

3. 2 断層帯の三次元的形状・断層帯周辺の地殻構造の解明のための調査観測

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 断層帯の三次元的形状・断層帯周辺の地殻構造の解明のための調査観測

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人京都大学防災研究所	教授	岩田 知孝
国立大学法人京都大学防災研究所	教授	橋本 学
国立大学法人京都大学大学院理学研究科	教授	竹村 恵二
国立大学法人富山大学大学院理工学研究部	准教授	楠本 成寿
公立大学法人大阪府立大学理学系研究科	准教授	伊藤 康人
国立大学法人京都大学防災研究所	准教授	遠田 晋次

(c) 業務の目的

上町断層帯の地震断層面形状と断層帯周辺の地殻構造の解明を目的とする。既存の反射法地震探査、ボーリング調査等の状況を把握するとともに、既存の長測線地震探査の再解析とこれまで人工地震探査が行われてきていない地域での地震基盤までの反射法探査を行う。InSAR解析による面的な地盤変動情報を得て、広域な地震基盤形状を得る。断層近傍等のボーリング調査や地震探査結果から、変形構造の空間分布や変形様式等を明らかにする。断層近傍変形構造の空間分布や変形様式を把握する。

(d) 3ヵ年の年次実施業務の要約

1) 平成22年度：

上町断層帯周辺で行われた長大展開の反射法地震探査記録に屈折トモグラフィ解析等を行い、この地域の断層形状と詳細な速度構造についての情報を取得した。これまで反射法探査が行われていない、大阪府南部地域においてP波速度構造探査を行い、地震基盤までのプロファイルと周辺の探査結果等との比較による堆積構造、断層面形状に関する情報を得た。InSAR解析による堆積盆地下の広域地震基盤面形状の把握に着手した。断層近傍の反射法地震探査結果やボーリング資料等を収集整理し、断層近傍の変形構造の把握のための検討図面を作成した。既存地質コアの再分析などの現地確認調査を実施した。それに関係する断層近傍の地盤情報調査結果取りまとめと断層変形構造の数値解析の資料作成を実施した。地表面に達しない基盤岩の正断層あるいは逆断層運動による堆積層の変形シミュレーションを行い、基盤の断層運動と堆積層の変形パターンについて検討を行った。

2) 平成23年度：

大阪堆積盆地下の地震基盤面形状の面的な把握のためのInSAR解析を継続する。平成22年度に行われた反射法地震探査結果やボーリング資料を整理し、それまでの解

析結果と統合して、断層の変形による構造形成の総合解析と震源断層の三次元的な形状モデルのプロトタイプを提案する。上町断層北部において表層部の地盤構成と撓曲形状を把握するためのボーリング調査を行うとともに、既存ボーリング情報を活用して断層帯浅部の変形ゾーン推定を試みる。

3) 平成24年度：

前年度までの表層部の地盤構成と撓曲形状を把握するためのボーリング調査試料・資料を整理し、InSARによる基盤形状情報、地震探査結果、モデルシミュレーション等の解析結果を踏まえ、断層の変形による構造形成の総合解析と震源断層の三次元的な形状モデルを提案する。既存ボーリング情報を活用して断層帯浅部の変形ゾーン推定結果をまとめる。

(2) 平成22年度の成果

(a) 業務の要約

1) 長測線探査記録の再解析

上町断層をはじめとする近畿圏の内陸活断層については、これまで多くの反射法地震探査が実施されている。本業務ではこれらの既存調査のうち、上町断層帯及び周辺の活断層帯を対象とし、且つ長大展開で取得された反射法地震探査記録について、屈折トモグラフィ解析を中心とする再解析を実施した。この結果、上町断層帯及び周辺の活断層帯について、その形状と詳細な速度構造が明らかとなった。

2) 地震波反射法探査

基盤構造の情報の少ない大阪平野南部地域である泉大津市大津川－忠岡町－岸和田市に至る地域において、上町断層が存在すると推定される位置を挟んで比較的長い反射法地震探査を実施し、反射構造断面を得て上町断層の存在位置の確認および広範な地下構造の把握を目的とした探査を行った。測線南東部において基盤岩上面に約350mの鉛直落差が見られた。これは上町断層帯の南端部にあたる久米田池断層に相当すると考えられる。それより更に東（上町断層帯上盤側）の基盤岩上面に100m程度の小規模な鉛直落差が見られ、その直上の堆積層も変形しているようであるが、深度200～300m以浅の堆積物には変形が見られない。測線の北西部で見られる基盤岩の大きな盛り上がりは、既存の大阪湾岸測線と比較することにより、重力探査等より推定される基盤岩構造図に見られる小丘構造に対応した構造と考えられる。この盛り上がりの近傍には約200mの基盤岩の鉛直落差を示す不連続構造が見られた。湾岸測線にも基盤岩落差が見られており、重力より推定される基盤岩構造よりこれらの構造が連続して可能性がある。ただし、堆積層は基盤岩上面の構造に沿って緩やかに傾斜しているが、堆積層の不連続は確認できない。

3) InSAR解析

人工衛星搭載合成開口レーダー（以下SAR）を用いて、大阪平野の地盤変動を面的に把握し、その空間分布から基盤形状を推定する。平成22年度は、陸域観測技術衛星「だいち」搭載のPALSAR画像を用いて解析を行った。解析には、2007年10月から2010年10月まで南行軌道からの15回の観測画像を用い、軌道間距離の短いペアについて干渉画像を作成し、こ

れらをスタッキングすることにより平均変動速度図を得た。その結果、観測期間中の京阪神地域の変動は1 cm/年以下であるが、京都盆地の南部に隆起、有馬-高槻構造線に沿った沈降などが顕著に見られた。大阪平野においては、淀川河口周辺と大阪府庁東側の沈降が目立つ。なお、今年度の解析においては地形に依存した大気遅延誤差の補正を施していないため、地形との相関も認められる。

4) 変形ゾーン推定

上町断層帯の地震断層面形状と断層帯周辺の地殻構造を解明するため、反射法地震探査結果やボーリング資料等を収集整理し、断層近傍変形構造の空間分布や変形様式等を明らかにすることを目的にした。そのために、反射法地震探査結果やボーリング資料等を収集整理した（KG-NET・関西地盤協議会、2007などを利用）。断層近傍の変形構造の把握のため、検討図面を作成した。既存地質コアの再分析などの現地確認調査を実施した。断層近傍の地盤情報調査結果取りまとめを行った。断層変形構造の数値解析の資料作成等を実施した。

5) 構造形成解析

個別要素法に基づく粒状体挙動解析プログラムPFC 2D (Particle Flow Code 2D)を用い、地表面に達しない基盤岩の正断層あるいは逆断層運動による堆積層(未固結堆積層)の変形シミュレーションを行った。その結果、基盤の断層運動が、逆断層運動なのか正断層運動なのかによって堆積層の変形パターンが異なることが示された。断層面が地表に達せず、地震探査等により堆積層の変形のみ捉えられている場合では、個別要素法を用いたシミュレーションは、一定の評価や解釈、あるいは震探解釈の検証に応用できる可能性のあることが示された。

(b) 業務の成果

1) 長測線地震探査記録の再解析

a) はじめに

本業務では、文部科学省による5ヵ年プロジェクト「大都市大震災軽減化プロジェクト」の一環として実施された大都市圏地殻構造調査のうち、平成16年度に近畿地方で実施された「大阪-鈴鹿測線」及び「新宮-舞鶴測線」のデータを用いた。図1に広域の測線図を示す。これらの測線のうち再解析対象としたのは、図2に示した大阪平野内の区間である。これらの区間上には、上町断層の他、枚方撓曲、交野断層、有馬高槻断層帯真上断層が位置する。以下に両測線の概要をそれぞれ記す。表1には再解析対象区間に関わるデータ取得仕様一覧を示した。

i) 平成16年度大阪-鈴鹿測線

本調査測線は、平成16年度に東京大学地震研究所が主体となって実施した、大阪平野から水口丘陵、鈴鹿山地を越えて伊勢平野に至る全長約135kmの大規模地殻構造探査測線である。震源には大型バイブレータ及び大薬量発破が用いられ、地殻中部に至る広域の地殻構造が明らかにされた。本業務では、同測線のうち、大阪市此花区舞洲緑地から淀川沿いに大阪平野、交野丘陵を横断し京都府宇治田原町と城陽市の境界付近に至る全長53km区間(反射法大阪測線)を解析対象とした。同区間では大型バイブレータを震源とする稠密反射法データが取得されている。本業務ではこれら稠密反射法発震記録及び同区間内の屈折法集

中発震点の発震記録を使用した。

図3及び図4に発震記録の例を示す。図3は上町断層西側（下盤側）、図4は枚方撓曲東側（上盤側）の発震記録であり、基盤構造の起伏を反映した複雑な初動走時が認められる。尚、一般的に基盤からの屈折波は振幅が弱く初動走時の読取には慎重を要した。

ii) 平成16年度新宮－舞鶴測線

本調査測線は、平成16年度に京都大学防災研究所が主体となって実施した、紀伊半島南部和歌山県新宮市から紀伊山地を越え、金剛山地の東側及び生駒山地の稜線に沿って北上し、大阪平野北東部を縦断し、北摂山地、亀岡盆地、丹波山地を越えて京都府舞鶴市に至る全長約220kmの大規模地殻構造探査測線である。震源には大型バイブレータ及び大薬量発破が用いられ、近畿地方を南北に縦断する広域の深部地殻構造が明らかにされた。本業務では、同測線のうち、大阪府交野市と生駒市の境界付近から天野川沿いに北上し、淀川を横断して高槻市市街地東側を経て北摂山地南縁部に至る全長22.5km区間（反射法生駒高槻測線）を解析対象とした。同区間では大型バイブレータを震源とする稠密反射法データが取得されている。なお、本調査測線では市街地を多く含むため、一部区間で大型バイブレータに代わりミニバイブレータが使用された。本業務ではこれら稠密反射法発震記録及び同区間内の屈折法集中発震点の発震記録を使用した。

図5及び図6に発震記録の例を示す。図5は真上断層南側、図6は交野断層南側（上盤側）の発震記録である、基盤の落ち込みを反映した初動の遅れが認められる。なお、大阪鈴鹿測線と同様に、基盤からの屈折波の振幅は微弱であり、初動走時の読取には慎重を要する。

b) データ解析

i) 屈折法データ解析

再解析対象区間内の全ての発震記録を用いて、図7の屈折法処理フローに従って、屈折トモグラフィ解析を行う。ここで用いられる解析パラメータは表2に示される。本解析では、想定される構造傾斜方向とデータ取得ジオメトリ（測線の屈曲、オフセット長）を考慮して、図8の青線で示す投影測線を設定してTurning-rayを仮定した初動走時トモグラフィにより速度構造の推定を行なう。

Turning-rayを仮定したトモグラフィ解析手法：

[1] 速度モデルに対する屈折波線及び走時計算

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。

[2] 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。

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

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。

[3] 初期モデルランダム化によるトモグラフィ解析結果の信頼性評価

屈折トモグラフィ解析結果の信頼性を評価す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確度解析をおこなう。図9にその概念図を示す。ある条件下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ィ解析を実施し、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バラつき度合いを示す標準偏差分布が得られる。これら二つの情報は、トモグラフィ解析による速度構造モデルとその確からしさの指標として提供される。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コストが増大するものの、トモグラフィ解析結果に対する解の信頼度および安定度を示すための有効な手段である。

[4] 平均化速度モデルを初期モデルとするトモグラフィ再計算の実施

初期モデルランダム化による速度モデルおよび信頼度の推定では、多数の初期モデルについてトモグラフィ解析を行い、全ての結果の平均化により統計的最尤な速度モデル(平均速度モデル)と確からしさの空間分布(標準偏差分布)が提供される。一方で、速度構造が急変するような場所では初期モデルへの依存性が大きく、初期値毎に推定される速度構造がバラつきを持つことがある。その結果、平均化により速度構造は平滑化されて境界が不明瞭となり、同時にその周辺では標準偏差値が高くなると考えられる。そこで本解析では、初期モデルランダム化により得られた平均速度モデルを尤もらしい初期モデルとして使用し、再度トモグラフィ解析を実施することで速度構造を再決定することとした。図10に今回採用した二段階のトモグラフィ解析の手順を示す。本解析では、平均速度モデルを尤もらしい初期モデルとして使用し再度トモグラフィ解析を行うことにより、平均化により平滑化されて曖昧となった速度境界が復元されることが期待されるので、この解析で得られた速度構造モデルを最終速度モデルとして採用することとした。

ii) 解析及び結果

解析に用いた初動読取結果を図11（大阪－鈴鹿測線）、図12（新宮－舞鶴測線）に示す。解析パラメータは、各測線についてそれぞれ以下のものを使用した。解析結果のうち、初期モデルランダム化による平均速度モデルによる結果及び標準偏差分布を図13、図14に、平均速度モデルを初期モデルとして再度トモグラフィ解析を行い得られた最終速度モデルを図15、図16に示す。

iii) 反射法データ解析

反射法データ解析で標準的に用いられるCMP重合法では水平成層構造や単傾斜構造を仮定しているために、各地震記録に含まれている短波長の不規則構造変化あるいは速度不均質に関わる有意な情報の一部が欠損する可能性がある。これに対し重合前マイグレーションでは、重合による変形を受ける前の地震記録に対して反射波列を地下の実際の反射点にマッピングするため、高精度なイメージが得られる可能性が大きい。特に重合前深度マイグレーションでは、予め速度構造モデルを仮定し、波動伝播を計算するため、速度構造の変化に柔軟に対応することができる。逆断層及び岩塩構造の様な速度不均質が高い場合においても、正しい速度モデルを前提とするならば、分解能の高い地震記録を得ることが可能である。

本業務では、上記の屈折トモグラフィ解析により、解析対象領域における高精度の速度分布が推定されていることから、これを利用して重合前深度マイグレーションを適用し、断層周辺の詳細形状の推定を試みる。重合前マイグレーションの基礎概念については図18上段に示した。解析は図17のデータ処理フローに従った。本データ解析においては、直線状の構造方向を設定し、構造方向以外の側方構造変化は無視できるものとして処理をおこなった。図18下段には、仮定する構造方向を’Imaging Direction’として定義し、実際の屈曲した測線配置に対して、2.5次元的な重合前深度マイグレーション処理をおこなう概念図を示した。図19には、本データ解析におけるイメージング対象領域および仮定する構造方向(図中の’Imaging Direction’)を示した。ここでは解析対象領域を、屈折トモグラフィ解析の誤差分布及び想定される構造方向に対する受振点発震点分布のアジマスを考慮して、大阪鈴鹿測線については上町断層を横断する西側の19km区間に限定した。新宮舞鶴測線については再解析対象全域を処理対象とした。

図20、図21に大阪鈴鹿測線、新宮舞鶴測線それぞれについて重合前深度マイグレーション結果と処理に用いた速度構造モデルを併せて示した。なお、用いた速度構造モデルは屈折トモグラフィ解析結果を平滑化したものである。ただし、基盤上面のイメージングが最も明瞭となるよう、速度分布全体を89%に減じたものを使用した。これは、ターニングレイを仮定する屈折トモグラフィ解析では、基盤上面における上部の堆積層との間の階段的な速度コントラストが再現しきれず、実際の基盤上面深度より浅い部分に高速度の染み出しが生じることに対処するためである。重合前深度マイグレーション処理の処理パラメータは表3のとおりである。図20の大阪鈴鹿測線において中程に見られる高速度領域の盛り上がり、上町断層に対応している。上町断層によって形成された堆積層内の撓曲構造がイメージングされている。地震基盤内の速度不連続や速度の逆転といった構造までが十

分に見ることができているわけではないが、周辺の反射断面情報や、地表付近での情報をあわせて、上町断層の幾何学的形状の拘束に今後用いる。

表 1 再解析対象区間 データ取得仕様一覧

調査名	平成16年度大阪－鈴鹿測線	平成16年度新宮－舞鶴測線
再解析対象区間	大阪市此花区－京都府城陽市	大阪府生駒市－大阪府高槻市
再解析対象区間測線長	53km	22.5km
震源系パラメータ		
震源	大型バイブレータ (HEMI,Y2400) ミニバイブレータ	大型バイブレータ (HEMI,Y2400) ミニバイブレータ 大薬量発破 (200kg)
バイブレータ台数	4台 (標準)	4台 (標準)
発震区間長	50km	20km
標準発震点間隔 (稠密発震)	100m	100m
総発震点数	345点	176点
スイープ長	反射法稠密発震：20s 屈折法集中発震：24s	反射法稠密発震：20s 屈折法集中発震：24s
スイープ周波数	反射法稠密発震：6-40Hz 屈折法集中発震：6-30Hz	反射法稠密発震：6-40Hz 屈折法集中発震：6-30Hz
スタック回数	反射法稠密発震：12回 屈折法集中発震：100～200回	反射法稠密発震：12回 屈折法集中発震：60～100回
受振系パラメータ		
受振器	SM-7 10Hz	SM-7/SM-24 10Hz
受振器数/受振点	3個組または9個組	3個組または9個組
受振測線長 (再解析対象範囲)	53km	22.5km
展開パターン	反射法稠密発震：対称中点展開 屈折法集中発震：固定展開	固定展開
展開長 (再解析対象範囲)	反射法稠密発震：20km 屈折法集中発震：53km	22.5km
受振点間隔	50m	50m
受振点数 (再解析対象範囲)	1068点	464点

記録系パラメータ		
レコーダ	GDAPS-4A、MS2000D	GDAPS-4A
サンプルレート	4ms	4ms
記録長（相互相関後）	反射法稠密発震：16s 屈折法集中発震：20s	反射法稠密発震：16s 屈折法集中発震：20s 大薬量発破：50s
プリアンプゲイン	30dB（GDAPS-4A） 31dB（MS2000D）	30dB
相互相関	Correlation After Stack	Correlation After Stack
Diversity Editパラメータ	反射法稠密発震：W=36s, $\alpha=3.0$ 屈折法集中発震：W=44s, $\alpha=3.0$	反射法稠密発震：W=36s, $\alpha=3.0$ 屈折法集中発震：W=11s, $\alpha=3.0$
チャンネル数 （再解析対象範囲）	反射法稠密発震：400（標準） 屈折法集中発震：715 - 1068	486

表2 屈折トモグラフィ解析パラメータ一覧

	大阪－鈴鹿測線	新宮－舞鶴測線
解析区間長（投影測線長）	46km	19km
インバージョンパラメータ		
格子間隔	水平方向：100m 鉛直方向：50m	水平方向：100m 鉛直方向：50m
格子数	水平方向：460 鉛直方向：80m	水平方向：196 鉛直方向：80m
格子上の走時評価間隔	水平方向：10m 鉛直方向：5m	水平方向：10m 鉛直方向：5m
通過する格子点からの反復修正 有効範囲	100m	100m
速度分布の反復修正回数	15回	15回
反復修正時の修正係数許容範囲	±30%	±30%
初期モデル数	96個	96個
初期モデルランダム化における速度 選択範囲	深度 0m 5000m	速度 1500m/s - 3000m/s 4000m/s - 6000m/s
(*）モデル生成過程においては、鉛直 方向単調増加を条件とする		
平均速度モデルを初期モデルとする 再解析におけるインバージョン パラメータ	上記のインバージョン パラメータと同一	上記のインバージョン パラメータと同一

表3 重合前深度マイグレーション解析パラメーター一覧

	大阪－鈴鹿測線	新宮－舞鶴測線
解析区間長（投影測線長）	19km	19.1km
投影測線方向	N63.7°E	S24°E
マイグレーションパラメータ		
アルゴリズム	キルヒホフ積分型	キルヒホフ積分型
出力格子間隔	水平方向：25m 鉛直方向：5m	水平方向：25m 鉛直方向：5m
出力格子数	水平方向：761 鉛直方向：540	水平方向：765 鉛直方向：399
走時計算における波線最大射出角度	40°	40°
最大アパーチャ距離	2000m	2000m
最大アパーチャ角度	80°	80°
最大オフセット距離	4000m	4000m
ストレッチミュート	2.0倍	2.0倍
速度モデル	初期モデルランダム化による屈折トモグラフィ解析における平均解を平滑化したもの	初期モデルランダム化による屈折トモグラフィ解析における平均解を平滑化したもの

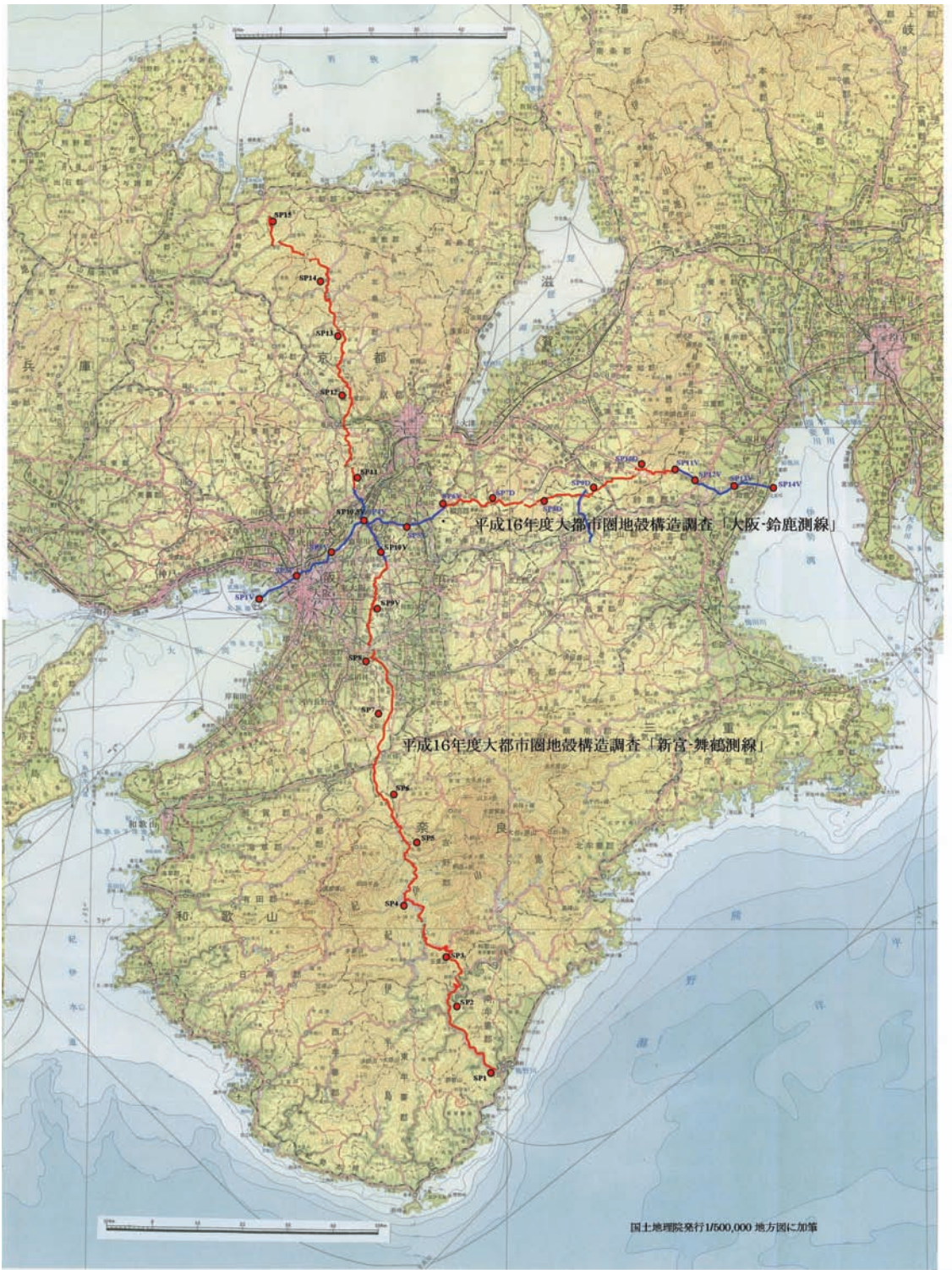


図1 既存調査測線概略図



図2 再解析対象区間

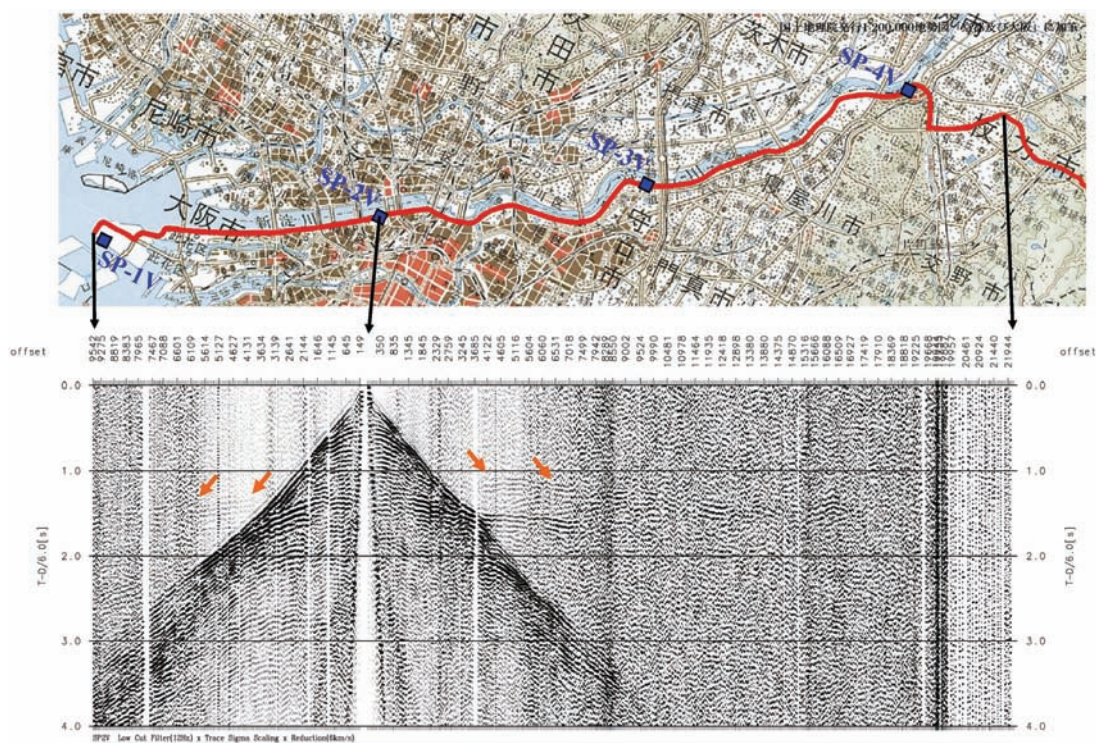


図3 発震記録例。大都市圏地殻構造調査「大阪-鈴鹿測線」パイプレータ集中発震SP-2V。

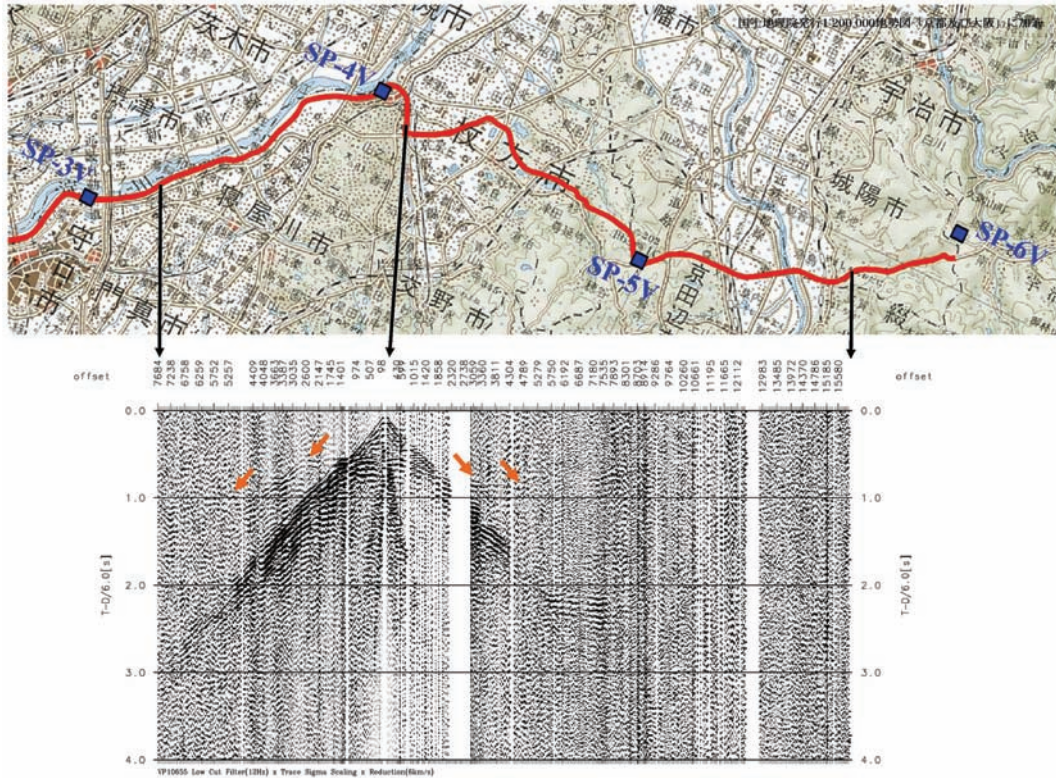


図4 発震記録例。大都市圏地殻構造調査「大阪-鈴鹿測線」バイブレータ稠密発震VP1065。

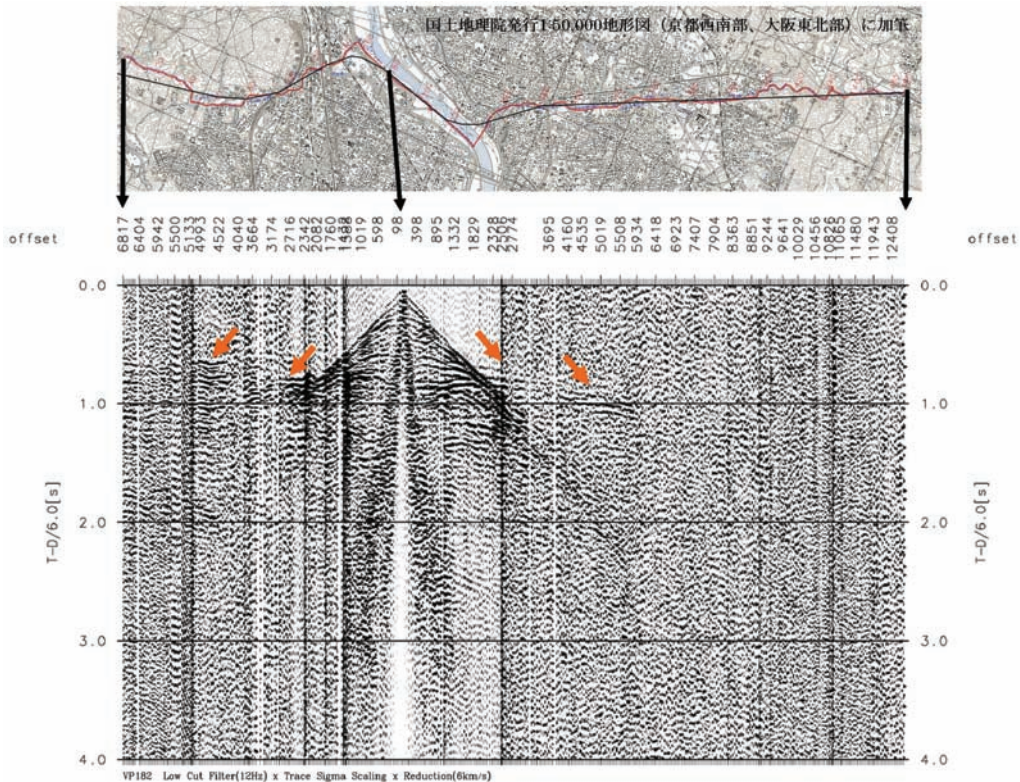


図5 発震記録例。大都市圏地殻構造調査「新宮-舞鶴測線」バイブレータ稠密発震VP182。

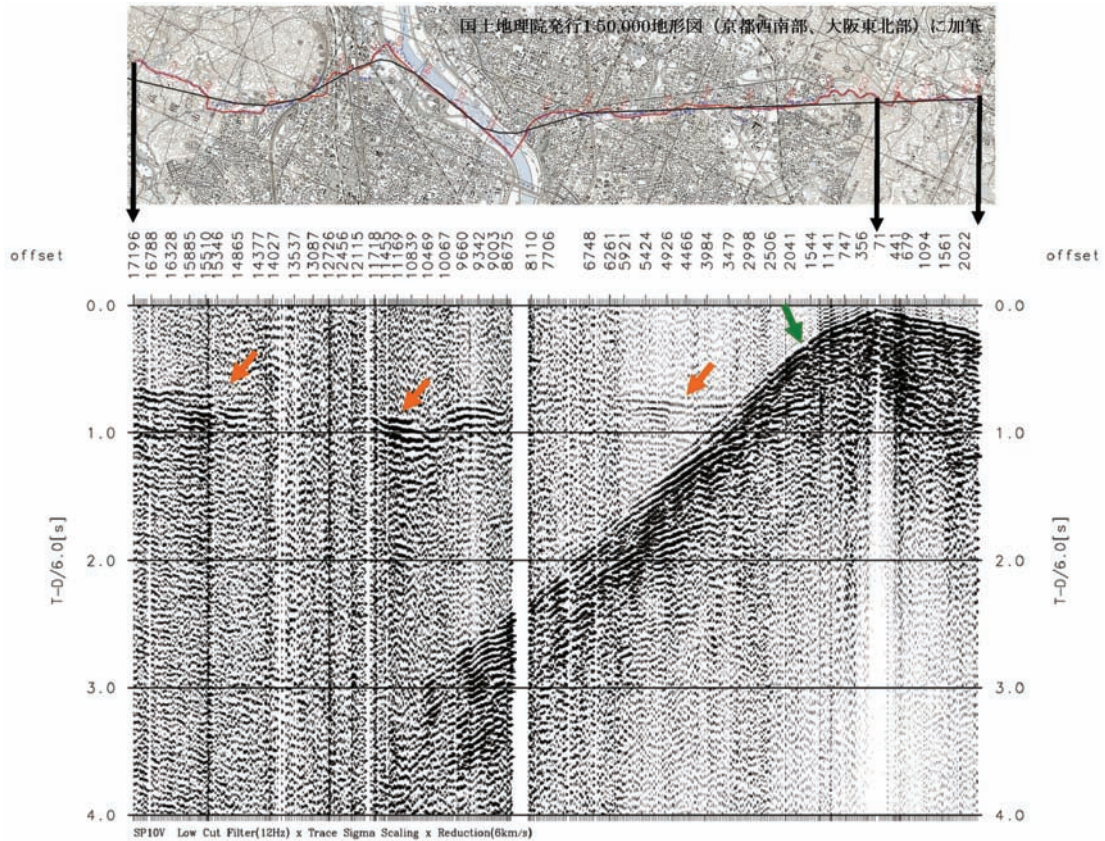


図6 発震記録例。大都市圏地殻構造調査「新宮－舞鶴測線」バイブレータ集中発震SP-10V。

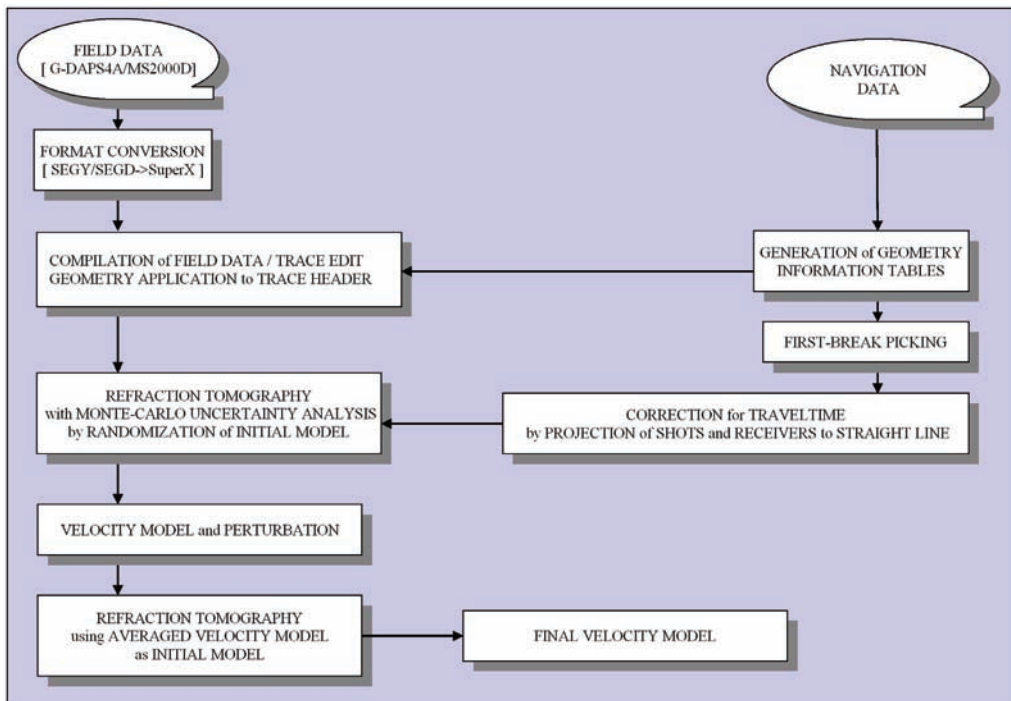


図7 屈折法データ解析フロー

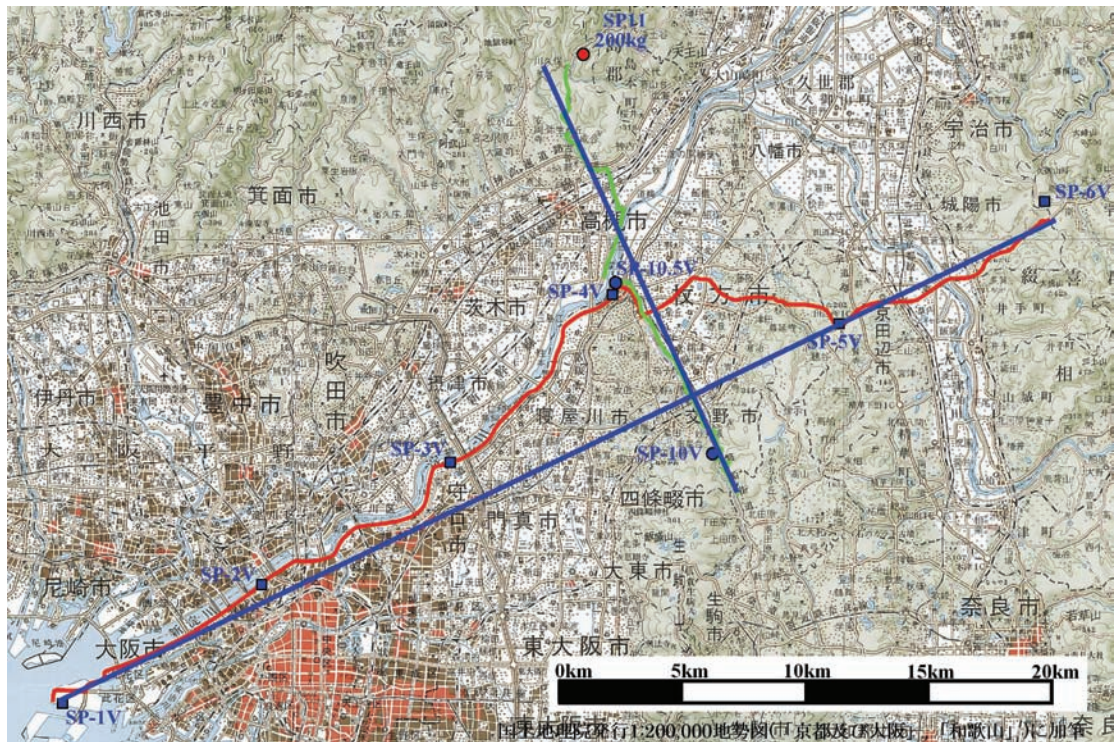


図8 屈折法投影ライン

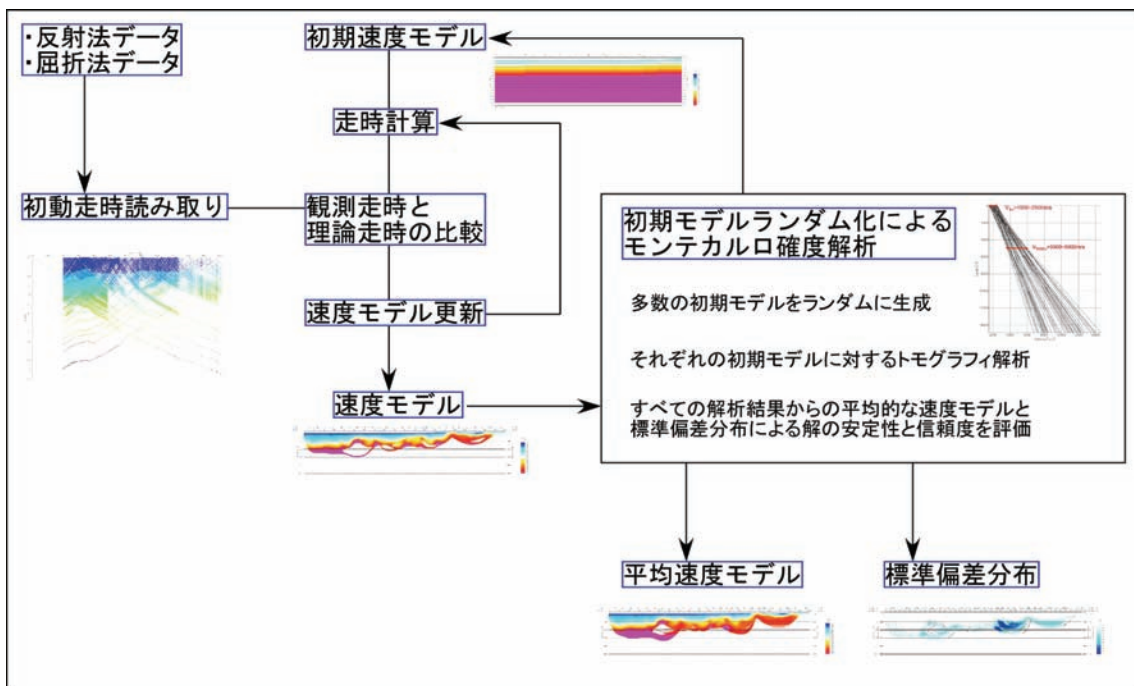


図9 初期モデルランダム化による解の信頼度評価（処理フローおよび概念図）

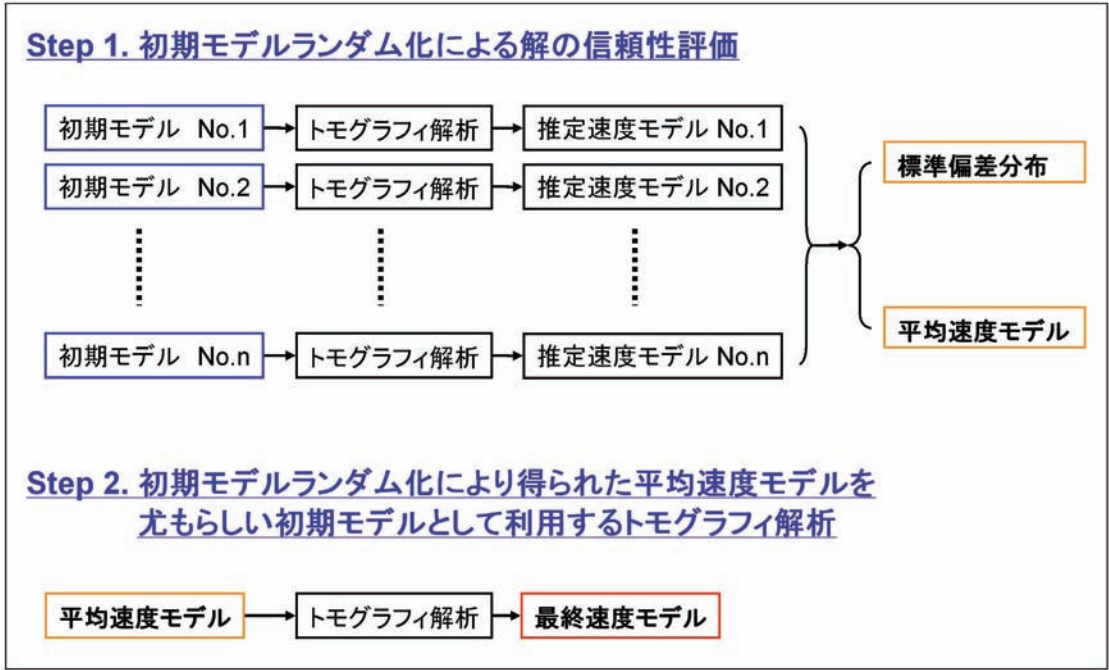


図10 平均解を初期モデルとする処理手順



図11 屈折初動読取結果（大阪－鈴鹿測線）

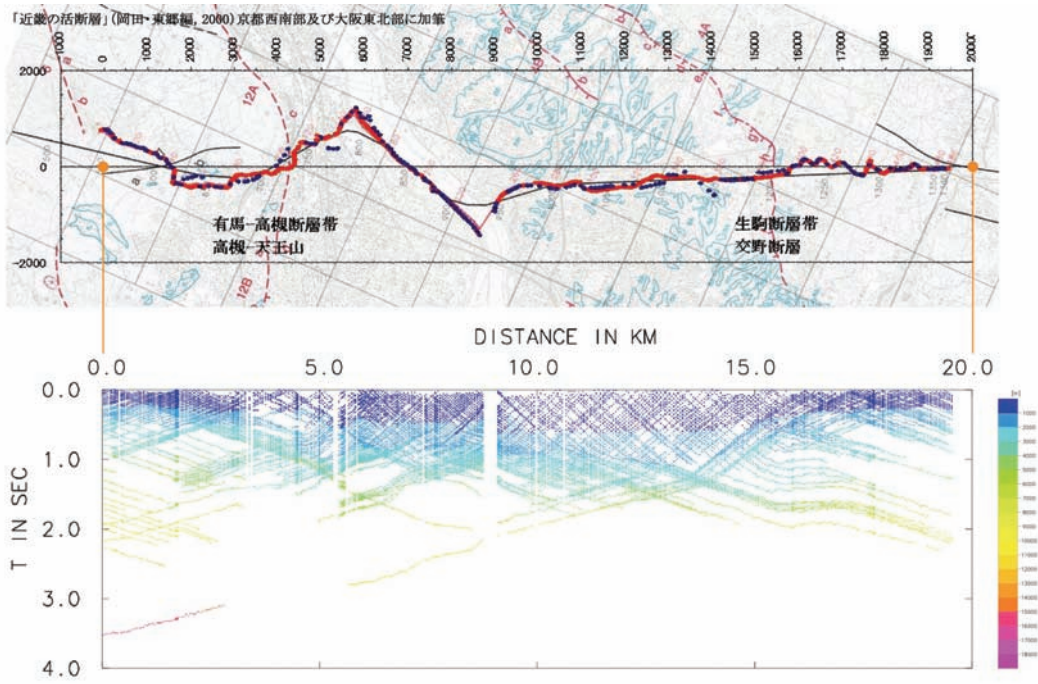


図12 屈折初動読取結果（新宮－舞鶴測線）

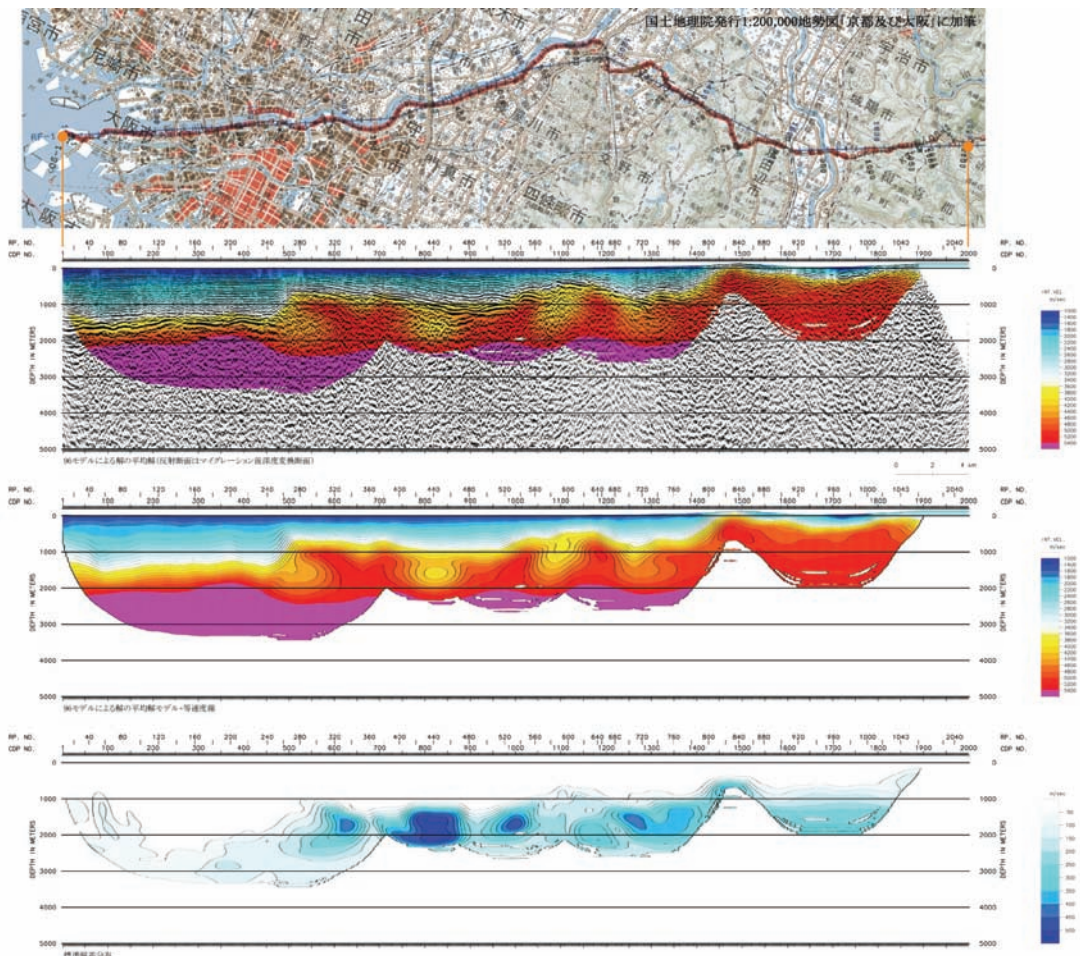


図13 初期モデルランダム化による平均解と標準偏差分布（大阪－鈴鹿測線）

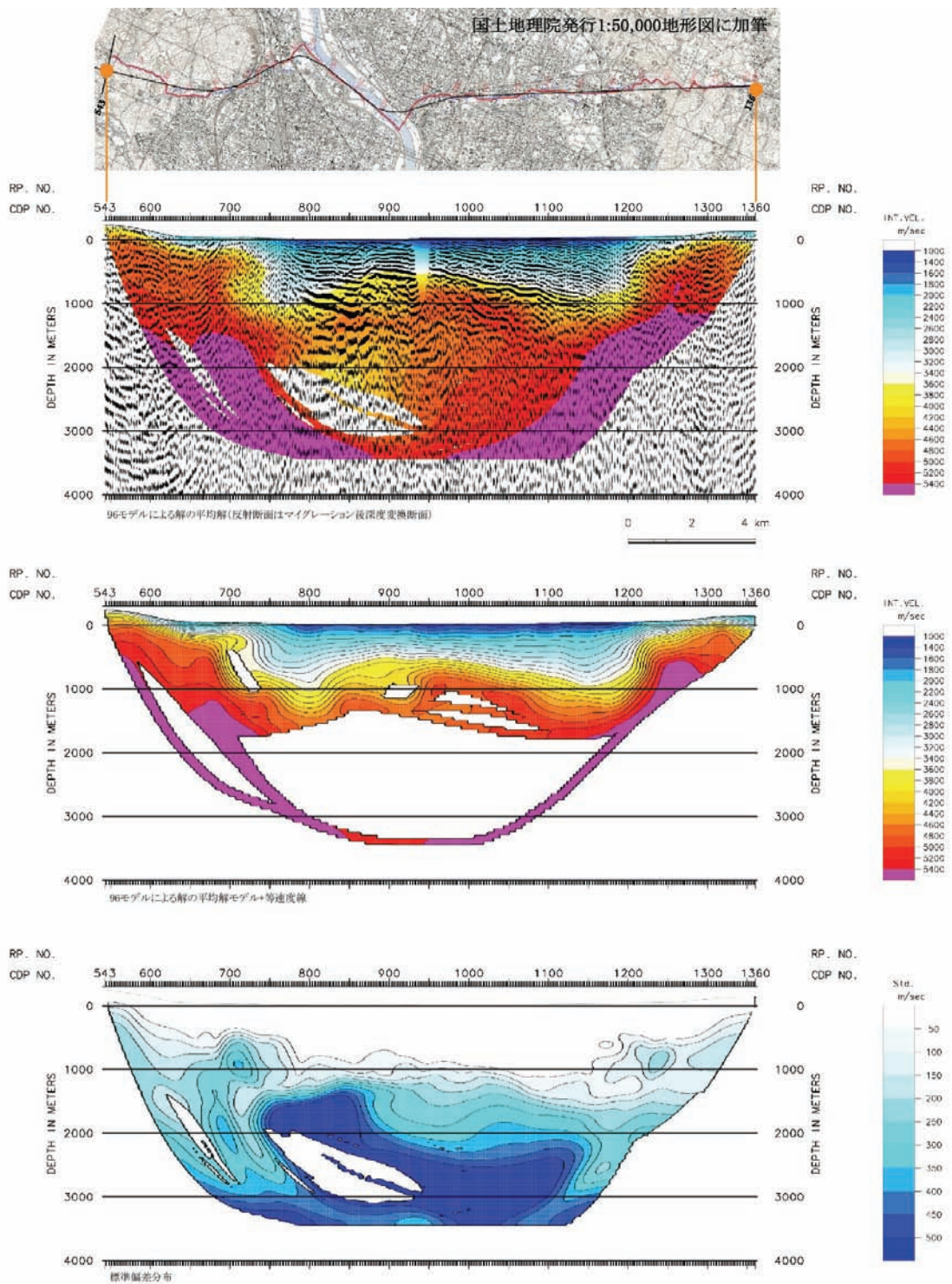


図14 初期モデルランダム化による平均解と標準偏差分布（新宮－舞鶴測線）

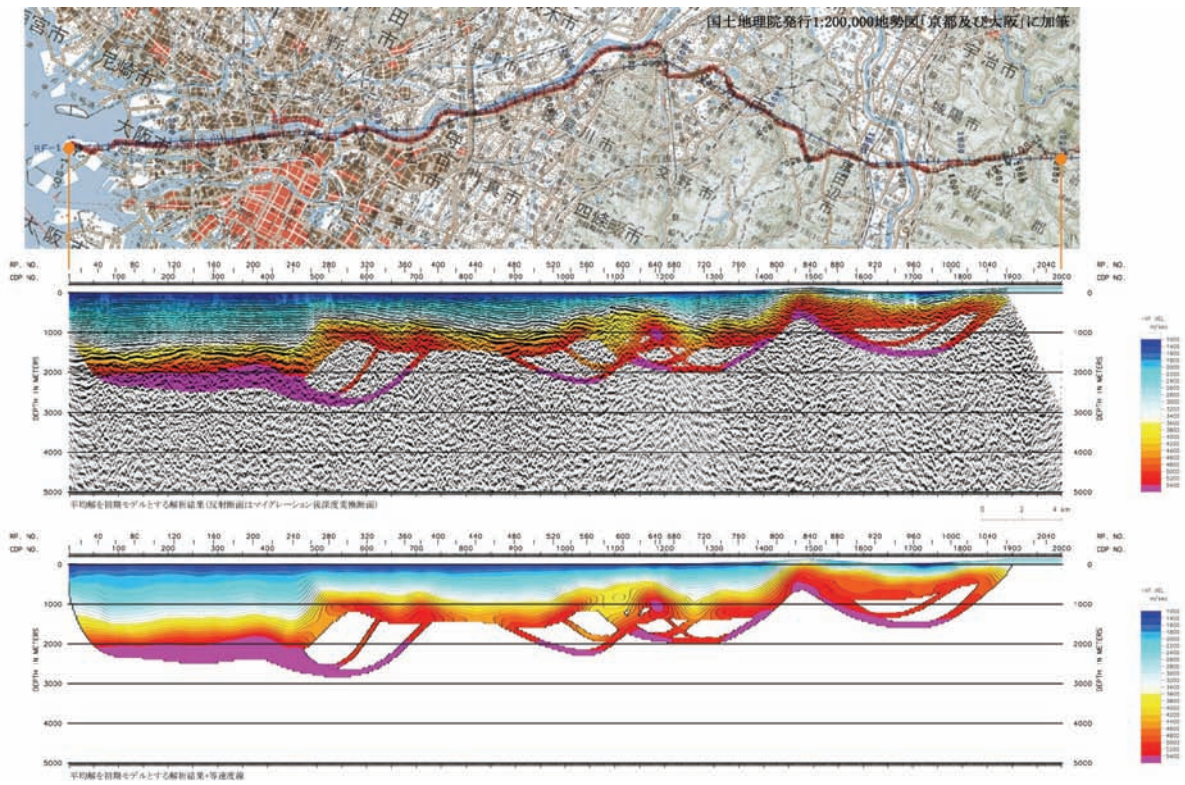


図15 平均解を初期モデルとしたトモグラフィ解析結果（大阪－鈴鹿測線）

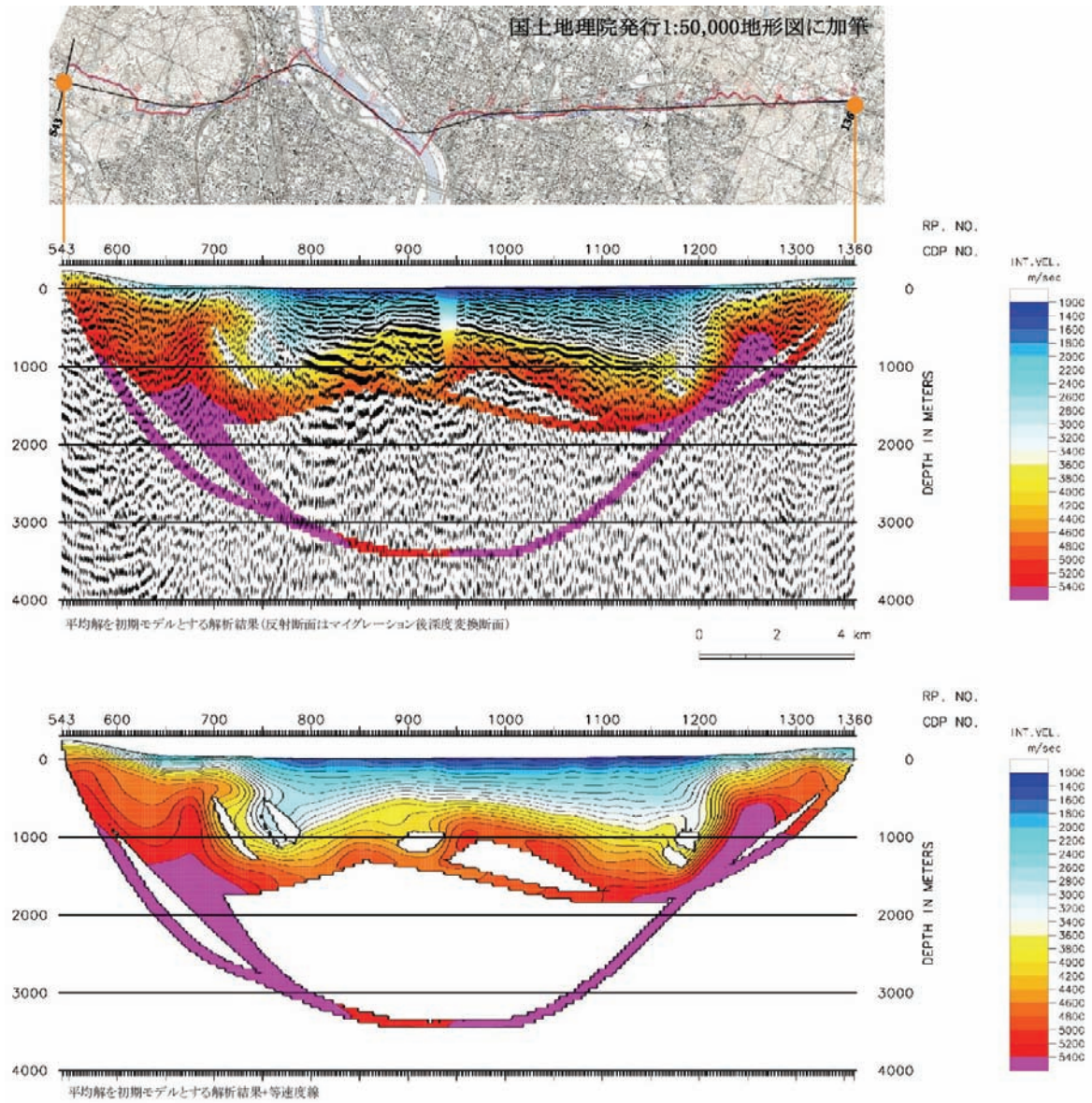


図16 平均解を初期モデルとしたトモグラフィ解析結果（新宮－舞鶴測線）

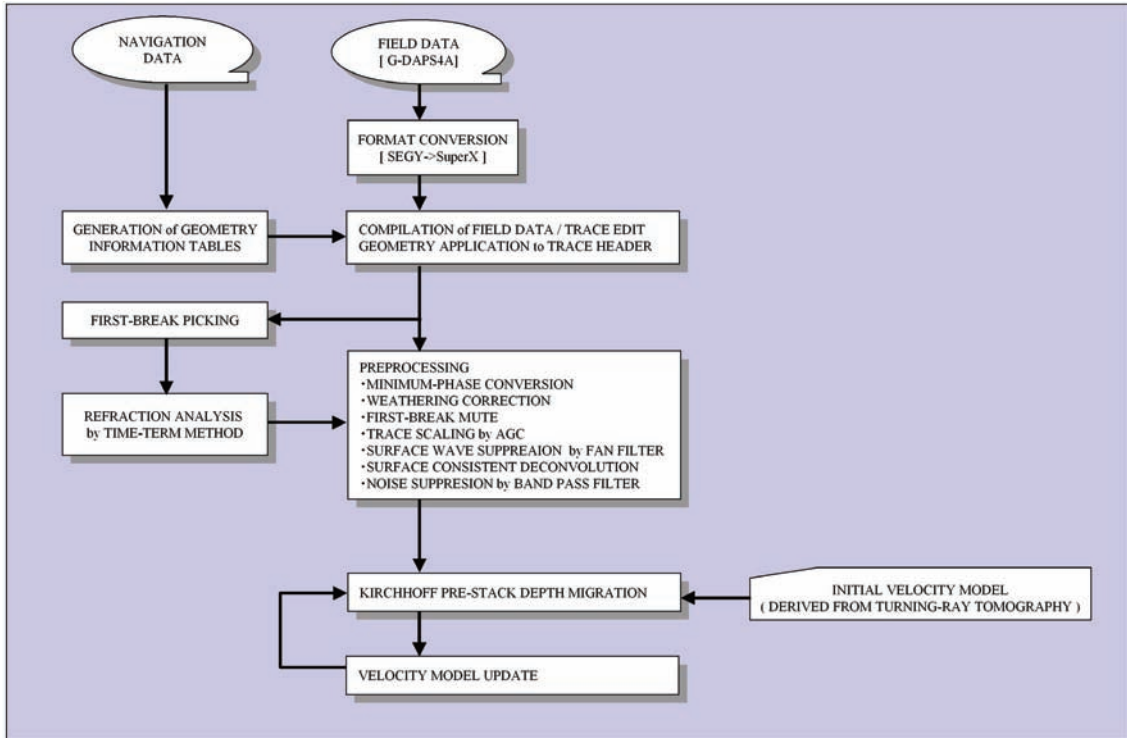
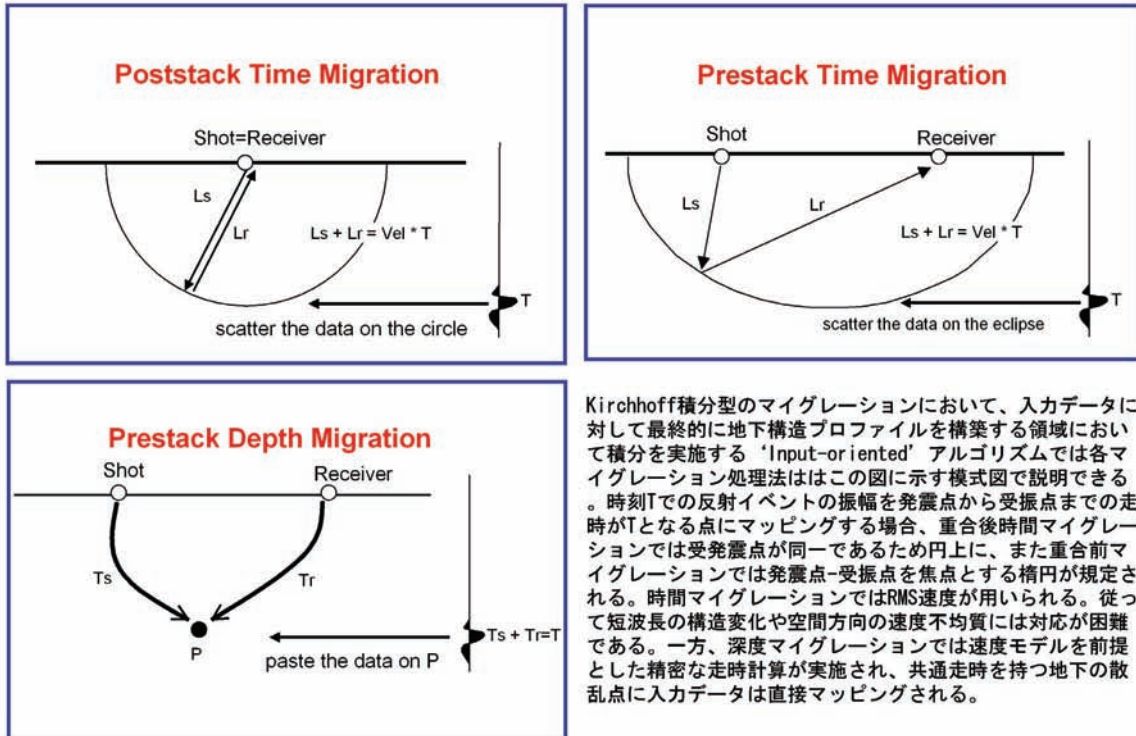


図17 重合前深度マイグレーションデータ処理フロー

重合前Kirchhoffマイグレーションの基本原則['Input-oriented'アルゴリズムの場合]



屈曲2次元測線における重合前深度マイグレーション概念図

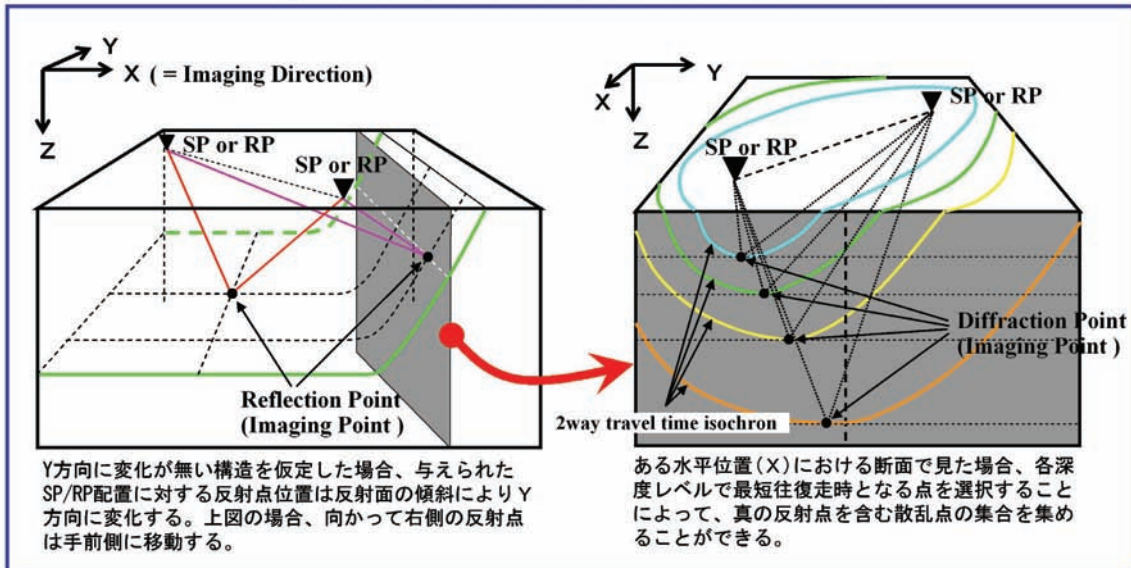


図18 重合前マイグレーションに関する基礎概念図

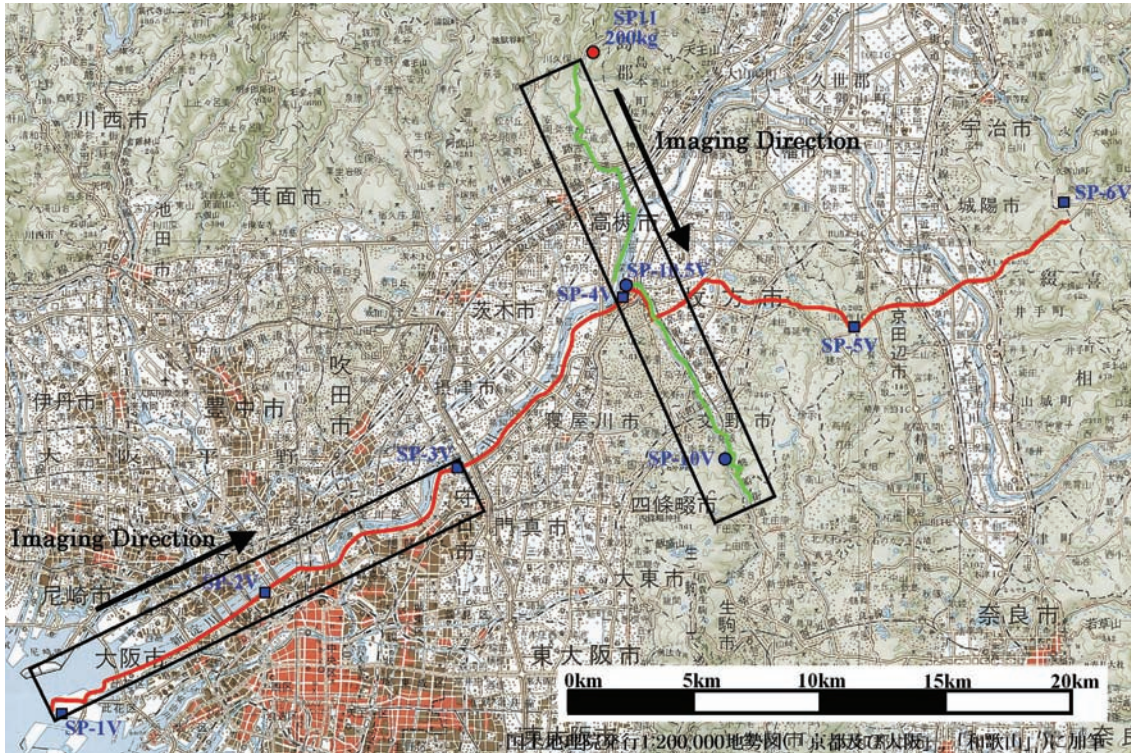


図19 重合前深度マイグレーションイメージング対象領域

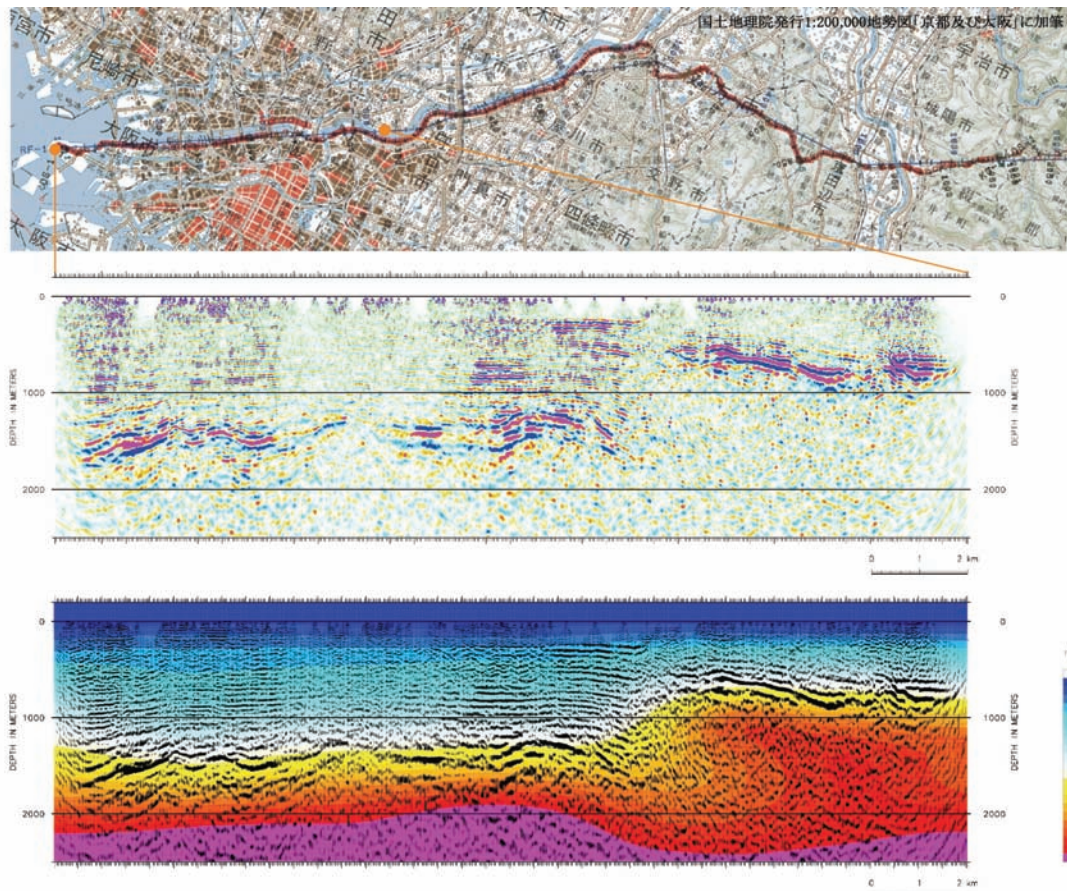


図20 重合前深度マイグレーション処理結果（大阪－鈴鹿測線）

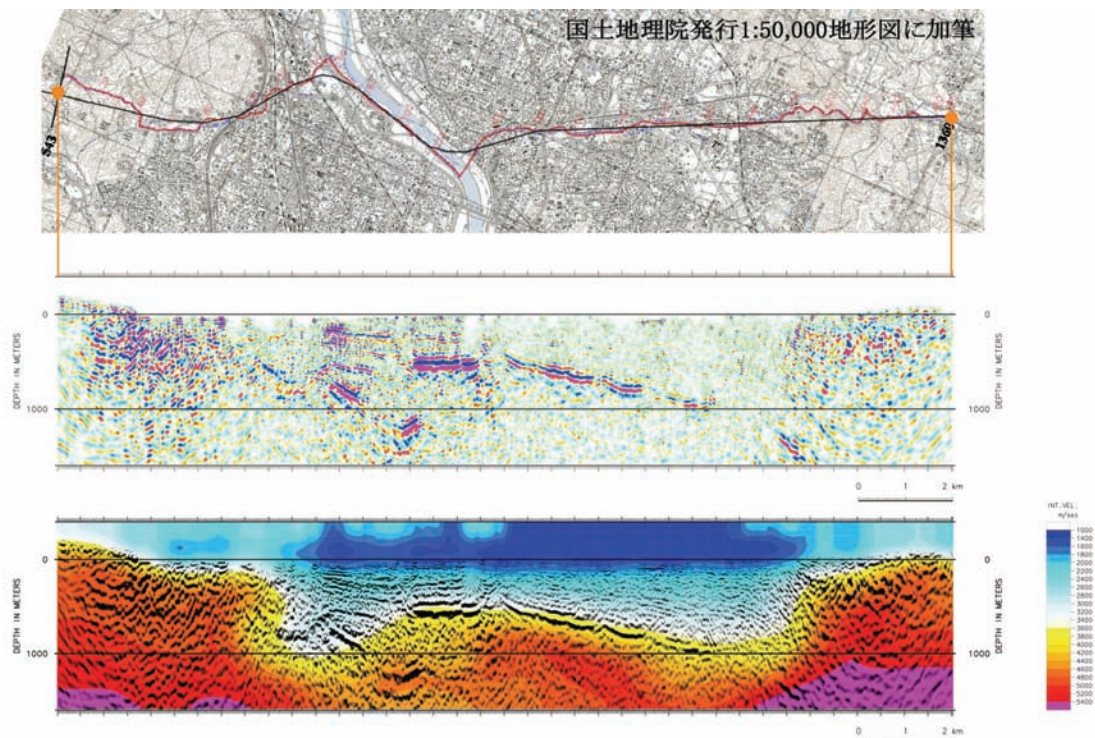


図21 重合前深度マイグレーション処理結果（新宮－舞鶴測線）

2) 地震波反射法探査

a) はじめに

上町断層を対象として、大阪堆積盆地の基盤形状や断層帯の特性を調査するための地震波反射法探査は様々な機関によって行われてきている（例えば、KG-NET・関西圏地盤研究会，2007）。本研究においては、基盤構造の情報の少ない大阪平野南部地域において、上町断層が存在すると推定される位置を挟んで比較的長い反射法地震探査を実施し、上町断層の存在位置の確認および広範な地下構造の把握を目的とした反射法探査を行った。

b) 調査地域

反射法地震探査の測線位置は上町断層の南端部を候補として、調査の可能性を調べたのち、道路状況等を勘案して大阪府泉大津市から大津川河川敷および忠岡町を経て岸和田市に至る約11kmの測線とした。測線は、表4に概要を記し、その概略位置を図22に示した。調査測線位置および解析測線位置をCMP番号とともに図23に示す。表5に探査についての主たる仕様と使用機器について記す。周辺の同様の調査及び地下構造モデル情報から、探査対象深度としては1500m程度を予定し、震源としては中型バイブレータを利用した。

c) 調査状況

本測定は2011年1月29日より開始された。表6に観測に用いた機材の規格等を示す。10m間隔で設定した測点を基準に、20m間隔で6個の地震計を直列接続した(グルーピングした)

受振器を設置した。6個からなる地震計は、測線沿いに空間的に一様なサンプリングとなるように、基本的に測点を中心に測線方向に約1.5mずつ離して設置した。振動方向が鉛直面内であるP波を測定対象とするため、地震計の主感度方向が鉛直となるように設置した。

地震計の地面への固定は図24に示すように、植栽部等においては地震計下部のスパイクを利用して直接地面に突き刺す方法を、アスファルト等の舗装部においてはピックスタンドと呼称する専用の金属スタンドに地震計を取り付ける方法を用いた。植栽部に設置した例及び歩道部端部に設置した例を図25に示す。探鉱機としてはテレメトリ型のものを使用した。これは、増幅、A/D変換、スタック(垂直重合)、相互相関処理等を、受振器の近傍に設置したアンプユニット(RSU; リモートステーションユニット)で処理し、これら処理後のデータを収録(保存)のために観測本部内の探鉱機に伝送する遠隔処理収録システムである。受振点から観測本部内の探鉱機まで導くケーブル本数が少なく、多くの受振点のデータを効率的に収録することが可能となっている。

使用するアンプユニット(RSU)は、6チャンネル(6受振点)分のデータ処理機能を有する。このため、6受振点、120m毎にアンプユニットを設置し、アンプユニット間を1本のケーブル(DTC; デジタルテレメトリケーブル)で順次接続する。また、ケーブル接続したアンプユニット群の任意の位置から、受振データのモニタ及び収録(保存)等のため、観測本部内の探鉱機へケーブルを導く。受振器、アンプユニット(RSU)、ケーブル(DTC)及び観測本部内の探鉱機等の接続状況を図26に示す。なお、本調査では、測定作業効率を上げること、一部区間ではSN比の良い記録が期待しにくいので後方の展開も収録したことなどから、仕様書で記されている同時収録チャンネル数100以上の受振機材(200チャンネル以上)を一度に設置した。

本測定は、所定の発震点に震源車を配置した後、発震テストを行って決定した標準垂直重合数(スタック回数)分発震を行い、1発震点に対して、発震点近傍の所定チャンネル区間(1500m以上の区間)の受振点で観測を行う。観測された波形記録を、受振点近傍のアンプユニット(RSU)でA/D変換(アナログ信号からデジタル信号への変換)し、スタック処理および相互相関処理を行い、その後、処理後のデータを観測車内の探鉱機に転送する。観測車内では、観測波形を紙出力して記録の品質を確認すると共に、外付けのハードディスク及び収録装置のハードディスクに記録を保存する。なお、記録の品質が良くない場合には、直ちに再測定を行った。

上記作業を、発震点を10mずつ、また発震点が20m移動する毎に受振区間を20mずつ移動させながら順次記録を収録した。なお、1発震点に対し、データを収録する受振点の配置、すなわち展開方法は、発震点が受振区間内に位置するスプリット展開法とし、状況に応じて前後のチャンネル数を変更した。

d) データ処理及び解析

収録記録のデータ処理及び解析は、一般に多用される共通中間点(Common Midpoint; CMP)重合法によりSN比(シグナルとノイズの比)を高めた時間断面を作成した。次に、速度解析結果等に基づき、マイグレーション処理を施し、時間断面中の反射面を正しい位置に戻した。さらに、深度変換により、時間断面を深度断面に変換した。標準的なデータ処理

のフローを図27に示すと共に、以下に主たる処理を列挙する。各データ処理に用いたパラメータを表7にまとめた。

- [1] トレース編集、解析測線の決定、ジオメトリの設定及びCMPソート
- [2] プレフィルタ、位相補償及び振幅回復
- [3] デコンボリューション
- [4] 静補正
- [5] 速度フィルタ
- [6] 速度解析、NMO補正及びCMP重合
- [7] 残差静補正
- [8] マイグレーション
- [9] 深度変換

v) 解析結果と解釈

図28に屈折波トモグラフィーによる表層速度分布を示す。また、測線全体の重合時間断面図とマイグレーションを行った後の深度断面図に区間速度を表示したものをそれぞれ図29、30に示す。測線全体に亘り、堆積盆地の基盤面までの反射断面が良好に見て取れる。基盤形状について見てみる。測線の北西の、泉大津市の埋め立て地付近（図面の左手）では、基盤深度は1200～1300m程度である。CMP660付近を頂上として、緩やかに上に凸な基盤形状がある。その南東側CMP860あたりで、200m程度の段差が見られる。ただしこの段差は、堆積層内には明瞭には観察されない。そこから南東側には基盤ゆるやかに浅くなって、CMP1680付近で約350m程度の基盤の食い違いが観察される。この基盤の段差は、堆積層内の層を撓曲させ、深いほどその撓曲量は大きいように見える。

次に周辺の反射法断面プロファイル等と比較して、現時点での解釈を行う。調査地は上町断層帯の南端部にあたり、平成7年度以降に大阪府などが活断層調査や地下構造調査により実施した反射法地震探査や、大阪平野の地盤沈下対策の一環として行われたボーリング調査などの既存調査結果が分布する。これらのおもな既存調査の出典および分布を表8、9および図31にまとめる。本調査測線は、CMP550付近で平成15年度に大阪府が実施した大阪湾岸第2測線のCMP300付近と交差する。測線の交差する付近の反射面の対応状況を図32に示す。堆積層および基盤からの反射面はよく対応しており、平成15年度および16年度の大阪湾岸測線の解釈と対比させることができる。

図33（吉川・三田村，1999等を参照）に示すように、調査地域周辺には表層より沖積層～段丘堆積層～大阪層群などの第四系が広く分布し、その基盤岩は調査地の南方4km付近に地表で観察、分布している花崗岩よりなる。花崗岩を覆う堆積物の主体は、大阪層群（約200～30万年前）であり、その地質層序は火山灰や海成粘土を鍵層として図33(b)、(c)のように編年されている。

上述の既存資料および地表地質分布などより、深度断面図をもとに作成した地質構造解釈図を図34に示す。前掲の図31に示したように、CMP1650～1700付近で上町断層帯の南端部にあたる久米田池断層と交差する。深度断面図にも明らかなようにCMP1680付近で基盤岩上面に約350mの鉛直落差が見られており、これに相当するものと考えられる。

基盤岩を不整合に覆う大阪層群について、本探査測線と交差する既存の大阪湾岸測線に

おける地質解釈結果をもとに、大阪層群には含まれる海成粘土層の相当層準を推定して図34に記した。ただし、地層の連続性は上町断層帯(久米田池断層)において不明瞭であるため、断層帯の上盤側においては、図33(a)に示した地表地質分布をもとに、各海成粘土層準の地表露出地点を推定して地質対比を行った。

CMP660付近では基盤岩に大きな盛り上がりが見られ、上位の堆積層にもゆるやかな凸状の変形が見られる。既存の大阪湾岸測線においてもCMP400付近に同様の基盤岩の盛り上がりを確認することができ、先の図31に示した重力探査等より推定される基盤岩構造図に見られる小丘構造に対応した構造と考えられる。また、CMP860付近の基盤岩上面には約200mの鉛直落差を持つ不連続構造が見られ、湾岸測線のCMP760～800付近にも基盤岩落差が見られており、重力より推定される基盤岩構造よりこれらの構造が連続する可能性がある。ただし、堆積層は基盤岩上面の構造に沿って緩やかに傾斜しているが、堆積層の不連続は確認できない。なお、上町断層帯上盤側のCMP1900にも基盤岩上面に100m程度の小規模な鉛直落差が見られ、その直上の堆積層も変形するようであるが、深度200～300m以浅の堆積物には変形が見られず、少なくとも100万年前以降における活動はないといえる。

図34の地質解釈結果をもとに、上町断層帯(久米田池断層)の活動性について検討を加える。断層をはさむ2地点間(CMP1600-1800)における大阪層群海成粘土層の分布標高差と、それより算出される鉛直方向における平均変位速度を表10に示すとおりである。断層上盤側における地層面の傾斜量の評価や、表層部にあたる基準面深度の推定精度などに問題はあるが、岡田篤正・東郷正美編(2000)に示されている上町断層帯の変位速度とほぼ同様の傾向にあるといえる。また岡田篤正・東郷正美編(2000)において、調査測線より南側のJR下松駅付近にリニアメントの存在が示されており、逆断層系の前面部に見られる派生断層の可能性が指摘されている。リニアメントと調査測線との交点はCMP1350付近であるが、探査結果では表層付近でわずかに盛り上がる反射面が見られるものの、深部には及んでおらず、断層の存在を示唆するような堆積層の変形は確認されない。

表4 調査測線の概要

測線名	主たる調査場所	測線長(m) [上段;測定、 下段;解析]	測点*1 番号	標準測点 間隔(m)
大津川 測線	泉大津市汐見町～泉大津市板原町	11,199	2～1,142	10.0
	～忠岡町北出～岸和田市東大路町 ～岸和田市包近町	10,500		

*1 測点;発震及び受振の基準点。

表5 主な探査仕様及び使用機器

項目	内容	備考
探査手法	P波反射法地震探査	
波動種別	P波	
測線数	1	
測線名	大津川測線	
調査測線長	11,199m	
解析測線長	10,500m	CMP ^{*a} 間隔の総延長
探査対象深度	地表付近から深度1,500m程度まで	
標準発震点間隔	10m	施設管理者の許可条件、交通状況、隣接家屋等の状況に応じて、発震をカット
発震点数	1034	
標準受振点間隔	20m	障害物がある場合は受振器設置位置をずらし設置する
受振点数	554	
受振器配置	グルーピング	
標準同時収録チャンネル数	150チャンネル以上	各発震点に対する標準受振点数
標準最大受振距離	1,500m以上	
標準展開方法	インラインシューティング [*]	前方80～100ch、後方50～70chのスプリット展開。収録状況に応じて調整。
標準水平重合数	75	
標準垂直重合数	5～10回	収録状況により調整
収録記録長	4秒	
サンプリング間隔	2msec	
Sweep周波数	12～90Hz	現地テストによる
Sweep長	20sec	現地テストによる
収録様式	SEG-Y	
震源	中型ハイブレイター	EnviroVibe (IVI社製)
受振器	速度型地震計 (固有周波数：10Hz、1受振点につき6個をグルーピングしたもの)	SM-4 (I/O Sensor社製) スプリアスノイズ発生は200Hz程度
収録装置	デジタルテレメトリ型地震探鉱機 (24ビットA/D変換)	G.DAPS-4A ((株)地球科学総合研究所製)

注)

*a 解析用に設定した点。Common Midpointの略称。

表 6 使用機器一覧

種類	形式	製品名	製造	主な仕様
震源	中型バイブレーター	EnviroVibe	IVI	実用周波数範囲：8～200Hz 最大ストローク：6.99cm ホールドダウン重量：約7.5トン リアクションマス重量：約0.8トン ベースプレート設置面積：約1.1m ² 総重量：8.4トン 寸法：(L)6.1×(H)2.4×(W)1.9m
受振器	ジオフォン	SM-4	I/O Sensor	速度型地震計（1成分） 固有周波数：10Hz グルーピング：6個
探鉱機	デジタルテレメトリ	G.DAPS-4A	株式会社 地球科学 総合研究 所	最大チャンネル数：2,032 チャンネル/測線×1,024測線 A/D変換：24ビットデルタシグマ型 最大記録長：16,001ポイント/チャンネル サンプリング間隔：0.5、1.0、2.0、4.0msec 保存データ形式：SEG-Y 周波数特性：DC～822Hz 分解能：120dB プリアンプゲイン：6、18、30dB

表7 データ処理に使用した主なパラメータ

処理名	パラメータ	設定値	備考
		大津川測線	
プレフィルタ	バンドパスフィルタ帯域	12-90Hz	
振幅回復	幾何学的発散補正ウィンドウ幅	40msec	
	自動振幅調整(AGC)	200msec	
デコンボリューション	自己相関演算用ゲート長	1400msec	タイムバリエーションスペクトラルホワイトニング等
	フィルタ長	100msec	
	ホワイトノイズ	3%	
静補正	メッシュサイズ	2m×2m	
	初期速度モデル	深度と共に単調増加 (300~1,500m/s)	
	最大オフセット距離	400m	
	再構成速度範囲	300~2,200m/s	最大値は速度走時曲線/走時曲線の傾斜から推定
	トモグラフィ繰り返し回数	50回	
	置換速度	1,550m/s	
	標高補正用速度	1,550m/s	
残差静補正	最大許容時間ソフト量 (1回当)	8msec	
	繰り返し算出回数	5	
速度フィルタ	τ -p	約1500m/s以下を抑制	
タイムバリエーションフィルタ	CMP1~1000 CMP1600~2100	0~500msec : 15~90Hz 500~800msec : 12~70Hz 800~1050msec : 8~60Hz 1050msec~ : 8~50Hz	
	CMP1000~1600	0~400msec : 15~90Hz 400~900msec : 12~70Hz 900msec~ : 8~50Hz	

表8 おもな既存調査（反射法地震探査）

名 称	出 典
大阪湾岸測線	大阪府(2005):平成16年度地震関係基礎調査交付金「大阪平野の地下構造調査」成果報告書(概要版). 大阪府, 55p.
堺築港東西、同南北測線	
堺泉北東西、同南北測線	
GS堺1、2測線	杉山雄一(1997):上町断層系の反射法弾性波探査. 地質調査所研究資料集, No.303, p.105-113.
GS石津川測線	杉山雄一ほか(2003):上町断層系の補足調査(その1) - 石津川沿い沖積低地におけるP波及びS波反射法地震探査. 活断層・古地震研究報告, No.3, p.103-115.
府中箕形測線	大阪府(1997):平成8年度地震調査研究交付金「上町断層帯に関する調査」成果報告書. 大阪府.
HD-2、HD-3測線	岩淵洋ほか(2000):反射法音波探査に基づく大阪湾の基盤と活構造. 水路部研究報告No.36, p.1-23
OD-B測線	岩崎好規ほか(1994):エアガン反射法地震探査による大阪湾の基盤構造, 地震第2輯, vol.46, no.4, p.395-403

表9 おもな既存調査（ボーリング調査）

名 称	出 典
IT18、20、26	Nobuo Ikebe et al(1969):Report on Land Subsidence in Osaka(Chapter4).Editorial Committee for Technical Report on Osaka Land Subsidence, p.46-88.
OXS1	市原実ほか(1986):岸和田地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 148p., 地質調査所
NAMI	栗本史雄ほか(1990):大阪平野南西部における大阪層群と基礎の花崗岩--岸和田市並松町のボーリング資料--, 地質調査所月報, 41, 12, 657-663,
No.1、2(H10)	大阪府(1999):平成10年度地震関係基礎調査交付金「上町断層帯に関する調査」成果報告書. 大阪府.

表10 上町断層帯をはさむ2地点間の基準面標高差と推定される変位速度

基準面	標高差 (m)	形成年代 (x10 ⁵ 年)	平均変位速度(鉛直) (m/1000年)
Ma3相当層準	200	85	0.24
Ma1相当層準	220	100	0.22
Ma-1相当層準	230	120	0.19

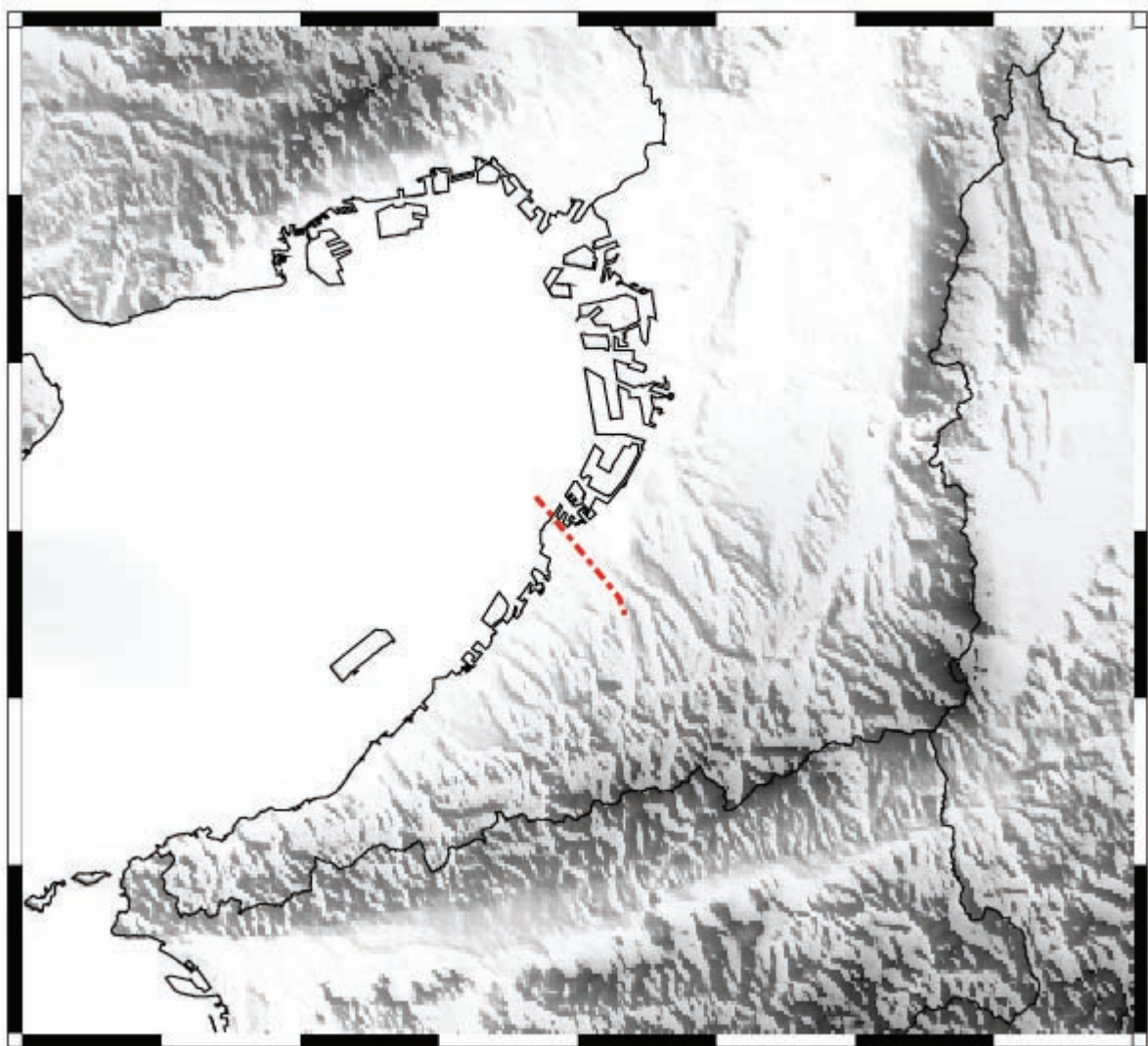


図22 調査位置図（赤破線が大凡の測線位置を示す）



図23 解析測線位置図

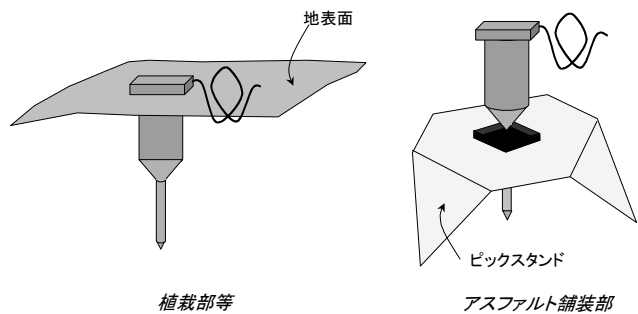


図24 地震計の設置方法



図25 地震計設置例

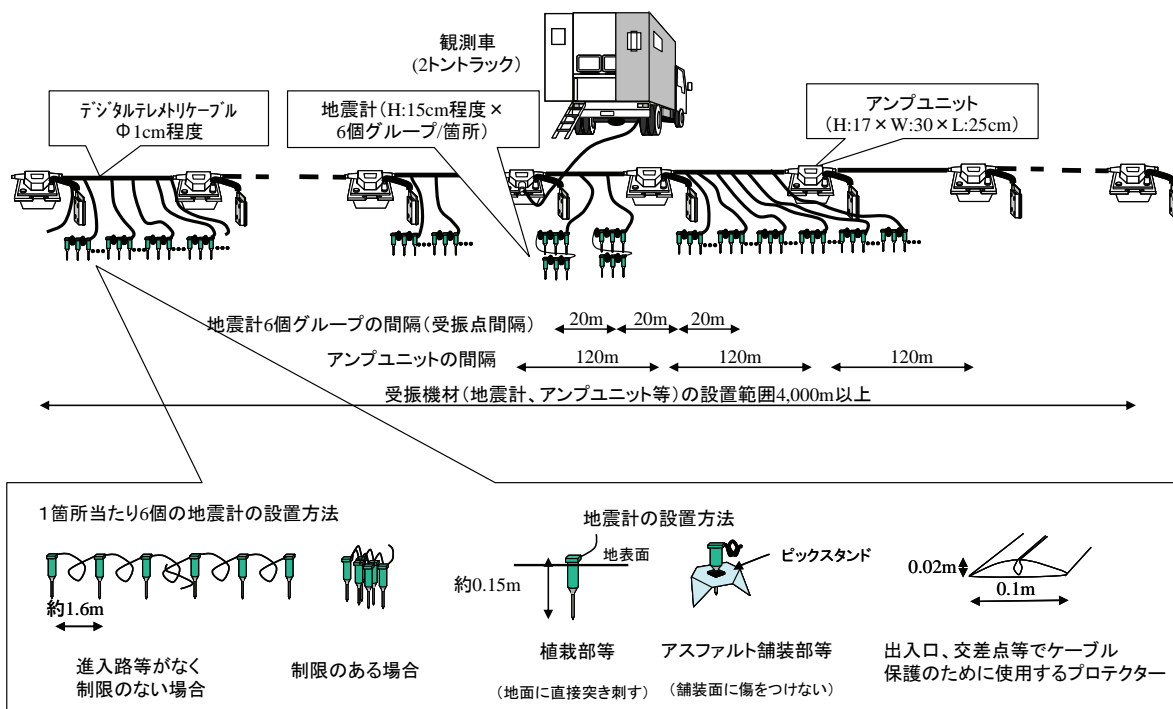


図26 受振機材の接続方法

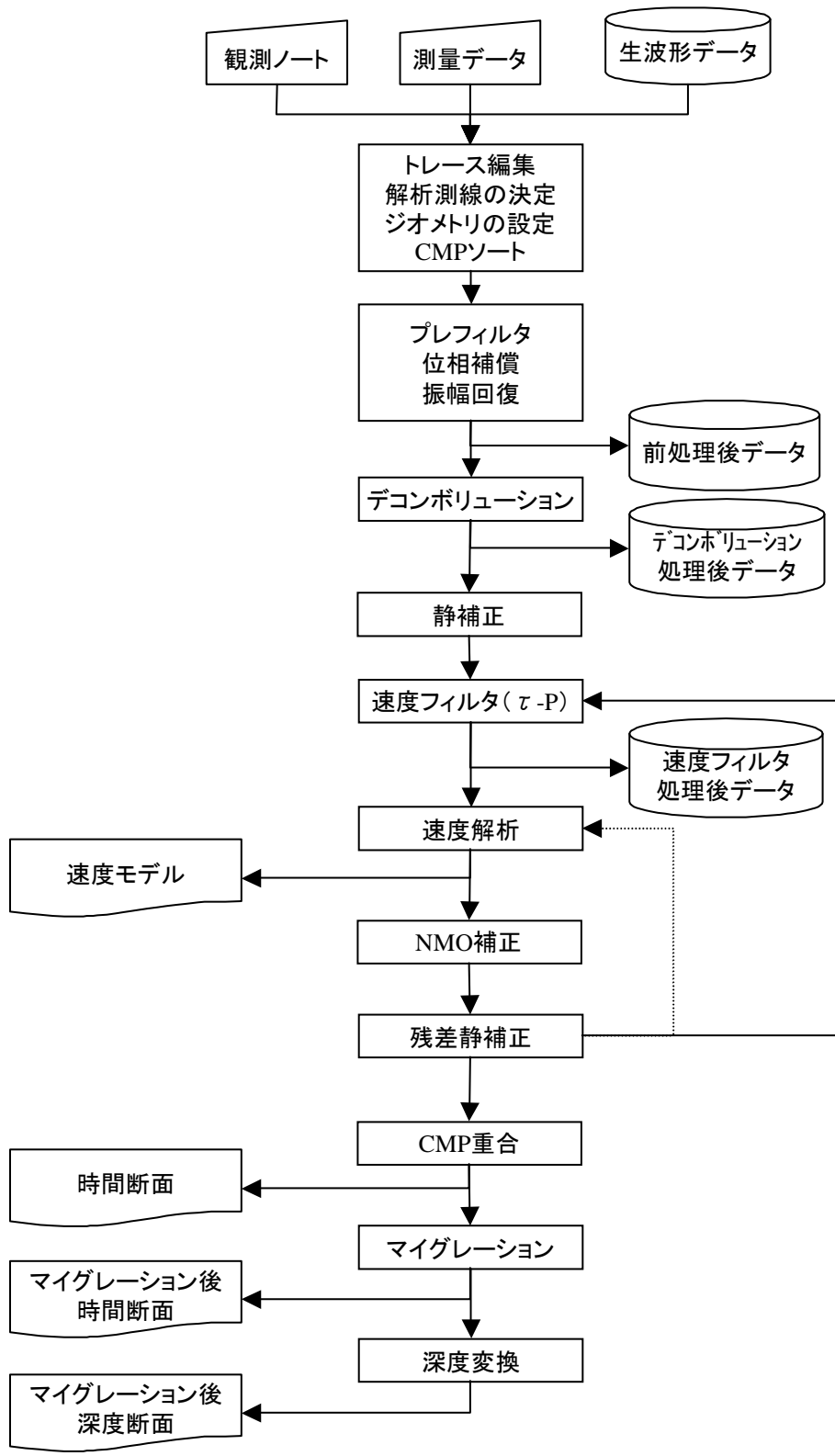


図27 反射法地震探査標準データ処理フロー

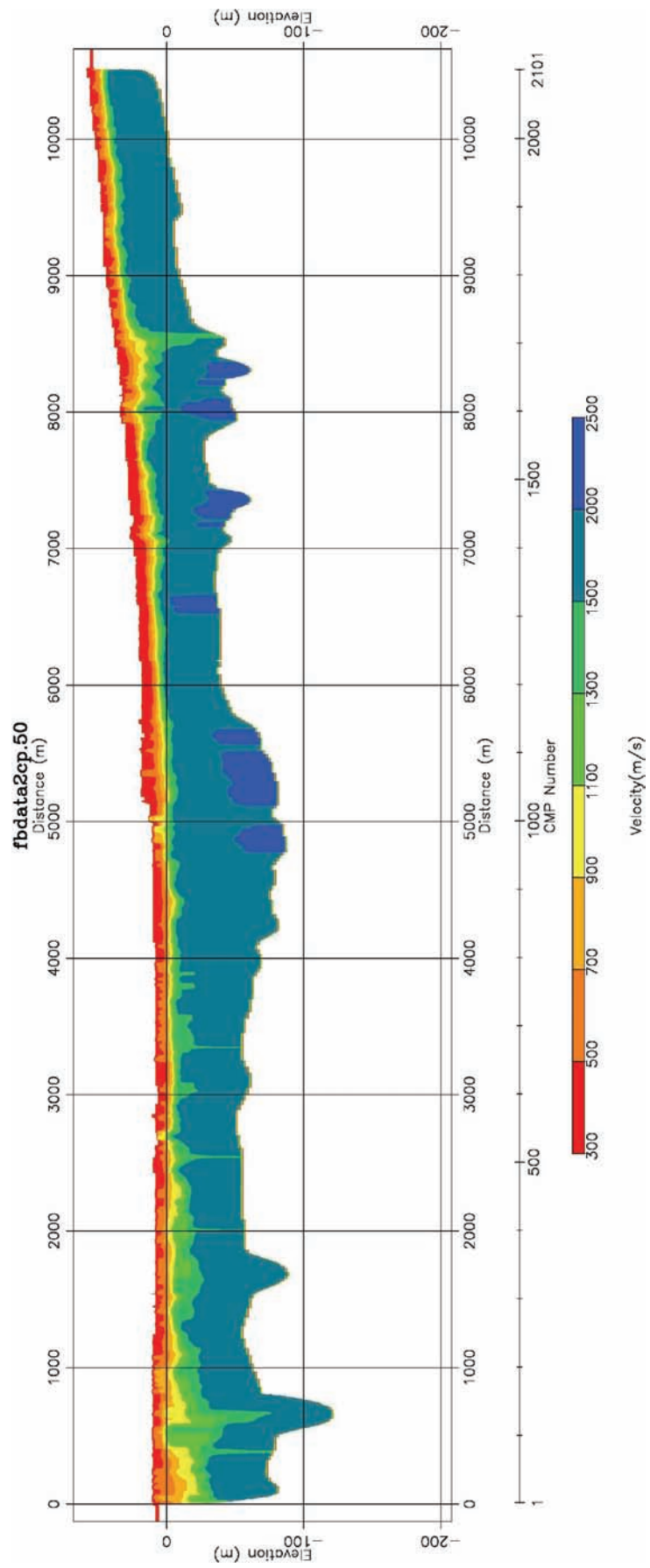


図28 屈折波トモグラフィによる表層速度分布

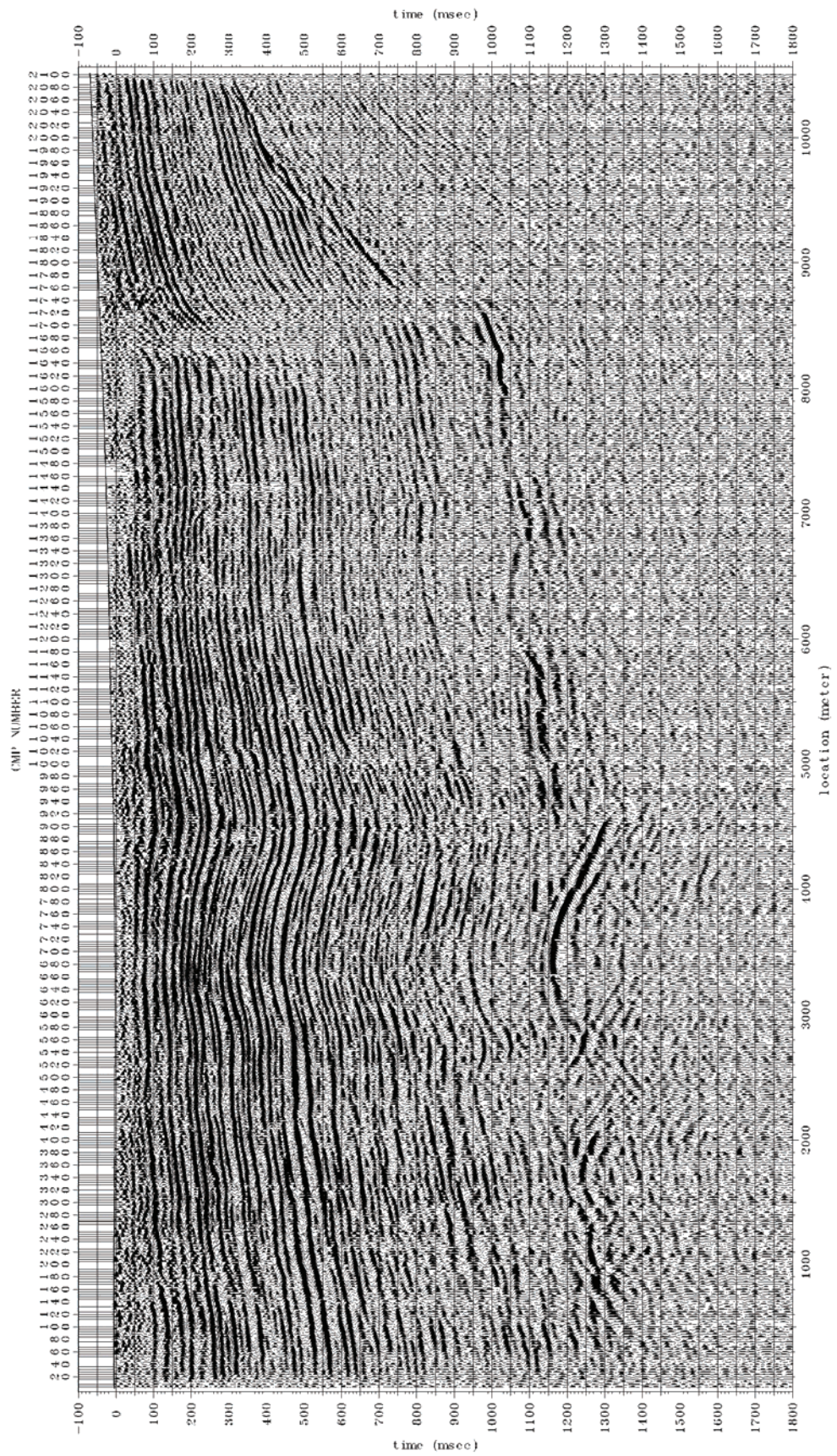


图29 重合時間断面図

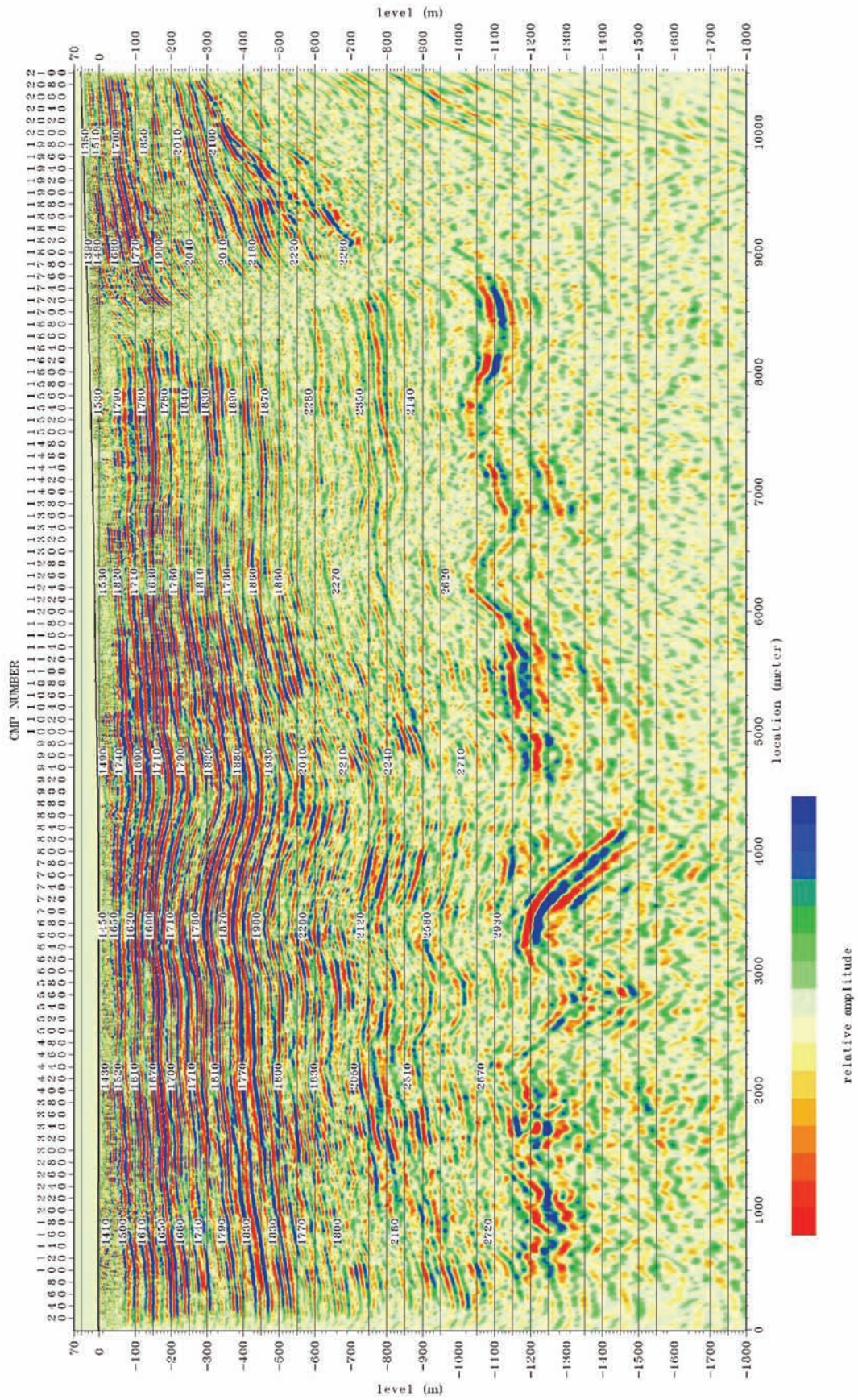


図30 深度断面図（区間速度を表示）

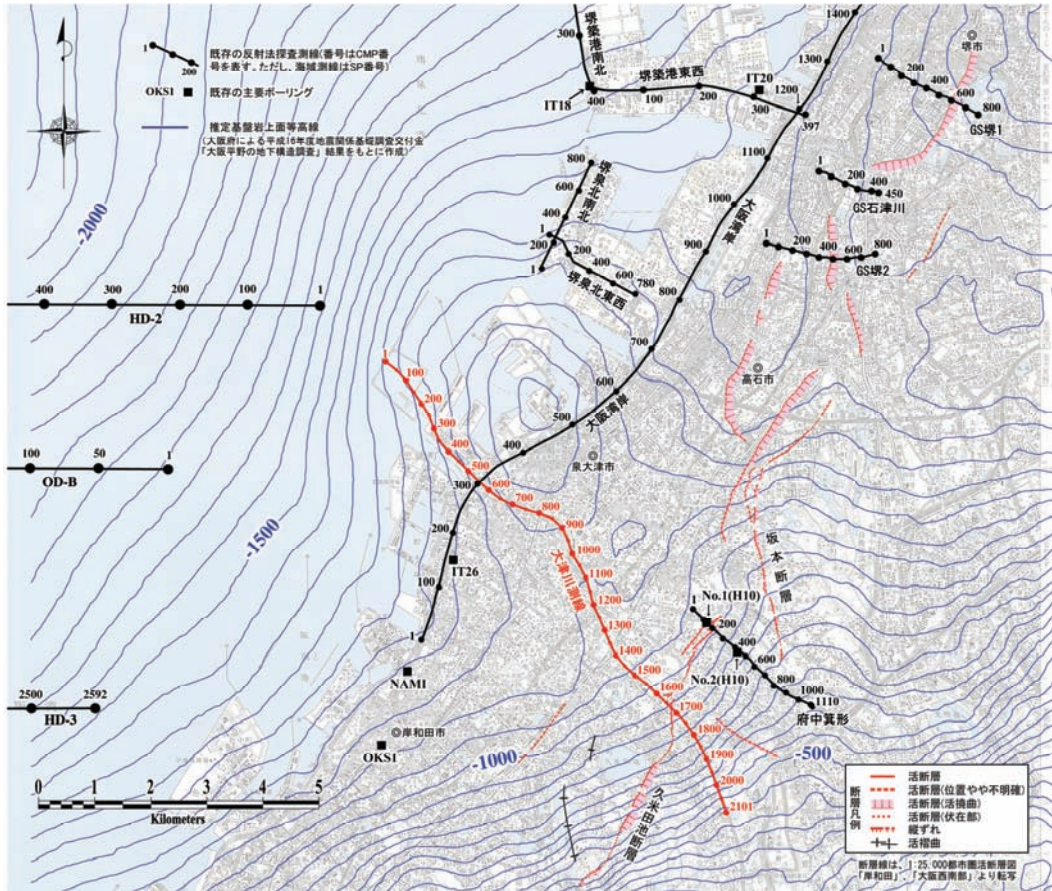


図31 主な既存調査測線、位置図

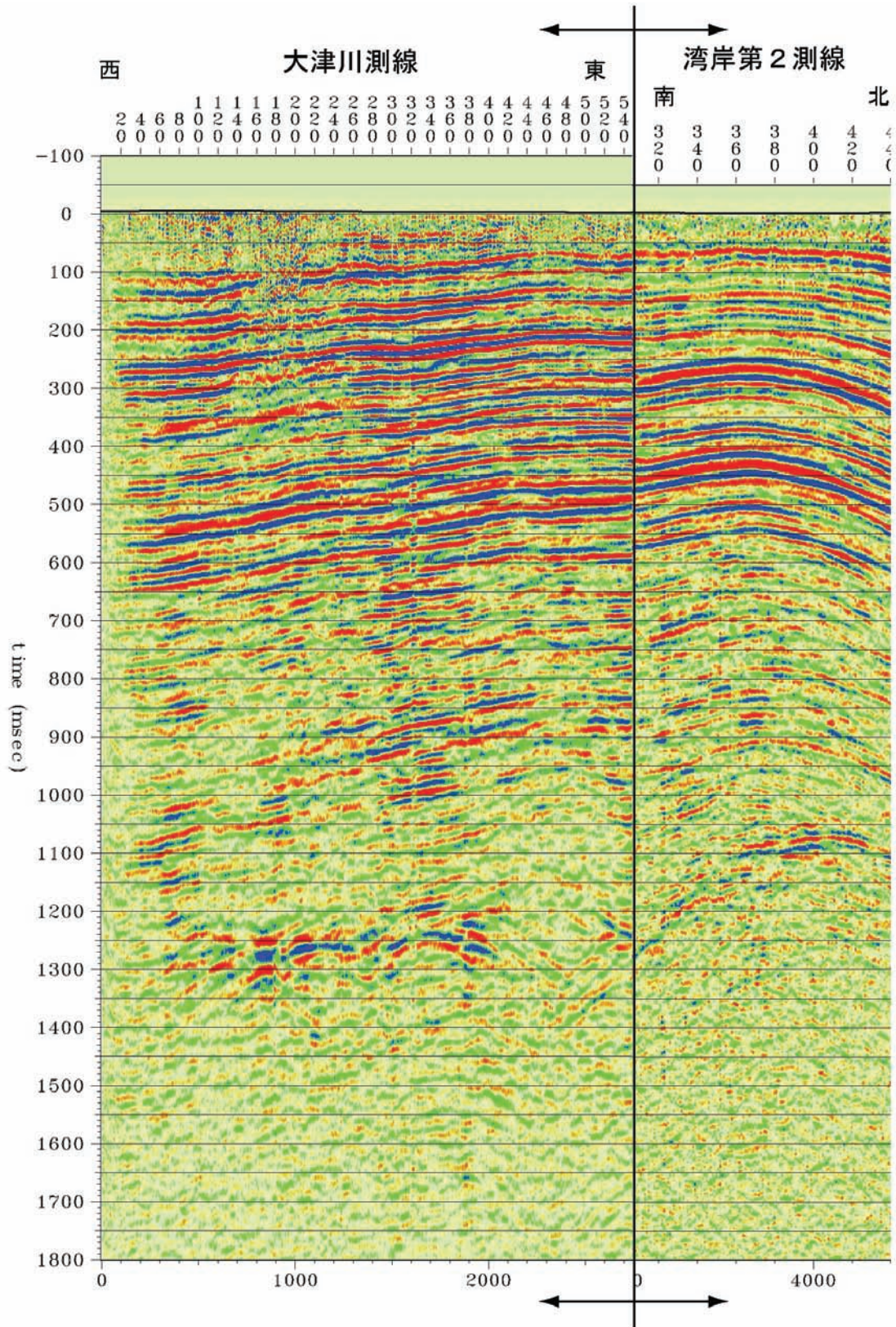
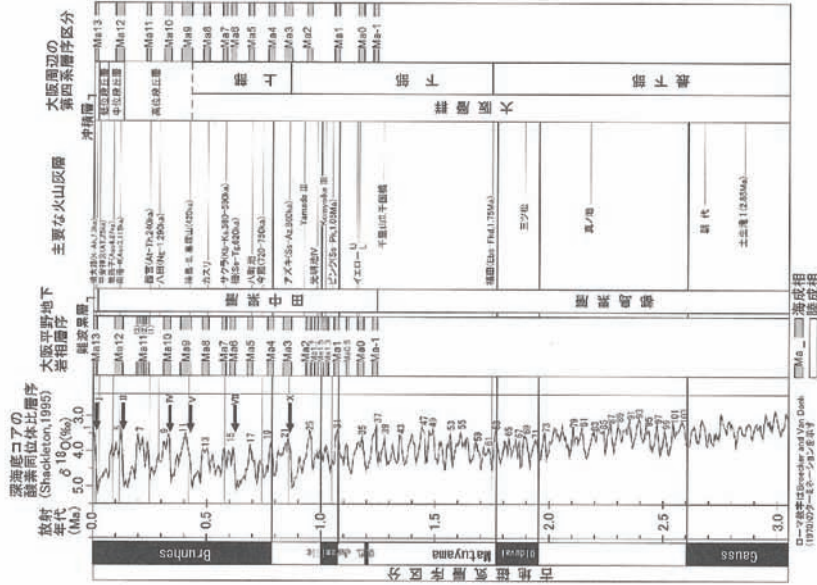


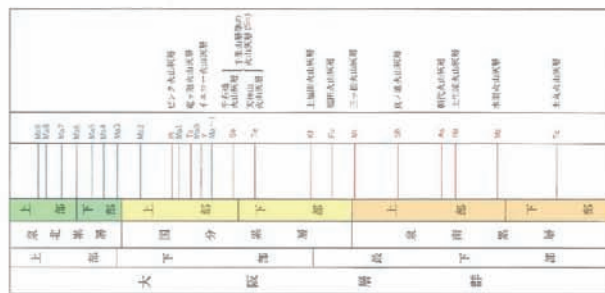
図32 大津川測線と湾岸第2測線の時間断面の対比



(a) 調査測線周辺の地質分布 (埋立部を除く)



(c) 大阪層群の層序区分と酸素同位対比層序との対比



(b) 大阪層群中の鍵層

Ma 9~Ma-1 : 海成粘土
P, Y, Se etc : 火山灰

出典 : (a, b) 市原美・市川浩一郎・山田直利(1986) : 5万分の1地質図幅「岸和田」、地質調査所
(c) 吉川周作・三田村赤樹(1999) : 大阪平野第四系層序と深海底酸素同位対比層序との対比、地質雑 誌 vol. 105, p. 332-340.

図33 調査地周辺の地質構成

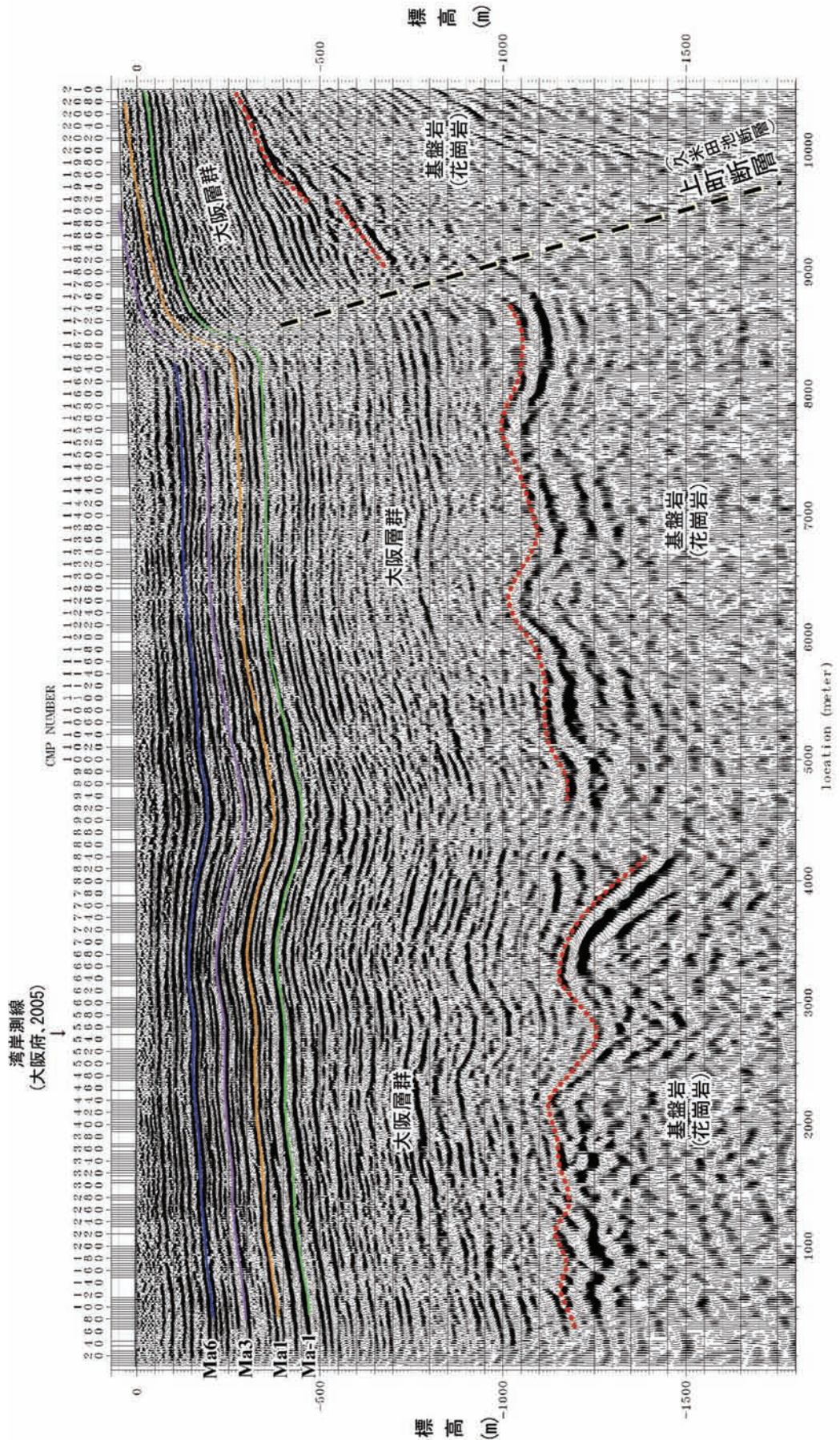


図34 地質構造解釈図

3) InSAR解析

陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS) 搭載のLバンド合成開口レーダー (PALSAR) 画像を用いた解析を行った。Lバンドのマイクロ波は波長が長いため、深い植生をも透過し、また急峻な地形に対しても良好な干渉を得ることができるため、我が国のような地域の干渉処理に適している。一方、波長が長いことは、短い波長のCバンド・レーダーなどより電離層の影響をより強く受けるという弱点があることを示唆している。電離層の擾乱は、どちらかというとも夜間に強く出ることが多いため、今年度は昼間の観測である南行軌道の画像を収集し、解析した。ただし、南行軌道においては光学観測が優先されるため、観測回数が北行軌道に比べて少ないという欠点を有する。

収集した観測画像は、パス65、フレーム2920で、京都から奈良盆地および大阪平野のほぼ全域をカバーしている。図35に、2007年10月9日の最初の観測を基準とした、15回の観測月日と垂直軌道間距離の関係を示す。図中の●は1回の観測を表し、これらを結ぶ直線は干渉処理をしたペアを示す。干渉処理においては、可能な限り短い軌道間距離が求められる。また、将来の時系列解析のためには、可能な限り多くの干渉ペアが必要であることから、図に示す17ペアについて干渉処理を行い、さらに干渉画像を見て、この内13ペアを用いてスタッキングを行った。解析には、Gamma Remote Sensing社のGamma Softwareを用いた。

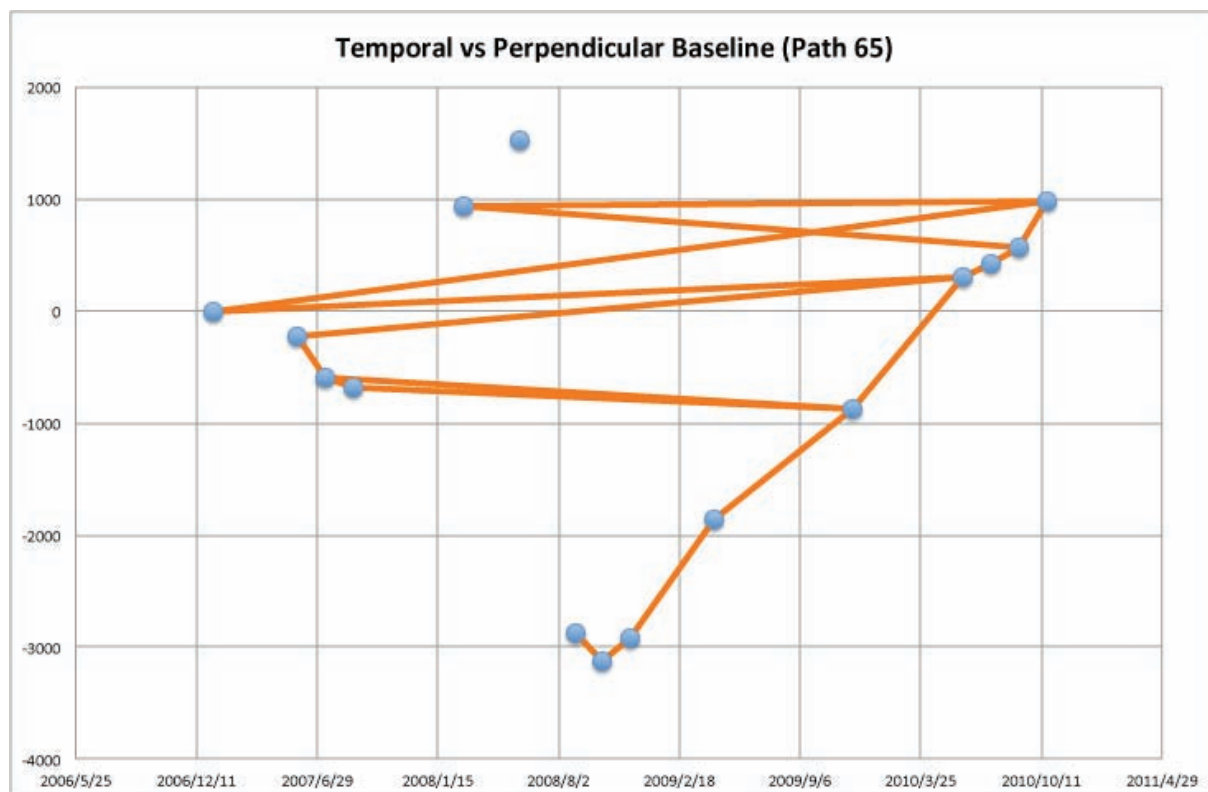


図35 解析に用いた南行軌道パス65、フレーム2920の観測月日と垂直軌道間距離の関係。
●が1回の観測、これらを結ぶ直線は干渉処理を行ったペアを示す。

図36、37に、視線方向変位に直した干渉画像を示す。SARの特質として、衛星と地表間の視線方向の距離の変動のみが示されている。南行軌道の場合、北から時計回りに約 110° 、仰角約 51° の視線方向となる。このため、得られた変動は、上下変動の成分の寄与がやや大きいと考えられる。変位の南北方向の成分の寄与は小さい。干渉画像中には ± 5 cm程度の変動が認められるが、生駒・和泉・六甲などの山地の形状とよく一致するものが多く、これらは標高に依存した大気遅延誤差の影響と考えられる。その他、平野に見られる不規則な変動パターンの多くは、異なるペアの干渉画像には同じようなパターンの変動は見られないことから、小規模な大気の擾乱と考えられる。ただ、京都盆地の南部に見られる視線距離短縮の変動は、多くのペアに見られるので、真の変動と考えられる。なお、解析においては、長波長の変動を除去している。電離層の擾乱は比較的長い波長の変動として現れることが多く、この処理によりかなり低減されているものと考えられる。

前記の大気の擾乱などは、観測日によって異なることが予想されるので、スタッキングすることにより低減できると考えられる。そこで、Gammaのスタッキング機能を用いて、13ペアについてスタッキングを実行した。その結果を、図38に示す。ここには良好な干渉が得られている13ペアについて、スタッキング処理をした結果を示している。標高依存の誤差を除去していないため、生駒や和泉山脈の形が残っている。これらを見れば、大阪平野の北部府庁の東側から淀川河口を経て尼崎周辺にいたる視線距離伸長、京都盆地南部の視線距離短縮、それから有馬-高槻構造線に沿った視線距離伸長が目立つ。京都-大阪府県境あたりにも視線距離伸長が目立つ。特に、京都盆地南部の視線距離短縮は年間1 cm近くに達している。湾岸部の埋め立て地では、年間1 cmまでのスケールを超えた視線方向伸長が見られ、埋め立て地の地盤沈下速度が大きいことを示唆している。府庁より南の大阪平野内においては、東側に小さい視線距離短縮、西側がほぼ変化なし。さらには、大阪平野南部では、東側が視線距離伸長、湾岸地域が視線距離短縮をなっている。これらのセンスが逆転する領域が上町断層とどのような関係にあるか、が関心のあるところであるが、かなり小さい変動であるため、結論的なことを述べるには時期尚早である。

なお、使用したALOS/PALSAR Level1.0画像の所有権は、独立行政法人宇宙航空開発研究機構および経済産業省にあります。

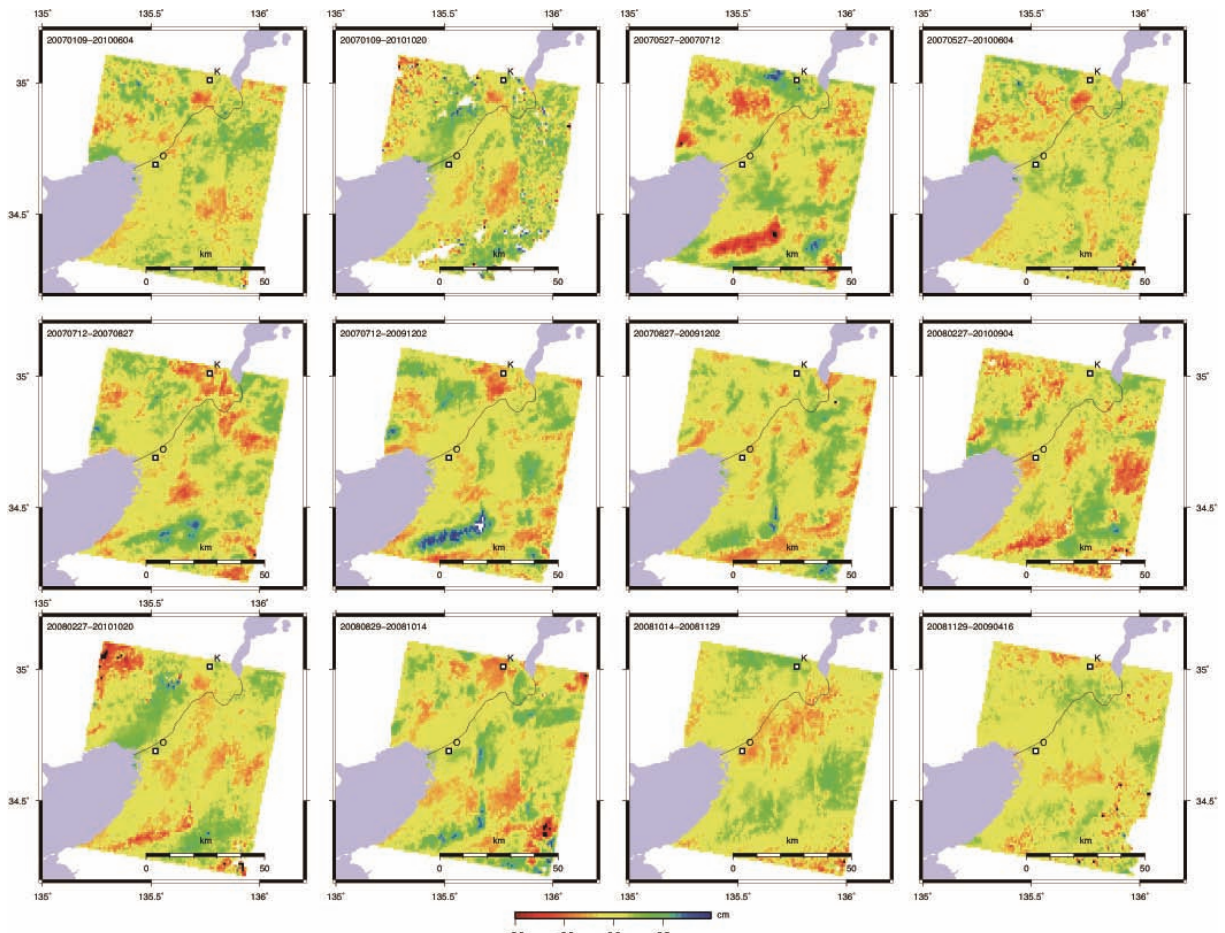


図36 干渉処理の結果得られた大阪平野を中心とする地域の変動。北から時計回りに約110°、仰角約51°の視線方向の距離変化を示す。短縮（赤）は地表面が衛星に近づく、すなわち隆起あるいは東向きの変動が卓越していることを示唆する。図中、□は京都（K）と大阪（O）府庁の位置を示す。

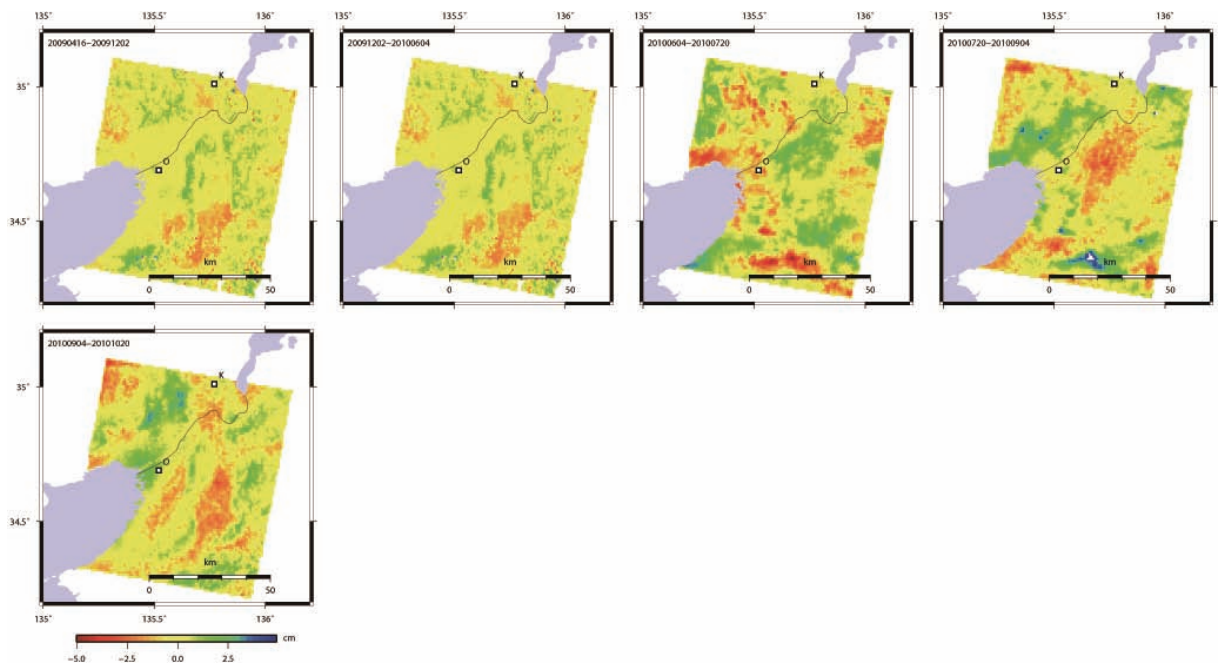


図37 干渉処理の結果得られた大阪平野を中心とする地域の変動（続き）。

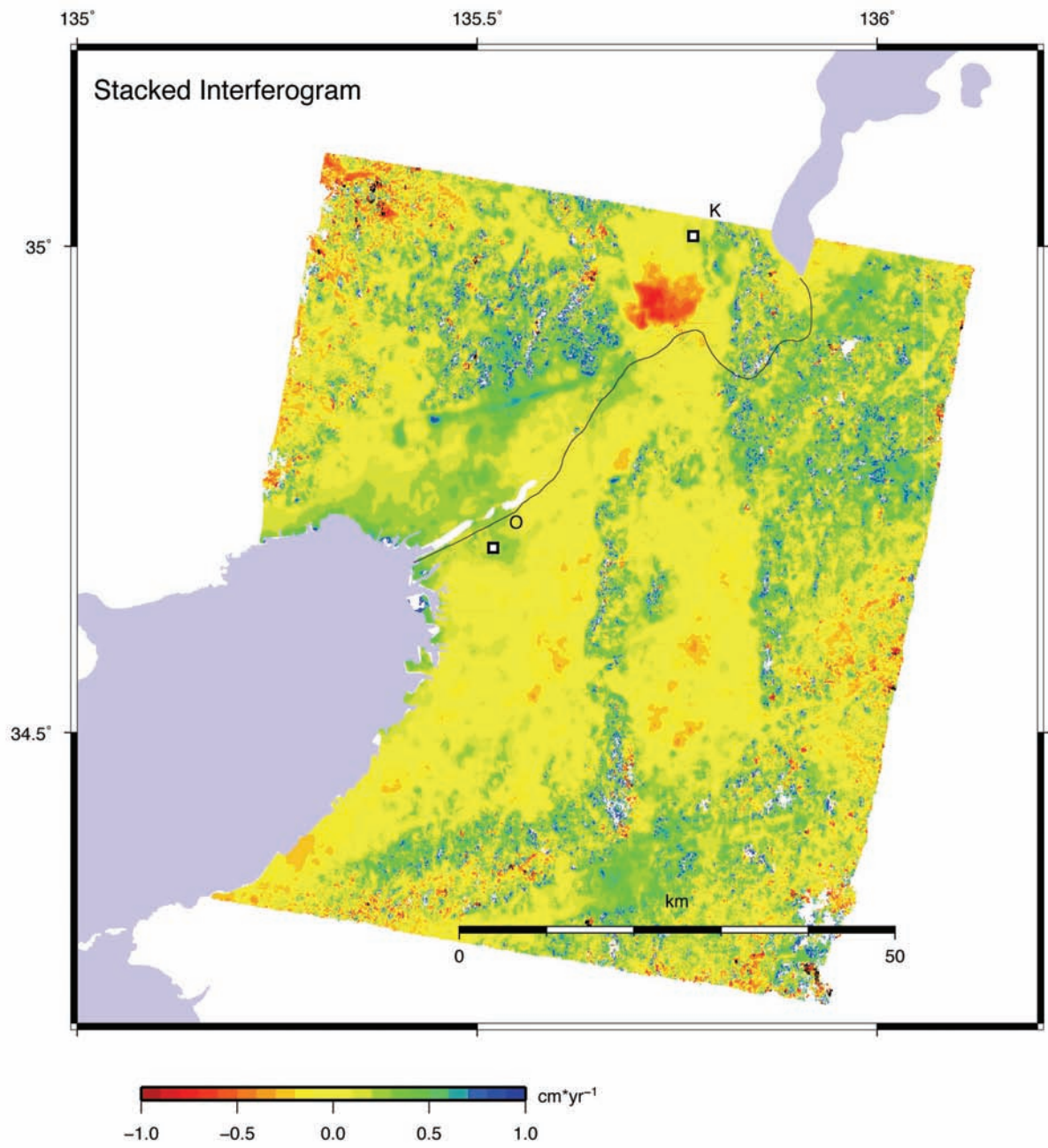


図38 13ペアの干渉画像のスタッキングにより得られた平均変動速度。赤が視線方向短縮を示す。

4) 変形ゾーン推定

a) はじめに

伏在断層である上町断層においては、地震活動がおきた際には地表が切れることだけでなく、変形を起こすことが予想される。実際地震波反射法探査による地下構造断面等では堆積層の撓曲構造が見られ、地表近くのボーリング資料を収集、断面図化することにより、変形ゾーンが確認されている（例えばKG-NET・関西圏地盤研究会、2007）。本項目においては、変形ゾーンのマッピングを最終目標として、今年度はそれに関わる様々な地盤情報を収集、整理することを行った。また、上町断層の震源断層形状の把握を大阪堆積盆地の生成過程と関連させて検討するために、大阪堆積盆地を囲む活断層の動きとそれによって形成される基盤形状変化及び重力変化に関するパラメータスタディに着手した。

具体的には、既存の反射法地震探査データを収集し、図面のデータアーカイブ化を行った。ボーリングデータは、関西圏に収集されてきたボーリングデータベースの使用許諾を受けて収集をすすめ、上町断層を横切ってボーリング情報の稠密な地域の断面をいくつか作成し、断層による地層変形の様相や地層変形の幅等に関する情報を整理した。データベース情報の精度向上のために、検証可能な既存ボーリングコア試料の再分析を実施した。断層近傍での地盤情報の調査結果の総合的な取りまとめを実施した。上町断層と大阪盆地を形成する周辺の断層との関係を基盤形状・重力異常の観点から検討するために、周辺の断層を単純化した断層モデルを作成し、断層傾斜角や滑り量等を変化させてdislocationモデルと重力変化を検討した。

b) 既存の反射法地震探査データ収集・図面のアーカイブ

大阪堆積盆地内で実施された、各機関の反射法地震探査データを収集し、図面のアーカイブ化を実施し、上町断層の形状・基盤深度分布の検討の資料を作成した。図39に収集している反射法探査測線を示す。堆積盆地構造や上町断層をはじめとする断層帯の形状調査のための探査が比較的多く行われている。

c) ボーリング資料の収集・整理

ボーリング資料の収集・整理をおこなうことで、上町断層に関連する情報を集約し、上町断層の特徴および分布などを検討するために有効な情報を抽出した。図40にはその例として大阪中央大通り沿いの東西ボーリングを収集した断面図を示す。この図面の解釈断面を図41に示す。密度の高い情報を得ることができていることから、上町台地の東西両サイドにおいて、海生層であるMa12層が堆積したあと、環境変化によって削られていることがこれらの断面から推察される。ここに示すように並べることにより、地質情報に関しては群列ボーリングと等価、もしくはそれ以上の密度の情報を得ることができている。収集された情報の中には、断層に沿って実施された複数の群列状ボーリングもあり、断層変形帯の抽出にも十分に有効と思われる情報も多数あることが確認された。年代情報等を得ることができる指標となるボーリングをこれらの中から抽出する、またポイントにおいて新規のボーリングを行って、指標を作成することによって、これらのボーリングデータベースの活用が飛躍的にすすむことが考えられる。

d) 断層形状の把握のための検討資料作成

断層通過位置近傍にて地盤情報を面的に可視化して検討できる程度の量のボーリングデータの収集を行った。ボーリング情報から面的な分布について検討を行うにあたり、各堆積場の特徴や形状、分布を推定し、その結果を基に、上町断層付近に見られる表層構造の特徴を抽出した。ボーリング情報で予測される構造のうち、桜川撓曲が派生断層として、上町断層主部より南西方向に分岐するとされてきたが、その後、方向を変えて南東方向に構造が変化する。そのため、桜川撓曲によって示される構造線の上盤域は西側に頂点を持つ三角形の地域に限定される。これは、ボーリングデータベースのみでなく、地質学的ボーリングの結果を見ても明らかである。構造の境界領域では、Ma12層が何らかの形で変形しているように観察されるが、あくまでボーリングデータベースからの推定であるため、最終的にはiii)でも述べたように現地ボーリング調査を実施して、層序を確認することが望ましい。

e) 既存地質コアの再分析などの現地確認調査

ボーリング資料の収集・整理の中で明らかとなった、桜川撓曲の形状を把握することに有効と考えられる既存コア 2本を選択し、このコアについての再度観察およびサンプリングを実施した。特に広域火山灰対比の個数が少ないので、再度確認された火山灰については、改めて火山灰分析を行って層序の確立を行った。その結果、桜川撓曲上盤地域の層序は非常に難しく、これまでの情報のみでは、Maナンバーの決定を行うことは難しいが、再度のボーリング調査を加えることで、格段に精度や特徴の把握が容易になると考えられる。

f) 地盤情報調査結果取りまとめ

断層通過位置近傍にて地盤情報を用いて、表層の断層による形状の把握を行うためにとりまとめを実施した。上町断層主部以西については、一般に沖積粘土に相当する Ma13層は水平に堆積して分布していることがわかった。しかしながら、Ma12層は構造付近で変形しているような構造が見られ、桜川撓曲部の構造の複雑な様相が明らかになった (図42)。

g) 断層変形構造の数値解析の資料作成

上町断層と大阪盆地を形成する周辺の断層との関係を基盤形状・重力異常の観点から検討するために、周辺の断層を単純化した断層モデルを作成し、断層傾斜角や滑り量等を変化させてdislocationモデルと重力変化を検討した (図43)。基盤形状は現在の上町断層のように北部と、南部に分かれ、中央部で一旦変位が少なくなる。この形状が上町断層のトレース位置にくるためには、生駒断層の変位量が大阪湾断層より小さくなければならない。どちらも同じ変位量だと、変位位置はより大阪湾側になる。

重力異常変化と比較すると、各断層に与えた滑り量では小さな変化しか期待されず、実際の重力異常に影響を及ぼすほどではない (図44)。しかし、滑り量が大きくなれば同様のパターンでの影響が予想される。パターンとしては、有馬-高槻構造線および中央構造線に起因する変化が顕著で、実際の重力異常パターンとは異なる。また、ここで検討した重力異常変化は断層運動に起因する密度の再配分によるものだけなので、実際の密度分布から推定される重力異常を加えることでブーゲー異常との比較・検討が可能となる。実際の

すべり量の検討や密度仮定に対する検討は次年度の課題とする。

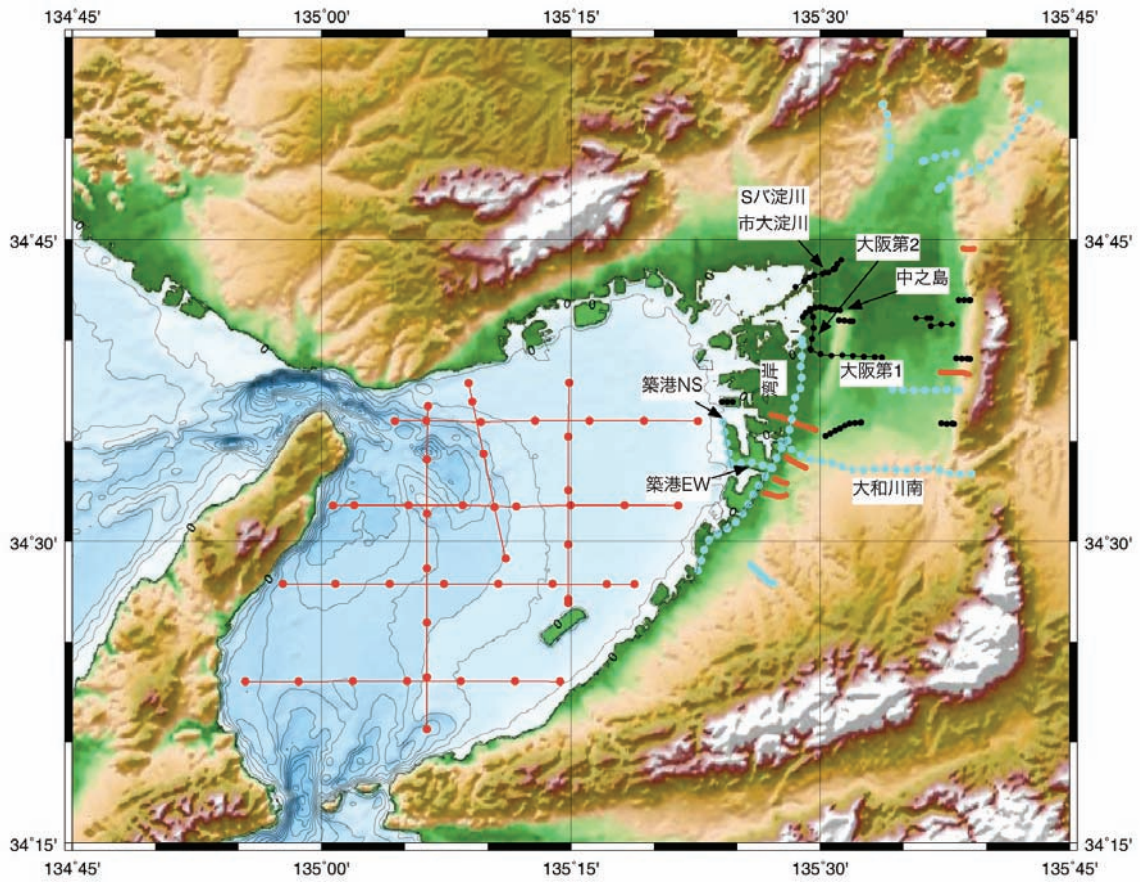


図39 収集した既存反射法地震探査測線データ位置図

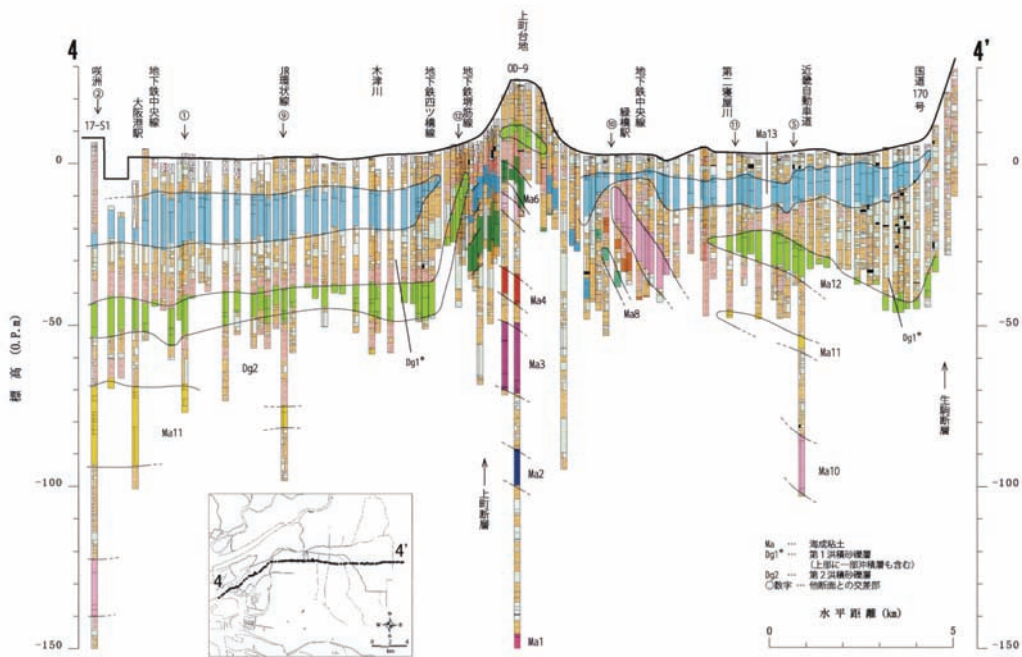


図40 中央大通り付近の東西ボーリング断面図

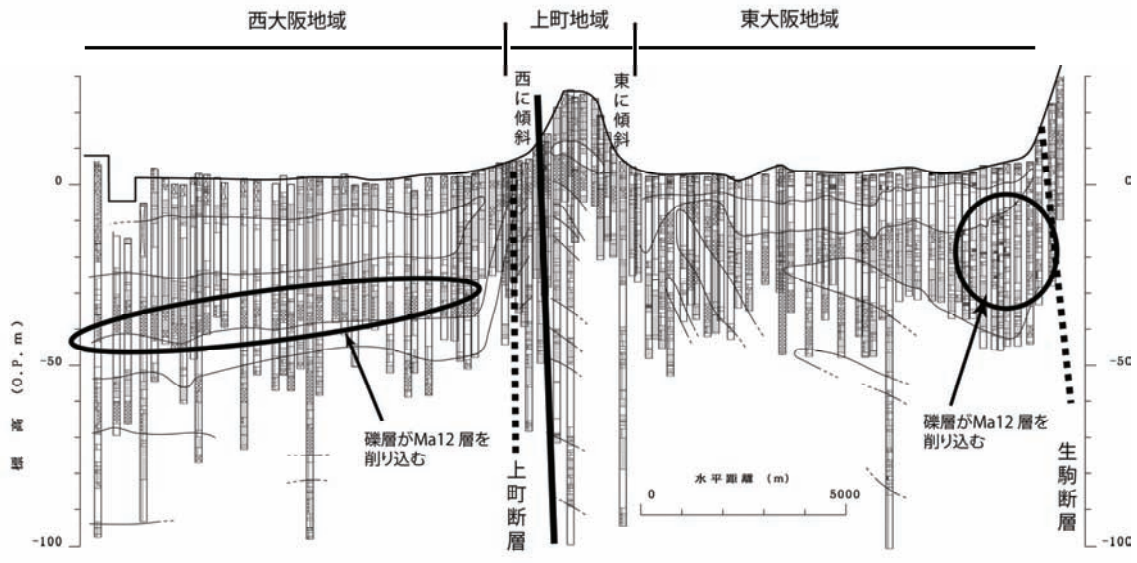


図41 図40の解釈断面

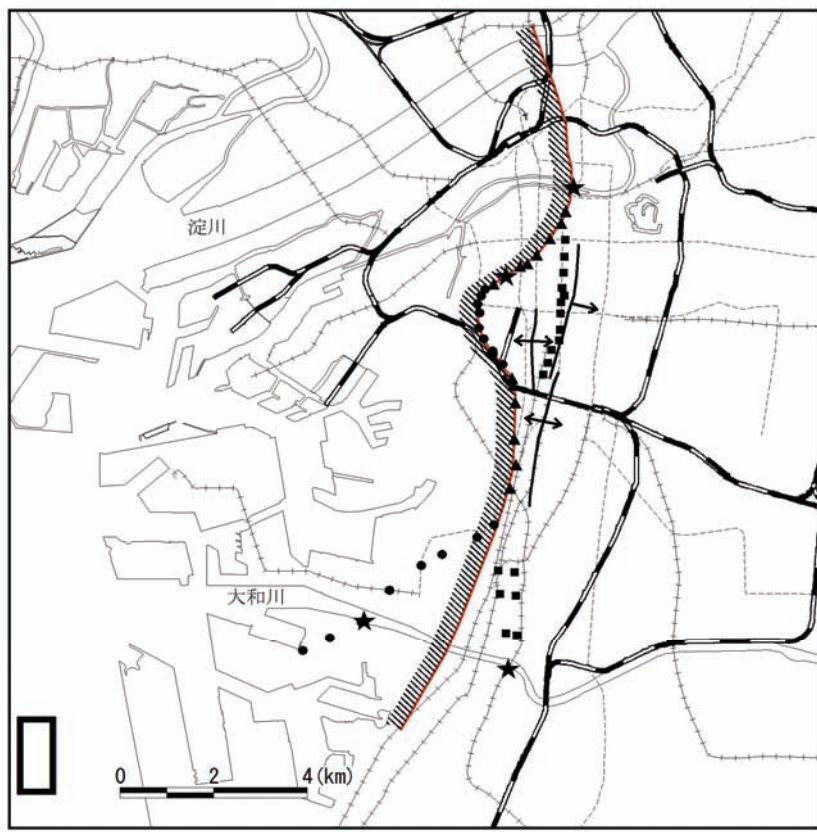


図42 ボーリングデータベース等から推定される構造。★：反射法地震探査で構造が確認された箇所、●：Ma12層の撓曲が見られた箇所（ボーリングデータより）、▲：Ma12層が側方に連続しなくなる箇所（ボーリングデータより）、■：Ma12層より下位の地層が側方に連続しなくなる箇所（ボーリングデータより）←|→：Ma12層より下位の地層にみられる背斜の軸、ハッチ部分：Ma12層の出現限界。

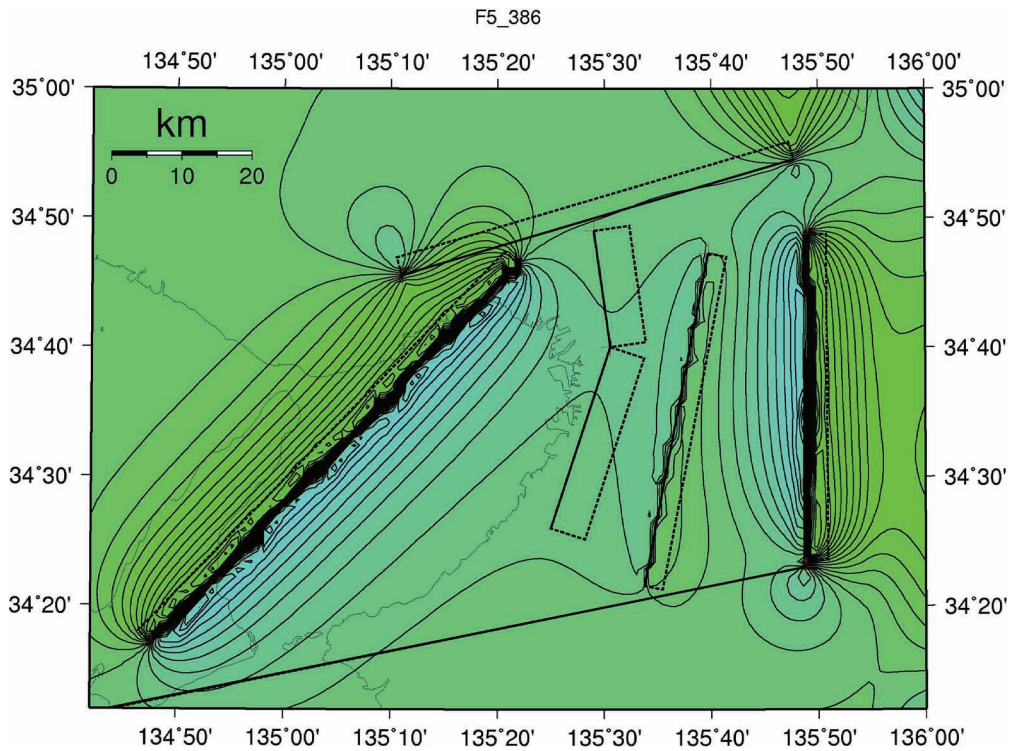


図43 ケース386の結果（上下変動成分、コンター間隔は1 m）。寒色が低い値を、暖色が高い値を示す。

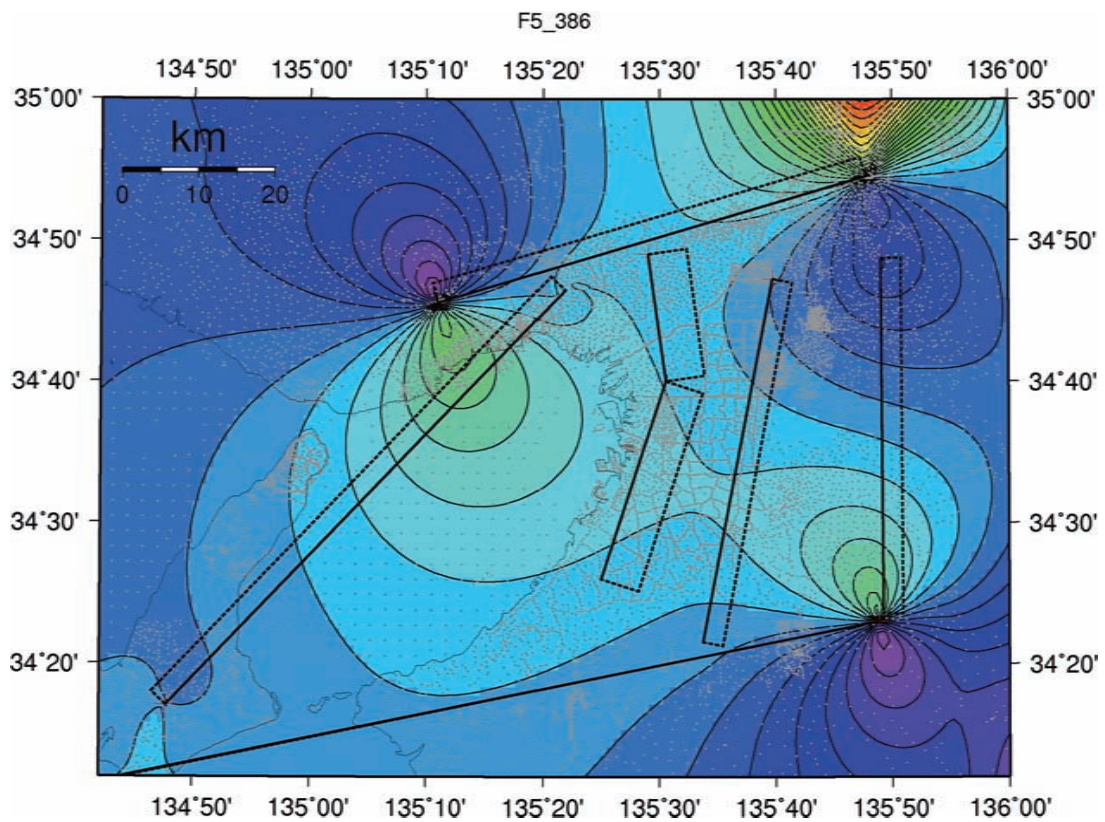


図44 ケース386の結果（重力異常変化、コンター間隔は0.05mgal）。灰色の点は重力測定点を示す。寒色が低い値を、暖色が高い値を示す。

5) 構造形成解析

個別要素法は、媒質を剛体球の集合体で表現し、それぞれの剛体球をばねでつないだものとして、媒質の弾性的性質を表現する(例えば、Cundall, 1971)。与えられた境界条件下で剛体球-ばね系の運動方程式を解くことにより、媒質の挙動をシミュレートする。ばねには、垂直方向のばね係数と、せん断方向のばね係数がある。また、これらの係数のほかに、せん断方向には摩擦係数を与える。媒質の弾性的性質(ヤング率やポアソン比)は、これらのばね係数や摩擦係数を与えることで表現される。また、岩石の強度は、ばね係数や摩擦係数のほかに、剛体球と剛体球を繋ぎとめておくボンドとよばれるパラメータの設定を行うことで表現される。

これらばね係数、ボンドといったパラメータと、ヤング率やポアソン比、さらには岩石強度との間に明確な関係式はない。そのため、個々の問題に対応する条件下で、三次元解析であれば3軸圧縮試験を、二次元解析であれば2軸圧縮試験を計算機の中で実施し、設定したいヤング率やポアソン比、圧縮強度となるよう、試行錯誤によってこれらのパラメータを決定する(例えば、Itasca, 2004; Finch et al., 2004)。

PFC 2Dを用いた本シミュレーションは、二次元解析であるため、未固結堆積層のヤング率207MPa、ポアソン比0.24、圧縮強度13MPaとなるよう、2軸圧縮試験を行い、垂直方向、せん断方向のばね定数を 5×10^8 N/m、摩擦係数を0.6、垂直方向、せん断方向のボンドを1MNと推定した。図45にその応力-ひずみ曲線を示す。

本シミュレーションでは、対象とする地盤を幅3km、深さ950mの堆積層(密度2000kg/m³)とし、この堆積層の下に基盤岩が存在していると仮定した。この基盤の断層運動によって生じる堆積層の変形パターンをシミュレートした。モデルでは、堆積層は4583個の粒子で構成されており、粒子を繋ぐばね係数等は、上述のとおりである。なお、上述のパラメータ設定の際に行った2軸圧縮試験のサンプルサイズは、このモデルサイズそのもの、すなわち、高さ0.95km×幅3kmで行った。また圧縮試験は、9MPaの封圧下で行われるよう設定した。封圧9MPaは、地下450m付近の静岩圧に相当する。

上町断層は、逆断層であると予想されているため、まず、地表に達しない基盤の逆断層運動による堆積層の変形パターンのシミュレーションを行った。基盤岩に300m程度の逆断層運動が生じたときの堆積層の変形場を図46に示す。図46(a)は傾斜45度、図46(b)は60度、図46(c)は80度、図46(d)は90度である。傾斜角90度の逆断層運動は参考のためここに示す。図中の黄色と青色の色分け(100m間隔)は、変形パターンを見やすくするために着色しただけであり、物性等に違いはない。

一方地表に達しない基盤の正断層運動による堆積層の変形パターンのシミュレーションを行った。逆断層運動が生じたときの堆積層の変形シミュレーション同様、基盤岩に300m程度の正断層運動が生じたときの堆積層の変形場を図47に示す。図47(a)は傾斜60度、図48(b)は80度、図49(c)は90度である。傾斜角90度の正断層運動は、参考のためここに示す。図中の色分け(100m間隔)は、変形パターンを見やすくするために着色しただけであり、物性等に違いはない。

図46と図47を比較すると、逆断層周辺の堆積層には弱い褶曲構造がみられるが、正断層周辺部の堆積層には、垂直断層を除いて、このような構造は見られないなど、堆積層の変形パターンは、基盤の断層運動が、逆断層運動なのか正断層運動なのかによって異なる。

断層面が地表に達せず、地震探査等により堆積層の変形のみ捉えられている場合には、個別要素法を用いたシミュレーションは、一定の評価や解釈、あるいは震探解釈の検証に応用できる可能性があることがわかった。

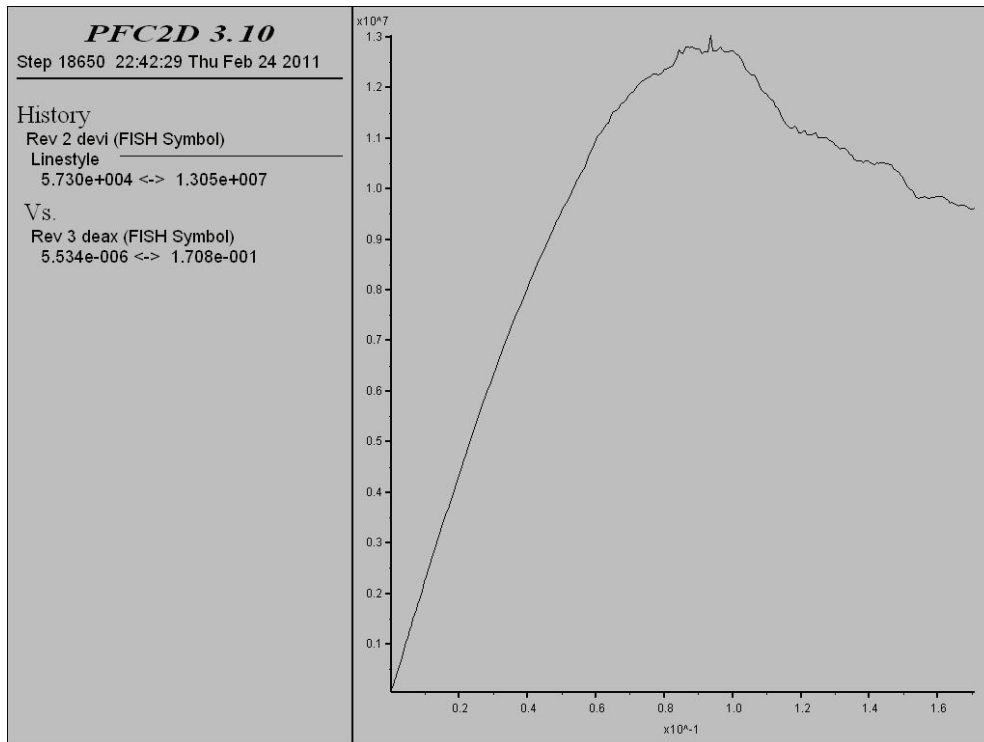


図 45 応力-ひずみ曲線。縦軸と横軸は其々、偏差応力と軸ひずみ。

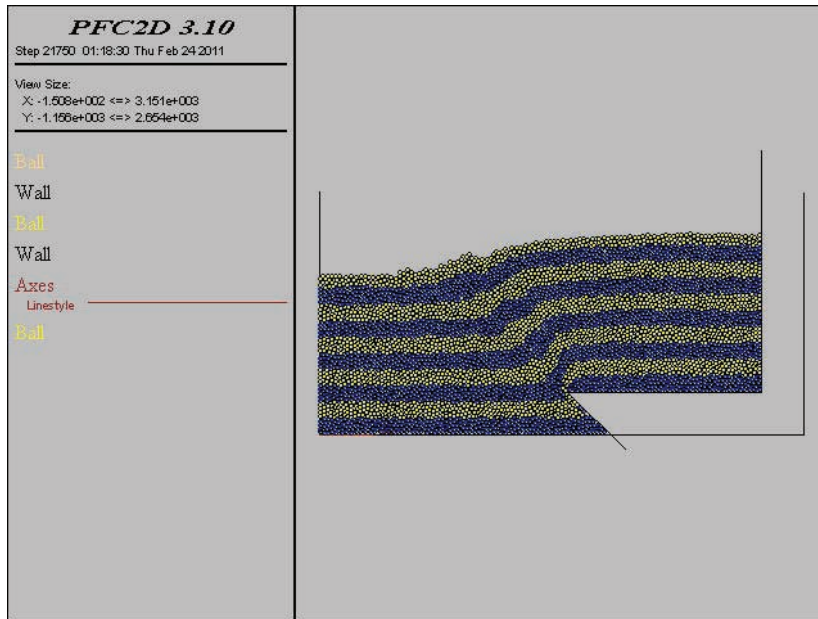


図 46(a) 傾斜角 45 度の逆断層運動による堆積層の変形

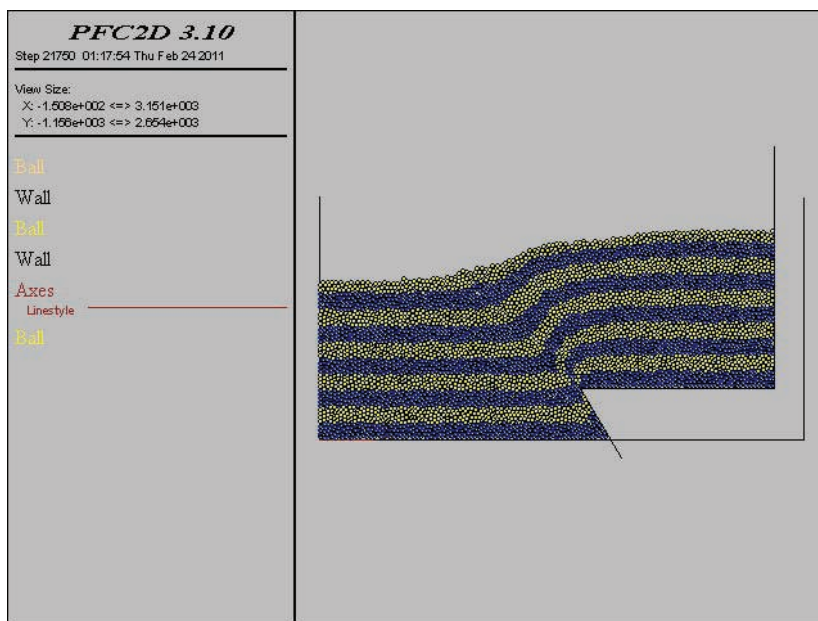


図 46(b) 傾斜角 60 度の逆断層運動による堆積層の変形

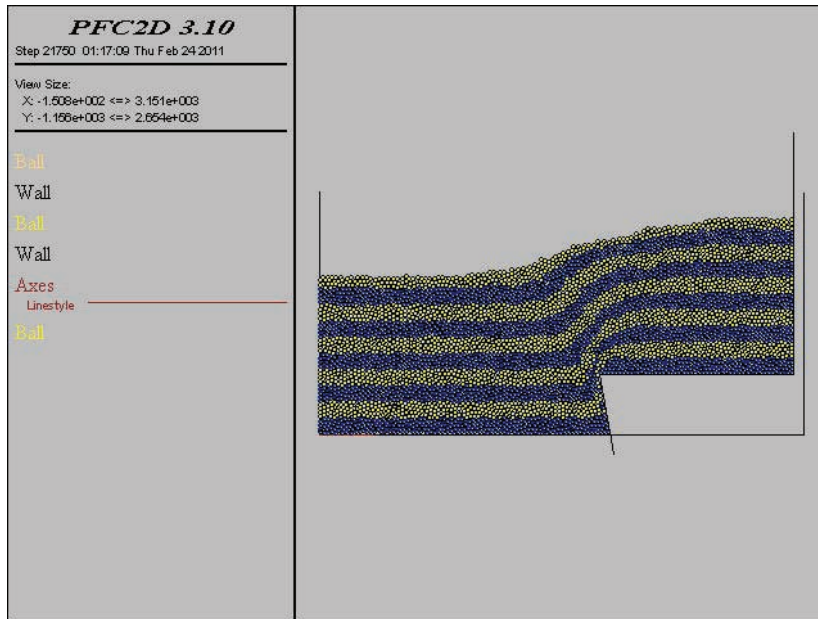


図 46(c) 傾斜角 80 度の逆断層運動による堆積層の変形

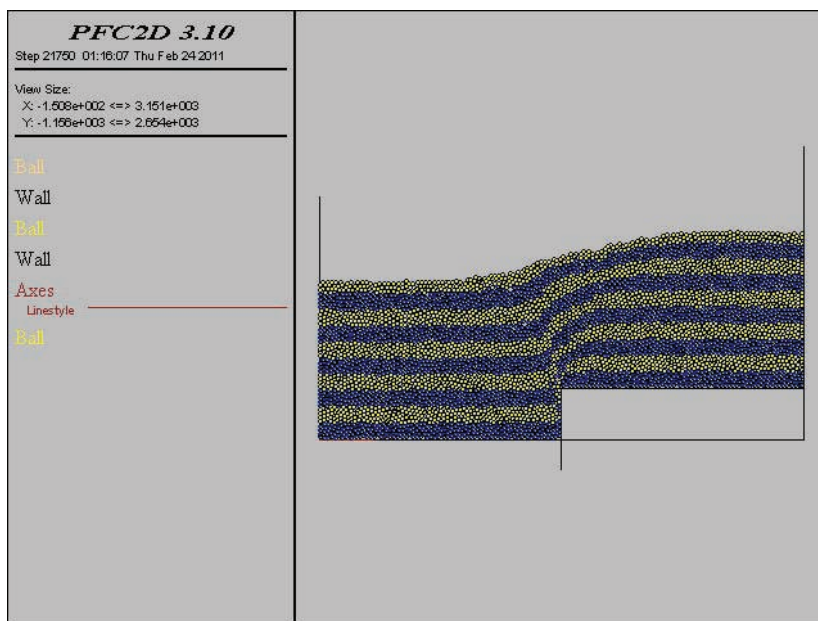


図 46(d) 傾斜角 90 度の逆断層運動による堆積層の変形

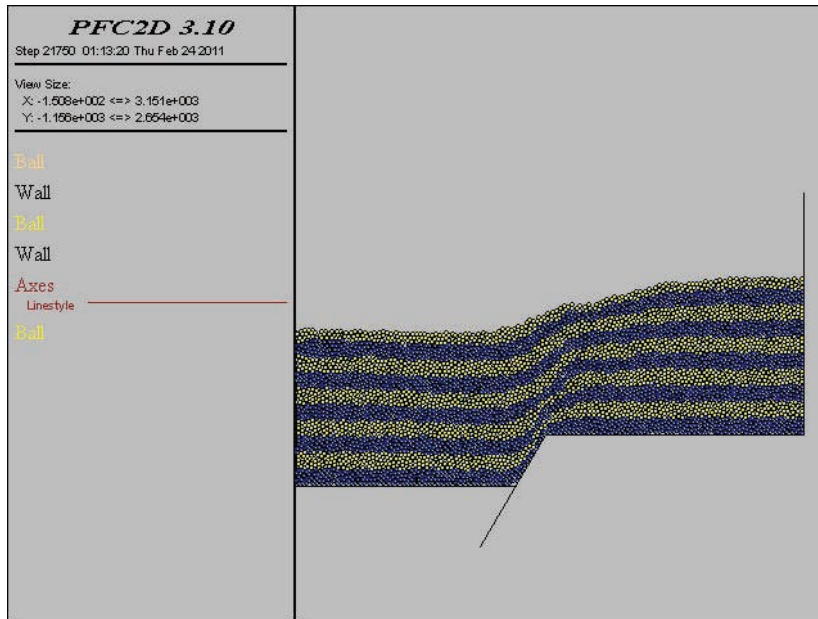


図 47(a) 傾斜角 60 度の正断層運動による堆積層の変形

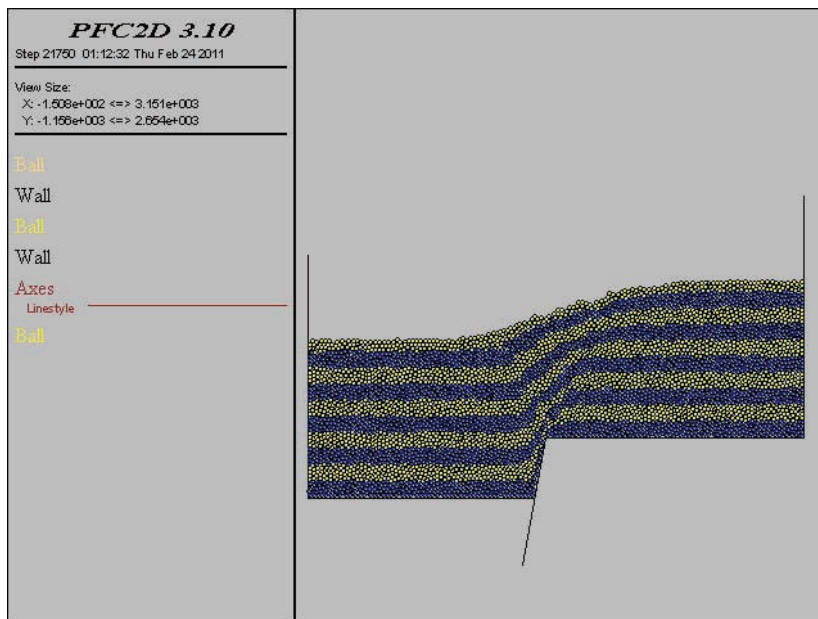


図 47(b) 傾斜角 80 度の正断層運動による堆積層の変形

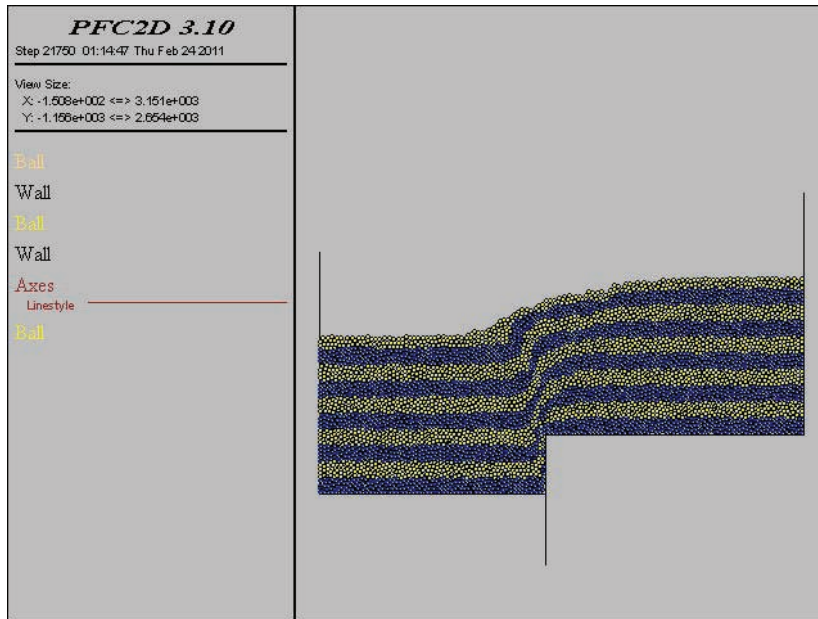


図 47(c) 傾斜角 90 度の正断層運動による堆積層の変形

(c) 結論ならびに今後の課題

1) 長測線地震探査の解析

上町断層帯および周辺の断層帯を対象として、既存の長大展開記録について、屈折トモグラフィ解析及び屈折トモグラフィ解析結果に基づく反射法再解析を実施した。平成16年度に実施された大都市圏地殻構造調査「大阪-鈴鹿測線」及び「新宮-舞鶴測線」について再解析した結果、以下の結果が得られた。

- ・ 屈折トモグラフィ解析の結果、上町断層、枚方撓曲、交野断層、有馬高槻断層帯真上断層に対応する明瞭な側方速度変化が認められた。
- ・ これらの側方速度変化は既存の反射法断面における反射パターンの変化と良好な一致を示す。
- ・ 上町断層については、速度分布において逆断層形状が明瞭な形で再現された。また、これに基づく重合前深度マイグレーション処理結果は下盤側の深部形状がより明瞭となり、屈折トモグラフィ結果の妥当性が確認された。

ただし、以下の点に課題を残しており、引き続き検討が必要である。

- ・ 屈折トモグラフィ解析結果において上町断層上盤側の基盤速度が約5000m/sと当地域で想定される速度より遅く推定されている。当該箇所周辺は特に基盤からの屈折初動振幅が微弱であり、初動読取結果も含めて再検討を要する。
- ・ 真上断層については、屈折トモグラフィ解析結果による速度分布は北傾斜を示唆しているが、当該断層については正断層成分を伴った地溝帯とする既往研究（例えば、戸田・他，1995）があり、これと矛盾する。本再解析に用いた新宮舞鶴測線は当該断層低下側において住宅密集地を通過しており記録質は良好とは言い難い。本解析結果の妥当性も含めて慎重な検討を要する。
- ・ 再解析対象地域のうち有馬高槻断層帯以南においては基盤をなす領家花崗岩類と直上の大阪層群下部・最下部との間に極めて大きな速度コントラストが存在する。本業務で用いたターニングレイを仮定する屈折トモグラフィ解析では、階段的な速度境界は一定の幅を持って漸増する速度変化として表現されるため、この速度コントラストが十分に表現できていない可能性が高い。これに対しては、フォワードモデリングを伴う速度モデルの再構築等をおこない、実際の物性境界に即したモデルの提示が必要である。

2) 地震波反射法探査

これまで地震波反射法探査が行われていなかった大阪府南部の上町断層帯南部において、上町断層帯を横切る測線（大津川測線）での反射法探査を行った。上町断層帯南部の久米田池断層に対応する地震基盤の食い違いと堆積層の撓曲構造を見いだすことができた。また湾岸部において、基盤の凸構造とその南東側において、基盤に食い違いがあることがわかった。これは大津川測線湾岸部の海側に重力探査によって推定されている基盤の盛り上がりに対応している可能性がある。今後は平成22年度にサブテーマ1で行われているDEMマップとの対比等を行い、上町断層帯の南部についての構造情報を高度化する。

3) InSAR解析

陸域観測技術衛星「だいち」搭載の合成開口レーダーPALSARの画像を用いて、大阪平野

の平均地盤変動速度の分布を得た。大阪平野の北部府庁の東側から淀川河口を経て尼崎周辺にいたる視線距離伸長、京都盆地南部の視線距離短縮、それから有馬-高槻構造線に沿った視線距離伸長、さらに京都-大阪府県境あたりにも視線距離伸長を認めた。

2011年5月12日をもって陸域観測技術衛星「だいち」が運用を停止したため、新しい観測データが得られなくなった。今年度は南行軌道のみデータをを用いた解析に留まっているため、平成23年度はよりデータ蓄積量が多い北行軌道のアーカイブ画像を用いて解析を行い、今年度の結果と統合することにより、上下変動の抽出を行う。

「だいち」のLバンドSARは干渉性が高いものの、変位の解像度がやや低い。この欠点を補うため、Cバンド、Xバンドの他の衛星のアーカイブデータを取得し、複数バンドでの解析を試みる。

4) 変形ゾーン推定

上町断層帯の地震断層面形状と断層帯周辺の地殻構造解明のために断層近傍変形構造の空間分布や変形様式等を明らかにすることを目的にした。そのために、反射法地震探査結果やボーリング資料等を収集整理した（KG-NET・関西地盤協議会、2007などを利用）。断層近傍の変形構造の把握のため、検討図面を作成した。既存地質コアの再分析などの現地確認調査を実施した。断層近傍の地盤情報調査結果取りまとめを行った。断層変形構造の数値解析の資料作成等を実施した。

今後の課題として、1. これらの情報やボーリングデータベースの情報をあわせて、断層変形ゾーンの分布図を作成すること。2. 構造の境界領域では、Ma12層が何らかの形で変形しているように観察されるが、あくまでボーリングデータベースからの推定であるため、最終的には現地ボーリング調査を実施による層序の確認。3. 桜川撓曲上盤地域の層序は非常に難しく、これまでの情報のみでは、到底 Maナンバーの決定を行うことは難しいので、再度のボーリング調査を加えることで、格段に精度や特徴の把握が必要。4. 検討した重力異常変化は断層運動に起因する密度の再配分によるものだけなので、実際の密度分布から推定される重力異常を加えることでブーゲー異常との比較・検討が可能となり、実際の滑り量の検討や密度分布の影響の検討、が上げられる。

全体として、基準ボーリング精度の向上、パラメータ設定の高度化などが変形構造の解明等に必要になる。

5) 構造形成解析

堆積層の撓曲構造と地震基盤下の震源断層の食い違いの特徴を見るため、逆断層と正断層の動きを、個別要素法を用いてモデルシミュレーションし、比較を行った。撓曲構造の特徴と断層運動には対応が見られることがわかった。今回のシミュレーション結果は、堆積層の弾性定数や強度パラメータとして、概数を与えておこなったため、この結果をそのまま大阪湾や、上町断層周辺の反射法等によって得られている断面に適用することは難しい。今後は、大阪層群の物性値に則したモデルを作成し、地震探査の解釈図と共にモデルを作成、議論を行っていききたい。

(d) 引用文献

- Cundall, P. A., Distinct element models of rock and soil structure, *Analytical and Computational Methods in Engineering Rock Mechanics* (Ed. by E. T. Brown), 129-163. Unwin Publishers, London, 1971.
- Finch, E., Hardy, S., and Gawthorpe, R., Discrete-element modelling of extensional fault propagation folding above rigid basement fault blocks, *Basin Research*, **16**, 489-506, 2004.
- 市原実・市川浩一郎・山村直利, 和田地域の地質, 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 地質調査所, 148pp, 1986.
- Ikebe, N. and J. Takenaka, Geologic structure of Osaka Basin, Chapter 4 of Report on Land Subsidence, Editorial Committee for Technical Report on Osaka Land Subsidence, Osaka, Japan, 46-88, 1969.
- Itasca, PFC2D: Particle Flow Code in 2 Dimensions, version 3.1, Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, Minnesota, 2004.
- 岩淵 洋・西川 公・野田直樹・雪松隆夫・田賀 傑・宮野正実・酒井建治・深沢 満, 反射法音波探査に基づく大阪湾の基盤と活構造, 水路部研究報告, **36**, 1-23, 2000.
- 岩崎好規・香川敬生・澤田純男・松山紀香・大志万和也・井川 猛・大西正純, エアガン反射法地震探査による大阪湾の基盤構造, 地震第2輯, **46**, 395-403, 1994.
- KG-NET・関西圏地盤研究会, 新関西地盤—大阪平野から大阪湾—, 450pp, 2007.
- 栗本史雄・山田直利・佐藤光男, 大阪平野南西部における大阪層群と基礎の花崗岩-岸和田市並松町のボーリング資料-, 地質調査所月報, **41-12**, 657-663, 1990.
- 岡田篤正・東郷正美, 近畿の活断層, 東京大学出版会, 395pp, 2000.
- 大阪府, 平成8年度地震調査研究交付金「上町断層帯に関する調査」成果報告書, 大阪府, <http://www.hp1039.jishin.go.jp/danso/OsakaFufirm.htm>, 1997.
- 大阪府, 平成10年度地震関係基礎調査交付金「上町断層帯に関する調査」成果報告書, 大阪府, <http://www.hp1039.jishin.go.jp/danso/OsakaFufirm.htm>, 1999.
- 大阪府, 平成16年度地震関係基礎調査交付金「大阪平野の地下構造調査」成果報告書 (概要版), 大阪府, 55pp, 2005.
- 杉山雄一, 上町断層系の反射法弾性波探査, 地質調査所研究資料集, **303**, 105-113, 1997.
- 杉山雄一・七山 太・北田奈緒子・竹村恵二・横田 裕・末廣匡基, 上町断層系の補足調査 (その1) —石津川沿い沖積低地におけるP波及びS波反射法地震探査, 活断層・古地震研究報告, **3**, 103-115, 2003.
- 戸田 茂・川崎慎治・竹村恵二・岡田篤正, 反射法地震探査の断面に見られる有馬—高槻構造線に沿う地溝帯, 地震第2輯, **48**, 511-520, 1995.
- 吉川周作・三田村宗樹, 大阪平野第四系層序と深海底酸素同位体比層序との対比, 地質学会誌, **106**, 332-340, 1999.