

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23年に実施する。

(b) 平成19年度業務目的

関東平野の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	産学官連携研究員	加藤直子	

(2) 平成19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の堆積平野部分（桐生測線）について、堆積盆地内の高分解能断面の構築を主眼とした反射法及び屈折法の追加解析を実施した。さらに、これらの結果にもとづいて地質学的な解釈を行い、関東平野西縁の地質構造を明らかにした。

(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」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19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の堆積平野部分（桐生測線）についての追加解析を行い、さらに構造地質学的観点から関東平野西縁断層帯の形状について検討を加えた。

1) 堆積平野地下構造の高精度化を目的とした反射法・屈折法追加解析(2003年関東山地東縁測線「桐生測線」)

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。このため、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解析は実施されていない。しかし、盆地内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あるが生じている。こうした背景から、堆積盆地内の高分解能断面の構築を主眼とした反射法及び屈折法の追加解析を実施した。

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⁾のうち、関東平野を横切る区間である桐生測線(53.1km)である。本節では、この桐生測線に関して、高精度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、図3に受振点、発震点及びCMP重合測線位置図を、さらに図4に調査測線地質図を示した。

a) 標準データ処理

広域測線北部の群馬県大間々町・埼玉県東秩父村間に位置する関東平野におけるバイブレータ桐生測線KR-1(測線長53km)については、以下のような反射法データ解析が行われている。

i) フォーマット変換及びデータ編集(Format Conversion and Trace Edit)

フィールドデータに記録された原記録(GDSPS-4 SEG Y Format)について、Siper X(JGI Internal Format)フォーマットへ変換を行った。また、各発震測線に関して下記の発震記録を発震点番号の昇順に従って抽出した。これは、バイブレータ発震作業順序が発震路あるいは発震作業の制約によって適宜変更され、フィールドテープには、作業時間順にデータが記録されているためである。

反射法桐生バイブレータ測線 発震点(347点) VP.128.0 - VP.1064.5

反射法太田バイブレータ測線 発震点(69点) VP.8013.0 - VP.8226.5

さらに、S/N比が著しく低く、初動が判別できないトレースを処理対象から除外した。

ii) トレースヘッダーへの測線情報の入力(Geometry Application)

SuperXトレースヘッダーに関して、発震点、受振点及び各CMPのインデックス、座標、標高値、オフセット距離、基準面標高値等の測線情報を入力した。データ解析における基準標高面は平均海水面に設定した。また、CMP重合測線は下記の基準によって決定した。

CMP 間隔..... 25.0m

重合測線からの最大偏倚制限....制限無し

重合測線決定のために CMP 分布を平滑化したオフセット範囲...0-2000m

iii) 屈折波初動解析 (Refraction Analysis)

桐生バイブレータ測線及び太田バイブレータ測線各々について独立に改良型タイムターム法による屈折初動解析を行い、受振点及び発震点タイムターム値と表層基底層速度を算出した。この手法では解析対象とする屈折面が 2 次元ブロックに分割され、各ブロックに対して表層基底層速度が定義される。このモデルは以下の関係式で記述される。

$$T_{ij} - \sum_k s_{k,0} \Delta_{ijk} = a_i + b_j + \sum_k \delta s_k \Delta_{ijk} \quad (1)$$

ここに、 T_{ij} は屈折初動走時、 a_i, b_j は発震点及び受振点タイムターム、 $s_{k,0}, \delta s_k, \Delta_{ijk}$ は各ブロックにおけるスローネス初期値、スローネスの初期値からの偏倚量及び屈折波線長である。この受振点及び発震点タイムターム値と表層基底層速度はインバージョン (‘Generalized Linear Inverse Method’) によって算出される。この改良型タイムターム法解析には、以下のパラメータが採用された。

初動読み取り位相.....正のピーク位置
 表層基底速度を求める際のブロック区分.....5000m
 屈折波インバージョンに用いるオフセット距離.....Space-Variant

関東平野内では表層地質の変化に対応して、表層構造は大きく変化し、同一屈折面を解析対象とするタイムターム法的前提条件を勘案して、以下のオフセット範囲を採用した。

Loc.201.....150-550m
 Loc.401.....400-1200m
 Loc.801.....45-300m
 Loc.1001.....25-100m

改良型タイムターム法解析の結果を用いて、表層基底深度は各発震点及び各受振点について以下の様に計算される。

$$D_w = \frac{T_m}{\sqrt{1 - \left(\frac{V_w}{V_{sw}}\right)^2}} \cdot V_w \quad (2)$$

ここに、 T_m は‘Time-Term’、 V_w は表層速度、 V_{sw} は表層基底層速度である。表層速度として受振点側及び発震点側共に 800m/sec を採用した。この値は表層速度を変化させた重合スキャンによって確定した。

iv) 初動ミュート (First-break Mute)

強振幅の屈折波初動部分を抑制する目的で、以下のパラメータによる初動抑制処理を実施した。

テーパー長..... 200msec
 ミュート位置のスライディング速度..... 4000m/sec

v) 振幅補償 (Gain Recovery)

弾性波の震源からの伝播に伴う幾何減衰、多層構造内を透過、多重反射することによる伝播損失及び非弾性効果による減衰、さらには受振点、発震点毎のカップリングの相異に起因する振幅特性の変化を補償することを目的として、振幅補償を行った。利根川北側の群馬県内における工業団地群周辺ではデータ S/N が著しく低く、幾何減衰補償単独では不十分であると判断された。従って、振幅補償として、以下の手法を採用した。

幾何減衰補償 + AGC [ウィンドー長.....800msec]

vi) コヒーレントノイズ抑制処理 (Suppression of Coherent Noise)

今回取得されたデータにおいて、利根川北部 2.5km の低地 (VP.480-529) 及び櫛引礫砂層に被覆されている区間 (VP.669-719) の発震記録では、比較的継続時間の長い屈折波多重反射波が確認された。従って、こうしたコヒーレントノイズを抑制するために、次のフィルター処理を適用した。

速度フィルター (通過帯域)-3000m/sec~+3000m/sec

この速度フィルターは、NMO 補正及び屈折波静補正後の共通発震点アンサンブルで適用した。また、速度フィルターの適用に際しては、反射波列よりも見掛け速度が遅い傾斜波列が周波数-空間領域において最小二乗的に抽出され、発震記録から除去される。この周波数-空間領域における速度フィルターは、通常の周波数-波数領域における速度フィルターと異なり、固定したトレース間隔を仮定せずに実際のオフセット距離を参照するため、不規則な震源-受振点ジオメトリを扱うことが可能である。

vii) デコンボリューション (Deconvolution)

デコンボリューション処理では、次式で示される 1次元コンボリューションモデルが前提とされている。

$$F(t) = W(t) * R(t) + N(t) \quad (3)$$

ここに $F(t)$ は地震波トレース、 $W(t)$ は基本波形、 $R(t)$ はランダム定常な反射係数列、 $N(t)$ はランダムノイズである。このモデルにおいて基本波形を構成する要素としては、以下の項目を挙げることができる。

- ・震源波形：パイブレータスウィープ波形、震源カップリング効果、ゴースト効果
 - ・地層効果：多重反射、非弾性による吸収
 - ・記録系：受振器特性及び設置効果、表層に関わるゴースト効果、探鉱機の応答特性
- こうした要素の集積としての基本波形を地震トレースから推定・除去し、記録の分解能向上を図るためにデコンボリューションを適用した。'Surface-consistent'型デコンボリューション処理を含めた比較重合テストを通じて、以下のパラメータが採用された。このパラメータテストの結果、'Surface-consistent'型デコンボリューションが有効であることが確認された。53km に互る関東平野の広域な区間を横断する桐生測線では、地表地質、受振器設置条件及び受振測線周辺の定常ノイズ等が測線内で大きく変化し、同様に発震条件についても、足尾帯、三波川帯及び関東平野堆積層上の発震点での発震カップリングの地域差は顕著であり、'Surface-consistent'な受振及び発震スペクトルを推定し、最小位相の前提によってデコンボリューションオペレータを構築することは有効性が非常に高いものと

考えられる。

予測距離.....	4.0msec
零オフセット位置における設計ゲート.....	200～3000msec [Non-TV]
オペレータ長.....	320msec
プリホワイトニングファクター.....	5.0%
アルゴリズム.....	'Surface-consistent Deconvolution with Spectral Decomposition'

尚、デコンボリューション適用に際しては、零位相であるバイブレータ震源のスイープ波形（探鉱機'A/D Decimation Filter (DCF)'及び相互相関処理実施後のスイープ波形）について、最小位相変換処理を適用した。今回用いた GDAPS-4A 探鉱機では 24 ビット Δ - Σ A/D 変換が採用されているため、ローカットフィルターは探鉱機では適用されず、最小位相推定において問題となる 10Hz 以下の低周波数成分についての影響は少ない。尚、スイープ周波数（6-35Hz）の範囲内における'Spectral Decomposition'によって得られた共通受振点スペクトルの空間分布を検討した結果、受振点カップリングの地域性は顕著であり、特に利根川両岸の低地帯約 12.0km の範囲内では表面波の励起度が低いにもかかわらず、8～10Hz の低周波成分が卓越していることが確認され、またこの区間南側の櫛引礫砂層分布範囲では 12～15Hz の周波数成分が卓越していることが確認された。

viii) 共通反射点編集 (Common Midpoint Sorting)

上述 ii) のパラメータによって、共通反射点の編集が実施された。

ix) 浮動基準面に対する静補正 (Static Corrections to FDP)

浮動基準面に対する静補正を実施した。静補正については、下式で定義される標高補正量及び表層補正量の和として各発震点、受振点について与えられる。

- ・ 標高補正 T_e : 観測面を一定基準面へ補正する。

$$T_e = - (H_e - H_b) / V_{sw} \quad (4)$$

- ・ 表層補正 T_w : 低速度の表層構造変化による影響を除去する。

$$T_w = S_d * (-1/V_w + 1/V_{sw}) \quad (5)$$

ここに、 H_e : 発震点あるいは受振点標高 (m)

H_b : 基準面 [平均海水面 0.0m]

S_d : 表層厚 (m)

である。

表層補正値は、前述 iii) の屈折波初動解析による結果を用いて計算された。本調査の基準面 (Datum) は平均海水面 0.0m に設定されたが、絶対値の大きい標高補正値の適用を回避するため、CMP アンサンブル上において平均標高を定義し、これを浮動基準面 (FDP:'Floating Datum Plane') とした。この FDP から基準面までの基準面補正量 T_d は、下記のように定義される。

$$T_d = -2.0 * (H_f - H_b) / V_c \quad (6)$$

ここに、 H_f : 浮動基準面 (FDP)

V_c : 基準面補正速度 (1800m/sec)

である。この FDP の計算には CMP 内のオフセット距離範囲 0 - 2000m のトレースが用いられた。

x) 速度解析及び DMO 速度解析 (Velocity Analysis)

以下に示す定速度重合法による速度解析を実施した。尚、残差静補正後に再解析がなされている。また、速度解析結果を用いて NMO 補正したデータを入力として、速度解析箇所の DMO モニターアンサンブルを抽出し、同様の定速度重合法による速度解析を実施した。

解析点間隔2000m
解析速度数.....48 (1500 - 7000 m/sec)

x i) NMO 補正 (Normal Moveout Corrections)

速度解析によって求められた重合速度-時間の関数を時間-空間方向に内挿し、その速度テーブルに従って NMO 補正を適用した。同時に、下記のストレッチミュートを実施した。

ストレッチミュートファクター 5.0

x ii) ミュート (Outside Mute)

NMO 補正に伴う波形の伸長及び'Far'オフセット側に残留する屈折波初動部分を抑制する目的で、ミュート処理を全 CMP アンサンブルについて設計して、適用した。

x iii) 残差静補正 (2D Residual Static Corrections)

NMO 補正後の CMP アンサンブルを入力として、基準トレースとの相互相関関数から得られる最大ラグ値を用いて'Surface-consistent'な発震点、受振点残差静補正量を LTI (Linear Travel-time Inversion) によって統計的に計算し、これを適用した。

時間シフトの最大許容値.....12msec (1st)
時間ウィンドー..... 100-2500msec

x iv) DMO 重合 (DMO Stack)

空間-時間領域に於けるキルヒホッフ積分型 DMO 処理を適用した。その目的は第一に、反射点を零オフセット位置にマッピングし、傾斜面に沿った反射点の広がり除去して重合効果を高めることであり、第二に重合速度の傾斜依存性を解消することである。今回の DMO 重合処理では以下の処理パラメータが採用された。

解析対象の最大傾斜角70 度
解析対象の最小基準速度1600m/sec
DMO オペレータの片側最大長2500m
標準 DMO 重合数79Folds
DMO オペレータの定義数100 [150m - 10050m 100m 間隔]
DMO 重合オフセット距離範囲150 - 10050m
振幅補償F-K DMO 等価型
位相補償dip-dependent alias filter 適用

x v) 周波数—空間領域予測フィルター (F-X Prediction Filter)

周波数-空間領域に於いて複素型予測フィルターを設計、適用して、ランダムノイズを抑制し相対的に S/N を向上させる以下の F-X 予測フィルター処理を実施した。

オペレータ長.....	3 CDPs
空間ウィンドー長.....	50 CDPs
時間ウィンドー長.....	500 msec

x vi) 帯域通過フィルター (Bandpass Filter)

反射波の有効周波数帯域が周波数成分解析によって決定され、以下の零位相帯域通過フィルターが採用された。

オペレータ長.....	500 msec
周波数通過帯域往復走時	0.0sec / 通過帯域[3 - 40Hz]
	1.0sec / 通過帯域[3 - 35Hz]
	2.0sec / 通過帯域[3 - 30Hz]
	4.0sec / 通過帯域[3 - 25Hz]
	8.0sec / 通過帯域[3 - 20Hz]
	16.0sec / 通過帯域[3 - 20Hz]

これらの通過帯域のフィルターパラメータは線型内挿される。

x vii) 基準面補正 (Datum Corrections)

浮動基準面から基準面への時間補正が適用された。

x viii) キルヒホッフ型時間マイグレーション (Geometry-oriented Kirchhoff Time Migration)

時間断面上の反射点位置を実際の位置に移動させ、回折波を回折点に復元することを目的として、キルヒホッフ型時間マイグレーションを適用した。この手法では、重合測線に沿った標高変化と測線の屈曲への対応が可能である。以下に適用パラメータを示す。

最大アパチャー距離.....	6000 m
最大傾斜角度.....	60 度

x ix) 深度変換 (Depth Conversion)

重合速度プロファイルから、時間及び空間方向に平滑化した平均速度分布を用いて、'Vertical Stretch'法による深度変換を実施した。

b) 高精度追加解析

堆積盆地内の詳細な構造については、浅部高分解能処理を最適化させる観点から、以下の追加解析を実施した。

i) クロスディップ補正の再検討と高精度反射波静補正

発震及び受振測線が屈曲している場合、地下の反射点は重合測線上に収束せず、空間的な広がりを持つ。この反射点の重合測線からの偏倚が大きい場合、同一 CMP 内で反射面走時が重合測線と直交する方向への構造傾斜を反映する誤差が系統的に含まれる。クロスディップ補正は、各トレースの発震点-受振点の midpoint と重合測線との距離 X (m) に対する時間補正量を X (m) $\times a$ (msec/m) として、重合スキャンによって各 CMP 位置及び時間ウィンドウにおいて重合効果が向上する見掛け時間傾斜量 a を決定する解析手法である。既存解析では重力異常に反映される大局的な三次元的構造変化に準拠してクロスディップ量推定のための参考データとしていたが、追加解析では浅部堆積層のイメージング向上を前提として、クロスディップ補正の適用を除外した。その上で、短波長残差静補正の推定を徹底して実施した。その結果、利根川横断区間を中心として短波長の残留静補正の残留が浅層部のイメージング結果の品質低下の一因となっていたことが判明した。図 5 に更新した残差静補正量を示す。

ii) 高精度速度解析

先新第三系までの速度構造について、その高精度推定を目的として、屈折トモグラフィ解析並びに先新第三系基盤面に関わるホライゾン速度解析を実施した。先ず、屈折トモグラフィ解析内容を記述する。

・ 屈折初動走時のピックアップ及び初期モデルの構築

タイムターム法では解析対象とする屈折面の走時をピックアップすることで解析に必要な要件は満たされるが、‘Turning-ray’トモグラフィ法において速度の鉛直分布を把握するには全オフセットに関して初動走時をピックアップしておくことが必要である。本解析では低 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クアップを試みた。また、初期モデルとして緩やかな速度勾配を伴う水平成層構造を設定した。

・ 速度モデルに対する屈折波線及び走時計算

本解析では、第一段階における屈折波線及び走時の計算法として、走時線型近似法 (LTI 法) を用いた。この手法はアイコーナル方程式の差分法解法の一般型であり、波線が節点に拘束されないため屈折角が節点間隔の制約を受けないこと、及び格子の境界内部ではなく境界面が分割されるため計算効率が良い利点がある。LTI 法では、前進過程に於いて発震点から格子境界面上の走時評価点までの走時が計算され、境界面上の総ての点での走時は計算走時を線型内挿することによって得られる。また、後進過程においては受振点からの最小走時点を求めて波線経路が計算される。

・ 屈折法インバージョンのアルゴリズム

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、速度モデルの更新を行った。インバージョンでは速度モデルの格子を通過する全波線について速度値の修正を行い、各格子の平均値を用いて修正量を決定する SIRT 法 (Simultaneous Iterative Reconstruction Method) を採用した。一般に、格子間隔を小さくすると波線密度は低下

して解の安定性は低下し、逆に格子間隔を大きくすると分解能が低下する傾向を示す。従って、本解析では以下に示す様に、波線に重み関数を持たせて内側の格子点について速度値の更新を実施した。これは屈折波の波線経路上にスローネス修正量が集中して、インバージョン結果が不安定となることを回避する効果を持つ。

$$S^{k+1} = S^k \cdot \Delta S = S^k \cdot \frac{\sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{w-R}{R} \right)^2 \cdot \frac{T_{S,i}}{T_{C,i}} \right]}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{w-R}{R} \right)^2} \quad (7)$$

ここに、 S^k は (k-1) 回の反復修正を経たスローネス分布、 ΔS はスローネスの修正係数、 w は波線が通過する格子点からの反復修正有効範囲、 R は波線が通過する格子点からの距離、 $T_{S,i}$ は i 番目の波線に関する観測走時及び $T_{C,i}$ は i 番目の波線に関する計算走時である。こうした速度 (スローネス) の修正後に、速度モデルの更新及びインバージョンを実施し、残差が平均誤差以下になった時点で解析を終了する。

・ 屈折法インバージョンの実施

初期速度モデルとして、以下に示す鉛直勾配を持つ水平成層構造を仮定した。

速度構造..... 地表面 1500m/sec～深度 6500.0m : 5000m/sec

一般に屈折波 Tomography 法では 2 次元の鉛直面が解析対象であり、不規則発震点及び受振点分布に関しては投影面への投影が必要である。本解析では発震点-受振点アジマスが小さいことを前提として、投影面上のオフセット距離と実際の発震点-受振点オフセット距離の比を用いて観測走時に関する線型修正を実施した。以下に、今回の屈折波 Tomography 解析で使用したパラメータを示す。

格子間隔.....	水平方向	100.0m	鉛直方向	50.0m
格子数.....	水平方向	460cells	鉛直方向	130cells
格子上における走時評価間隔.....	水平方向	0.5 m	鉛直方向	0.5m
通過する格子点からの反復修正有効範囲.....		100.0m		
速度分布の反復修正回数.....		15 回		
速度分布の反復修正時における修正係数の許容範囲.....		±30.0%		

屈折波 Tomography 解析では、発震点間隔が不規則分布を伴う場合には波線が一部の格子に集中し易く、集中した格子において速度の増加傾向がある。従って、インバージョン実施後の修正速度モデルに対して水平及び鉛直方向に平滑化を実施した。さらに波線が存在しない測線両端部では、波線の存在する領域から水平方向に速度分布を外挿した。図 6 に屈折トモグラフィ結果を示す。反射法断面図による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。

次に、先新第三系基盤面のイメージング向上を目的として、先新第三系基盤面に沿ったホライゾン速度解析を実施した。反射法による最終深度断面図では、先新第三系基盤面は北部では卓越周波数が低周波数帯域 (6~10Hz) に限定された強振幅の反射波として現われ、緩やかな南下がりの傾斜を持って、利根川直下の最深部で約 3500m の深度を示している。一方、南の関東山地側では基盤面は急傾斜を示している。ホライゾン速度解析では、

この基盤面を自動追尾すると共に、スキャン速度を連続速度スペクトルとして計算した。図 7 に速度解析スペクトル及び自動ピッキングされた速度及び往復走時を示した。最終的には、屈折トモグラフィー結果及びホライゾン速度解析結果を総括し、CMP 重合速度の反復修正を実施した。

iii) 重合後高分解能解析

前節で確定した速度情報を基に CMP 重合処理を実施し、先新第三系基盤面に関しては広角反射波の抽出及び保存を CMP アンサンブル上で精密に行った。また、重合後処理記録について有効周波数帯域におけるスペクトルを平均化し、高分解能記録の構築を前提として、スペクトラルバランシング及び BLRR (‘Band-limited Ridge Regression’) 法による重合後デコンボリューションのテストを行った (図 8・9)。その結果、入力トレースを狭帯域の零位相帯域通過フィルターによって分割し、帯域パネル毎にトレーススケールングを行い加算手法によってスペクトラルバランシングを適用した。尚、有効周波数帯域は深部探査用に設定された起震車スウィープ周波数 (6-40Hz) に大きく制約を受けている。

有効周波数帯域.....2-40Hz
周波数ステップ.....4Hz

c) 高精度追加解析結果

標準データ処理によって得られた結果¹⁾と高精度追加解析により得られた結果とを図 10-15 に示す。高精度追加解析により、堆積盆地内の高分解能反射面を抽出することができた。

2) 関東平野北西部の地質構造

新たな追加解析によって得られた反射法地震探査断面、屈折トモグラフィーなどの情報をもとに、地質構造についての解釈を行った。従来の解析では、基盤上面を振幅の大きな周波数が低い反射波群によって認定してきた。測線北部については、こうした判断で比較的明瞭に相当層準を判断できるが、測線南部についてはこのよう特徴を有する波群が比較的広い範囲に出現し、高い精度で基盤上面の深度を判断することが困難であった。

屈折トモグラフィーの結果 (図 6) からは、P 波速度 4km/s と 5km/s の部分は 0.5km 程度の深度の範囲で決定されており、通例 5km/s を越える新第三系基盤の上面は高精度で判断できるようになった。測線内での基盤上面の形状は北部と南部で明瞭な差異がある。基盤上面は、北部では上に凸の曲率を示し、なだらかな比較的単純な形状を示している。これに対して南部は、基盤上面はやや複雑な形状を示し、全体としては下に凸の曲率で近似できる円弧状の形状を示している。

図 16 に深度断面の地質学的解釈を示した。図中に深度断面と地表地質との対応関係を示した。非対称な基盤上面の形状から、初期中新世の単純剪断型の伸張性の堆積盆地の形成プロセスを想定した。測線に沿っては測線南部では西北西-東南東方向の走向を有する平井断層・櫛挽断層・深谷断層が分布する¹⁾。測線周辺ではこの中で櫛挽断層と深谷断層が

活断層となっている。平井断層は三波川変成岩と松山層群・児玉層と呼ばれる中部中新統下部の地層²⁾の境に形成されている。この北方の櫛挽断層との間に分布する松山層群・児玉層と呼ばれる中部中新統下部の地層²⁾は、波長の短い褶曲を伴う変形をしている。櫛挽断層は、南側低下の逆断層であり、反射断面では断層の上盤（北側）は北傾斜の等斜構造を示す。櫛挽断層・平井断層とも、基本的には中新世初期に発生した北傾斜の正断層として解釈した。初期中新世における櫛挽断層の変位量は大きく、少なくとも 2.5km 以上の垂直隔離が発生したと推定される。こうした初期中新世におけるハーフグラベン³⁾の形成は、東北日本³⁾、⁴⁾や関東平野⁵⁾で広域的に見られる。こうした非対称な形状のリフトは大局的には北傾斜の断層による単純剪断型（simple-shear 型）の伸展変形によって形成されたと考えられる。このリフト構造の形成には中央構造線が果たした役割も見逃せない。測線南部には西南日本外帯に属する四万十帯が分布し、測線北部には内帯の足尾帯が分布する。したがって、中央構造線はこの測線内を通過している。近年、西南日本では反射法地震探査により中央構造線の地下構造の解明が進んだ⁶⁾、⁷⁾、⁸⁾。とくに 2006 年度の大都市圏地殻構造探査の和泉測線では中央構造線が三波川帯中の反射面群と平行にそれらの上面として形成されていることが判明している。中央構造線は和歌山から大分まで北に低～中角度で傾斜していることが明らかになっている。こうした背景から、関東平野北西部の中央構造線についても、中角度で北東に傾斜していると推定される。この形状は、関東平野北西部の中新世の南北方向に非対象な堆積盆地の形成と良好な相関を示している。従って、平井断層・櫛挽断層は基本的には中央構造線に接合する可能性が高いと判断される。

深谷断層は本断面では、断層より南側の地層が北傾斜を示すのに対して、断層より北方ではほぼ水平な反射面が卓越する。この境界は南に傾斜した面を示しており、北傾斜の櫛挽断層と地下 3km 程度で交差もしくは接合することになる。深谷断層に沿った重力異常は、断層に沿った明瞭な線状構造は示さない⁹⁾。櫛挽断層と深谷断層、さらには中央構造線との関連については、大きく二つの考えが提案されている。一つは中央構造線を垂直な断層として関東山地の縁に想定し、深谷断層をそれらから低角度で派生させるものである¹⁰⁾。この場合は、深谷断層が主断層である中央構造線から直接連続し、櫛挽断層はバックスラストと解釈される。この考えは変動地形的に連続性が良好な深谷断層の性状をよく説明できるが、前述した関東平野下の堆積盆地との関連性がなくなる。もう一つは、ここでの解釈と共通したもので、深谷断層をバックスラストと見なすものである⁵⁾。今回の追加解析に基づく地質解釈は、後者に近い。

基盤上面の形状は、利根川の左岸で基盤上面の傾斜が変化している。この部分は重力異常として、北西-南東方向の線状構造が認められ、高橋（2006）⁵⁾ が利根川構造線として図示した部分に相当する。

(d) 引用文献

- 1) 活断層研究会編：新編日本の活断層. 437p., 東京大学出版会, 1991.
- 2) 牧本 博, 竹内圭史: 寄居地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 1992.
- 3) Sato, H.: The relationship between late Cenozoic tectonic events and stress field

- and basin development in northeast Japan. *J. Geophys. Res.*, 99, 22261-22274, 1994.
- 4) Kato, N., Sato, H. and Umino, N.: Fault reactivation and active tectonics on the fore-arc side of the back-arc rift system, NE Japan. *Journal of Structural Geology*, 28, 2011-2022, 2006.
 - 5) 高橋雅紀, 林 広樹, 笠原敬司, 木村尚紀: 関東平野西縁の反射法地震探査記録の地質学的解釈 - とくに吉見変成岩の露出と利根川構造線の西方延長 -. *地質学雑誌*, 112, 33-52. 2006.
 - 6) Ito, T., Ikawa, T., Yamakita, S. and Maeda, T.: Gently north-dipping Median Tectonic Line (MTL) revealed by recent seismic reflection studies, Southwest Japan. *Tectonophysics*, 264, 51-63, 1996.
 - 7) 佐藤比呂志, 児島悠司, 村田明広, 伊藤谷生, 金田義行, 大西正純, 岩崎貴哉, 於保幸正, 荻野スミ子, 狩野謙一, 河村知徳, 蔵下英司, 越谷 信, 高須 晃, 竹下 徹, 津村紀子, 寺林 優, 豊原富士夫, 中島 隆, 野田 賢, 橋本善孝, 長谷川修一, 平田 直, 宮内崇裕, 宮田隆夫, 山北 聡, 吉田武義, Steven Harder, Kate Miller, Galen Kaip, 小澤岳史, 井川 猛: 西南日本外帯の地殻構造: 2002 年四国一瀬戸内海横断地殻構造探査の成果. *地震研究所彙報*, 53-72, 2005.
 - 8) 堤 浩之, 戸田 茂, 今村朋裕, 石山達也, 河村知徳, 佐藤比呂志, 宮内崇裕, 加藤一, 隈元 崇, 武田麻美, 山本彰吾: 四国の中央構造線断層帯の浅層反射法地震探査 - 2002 年新居浜測線と 2003 年阿波測線 -. *地震研究所彙報*, 105-117, 2007.
 - 9) 駒澤正夫: 日本重力以上グリッドデータベース. 日本重力 CD-ROM, 数値地質図 P-2, 地質調査所, 2000.
 - 10) 杉山雄一, 須貝俊彦, 水野清秀, 山崎晴雄, 伏島祐一郎, 遠藤秀典, 山口和雄, 伊藤久男, 横田 裕: 群馬県下における深谷断層の反射法地震探査と深谷断層系=東日本の中央構造線活断層系モデル. *地質ニュース*, 546,45-51, 2000.
 - 11) 佐藤比呂志, 平田 直, 伊藤谷生, 岩崎貴哉, 額額一起, 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.
 - 12) 須藤定久, 牧本 博, 秦 光男, 宇野沢 昭, 滝沢文教, 坂本 亨, 駒澤正夫, 広島俊男: 20 万分の 1 地質図幅「宇都宮」, 地質調査所, 1991.
 - 13) 坂本 亨, 酒井 彰, 秦 光男, 宇野沢 昭, 岡 重文, 広島俊男, 駒澤正夫, 村田泰章: 20 万分の 1 地質図幅「東京」, 地質調査所, 1987.

(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	国内・外の別
Seismic reflection profiling of active-seismogenic fault systems in Japan (口頭)	Sato, H., S. Abe, N. Kato, N. Hirata and T. Iwasaki	IUGG 24回大会、 ペルー、イタリア	平成19年 7月9日	国外
Geologic evolution of Japanese islands: insight from deep seismic profiling (口頭)	Sato, H.	IX International Congress on Pacific Neogene Stratigraphy, 筑波大学	平成19年 10月2日	国外
関東におけるフィリピン海プレート上面の形状について: レビュー (口頭)	佐藤比呂志・ 平田直	地球惑星科学関連 学会2007	平成19年 5月23日	国内
西南日本弧下に沈む込むフィリピン海プレートの遷移領域から非地震性すべり領域における反射波特性 (口頭)	蔵下英司・岩崎 貴哉・飯高 隆・河村知徳・ 森谷武男・伊藤 潔・澁谷拓郎・ 宮町宏樹・佐藤 比呂志・Miller Kate・Harder Steven・伊藤谷 生・金田義行・ 大西正純	地球惑星科学関連 学会2007	平成19年 5月23日	国内
大大特房総2002, 千葉大房総2005 による房総半島南部浅部地質構造の解明 (口頭)	山本修治・佐藤 比呂志・津村紀 子・菊池伸輔・ 駒田希充・菊地 陽亮・石黒梓・ 浅尾一己・伊藤 谷生・東中基 倫・須田茂幸・ 川中卓・井川猛	地球惑星科学関連 学会2007	平成19年 5月23日	国内

関東山地東縁部における地殻構造 - 大都市圏地殻構造調査関東山地東縁2003 測線の屈折法 - 広角反射法解析 - (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2007	平成19年 5月24日	国内
伊豆衝突帯東部における地殻構造 - 大大特関東山地東縁2003測線の屈折法 - 広角反射法解析 - (口頭)	新井隆太・岩崎貴哉・佐藤比呂志・阿部進・平田直	日本地震学会2007年度秋期大会	平成19年 10月25日	国内

学会誌・雑誌等における論文掲載
なし

マスコミ等における報道・掲載
なし

(f) 特許出願, ソフトウェア開発, 仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 20 年度業務計画案

平成 21 年度の制御震源によるデータ所得までは、大都市圏地殻構造探査で首都圏において取得したデータの検討を行う。平成 20 年度については、2005 年の北関東測線の検討を含め、平成 21 年の制御震源による探査に向けて、関東平野北西アレイ沿いの地殻構造について明らかにする。また、平成 21 年の制御震源による構造探査測線、仕様についての検討を行う。

[図表の説明]

図 1 地殻構造探査測線

図 2 大都市圏地殻構造調査桐生測線の測線図¹¹⁾。 国土地理院発行 1:200,000 地勢図(宇都宮、東京)に加筆。

図 3 調査測線位置図[受振点、発震点及び CMP 重合測線]¹¹⁾。国土地理院発行 1:200,000 地勢図(宇都宮、東京)に加筆。

図 4 調査測線地質図¹¹⁾。須藤ほか(1991)¹²⁾・坂本ほか(1987)¹³⁾に加筆。

図 5 残差静補正值更新結果

図 6 速度推定解析コンパイル結果：屈折トモグラフィ解析結果

図 7 速度推定解析コンパイル結果：先新第三系基盤面に関するホライゾン速度解析

図 8 高分解能解析パラメータテスト結果：スペクトラルバランシング

図 9 高分解能解析パラメータテスト結果：BLRR デコンボリューション

図 10 高分解能重合処理時間断面図：既存処理結果。佐藤ほか(2004)¹¹⁾による。

図 11 高分解能重合処理時間断面図：高分解能処理結果

図 12 重合後時間マイグレーション断面図：既存処理結果。佐藤ほか(2004)¹¹⁾による。

図 13 重合後時間マイグレーション断面図：高分解能処理結果

図 14 深度断面図(重合後時間マイグレーション記録)：既存処理結果。佐藤ほか(2004)¹¹⁾による。

図 15 深度断面図(重合後時間マイグレーション記録)：高分解能処理結果

図 16 深度断面図にもとづく桐生測線の地質学的解釈。

[図表]

統合地殻構造探査 探査測線

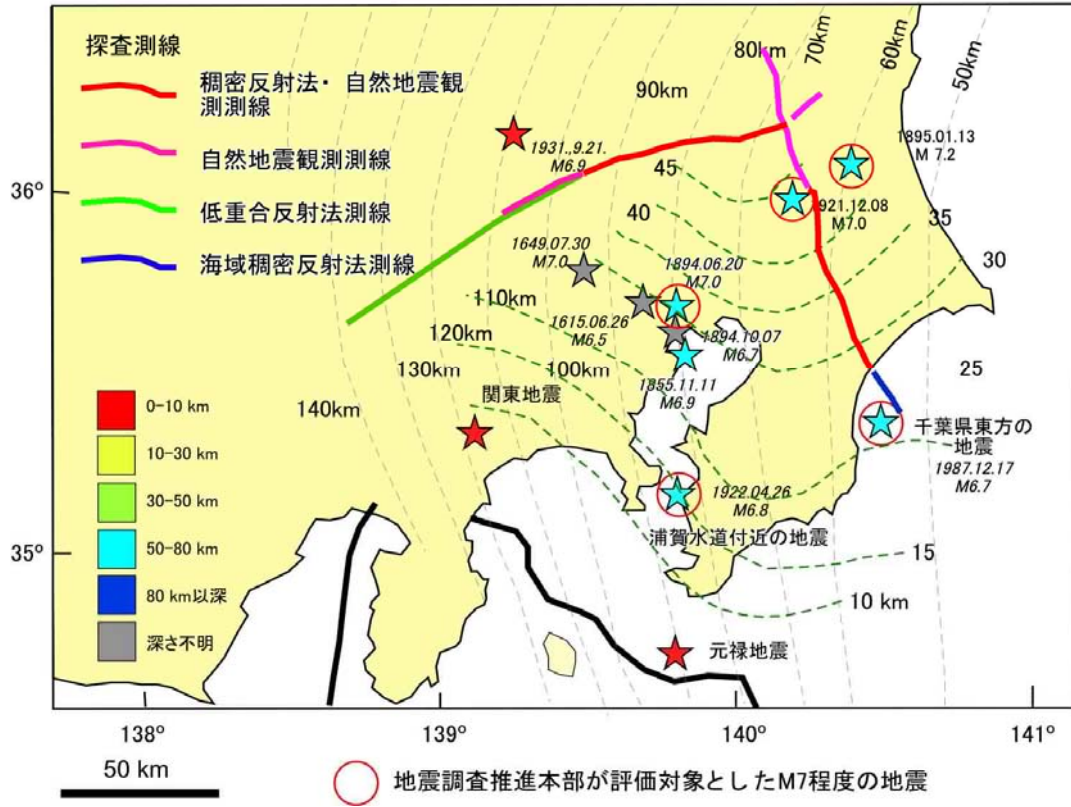


図 1. 地殻構造探査測線。

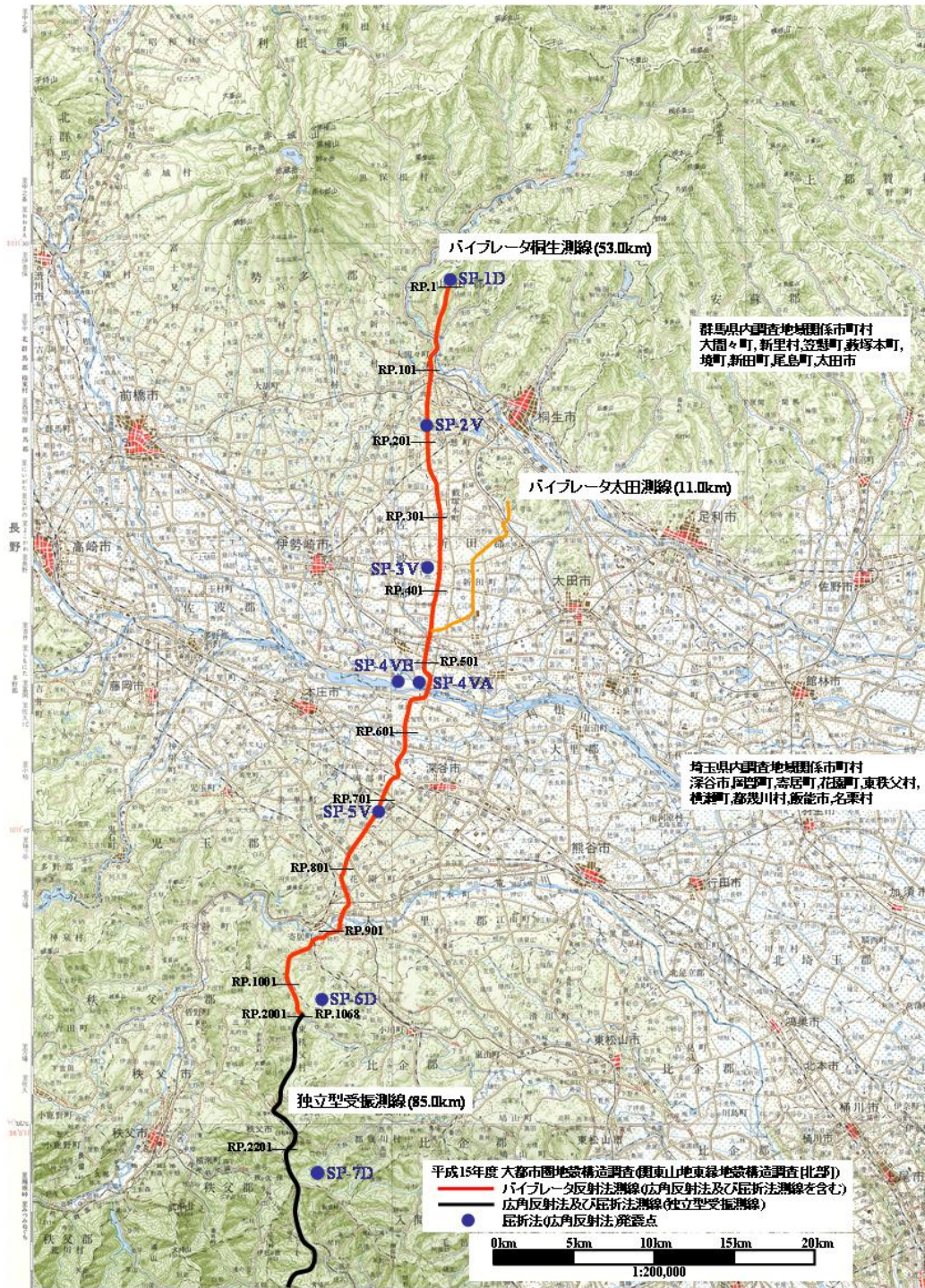


図 2. 大都市圏地殻構造調査桐生測線の測線図¹¹⁾。 国土地理院発行 1:200,000 地勢図(宇都宮、東京)に加筆。

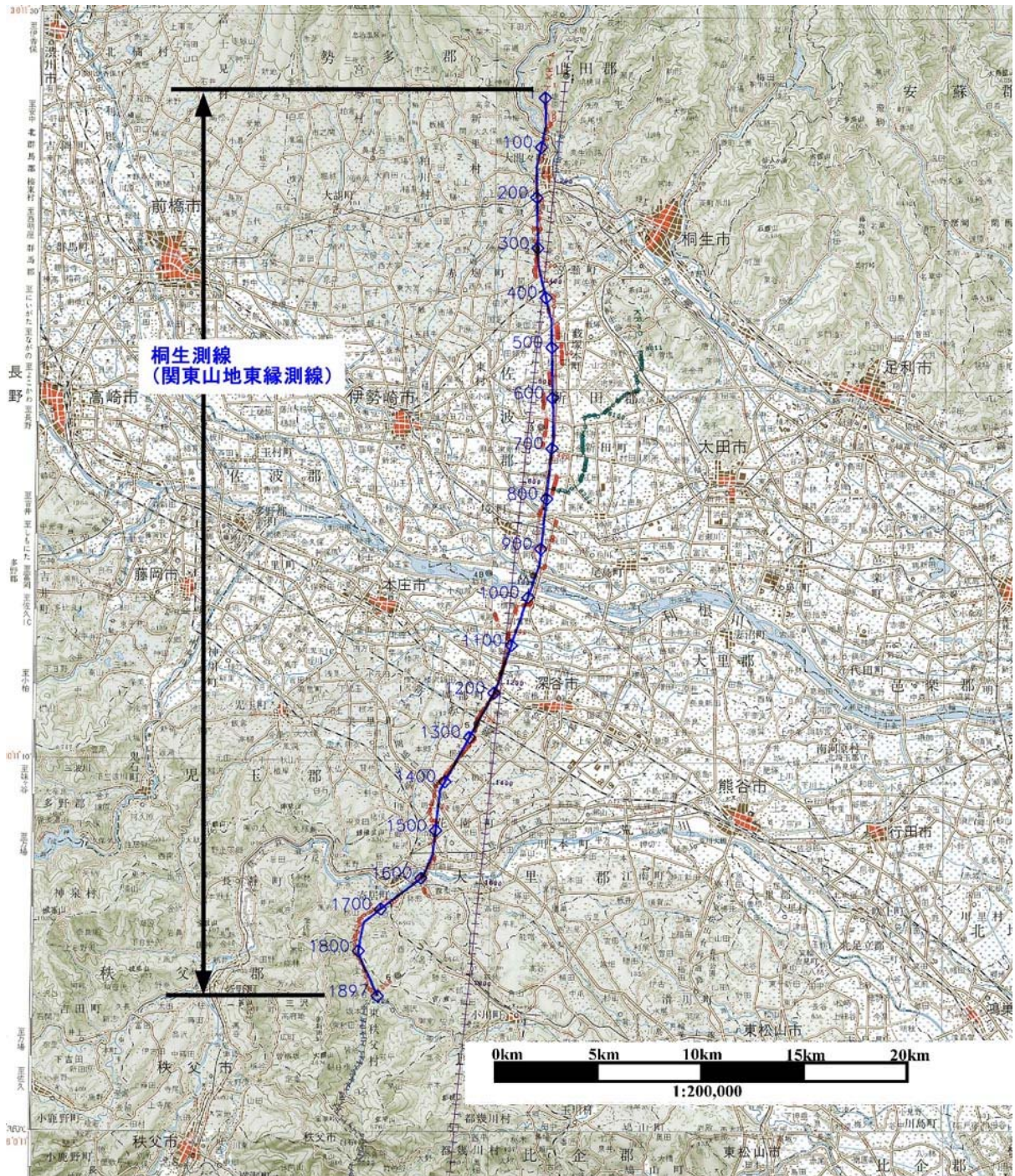


図 3. 調査測線位置図 [受振点、発震点及び CMP 重合測線¹¹⁾。国土地理院発行 1:200,000 地勢図（宇都宮、東京）に加筆。

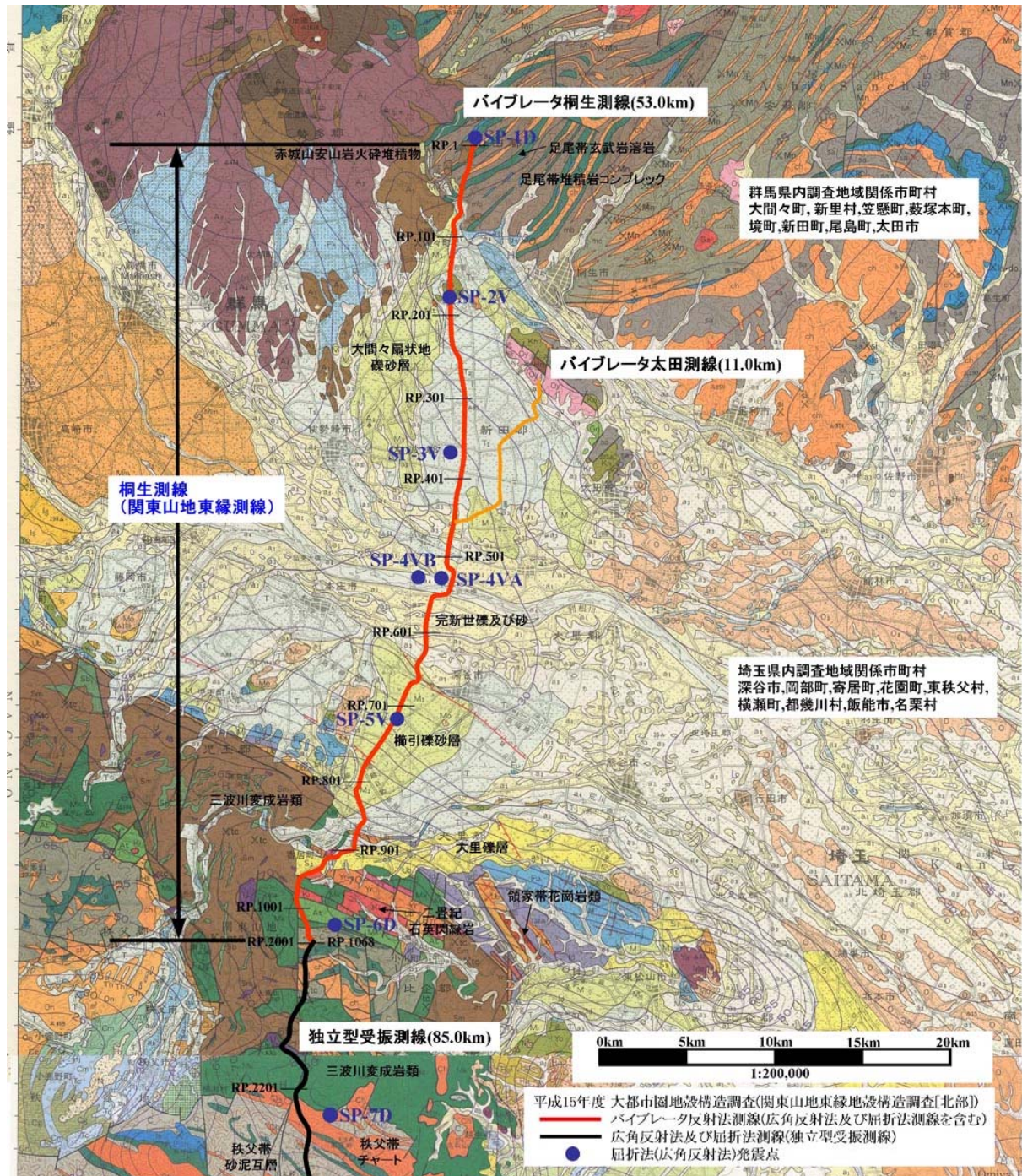


図 4. 調査測線地質図¹¹⁾。須藤ほか (1991)¹²⁾・坂本ほか (1987)¹³⁾に加筆。

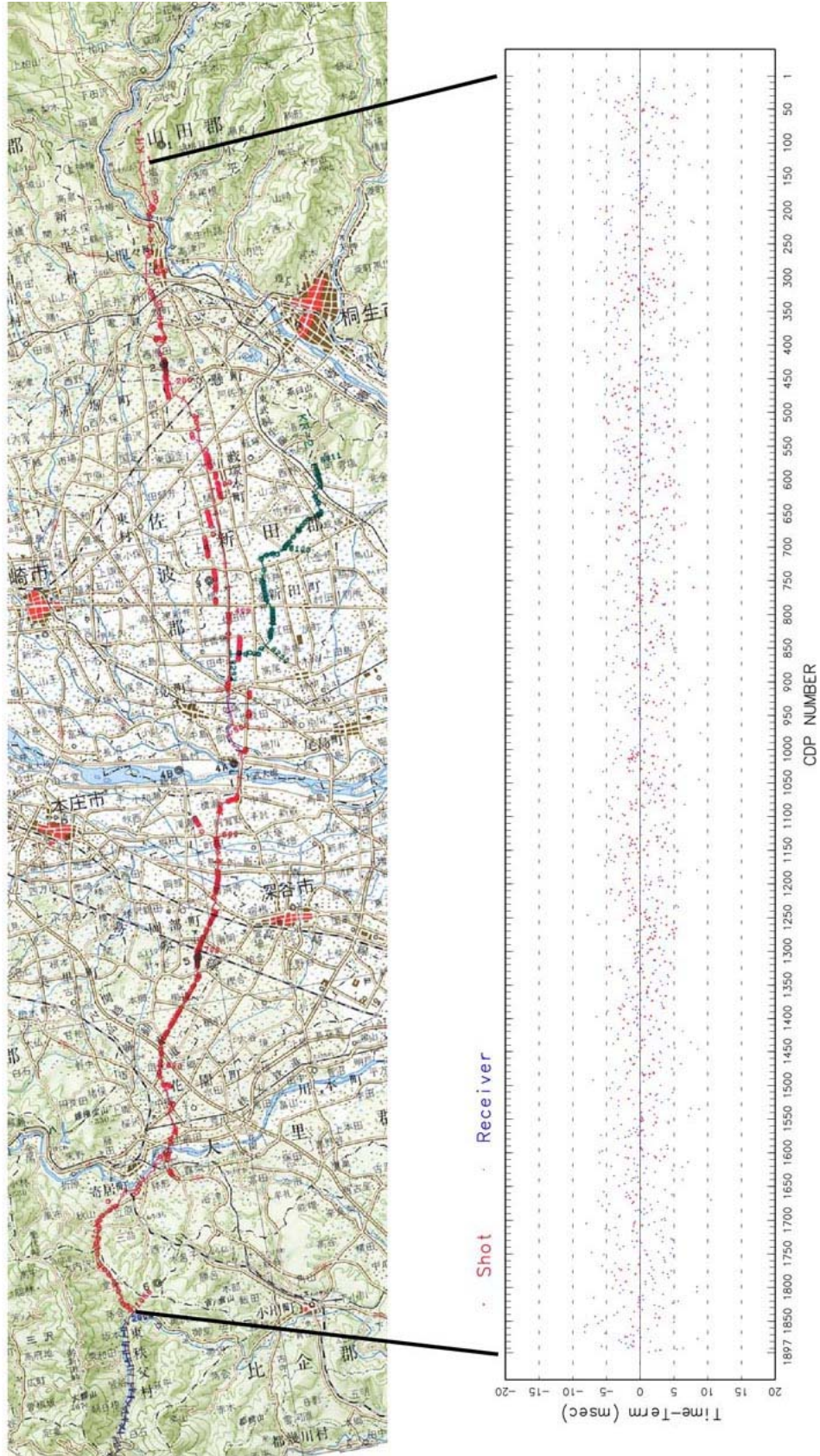


図 5. 残差静補正值更新結果。

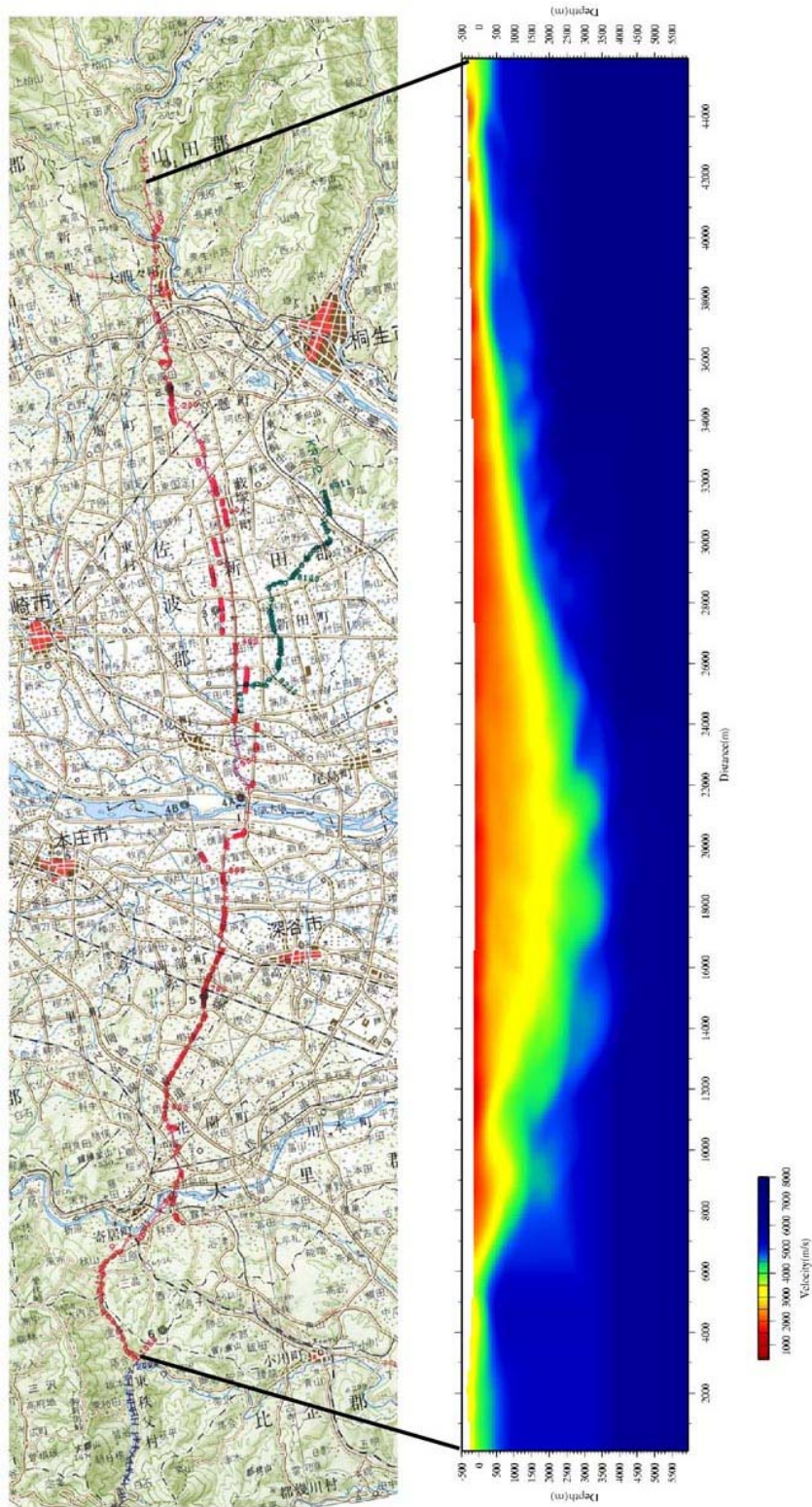


図 6. 速度推定解析コンパイル結果：屈折トモグラフィー解析結果。

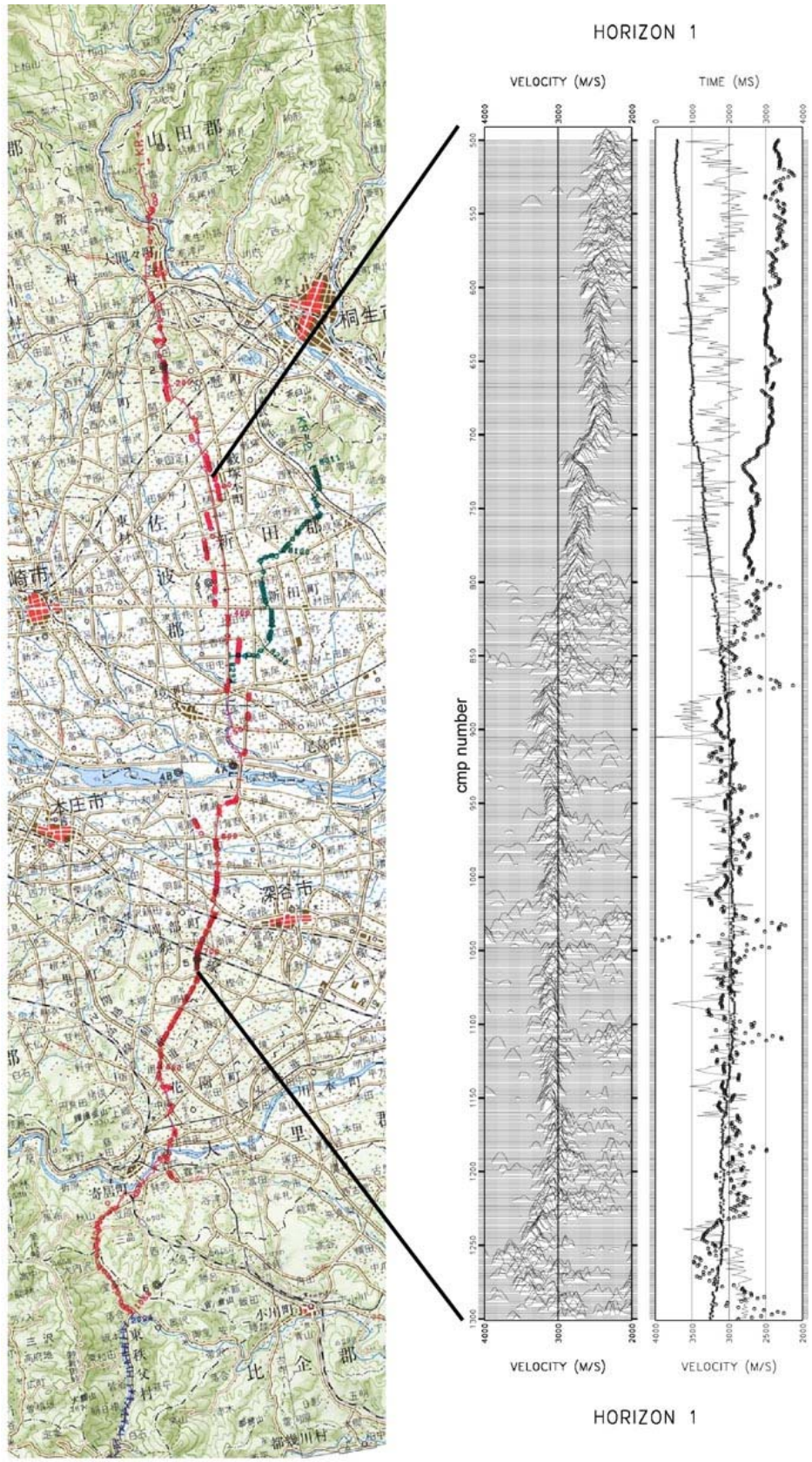
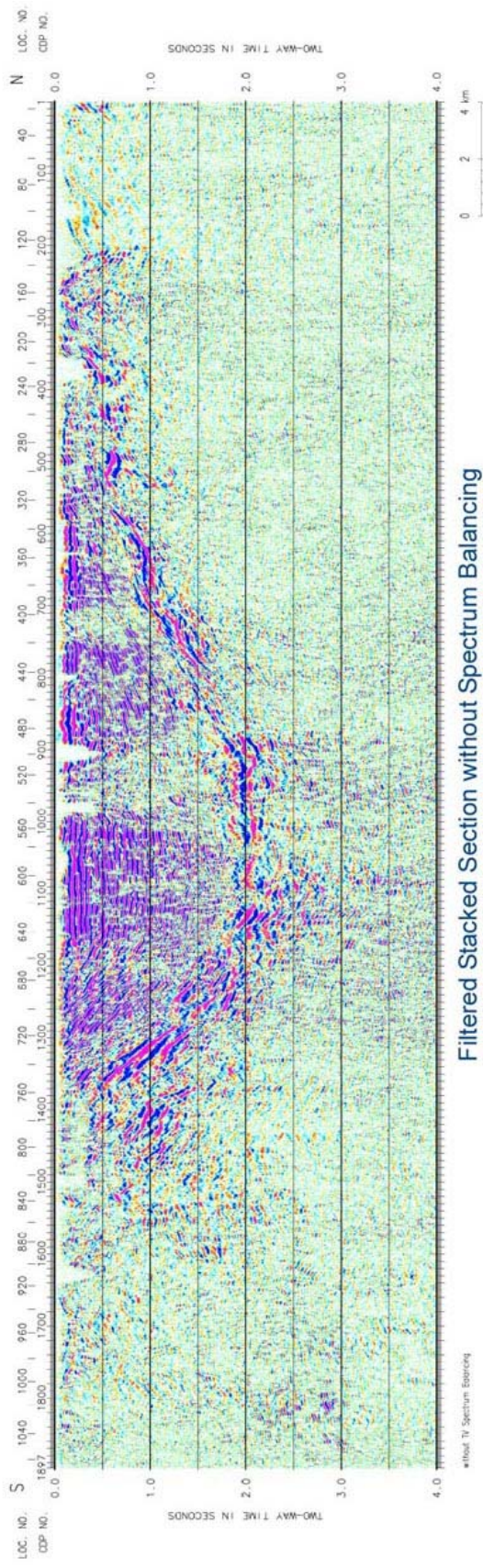
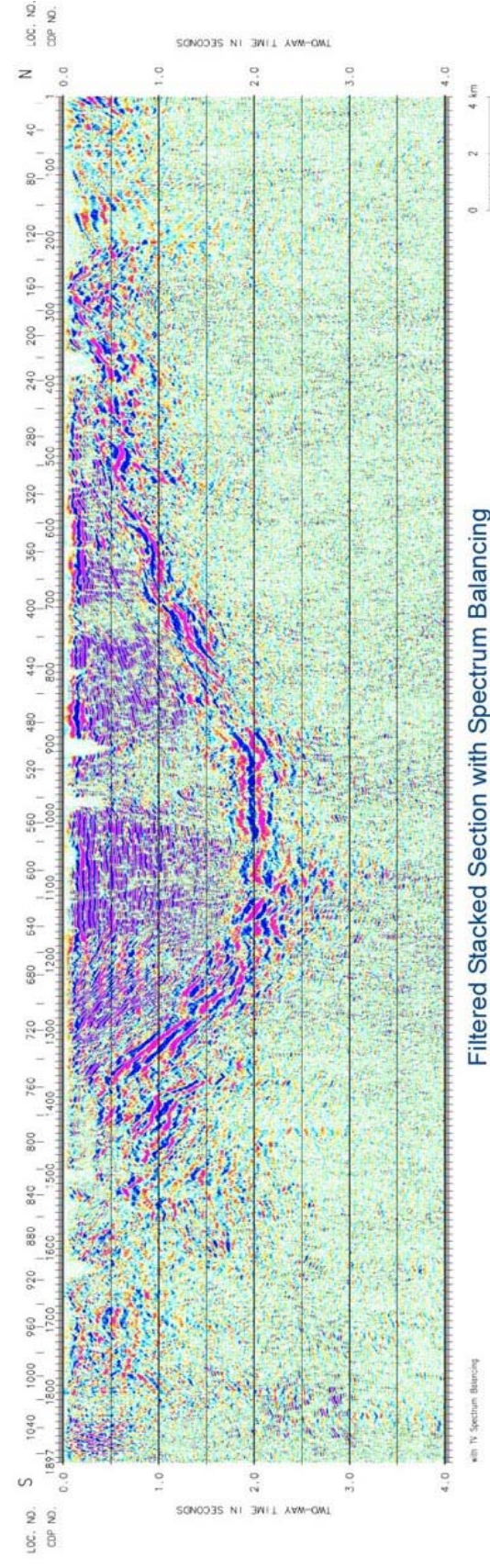


図 7. 速度推定解析コンパイル結果：先新第三系基盤面に関するホライズン速度解析。



Filtered Stacked Section without Spectrum Balancing



Filtered Stacked Section with Spectrum Balancing

図 8. 高分解能解析パラメータテスト結果: スペクトラルバランシング。

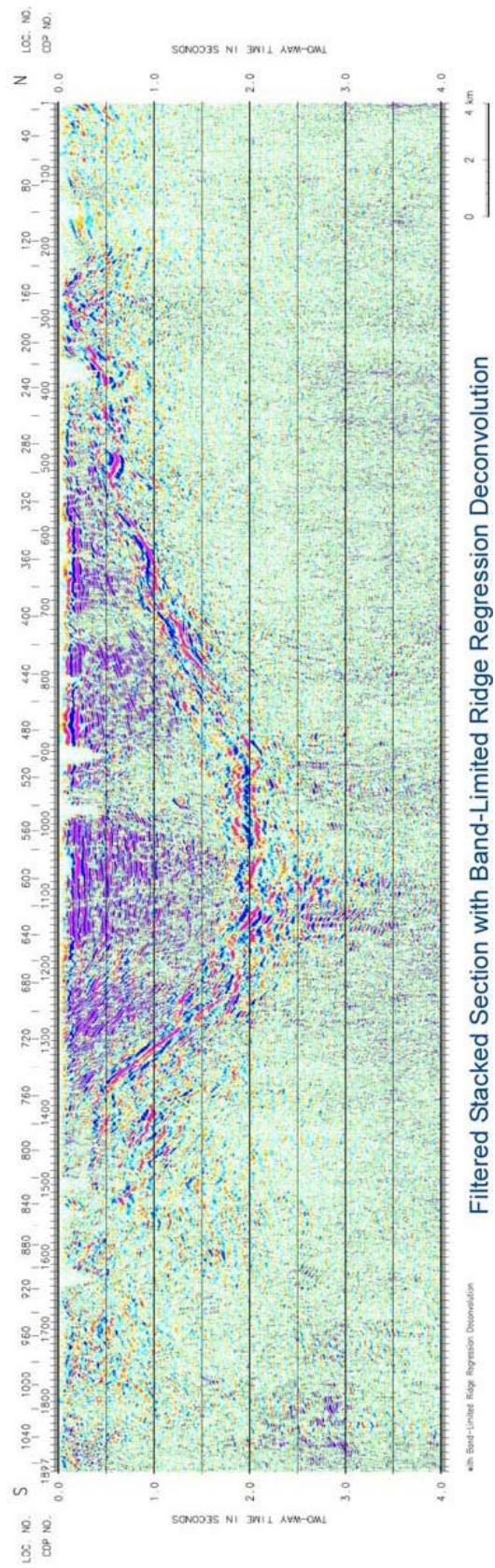
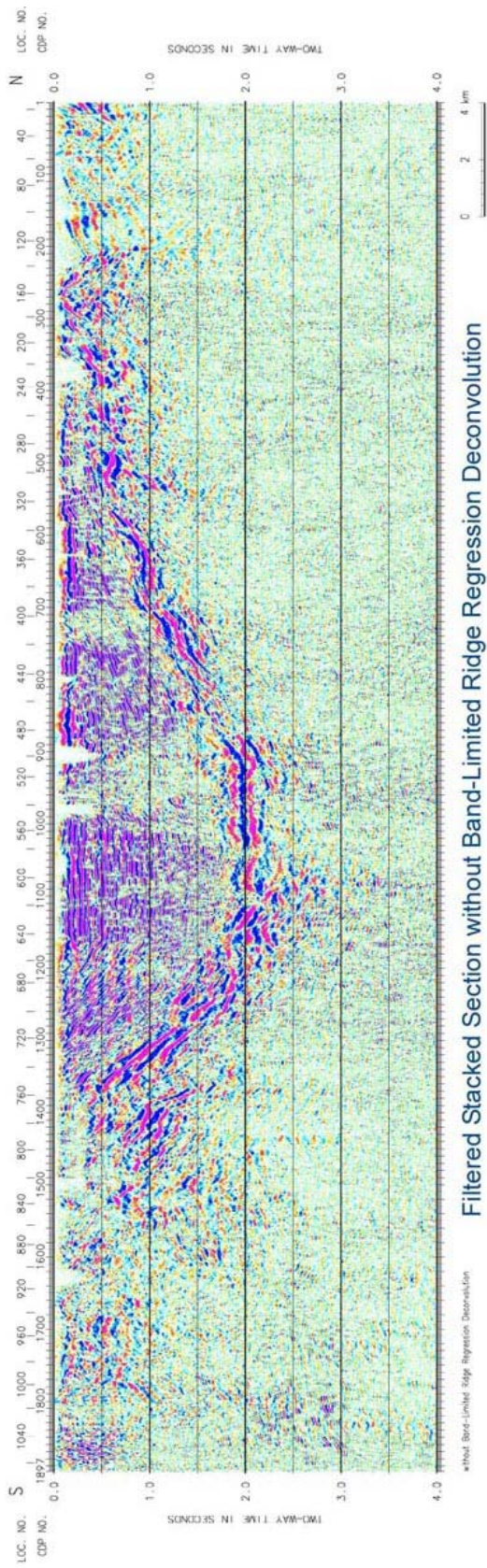


図 9. 高分解能解析パラメータテスト結果: BLRR デコンボリューション。

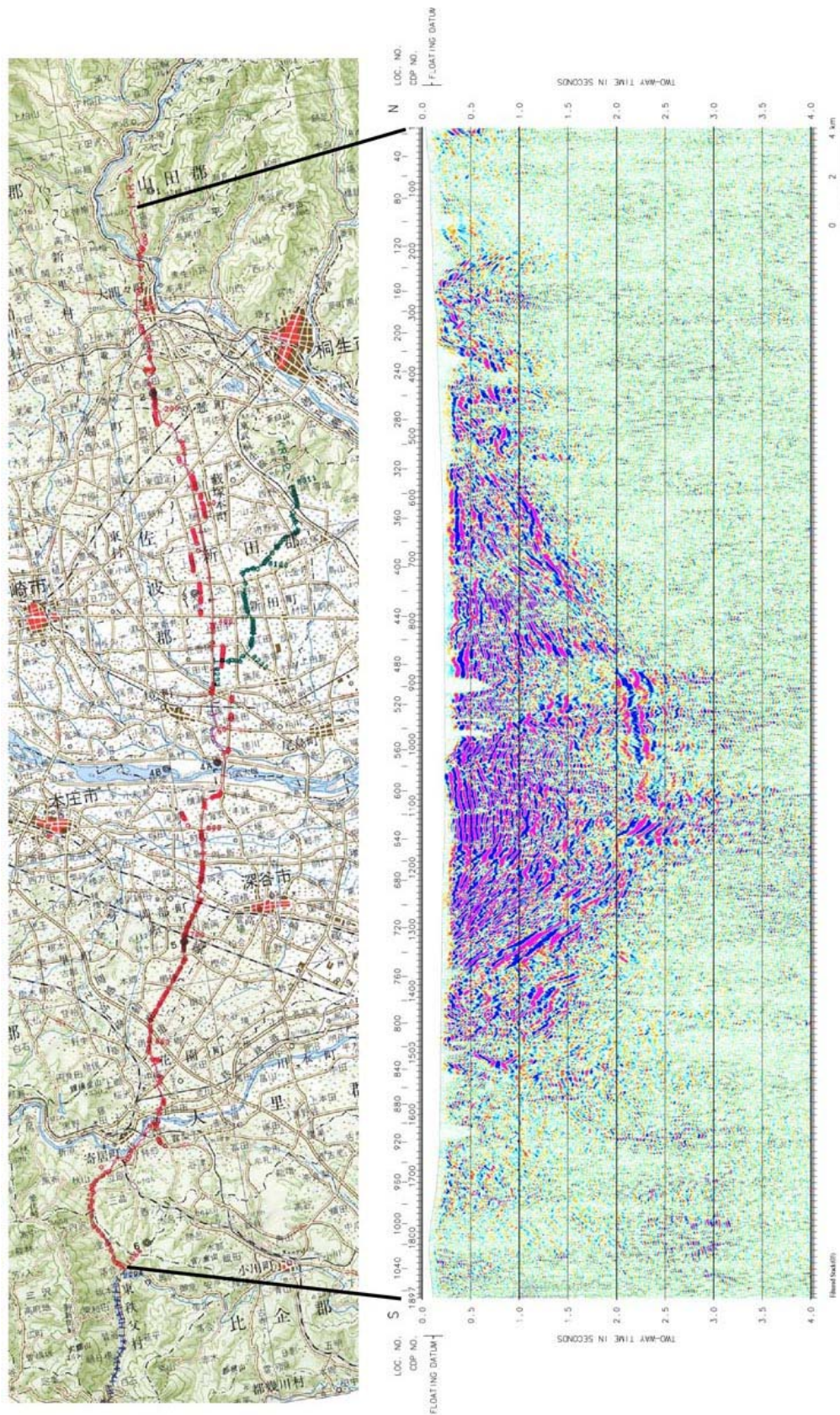


図 10. 高分解能重合処理時間断面図：既存処理結果。佐藤ほか（2004）¹¹⁾による。

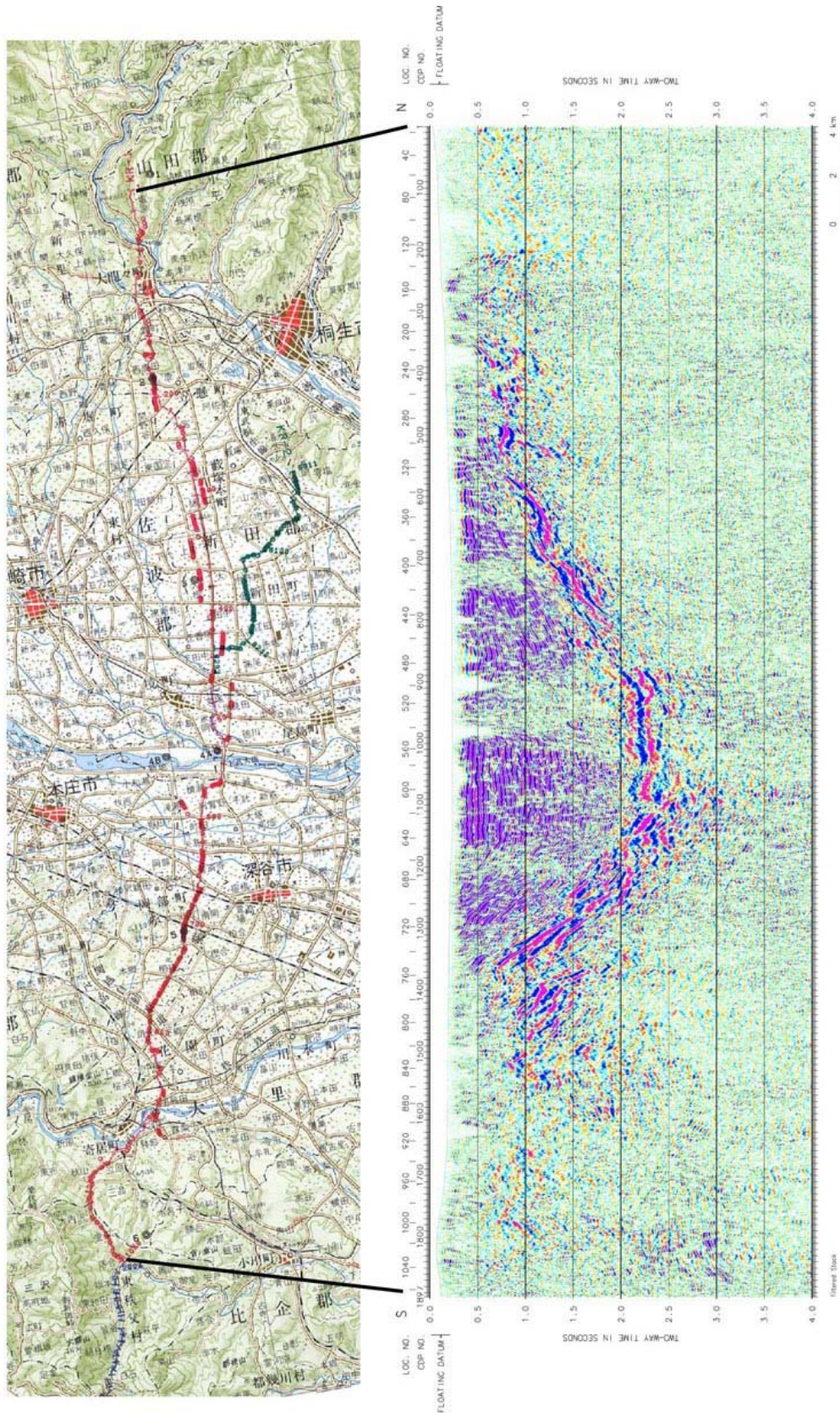


图 11. 高分解能重合处理時間断面图：高分解能处理結果。

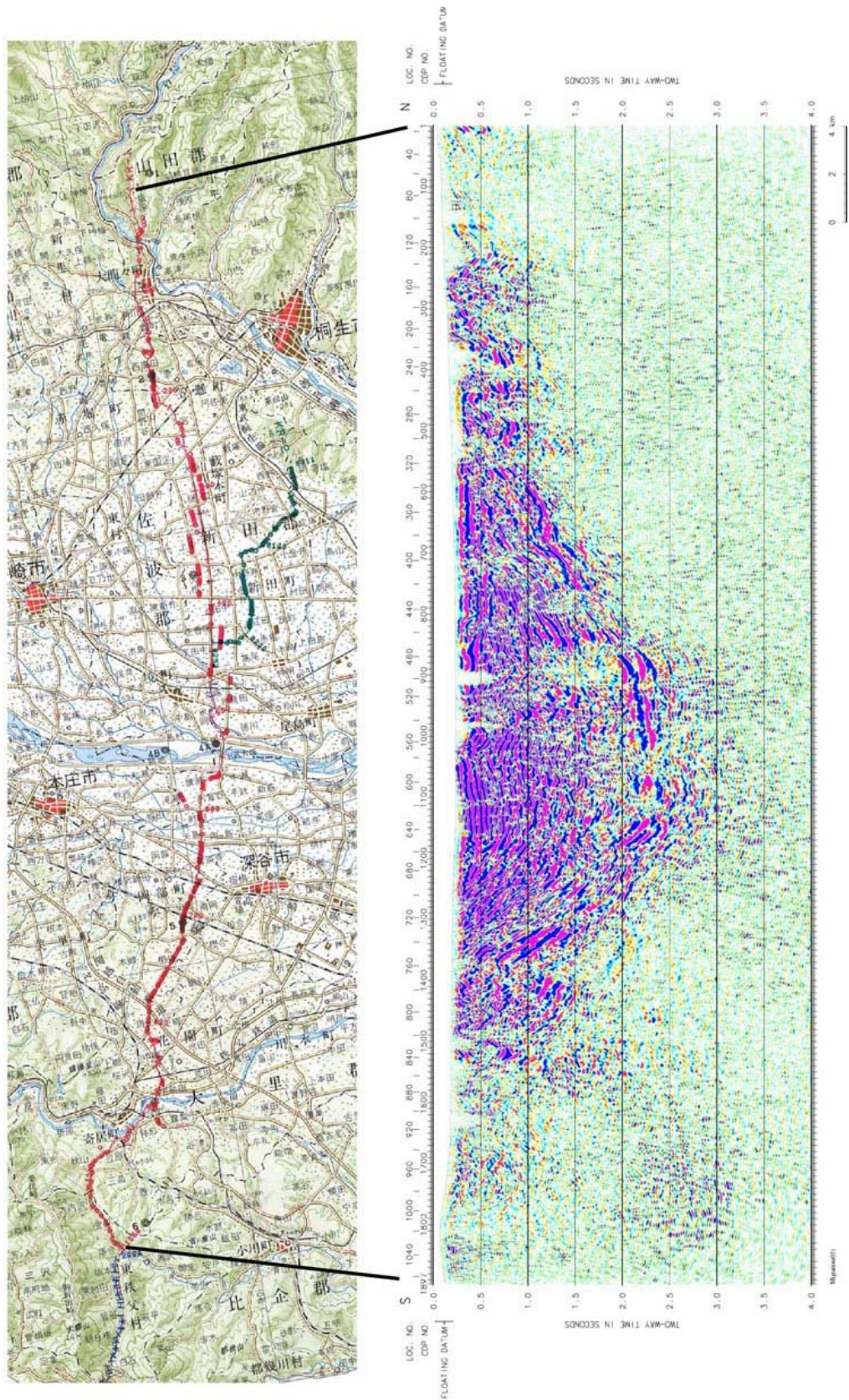


図 12. 重合後時間マイグレーション断面図: 既存処理結果。佐藤ほか (2004) ¹¹⁾による。

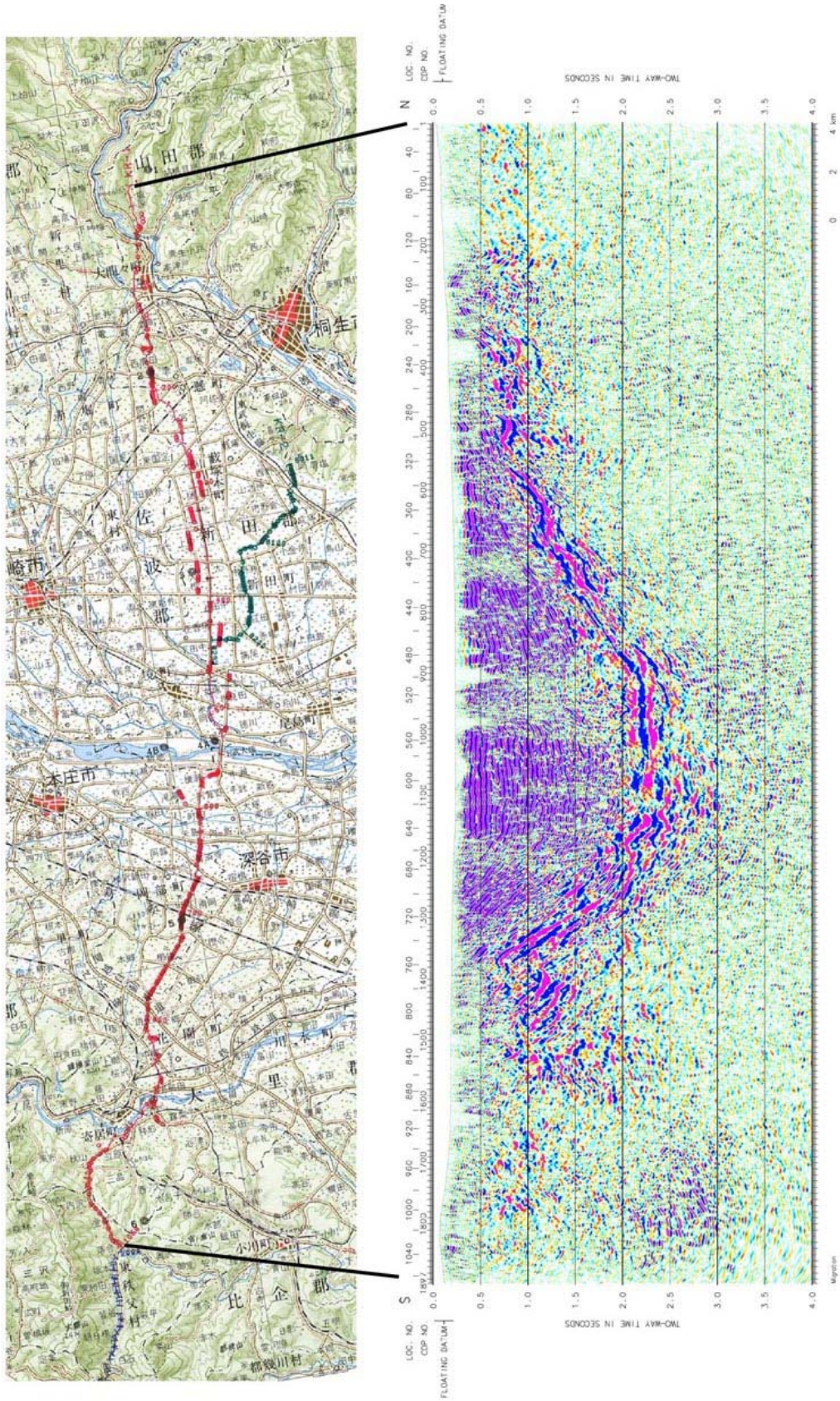


図 13. 重合後時間マイグレーション断面図：高分解能処理結果。

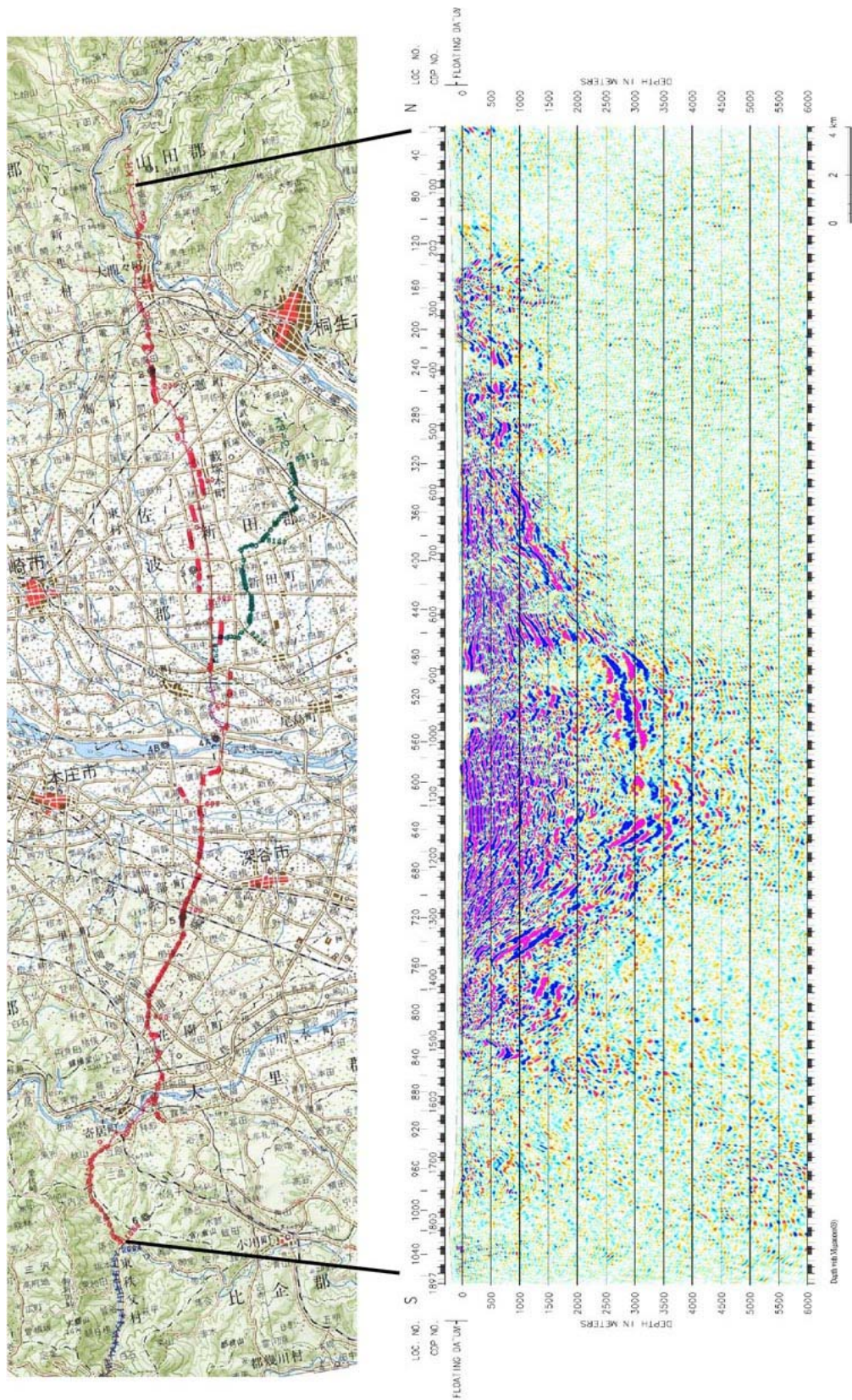


図 14. 深度断面図（重合後時間マイグレーション記録）：既存処理結果。
佐藤ほか（2004）¹¹⁾による。

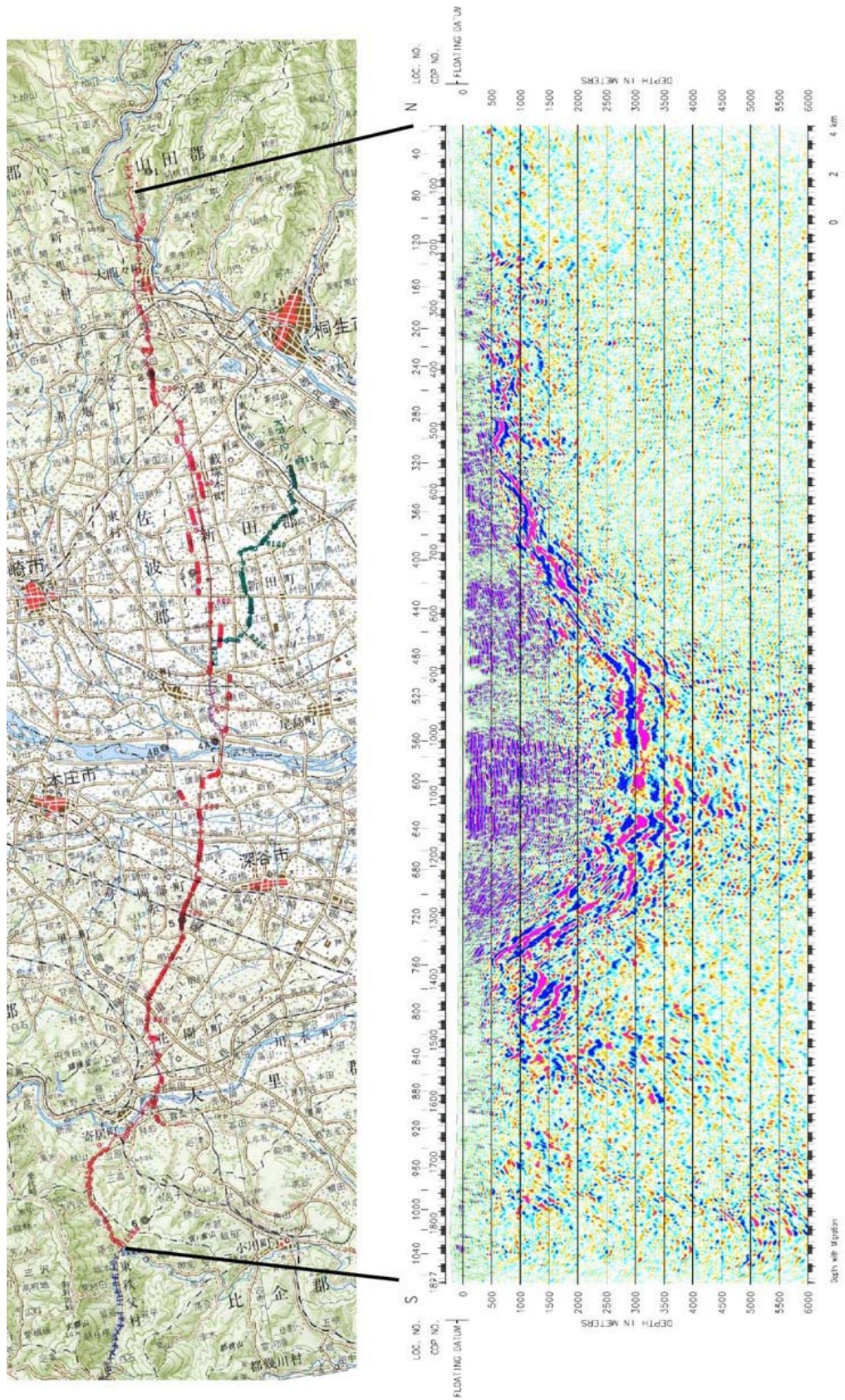


図 15. 深度断面図（重合後時間マイグレーション記録）：高分解能処理結果。

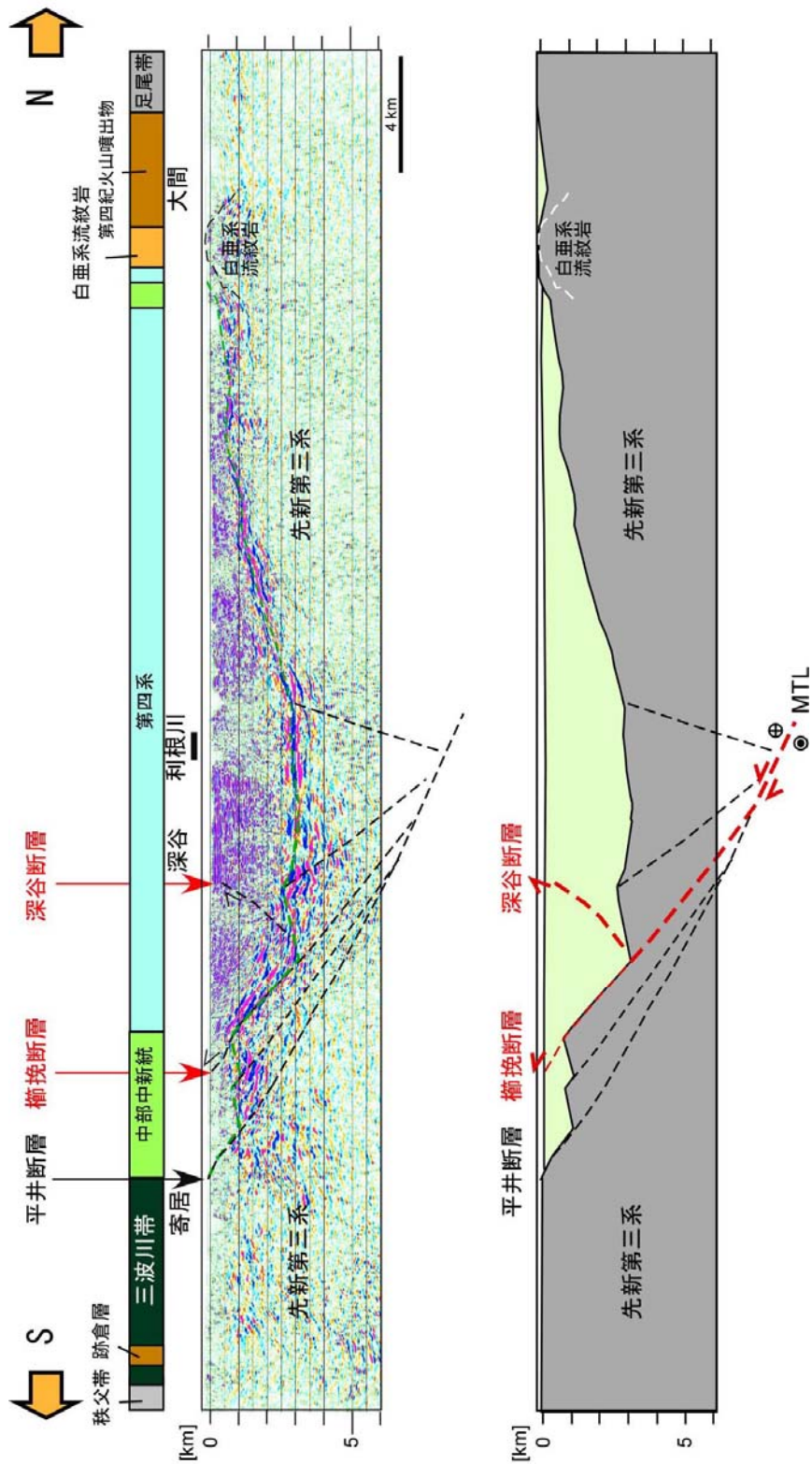


図 16. 深度断面図にもとづく桐生測線の地質学的解釈。