沢山地は高速度領域である。また、神縄断層の西方延長においても、顕著な低速度領域がイメージングされた。この結果は、電磁気探査などの結果とも調和的であった。一方、国府津－松田断層では、高速度な沈み込むフィリピン海プレートと最上部の低速度海洋性地殻がイメージングされるとともに、下盤の高速度領域との境界をなすことも明らかになった。

(d) 引用文献

1) Arai, R., T. Iwasaki, H. Sato, S. Abe, and N. Hirata, Collision and subduction structure of the Izu-Bonin arc, central Japan, revealed by refraction/wide-angle reflection analysis Original Research Article, 475, 438-453, 2009.
2) Asano, S., T. Yoshii, S. Kubota, Y. Sasaki, H. Okada, S. Suzuki, T. Masuda, H. Murakami, N. Nishide and H. Inatani, Crustal structure of Izu Peninsula, central Japan, as derived from explosion seismic observations, 1. Mishima-Shimoda Profile, J. Phys. Earth, 30, 367-387, 1982.
3) Asano, S., K. Wada, T. Yoshii, M. Hayakawa, Y. Misawa, T. Moriya, R. Kubota and K. Suyehiro (1985), Crustal structure in the northern part of the Philippine Sea plate as derived from seismic observations of Hatoyama-off Izu peninsula explosions, *J. Phys. Earth*, **33**, 173-189.
4) Matsubara, M., H. Hayashi, K. Obara and K. Kasahara, Low-velocity oceanic crust at the top of the Philippine Sea and Pacific plates beneath the Kanto region, central Japan, imaged by seismic tomography, *J. Geophys. Res.*, **112**, B12304,

doi:10.1029/2005JB003673, 2005.
5) Matsubara, M., K. Obara and K. Kasahara, Three-dimensional P- and S-wave velocity structures beneath the Japan Islands obtained by high-density seismic stations by seismic tomography, Tectonophysics, 454, 86-103, 2008.
6) Zhao, D., A. Hasegawa, S. Horiuchi, Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath Northeastern Japan. J. Geophys, Res. 97, 19909–19928, 1992.

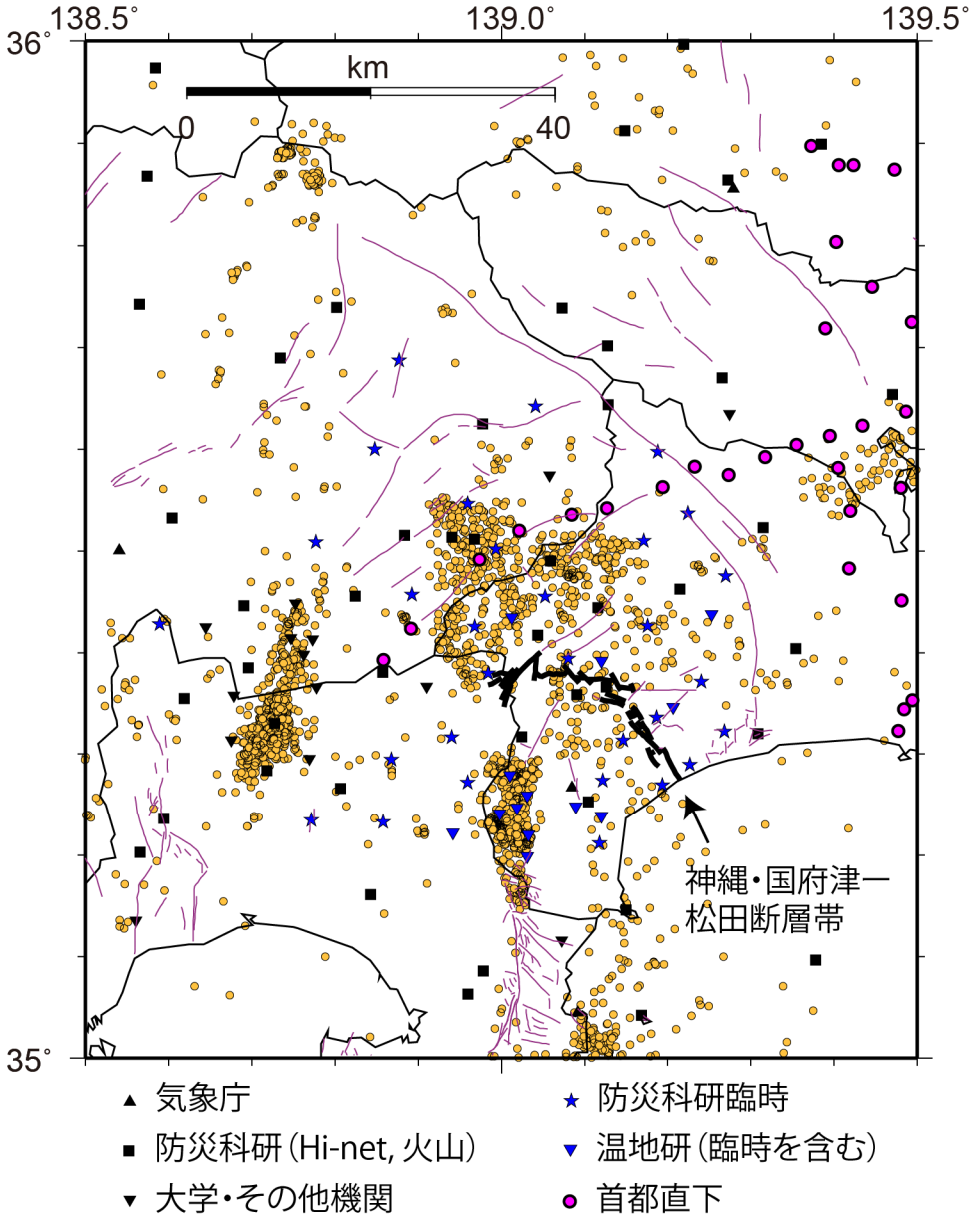

図 1　観測点分布と地震活動。観測点を表すシンボルの説明は、図中の凡例に示す。2010 年 8 月 15 日から 2011 年 11 月 20 日の期間内に発生した浅発微小地震(深さ 30 km 以浅、

M 0.5 以上）を黄丸印で示す。震源は、防災科研の手動検測震源の他、気象庁一元化処理による手動検測値と防災科研 Hi-net による自動読取値を併用した防災科研 Hi-net の 2 次検測震源を含む。

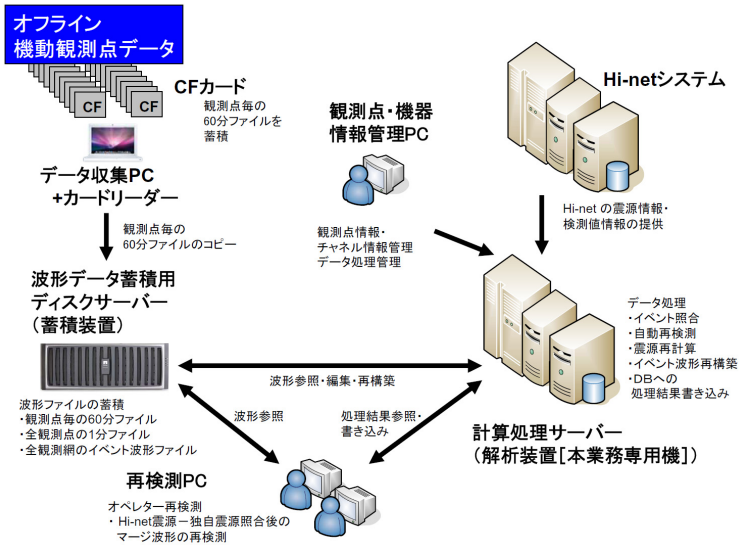

図 2　データ処理システム概念図。

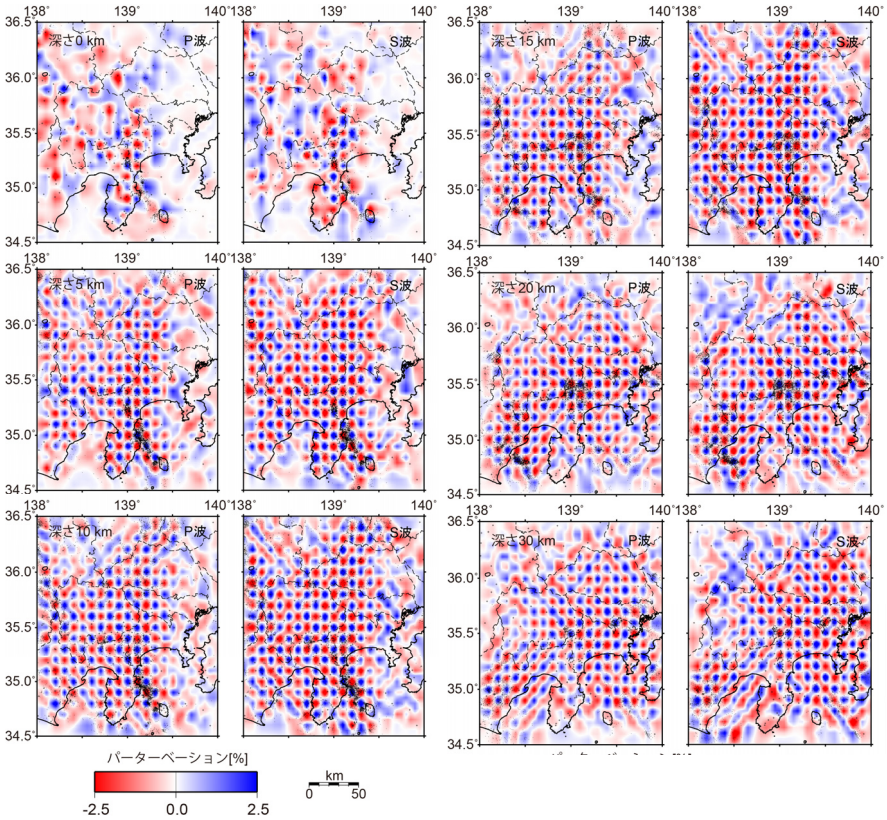

図３　チェッカーボードテストの結果。+は観測点の位置を、点は解析に用いた地震のうち、それぞれの深さから±5km 以内の震源分布を示す。

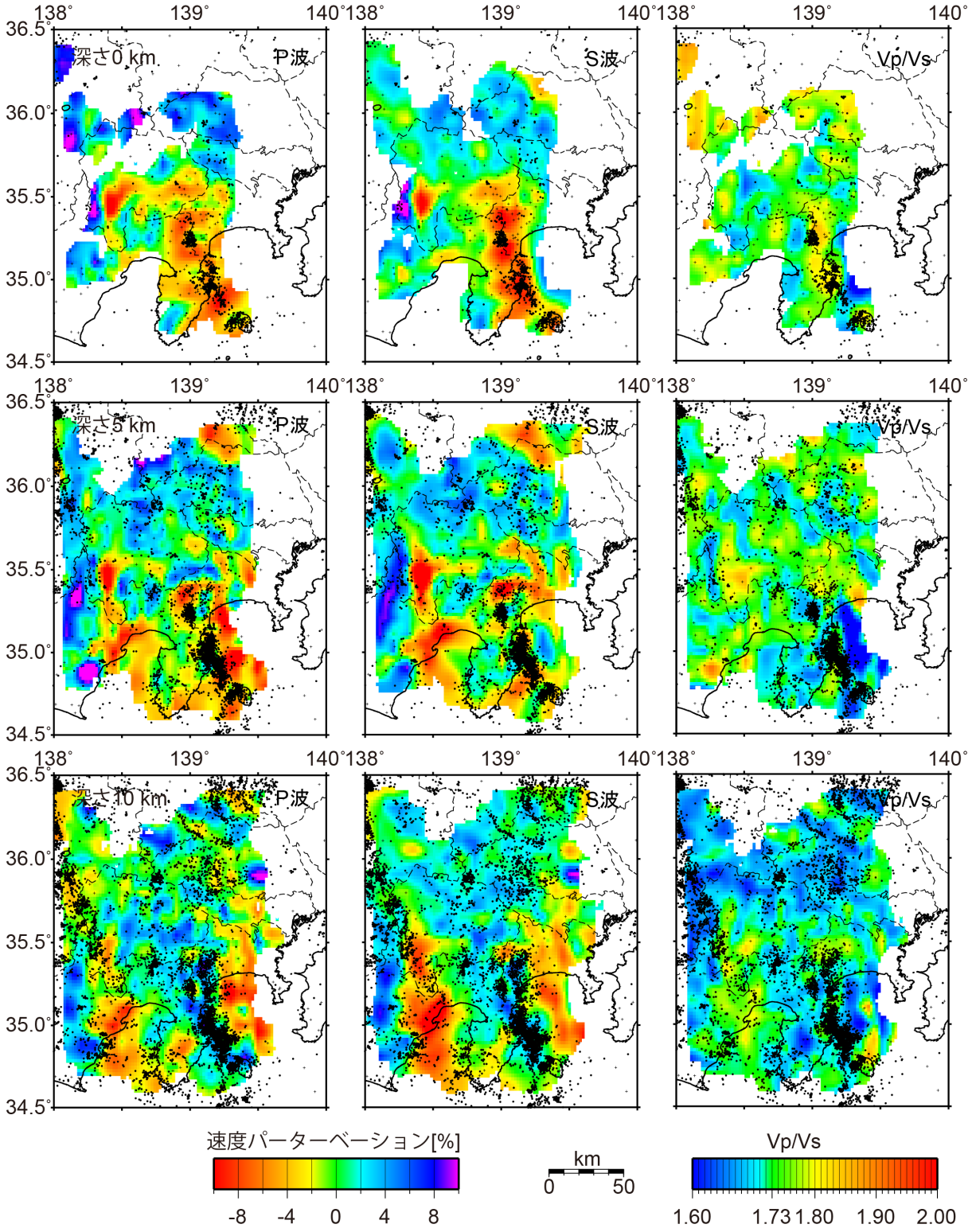

図４　深さ 0～10km の水平断面。+は観測点の位置を、点は解析に用いた地震のうち、それぞれの深さから±5km 以内の震源分布を示す。

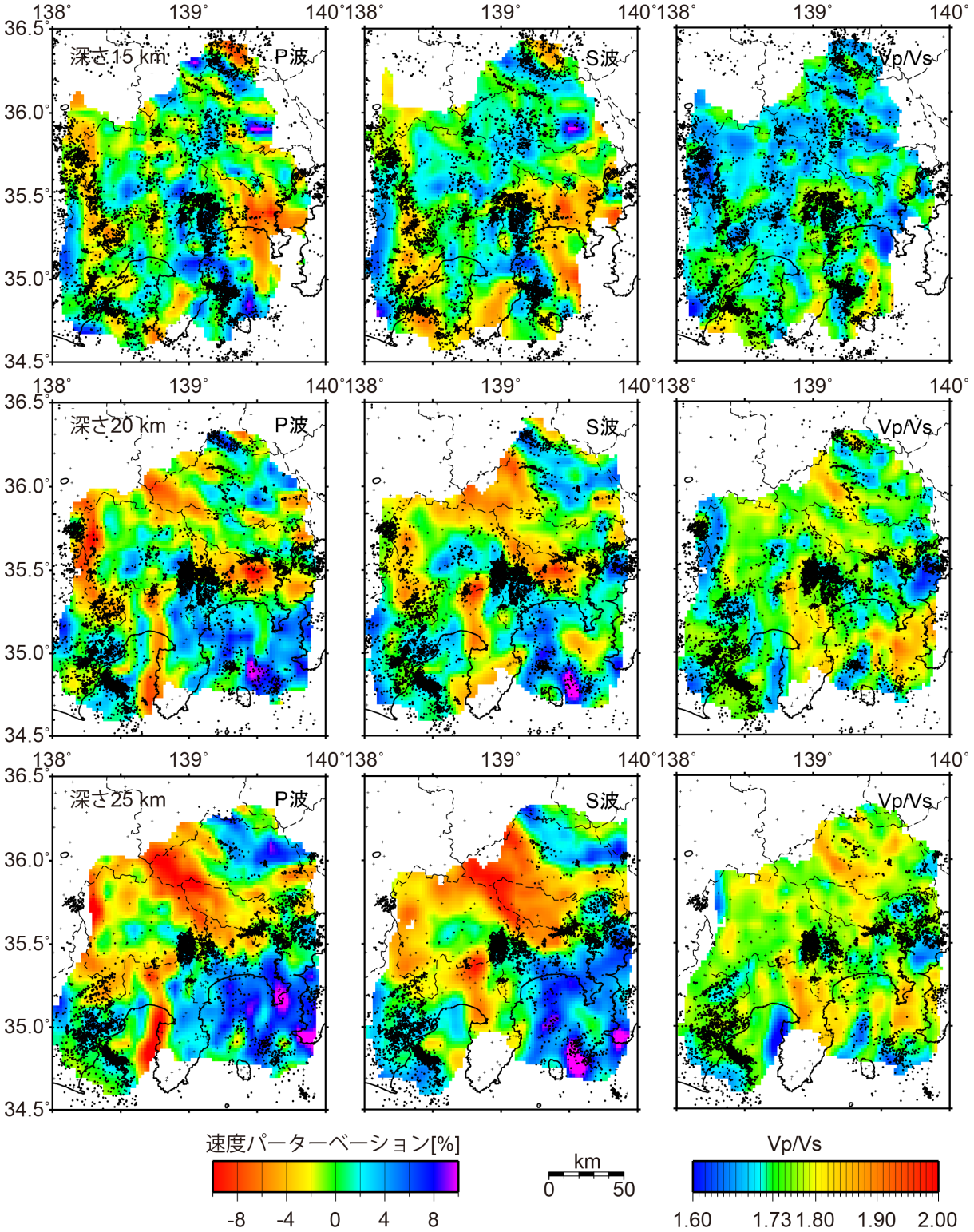

図５　深さ 15～25km の水平断面。+は観測点の位置を、点は解析に用いた地震のうち、それぞれの深さから±5km 以内の震源分布を示す。

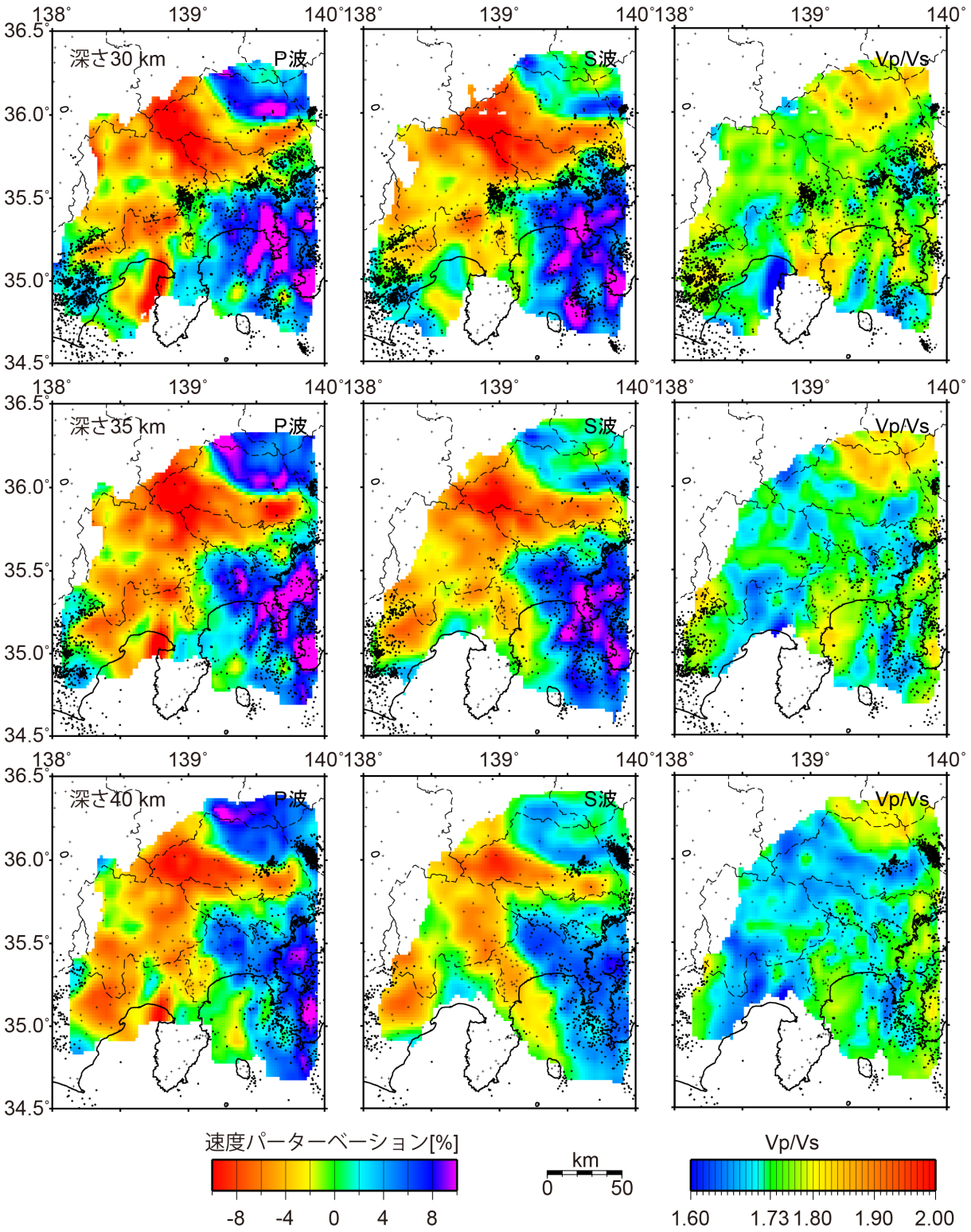

図６　深さ 30～40km の水平断面。+は観測点の位置を、点は解析に用いた地震のうち、それぞれの深さから±5km 以内の震源分布を示す。

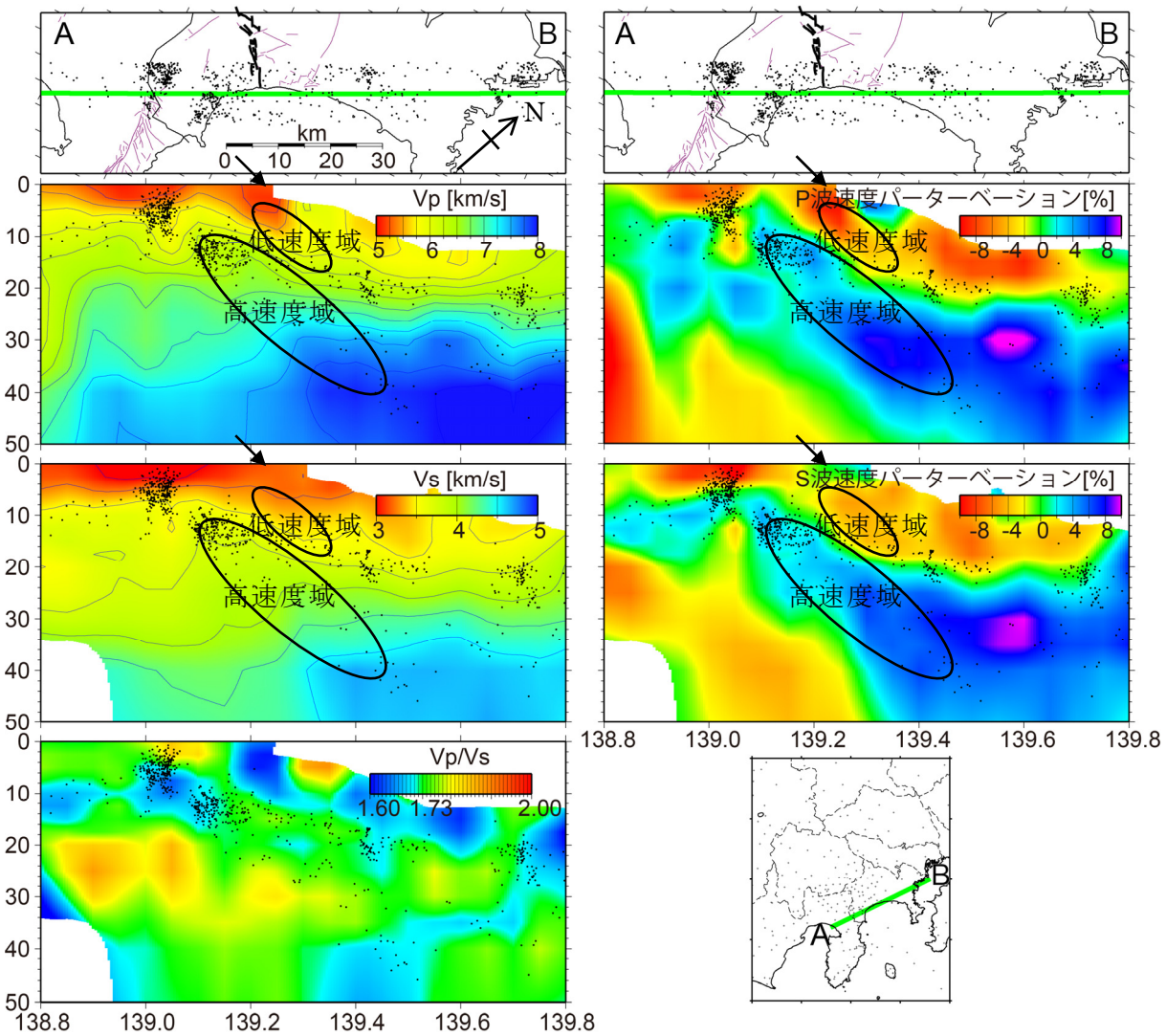

図７　国府津－松田断層を横切る東北東－西南西断面。

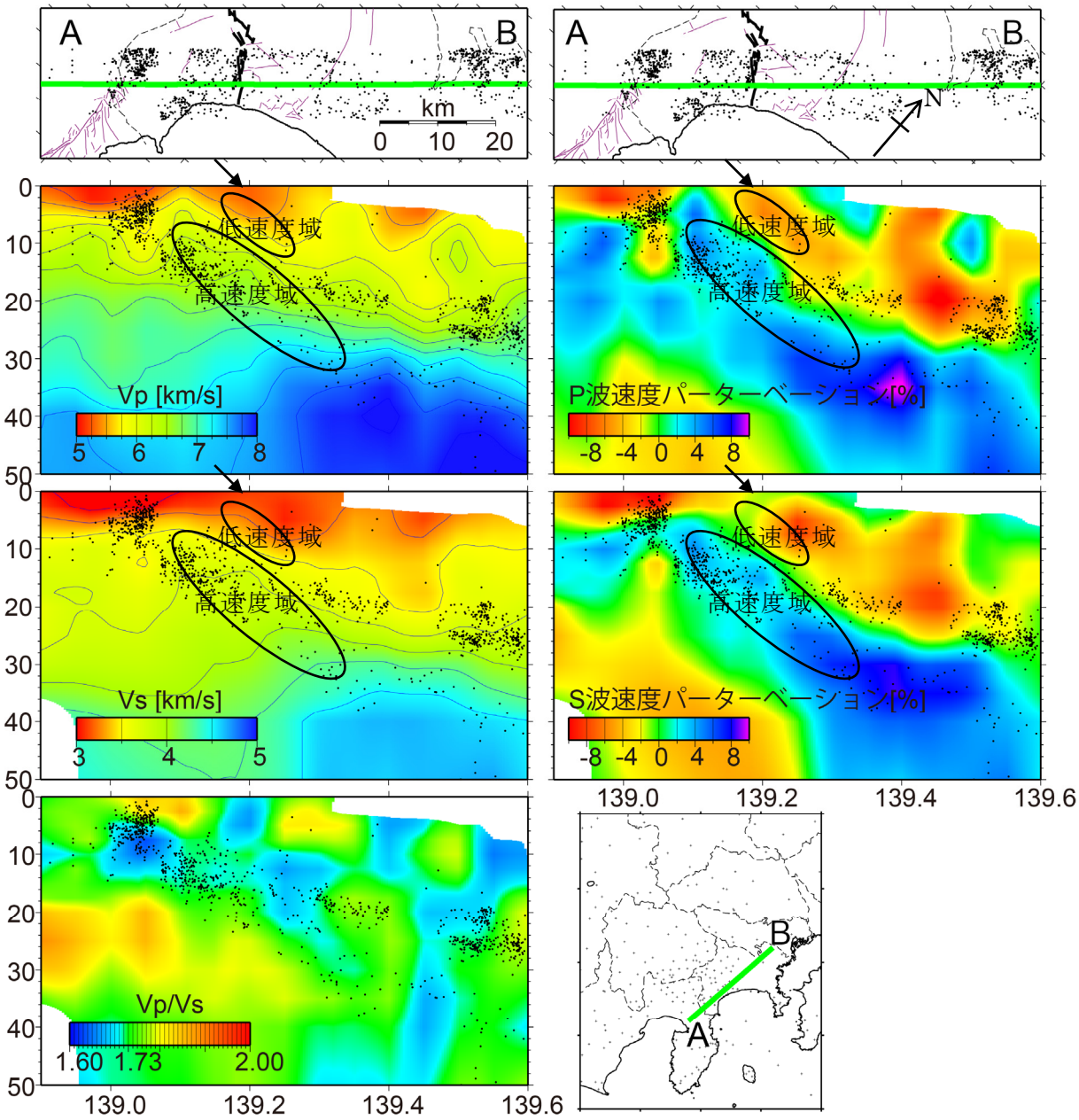

図８　国府津－松田断層を横切る北東－南西断面。

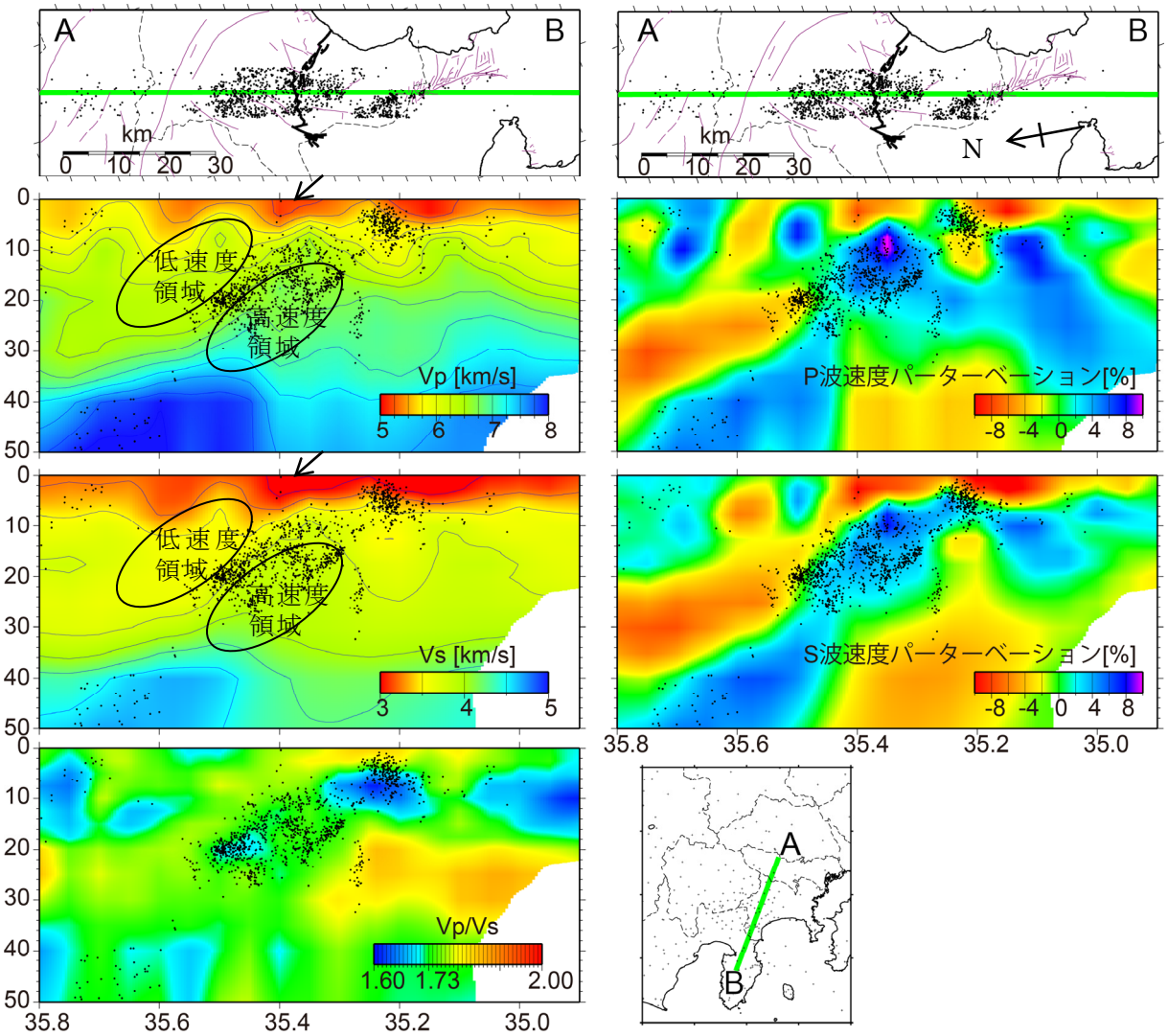

図９　国府津－松田断層を横切る北北東－南南西断面。

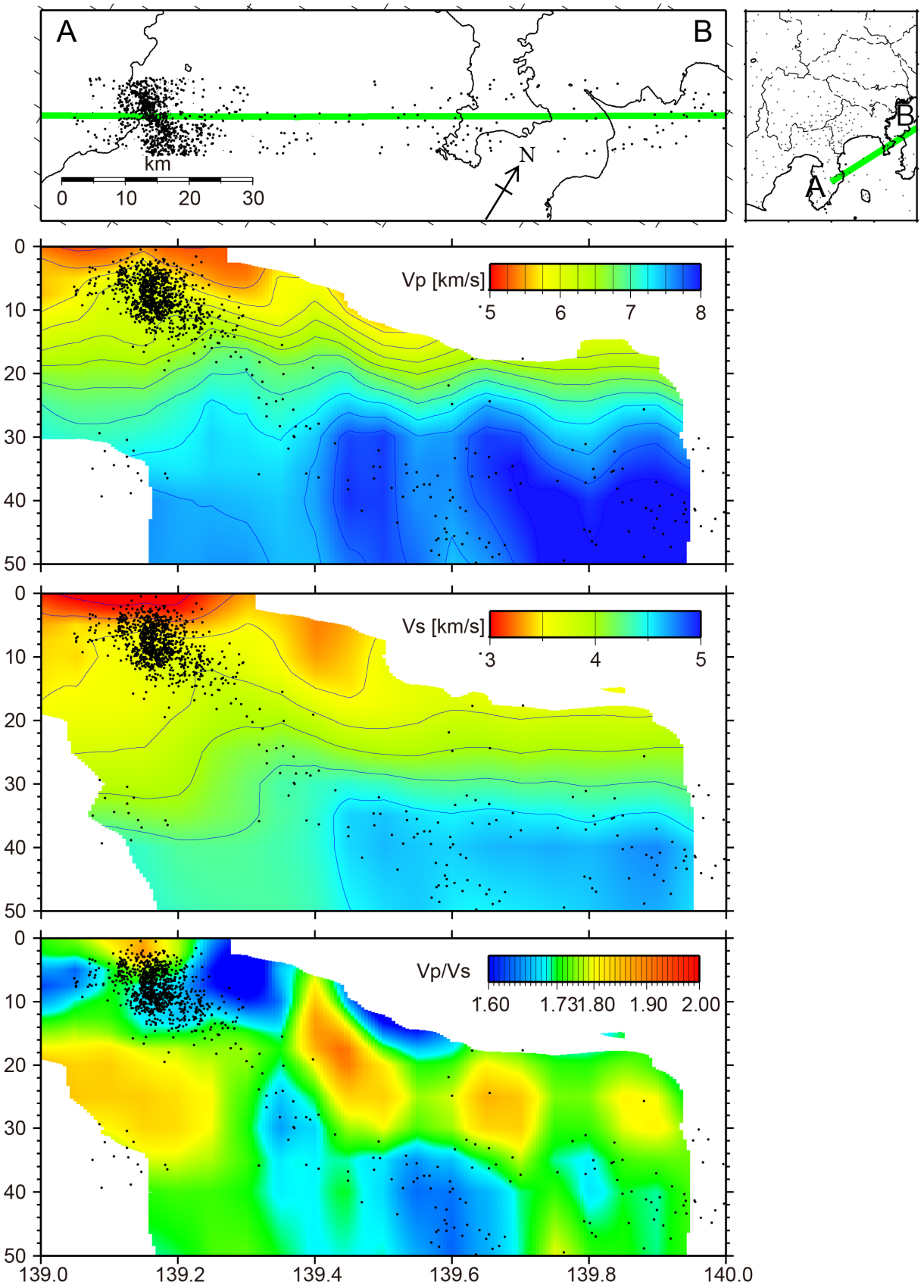

図１０　相模湾重合測線に沿った断面。

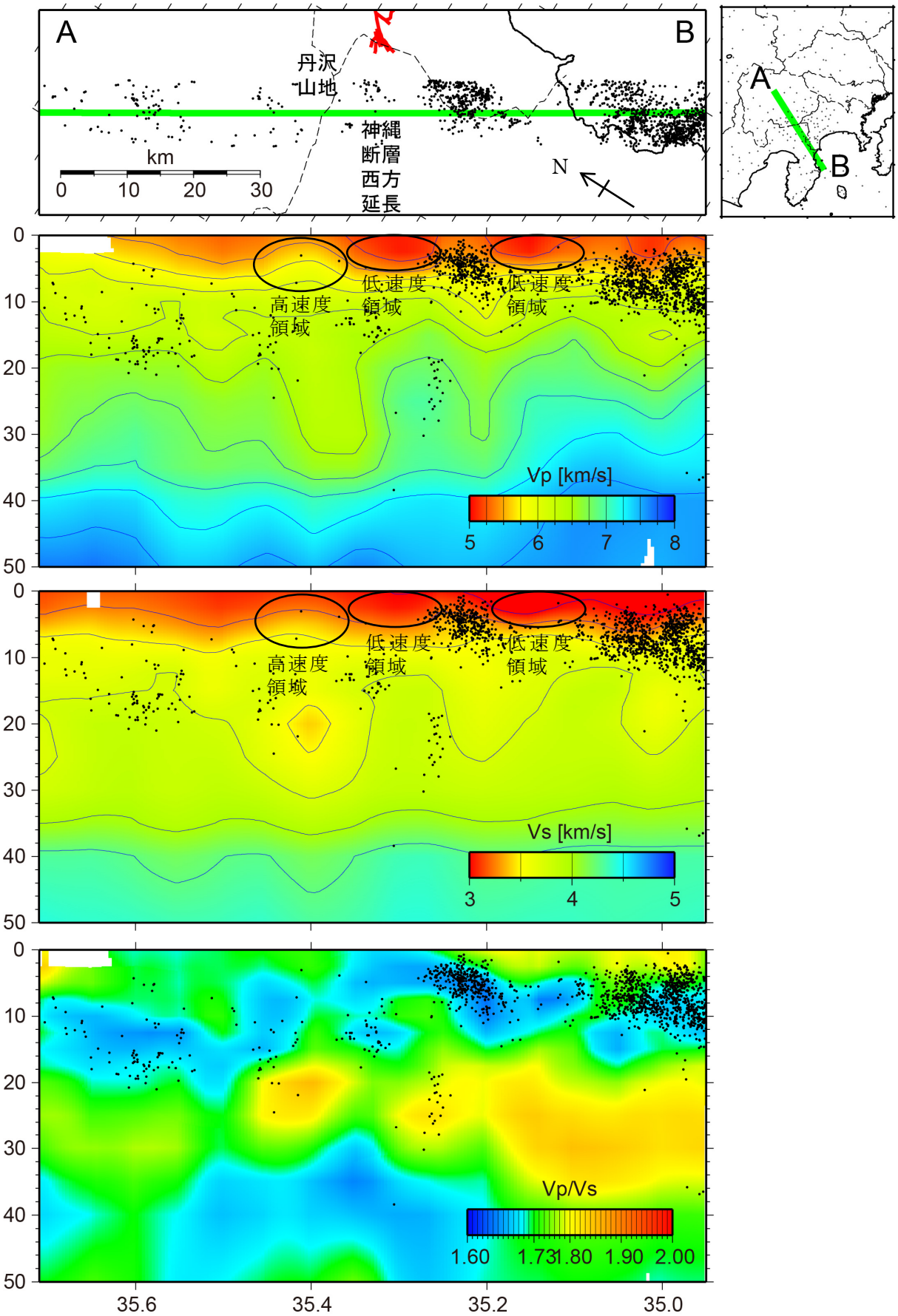
A
B
丹沢
山地
神縄
断層
西方
延長
km
0
10
20
30
N
A
B
高速度
領域
低速度
領域
低速度
領域
Vp [km/s]
5
6
7
8
高速度
領域
低速度
領域
低速度
領域
Vs [km/s]
3
4
5
Vp/Vs
1.60
1.73
1.80
1.90
2.00
0
10
20
30
40
50
35.6
35.4
35.2
35.0

図１１　箱根－富士吉田側線に沿った断面。赤線は神縄・国府津－松田断層を示す。

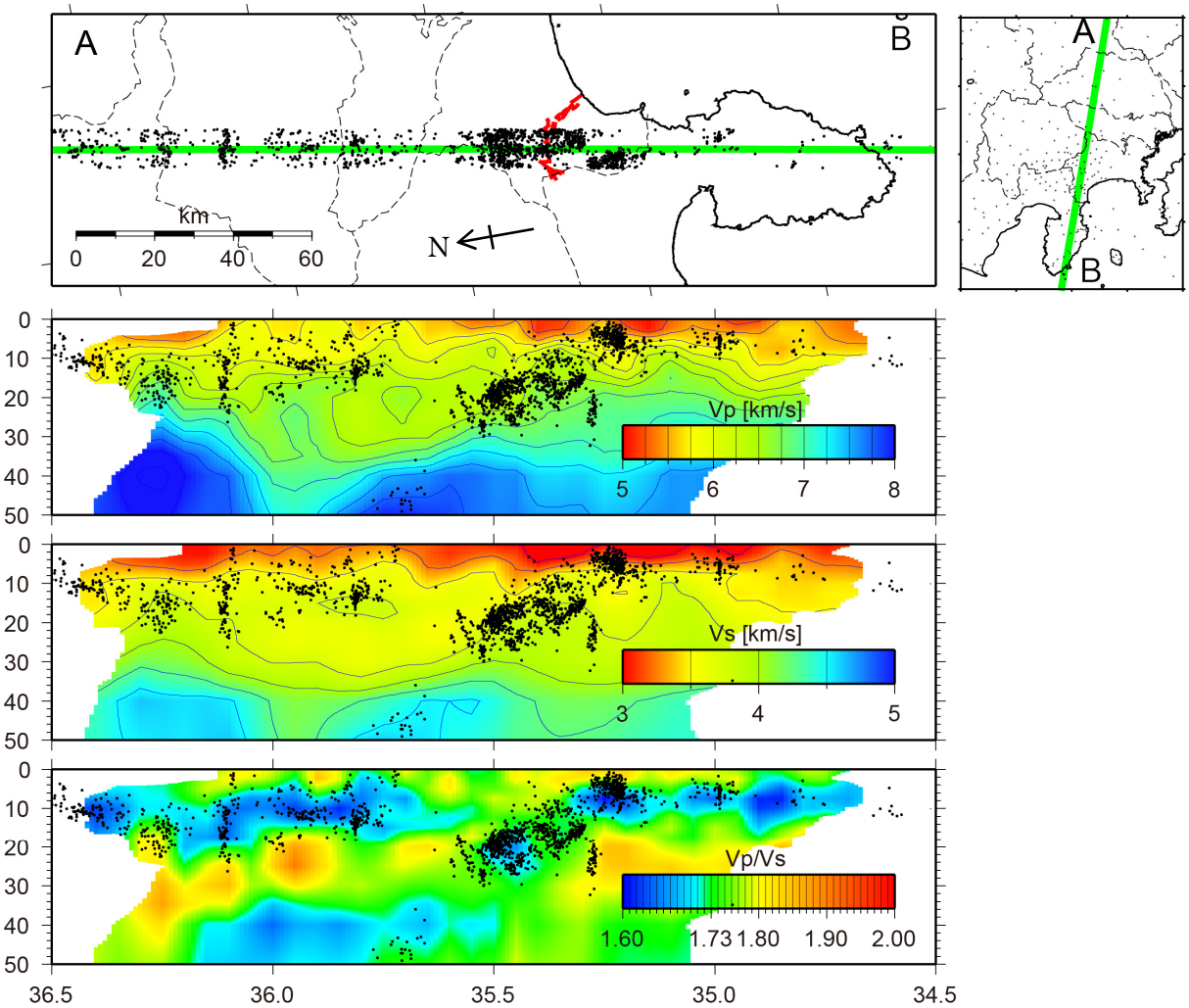

図１２　小田原－桐生側線に沿った断面。赤線は神縄・国府津－松田断層を示す。

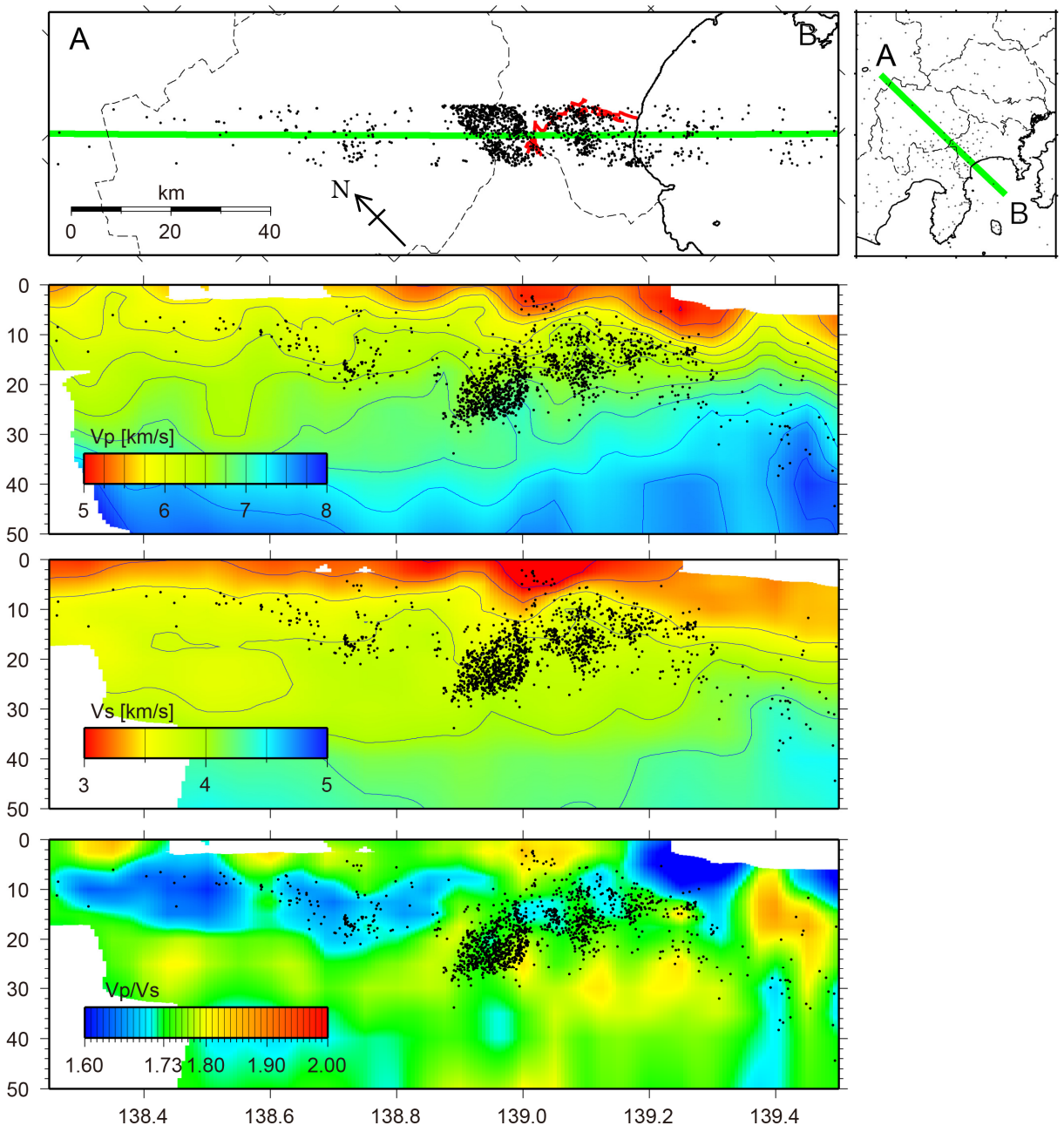

図１３　小田原－山梨側線に沿った断面。

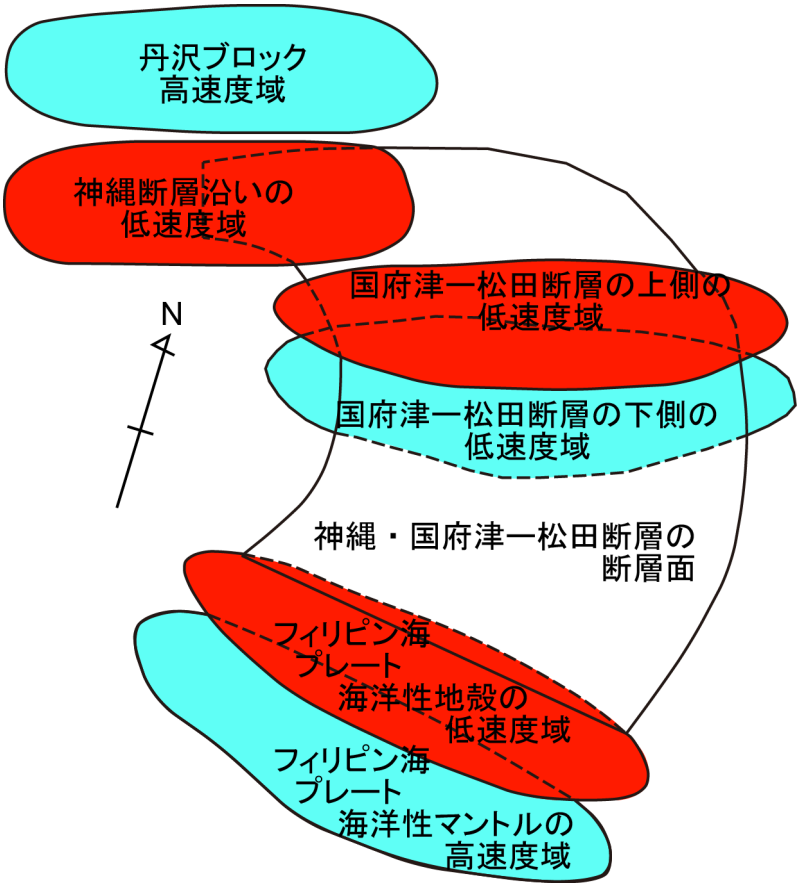

図 14 トモグラフィーの結果に基づく国府津－松田断層の模式図。

表１　本業務によって整備された観測点。

観測点名	緯度（度）	経度（度）	標高（m）	センサー	所在地（大字まで表示）
N.KM01	35.37136	139.24078	175	2 Hz	神奈川県秦野市曽屋
N.KM02	35.42614	139.17572	440	2 Hz	神奈川県秦野市戸川
N.KM03	35.26950	139.19375	10	2 Hz	神奈川県小田原市酒匂 *)
N.KM04	35.47550	139.27003	170	2 Hz	神奈川県愛甲郡清川村煤ヶ谷
N.KM05	35.21211	139.11825	380	2 Hz	神奈川県小田原市根布川
N.KM06	35.28978	139.22625	70	2 Hz	神奈川県小田原市羽根尾
N.KM07	35.31361	139.14686	25	2 Hz	神奈川県小田原市栢山 *)
N.KM08	35.27378	139.12158	110	2 Hz	神奈川県小田原市久野 *)
N.KM09	35.32256	139.26844	65	2 Hz	神奈川県中郡大磯町虫窪
N.KM10	35.33639	139.18664	150	2 Hz	神奈川県足柄上郡大井町赤田 *)
N.KM11	35.59728	139.18783	320	2 Hz	神奈川県相模原市緑区寸沢嵐
N.KM12	35.53742	139.22453	310	2 Hz	神奈川県相模原市緑区鳥屋
N.KM13	35.51006	139.17144	595	2 Hz	神奈川県相模原市緑区鳥屋
N.KM14	35.45519	139.05300	450	2 Hz	神奈川県足柄上郡山北町中川
N.KM15	35.39444	139.08042	305	2 Hz	神奈川県足柄上郡山北町皆瀬川
N.KM16	35.42592	138.96797	570	1 Hz	神奈川県足柄上郡山北町世附
N.KM17	35.23436	138.77186	820	2 Hz	静岡県富士市桑崎
N.KM18	35.31664	138.94047	455	2 Hz	静岡県御殿場市御殿場
N.KM19	35.27186	138.95972	775	2 Hz	静岡県御殿場市東田中
N.KM20	35.29431	138.86792	625	2 Hz	静岡県御殿場市印野
N.KM21	35.37958	138.98436	350	2 Hz	静岡県駿東郡小山町柳島
N.KM22	35.23253	138.85756	460	2 Hz	静岡県裾野市下和田内平
N.KM23	35.50222	138.99369	750	2 Hz	山梨県南都留郡道志村上中山
N.KM24	35.68728	138.87731	1570	2 Hz	山梨県大月市七保町瀬戸
N.KM25	35.50883	138.77736	870	2 Hz	山梨県南都留郡富士河口湖町浅川
N.KM26	35.42803	138.58933	940	2 Hz	山梨県富士宮市根原
N.KM27	35.60003	138.84814	550	2 Hz	山梨県大月市笹子町白野
N.KM28	35.45725	138.89225	1150	2 Hz	山梨県南都留郡忍野村内野
N.KM29	35.54689	138.95933	580	2 Hz	山梨県都留市戸沢
N.KM30	35.64206	139.04081	430	2 Hz	山梨県上野原市野田尻

＊印を併記の観測点については、東京大学地震観測所の強震観測網に本業務の観測機器を併設させていただきました。