

3. 1 断層帯の三次元的形状・断層帯周辺の地殻構造解明のための調査観測

a. 制御震源地震探査による地殻構造の解明

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 制御震源地震探査による地殻構造の解明

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人 東京大学地震研究所	教授	佐藤 比呂志
国立大学法人 東京大学地震研究所	教授	岩崎 貴哉
国立大学法人 東京大学地震研究所	准教授	飯高 隆
国立大学法人 東京大学地震研究所	助教	蔵下 英司

(c) 業務の目的

神縄・国府津-松田断層帯の相模湾における断層形状把握のために制御震源（エアガン）による深部構造探査を行い、フィリピン海プレート上面までを含む断層構造のイメージングを図る。また、不明の点が多く残されている西方延長部で制御震源による構造調査を行い、火山噴出物下の断層帯の位置と形状を求める。

(d) 3 カ年の年次実施計画

1) 平成 21 年度：

伊豆半島の伊東から相模トラフを横断し、三浦半島の逗子に至る延長約 50km の海上区間で、エアガンを震源とした二船式の深部地殻構造探査を実施する。陸上部にもそれぞれ受振ラインを設置し、海陸にまたがる地殻構造イメージを得るとともに、受振点での波形記録を擬似的に発震点での記録として扱うことにより、測線沿いの深部までの速度構造を明らかにした。これにより、神縄・国府津-松田断層帯の深部延長とフィリピン海プレート上面の巨大衝上断層(メガスラスト)との接合関係を明らかにした。また、強震動予測の高度化に資する速度構造を得た。

2) 平成 22 年度：

平成 21 年度の伊東-逗子測線を含め、大学・地方自治体が実施した神縄・国府津-松田断層系を横切る既存の反射法地震探査データを、共通したパラメーターで再解析し、整合的な速度構造による地下断面を作成する。これらの断面をもとに神縄・国府津-松田断層系の三次元地下形状モデルを作成する。

3) 平成 23 年度：

伊豆衝突帯の西側のプレート境界の位置を明らかにするため、箱根火山を横切り富士山東麓を横切る屈折法地震探査を実施する。地表は弾性波の減衰の大きな火山噴出物で覆われるため、ダイナマイトを震源とする地下構造探査とする。平成22年度の電磁気探査測線の結果と総合して、プレート境界断層の位置を明らかにする。

(e) 平成 22 年度業務目的

平成 21 年度の伊東-逗子測線を含め、大学・地方自治体が実施した神縄・国府津-松田断

層系を横切る既存の反射法地震探査データを、共通したパラメーターで再解析し、整合的な速度構造による地下断面を作成する。これらの断面をもとに神縄・国府津-松田断層系の三次元地下形状モデルを作成する。

(2) 平成22年度の成果

(a) 業務の要約

神縄・国府津-松田断層帯周辺では、1990年から反射法地震探査が実施されている。これらの異なる仕様で取得されたデータを統一的な手法と、近年開発された屈折トモグラフィー法による速度構造解析・CRS (Common Reflection Surface)法などの手法で再解析することにより、断層形状を高い精度で明らかにするための基礎資料とした。解析した測線は、平成13年度（2001）神奈川県地下構造調査 Line-A、同 Line-B、大都市圏地殻構造調査として実施した平成15年度（2003）相模湾測線、同 関東山地東縁測線 松田測線、平成17年度（2005）小田原-山梨測線 足柄区間である。

統一ワークフロー及び統一パラメータによる統合解析、複合型コヒーレントノイズ抑制処理、初期モデルランダム化による‘Turning-ray’トモグラフィー解析、CRS (Common Reflection Surface)法による統合解析をそれぞれの測線データについて実施した。とくに反射断面での反射イベントの連続性の向上が見られ、得られた速度構造も利用して、断層形状の地質学的な解釈を行い、断層の地下形状を推定した。得られた、断層形状をもとに神縄・国府津-松田断層帯の震源断層の三次元形状についてのモデルを作成した。

(b) 業務の成果

1) 神縄・国府津-松田断層帯の周辺の反射法地震探査データの再解析

神縄・国府津-松田断層帯周辺では、1990年代から防災科学技術研究所・神奈川県・東京大学地震研究所・地質調査所などによって、反射法地震探査が実施されてきた。断層の深部形状を統一的に検討するためには、これらの反射法地震探査断面は極めて有効な資料である。ここでは、様々な仕様で取得されたデータを統一的な解析を行うことにより、均質な評価による断層形状の把握につとめた。また、近年、屈折トモグラフィー法による速度構造解析や、CRS (Common Reflection Surface)法など、新たな解析方法も開発されており、より明瞭に深部の地質構造を捉えることが可能になっている。こうした背景から、ここでは東京大学地震研究所や神奈川県によって取得された反射法地震探査データの再解析を行った。使用したデータは以下の5測線である（図1）。

1. 平成13年度（2001）神奈川県地下構造調査 Line-A
2. 平成13年度（2001）神奈川県地下構造調査 Line-B
3. 平成15年度（2003）東京大学地震研究所 相模湾測線
4. 平成15年度（2003）東京大学地震研究所 関東山地東縁測線 松田測線
5. 平成17年度（2005）東京大学地震研究所 小田原-山梨測線 足柄区間

上記の統合解析対象データは、発震、受振及び記録取得仕様に応じて、探査深度や分解能に差異が認められる。また、データ解析フローチャート及びパラメータが各測線で異なるために、統合的な扱いが困難であった。

そこで、今回、各既存データに関してデータ取得仕様及び解析パラメータを精査した上で、以下に挙げる4つの解析手法を選択的に用いて統合解析を実施した。

[1]統一フローチャート及び統一パラメータによる統合解析

コヒーレントノイズ抑制、静補正、速度解析及びマイグレーション処理を中心に、全てのパラメータ及び処理フローを再評価し、統一パラメータによる重合処理を適用する。速度構造に関しては、詳細な速度解析結果に加えてブーゲー重力異常値を参照し、足柄平野の三次元的速度構造モデルを構築する。この統合解析の適用及び三次元速度構造モデルを通じて、重合処理断面図及び深度断面図を全測線について提示する。

[2]複合型コヒーレントノイズ抑制処理

足柄平野を充填する新期堆積層は最下部を除いて成層構造を示す反射群として、また、下位の箱根火山古期外輪山期溶岩は不均質な小セグメントの波群として認識出来る。この不均質な散乱波群の包絡面が第三系白浜層群の上面に対応するものと解釈されている。こうした堆積盆地下部の不均質構造の明確化は重要な課題であり、走時差準拠型、過大振幅エディット型及び予測トレース型の各種コヒーレントノイズ抑制処理を複合化させて適用し、データ品質及び分解能改善を試行する。

[3]初期モデルランダム化による' Turning-ray' トモグラフィー解析

主に長大測線で反射法データが取得されている大都市圏地殻構造調査に関して、初期モデルランダム化によるモンテカルロ型信頼性評価解析を伴う' Turning-ray' トモグラフィー解析を適用し、断層周辺における速度不均質構造を抽出する。併せて、推定速度構造に関する誤差評価を行う。なお、この速度情報は[1]で作成した三次元速度構造モデルの検証に使用する。

[4]CRS (Common Reflection Surface) 法による統合解析

国府津-松田断層を東西に横断する測線を選択し、CRS 法の適用による断層近傍における不均質構造及び断層形状の抽出を行う。CRS 法では、近軸波線理論 (Paraxial Ray Theory)に基づき、ゼロオフセット反射波走時に伴う CMP 間走時差の挙動を考慮したムーブアウト補正、すなわち、反射面沿いの振幅応答の平滑化を通じて飛躍的な重合数が確保されるが、本解析では、複数の傾斜イベントに関して対応可能なアルゴリズムを採用する。

以上の解析手法を用いて、各測線における反射波イメージングの高精度及び高分解能化を行い、神縄・国府津-松田断層帯の形状把握を図った。

2) 統合解析対象測線概要

a) 2001 神奈川県地下構造調査 A 測線

2001 神奈川県地下構造調査は、神奈川県西部地域にあたる足柄平野周辺の地下構造を解明し、地震防災対策に必要な基礎資料を得る目的で、神奈川県が実施した地下構造調査である（神奈川県、2004）。A 測線は、神奈川県大磯町から神奈川県小田原市に至る、東北東-西南西方向の測線長約 15km の測線である。測線中央部に、ミニバイブレータを用いた展開長 2.5km の高密度発震測線が 3km 設定された。この高密度発震区間を挟んだ東西に、大型バイブルレータを用いた展開長 8~10km の反射法地震探査データが取得された。また東

京大学地震研究所により 4ヶ所でのダイナマイト発震と 3ヶ所での夜間バイブレータ発震（100回スタック）を行ない、準3次元的な屈折法データが取得されている。

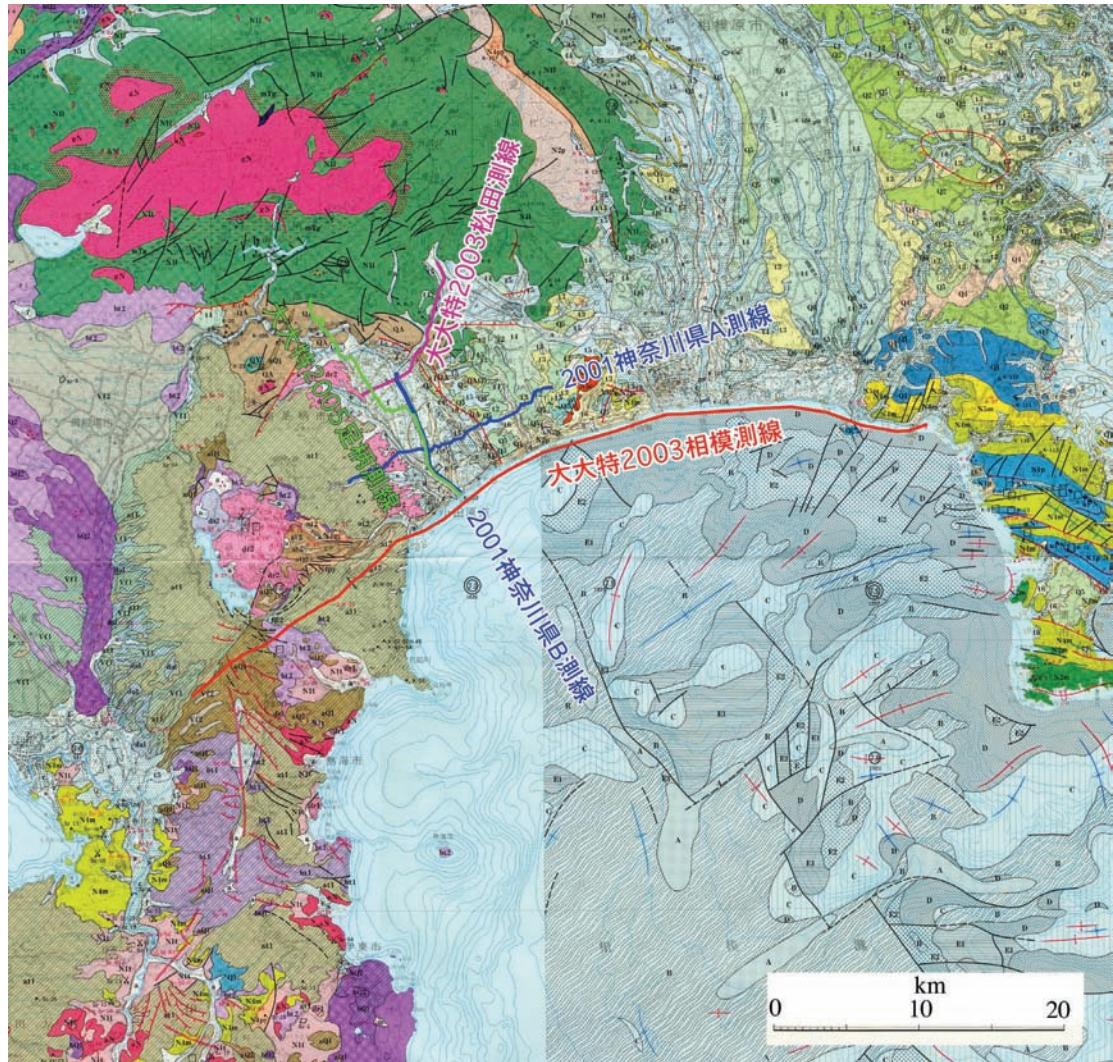


図 1 再解析対象測線の分布図。地質図は、関東土木地質図編纂委員会（1996）による。

b) 2001 神奈川県地下構造調査 B 測線

2001 神奈川県地下構造調査の B 測線は、神奈川県小田原市から酒匂川河川敷に沿い神奈川県松田市に至る、南南東-北北西方向の約 10km の測線である。受振器は 400 チャンネルの固定展開で、標準 3 台の大型バイブルータ発震によりデータを取得した。

c) 2003 大都市圏地殻構造調査 相模測線

大都市圏地殻構造調査の一環で実施された 2003 相模測線は、測線下における関東地震の震源であるフィリピン海プレート上面のメガスラストと国府津-松田断層の深部形状、とくに接合部のイメージングを目的とした。調査測線は、静岡県三島市北東部から小田原及び相模湾岸を経て、東京湾に面した横浜市金沢区に至る約 77km の区間であり、バイブルータ、ダイナマイト及びエアガン震源を組み合わせて屈折法、広角反射法及び反射法データ

が取得された（佐藤ほか, 2003; Sato et al., 2005）。探査レイアウトは、箱根区間におけるバイブルサイス車 4 台を震源とした反射法測線、相模湾岸における海岸線に受振器を設置し、海域のエアガンを震源とした反射法測線、鎌倉・横浜区間の独立型受振区間を含めて全受振器展開におけるエアガン多重発震 6 点とダイナマイト発震 1 点による屈折法・広角反射法測線となっている。

d) 2003 大都市圏地殻構造調査 関東山地東縁測線 松田測線

足柄平野において想定されている国府津～松田断層の確認及び深部地下構造を明らかにする目的で、東京大学地震研究所が平成 15 年に実施した大都市圏地殻構造調査「関東山地東縁測線」（佐藤ほか, 2004）のうち、「反射法松田バイブレータ測線」が統合解析の対象である。秦野市戸川より大井町、開成町、南足柄市竹松に至る 16km の測線である。丹沢層群の分布地域と神縄断層によって画された足柄層群の分布地域を経て足柄平野に至る。展開長 16.0km (224 チャンネル、固定展開) による反射法地震探査データが取得された。

e) 2005 小田原・山梨測線 足柄区間

大都市圏地殻構造調査の一環で実施された 2005 小田原・山梨測線は、調査地域下のフィリピン海プレートの形状、地殻上部の速度構造を明らかにすることを第一調査目的としたほか、測線が交差する活断層帯の深部形状を解明することを第二の目的としている（佐藤ほか、2006）。今回の統合解析の対象としたのは、小田原・山梨測線のうち稠密なバイブルータ発震が実施された足柄平野内の「足柄区間」である。足柄区間は小田原市酒匂川河口を起点とし、JR 御殿場線山北駅近傍に至る約 17km の測線である。足柄区間は有線テレメトリー・システム GDAPS-4 が使われており、固定展開の 342 チャンネル（展開長は 50m × 342 = 17.1km）でデータが取得されている。測線上を大型バイブルータが標準で 4 台、150m 間隔で発震作業を行った。標準の発震は 16 回スイープとしたが、40 回スイープの高エネルギー発震点を測線上で 9 点実施した。

3) 統一データ解析について

a) 統一データ解析フローチャートの構築及び解析パラメータの決定

統一解析フローチャート（図 2）及び解析パラメータ（表 1）は、2001 神奈川県地下構造調査 A 測線をテスト測線に設定し、そのテスト結果及び統合解析結果に基づき決定した。

強振幅の屈折波初動部分の抑制に用いられる初動ミュート処理は、浅層部の反射波を損傷してしまうために、適用していない。また、デコンボリューション処理のアルゴリズムには、ホワイトニングデコンボリューション、マイグレーション処理には、キルヒホップ型時間マイグレーションを適用している。

ノイズ抑制処理としては、ランダムノイズを抑制し、相対的に S/N 比を向上させる F-X 予測フィルタ処理を重合後に全ての測線で適用する事とした。

b) データ解析内容詳細

本データ統合解析では、(株) 地球科学総合研究所の電子計算機システム (IBM eServer p5 570) を用い、地震探査データ解析ソフトウェア 'SuperX' を使用した。

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について、SuperX (JGI Internal Format) フォーマットへ変換を行った。S/N 比が著しく低く、初動が判別できないトレースについては処理

対象から除外した。

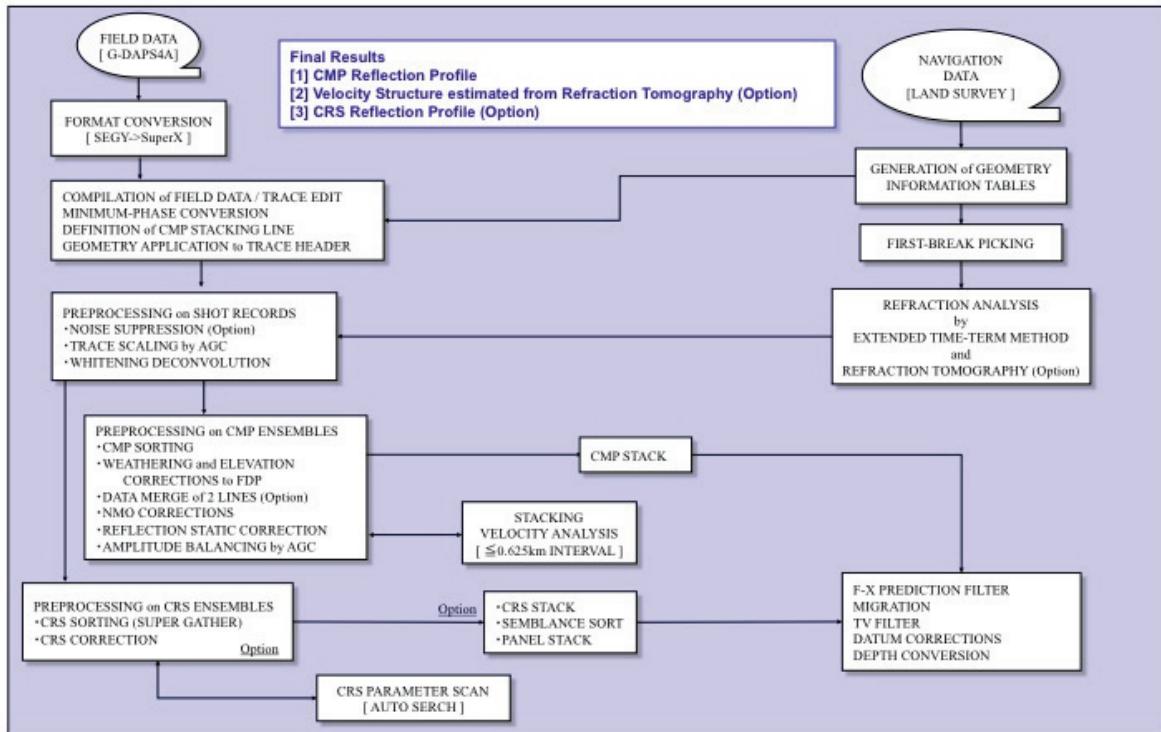


図2 統一データ解析フローチャート

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面は平均海面位置に設定した。

iii) 共通反射点情報セット (CMP Set)

測量データを基に、反射点(発震点と受振点の中点)の分布図を作成し、これを参照して、CMP 重合測線を設定した。 CMP 重合測線は下記の基準によって決定された。

CMP 間隔	: 12.5m or 25m
重合測線からの最大偏倚制限	: 制限無し
重合測線の決定基準	: 受振測線の屈曲度及び測線上主要 活断層走向に関する直交性

iv) 最小位相変換 (Minimum Phase Conversion)

バイブルレータ発震記録に関し、原記録としてゼロ位相コリレーション済のデータをフィールドテープに記録しているために、震源波形はゼロ位相であるとみなす事が出来る。ここでは後述するデコンボリューション処理で必要とされる条件を満たすために、ゼロ位相から最小位相波形に変換するオペレータを設計し、バイブルレータ震源記録に適用した。

v) 屈折波初動解析 (Refraction Analysis)

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。

$$T_{ij} - \sum_k s_{k,0} \Delta_{ijk} = a_i + b_j + \sum_k \delta s_k \Delta_{ijk} \quad (3-b-1)$$

ここで、 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

: Space-variant

屈折波インバージョンに用いるオフセット距離…各測線により異なる

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。

$$D_w = \frac{T_m}{\sqrt{1 - \left(\frac{V_w}{V_{sw}}\right)^2}} \cdot V_w \quad (3-b-2)$$

ここで、 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。

vi) 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。

[A] 標高補正 T_e : 観測面を一定基準面へ補正する。

$$T_e = - (H_e - H_b) / V_{sw} \quad (3-b-3)$$

[B] 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。

$$T_w = S_d * (-1/V_w + 1/V_{sw}) \quad (3-b-4)$$

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。

表層補正值は、前述 v) の屈折波初動解析による結果を用いて計算した。また、絶対値の大きい標高補正值の適用を回避するため、CMPに近接する受振点標高に対して受振点の移動平均によって長波長成分を抽出して CMP アンサンブル上の平均標高を定義し、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。

$$T_d = -2.0 * (H_f - H_b) / V_c \quad (3-b-5)$$

ここで、
 Hf : 浮動基準面(FDP)
 Vc : 基準面補正速度(2500m/sec)
 である。

vii) 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。統合解析対象測線では、それぞれバックグラウンドノイズレベルが高く、幾何減衰補償の適用によって振幅レベルを過度に増大させることが懸念されたため、下記の自動振幅調整のみを適用した。

Instantaneous AGC [ウィンドー長 600～1000 msec]

viii) 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。

$$F(t) = W(t) * R(t) + N(t) \quad (3-b-6)$$

ここで、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：バイブレータスウェーブ波形、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、以下のデコンボリューションを適用した。

アルゴリズム : Whitening Deconvolution

予測距離 : 4 msec

オペレータ長 : 240 msec

プリホワイトニングファクタ : 5.0%

なお、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ルータ震源のスウェーブ波形(探鉱機' A/D Decimation Filter(DCF)' 及び相互相関処理実施後のスウェーブ波形)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 $\Delta-\Sigma$ A/D 変換が採用されているため、ローカットフィルタ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。

ix) 共通反射点編集(Common Midpoint Sorting)

上述(ii)、(iii)のパラメータによって、共通反射点の編集を実施した。

x) 重合速度解析(Stacking Velocity Analysis)

定速度重合法による速度解析を実施した。また、残差静補正後に再速度解析がなされている。なお、今回、定速度重合断面それぞれに F-X 予測フィルタを適用することにより、

速度解析の改善を図った。また Long CVSK のパネルを作成し、速度構造を検討する材料とした。

xii) 残差静補正 (Residual Static Correction)

NMO 補正を行ったデータを入力とし、静補正で補正しきれない表層付近に起因する CMP 内の反射波到達時間のばらつきを、統計的手法により各発震点、受振点毎に算出し、残差静補正量としてこれを適用した。

なお、いくつかの測線では残差静補正適用後の記録で 2 回目の重合速度解析、2 回目の残差静補正を適用し、反射波の連續性を高めるようにした。

xiii) 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

xiv) 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。

xv) 共通反射点重合 (CMP Stack)

共通反射点アンサンブルに関して、水平重合処理を実施した。なお、重合前の振幅調整として、ウィンドウ長 100~300ms の Short AGC を適用した。

xvi) 帯域通過フィルタ (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、零位相帯域通過フィルタを採用した。

xvii) 周波数-空間領域予測フィルタ (F-X Prediction Filter)

周波数-空間領域において複素型予測フィルタを設計、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 F-X 予測フィルタ処理を実施した。パラメータは以下の通りである。

オペレータ長 : 7 CMPs

空間ウィンドウ長 : 70 CMPs

時間ウィンドウ長 : 1000 msec

xviii) 基準面補正 (Datum Corrections)

浮動基準面から基準面への、時間補正を適用した。

xix) キルヒhoff 型時間マイグレーション (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、時間マイグレーションを適用した。この手法は、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。

xx) 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。

表1 主要統一データ解析パラメータ一覧

統一処理内容	統一パラメータ
フォーマット変換及びデータ編集	SEG-Y形式をSuper-X形式に変換
トレースヘッダーへの測線情報の入力	
CMP間隔	12.5mもしくは25m(受振点間隔の1/2)
重合測線からの最大許容偏倚	制限無し
屈折初動解析	
屈折初動読み取り位相	正のピーク位置
屈折波インバージョン実施オフセット範囲	測線によって変更
表層基底速度を求める際の空間ブロック長	測線によって変更
最小位相変換	
震源波形	AUX CHに記録されたKlauder Wavelet
コヒーレントノイズ抑制処理(オプション)	
アルゴリズム	「周波数-空間領域フィルター」もしくは「Data Adaptive Time Variant Filter」
振幅補償	
幾何減衰補償	自動振幅調整(AGC)を適用
AGC適用ゲート長	600~1000msec
デコンボリューション	
アルゴリズム	Whitening Deconvolution
前提とするウェーブレット位相	最小位相
予測距離	4.0msec
零オフセット位置における設計ゲート	Non-TV型とし、ゲート長は測線によって変更
オペレータ長	240msec
ブリホワイトニングファクター	0.5%
浮動基準面に関する静補正	
浮動基準面の定義	長波長標高変化
補正内容	表層補正及び標高補正
速度解析	
解析内容	重合速度
解析点間隔	625m以下
残差静補正	
アルゴリズム	Linear Traveltime Inversion
時間シフトの最大許容値	8~12msec(断面の特性に応じて変更)
時間ウインドウ	断面の特性に応じて変更
CMP/CRS重合	
アルゴリズム	CMP Stack
NMOストレッチファクター	5.0
Outside Mute	マニュアルで設計
重合前振幅調整	300msec
重合オフセット距離範囲	制約無し
周波数-空間領域フィルター	
空間オペレータ長	7 CMPs
空間ウインドー長	70 CMPs
時間ウインドー長	1000msec
帯域通過フィルター	
オペレータ長	1000msec
周波数通過帯域	Time-variant
時間マイグレーション	
アルゴリズム	Kirchhoffマイグレーション
最大傾斜角度	75degree

4) 特殊データ解析手法

a) ノイズ抑制処理

i) エディット型局所的強振幅ノイズ抑制（図3）

本手法は、細分した時間ゲート毎に特定の周波数範囲での平均振幅を計算し、指定した閾値を超えるゲートに対して振幅のスケーリングを行うものである。時間的、空間的に局在ないし偏在し、信号とは異なる周波数帯域を有するノイズの抑制に用いる。

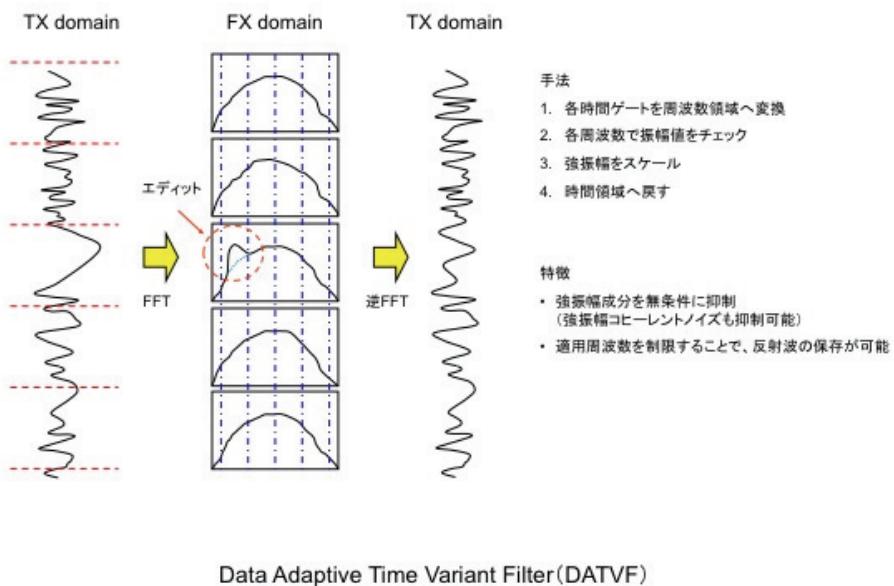


図3 エディット型局所的強振幅ノイズ抑制（DATVF）手法の概要

処理は、発震記録に対し、①各時間ゲートを周波数領域へ変換する、②各周波数で振幅値をチェックする、③強振幅をスケールする、④時間領域へ戻す、の手順で行われる。

特徴として、強振幅成分及びコヒーレントノイズを無条件に抑制することが出来、さらに、適用周波数を制限することにより反射波の保存が可能である事が挙げられる。

ii) 走時差準拠型コヒーレントノイズ抑制（図4）

本手法は、重合前の地震記録に含まれる傾斜成分を周波数一空間領域において最小二乗的に抽出し、原記録から取り除くものである。固定されたトレース間隔を仮定せず、実際のオフセット距離を参照するため、不規則な震源一受振点オフセット分布を取り扱う事が出来る。主に陸上記録や3次元記録などジオメトリの不規則性が顕著な記録に含まれる表面波成分の抑制などに用いられる。

処理は、NMO適用後発震記録に対し、①F-X領域へ変換する、②F-K領域のファンフィルタと同値のフィルタをF-X領域で設計する、③ノイズを最小化する様に各周波数でフィルタの重みを決定する、④ノイズ成分を除去または抽出する、⑤T-X領域へ変換する、⑥抽出した場合は入力データから減算する、の手順で行われる。

特徴として、空間方向のFFTが不要なために、不規則ジオメトリへの対応が可能である事が挙げられる。

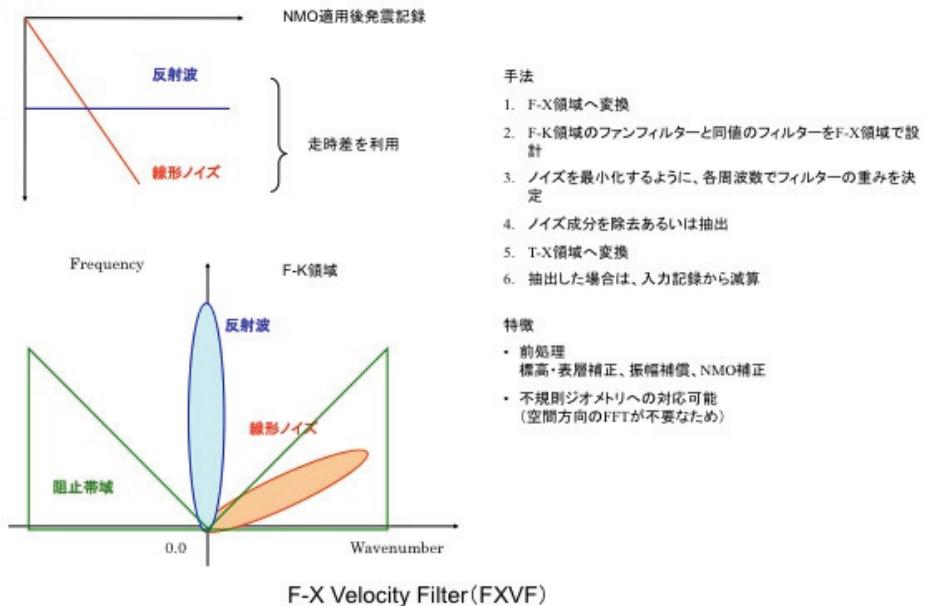


図 4 走時差準拠型コヒーレントノイズ抑制 (FXVF) 手法

iii) 予測トレース型ランダムノイズ抑制 (図 5)

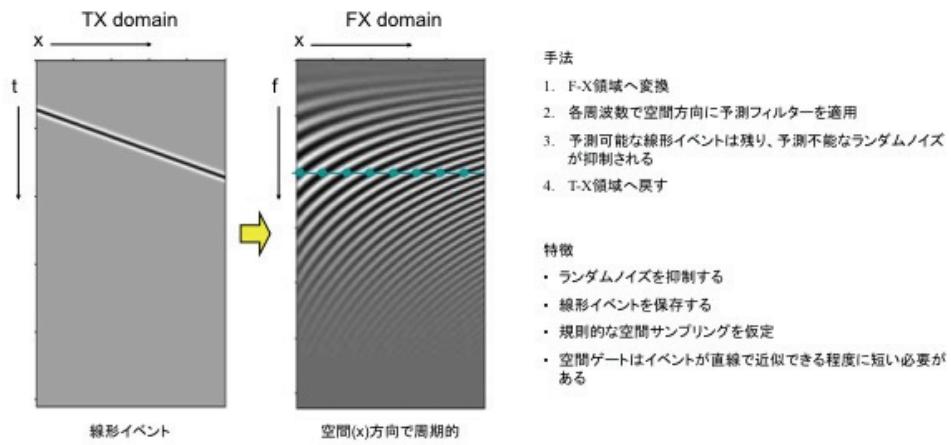
周波数・空間領域において複素 Wiener filter 理論に基づき設計した空間方向の予測フィルタを適用することにより、時間・空間領域の記録上に見られるランダムなノイズを抑制する。予測フィルタは両サイドオペレータとして設計されている。対象データとしては、重合記録、共通オフセットパネル、及びギャザーデータに対応しており、重合記録と共にオフセットパネルに関しては 3 次元処理も可能である。またギャザーデータに関しては、ギャザーごとにトレース数の異なる記録にも対応可能である。

処理は、重合後の記録に対し、①F-X 領域へ変換する、②各周波数で空間方向に予測フィルタを適用する、③予測可能な線形イベントは残り、予測不能なランダムノイズは抑制される、④T-X 領域に戻す、の手順で行われる。

特徴として、規則的な空間サンプリングを仮定しているために、線形イベントは保存され、ランダムイベントは抑制される事が挙げられる。

b) 初期モデルランダム化 ‘Turning-ray’ トモグラフィー解析

改良型 Time-Term 法あるいは’ GRM’ 法等では、各屈折面に関して速度の側方変化は考慮されるが鉛直勾配については対応出来ない。一般に、速度構造は鉛直勾配を伴うと共に屈折波は’ Turning-ray’ として存在するため、このトモグラフィー解析は、最も精度の高い速度構造の推定に寄与するものと考えられる。そのことにより反射法及び屈折法を用いた総合解析が実現する(図 6)。以下に、この屈折法解析の解析内容に関する記述する。



F-X Prediction Filter (FXPF)

図 5 予測トレース型ランダムノイズ抑制 (FXPF) 手法

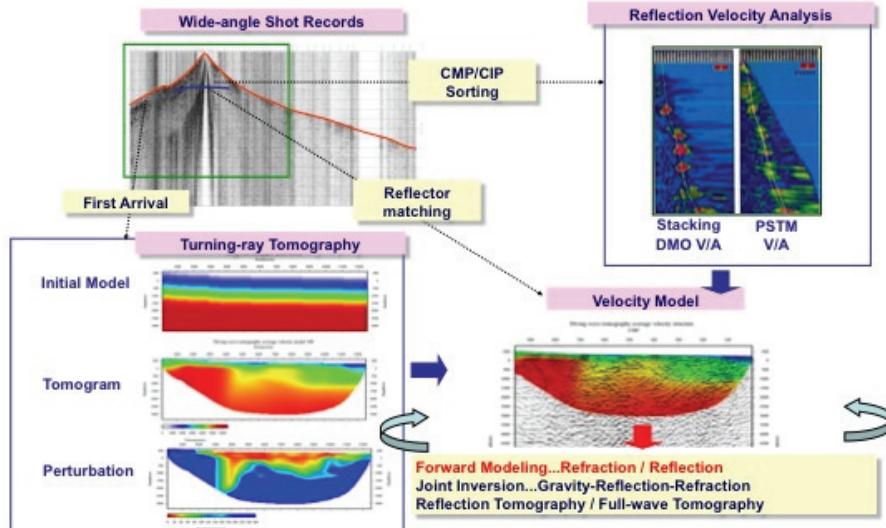


図 6 速度推定の高精度化－反射法及び屈折法を用いた統合解析

i) 屈折初動走時のピッキング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キングすることで解析に必要な要件は満たされるが、「Turning-ray」トモグラフィー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キング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キングを試みた。また、初期モデルとして緩やかな線形速度勾配を伴う水平成層構造を設定した。

ii) 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、前進過程においては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。一般に屈折波トモグラフィー法では 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ている。

iii) 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。

$$S^{k+1} = S^k \cdot \Delta S = S^k \cdot \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{w-R}{R} \right)^2 \cdot \frac{T_{S,i}}{T_{C,i}} \right] \Bigg/ \sum_{i=1}^N \left(\frac{w-R}{R} \right)^2 \quad (4-b-1)$$

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。また屈折波トモグラフィー解析では、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ている。

iv) 初期モデルランダム化によるトモグラフィー解析結果の信頼性評価

今回、屈折トモグラフィー解析の結果に対する信頼性の評価を与える方法として初期モデルランダム化によるモンテカルロ型信頼性評価解析を実施した(図 7、白石ほか, 2010)。この手法では、一定の条件化でランダムに生成した多数の初期モデルに対してトモグラフ

イー解析を実施し、すべての結果を平均化した速度分布およびその平均値からの偏倚を示す標準偏差分布が得られる。これらの情報は、トモグラフィー解析による最終速度構造モデル及びその確実度に関する指標として用いられる。この方法では計算に用いる初期モデルの数に応じて計算量が増大するものの、トモグラフィー解析結果に対する解の信頼度を提示することが可能である。本解析では、初期モデルとして 100 個の速度モデルを用意した。地表面における速度及び線型速度勾配を各々設定し一様乱数によって与え、線形速度勾配を持つ一次元速度構造モデルを生成した。

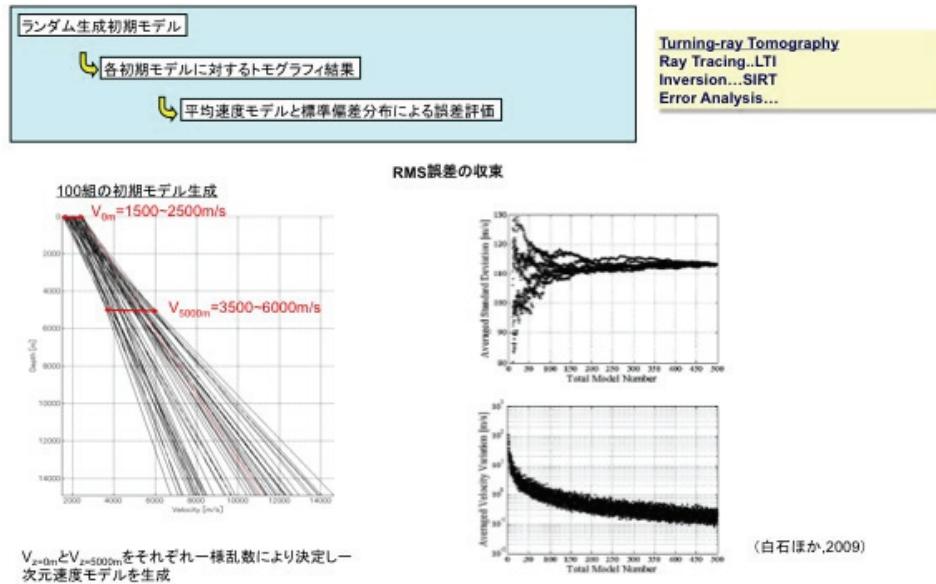


図 7 初期モデルランダム化による Turning-ray トモグラフィー解析

c) CRS 法

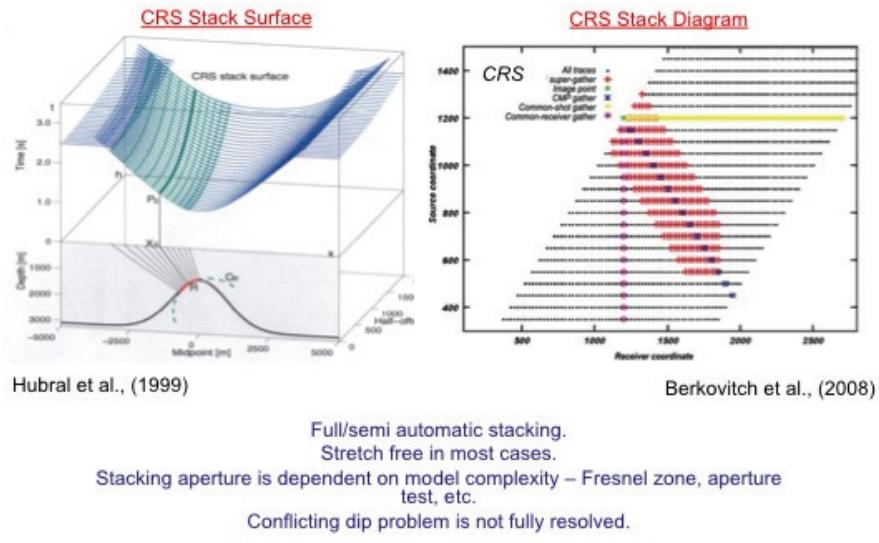
i) 理論概要

CRS 法 (Common reflection surface stack (Jager, 2001; Mann, 2007; Schleicher, 1993)) は CMP に属するトレースだけではなく、その近傍の CMP を併せた所謂 Super gather を重合処理することで従来の CMP 重合法と比べて飛躍的に高い重合数を得ることができる手法である (図 8)。反射点の異なるトレースの重合を空間解像度の劣化を抑えつつ適切に行うため、CRS 法におけるムーブアウト補正ではゼロオフセットセクション上の反射波走時の傾きと曲がりといった CMP 間の挙動が考慮される (図 9)。このため複雑な地下構造への適用性も高い。式 4-c-1 に直線状の 2 次元測線における CRS 法の走時近似式を示す。

$$T^2(x_m, h) = \left(T_0 + \frac{2 \sin \alpha}{v_0} (x_m - x_0) \right)^2 + \frac{2 T_0 \cos^2 \alpha}{v_0} (K_N (x_m - x_0)^2 + K_{NIP} h^2) \quad (4-c-1)$$

ここで $T_0(m_0, h_0)$ と $T(x_m, h)$ が CMP-ハーフオフセット座標におけるゼロオフセット反射波線とその近軸波線の往復走時、 $x_m - x_0$ は中点間の距離、 h がハーフオフセット、 v_0 は地表付近の媒質の速度である。 A 、 K_N 、 K_{NIP} は N 波 (Normal wave の略；反射面上の各点から同時に発する波で、観測面 (地表) に向けて進行する) と NIP 波 (Normal incident point wave の略；ゼロオフセット反射波線の反射点からの点震源波動である) と呼ぶ仮想

の波の到来方向と波面の形状に関するパラメータである。 α は地表への NIP 波の入射角を表し、 K_N と K_{NIP} はそれぞれ N 波と NIP 波の地表付近での曲率である(図 10)。



Common Reflection Surface Method

図 8 CRS 法の概要

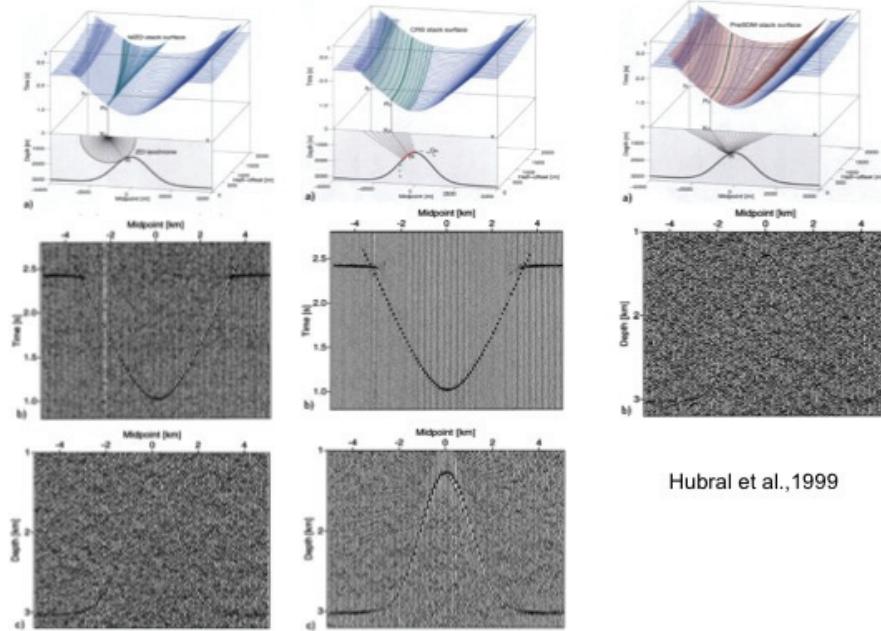


図 9 CRS 法の CMP 法との重合曲面と時間領域、深度領域における比較

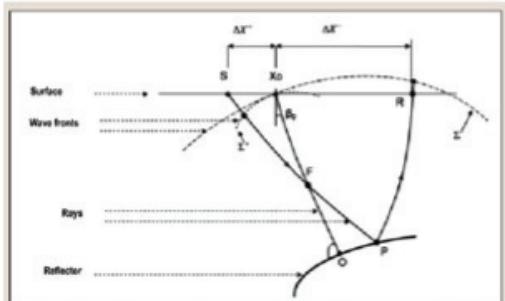


Figure 1. A schematic representation of the focusing principle.

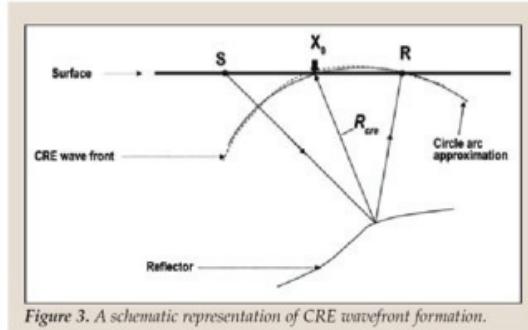


Figure 3. A schematic representation of CRE wavefront formation.

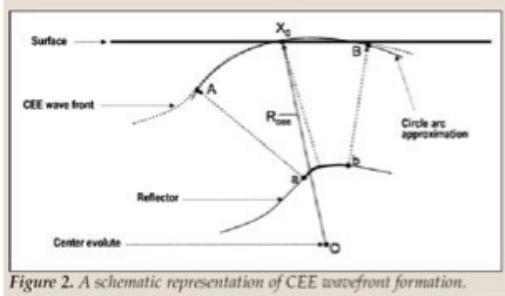


Figure 2. A schematic representation of CEE wavefront formation.

Barkovitch,2008

図 10 CRS 法におけるパラメータの定義

ii) CRS パラメータの探索

CRS パラメータは自動化されたコヒーレンス解析により全サンプルにおいて抽出される。標準的 CRS パラメータ解析は以下の 3 ステップで実施する。

Step 1. α の一次元探索

α の走査を行いセンブランス値を最大にするパラメータを探索する。ここで α の範囲と刻み幅はユーザーが指定し、 K_N は 0 を仮定、 K_{NIP} は重合速度から推定した値を使用する。

Step 2. α と K_{NIP} の二次元探索

α との K_{NIP} の二次元の走査によってセンブランス値を最大にするパラメータの組み合わせを探索する。ここで α は Step 1 で得られた初期値を中心に刻み幅 $\Delta \alpha = 1^\circ$ で 5 段階の走査を行う。 K_{NIP} は Step 1 で使用した K_{NIP} の初期値を中心に、パラメータ Fresnelh(このプログラムではフレネル半径の Fresnelh 倍のハーフオフセット h において ΔT がサンプリング間隔と等しくなるような刻み幅 ΔK_{NIP} が使用される) によってコントロールされる刻み幅 ΔK_{NIP} で 21 段階の走査を行う。 K_N は 0 を仮定する。

Step 3. α と K_N の二次元探索

α との K_N の二次元の走査によってセンブランス値を最大にするパラメータの組み合わせを探索する。ここで α は Step 2 で得られた値を中心に $\Delta \alpha = 0.5^\circ$ で 5 段階の走査を、 K_N は 0 を中心にパラメータ Fresnelm によってコントロールされる刻み幅 ΔK_N で

21段階のスキャンを行う。 K_{NIP} はStep 2で得られた値を使用する。

iii) コンフリクティング・ディップへの対応 (MDRS 法)

複雑な地質構造を有する地域ではゼロオフセット断面上で反射波が交差する状況（コンフリクトィング・ディップ）が予想される。このような状況に対応するために、(株) 地球科学総合研究所が開発した Multi-Dip Reflection Surface (MDRS) 法を適用している。MDRS 解析では、 α の範囲を複数に分割（通常は 6 分割）しそれぞれ別個に CRS 解析を実施する。図 11 に MDRS 法の概念図を示す。こうして得られた領域分割 CRS 重合断面をコピーレンズ値の高いものから数枚加算することで波の重なり合いが表現された CRS 重合記録を得ている。

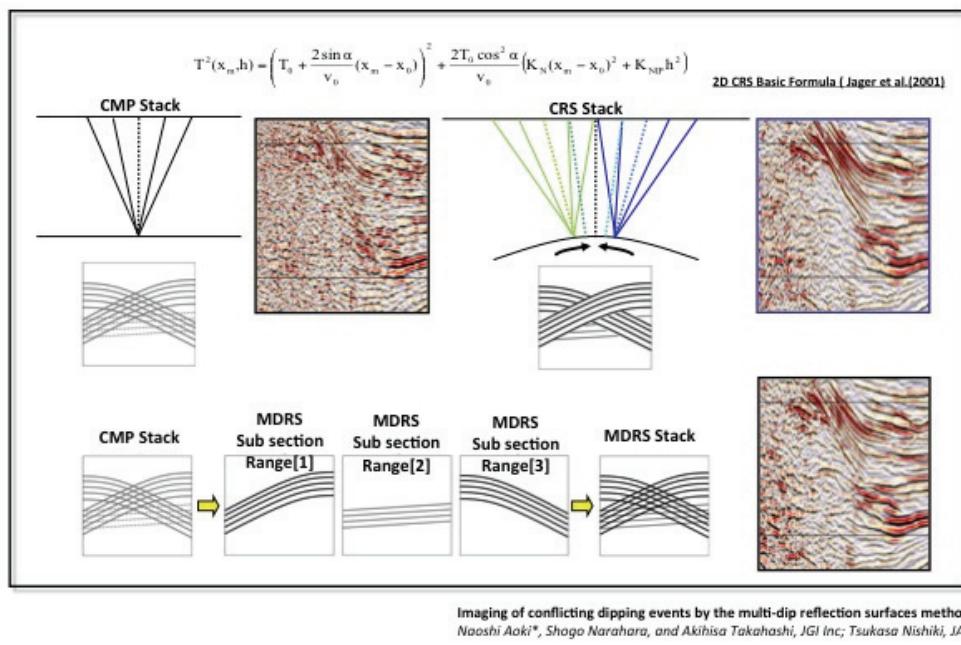


図 11 MDRS 法の概要

iv) CRS による速度構造の推定

CRS 法では、NMO 速度や RMS 速度が直接得られるわけではないが、CMP ギャザーに対して、ゼロオフセット走時式(3-1-1)式は

$$T^2(h) = T_0^2 + 2T_0 \frac{K_{NIP} \cos^2 \alpha}{v_0} h^2$$

(4-c-2)

となり、ゼロオフセット反射波の到達角 α と NIP 波面の曲率 K_{NIP} から NMO 速度プロファイルが得られる。

$$v_{NMO}^2 = \frac{2v_0}{T_0 K_{NIP} \cos^2 \alpha} \quad (4-c-3)$$

さらに、 $V_{\text{NMO}} \doteq V_{\text{RMS}} / \cos \alpha$ と考えれば、その半径 R_{NIP} を用いると

$$v_{RMS} = \sqrt{\frac{2v_0}{T_0 K_{NIP}}} = \sqrt{\frac{2v_0 R_{NIP}}{T_0}} \quad (4-c-4)$$

と表すことができ、CRS のパラメータから RMS 速度プロファイルを得る事が出来る。

5) 統合解析結果－2001 神奈川県地下構造調査 A 測線

a) 取得データについて

本測線の震源には、大型バイブレータ及びミニバイブルーテタが用いられている。すなわち、測線中央部の国府津－松田断層推定位置西縁では、ミニバイブルーテタによる高密度発震が設定され、その両側に大型バイブルーテタ標準3台による深部対象の発震区間が設定されている。データ取得仕様は大きく異なっており、データ解析の際には両者の統合には特に注意を要する。

本測線は、国府津-松田断層帯を東西に横断する測線（図12、13）であるが、当該地点周辺は交通量が多いためにノイズレベルが大きい。ノイズ抑制等の適切な処理が必要である。大型バイブルーテタによる通常発震記録をみてみると、表層基底層を伝播した初動屈折波（直線的な波の並び）及び、それに続く反射波（双曲線的な波の並び）等が確認できる。初動屈折波の見かけの速度は約2km/sであるが、小田原市久野地区では1km/s未満の低速度層が認められる。一部の記録で垂直往復走時1.3秒付近に明瞭ではないものの基盤からの反射が確認できる。この基盤深度以浅には、複数の連続する反射波が確認できる。これらは、第三紀または第四紀の堆積層に相当すると考えられる。3.0秒以降は、連続する強い反射面は確認できない。なお、ノイズレベルの大きい場所は、足柄平野内の交通量の多い道路上の区間であり、ノイズレベルの小さい場所は、A測線の両端部、及び、B測線の北部である。両者における受振点では20dB以上の差がある。この違いが最終断面図の品質にも影響し、特にB測線北部におけるS/Nは他と比べて高く、品質が良くなっている。

一方、高分解能発振区間約3kmでは、ミニバイブルーテタ1台、4スタックを用いて合計199点の発振を行なった。二つの南北の主要道路を結ぶ県道であるため、交通量が多くノイズレベルが高く、また、道幅がせまいため渋滞しやすく大型車両が来るとバイブルーテタを退避させる必要があった。おおよそオフセット300m程度は初動が読み、0.1、0.2秒程度、および場所によるが0.4秒程度に反射が認められる。

b) 既存解析と統合解析の結果

統合解析は、基本的には、3)で示した統一処理フロー及びパラメータに基づき行われた。なお先に述べた様に、今回の統合解析フローチャート及びそのパラメータは、本測線をテスト測線と位置づけて予め各種処理テストを行なった上で決定されている。振幅調整テスト及びデコンボリューションテストは、100%記録を作成して比較、検討された。

なお、2001 神奈川県地下構造調査 A 測線の解析は統一データ解析パラメータに対して次の点が異なり、その他にも各特殊処理がなされている。

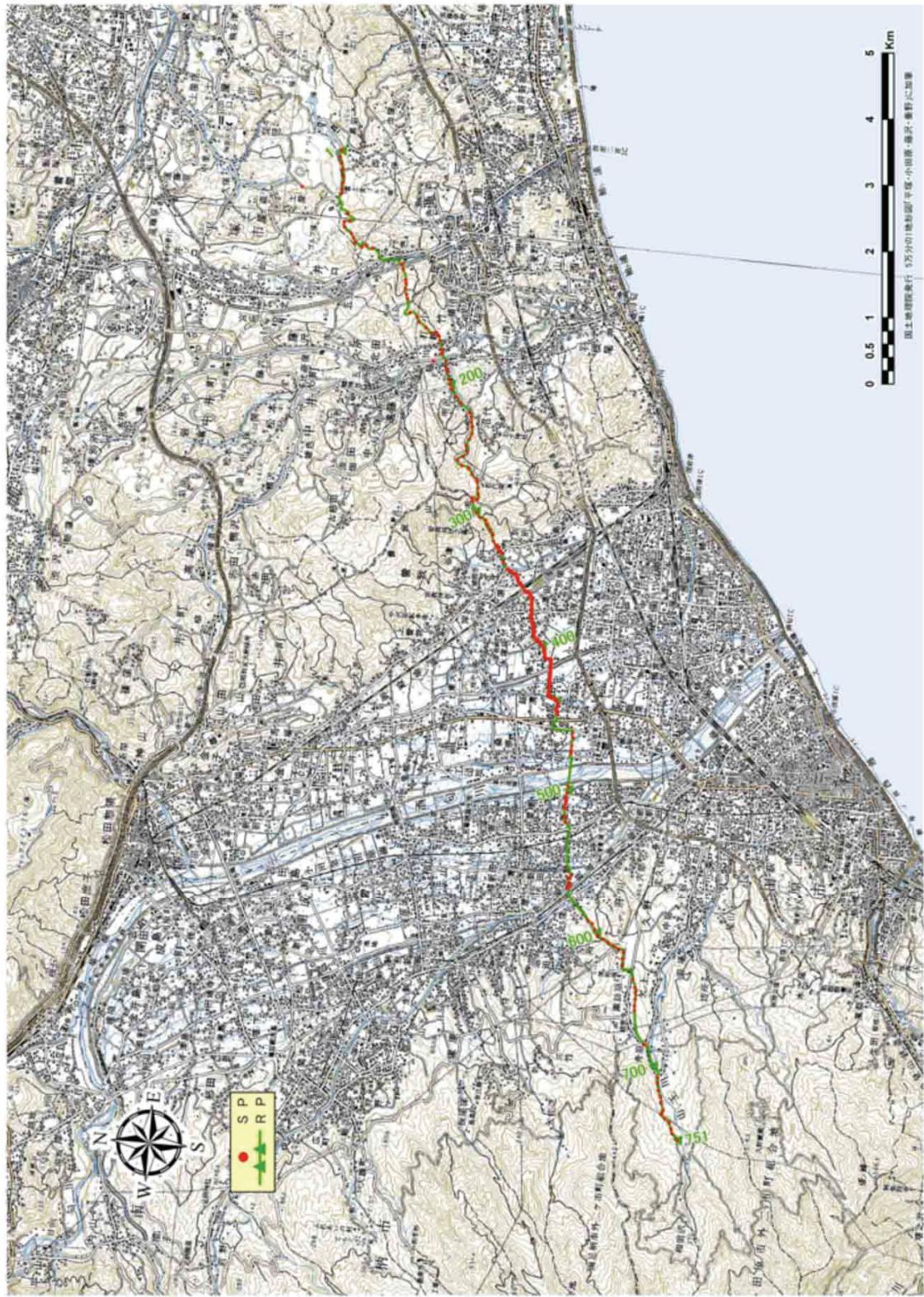


図 12 2001 神奈川県地下構造調査(Line-A) 調査測線位置図 (地形図+RP +SP)

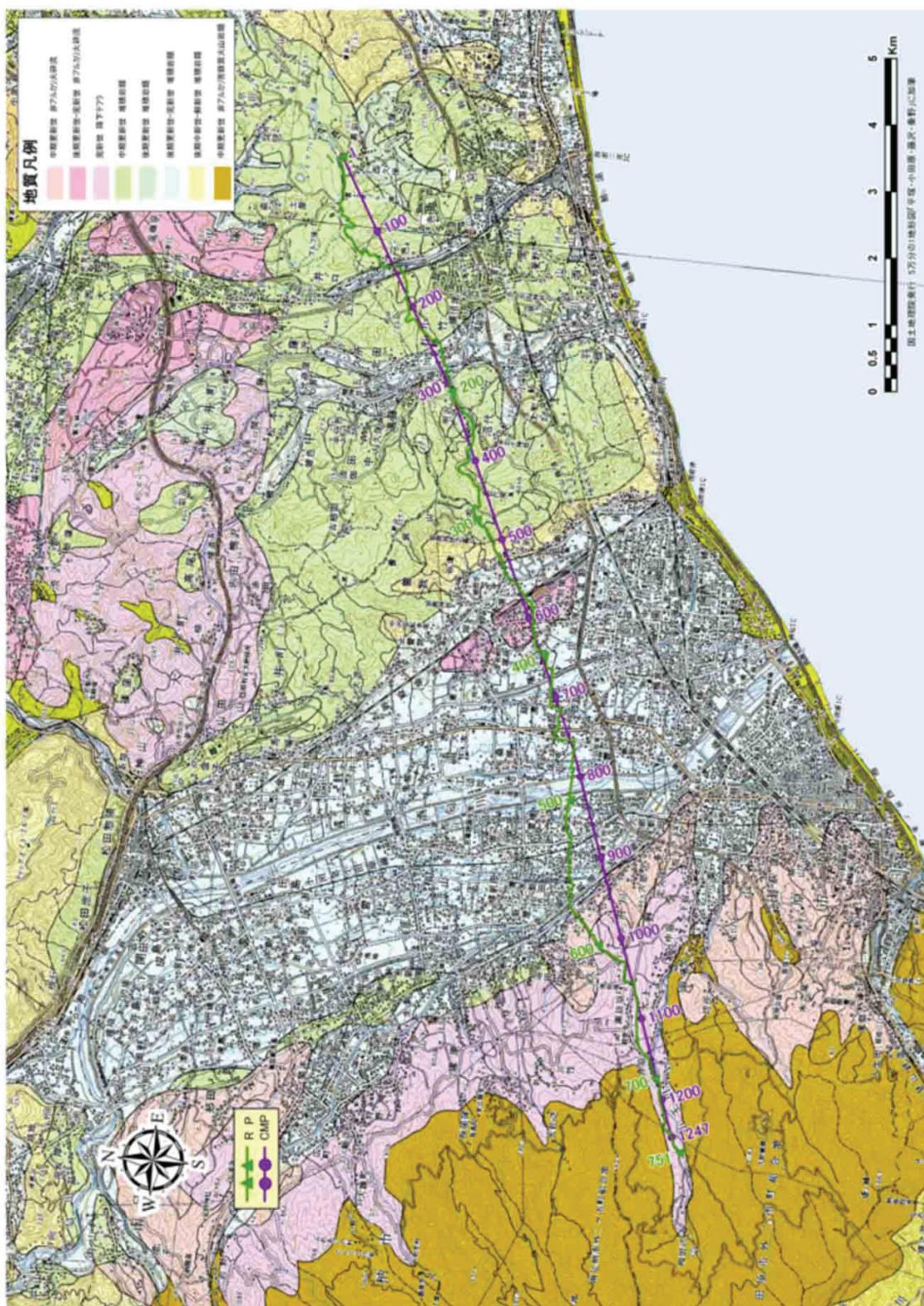


図 13 周辺地質図及び CMP 重合測線（シームレス地質図+RP + CMP 重合測線）

i) コヒーレントノイズ抑制処理

足柄平野を充填する新期堆積層は最下部を除いて成層構造をなし、下位の箱根火山古期外輪山期溶岩は不均質な小セグメントの波群として認識出来る。こうした堆積盆下部の不均質構造の明確化は重要な課題であり、今回、走時差準拠型コヒーレントノイズ抑制手法として F-X 領域速度フィルタ (FXVF)、エディット型強振幅ノイズ抑制手法として Data-Adaptive Time Variant Filter (DATVF)、及び、予測トレース型ランダムノイズ抑制手法として F-X Prediction Filter (FXPF) の各種ノイズ抑制処理を複合化させて適用し、データ品質及び分解能改善を図った。

FXVF に関しては、傾斜ノイズ成分が除去され、その結果深部反射の明瞭化に効果が認められたが、浅部反射波を多少損傷させる傾向があった。そのため、CMP 重合断面及び後述する MDRS 重合断面には適用しなかった。 CMP 重合断面比較では大差は認められなかつたが、深部構造及び断層近傍における不均質構造の把握を目的とした、後述する MDRS 法において FXPF と共に適用した。

ii) 重合速度解析の見直し

既存解析では速度解析の間隔が 625m で速度解析が実施されており、神縄・国府津-松田断層帯の詳細な形状把握を目的とした場合、速度解析間隔が大きいと思われる。そこで、本統合解析では間隔を 300m として速度解析を実施した。なお、今回、定速度重合断面 (1500–5000m/s、50 枚) それぞれに F-X 予測フィルタを適用することにより、速度解析における改善を図った。

iii) 初期モデルランダム化による 'Turning-ray' トモグラフィー解析

初期モデルランダム化によるモンテカルロ型信頼性評価解析を伴う 'Turning-ray' トモグラフィー解析を適用し、特に断層周辺における速度不均質構造の抽出を試みた。さらに、この速度構造を基に、各測線の速度構造モデルの検証を行った。

iv) CRS/MDRS 法による統合解析

CRS 及びマルチディップ対応の MDRS 法を適用し、断層近傍における不均質構造及び断層形状の抽出を試みた。

既存の処理 (図 14) では、重合後に時間-空間領域の速度フィルタが適用されている。これは重合後の断面においてノイズと思われる斜交イベントを抑制するフィルタである。しかし、今回、本来有意義であるイベントまでも抑制してしまう事を避けるために、重合後の速度フィルタ等のノイズ抑制処理は行なわない事とした。

統合解析の結果得られた CMP 重合後時間マイグレーション断面図 (FD マイグレーション、図 15)、CMP 重合後マイグレーション深度断面図 (図 16) を示す。

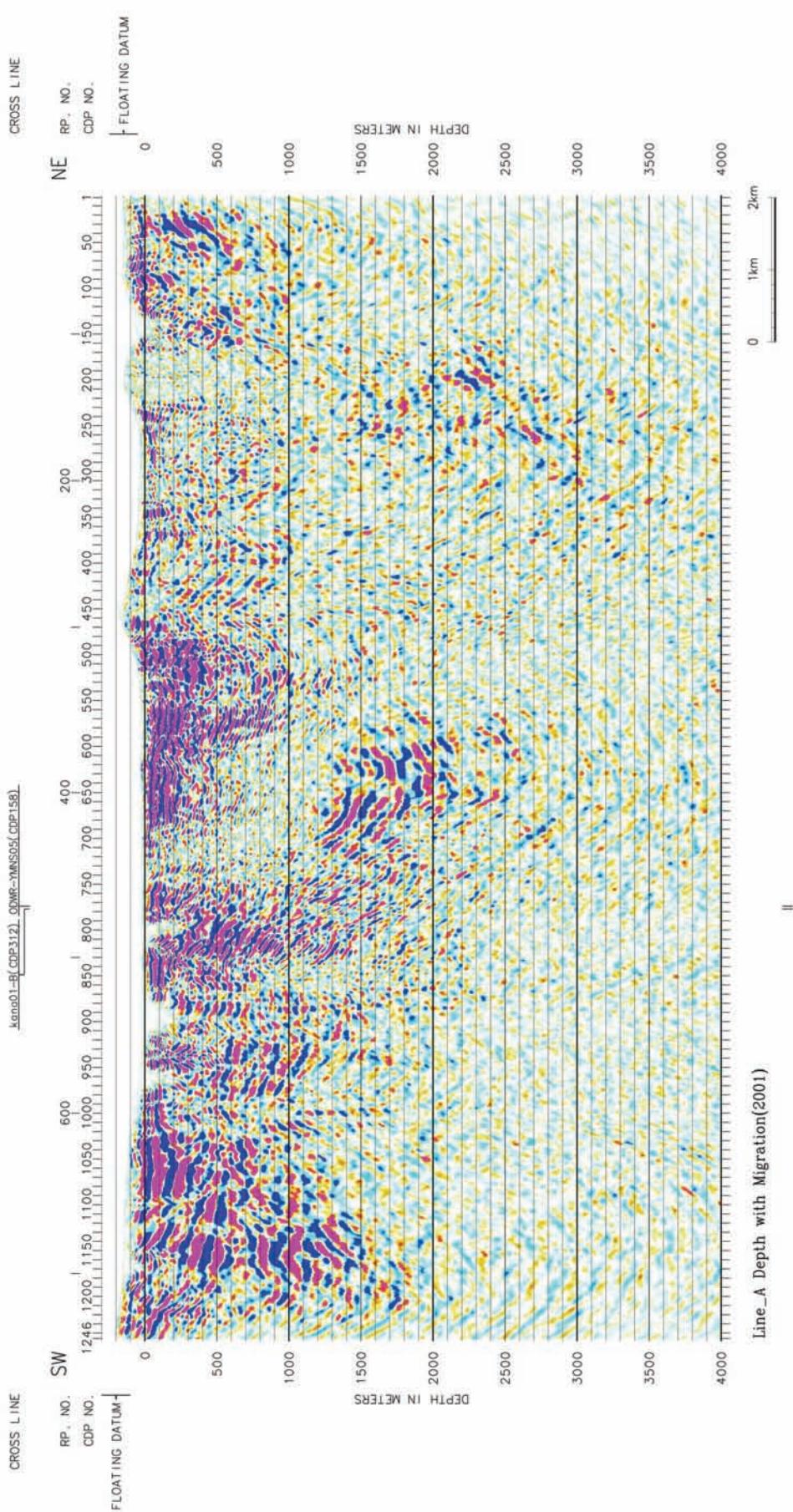


図 14 既存解析結果(CMP 重合処理結果)深度断面図(縦横比 2:1)

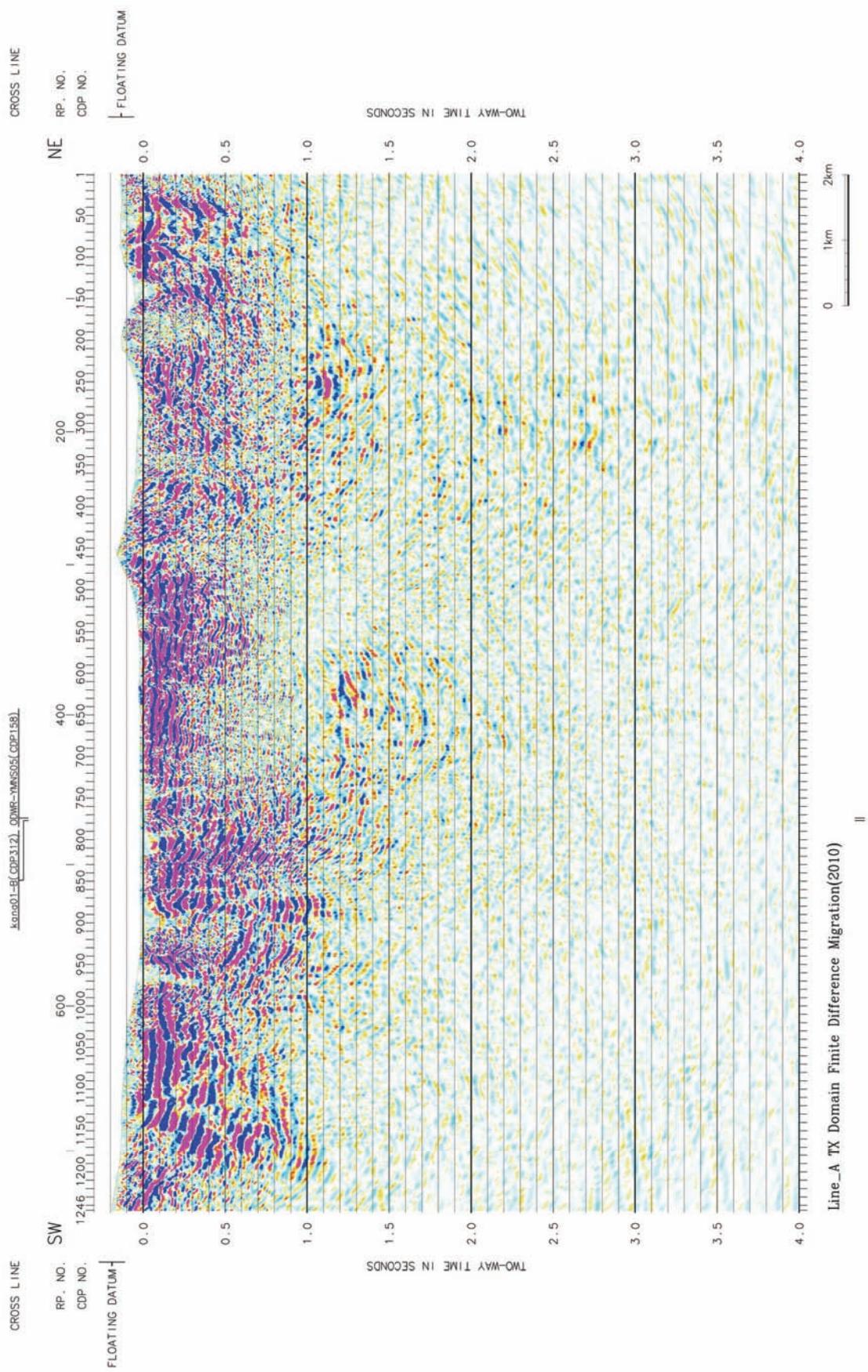


図 15 統合解析結果(CMP 重合処理結果) マイグレーション時間断面。

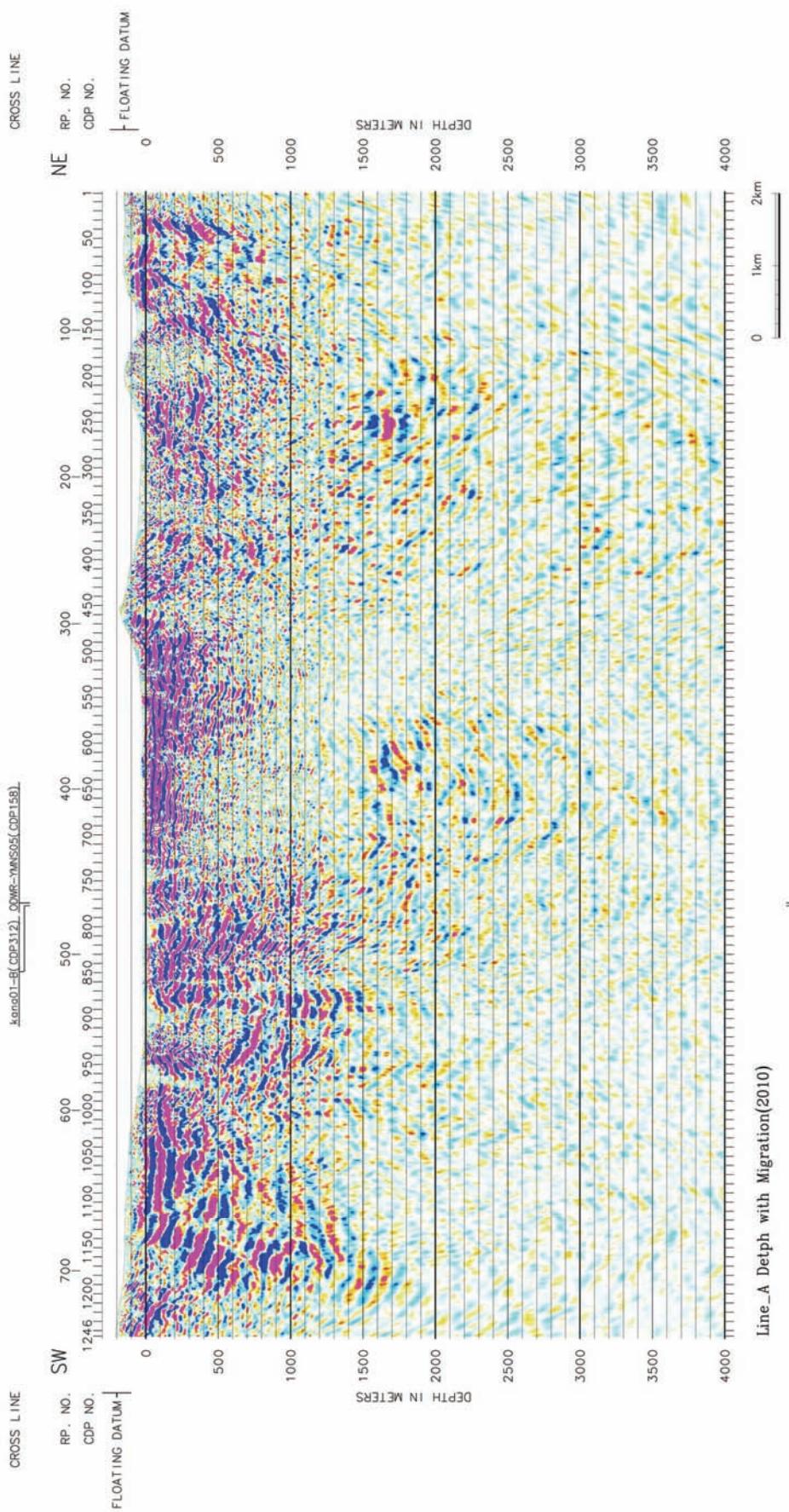


図 16 統合解析結果(CMP 重合処理結果) 深度断面図(FDMG)(縦横比 2:1)

c) CRS/MDRS 法による解析結果

上述した統合処理を実施したデータを入力として、MDRS 法による高精度イメージング処理を実施した。

MDRS 法解析に用いた主要なパラメータを以下に示す。

Super Gather 範囲	: ±20CDP
V_o	: 1500m/s
α 値範囲	: -45degrees～45degrees
α 値刻み幅	: 1degrees
Fresnelh	: 15
Fresnelm	: 2°. 0
CMP 方向 Outside Mute Points(x, t)	: (75, 25) (150, 100) (340, 1000) (480, 2000) (1020, 3500) (1440, 5000)

ハーフオフセット方向 Outside Mute Points(x, t): (50, 25) (1000, 500) (1875, 1000) (3000, 1500) (10000, 30000)

MDRS 法解析の結果得られた速度プロファイルを図 17 に示す。また、センブランスマトリビュートを図 18 に、MDRS 重合処理断面図を図 19 に示す。MDRS 重合後マイグレーション時間（図 20）、深度断面図を図 21 にそれぞれ示す。

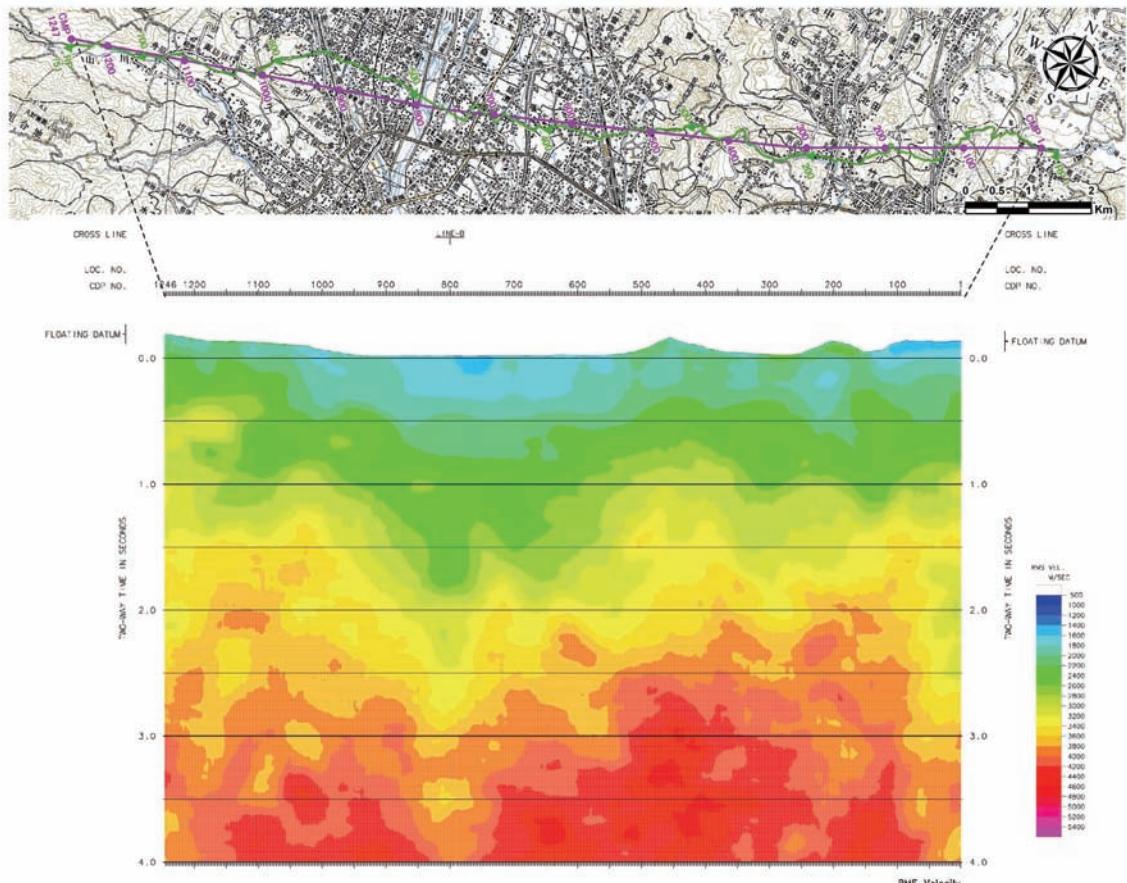


図 17 統合解析結果(MDRS 重合処理結果) [1]速度プロファイル

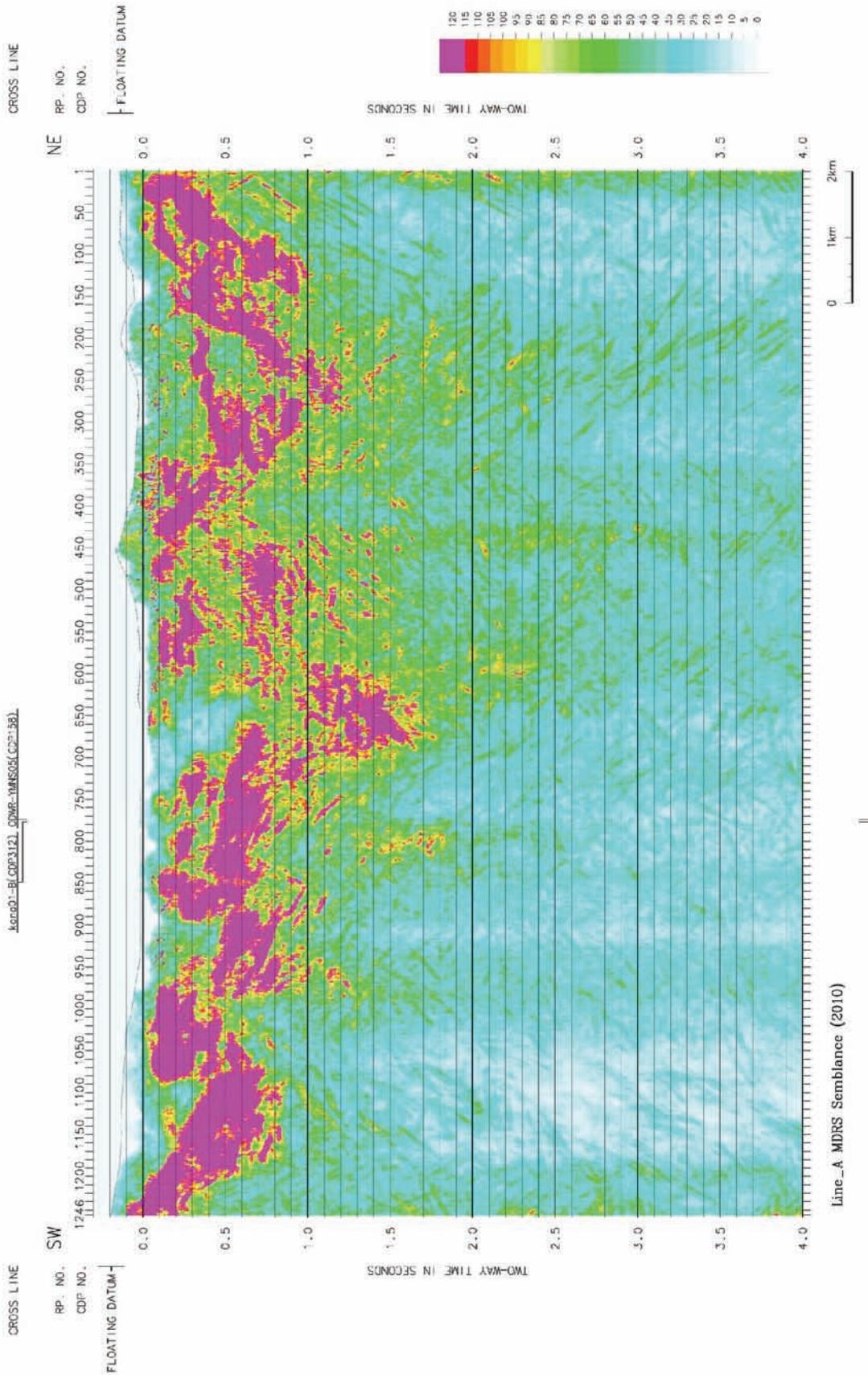


図 18 統合解析結果(MDRS 重合処理結果) センプランスアトリビュート

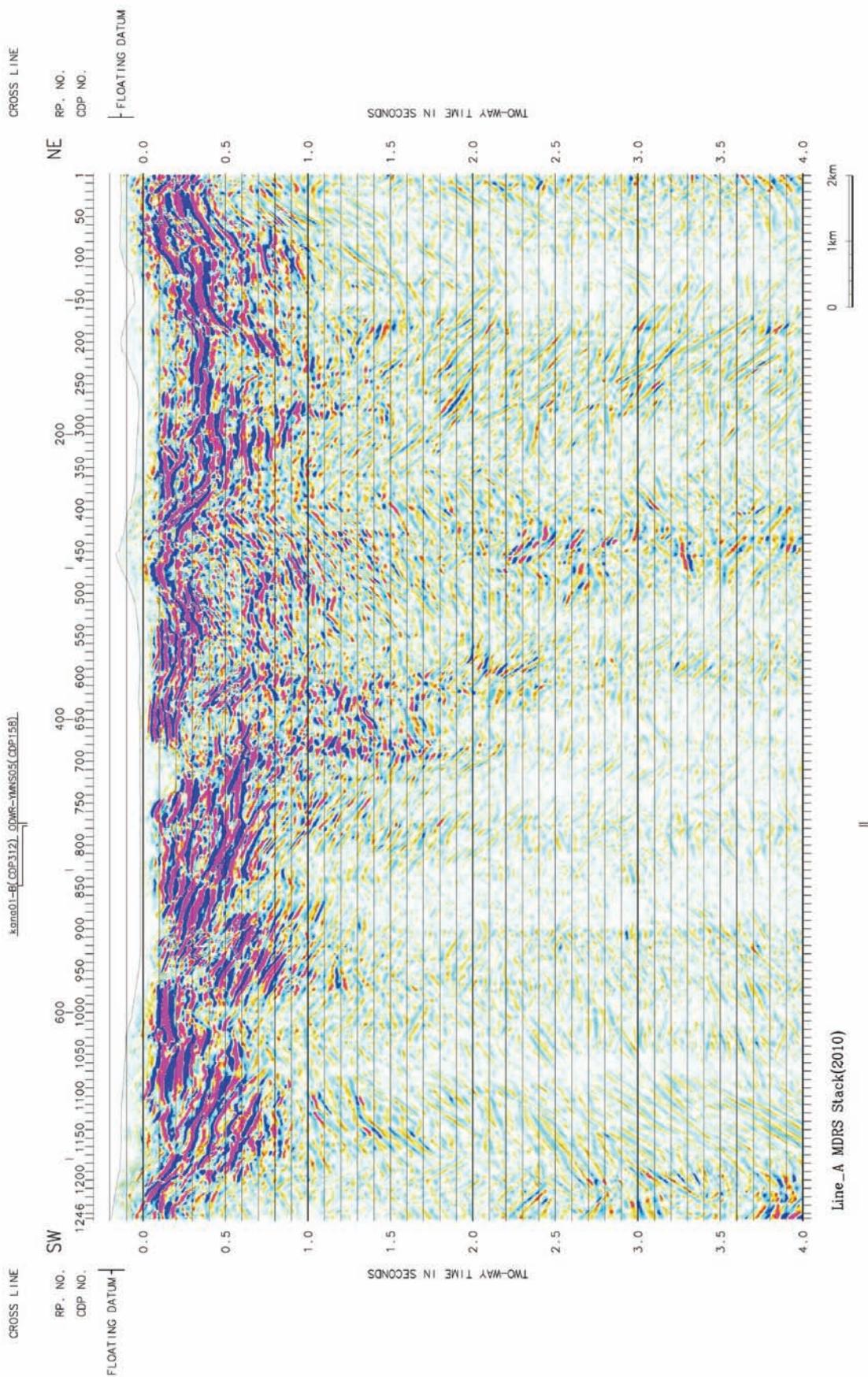


図 19 統合解析結果(MDRS 重合処理結果) 重合処理断面図

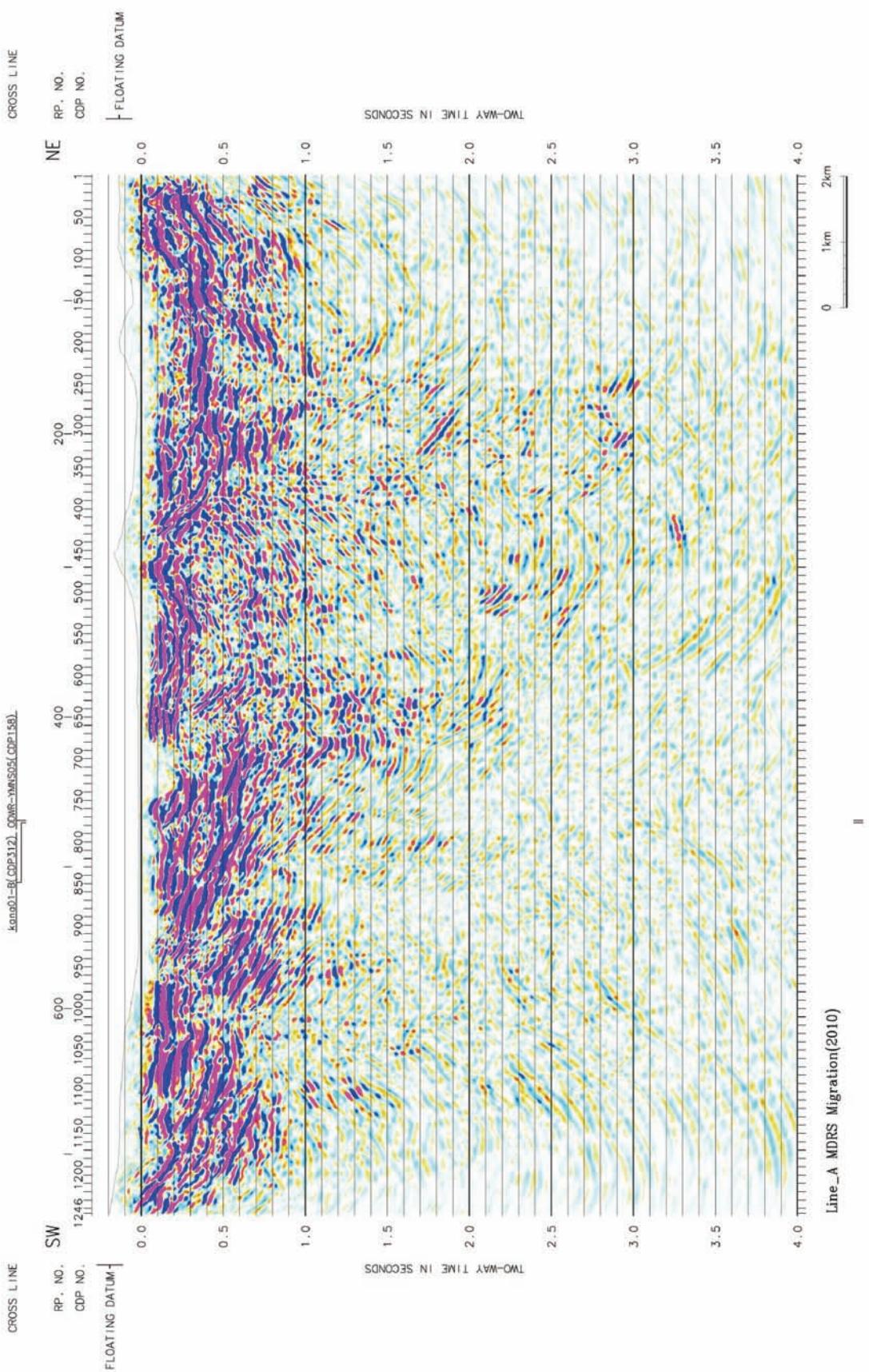


図 20 統合解析結果(MDRS 重合処理結果) マイグレーション処理時間断面図

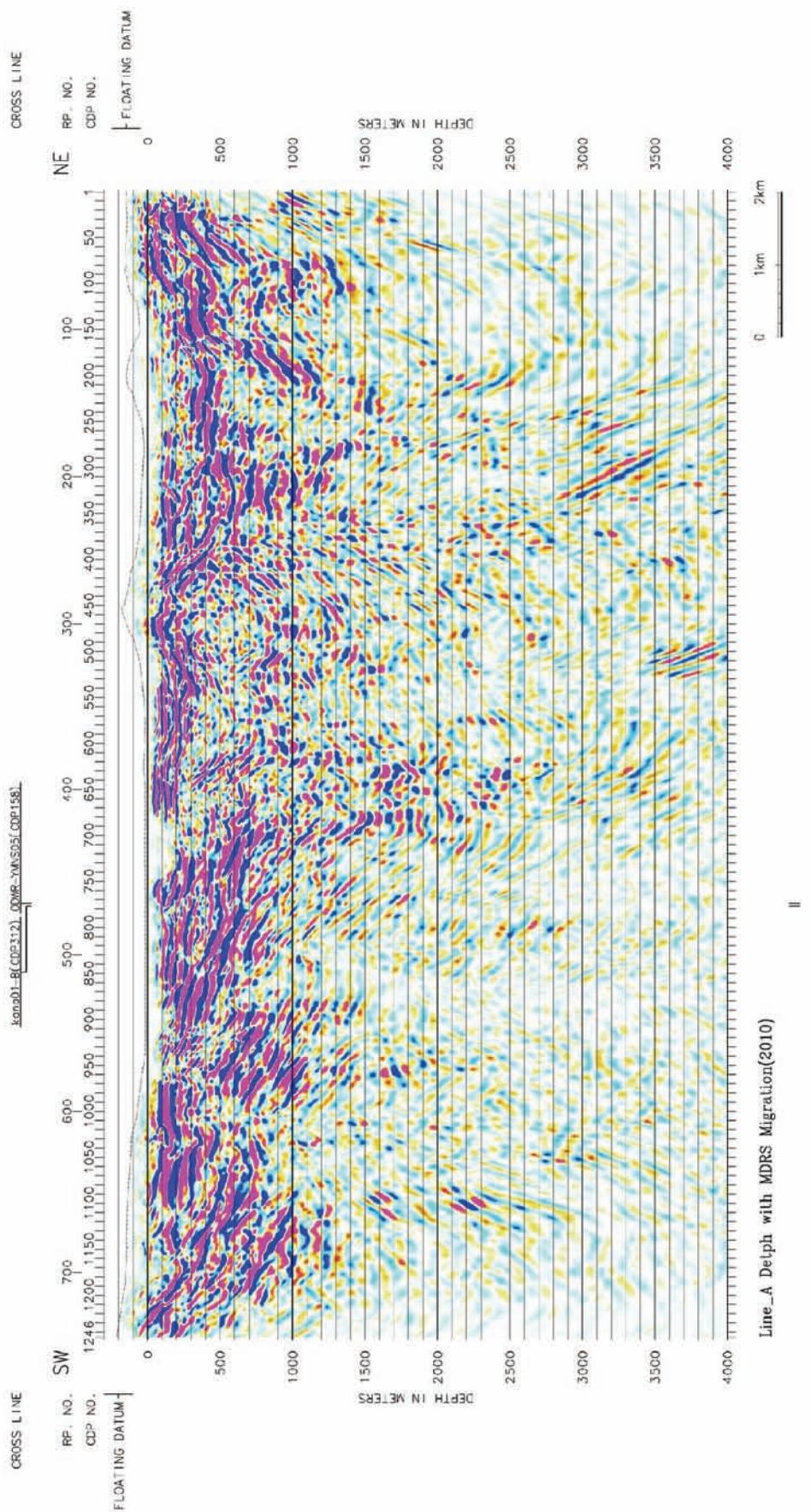


図 21 統合解析結果(MDRS 重合処理結果) マイグレーション処理深度断面図

d) 初期ランダム化による屈折トモグラフィー解析結果

詳細な速度構造を得るために、屈折トモグラフィー解析を実施した。以下に、今回の屈折トモグラフィー解析で使用したパラメータを示す。

格子間隔	: 水平方向 100m 鉛直方向 100m
格子数	: 水平方向 150cells 鉛直方向 20cells
格子上における走時評価間隔	: 水平方向 5.0 m 鉛直方向 5.0 m
通過する格子点からの反復修正有効範囲	: 400m
速度分布の反復修正回数	: 15 回
速度分布の反復修正時に於ける修正係数の許容範囲	: ±30.0%
SIRT 法によるインバージョンに使用した入力オフセット距離範囲	: 指定なし
ランダム化初期モデル範囲	: 深度 1000m: 2000-3500m/s

図 22 にランダム化した 100 個の初期モデルに対する解析結果としての推定速度構造、波線密度及び標準偏差表示の各結果を示す。図 23 に深度断面とトモグラフィー解析断面図との重ね合わせ図を示す。

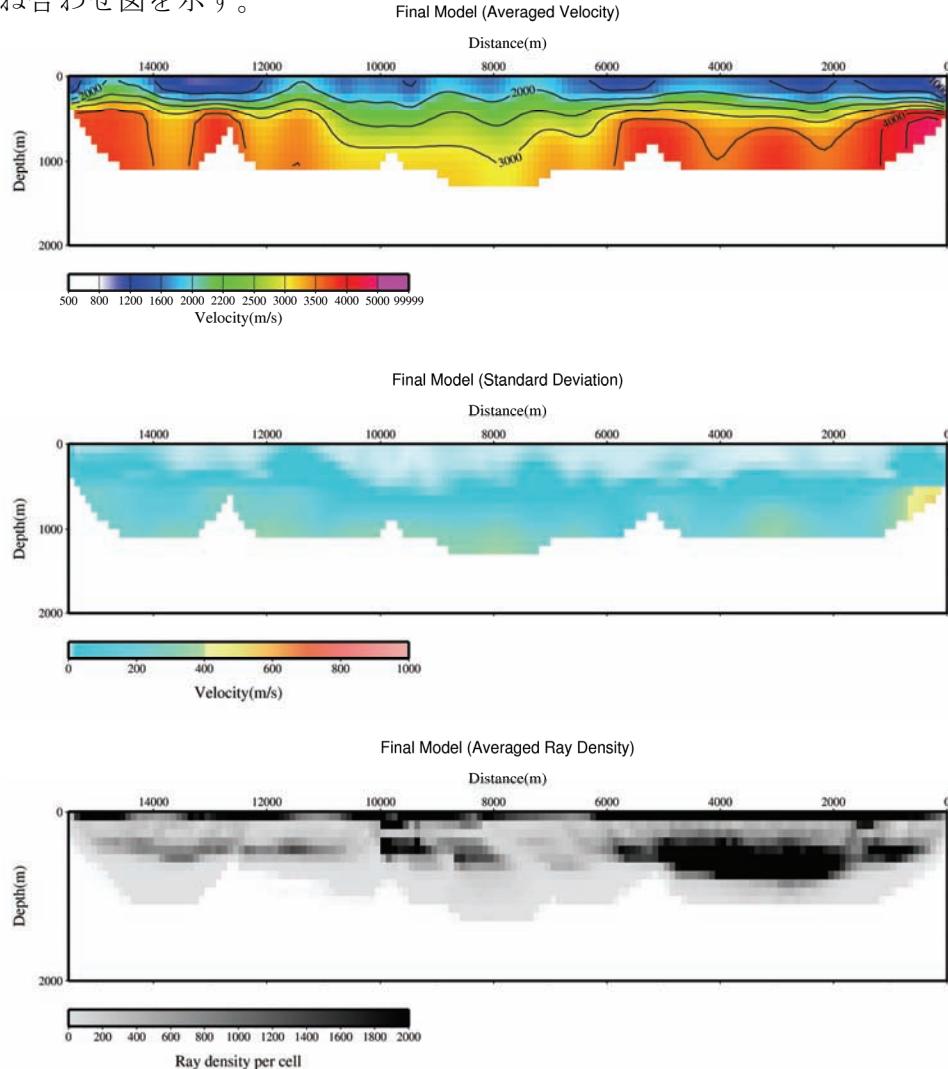


図 23 最終解析結果(破線密度、推定速度構造及び誤差評価表示結果)

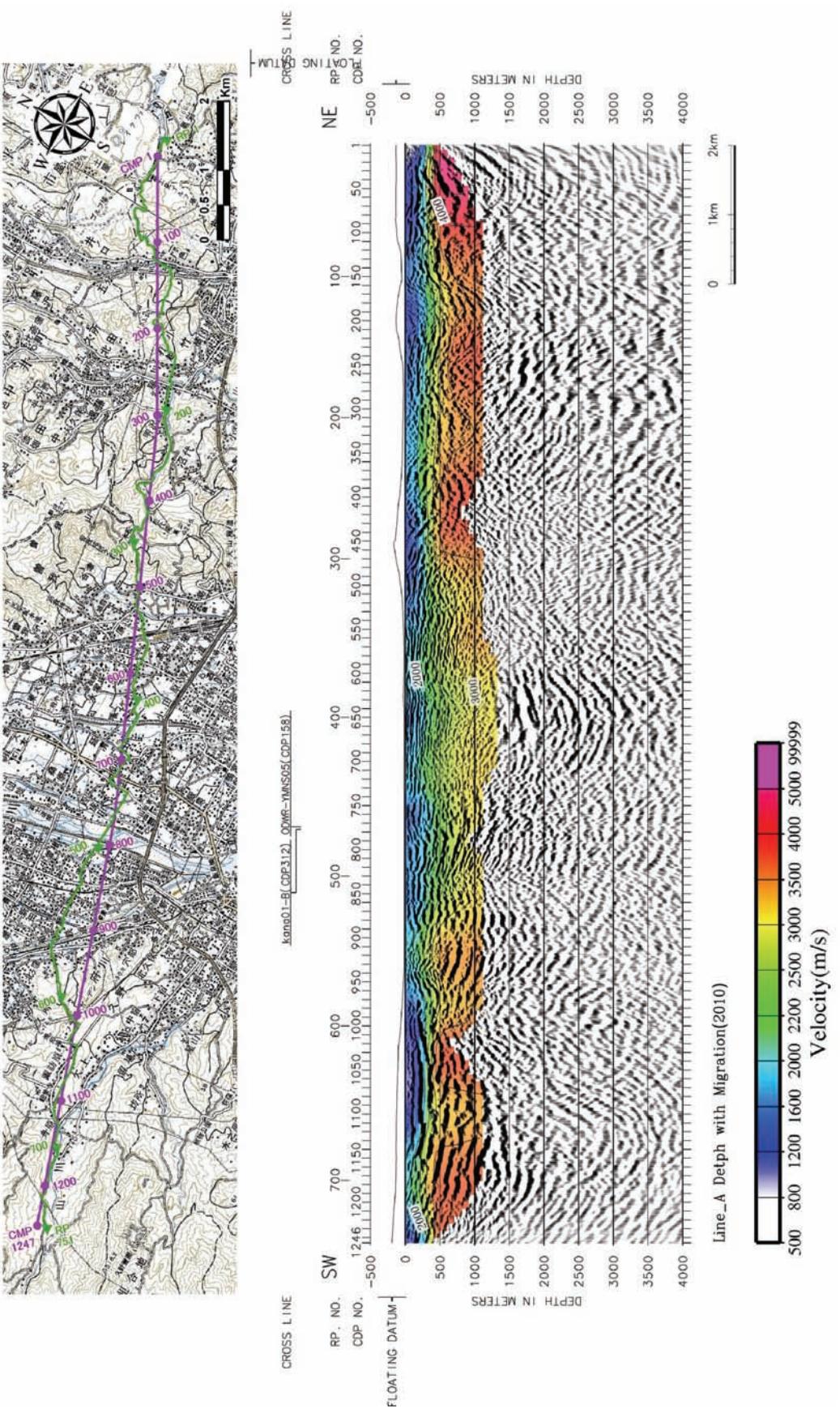


図 24 深度断面図とトモグラフィー解析断面図との重ね合わせ図

6) 統合解析結果－2001 神奈川県地下構造調査 B 測線

a) 取得データ

B 測線は、A 測線とはほぼ直交し、2001 神奈川県地下構造調査の一環として、A 測線と同時期にデータ取得が実施された（神奈川県、2004）。図 25 に受振点、発震点分布及び CMP 重合測線を加筆した測線位置図、図 26 には CMP 重合測線を加筆した地質図を示す。

b) 既存解析と統合解析の結果

2001 神奈川県地下構造調査 A 測線と同様に、既存の処理では重合後に時間-空間領域の速度フィルタが適用されている。これは重合後の断面においてノイズと思われる斜交イベントを抑制するフィルタである。今回、本来有意義であるイベントまでも抑制してしまう事を避けるために、重合後の速度フィルタ等のノイズ抑制処理は行っていない。

B 測線の統合解析は統一データ解析パラメータに対して次の点が異なる。

i) 各種ノイズ抑制処理

本測線ではノイズ抑制として、以下の 3 つの手法を複合化させて行なった。

①Data-Adaptive Time Variant Filter (DATVF)、②F-X Velocity Filter (FXVF)、③F-X Prediction Filter (FXPF) を発震記録に対して順次適用した。エディット型強振幅ノイズ抑制として実施した、DATVF の設定パラメータを以下に示す。

リファレンス値	:各 ウィンドウ平均振幅値の上位 5%
スケーリング適用の閾値	:リファレンス値の 3 倍
振幅が閾値を超えた時のスケーリング	:リファレンス値の 3 倍
ウィンドウ長	:300 msec

今回の場合、データから決定されたリファレンス値の 3 倍を超える平均振幅が、3 倍の値で頭打ちとなるとなるよう振幅が抑制される。この処理を適用の結果、特に表面波等の強振幅ノイズが抑えられ、堆積層からの反射面の明瞭化に効果が認められた。

走時差準拠型コヒーレントノイズ抑制として実施した、FXVF の設定パラメータを以下に示す。

阻止する速度帯	:±2500/3000 m/s
フィルタ適用前 AGC	:100 msec

本処理を適用した結果、傾斜成分ノイズを抑制する事が出来、0.5 秒以深のイメージングがより向上した。

周波数-空間領域において複素型予測フィルタを設計、共通発震記録に対して適用し、ランダムノイズを抑制し相対的に S/N を向上させる F-X 予測フィルタ処理を実施した。ここでは最終処理結果における表示区間毎に以下のパラメータを用いた。

オペレータ長	:5 CDPs
空間 ウィンドウ長	:30 CDPs
時間 ウィンドウ長	:1000 msec

この処理を発震記録に対して適用した結果、ランダムノイズを抑制し水平方向の連続性を高める事が出来た。

これら 3 つのノイズ抑制処理を複合化させて適用することにより、特に堆積層からの反射面が鮮明化し、全体的な品質及び分解能の改善に繋がった。

ii) 速度構造の見直し

F-X 予測フィルタを適用した定速度図重合記録（1500–5000m/s、50枚）を作成し、速度構造の見直しを行った。図 6-2-6[1]に統合解析の速度プロファイルを示す。

統合解析の結果得られた CMP 重合処理断面図を図 6-2-6-[2]に示す。CMP 重合後時間マイグレーション断面図を図 6-2-6-[3]に、CMP 重合後マイグレーション深度断面図を図 6-2-6-[4]（縦横比 1:1）及び図 6-2-6-[5]（縦横比 2:1）に示す。既存解析の結果でも認められる様に、測線の中間付近で浅部に盆地構造があり、この付近を境にして測線両側で反射面の様相が異なっていることが、より明瞭にわかる。北部ではコントラストのある水平な反射面が認められるが、南部では CMP150–300 付近に高まりがあり、それ以南では南傾斜していることがわかる。



図 25 2001 神奈川県地下構造調査(Line-B) 調査測線位置図 (地形図+RP +SP)

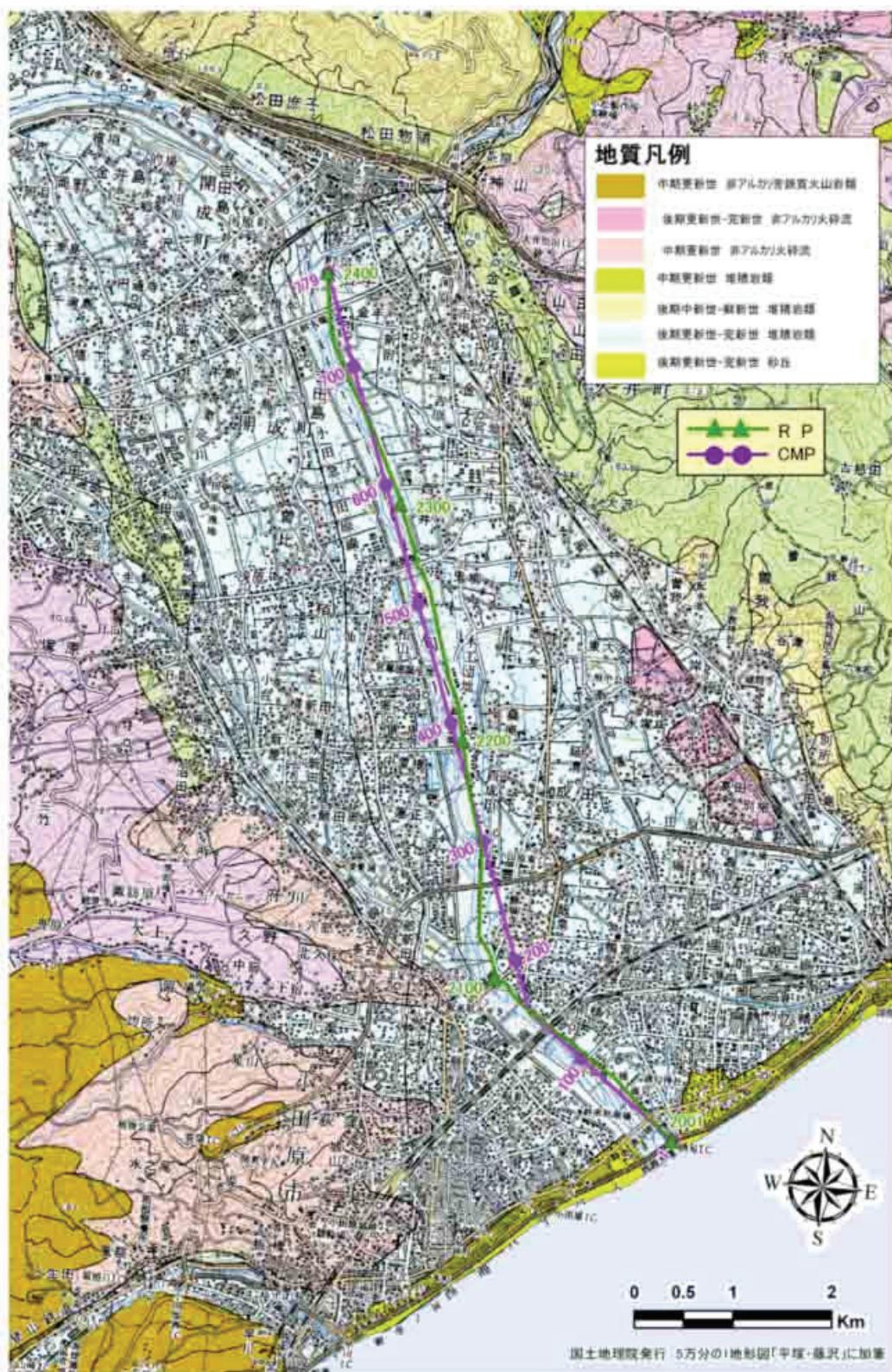


図 26 周辺地質図及び CMP 重合測線（シームレス地質図+RP + CMP 重合測線）

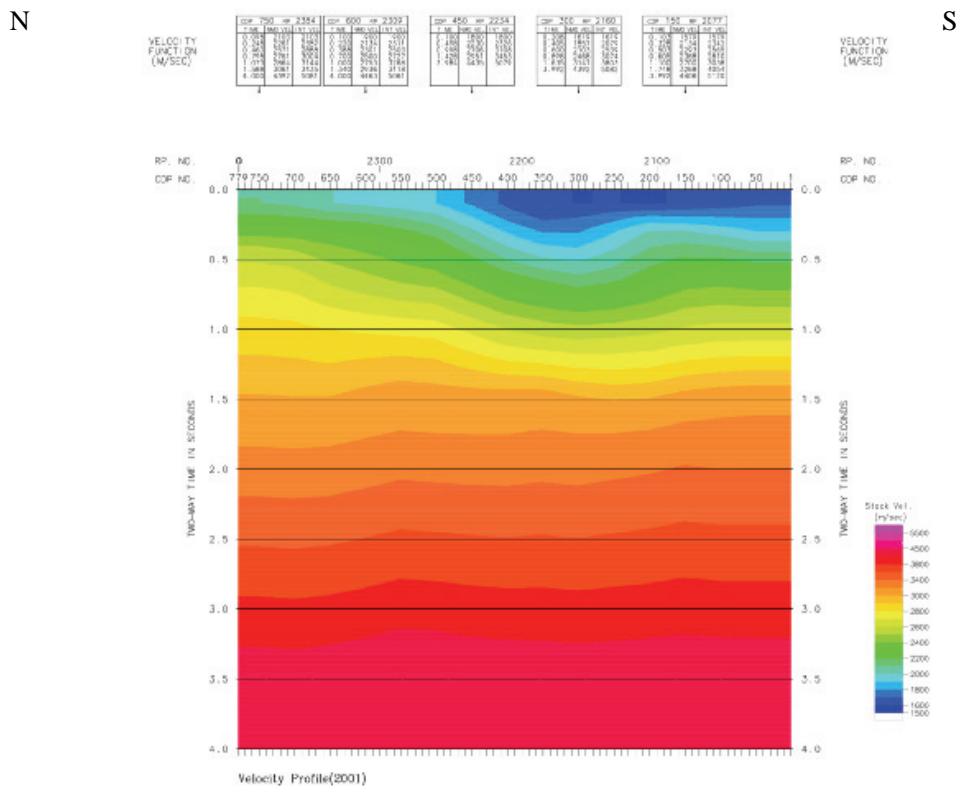


図 27 統合解析結果(CMP 重合処理結果) 速度プロファイル

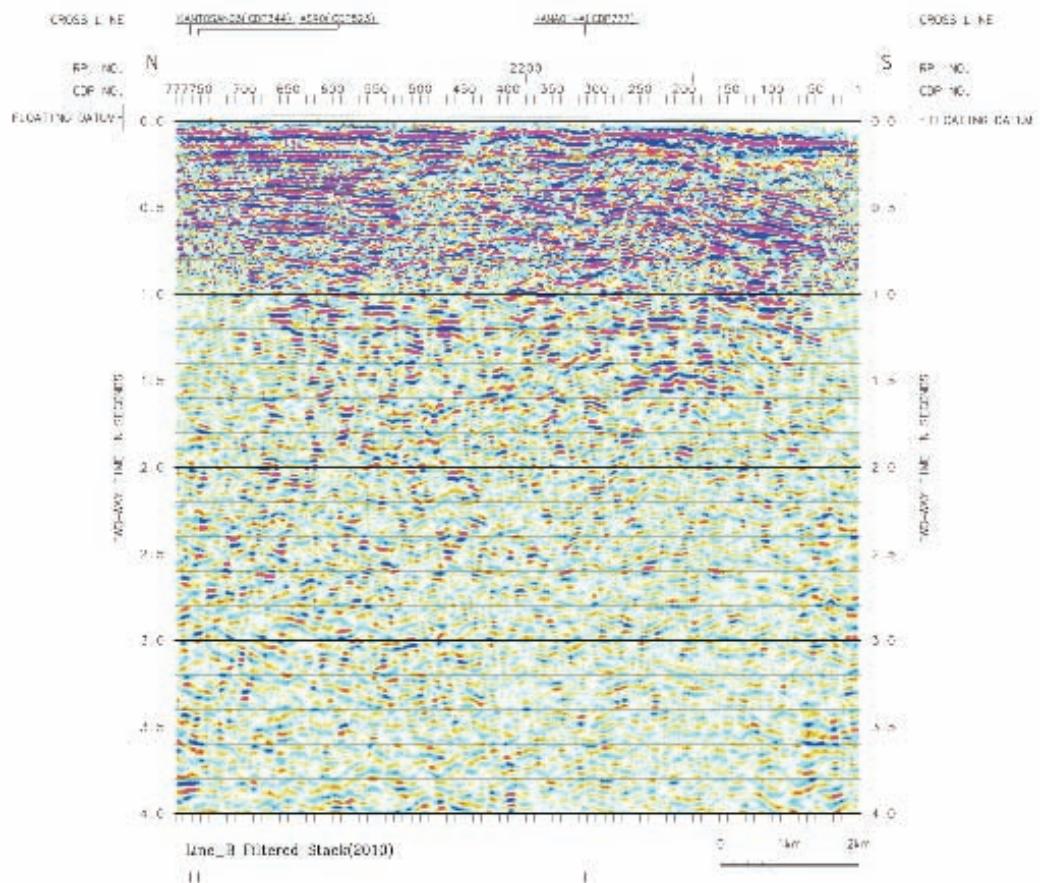


図 28 統合解析結果(CMP 重合処理結果) 重合処理断面図

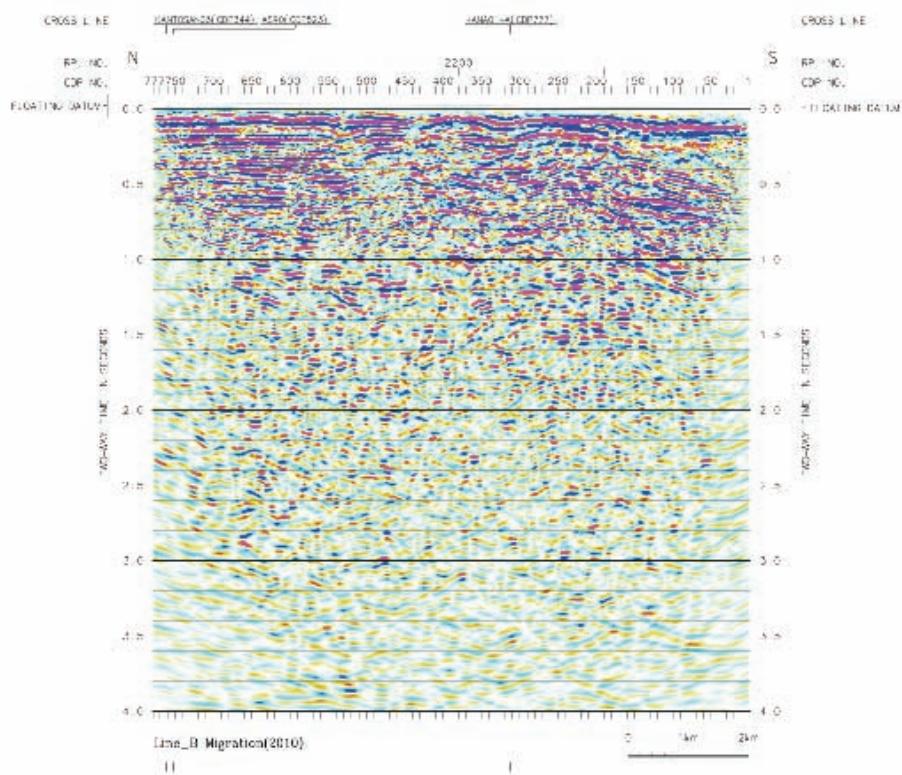


図 29 統合解析結果(CMP 重合処理結果) マイグレーション処理時間断面図

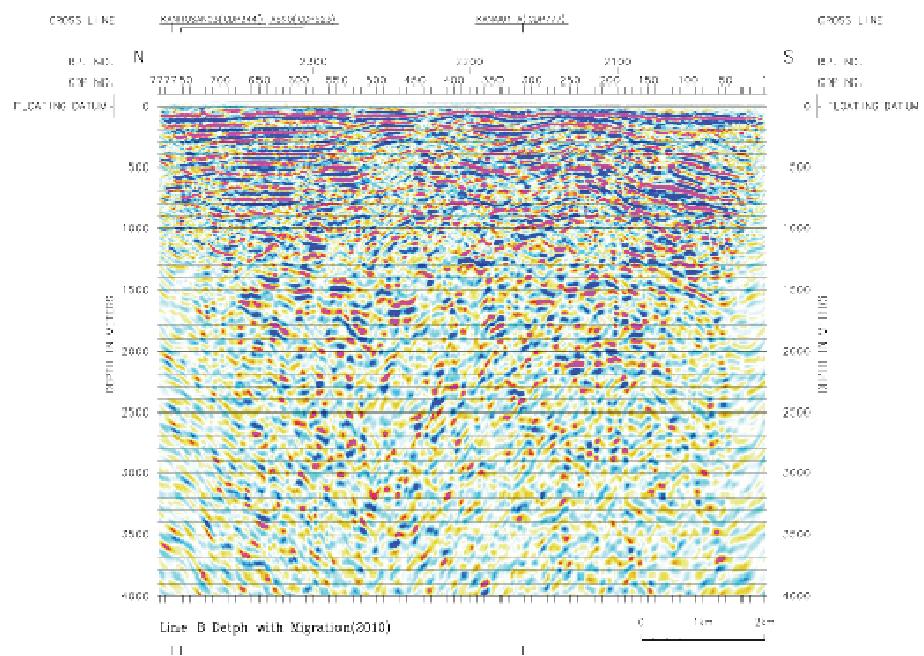


図 30 統合解析結果(CMP 重合処理結果) マイグレーション処理深度変換断面図

7) 統合解析結果－2003 大都市圏地殻構造探査 相模測線

a) 既存処理パラメータの最適化と CMP 重合法による再解析の結果

既存処理は、S/N 比が高くないデータに対して、反射面の抽出のために最善なパラメータを選択していた（図 31、32）。そのため浅部分解能の向上を目的として、再解析としては速度構造の見直しに着手することとした。しかし CMP において定速度重合法による速度解析には限界があったため、後述するが特殊解析として実施した CRS 法解析により推定された RMS 速度構造と、屈折トモグラフィー解析により推定される RMS 速度構造を重合速度に用いることで反射断面の精度向上に努めた。

2つの速度構造は長波長の速度構造は類似しているものの短波長の速度不均質は異なる。そのため両者を合理的に接合させ、ある妥当な速度構造の構築を試みた。まず 2.0 秒以浅の浅部においては屈折トモグラフィー解析による速度解析の方が、波線密度等を考慮するとより詳細な速度構造を得ていると判断できる。一方 2.0 秒以深に関しては屈折トモグラフィー解析の波線が少ないため信頼度は落ちる。そのため、浅部の屈折トモグラフィー解析による速度構造と、深部の CRS 解析による速度構造に対して、2.0 秒・3.0 秒にテーパーをかけ、両者を統合させた（図 33a）。この統合速度構造を用いた反射法地震探査断面を図 33(b, c)に示す。

b) CRS 法を用いた解析結果

CRS 解析前のデータ処理は、既存解析における前処理を適用し、CMP 重合直前までの解析は不变とした。その後、NMO 補正/逆 NMO 補正実施による屈折初動ミュートを行い、入力データとした。以下に、今回の CRS 法解析に用いたパラメータを示す。

Super Gather 範囲	.....	±20 CDP
Vo	.....	3000 m/s
α 値範囲	.....	-60 degrees～60degrees
α 値刻み幅	.....	1 degrees
Fresnelh	.....	2.5
Fresnelm	.....	0.5
CMP 方向 Outside Mute Points(x,t)	....(75, 25)(150, 100)(510, 1000) (720, 2000)(1020, 3500)(1440, 5000)(2120, 10000)	
ハーフオフセット方向 Outside Mute Points(x,t)	..... (50, 25)(1000, 500)(2500, 1000)(5000, 1500)(10000, 3000)(30000, 10000)	
コンフリクトティング・ディップ対応処理	.....	20 degrees 刻みで適用

その結果得られた CRS 重合法による反射断面図を図 34 に示す。CMP 重合法に比べて、重合数の増加によりデータの整理がなされ、多くの反射面が獲得されている。しかし、偽像が多数存在している可能性もあるため注意が必要である。



図 31 2003 大都市圏地殻構造探査・相模測線測線図

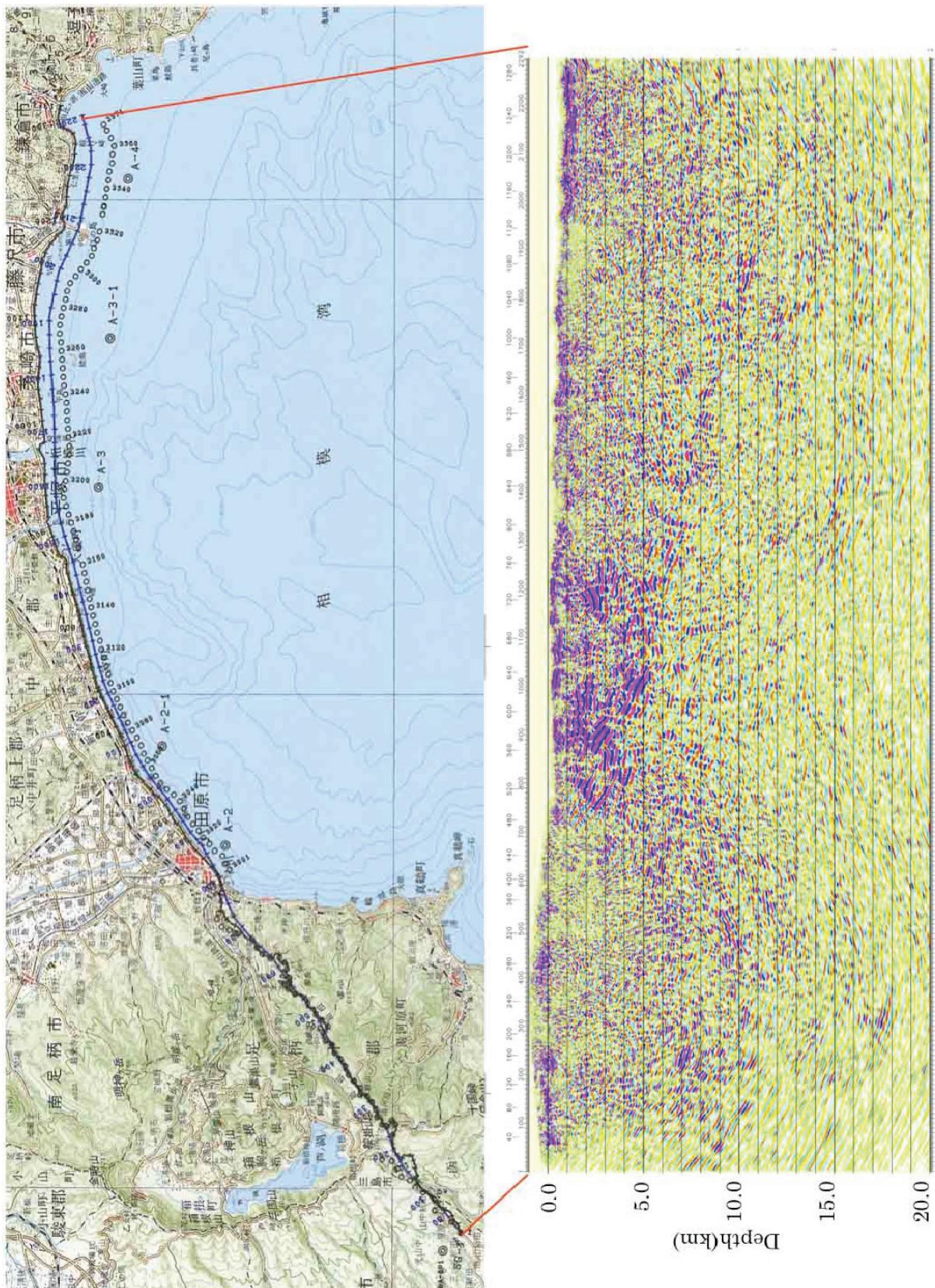


図 32 2003 相模湾測線既存マイグレーション後深度変換断面

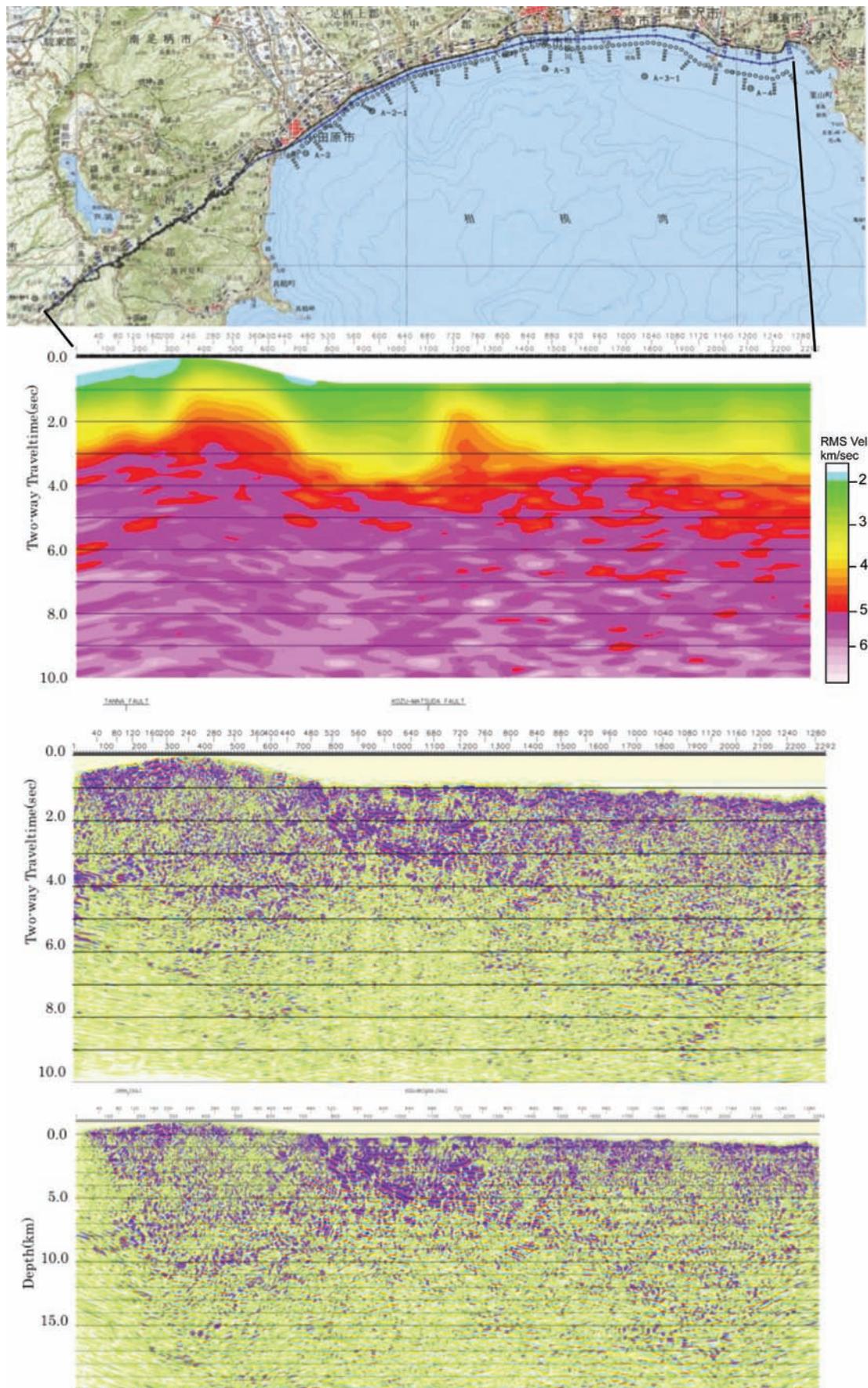


図 33 再解析 a)屈折トモグラフィー速度+CRS 速度、b)重合後マイグレーション時間断面、
c)重合後マイグレーション深度変換断面。

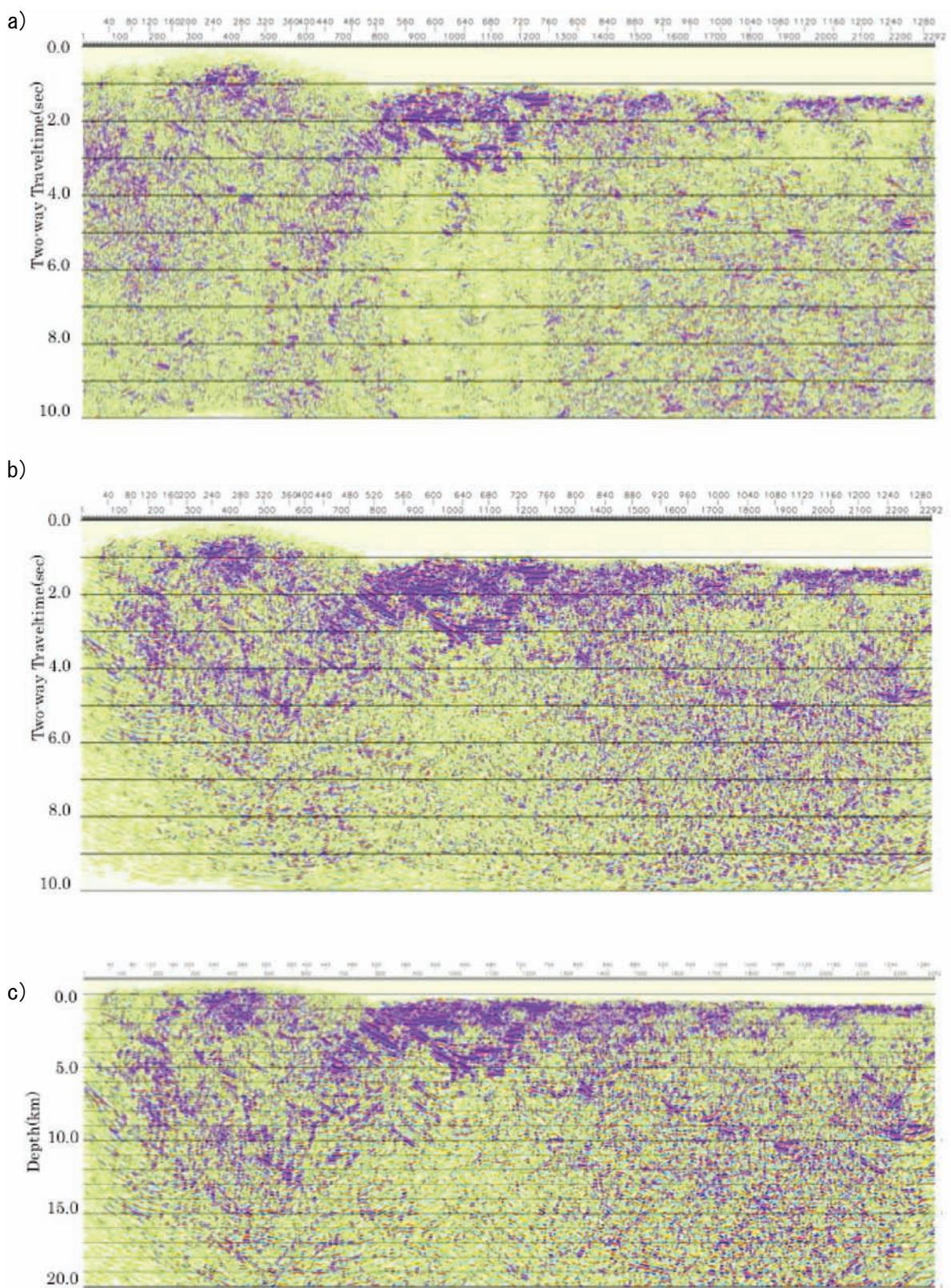


図 34 CRS 法による解析 a) CRS 重合時間断面図、b) CRS 重合後マイグレーション時間断面図、c) CRS 重合後マイグレーション深度断面図。

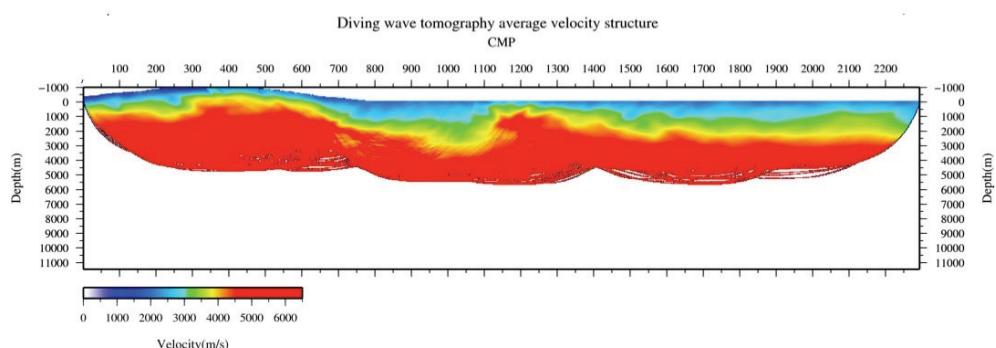
c) 初期モデルランダム化による屈折トモグラフィー解析結果

詳細な速度構造を得るために、屈折トモグラフィー解析を実施した。以下に、今回の屈折トモグラフィー解析で使用したパラメータを示す。

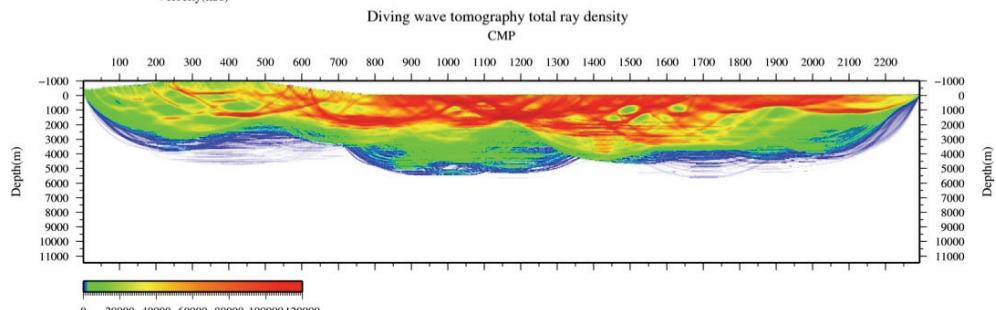
格子間隔	水平方向 50.0 m	鉛直方向 50.0 m
格子数	水平方向 1088 cells	鉛直方向 250 cells
格子上における走時評価間隔	水平方向 4.5 m	鉛直方向 4.5 m
通過する格子点からの反復修正有効範囲		100.0 m
速度分布の反復修正回数		20 回
速度分布の反復修正時に於ける修正係数の許容範囲		±30.0 %
SIRT 法によるインバージョンに使用した入力オフセット距離範囲	0.0-90.0 km	
ランダム化初期モデル範囲	地表:1500-3000m/s、深度 10000m:3000-7000m/s	

本調査はバイブルエタ発震とエアガン発震という 2 つの発震システムにより実施されているため、2 つのデータセットでそれぞれに対して実施し、統合させることで、速度構造を獲得した。図 35 には、ランダム化した 100 個の初期モデルに対する解析として得られた、最終平均速度構造、波線密度及び標準偏差表示の各結果を示す。

a)



b)



c)

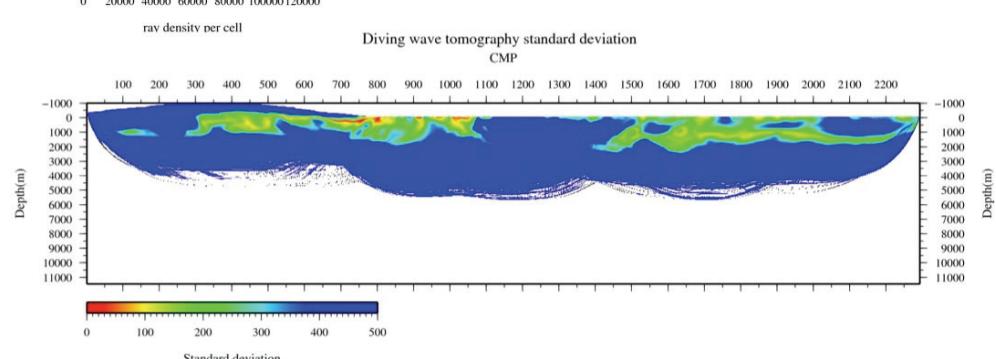


図 35 初期モデルランダム化屈折トモグラフィー解析断面図。

a) 波線密度、b) 平均速度、c) 標準偏差

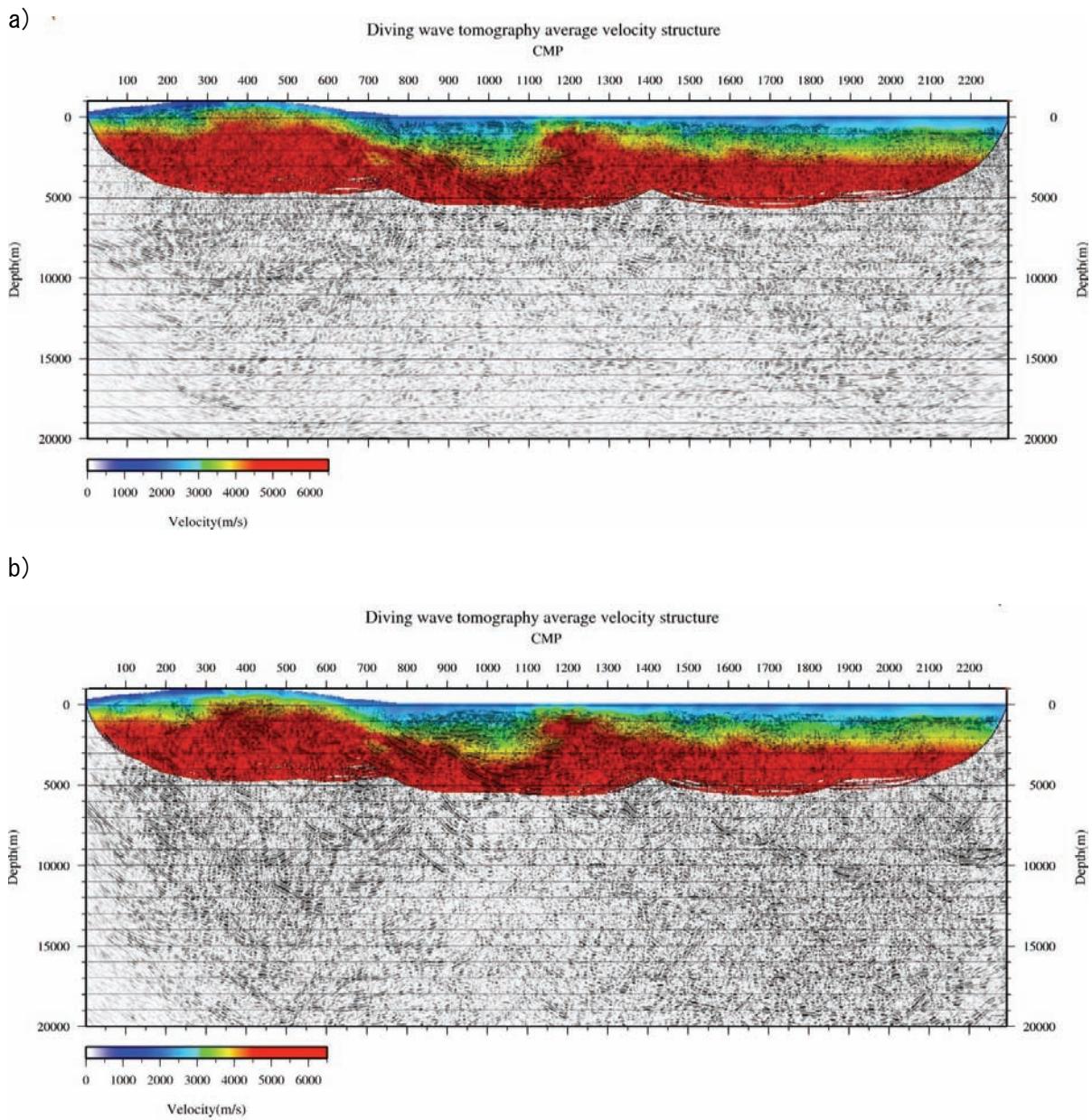


図 36 反射法及び屈折法最終結果コンパイル記録深度断面図 a) 反射法速度再解析結果－屈折トモグラフィー解析結果、b) 反射法 CRS 处理結果－屈折トモグラフィー解析結果。

8) 統合解析結果－2003 関東山地東縁測線 松田測線

a) 取得データについて

2003 関東山地東縁測線のデータ取得の説明として、図 35 に受振点、発震点分布及び CMP 重合測線を加筆した測線位置図を示す。また、図 36 に CMP 重合測線を加筆した地質図を示す。

- i) 展開長 16km(224 チャンネル、固定展開)のうち、約 11km の発震区間でのデータが取得されており、測線全域に亘って平均的な最大オフセットは 10.0km である。
- ii) 発震仕様に関しては、大型バイブレータ 4 台での発震を標準仕様としているが、発震点が設定された区間のうち、県道 706 号丹沢公園松原町線、県道 72 号松田国府津線、県道 78 号御殿場大井線いずれの路線についても民家及び店舗の密集地に相当し、バイブルータ発震台数、発震回数及びエネルギーは大幅に制約されている。
- iii) 国道 246 号線の八沢入口-新籠場の約 3.0km の区間を除く、ほぼ全区間が民家及び店舗の密集地に相当し、バイブルータ発震台数、発震回数及びエネルギーは大幅に制約されている。

b) 既存解析と統合解析の結果

ここでは、本測線で適用した統一データ解析フロー及び統一パラメータと異なる点について記述する。

i) 重合速度の確認及び NMO 補正後ミュートの確認

既存の重合速度解析結果を用いて CMP アンサンブル記録に対し NMO 補正を実施し、特に浅部の高分解能化処理を目的として、NMO 補正後ミュートの再設計を実施した。

ii) 残差静補正(Residual Static Correction)

NMO 補正後ミュートの再設計を実施したうえで、最適な残差静補正パラメータをテストし、実施した。

統合解析結果を検討するに際して、既存 CMP 重合後マイグレーション深度断面図を図 39(縦横比 2:1)に示す。また、統合解析の結果得られた CMP 重合後マイグレーション深度断面図を図 40 に示す。

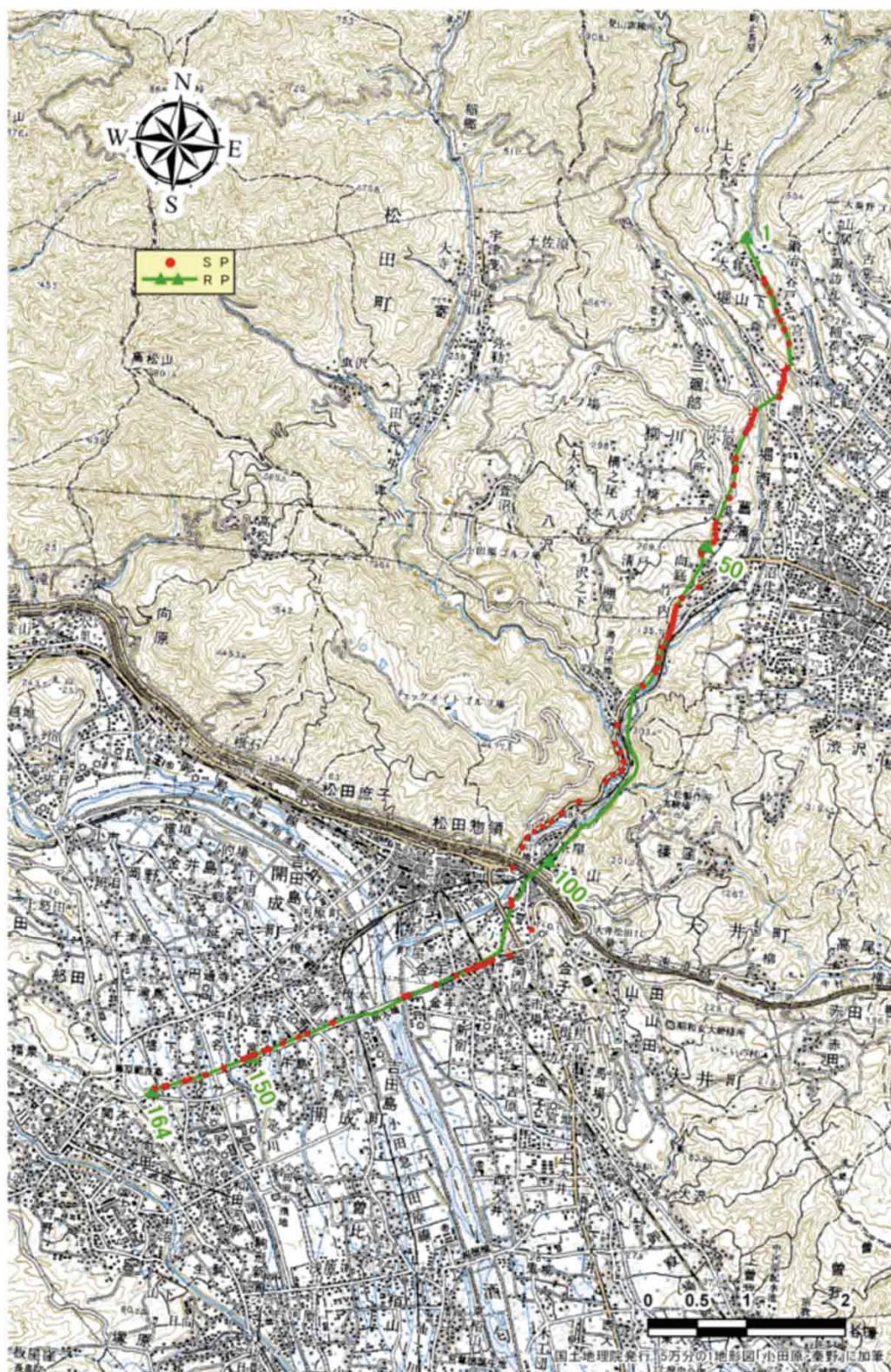


図 37 2003 大都市圏地殻構造調査 関東山地東縁測線 松田測線
調査測線位置図 (地形図+RP +SP)

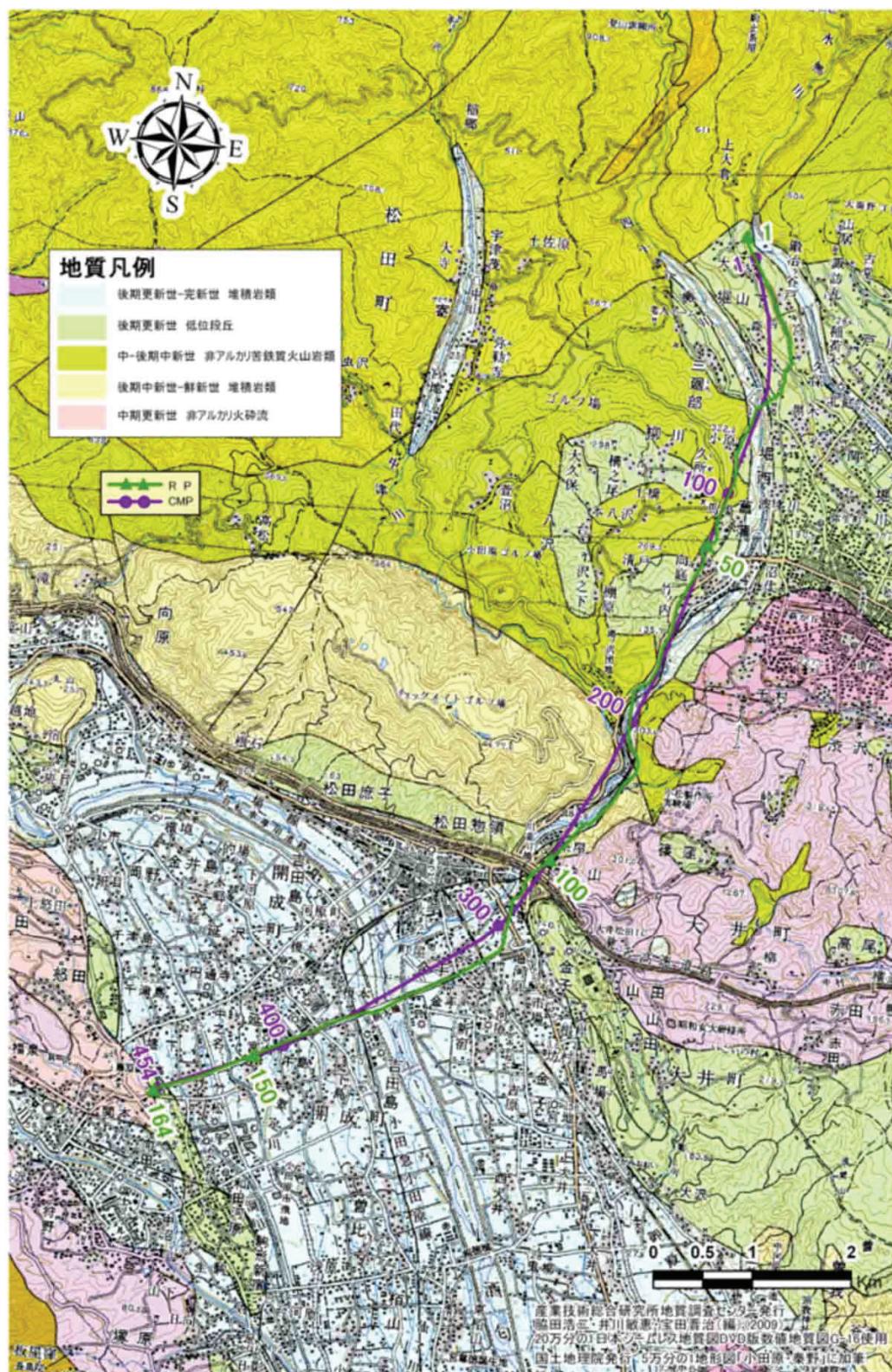


図 38 周辺地質図及び CMP 重合測線（シームレス地質図+RP + CMP 重合測線）

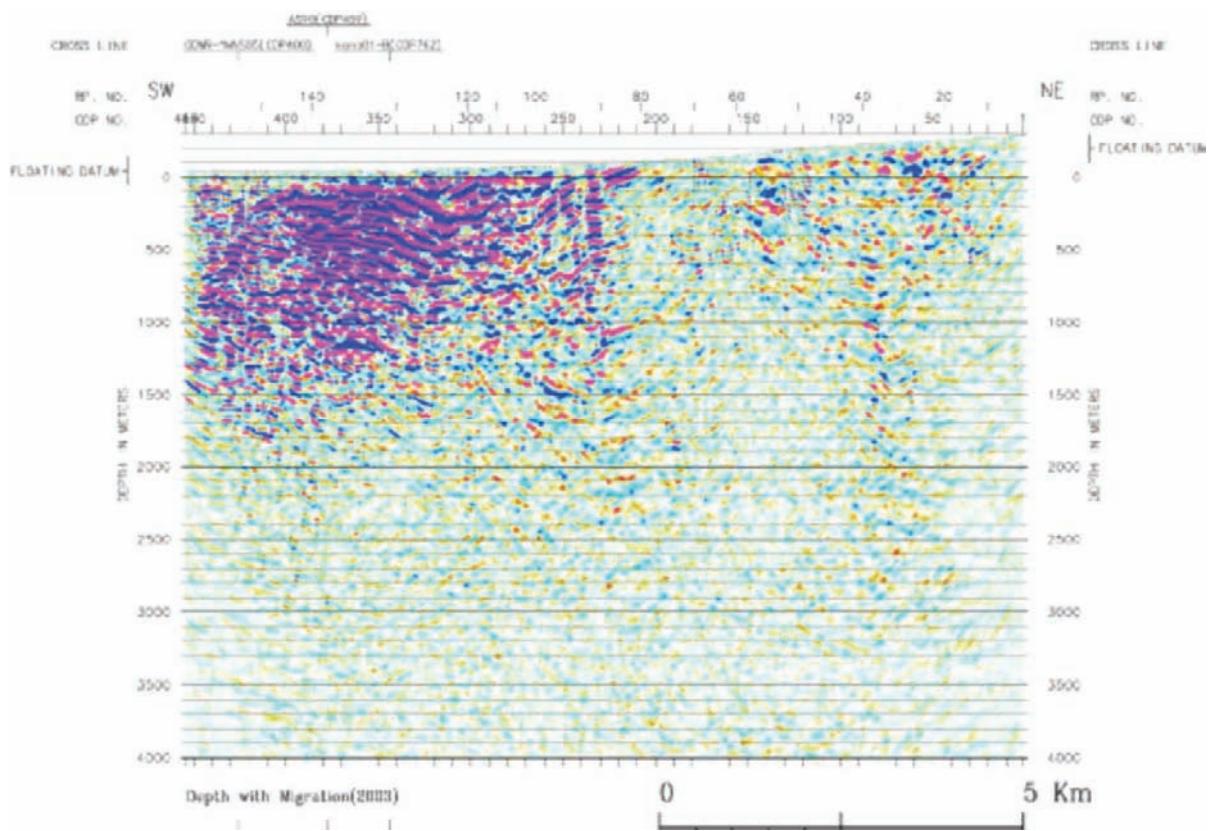


図 39 2003 関東山地東縁測線 松田測線 既存マイグレーション後深度変換断面

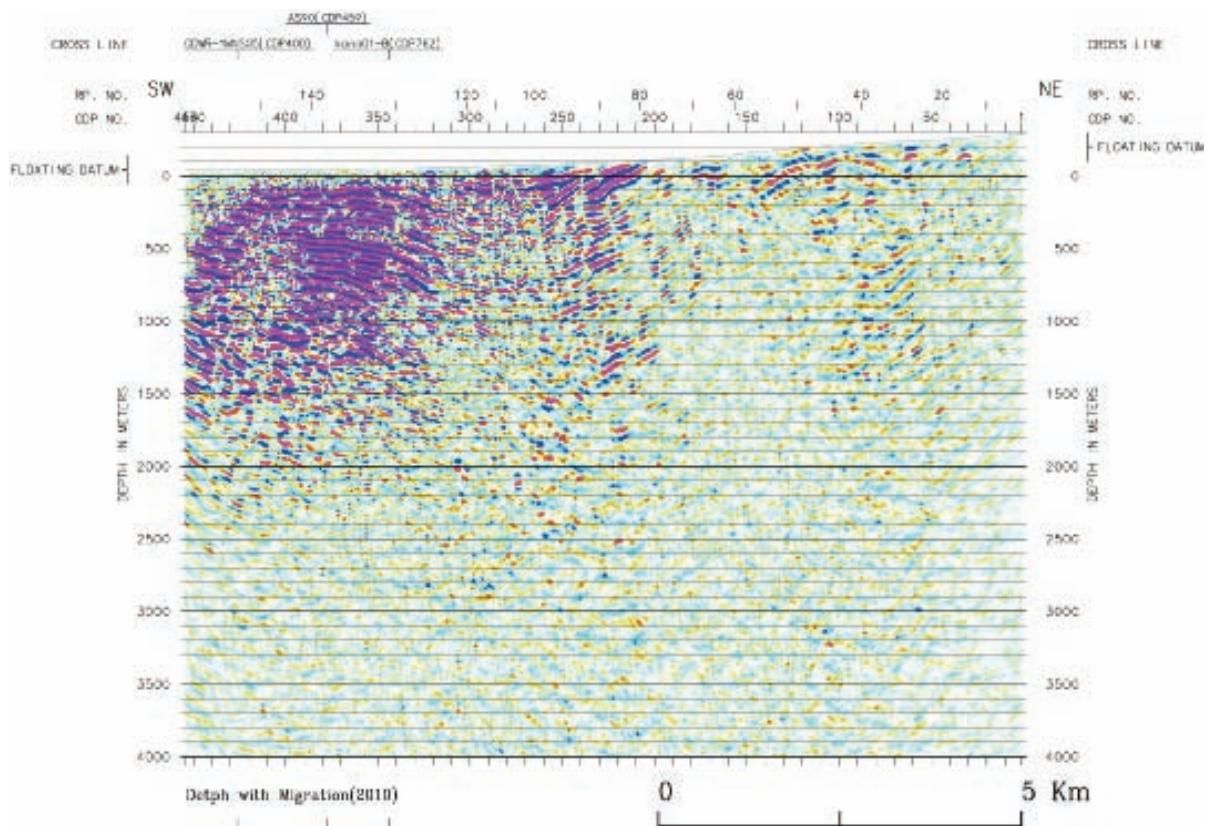


図 40 2003 関東山地東縁測線 松田測線 統合解析マイグレーション後深度変換断面

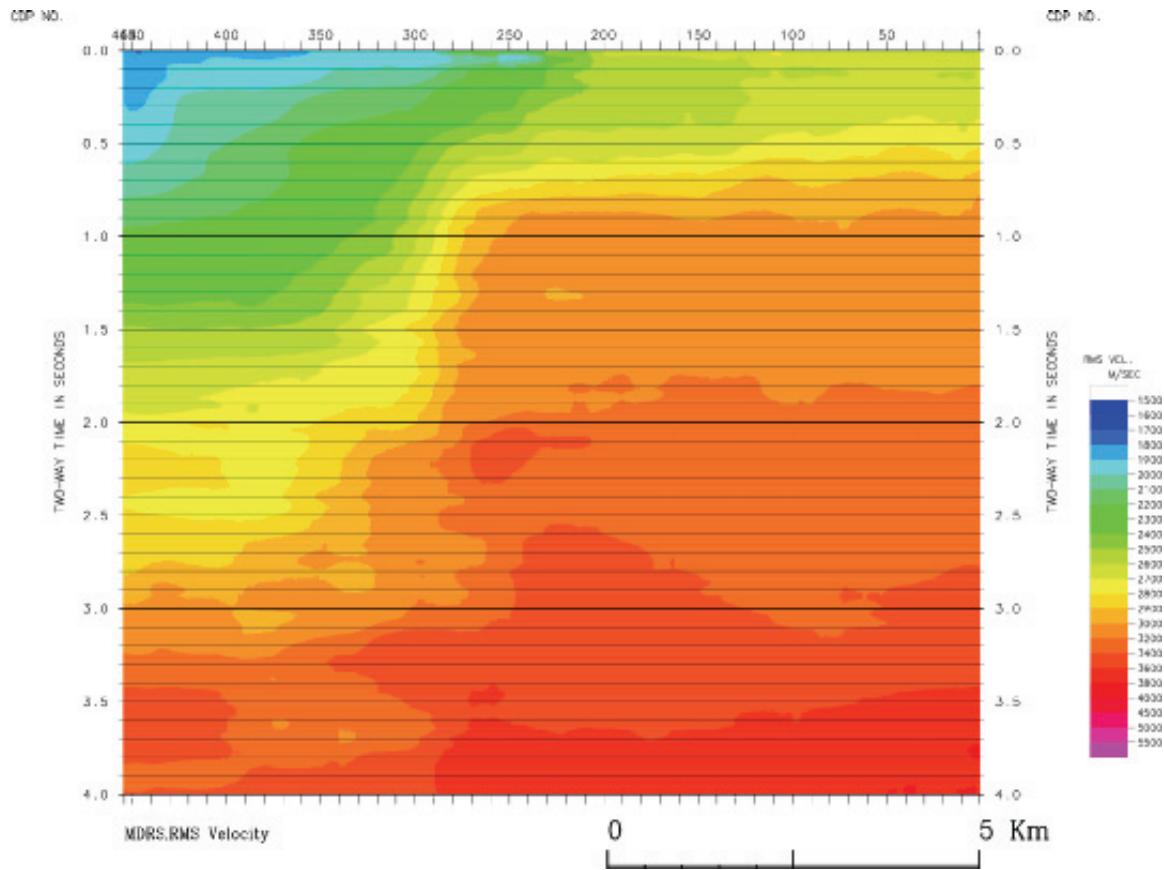


図 41 統合解析結果(MDRS 重合処理結果) 速度プロファイル

c) CRS/MDRS 法による解析結果

上述した統合処理を実施したデータを入力として、MDRS 法による高精度イメージング処理を実施した。MDRS 法の第一段階として CRS 法を適用した。尚、本統合解析測線は神縄・国府津-松田断層帯を横断し、ゼロオフセット断面上で反射波が交差する状況(コンフリクトティング・ディップ)が予想される。このような状況に対応するため、第二段階として高精度 CRS 解析として位置付けられる MDRS 法を適用し、複数の交差する傾斜を持つ反射面に関するイメージングの改善を実施した。

MDRS 法ではまず予測した反射波の出現角の範囲を幾つかの領域に分割し、それぞれの領域で CRS 法を適用した CRS 重合記録 (MDRS サブセクション) を作成する。次に、CRS 法の副産物であるセンプランスアトリビュートを参照し、サンプル単位に MDRS サブセクションの並び替えを行うセンプランス・ソート法によって反射波イベントを抽出する。最後にこれらの重ね合わせを行って MDRS 重合記録を作成する。

MDRS 法解析に用いた主要なパラメータを以下に示す。

Super Gather 範囲	: 41CMP (± 20 CMP)
V_o	: 1900m/s
α 値範囲	: -30degrees ~ 30degrees
α 値刻み幅	: 1degrees
Fresnelh	: 3.0

Fresnelm

: 1.0

CMP 方向 Outside Mute Points(x, t)

: (25, 20) (500, 658) (1000, 1200)

(1500, 1700) (2000, 2000)

ハーフオフセット方向 Outside Mute Points(x, t) :

(20, 25) (219, 500) (310, 1000) (380, 1500) (438, 2000) (490, 2500) (537, 3000)

MDRS 法解析の結果得られた速度プロファイルを図 41 に示す。MDRS 重合後マイグレーション断面図を図 42 に、MDRS 重合後マイグレーション深度断面図を図 43 に示す。

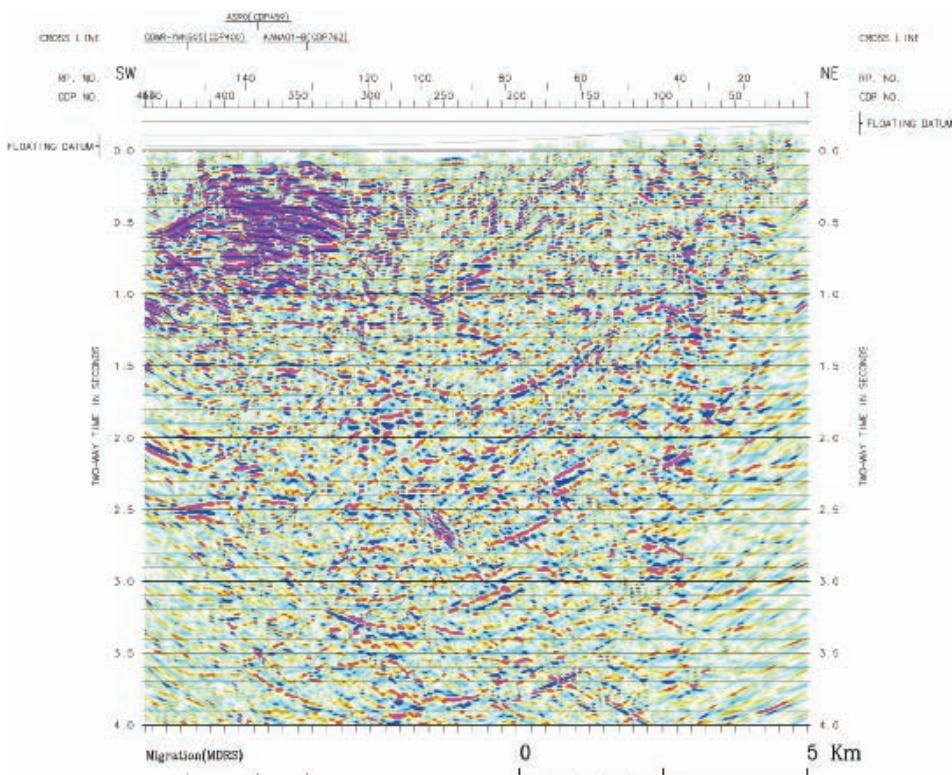


図 42 MDRS 重合後マイグレーション断面図

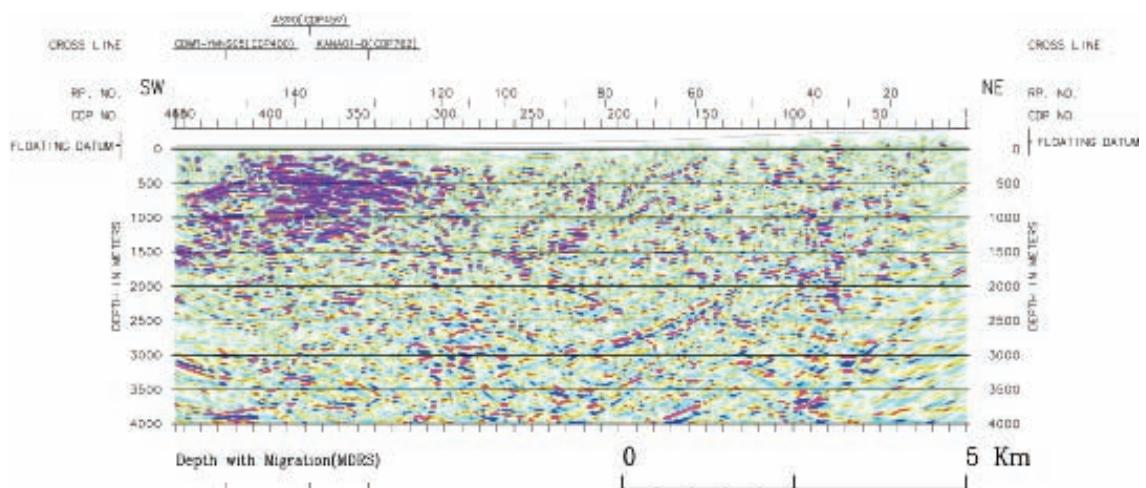


図 43 MDRS 重合後マイグレーション深度断面図

8) 統合解析結果－2005 小田原-山梨測線 足柄区間

a) 取得データについて

2005 小田原-山梨測線 足柄区間のデータ取得の説明として、図 44 に受振点、発震点分布及び CMP 重合測線を加筆した測線位置図、図 45 には CMP 重合測線を加筆した地質図を示す。

今回の統合解析で主目的とした、神縄・国府津-松田断層帯の形状把握を鑑みた場合の、データ取得仕様に関する確認事項を記載する。

- i) 測線近傍の建造物、構築物、路面強度および埋設管設置に対する保安上の配慮から、標準発震点を確保できた発震点は約 53% にとどまっている。また大型バイブレータの進入が困難であった区間では小型バイブルータで発震点を補完せざるを得なかった。
- ii) 固定展開 17km でのデータ取得は、今回の統合解析対象測線でもっとも展開長が長く、屈折波トモグラフィー解析が有効に機能することが期待できる。

本測線においては、浅層部分の沖積層に関する成層構造は確認できるものの、箱根古期外輪山期溶岩類に付随する反射波は連続性に乏しい。往復走時では、およそ 0.7-1.2 秒程度の継続時間を持つ波群として認識できるに止まる。その基底部分の包絡面が先新第三系基盤面相当と考えられるが、これら発震記録上では確認することが困難である。足柄平野北部の発震記録を見てみると、礫層が卓越することにより有効周波数が 20Hz 以下に低下し、且つ、表面波と共に震源近傍における散乱波のエネルギーが屈折多重反射として卓越していることがわかる。

b) 既存解析と統合解析の結果

統合解析は、基本的には、統一処理フロー及びパラメータに基づき行った。なお、2005 小田原-山梨測線 足柄区間の解析は統一データ解析パラメータに対して次の点が異なり、また、以下に挙げる各特殊処理がなされている。

i) デコンボリューション

既存の処理では、デコンボリューションのアルゴリズムとして、以下の Surface-consistent 型のデコンボリューションが適用されていた。

予測距離	: 4.0 msec
零オフセット位置における設計ゲート	: 300~4000 msec [Non-TV]
オペレータ長	: 400 msec
プリホワイトニングファクター	: 5.0%

しかし、今回、他の測線を考慮に入れ、アルゴリズムとしてホワイトニングデコンボリューションを採用した。

予測距離	: 4.0 msec
零オフセット位置における設計ゲート	: 0~2000 msec [Non-TV]
オペレータ長	: 240 msec
プリホワイトニングファクター	: 5.0%

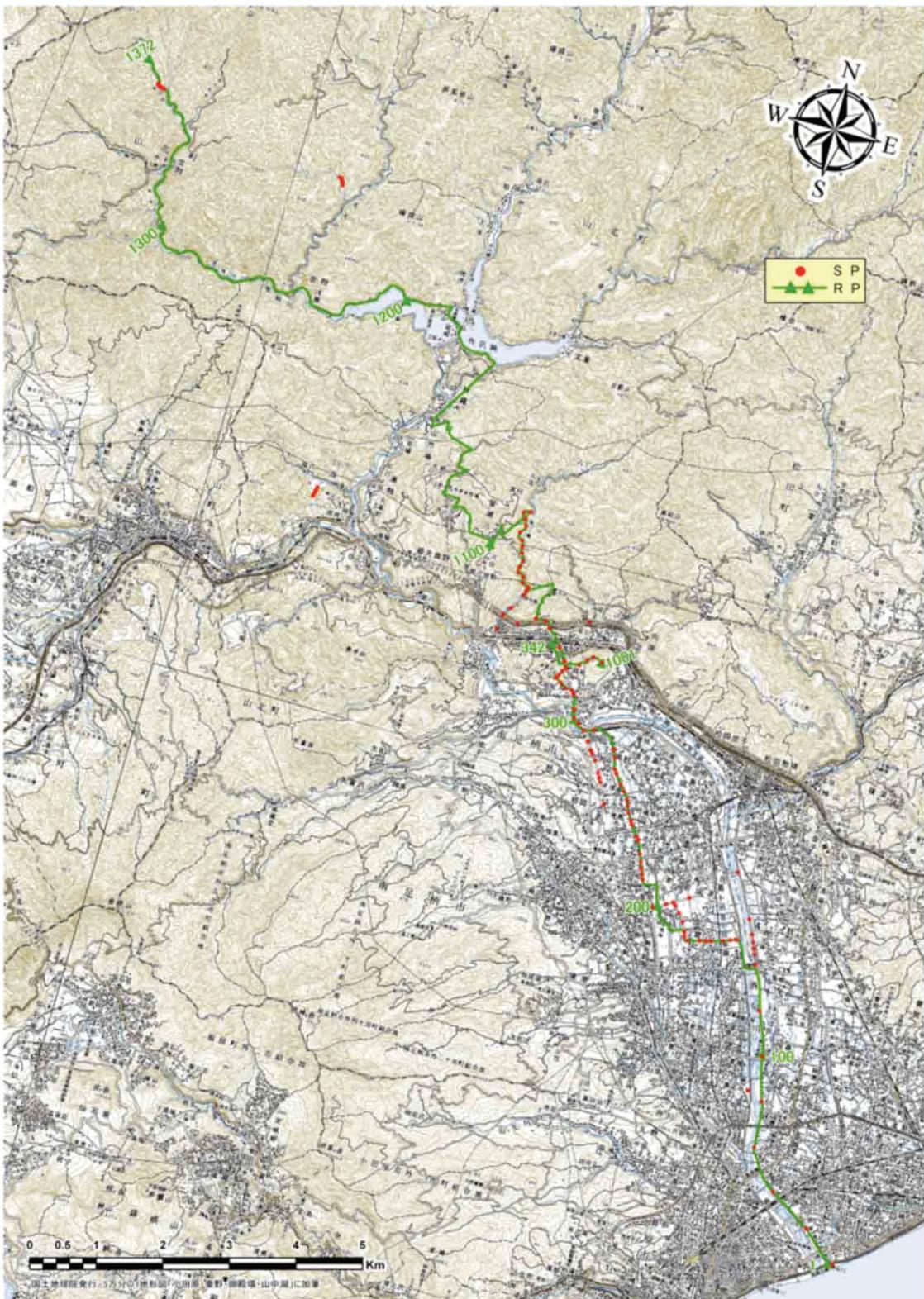


図 44 2005 大都市圏地殻構造調査 小田原-山梨測線 足柄区間
調査測線位置図（地形図+RP +SP）

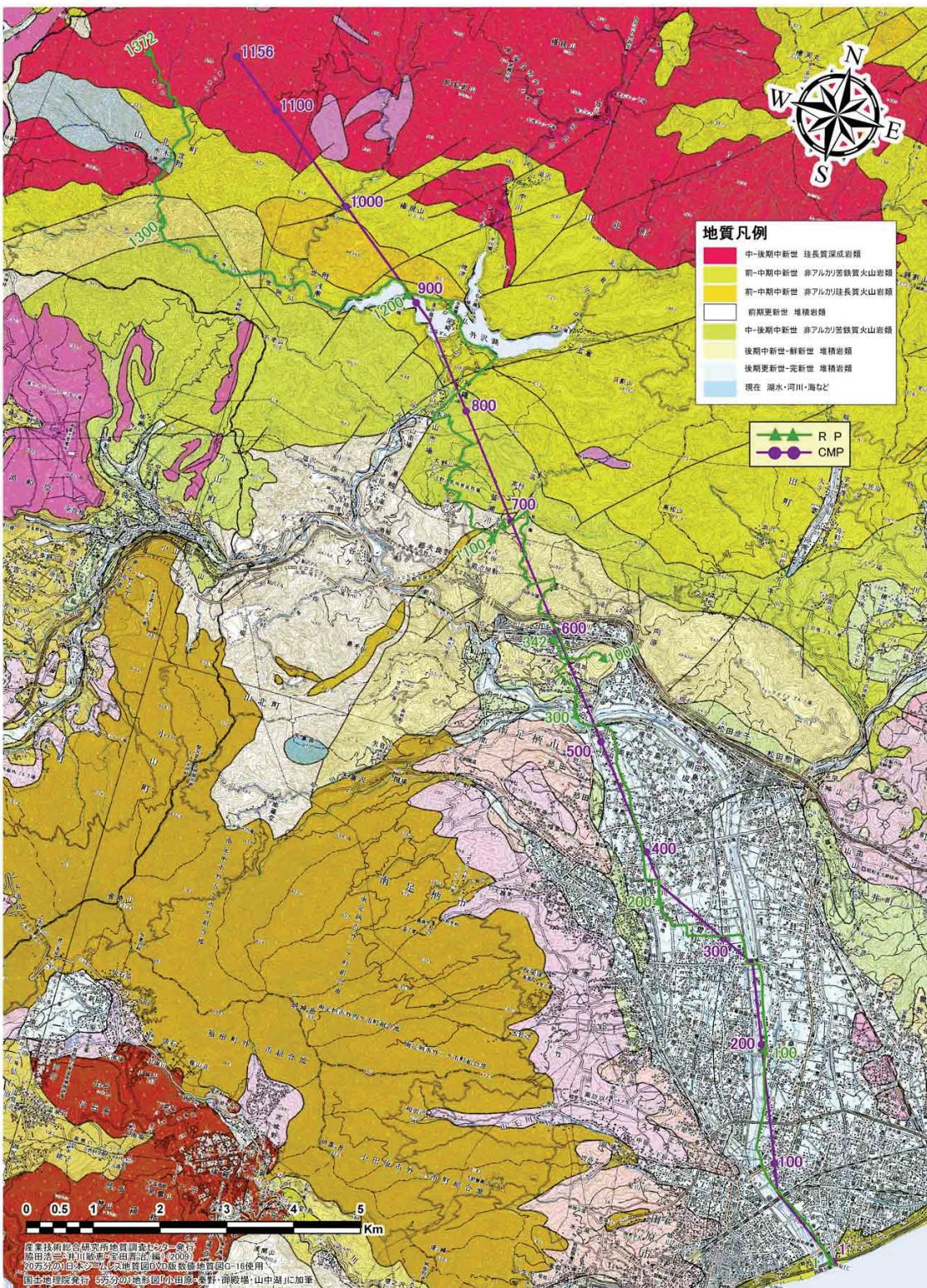


図 45 周辺地質図及び CMP 重合測線（シームレス地質図+RP + CMP 重合測線）

ii) 重合速度解析の見直し

既存解析では速度解析間隔 1250m で速度解析が実施されており、神縄・国府津-松田断層帶の形状把握を目的とした場合、速度解析間隔は非常に荒い。そこで、本統合解析では速度解析間隔約 600m で速度解析を実施した。なお、今回、定速度重合断面それぞれに F-X 予測フィルタを適用することにより、速度解析の改善を図った。また Long CVSX のパネルを作成し、速度構造を検討する材料とした。

iii) 初期モデルランダム化による' Turning-ray' トモグラフィー解析

初期モデルランダム化によるモンテカルロ型信頼性評価解析を伴う' Turning-ray' トモグラフィー解析を適用し、断層周辺における速度不均質構造の抽出を試みた。さらに、この速度構造を基に、各測線の速度構造モデルの検証を行った。

統合解析結果を検討するに際して、既存 CMP 重合後マイグレーション深度断面図を図 46 に示す。

統合解析の結果得られた速度プロファイルを図 47 に、CMP 重合後時間マイグレーション断面図と CMP 重合後マイグレーション深度断面図を図 48 に示す。

c) 初期モデルランダム化による屈折トモグラフィー解析結果

詳細な速度構造を得るために、屈折トモグラフィー解析を実施した。以下に、今回の屈折トモグラフィー解析で使用したパラメータを示す。

格子間隔	: 水平方向 50m 鉛直方向 50m
格子数	: 水平方向 565cells 鉛直方 150cells
格子上における走時評価間隔: 水平方向	5.0 m 鉛直方向 5.0 m
通過する格子点からの反復修正有効範囲:	100m
速度分布の反復修正回数	: 15 回
速度分布の反復修正時に於ける修正係数の許容範囲	: ±30. 0%
SIRT 法によるインバージョンに使用した	
入力オフセット距離範囲	: 指定なし
ランダム化初期モデル範囲	: 深度 1000m:1000-4500m/s

図 49 には、ランダム化した 100 個の初期モデルに対する解析結果として、最終平均速度構造、波線密度及び標準偏差表示の各結果を示す。図 50 に、屈折法による速度構造と、深度断面を重ねあわせた図を示す。

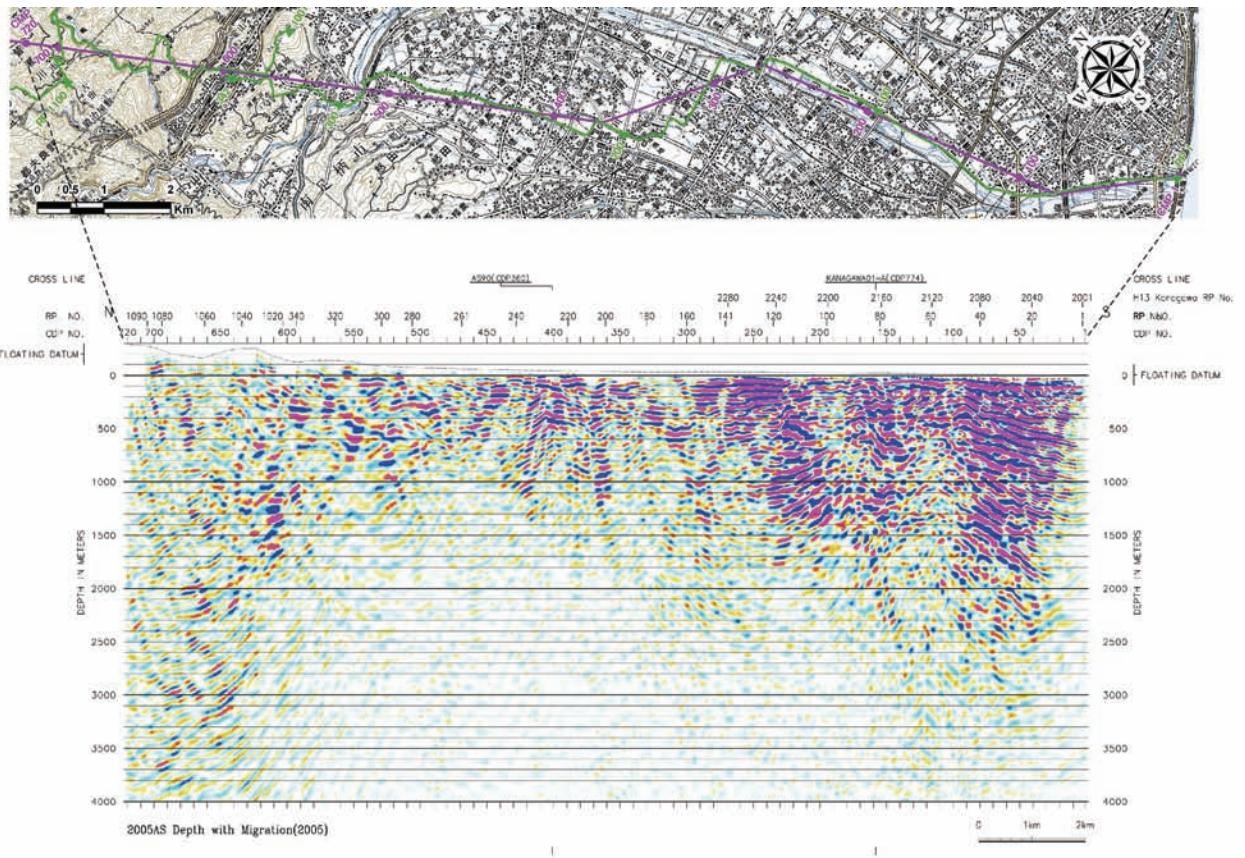


図 46 既存解析結果(CMP 重合処理結果) 深度断面図(縦横比 2:1)

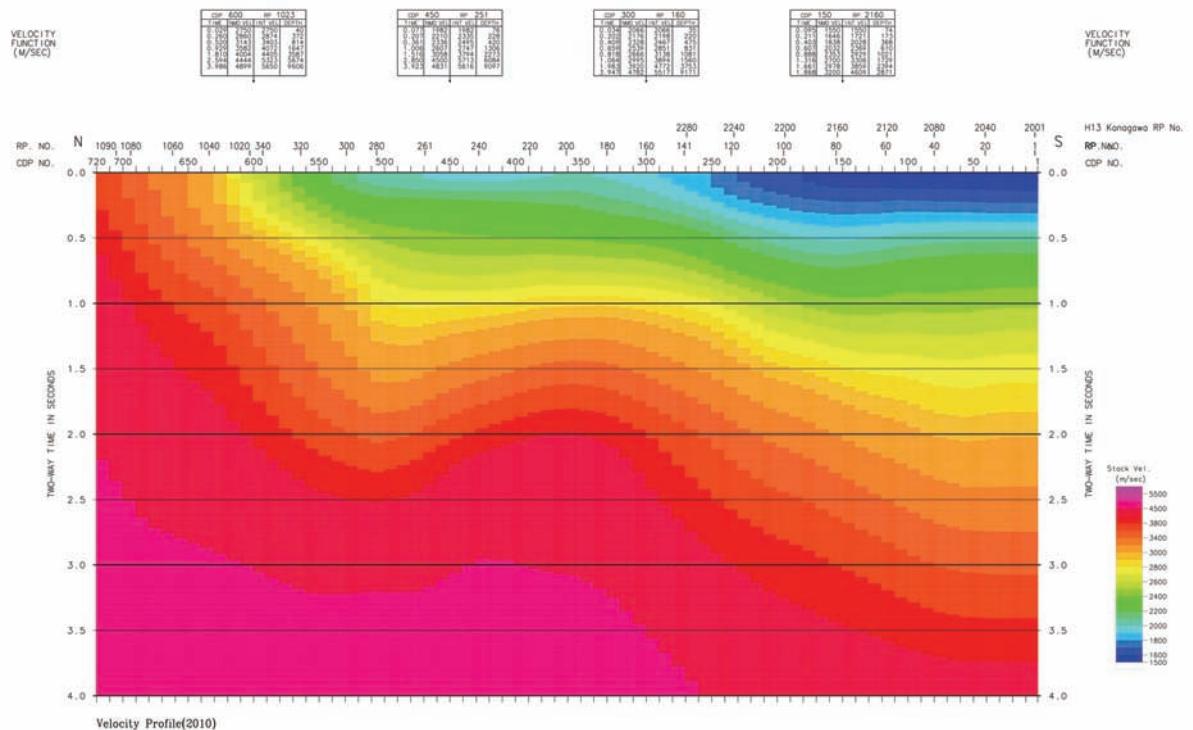


図 47 統合解析結果(CMP 重合処理結果) 速度プロファイル

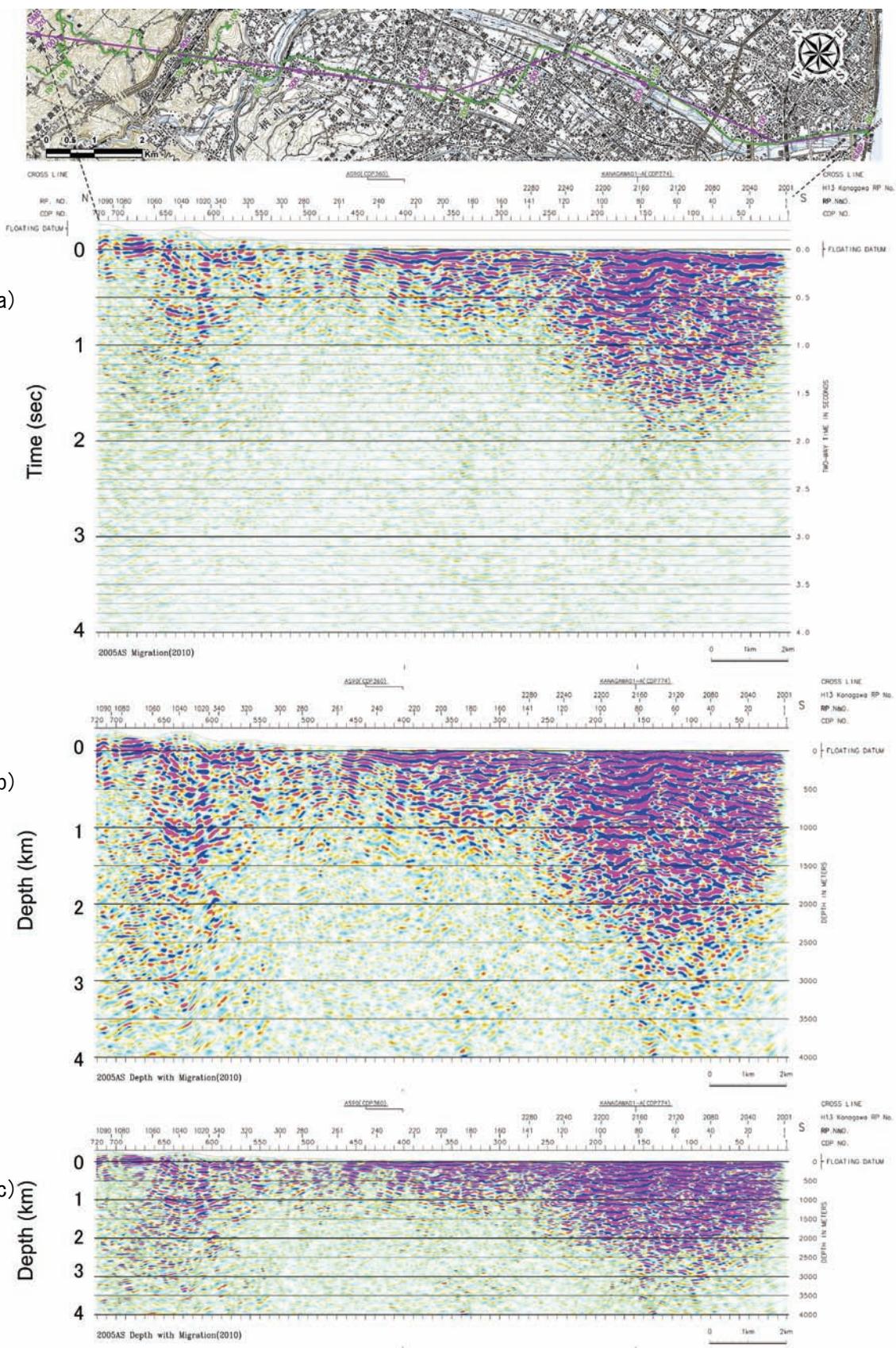


図 48 統合解析結果(CMP 重合処理結果) a)マイグレーション時間断面、b)重合後マイグレーション深度断面 (1:2)、c)重合後マイグレーション深度断面 (1:1)

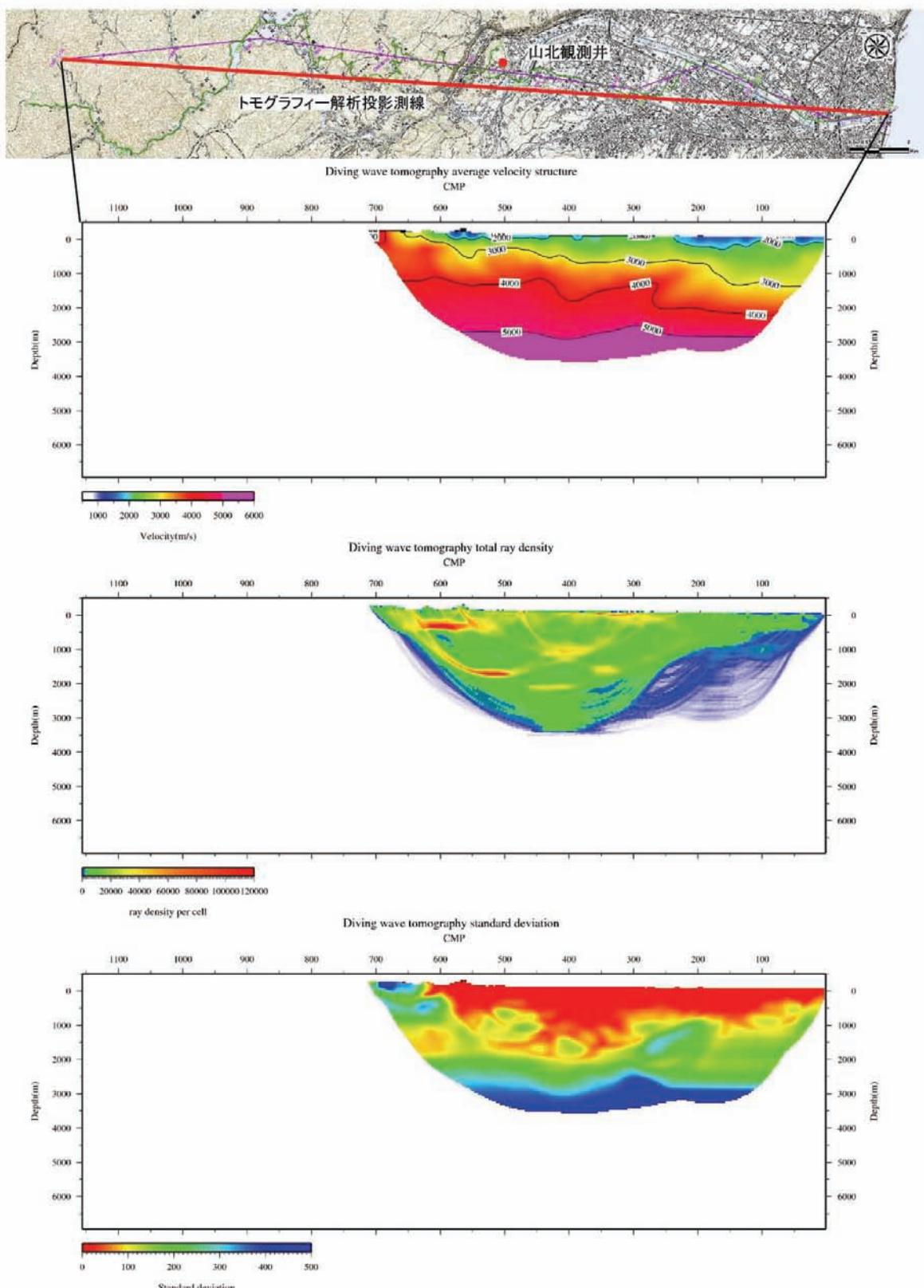


図 49 屈折トモグラフィー解析結果

a) 推定速度構造、b) 破線密度、c) 誤差評価表示結果

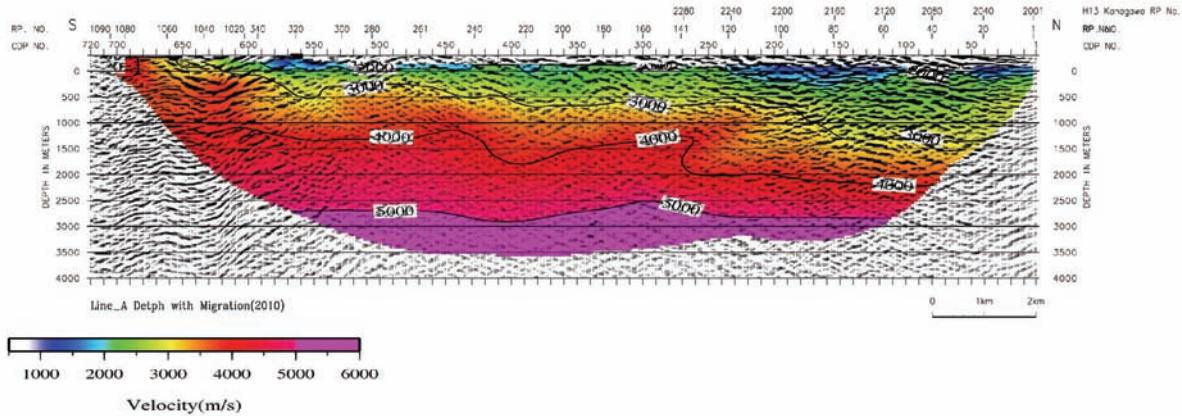


図 50 深度断面図とトモグラフィー解析断面図との重ね合わせ図

9) 再解析断面の地質学的解釈

a) 2001 神奈川県地下構造調査 A 測線

神奈川県が実施した足柄平野から大磯丘陵にいたる測線は、国府津-松田断層を横断して実施されたものであるが、横断部分の測線が狭隘であり、大型バイブルーターによる発震が断層近傍で確保できず、国府津-松田断層の形状については、必ずしも充分なイメージングが得られていない。今回実施したとくに CRS 重合法による解析によって、大磯丘陵側の地下構造のイメージングが改善され、地表地質構造と調和的な反射断面が得られた。ここでは、主にマイグレーション処理をほどこした CRS 重合法深度断面をもとに、国府津-松田断層の地下形状に焦点を置いて、本断面の地質学的解釈を行う。大磯丘陵下では CDP200 付近より東側では概ね西傾斜の反射面が卓越し、大磯丘陵の西部の CDP200 より西側では東傾斜の反射面が卓越する。見かけ上、向斜状の構造を示すがこの向斜の東翼では反射面のパタンーンから東傾斜の断層を推定した。地表地質(矢野, 1986)では、単純な向斜をなしている訳ではなく、大磯丘陵に分布する上部中新統の谷戸層の層理面は、しばしば傾斜 50° を越える傾斜を示し、複雑な地下構造が推定される。振幅の大きい部分がほぼ、上部中新統以下の地層に相当し、その上位に不整合で重なる第四系、前川層・二宮層などが振幅の小さい反射波群によって特徴づけられる領域に対応している(図 51)。この境界を a 層準として、記載した。CDP520 付近に国府津-松田断層の断層トレースが地表地質・変動地形学的に推定されているが、東傾斜断層を隔てて上盤では東傾斜の反射面が、下盤では水平-西傾斜の反射面が卓越する。推定した断層のみかけの傾斜は、30° である。国府津-松田断層の下盤側、千代台地の下では振幅の大きな反射面群が深さ 750-1,500m に分布し、その上位には大磯丘陵下と同様に、反射面が不明瞭なユニットが重なる。これらの類似性から、層準 b を推定し、大磯丘陵下の層準 a と対応するものと推定した。この対応関係の確実性については、検討を要する。国府津-松田断層の下盤で、西傾斜の反射面とその西側の水平な反射面との境界部に断層を推定した。また、千代台地の西端に東傾斜の断層を推定した、これは CDP650 付近で 35° の傾斜で東に傾斜する反射面のユニットの基底部分に推定した emergent thrust である。累積変位量からは、この断層の変位は国府津-松田断層の次ぎに大きなものである。台地を構成する地下 300m ほどのユニットは、より下位の地層とは斜交し、不整合関係にあるものと推定される。この断層のさらに西側にも、CDP780-670

に上に凸の反射面が分布することから、その翼部に断層を推定した。測線西部では箱根火山古期外輪山火山噴出物(OS、図 51)は東傾斜の反射面群として識別され、その上位にはほぼ平行に第四系堆積層が覆っている。この断面で推定される断層群は、いずれも東傾斜でありこれらの断層群はいずれもプレート境界部の逆断層から分岐した断層と推定される。

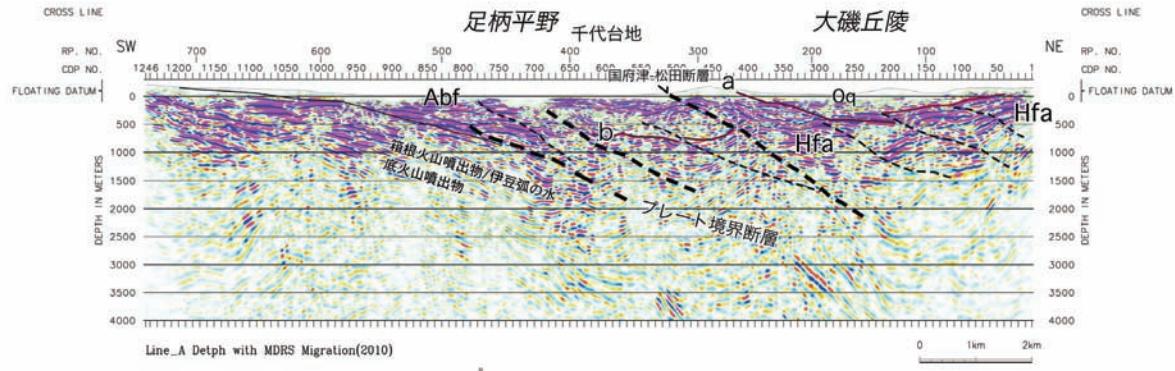


図 51 神奈川県地下構造調査 A 測線の CRS 重合法による深度変換断面とその地質学的解釈
太破線：累積変位量の大きな断層、破線：断層、Hfa：大磯丘陵下の中新統、Abf：足柄平野を充填する第四系堆積物、Oq：大磯丘陵の第四系、a、b：層準(本文参照)。

b) 2001 神奈川県地下構造調査 B 測線

CMP 重合法による深度変換断面をもとに層準を判定した(図 52)。箱根古期外輪山溶岩類(OS)を覆って堆積した足柄平野を充填する堆積物(Abf)は、オンラップして堆積しており、この特徴から OS のトップの層準を認定した。本測線と直交する測線については、層準が調和的に判断されるよう努めた。

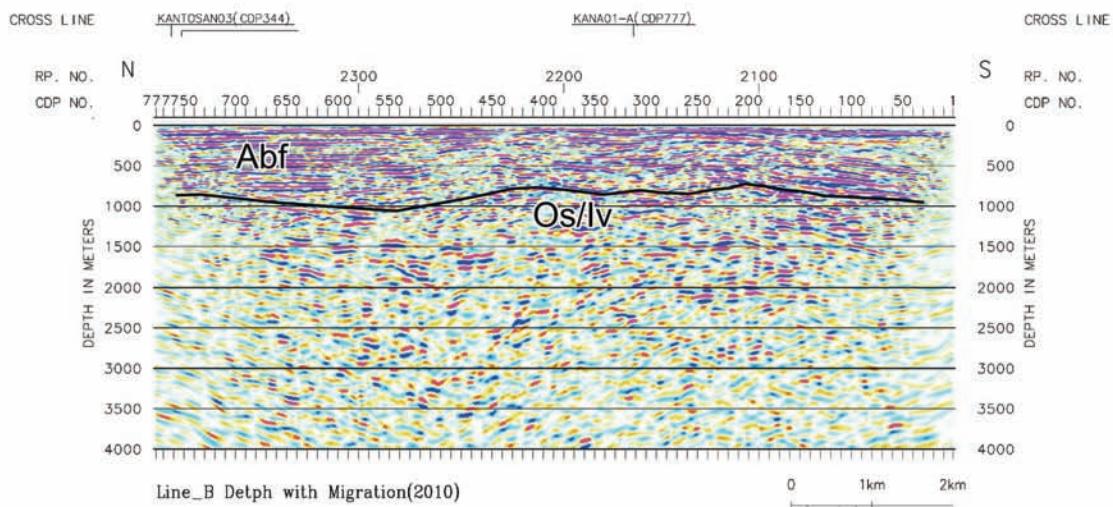


図 52 2001 神奈川県地下構造調査 B 測線マイグレーション後深度変換断面の地質学的解釈。
Abf：足柄平野充填堆積物、Os/Iv：箱根火山噴出物および伊豆弧の第三系火山碎屑岩。

c) 2003 大都市圏地殻構造探査 相模測線

再解析によって得られた、CMP 重合法と CRS 重合法による深度変換断面、屈折トモグラフィー法によって得られた速度構造をもとに、地質学的な解釈を行う。測線東部の箱根火山南麓部分では地表では、箱根火山噴出物が分布する。屈折トモグラフィーによる速度構造は、箱根火山下で 5km/s の速度構造が全体として浅くなる。4~5km/s の等速度線は CMP300 付近で西側低下の低下を示す。変位量は約 1km で、この西側では反射層に富む領域が深さ 2km 程度まで分布するが、段差を隔てて東側では分布しない。これらの反射面は背斜上の構造をなし、横ずれに伴う花弁状構造と判断される。構造性の不連続から高角西傾斜の横ずれ断層が推定され丹那断層の主部が通過するものと判断される。

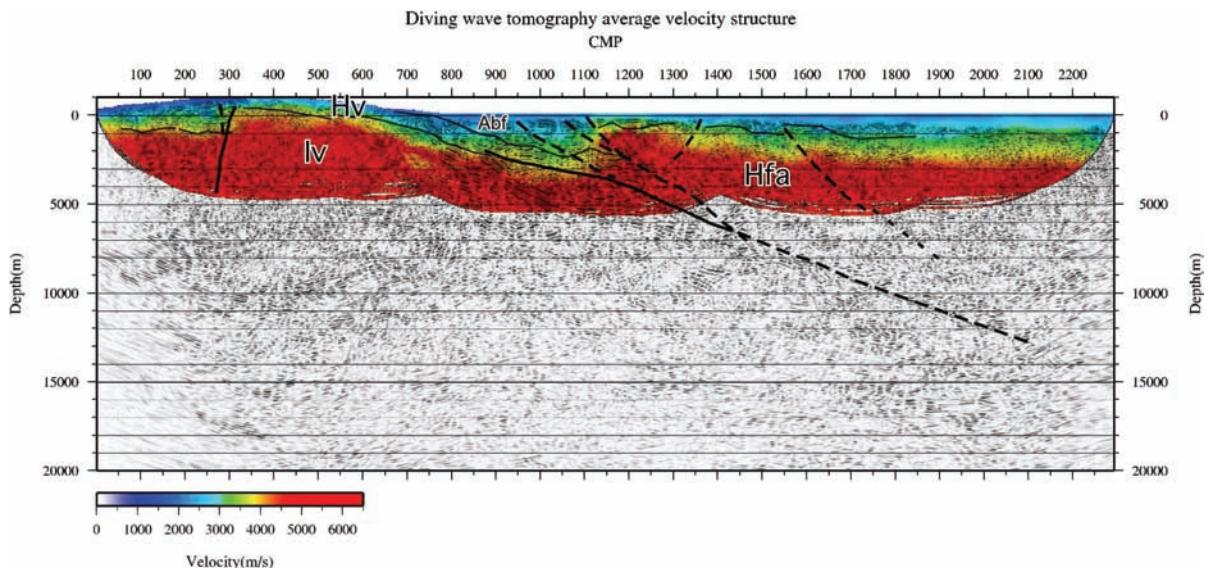


図 53 2003 大都市圏地殻構造探査・相模測線のマイグレーション後深度変換断面と屈折トモグラフィーによる速度構造および地質学的解釈。HV: 箱根火山噴出物、IV:伊豆弧の上部地殻、Hfa:本州弧の前弧堆積物および付加体、Abf:足柄平野充填堆積物、太い黒実線:断層、太い黒破線:推定断層、細い実線:地質ユニット境界。

CMP1200 から 2000 までの測線中央部では、約 30° の東傾斜でみかけ上東に傾斜する反射面群が分布する。これらの反射面群はフィリピン海プレート上面からのものと考えられている (Sato et al., 2005)。このプレート境界断層は 6km 以浅でいくつかの断層に分岐し、複雑な形状をなす。国府津-松田断層周辺では、CMP1100 付近で東側の東傾斜の反射面と西側のほぼ水平な反射面の境界として認識できる。ややリストリックな形状を示し、浅部では傾斜 45°、深さ 3km 以深は不明瞭であるが低角化しつつプレート境界断層に接合するものと推定される。屈折トモグラフィー法による速度構造は、反射断面からの推定と調和的でこの断層に沿って、深さ 500m にある 4km/s の等速度線が足柄平野の軸部では深さ 3km となる。反射面の不連続から、国府津-松田断層から深さ 2km 付近で分岐する傾斜 30° の断層と、CMP950 付近に伸びるより西側の断層が推定される。この断層の 1km 以浅では東翼緩傾斜の背斜構造を伴う。大磯丘陵下と足柄平野下の速度構造は大局的には西に傾斜した面で低速度領域に推移しており、このことはこの間の構造が単に一つの衝上断層だけではなく、複数の断層に境されたスラストシートの分布によって、大局的には西傾斜の速度境界

が形成されていることを示唆する。大磯丘陵下には、上部中新統の前弧堆積物が分布する。CMP1550付近では、ブーゲ異常のデータから(駒沢, 1985)、藤の木-愛川線の南方延長の向斜状の構造が追跡される。速度構造からも西側で V_p 4km層が低下する構造を示しており、この東側に藤の木-愛川線の南方延長の構造が推定される。

d) 2003 関東山地東縁測線 松田測線

再解析によって、CMP重合後マイグレーション深度断面図とMDRS重合後マイグレーション深度断面図を得た。主としてCMP重合後マイグレーション深度断面図に基づいて地質学的な解釈を行う。露出する箱根古期外輪山溶岩類の分布と傾斜から、その上面の層準(OS、図54)を推定した。これより上位では反射面に富む領域が広がり、この層準は下限となっている。この反射面に富む地層は、足柄平野を充填した概ね20万年以降の堆積物である。国府津-松田断層は、CMP法反射断面では向斜状の傾斜変換点に推定した。この部分は、変動地形学的に推定される断層トレース(宮内ほか, 2009)と一致する。平野充填堆積物中には顕著な変位を示す断層は分布しない。国府津-松田断層の上盤側は、地質構造からは北東傾斜が推定されるが、反射断面では南西傾斜の反射イベントが卓越しており、重合速度についてさらなる検討が必要である。このため断層の傾斜については、検討を継続する必要がある。

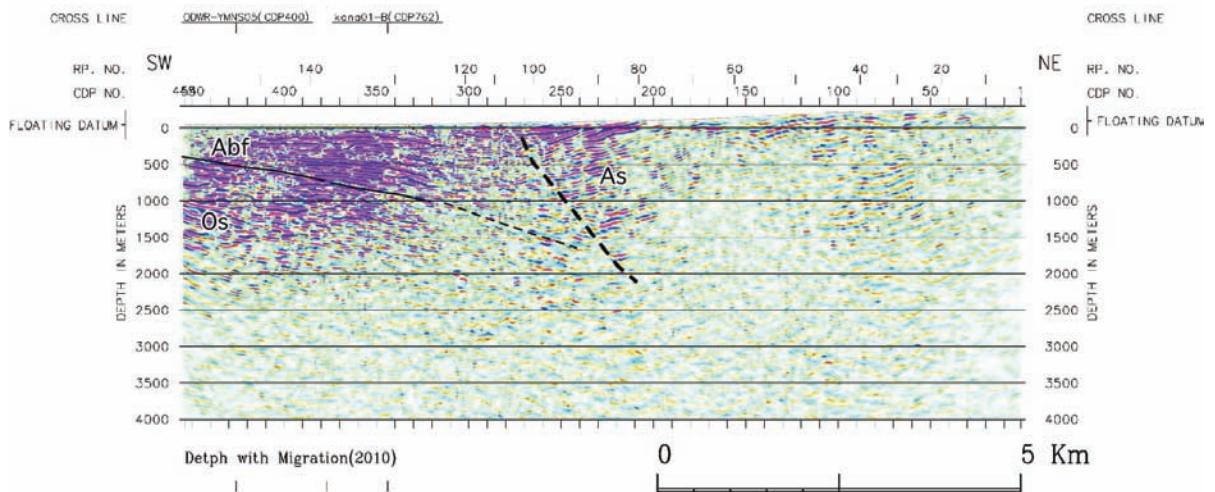


図54 2003 関東山地東縁測線・松田測線、マイグレーション後深度変換断面。0s: 箱根古期外輪山溶岩、As: 足柄層群、Abf: 足柄平野充填堆積物、太い黒波線: 推定断層、細い黒実線と破線: 地層境界。

e) 2005 小田原-山梨測線 足柄区間

マイグレーション後の深度変換断面にもとづいて、地質構造の検討を行った(図55)。測線北端部には、丹沢層群が露出し、その南端は北傾斜の神縄断層によって限られる。その南には足柄層群(Ag)が分布し、その南端は近年のボーリングによって、その存在が明らかになった丸山断層が分布する(笠原ほか, 2004; 林ほか, 2010)。丸山断層の地下形状は、地表位置と CMP650-550まで連続する反射面が消滅する部分をつないで推定した。大都市圏大

震災軽減化特別プロジェクトの一環として掘削された山北観測井でのボーリング調査によって、深さ 2km までの層序が明らかになっている(林ほか, 2007; 津久井ほか, 2006)。CMP450 より南側の箱根古期外輪山溶岩の層準の位置については、交差する反射法地震探査測線の結果と調和的になるよう留意して判断した。CMP400 より北側で、箱根古期外輪山溶岩の層準が浅くなる。これらの隆起運動を引き起こした断層の有無について今後検討する必要がある。

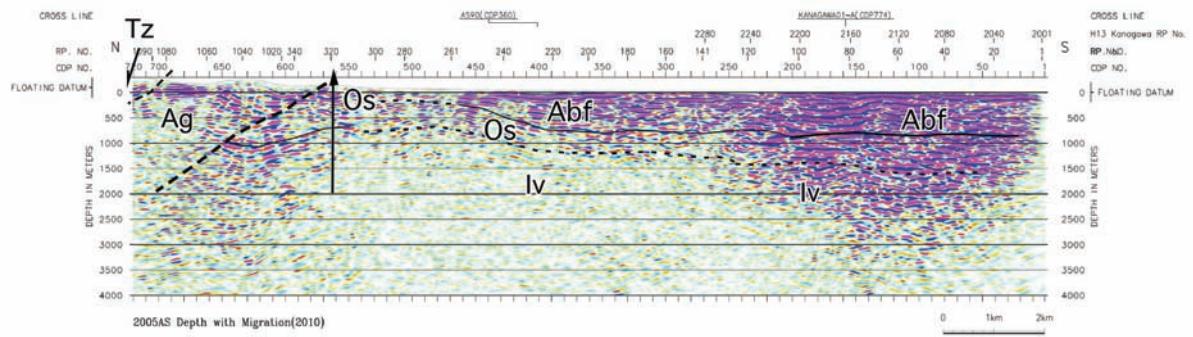


図 55 2005 小田原-山梨測線・足柄区間のマイグレーション後深度変換断面。Tz: 丹沢層群、Ag: 足柄層群、Iv: 伊豆弧の上部地殻、Os: 箱根古期外輪山溶岩流、Abf: 足柄平野充填堆積物。三角形と太実線: 山北観測井、太い黒実線: 断層、細い黒実線・破線: 地層境界。

10) 三次元断層モデルの構築

平成 21 年度の相模灘横断地殻構造探査の結果と、再解析を行った足柄平野周辺の反射法地震探査結果、既存の反射法地震探査断面などをもとに、震源断層の形状のモデル化を行った(図 56)。国府津-松田断層は基本的には、プレート境界から分岐した断層であり、断層の下限は、プレート境界面との交線となる。プレート境界の形状は、大都市圏大震災軽減化特別プロジェクトの一環として実施した地殻構造探査の成果をもとに推定した。プレート境界面に接合するまでの断層の形状を矩形として、表現した(図 56)。これらは、形状のみを考慮したものであり、地球科学的な広範な情報をとりいれて、今後より精度の向上を計る。

(e) 結論ならびに今後の課題

神縄・国府津-松田断層帯の三次元断層形状モデルを作成するために、既存の反射法地震探査データの再解析を行った。異なる仕様で取得されたデータを統一的な手法と、近年開発された屈折トモグラフィー法による速度構造解析・CRS (Common Reflection Surface) 法などの手法で再解析することにより、断層形状を高い精度で明らかにするための基礎資料とした。平成 13 年度 (2001) 神奈川県地下構造調査 Line-A は CRS 法によって、平成 15 年度 (2003) 相模湾測線については、屈折トモグラフィー法による速度構造解析によって、活断層の地下形状を推定する上で、有効な成果が得られた。両測線とも、中角度で傾斜する国府津-松田断層の西側に、東傾斜の逆断層が形成されている。これらの再解析結果と、

既存の反射法地震探査断面をもとに、三次元断層形状モデルを作成した。

今後、さらに断層形状の検討を行うとともに、変動地形学的・地質学的資料を総合して、断層モデルを構築する。

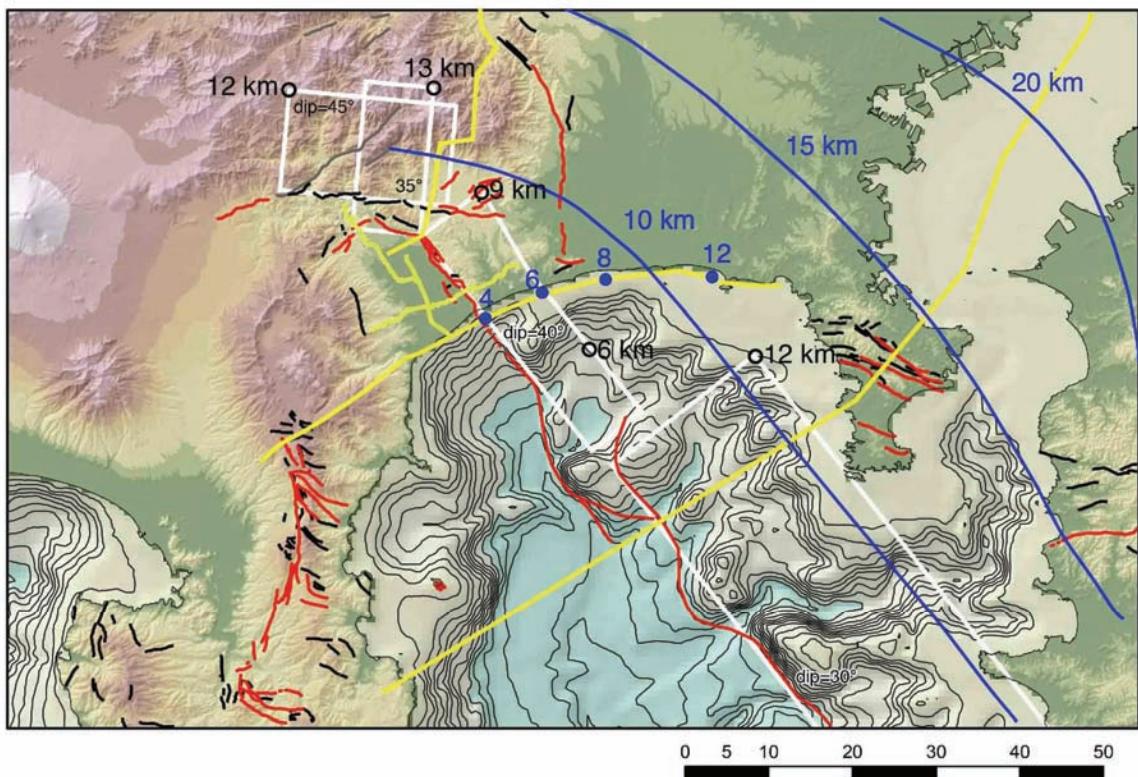


図 56 神縄・国府津-松田断層の三次元形状モデル。断層は白枠の矩形で平面に投影。これらの断層系は、プレート境界断層からの分岐断層であるため、プレートの深さを Sato et al. (2005)により等深度線(青線)で表現。青丸と数値は、相模測線沿いのフィリピン海プレートまでの深度。黒丸と数値は、プレート境界と接する場所の深度。黄色線は検討対象とした反射法地震探査測線。赤線、活断層。

(f) 引用文献

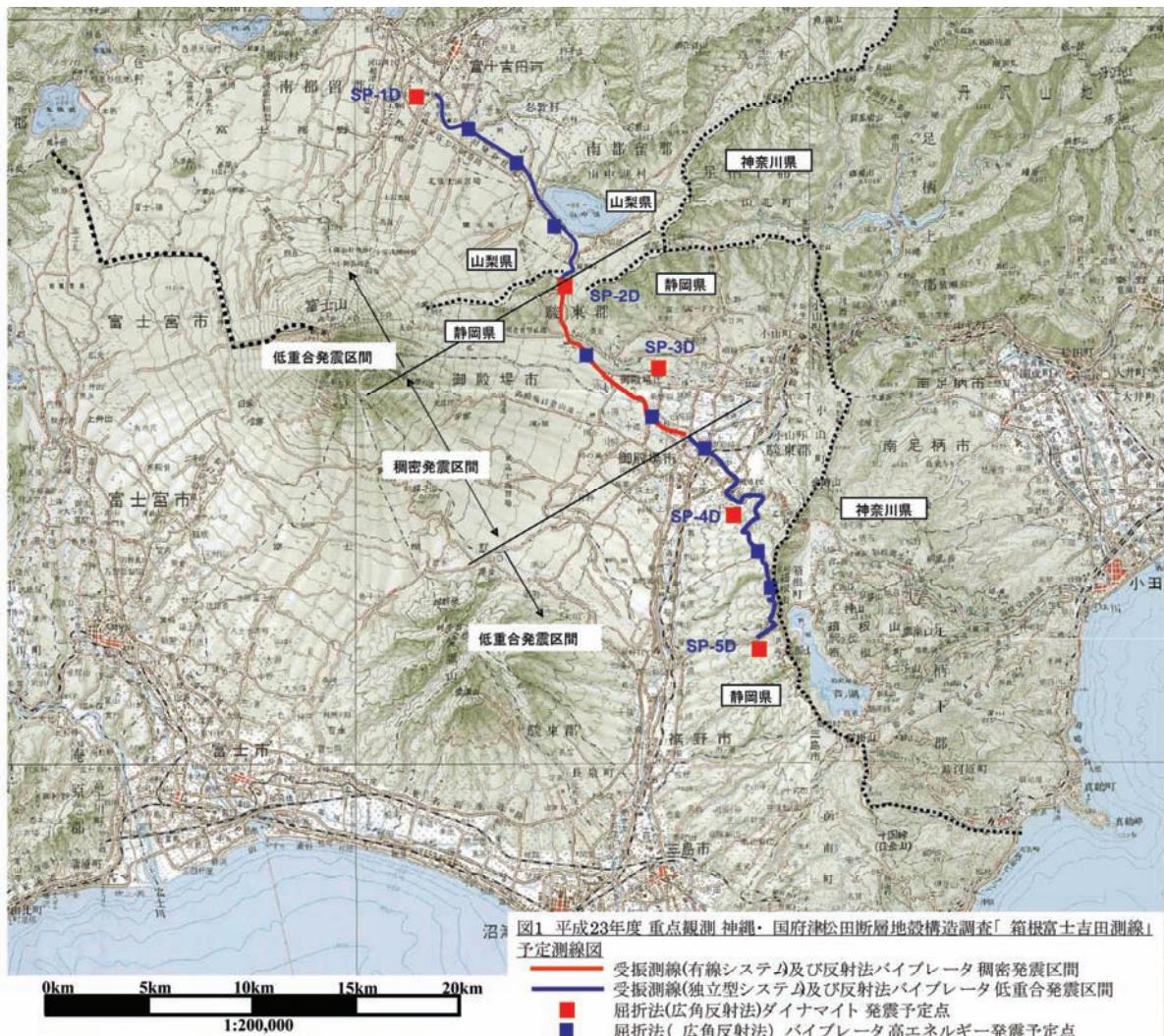
- 1) 林 広樹・伊藤谷生・上杉 陽・笠原敬司・関口涉次・高橋雅紀・津久井雅志・松本拓己・山水史生・柳沢幸夫: 伊豆衝突帯北東部における大深度陸上掘削の成果. 月刊地球, 号外, 57, 140-147, 2007.
- 2) 林 広樹・中満隆博・上杉 陽・笠原敬司・関口涉次: 神奈川県西部, 山北町丸山における表層ボーリング調査—山北南高感度地震観測井により示唆された第四紀断層の解明に向けて, 防災科学技術研究所研究報告, 77, 19-30, 2010.
- 3) Jager, R., Mann, J. Hocht, G., & Hubral, P. :Common-reflection-surface stack: Image and attributes, Geophysics, 66, 97-109, 2001.
- 4) 関東地方土木地質図編纂委員会:関東地方土木地質図および説明書, (財) 国土開発技

術センター, 768p., 1996.

- 5) 笠原敬司・林 広樹・関口涉次: 伊豆一丹沢衝突域に未発見A級活断層の存在確実－神奈川県山北町における2,000 m掘削速報－. 日本地質学会第111年学術大会講演要旨, S-4, 2004.
- 6) 神奈川県:「平成15年度 地震関係基礎調査交付金 神縄・国府津-松田断層帯に関する調査」, 76p., 2004.
- 7) 駒澤正夫:関東地域重力図(ブーゲー異常図), 特殊地質図24, 地質調査所, 1985.
- 8) Mann, J., Schleicher, J., and Hertweck, T. : CRS Stacking - A Simplified Explanation, In Extended abstracts, 69th Conf. Eur. Assn. Geosci. Eng., B044, 2007.
- 9) 佐藤比呂志・平田 直・伊藤谷生・岩崎貴哉・纈纈一起・笠原敬司・伊藤 潔:大深度弾性波探査 3. 相模測線における地殻構造探査 1. 相模湾岸地殻構造探査(相模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14年度)成果報告書, 88-137, 2003.
- 10) 佐藤比呂志・平田 直・伊藤谷生・岩崎貴哉・纈纈一起・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.
- 11) Sato, H., Hirata, N., Koketsu, K., Okaya, D., Iwasaki, T., Ito, T., Kasahara, K., Ikawa, T., Abe, S., Kawanaka, T., Matsubara, M., Kobayashi, R., Harder, S. : Earthquake source fault beneath the Tokyo, *Science*, **309** (5737), 462-464, 2005.
- 12) 佐藤比呂志・平田 直・岩崎貴哉・纈纈一起・伊藤 潔・伊藤谷生・笠原敬司・加藤直子:大深度弾性波探査 3.1.3. 関東地殻構造探査(小田原-山梨測線), 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17年度)成果報告書, 98-182, 2006.
- 13) Schleicher, J., Tygel, M., dan Hubral, P. : Parabolic and hyperbolic paraxial twopoint traveltimes in 3d media, *Geophysical Prospecting*, **41**, 495-513, 1993.
- 14) 白石和也・阿部 進・岩崎貴哉・斎藤秀雄・佐藤比呂志・越谷 信・加藤直子・新井 隆太・川中 卓:屈折初動走時トモグラフィ解析における初期モデルランダム化による解の信頼性評価, *物理探査*, **63**, 345-356, 2010.
- 15) 津久井雅志・山崎 優・松井智之・小山田浩子・上杉 陽・林 広樹・柳沢幸夫・笠原敬司: 伊豆弧北端の火山岩類の記載と地殻構造－山北南大深度観測井の箱根火山, 先箱根火山岩類から－. 地質調査研究報告, 57, 197-215, 2006.
- 16) 矢野 享:大磯丘陵南部地域の層序とその地質年代および堆積環境, 静岡大学地球科学研究報告, 12, 191-208, 1986.

(3) 平成23年度業務計画案

伊豆衝突帶の西側のプレート境界の位置を明らかにするため、箱根火山を横切り富士山東麓を横切る屈折法地震探査を実施する(図57)。測線長は、34 km。地表は弾性波の減衰の大きな火山噴出物で覆われるため、ダイナマイト・バイブロサイズの集中発震などの高エネルギー震源を使用する地下構造探査とする。



国土地理院発行1:200,000地勢図(東京, 横須賀, 甲府, 静岡)に加筆

図 57 平成 23 年度 重点観測 神縄・国府津-松田断層帯地殻構造調査「箱根-富士吉田測線」予定測線図。受振点間隔は 50m。680 チャネルを使用。図中の ■ が高エネルギー発震点。