

(2-1) 自然地震を用いた三次元地殻構造

大見士朗（京都大学防災研究所）

ohmi@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp

(a) 業務の要約

本項目では、自然地震・制御震源を用いた内陸活断層の深部モデルと地殻内三次元構造モデルの構築に関する研究を行なう。ここでは、その中のサブテーマとして、自然地震データを用いたトモグラフィ等の手法により、内陸活断層や周辺地殻の三次元速度構造モデルの推定を行なうことを目的とする。

(b) 業務の実施方法

はじめに

活断層やその周辺地域の精密な三次元地震波伝播速度構造を求めることは、強震動のシミュレーションにとって必要であるだけでなく、地震の発生環境としての活断層のテクトニクスを理解するためにも重要である。本研究では、自然地震を用いたトモグラフィ手法により、近畿地方のいくつかの活断層（図 1 参照）の深部構造を求めるほか、周辺の地殻内三次元地震波速度構造を求め、強震動のシミュレーションに資するためのデータを作成する。得られる結果は、地震活動そのほかのデータとの比較により、当地域の地震発生環境の理解にも資することが期待される。

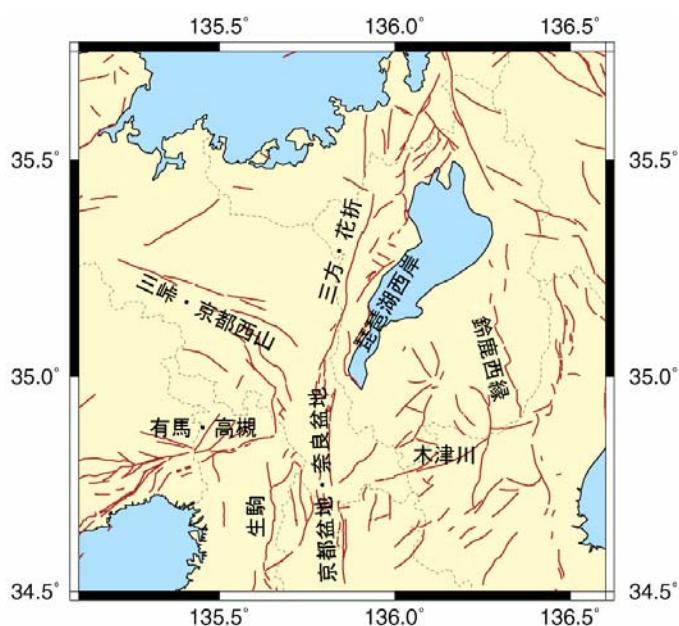


図1 近畿地方の活断層の分布。茶色の実線が活断層を示す。

これまでの研究

近畿地方においては、これまでもいくつかの研究により、三次元地震波速度構造の研究が行なわれてきた。Zhao and Negishi (1998)¹⁾は、兵庫県南部地震の合同余震観測 (Hirata et al, 1996²⁾) の観測データを用いて、兵庫県南部地震の震源断層である野島断層から有馬高槻構造線にかけての地域の地震波速度構造を求めた。これによると、兵庫県南部地震の震源付近は、P波、S波とも顕著な低速度異常を示し、ポアソン比が高い領域であることが判明した。これは、この領域に流体が満たされた岩石が分布しているためと解釈され、これらの流体が破壊開始に寄与したのではないかと考えられた。また、Zhao et al. (2000)³⁾により、日本全域の三次元地震波速度構造モデルが求められ、これと内陸の大きな地殻内地震の発生場所の関連が調べられた。それによれば、1885年から1999年までの115年間に発生したM5.7からM8.0までの内陸の地殻内地震は、ほぼ普遍的に地震波速度の低速度領域の周縁部で発生していることが明らかになり、兵庫県南部地震もその例であることが指摘された。これらの低速度異常域は、沈み込む海洋性プレートの脱水反応によって生じる流体によるものと考えられ、これにより地殻の強度低下が起こり、大きな地震が発生すると考えられている。最近、Okada et al. (2004)⁴⁾は、Zhao and Negishi (1998)¹⁾が使用したものと同一データとDouble-Difference Tomographyの手法を用い、兵庫県南部地震の震源域の微細構造の再解析を行い、断層に沿う地域が低速度領域を呈しながら、かつアスペリティに相当する部分は周囲よりも高速度を呈することを明らかにした。

解析方法とデータ

今年度は、平成 17 年度に引き続き、トモグラフィ解析に頻繁に用いられており大量のデータの取り扱いに優れているZhao et al. (1992)⁵⁾のプログラムを用いて、近畿地方中央部の構造のイメージングを試みた。今回は、トモグラフィ手法の改善により、対象地域の全域にわたって詳細・精密な結果を得るために、トモグラフィのステップを2段階に分けた。具体的には、(1)比較的粗いグリッドによる、広域・深部までの計算、(2)その結果を初期値として考察している地域の精密な構造を求めるための計算、の2段階に分けて解析を行なった。これにより、対象地域の末端部（東西南北の端部、最深部等）まで信頼できる結果が得られることが期待される。また、観測点近傍の走時異常を補正するために、前処理として、トモグラフィ解析の前に、観測点補正值を評価して走時データの補正も行なった。

1) 走時データの前処理

トモグラフィ解析の前に、観測点近傍の走時異常を補正するために観測点補正值を評価して走時データを補正することを試みた。トモグラフィ解析に用いる地震のカatalogの中から、深さが100kmよりも浅い地震(図2)について、JMA2001の速度構造(上野, 他, 2001⁶⁾) (図3)を使用してhypomhプログラム(Hirata and Matsu'ura, 1987⁷⁾)による通常の震源決定を行ない、各観測点の走時残差の平均値をそれぞれの観測点の観測点補正值として走時データを補正した。観測点補正の解析に使用した地震数は約16000個、観測点数は220点である。

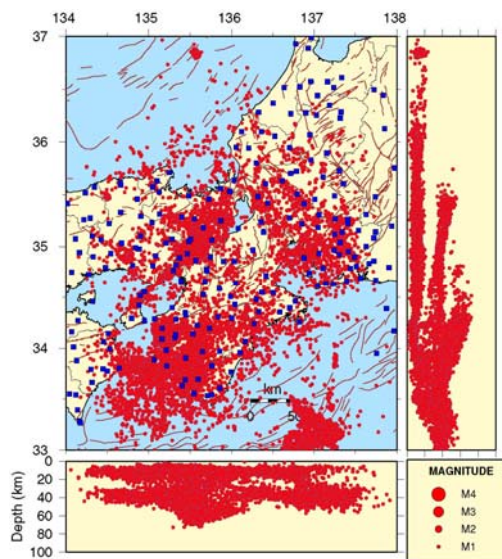


図2 観測点補正值の解析に
使用した地震と観測点

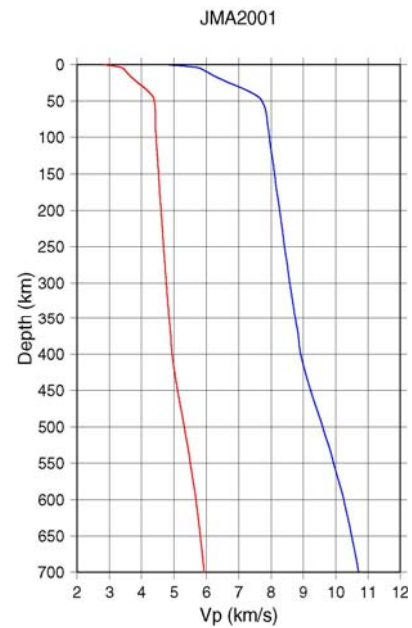


図3 地震波速度構造
(JMA2001)

図4に各観測点での走時残差の分布を示す。図4(左)が観測点補正值を使用しない場合の震源決定に基づく、各観測点の走時残差の分布である。図4(右)は、左図に見られる各観測点の走時残差を観測点補正值として与え、走時データを補正し、再度震源決定を行なった際の走時残差の分布を示す。観測点補正を適用することにより、各観測点の走時残差が小さくなっている。

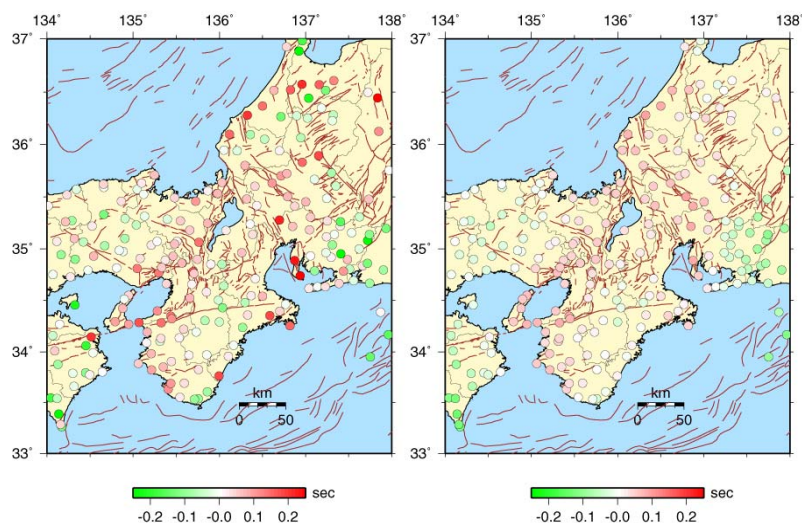


図4 各観測点の走時残差の分布
(左) 観測点補正值無し (右) 観測点補正值有り

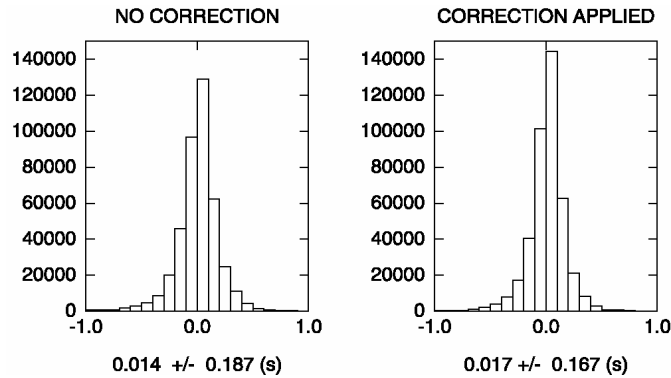


図5 全P波データの走時残差分布
 (左) 観測点補正無し
 (右) 観測点補正有り

また、図5に、全P波走時データの走時残差分布を示す。観測点補正を適用して震源決定したもの（右）の方が残差の分布が狭い範囲にかたまるようになっている。これらの結果は、観測点近傍の構造による走時異常を、ある程度補正できたためと考えられる。ここで求めた観測点補正を施した走時データを、トモグラフィ解析の入力データとする。

2) トモグラフィ解析：ステップ1（比較的粗いグリッドによる、広域・深部までの計算）

第1ステップでは、対象領域よりも広域・深部までのグリッドを設定して計算を行なった。この結果を、第2ステップの入力とする。設定したグリッド配置を図6に、使用したデータを図7に示す。グリッド配置は水平方向 0.2° 間隔、深さ方向には 5km～200km間隔で設定した。使用したデータは、JMAカタログを用い、1998年1月から2005年10月までの地震のなかから、P波検測値、S波検測値がそれぞれ8個以上あるという条件で選んだ。地震数は約17000、観測点数は220である。使用したP波検測値は約42万、S波検測値は約41万となった。走時データには、1)で求めた観測点補正值による補正を施した。解析の際の初期構造はJMA2001の速度構造（上野・他、2001⁶⁾）（図3）を使用した。

ステップ1での解の信頼性を見るための「チェッカーボードテスト」の結果を図8に示す。チェッカーボードテストでは、水平方向 0.2° 刻みでテストデータを置き、使用した波線データでイメージを復元できるかどうかを調べている。チェッカーボード模様が復元できている地域の解の信頼性は高い。ここでは、深さ 0 km、5 km、10 km、15km、20km、25km、30km、35kmの結果を示す。広域・深部の地震までをデータとして使用しているため、最終的な対象地域である近畿地方中央部においては、20km程度の深さまではある程度の解像度があると考えられる。

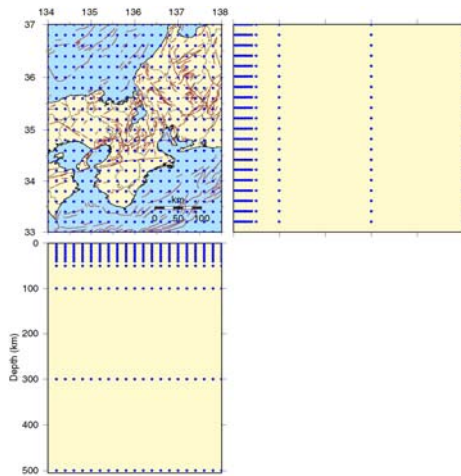


図6 ステップ1での解析に用いた
グリッド配置。水平方向は0.2
度、深さ方向は5kmから200km
のスペーシングに設定。

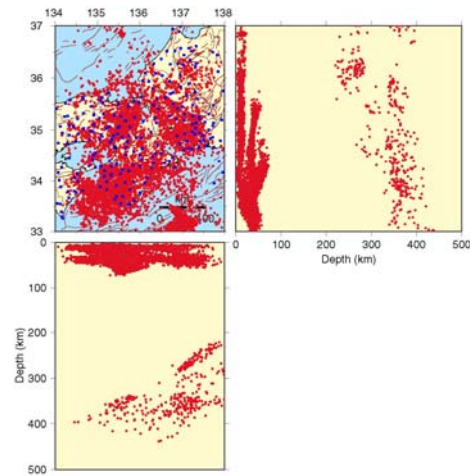


図7 ステップ1での解析に用いた観測
点（青四角）と地震（赤丸）。地震
数約17000個、観測点数220点、検
測データはP、Sとも約40万個強を
使用。

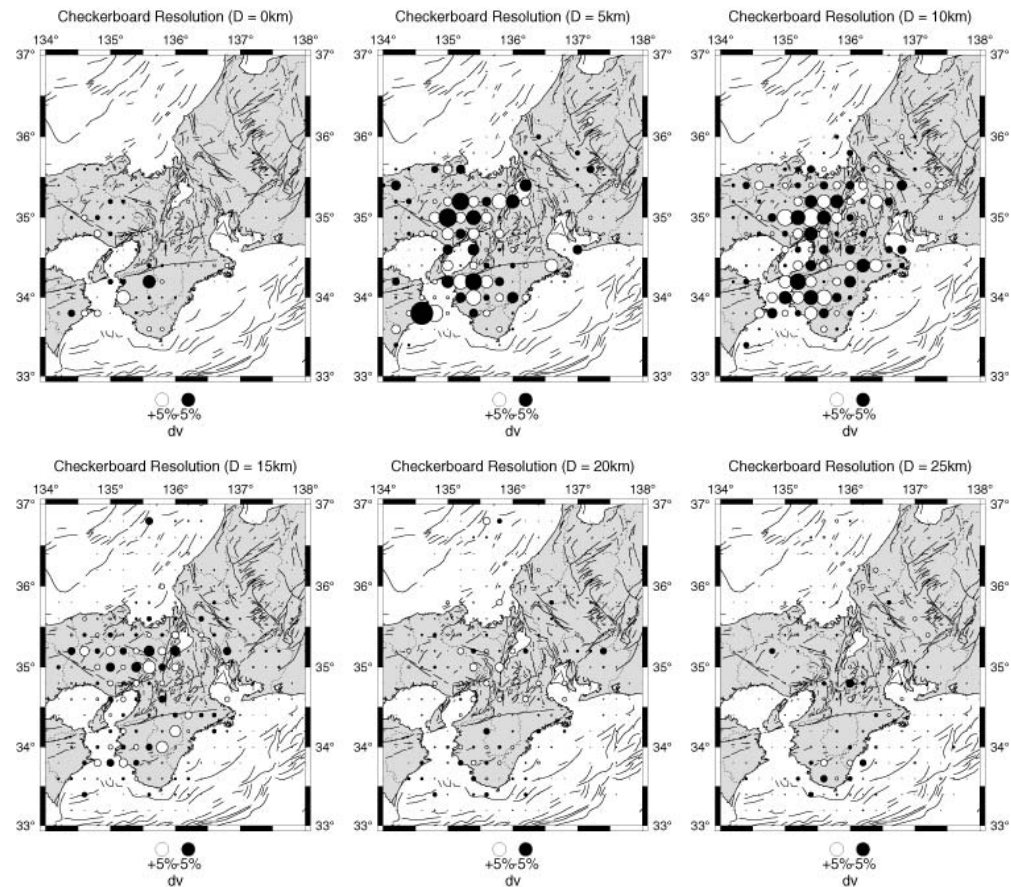


図8 チェッカーボードレゾリューションテストの結果。

3) トモグラフィ解析：ステップ2（対象地域に詳細なグリッドを設定）

第2ステップでは、解析領域として、近畿地方の中心部を対象とし、水平方向には 0.1° （約10km）、深さ方向には5kmから10kmのグリッドメッシュを設定した（図9）。データは、2)で使用したデータセットから、地震の深さが80kmより浅いもの、P波検測値、S波検測値がそれぞれ10個以上あるという条件で選んだ。地震数は約7800、観測点数は89である。使用した検測値は、P波、S波ともに約15万個となった。図10には、使用した地震と観測点の分布を示している。解析の初期構造としては、2)の結果を補間して与えた。

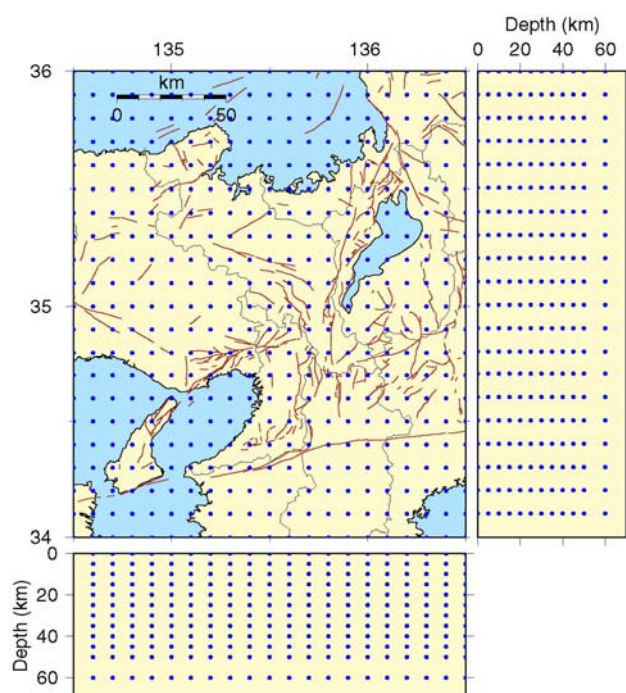


図9 ステップ2での解析に用いたグリッド配置。水平方向は 0.1° 度、深さ方向は5kmから10kmのスペーシングに設定。

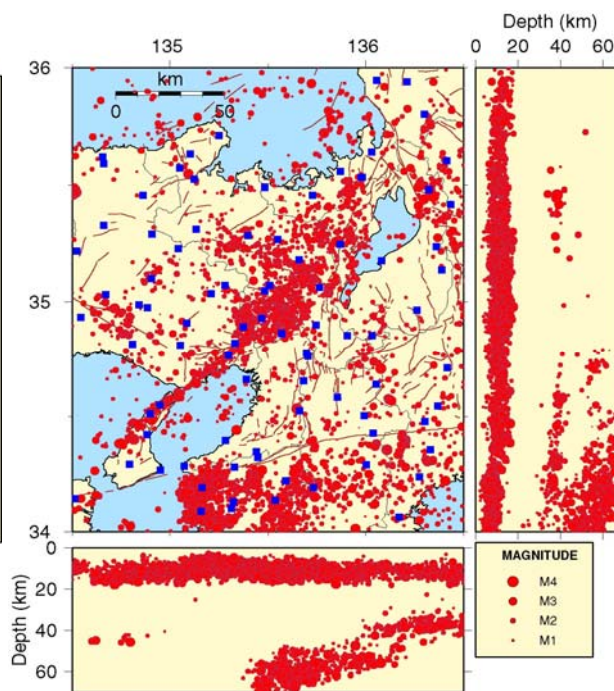


図10 解析に用いた観測点（青四角）と地震（赤丸）。地震数約7800個、観測点数89点、検測データはP、Sとも約15万個を使用。

(c) 業務の成果

解析結果と考察

得られたトモグラフィ解析の結果を図11に示す。これらは、(b)-3)の、対象地域に詳細なグリッドを設定したステップ2の結果である。0 km、5 km、10 km、15km、20km、25kmの深さのP波およびS波の速度構造の計算結果を、速度の初期値からの揺らぎ（%）で示している。この結果によれば、活断層のトレースと低速度領域に良い対応が見られる地域があることがわかる。深さ5kmの結果では、有馬・高槻構造線から花折・琵琶湖西岸断層に至る地域、京都府中西部の三峠・西山断層系に至る地域の低速度領域が顕著である。そのほかにも、山崎断層の南東部に延びる低速度域や、和歌山市付近の中央構造線に沿うものが見て取れる。さらに、兵庫県南部地震の震央付近にも顕著な低速度異常域が認められ

る。これらの傾向は、S波速度構造にも認めることができる。深さ 5km で認められた傾向は、深さ 10km、15km でも引き続き認めることができ、活断層のトレースに沿う低速度異常は、少なくとも上部地殻内部では深部まで連続しているように見える。

(d) 結論ならびに今後の課題

今年度の結果と来年度の課題

平成 17 年度は、前年度に引き続き、気象庁一元化データに基づく自然地震の走時データを使用した解析を行なった。その結果、近畿地方中央部で、活断層に沿って低速度異常が見られることが判明した。この傾向は、有馬・高槻構造線をはじめとして、花折、琵琶湖西岸断層、三峠・西山断層系、山崎断層南東部などの主な活断層周辺に共通して見られている。また、表層のみならず、解の信頼性が期待される 15km 程度の深さまで共通して認められ、活断層のトレースに沿う低速度異常は、少なくとも上部地殻内部では深部まで連続しているように見える。

今回の解析では、表層の影響を除去することを目的として、観測点補正値の評価を行って走時データに補正を施したものを使用した。深さ 0 km の結果を見る限り、特定の観測点近傍に局在した速度異常は特に見られないので、本手法の効果があったのではないかと考えられる。

強震動予測のための波形計算に資するためには、速度構造の絶対値が必要となる。しかしながら、今回の解析の印象では、速度構造の相対的なパターンは得られているが、それを絶対値に変換するためにはさらにパラメタのチューニングが必要であるように見える。特に、S波速度構造は揺らぎが大きく、トモグラフィ計算に与えるパラメタの調整により、相対的なパターンは変わらないものの、揺らぎの振幅が変化する傾向が見られる。本解析では、P波速度構造とS波速度構造を独立に解析する手法を採っているが、S波速度構造の絶対値の検証のため、P波速度構造とS波速度構造の同時インバージョンの手法を採用するなどして、速度構造の絶対値の検証が必要であると思われる。

謝辞

Dapeng Zhao 博士から、トモグラフィ解析のためのプログラム一式を提供していただいた。記して感謝申し上げる。

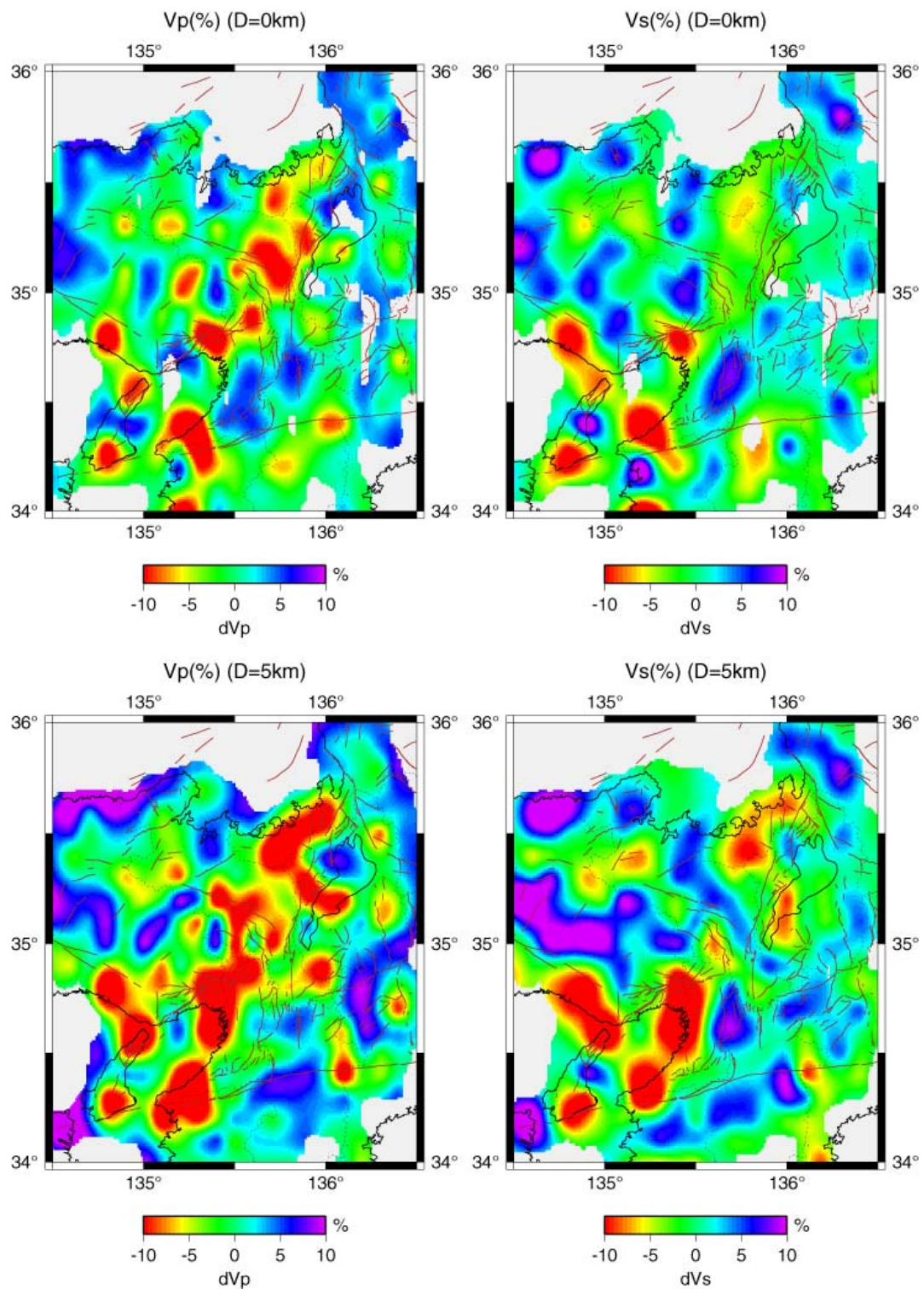


図 1 1 (a) 得られた P 波速度構造 (左) および S 波速度構造 (右)。上段が深さ 0km、下段が深さ 5km の結果。それぞれ、各層内の平均的な速度値からの揺らぎを示す。

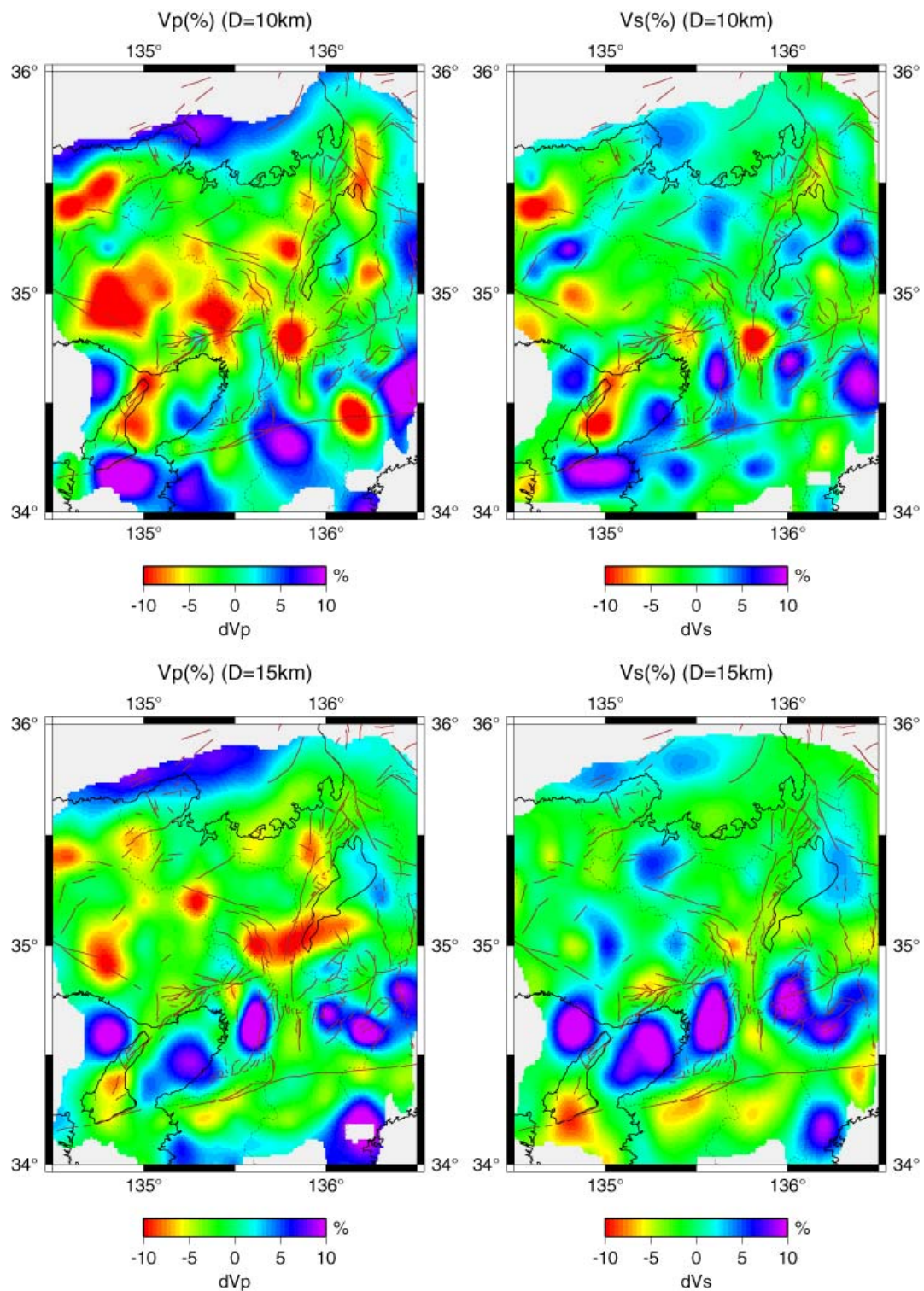


図 1 1 (b) 得られた P 波速度構造 (左) および S 波速度構造 (右)。上段が深さ 10 km、下段が深さ 15km の結果。それぞれ、各層内の平均的な速度値からの揺らぎを示す。

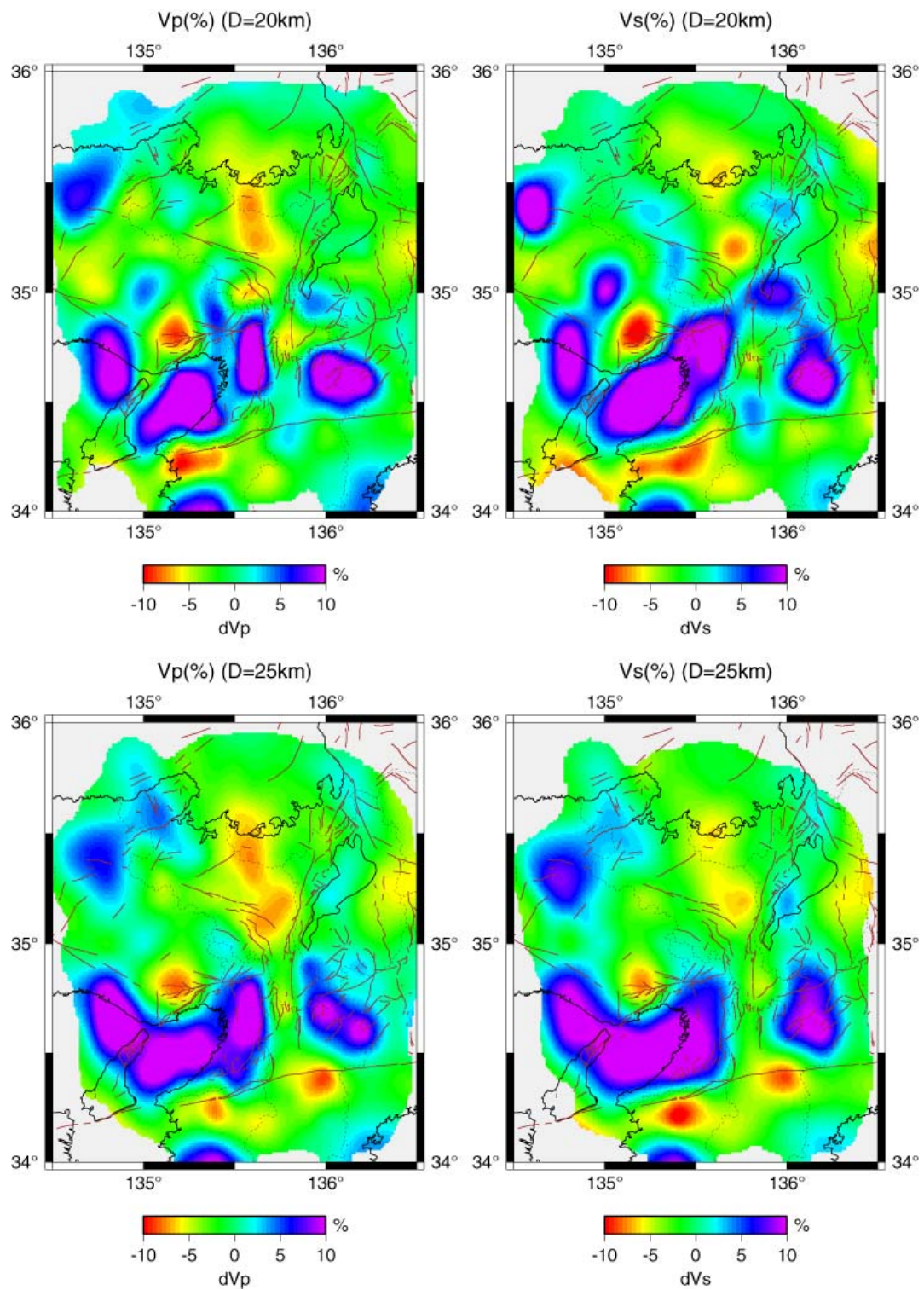


図 1 1 (c) 得られた P 波速度構造 (左) および S 波速度構造 (右)。上段が深さ 20km、下段が深さ 25km の結果。それぞれ、各層内の平均的な速度値からの揺らぎを示す。

(e) 引用文献

- 1) Zhao, D. and Negishi, H.: The 1995 Kobe earthquake: Seismic image of the source zone and its implications for the rupture nucleation, J. Geophys. Res., Vol.103, pp.9967-9986, 1998.
- 2) Hirata, N., Ohmi, S., Sakai, S., Katsumata, K., Matsumoto, S., Takanami, T., Yamamoto, A., Iidaka, T., Urabe, T., Sekine, M., Ooida, T., Yamazaki, F., Katao, H., Umeda, Y., Nakamura, M., Seto, N., Matsushima, T., Shimizu, H. and Japanese University Group of the Urgent Joint Observation for the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake.: Urgent joint observation of aftershocks of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake., J. Phys. Earth, Vol.44, pp.317-328, 1996.
- 3) Zhao, D., Ohchi, F., Hasegawa, A. and Yamamoto, A.: Evidence for the location and cause of large crustal earthquakes in Japan, J. Geophys. Res., Vol.105, pp.13579-13594, 2000.
- 4) Okada, T., Hasegawa, A., Suganomata, J., Zhao, D., Zhang, H., Thurber, C.: Imaging the fault plane and asperities of the 1995 southern Hyogo (Kobe) earthquake (M7.3) by double-difference tomography, Eos Trans. AGU, Vol.85, No.47, Fall Meet. Suppl. Abstract S53C-01, 2004.
- 5) Zhao, D., Hasegawa, A. and Horiuchi, S.: Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan, J. Geophys. Res., Vol.97, pp.19909-19928, 1992.
- 6) 上野 寛, 畠山信一, 明田川 保, 舟崎 淳, 浜田信生:気象庁の震源決定方法の改善 -浅部速度構造と重み関数の改良-, 験震時報, Vol.65, pp.123-134, 2002.
- 7) Hirata, N. and Matsu'ura, M.: Maximumlikelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique, Phys. Earth Planet. Interiors, Vol.47, pp.50-61, 1987.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

1)論文発表

なし

2)口頭発表、その他

なし

(g) 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