３．２　制御震源を用いた地殻構造探査

３．２．１　稠密発震反射法地震探査による地殻構造調査研究

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

首都圏において、制御震源を用いた反射法・屈折法地震探査等を行い、10km～15km 程度の深さまでの地震波の速度構造や不連続面の形状等を把握する。実施する探査測線は、つくば-奥多摩間の首都圏北西部測線とつくば - 九十九里間の首都圏東北部測線である（図 1)。同一測線において、自然地震の稠密観測を行い、総合的に地殻・プレート構造を明らかにする。制御震源による地殻構造探査は、平成 21 年と 22 年に実施する。

(b) 平成 20 年度業務目的

既存の反射法地震探査データや現地調査をもとに、首都圏北西部測線の位置・探査仕様について検討を加える。既存の反射法地震探査データの解析により、詳細な地殻構造を明らかにする。

(c) 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	佐藤比呂志	
東京大学地震研究所	教授	岩崎貴哉	
東京大学地震研究所	助教	蔵下英司	
東京大学地震研究所	特任研究員	加藤直子	
東京大学地震研究所	大学院生	新井隆太	

(2) 平成 20 年度の成果

(a) 業務の要約

首都圏北西部アレイ測線に近接した「大都市圏地殻構造調査」で実施した 2003 年関東山地東縁測線の反射法地震探査データ及び屈折法広角反射法地震探査データについて、地殻上部の詳細な弾性波速度構造と地殻深部の不均質構造の解明を主眼とした屈折法広角反射法の追加解析を実施した。

(b) 業務の成果

制御震源による地殻構造探査が実施されるのは、平成 21 年度と 23 年度であり、平成 20 年度までは「大都市圏地殻構造調査」で取得されたデータの検討により詳細な地殻構造を明らかにするための研究を行う。平成 20 年度は、「大都市圏地殻構造調査」で取得した 2003 年関東山地東縁測線の反射法地震探査データ及び屈折法広角反射法地震探査データについての追加解析を行った。

1) 地殻上部の詳細な弾性波速度構造と地殻深部の不均質構造の解明を目的とした屈折法広角反射法追加解析(2003 年関東山地東縁測線)

大都市圏地殻構造調査の一環として2003年に探査を実施した関東山地東縁測線については、主にプレート境界型と内陸地震型の震源断層のイメージング、地殻上部の弾性波速度構造の解明を目的として広域深部構造の把握に焦点を当てたデータ解析をおこなった [1)]。また平成 19 年度の解析では、関東山地東縁測線内に位置する関東平野北西部の堆積盆地内の詳細な構造を抽出することを目的とした反射法及び屈折法の追加解析を実施した [2)]。このため、関東山地東縁測線全域にわたる詳細な弾性波速度構造を抽出することを目的とした解析は実施されていない。しかし、盆地内に限らず地殻上部の詳細構造及び速度不均質の把握に関しては、断層モデルの構築や強震動予測の観点から、より短波長変化を含む高精度の情報を抽出する必要が生じている。また、これまでの解析では用いられていない広角反射波の伝播時間及び振幅データを解析することで、地殻深部のより詳細な不均質構造を明らかにすることができる。こうした背景から、地殻上部の詳細な速度構造と地殻深部の不均質構造の構築を主眼とした屈折法広角反射法の追加解析を実施した。さらに、定常地震観測点で取られた自然地震走時データを用いて震源分布の再決定を行い、地殻深部の不均質構造と地震活動の関係を考察した。

ここで対象としたのは、足柄平野から丹沢山地・秩父山系を経て、関東平野を南北に縦断する約 140km の関東山地東縁測線 [1)]である。本節では、この関東山地東縁測線に関して、屈折法広角反射法の追加解析を実施した概要に関して記述する。図 2 に調査測線概略図を示した。

a) 初動走時を用いた屈折トモグラフィ法解析による屈折波解析

関東山地東縁測線については、ダイナマイト発震点 9 点、バイブレータ集中発震 7 点の計 16 点の屈折法広角反射法データに関して、改良型タイムターム法及び波線追跡法による解析が行われている [1)]。そこで新たに、反射法桐生バイブレータ測線、反射法相模湖低重合バイブレータ測線及び反射法松田バイブレータ測線の 3 測線で得られた稠密発震データも追加して屈折波解析を行った。

ⅰ) 屈折初動走時の読み取りと初期モデルの構築

まず全区間での屈折初動読み取りを目的とし、バンドパスフィルター(6-30Hz)の強調処理を行った。低 S/N のトレースを除外して、全トレースに関する初動ピッキングを試みた。屈折波初動の読み取りは、会話型システム(地球科学総合研究所ソフトウェア'iRAS')によって行った。また、初期速度モデルとして以下に示す鉛直速度勾配を持つ水平成層構造に、関東平野堆積盆地に相当する低速度領域を取り入れた構造を設定した（図 3)。

初期速度構造…… 地表面：4 km/s ～ 深度 4 km：5.5km/s

ⅱ) 屈折トモグラフィ法による屈折波解析

地殻上部における水平方向の速度不均質を抽出することを目的とし、屈折トモグラフィ

法解析を行った。本解析には屈折トモグラフィ解析用プログラム FAST[3]を使用した。この手法は、アイコナール方程式を有限差分法で解くことによって屈折波の走時及び波線を計算する。観測走時、計算走時及び速度モデルを用いてインバージョンを実施し、走時残差と速度モデルのラフネスが小さくなるように速度モデルの修正を行う。こうした速度モデルの修正を反復して行い、走時残差が十分に収束した時点で解析を終了する。以下に、今回の屈折トモグラフィ解析で使用したパラメータを示す。

走時計算のための格子間隔.....	水平方向	50.0m	鉛直方向	50.0m
走時計算のための格子数.....	水平方向	2601	鉛直方向	121
インバージョンのための cell の大きさ.....	水平方向	500.0m	鉛直方向	500.0m
インバージョンのための cell の数.....	水平方向	260	鉛直方向	12
解析に用いた初動読み取り値総数.....	34426			
速度モデルの反復修正回数.....	4 回			
初期モデルにおける走時の平均二乗残差...	333ms			
最終モデルにおける走時の平均二乗残差...	109ms			

図 4 に屈折トモグラフィ解析の結果を示す。測線北部では、関東平野北部の先新第三系までの堆積構造と良く一致した速度構造が得られた。また、堆積盆地内で南に傾斜する深谷断層及び北傾斜の藤の木-愛川線に対応する速度不均質を抽出することができた。

b) フォワードモデリングによる深部弾性波速度と広角反射波の反射面構造

地殻深部の不均質構造を明らかにすることを目的とし、弾性波速度のフォワードモデリングを行った。本解析には波線追跡法による屈折波広角反射波の走時計算プログラム [4]と波形計算プログラム SEIS83[5]を使用した。波線追跡法は、任意の射出角に対して波線方程式を Runge-Kutta 法で解くことによって屈折波と広角反射波の走時及び波線を計算する。また SEIS83 では、点震源を仮定した震源時間関数を用い、平面波近似で計算される速度境界面での反射・透過係数から理論波形を与える。その際、波線上での幾何学的な減衰効果も考慮されている。フォワードモデリングではまず、ある速度モデルに対して理論走時と理論波形を計算する。得られた理論走時と理論波形が、屈折波初動及び広角反射波の観測走時と観測波形を再現できるようになるまで試行錯誤的に弾性波速度と反射面の位置及び形状の修正を行い、最終速度モデルを得る。図 5 と図 6 に示すように、最終速度モデルから計算される理論走時及び理論波形は観測データをよく説明できている。

フォワードモデリングによる最終速度モデルと広角反射波の反射面構造を図 7 に示す。本解析により藤の木-愛川線の深部延長にあたる反射面と伊豆島弧地殻の沈み込み・剥離構造を明らかにした。この結果は Sato et al. (2005)[6]による関東山地東縁測線の反射法処理結果（図 8）とよく整合する。また本解析結果と海域における伊豆島この弾性波速度モデル [7]との比較から、丹沢地塊が伊豆島弧の上部地殻及び中部地殻上部、沈み込むフィリピン海プレートが伊豆島弧の中部地殻下部及び下部地殻に相当することを明らかにした。

c) 最終速度モデルを用いた震源分布の再決定

地殻深部の不均質構造と地震活動の関係を考察することを目的とし、定常地震観測点で取られた自然地震走時データ(気象庁一元化処理震源初動読み取り値)を用いて震源分布の

再決定を行った。本解析には相対走時残差を用いた震源決定プログラム tomoDD[8]を用いた。この手法は、pseudo-bending 法[9]によって震源から観測点までの走時及び波線を計算する。観測走時と計算走時を用いてインバージョンを実施し、走時残差が小さくなるように震源分布の修正を行う。こうした修正を反復して行い、走時残差が十分に収束した時点で解析を終了する。走時計算に用いる速度構造として、最終速度モデル(図 7)を東西方向に均一に広げたものを用いた。以下に、今回の震源再決定で使用したパラメータを示す。

イベント数…… 1127
格子間隔…… 南北方向 3km　東西方向 10km　鉛直方向 2～5km
格子数…… 南北方向 47　　東西方向 5　鉛直方向　14
震源分布の反復修正回数…… 6 回
初期震源分布における走時の平均二乗残差… 233ms
最終震源分布における走時の平均二乗残差… 161ms

図 9 に関東山地東縁測線の測線図と再決定された微小地震の震央分布を、図 10 に再決定された震源分布を最終速度モデル(図 7)に投影した図を示した。本解析により、丹沢地塊が非地震性領域であること、藤の木-愛川線の周辺では顕著な地震活動が存在することを明らかにした。

(c) 結論ならびに今後の課題

2003 年関東山地東縁測線の反射法地震探査データ及び屈折法広角反射法地震探査データについての追加解析を行い、反射法地震探査から推定したフィリピン海プレートの上面が、速度構造の点からも同様の推定が得られることが明らかになった。今後、関東山地東縁については自然地震観測も実施し、多角的に伊豆衝突帯の構造を明らかにしていく必要がある。

(d) 引用文献

1) 佐藤比呂志, 平田　直, 伊藤谷生, 岩崎貴哉, 纐纈一起, 笠原敬司, 伊藤　潔: 大深度弾性波探査　3.1.3.関東山地東縁地殻構造探査（関東山地 2003）, 大都市大震災軽減化特別プロジェクト　1　地震動（強い揺れ）の予測「大都市圏地殻構造調査研究」（平成 15 年度）成果報告書, 83-191,2004.
2) 佐藤比呂志, 岩崎貴哉, 蔵下英司, 加藤直子: 制御震源を用いた地殻構造探査　3.2.1 稠密発震反射法地震探査による地殻構造調査研究, 首都直下地震防災・減災特別プロジェクト　①　首都圏でのプレート構造調査、震源断層モデル等の構築等（平成 19 年度）成果報告書, 119-149, 2008.
3) Zelt, C. A. and Barton, P. J.: Three-dimensional seismic refraction tomography: A comparison of two methods applied to data from the Faeroe Basin. J. Geophys. Res., 103, 7187-7210, 1998.
4) 岩崎貴哉: 海底地震探査に基づく地下速度構造研究のための波線追跡プログラム. 地震, 41, 263-266, 1988.
5) Červený, V. and Pšenčík, I.: Program package SEIS83, Charles University, Prague, 1983.

6) Sato, H., Hirata, N., Koketsu, K., Okaya, D., Abe, S., Kobayashi, R., Matsubara, M., Iwasaki, T., Ito, T., Ikawa, T., Kawanaka, T., Kasahara, K. and Harder, S.: Earthquake source fault beneath Tokyo, Science, 309, 462-464, 2005.
7) Kodaira, S., Sato, T., Takahashi, N., Ito, A., Tamura, Y., Tatsumi, Y. and Kaneda, Y.: Seismological evidence for variable growth of crust along the Izu intraoceanic arc, J. Geophys. Res., 112, B05104, doi:10.1029/2006JB004593, 2007.
8) Zhang, H. and Thurber, C. H.: Double-difference tomography: The method and its application to the Hayward fault, California, Bulletin of the Seismological Society of America, 93, 1875-1889, 2003.
9) Um, J. and Thurber, C. H.: A fast algorithm for two-point seismic ray tracing, Bulletin of the Seismological Society America, 77, 972-986, 1987.
10) 産業技術総合研究所地質調査総合センター:100万分の1日本地質図 第3版 CD-ROM第2版,産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2003.

(e) 学会等発表実績

学会等における口頭・ポスター発表

発表成果	発表者氏名	発表場所	発表時期	国際・国内の別
Deep seismic profiling in the Kinki region, central Japan: Subduction, basin development and slip partisioning of active faults （口頭）	Sato, H., K. Ito, S. Abe, N. Kato, T. Iwasaki, N. Hirata and T. Kawanaka	13th International Symposium on Deep Seismic Profiling of the Continents and their Margins (Seismix2008), サーリセルカ、フィンランド	平成20年 6月10日	国際
Collision and subduction structure of the Izu-Bonin arc in central Japan （口頭）	Arai, R., T. Iwasaki, H. Sato, S. Abe and N. Hirata	13th International Symposium on Deep Seismic Profiling of the Continents and their Margins (Seismix2008), サーリセルカ、フィンランド	平成20年 6月10日	国際

Ongoing deep seismic profiling projects in Japanese islands for earthquake hazard mitigation （ポスター）	Sato, H., N. Hirata, T. Iwasaki, K. Obara, S. Kodaira and T. Iidaka	13th International Symposium on Deep Seismic Profiling of the Continents and their Margins (Seismix2008), サーリセルカ、フィンランド	平成20年 6月9-13日	国際
Detailed structure of the locked-sliding transition on the subducting plate boundary beneath the southern part of Kii peninsula, southwestern Japan （ポスター）	Kurashimo, E., A. Kato, N. Hirata, T. Iwasaki, T. Iidaka, K. Ito, F. Yamazaki, K. Miyashita and K. Obara	13th International Symposium on Deep Seismic Profiling of the Continents and their Margins (Seismix2008), サーリセルカ、フィンランド	平成20年 6月9-13日	国際
The configuration of an aseismic slab beneath the collision zone between Izu and Japan-Honshu arcs, inferred from wide-angle reflection and receiver function analyses （ポスター）	Kikuchi, S., N. Tsumura, T. Ito, H. Sato, T. Iwasaki, N. Hirata, Y. Ikeda, S. Abe, Y. Aoyagi, T. Kawanaka, S. Abe, M. Higashinaka and T. Kozawa	13th International Symposium on Deep Seismic Profiling of the Continents and their Margins (Seismix2008), サーリセルカ、フィンランド	平成20年 6月9-13日	国際
Crustal structure beneath the eastern part of the Izu collision zone, central	Arai, R., T. Iwasaki, H. Sato, S. Abe	13th International Symposium on Deep Seismic	平成20年 6月9-13日	国際

Japan, revealed by refraction/wide-angle reflection analysis（ポスター）	and N. Hirata	Profiling of the Continents and their Margins (Seismix2008), サーリセルカ、フィンランド		
Relationship between crustal structure and seismicity beneath the northwestern part of the Kanto plain, central Japan（口頭）	Arai, R., T. Iwasaki, H. Sato, S. Abe and N. Hirata	7th General Assembly of Asian Seismological Commission and Seismological Soceity of Japan, 2008 Fall meeting, つくば市	平成20年11月27日	国際
Collision and subduction structure of the Izu-Bonin arc, central Japan, revealed by refraction/wide-angle reflection analysis（ポスター）	Arai, R., T. Iwasaki, H. Sato, S. Abe and N. Hirata	American Geophysical Union 2008 Fall Meeting	平成20年12月16日	国際
関東山地東縁部における伊豆-小笠原弧の衝突構造（口頭）	新井隆太・岩崎貴哉・佐藤比呂志・阿部進・平田直	地球惑星科学関連学会2008	平成20年5月26日	国内
Deep geometry of active faults in the Kinki triangle, central Japan: Results of deep seismic reflection profiling（ポスター）	Kato, N., H. Sato, S. Abe, T. Kawanaka,	33th IGC（第33回万国地質学会議）ノルウェー・オスロ	平成20年8月7日	国際
震源断層のイメージングの現状と地震被害想定へのインパクト	佐藤比呂志・平田　直・阿部進	物理探査学会　創立60周年記念シンポジウム	平成20年10月23	国内
地震探査からみた甲府	加藤直子・佐藤	第115年日本地質	平成20年	国内

盆地南縁部の地殻構造	比呂志・蔵下英司，阿部　進	学会学術大会　秋田市	9月21日	

学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載論文	発表者氏名	発表場所	発表時期	国内・外の別
Deep seismic reflection profiling across active reverse faults in the Kinki Triangle, central Japan	Sato, H., K. Ito, S. Abe, N. Kato, T. Iwasaki, N. Hirata, T. Ikawa and T. Kawanaka	Tectonophysics, doi:10.1016/j.tecto.2008.06.014	平成20年	国際
震源断層のイメージングの現状と地震被害想定へのインパクト	佐藤比呂志・平田　直・阿部進	物理探査学会　創立60周年記念事業実行委員会編「最新の物理探査適用事例集」	平成20年10月	国内

マスコミ等における報道・掲載

なし

(f) 特許出願，ソフトウエア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウエア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 21 年度業務計画案

平成 14 年度以来、文部科学省の受託研究として「大都市圏地殻構造調査研究」が実施された。とくに伊豆衝突帯の北部から北西部においては、関東山地を南北に横切る関東山地東縁測線、富士山東麓を北西方向に通過する小田原-山梨測線において制御震源を用いた構造探査が実施され、フィリピン海プレートの形状が明らかになった。フィリピン海プレート上面の出現深度はこれら 2 測線での異なっており、この間の区間での複雑な構造が予想された。このため平成 20 年度にはこれらの 2 測線を繋ぐ飯能-御坂測線で稠密自然地震観測を実施した。稠密地震観測にもとづいたレシーバー関数解析（3.2.2 参照）では、

フィリピン海プレートの最上部と判断される変換面が山梨県側では明瞭に深さ 40km に存在するが、東部ではその連続が断たれる。このことはフィリピン海プレートが破断・変形している可能性を示唆している。フィリピン海プレートの破断は、関東平野下に沈み込んでいるフィリピン海スラブがプレート本体とは独自の運動をする可能性を示唆することになり、関東下のフィリピン海スラブの運動を理解するために重要である。

したがって、平成 21 年度には平成 20 年度に稠密自然地震観測を行った飯能-笛吹測線において、フィリピン海プレート上面の形状を明らかにするために、ダイナマイトを震源とした低重合法反射法地震探査を行う(図 11 参照)。発破点は 8 点(300kg2 点、200kg2 点、100kg4 点)程度を予定している。制御震源による波形は MS2000 などの独立型レコーダーで収録する。

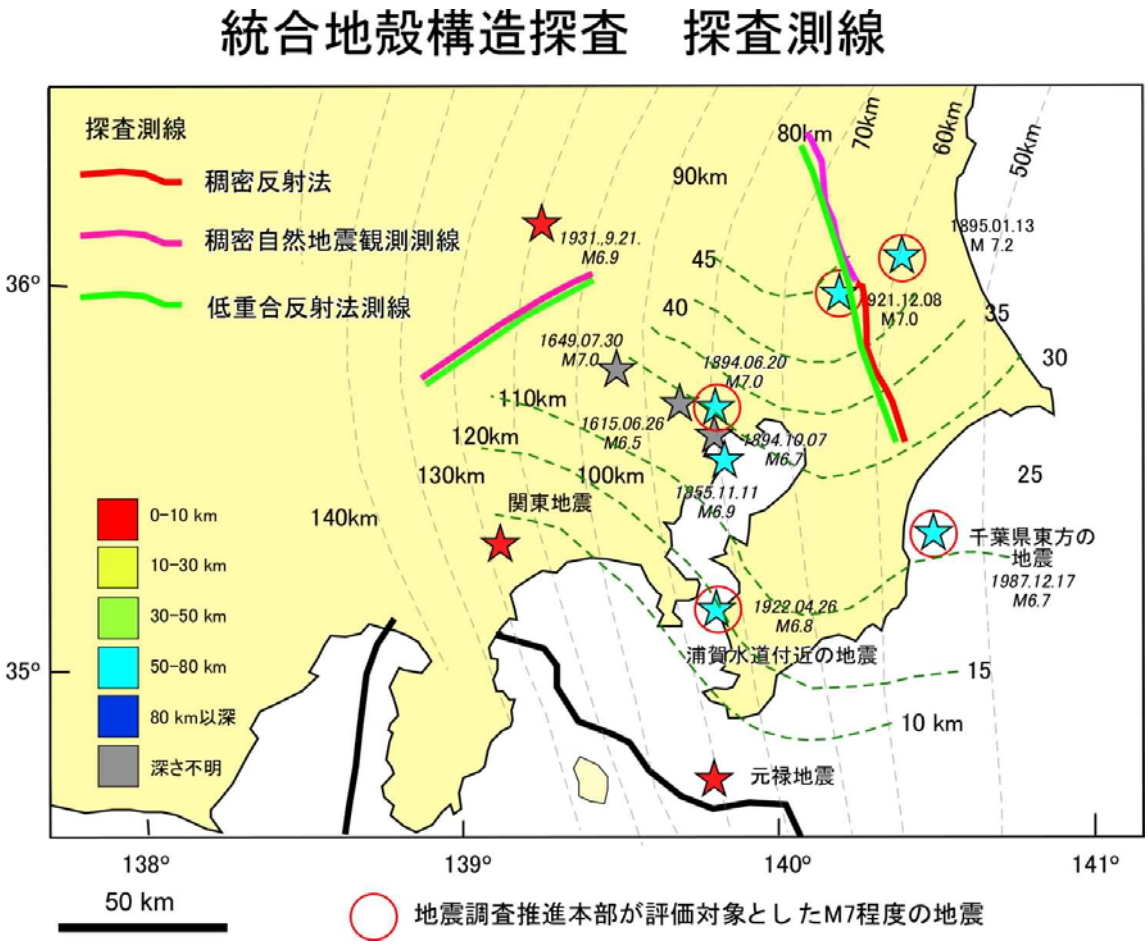
統合地殻構造探査　探査測線
探査測線
稠密反射法
稠密自然地震観測測線
低重合反射法測線
0-10 km
10-30 km
30-50 km
50-80 km
80 km以深
深さ不明
36°
35°
138°
139°
140°
141°
50 km
90km
80km
70km
60km
50km
45
40
35
30
25
15
10 km
110km
120km
130km
100km
140km
1931.9.21.
M6.9
1649.07.30
M7.0
1894.06.20
M7.0
1615.06.26
M6.5
1894.10.07
M6.7
1855.11.11
M6.9
関東地震
1895.01.13
M 7.2
1921.12.08
M7.0
千葉県東方の
地震
1987.12.17
M6.7
1922.04.26
M6.8
浦賀水道付近の地震
元禄地震
地震調査推進本部が評価対象としたM7程度の地震

図 1．地殻構造探査測線。

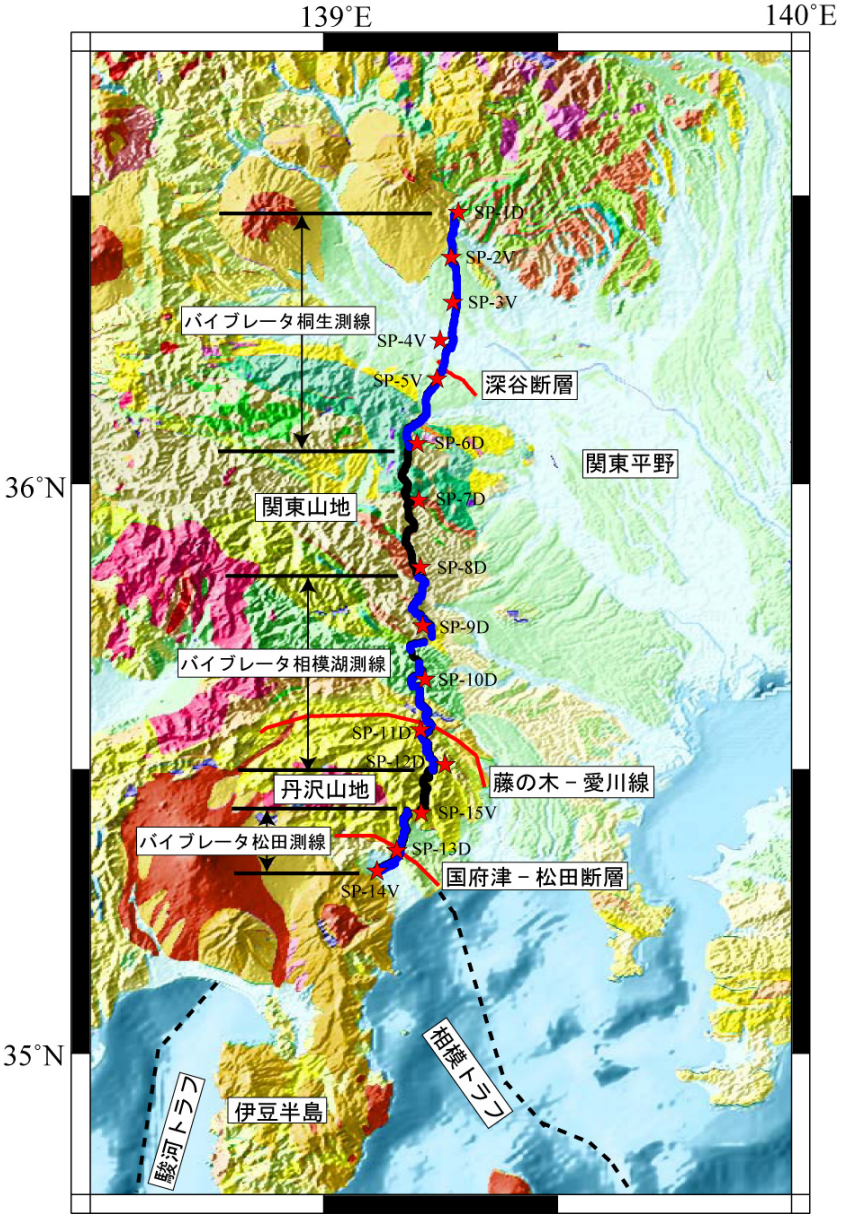

図 2．大都市圏地殻構造調査関東山地東縁測線の周辺の地質 10) と測線の位置図。

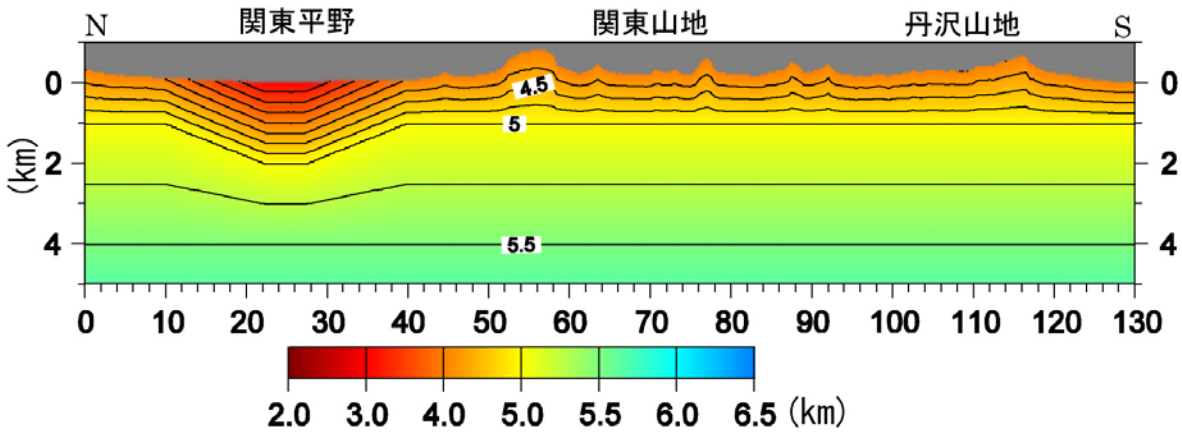

図 3. 屈折トモグラフィ法解析における初期速度モデル。

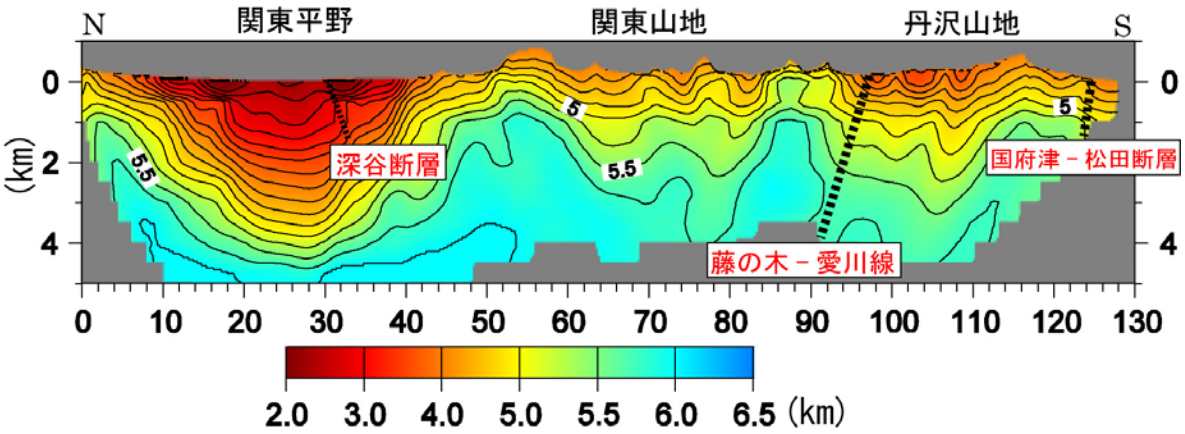

図 4. 屈折トモグラフィ法解析による最終速度モデル。

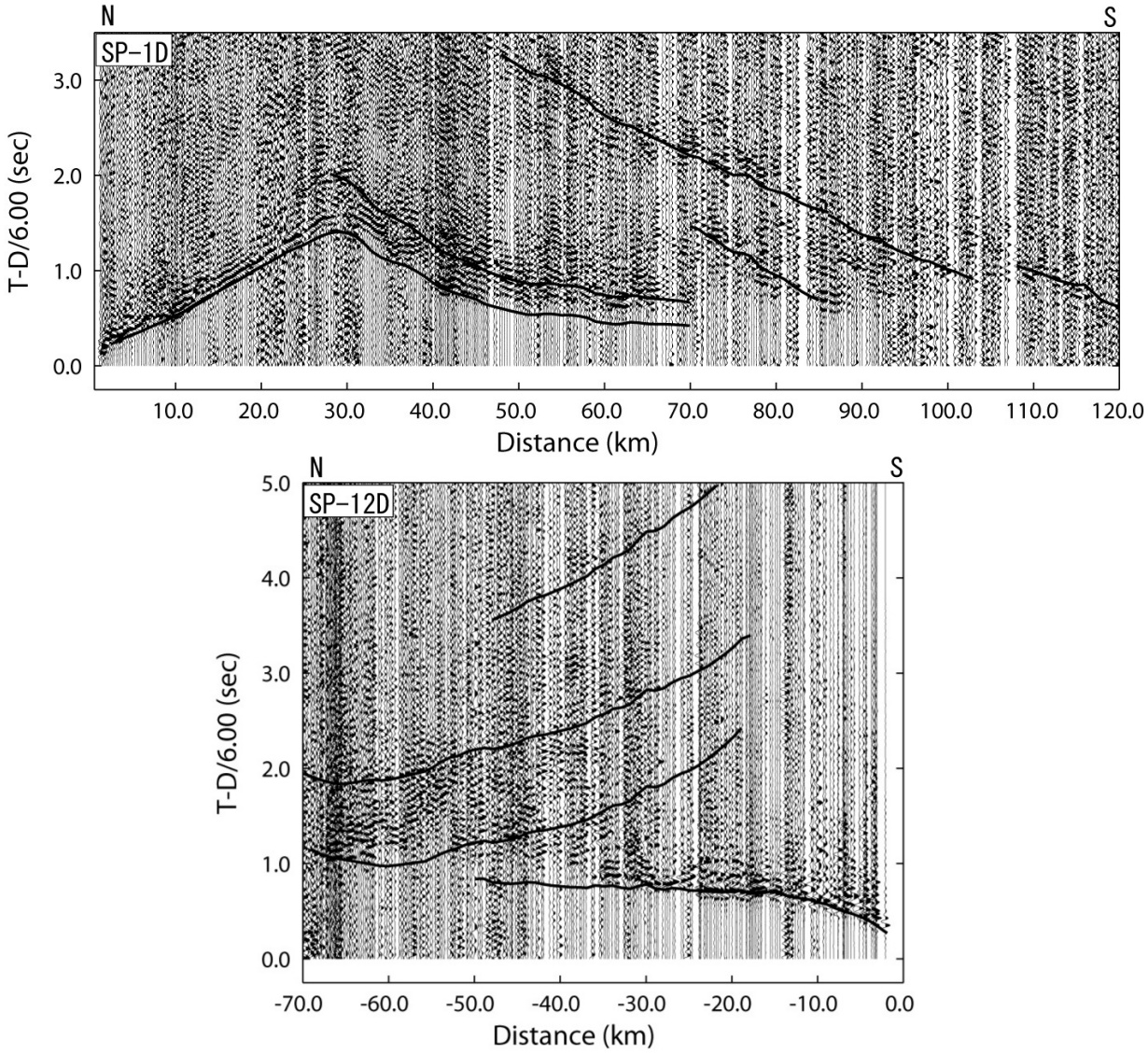

図 5．観測された波形記録の例（SP-1D と SP12D）。黒の実線は最終速度モデルで計算される屈折波初動および広角反射波の計算走時を表す。

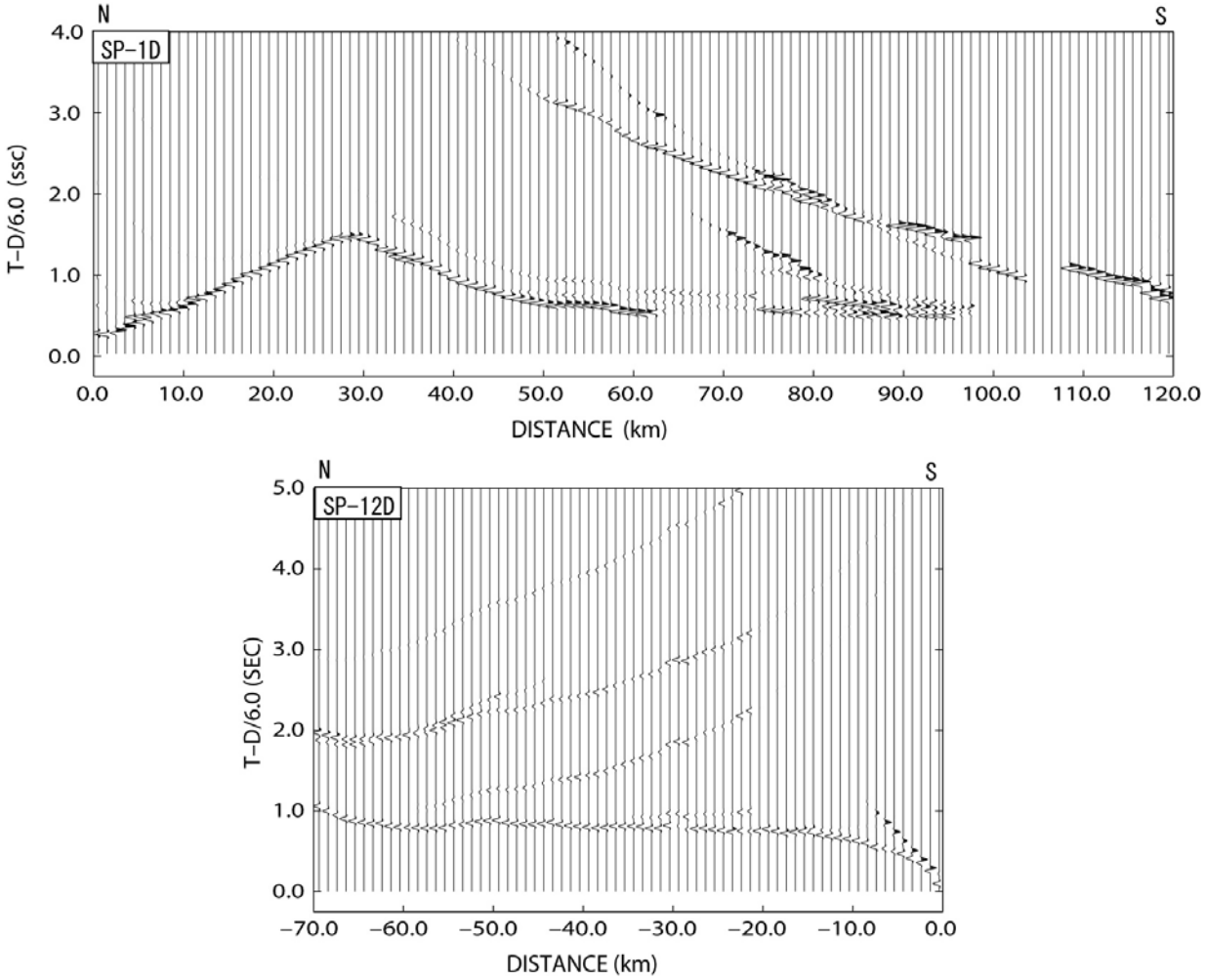

図 6. 最終速度モデルで計算される理論波形（SP-1D と SP12D）。

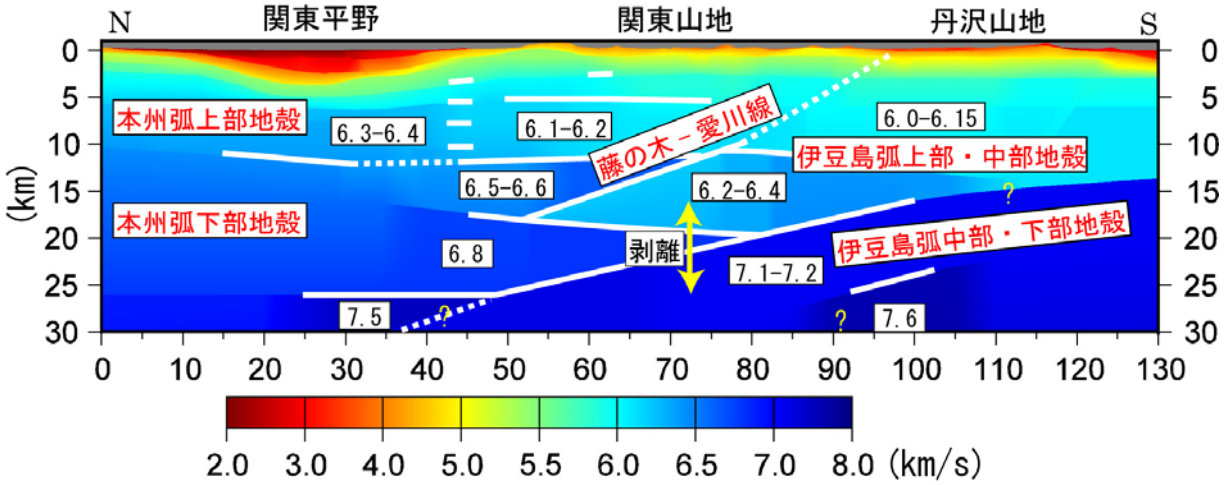

図 7. フォワードモデリングによる最終速度モデル。白の実線は広角反射波の反射面、数値は P 波速度を表す。

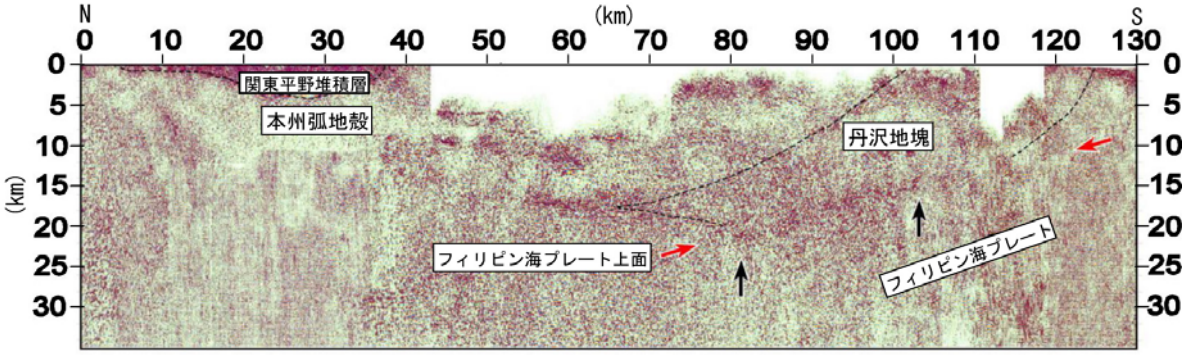

図 8. 深度断面図：既存の反射法処理結果。Sato et al. (2005)による。

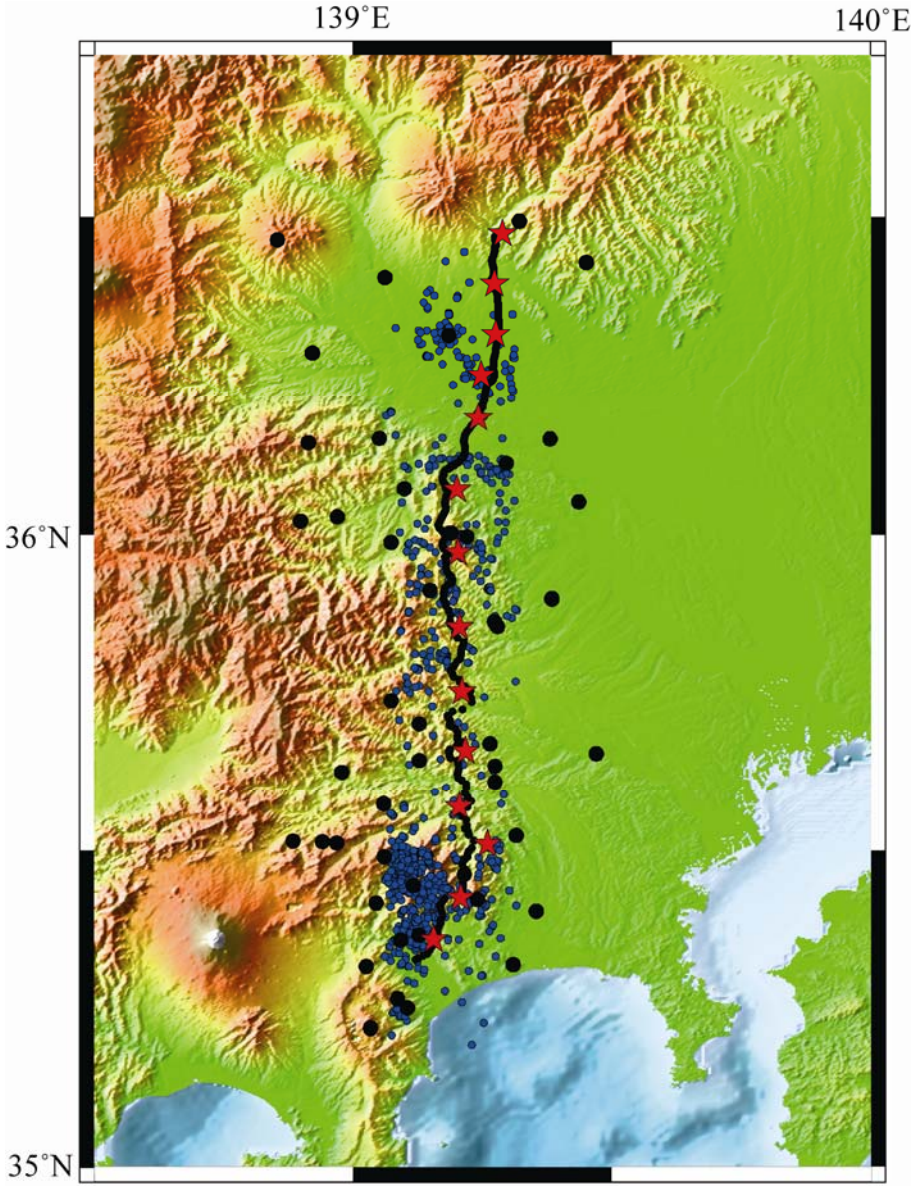

図 9. 関東山地東縁測線の測線図と再決定された震央分布。黒の実線は関東山地東縁測線、赤の星は発震点、黒の点は定常地震観測点、青の点は微小地震の震央をそれぞれ表す。

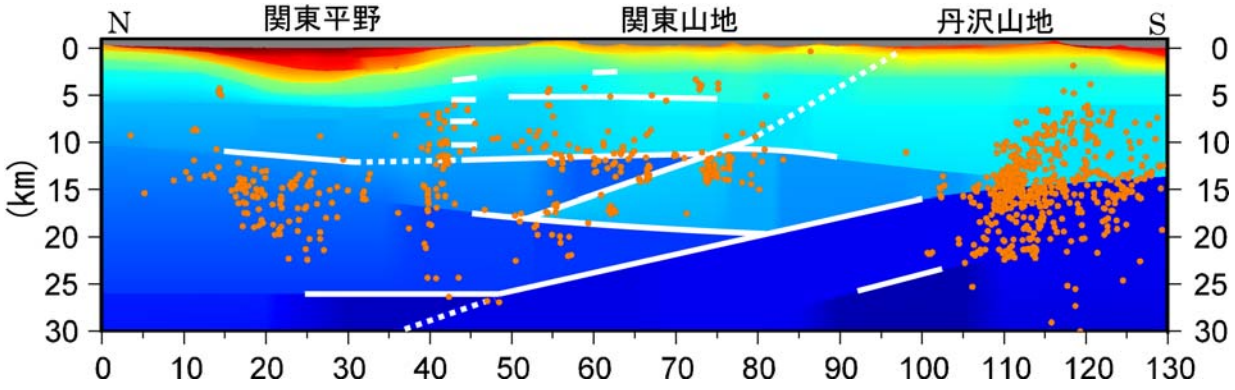

図 10. 再決定された震源分布とフォワードモデリングによる最終速度モデルの比較。オレンジの点は微小地震の震源を表す。

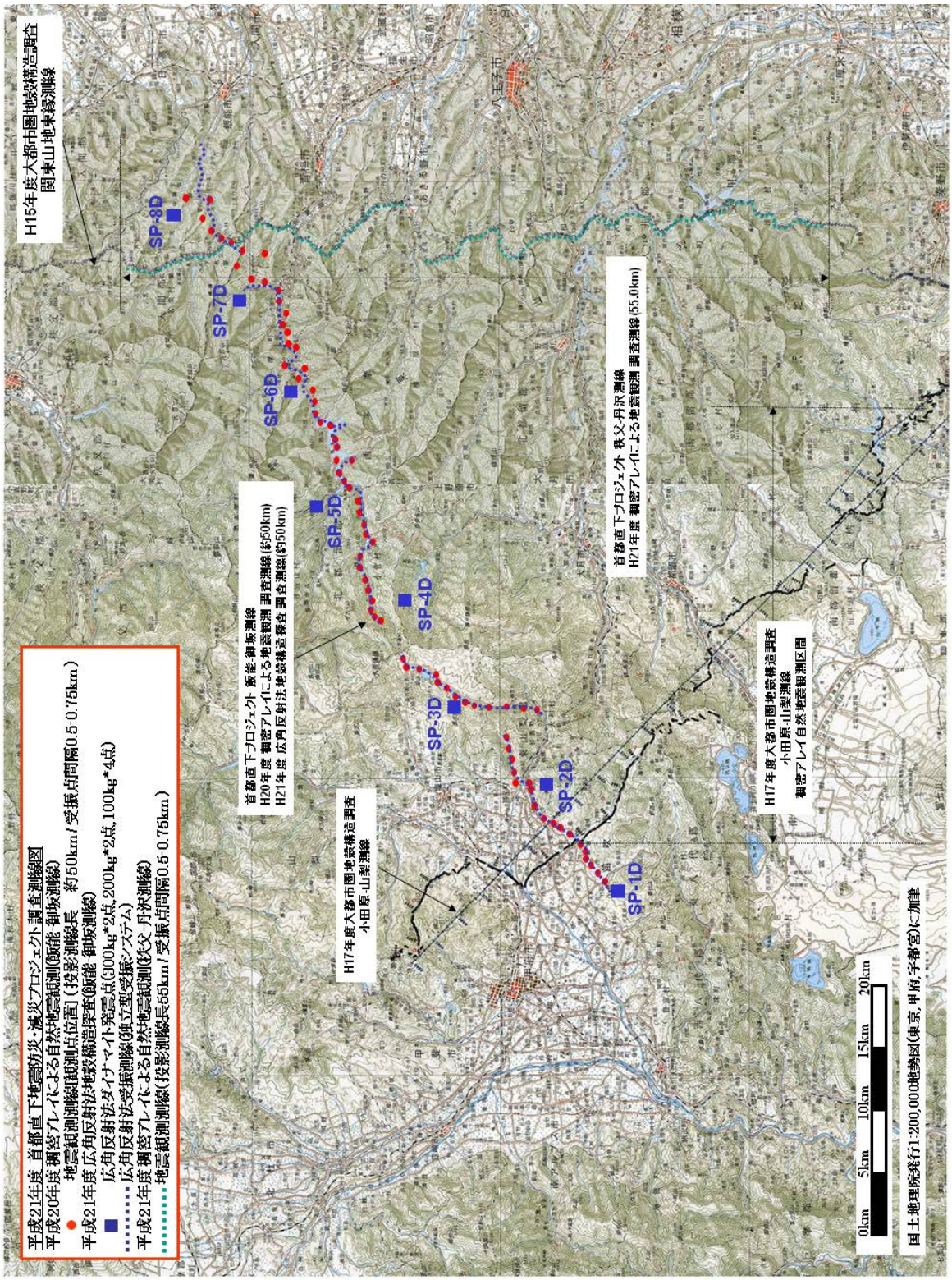

図 11.　平成 21 年度低重合法反射法・広角反射法地震探査測線（飯能-笛吹測線）位置図。青色の四角はダイナマイトによる予定発震点を示す。