

3. 2 地殻応力場推定のための微小地震解析

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 地殻応力場推定のための微小地震解析

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立研究開発法人 産業技術総合研究所	主任研究員	内出 崇彦
国立研究開発法人 産業技術総合研究所	研究企画室長	今西 和俊
国立研究開発法人 産業技術総合研究所	研究員	椎名 高裕

(c) 業務の目的

近年観測された微小地震等の震源位置を精密に再決定し、不均質を考慮した三次元速度構造モデルを構築する。微小地震解析によりメカニズム解を決定し、断層形状を推定する。

(d) 年度毎の実施業務の要約

1) 令和2年度：

既報の三次元速度構造モデルを収集し、対象断層帯全域にわたるモデルを構築した。

2) 令和3年度：

断層帯で発生している地震の震源決定とメカニズム解推定を行う。震源断層周辺の微小地震分布から断層形状を推定する。

3) 令和4年度：

断層帯の応力場推定を行い、断層セグメントごとのテクトニック応力場を取りまとめる。

(2) 令和2年度の成果

(a) 業務の要約

四国地方の中央構造線及びその周辺における地震波速度構造について、文献調査並びに地震波走時トモグラフィ解析を実施し、地下構造の特徴を調べ、次年度以降実施する震源再決定への影響を検討した。四国地方の地震波速度構造は、中央構造線を挟んで北部では高速度域、南部では低速度域としておおよそ特徴づけることができる。気象庁一元化震源カタログと比較した場合、地震波速度の3次元的不均質性を考慮することで、地殻内で発生する地震の震源深さが数 km 程度浅くなると考えられる。また、令和3年度以降に実施予定の課題との関連で、日本全国内陸部における震源メカニズム解カタログを用いて応力場を概観したところ、四国地域の応力場は広域的な東西圧縮場と整合的であることがわかった。また、四国東部では中央構造線を境に南北で応力軸方位が異なる可能性が示された。

(b) 業務の成果

1) 文献調査

四国地方における中央構造線周辺域の地震波速度構造モデルに関連する先行研究の調査を行った。表1に代表的なモデルを示す。対象地域では、直達波の到着時刻を用いた地震波トモグラフィ解析（例えば、Ikeda et al., 2006; Matsubara et al., 2017）に加えて、モホ面反射P波と解釈される波群（PmP波）の到着時刻（Gupta et al., 2009）や常時雑微動（Nishida et al., 2008）を用いた解析により、地震波速度構造の推定が行われている。これらの先行研究は四国地方では中央構造線北側で地震波速度が速く、南側で遅くなる傾向を示している（図1～3）。このような地震波速度分布は深さ20～30 km程度まで確認できる（図4、図5）。また、重力異常でも中央構造線を境にした南北の変化が認められ、北側で負のブーゲー重力異常がより大きくなる（植田, 2005）（図6）。

表1 代表的な地震波速度構造モデル

論文	モデル	データ・解析手法
Gupta et al. (2009)	中央構造線付近の 3次元P波速度偏差構造	直達P波およびPmP波の到着時刻・トモグラフィ解析
Ikeda et al. (2006)	中国・四国地方の 3次元P波速度偏差構造	直達P波の到着時刻・トモグラフィ解析
Matsubara et al. (2017)	日本列島の3次元P波・S波速度偏差構造	直達P波と直達S波の到着時刻・トモグラフィ解析
Nishida et al. (2008)	日本列島の 3次元S波速度偏差構造	常時雑微動・トモグラフィ解析

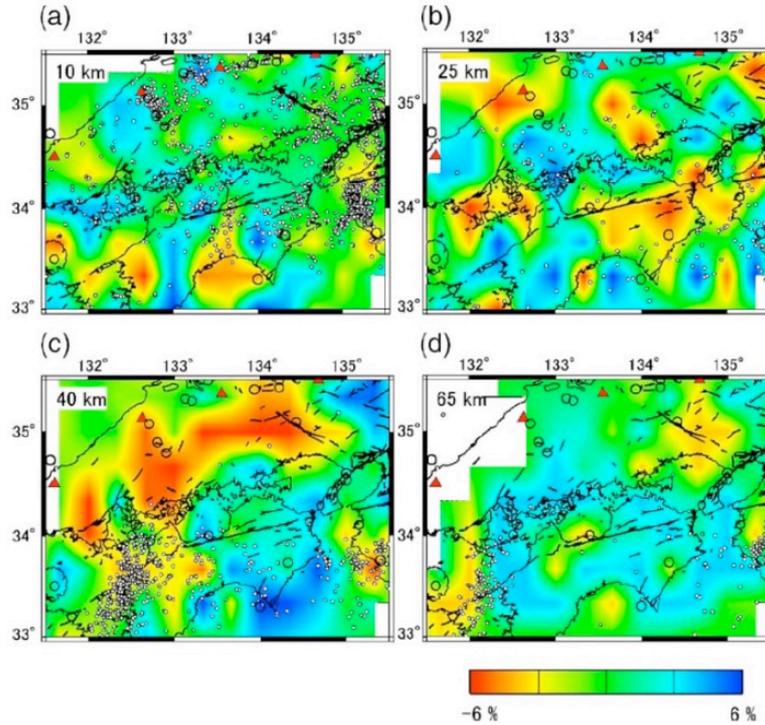


図1 Ikeda et al. (2006)により推定された中国・四国地方の3次元P波速度偏差構造の水平断面図。白丸が微小地震、中抜円は1987年から1996年に発生したマグニチュード5以上の地震、赤三角は第四紀火山を示す。

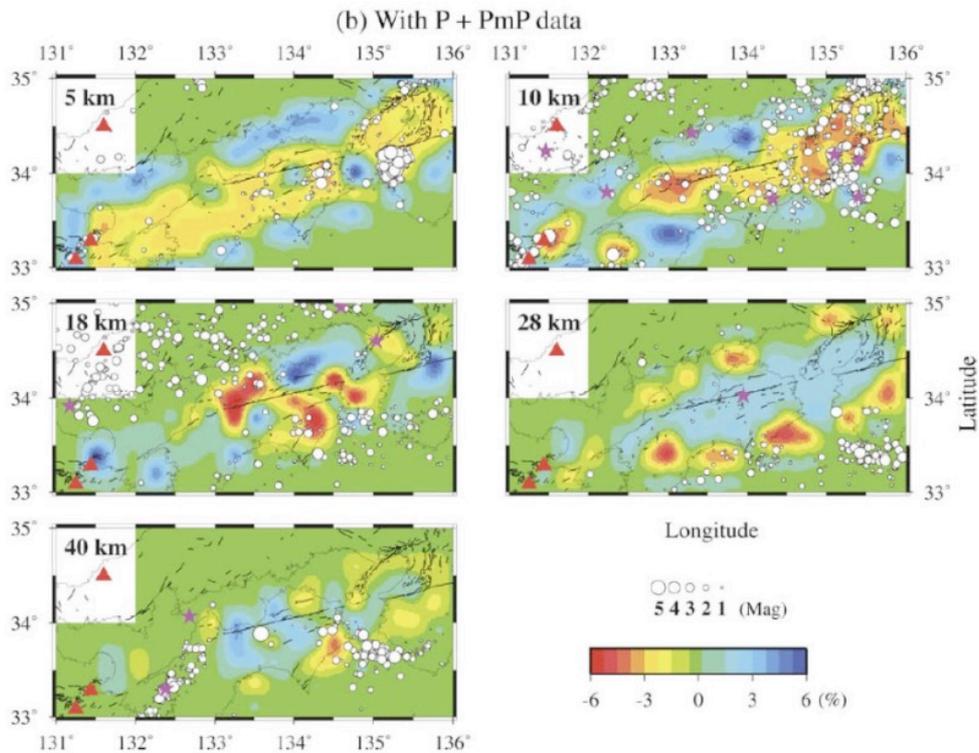


図2 Gupta et al. (2009)により推定された中央構造線付近の3次元P波速度偏差構造の水平断面図。白丸が2003年から2007年に発生した微小地震、星は1925年から2000年に発生したマグニチュード4.5以上の地震を示す。赤三角は活火山あるいは第四紀火山。

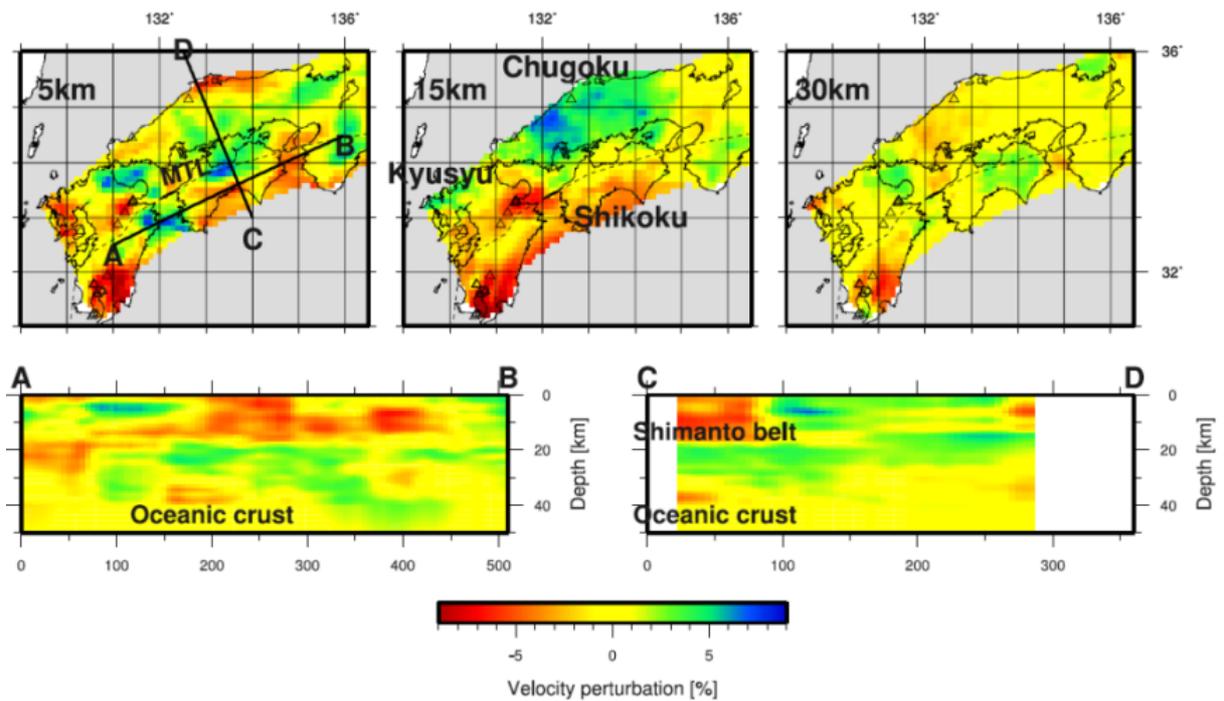


図3 常時雑微動解析から推定された3次元S波速度偏差構造の(上)水平断面図と(下)鉛直断面図(Nishida et al., 2008)。

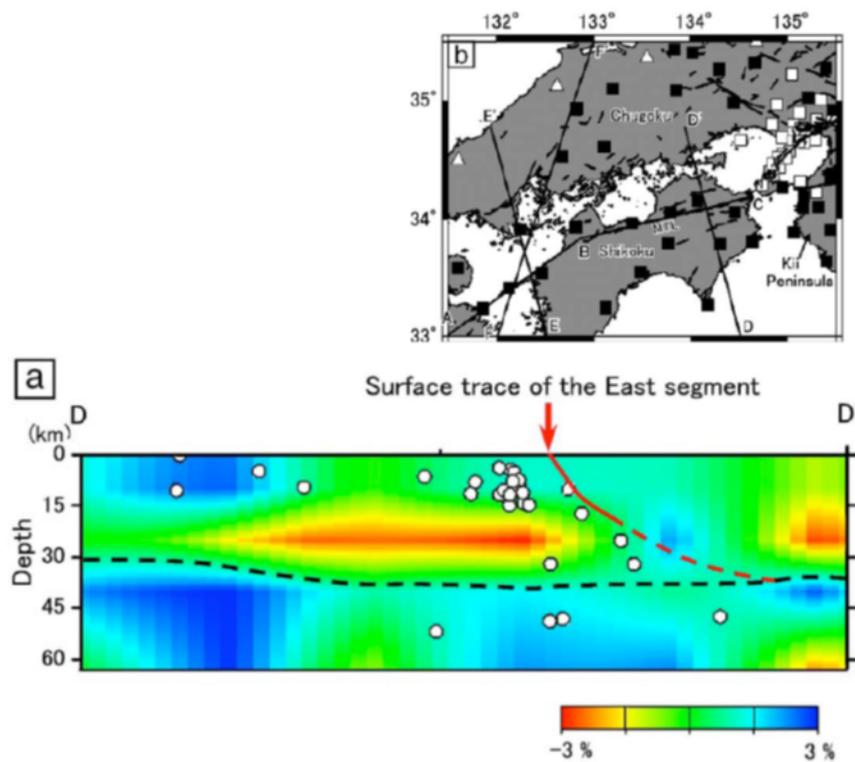


図4 Ikeda et al. (2006)により推定された中国・四国地方の3次元P波速度偏差構造の鉛直断面図。白丸が微小地震を示す。

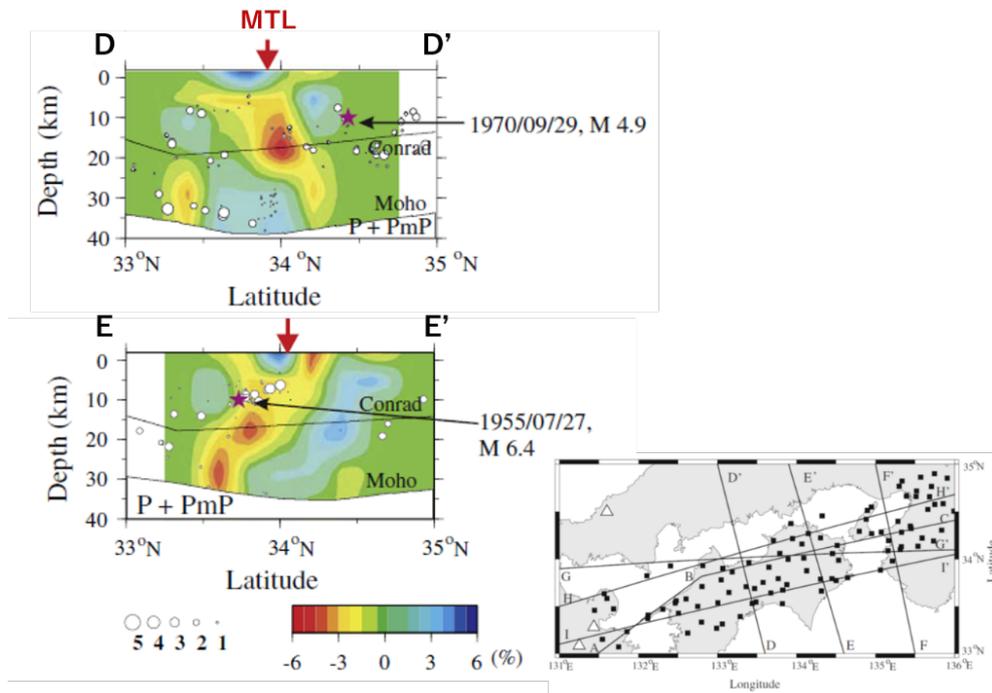


図5 Gupta et al. (2009)により推定された中央構造線付近の3次元P波速度偏差構造の鉛直断面図。白丸が微小地震、星はマグニチュード4.5以上の地震を示す。

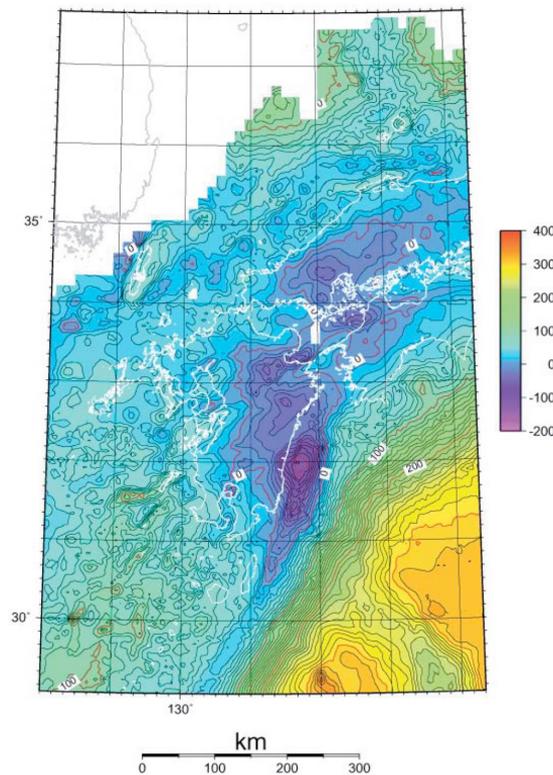


図6 九州・四国・中国地方周辺のブーゲー重力異常図 (植田, 2005)。2,670 kg/m³の密度を仮定。コンターは10 mGal間隔。

2) 地震波走時トモグラフィ

文献調査により、四国地方では中央構造線を挟んで地震波速度が異なる特徴を持つことを確認した。一方、現在の中央構造線周辺では、Ikeda et al. (2006)やGupta et al. (2009)が解析を行った当時よりも多くの地震観測点が展開されている。そこで、これらの地震観測網で得られた観測データを用いた地震波走時トモグラフィ解析を実施し、次年度以降に行う高精度震源決定に適用する3次元地震波速度構造モデルの構築を行った。

解析にはDouble-Difference Tomography法 (Zhang and Thurber, 2003; 2006)を用いた。気象庁一元化震源カタログに記載された地震のうち、2005年から2020年に発生したマグニチュード1.5以上、震源深さが0~50 km以内の地震を使用した。解析範囲(図7)に分布する地震は19,607個、観測点が212地点である。本解析で使用した観測点には防災科学技術研究所のHi-net (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2019)、気象庁、各大学および産業技術総合研究所地質調査総合センターが運用する地震観測網のものを含む。検測データは気象庁および今西・他(2021)で読み取られたものを使用した。P波とS波の検測データの個数はそれぞれ427,965個と330,404個である。1次元速度構造モデル「JMA2001」(上野・他, 2002)を初期構造とし、20回のイタレーションの後に最終的な結果を得た。走時残差はP波で0.18秒から0.08秒、S波で0.26秒から0.13秒へ改善した。

本解析で得られた地震波速度構造の水平断面図を図8に、鉛直断面図を図9に示す。先行研究で議論されている中央構造線を挟んだ南北方向の地震波速度の変化に加えて、次の特徴が認められる：(1)深さ5~10 kmでは、中央構造線南部の地震波速度が四国西部から中央部にかけてより大きく低下する、(2)深さ20 km付近では、地震波速度の遅い領域は中央構造線に沿って分布する、(3)さらに深さ20 km付近では、中央構造線南部の地震波速度が四国西部と東部で低下し、中央部ではやや早い傾向になる。なお、3次元地震波速度構造の推定と同時に再決定された地殻内部で発生した地震の震源位置は、気象庁一元化震源カタログの値に比べて、数km程度浅くに位置する。

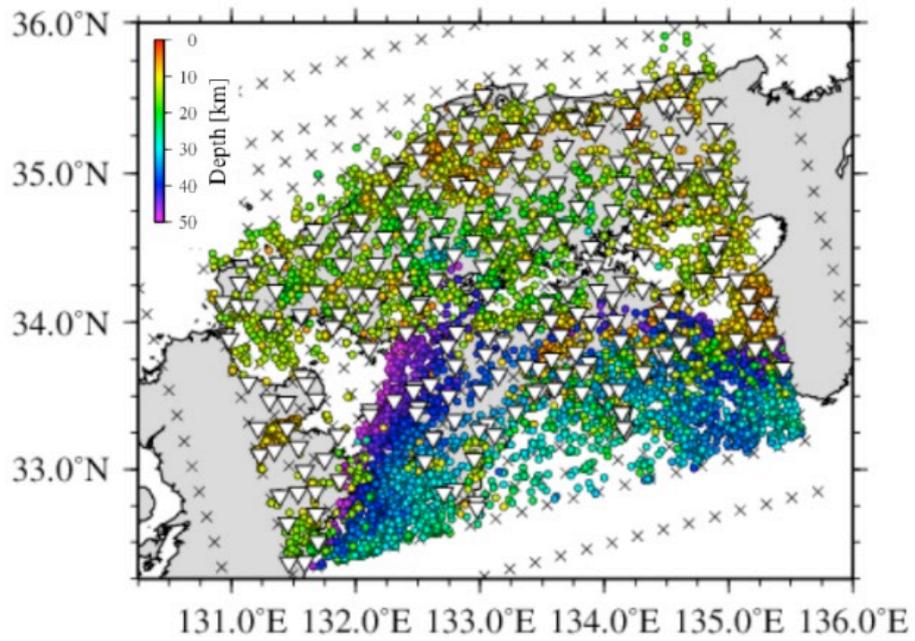


図7 本研究で実施した地震波走時トモグラフィの解析領域。使用した地震を色付き丸、観測点を白逆三角で示す。×印は速度グリッドの位置。

P波速度

S波速度

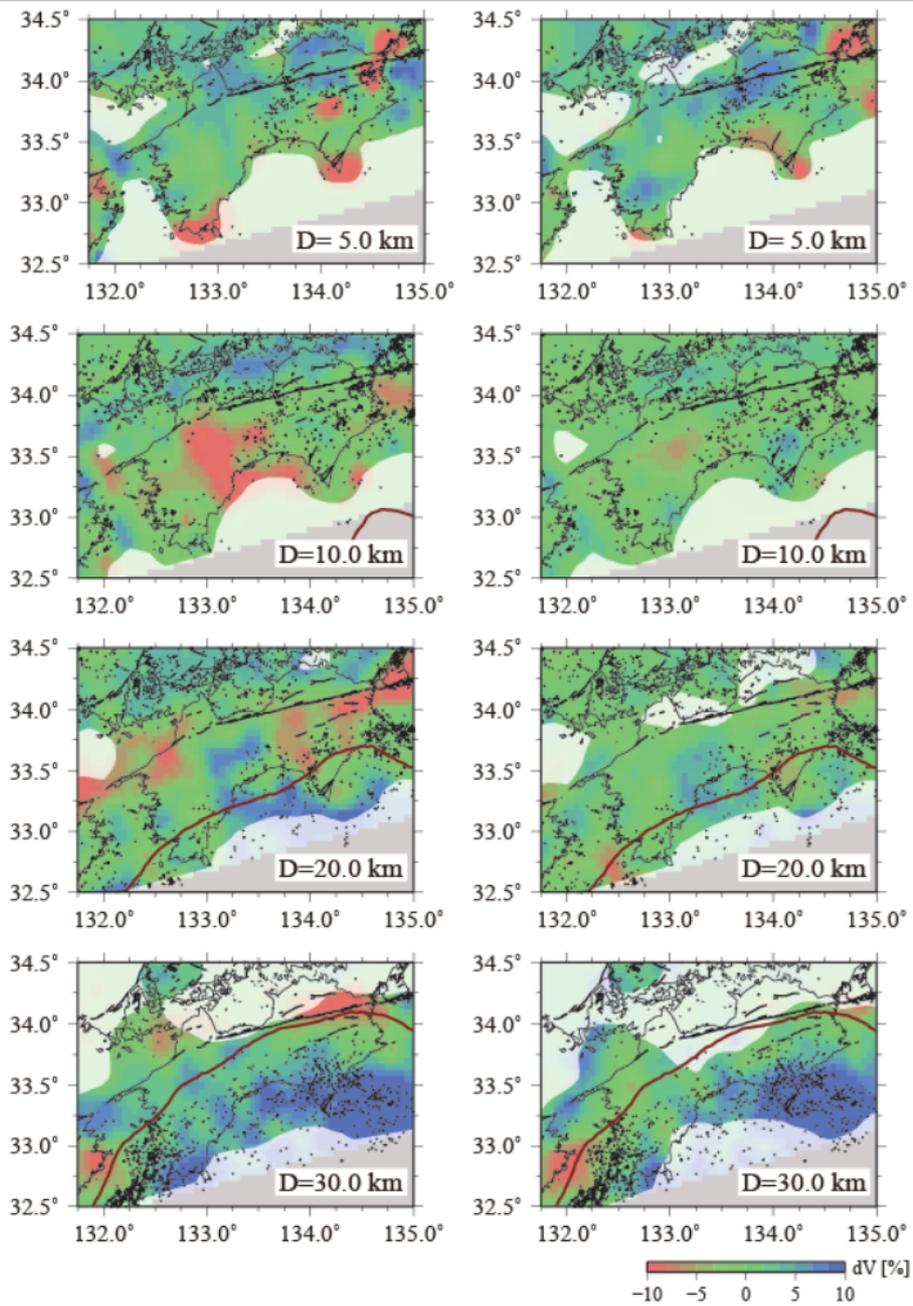


図8 中央構造線周辺の(左) P波速度偏差構造と(右) S波速度偏差構造の水平断面図。深さ(D)が5 km、10 km、20 km、30 kmの結果を示す。信頼度の低い領域は白マスクを重ねている。黒点が断面から深さ5 km以内の地震。赤実線はフィリピン海プレートの深さ(弘瀬・他, 2008)。

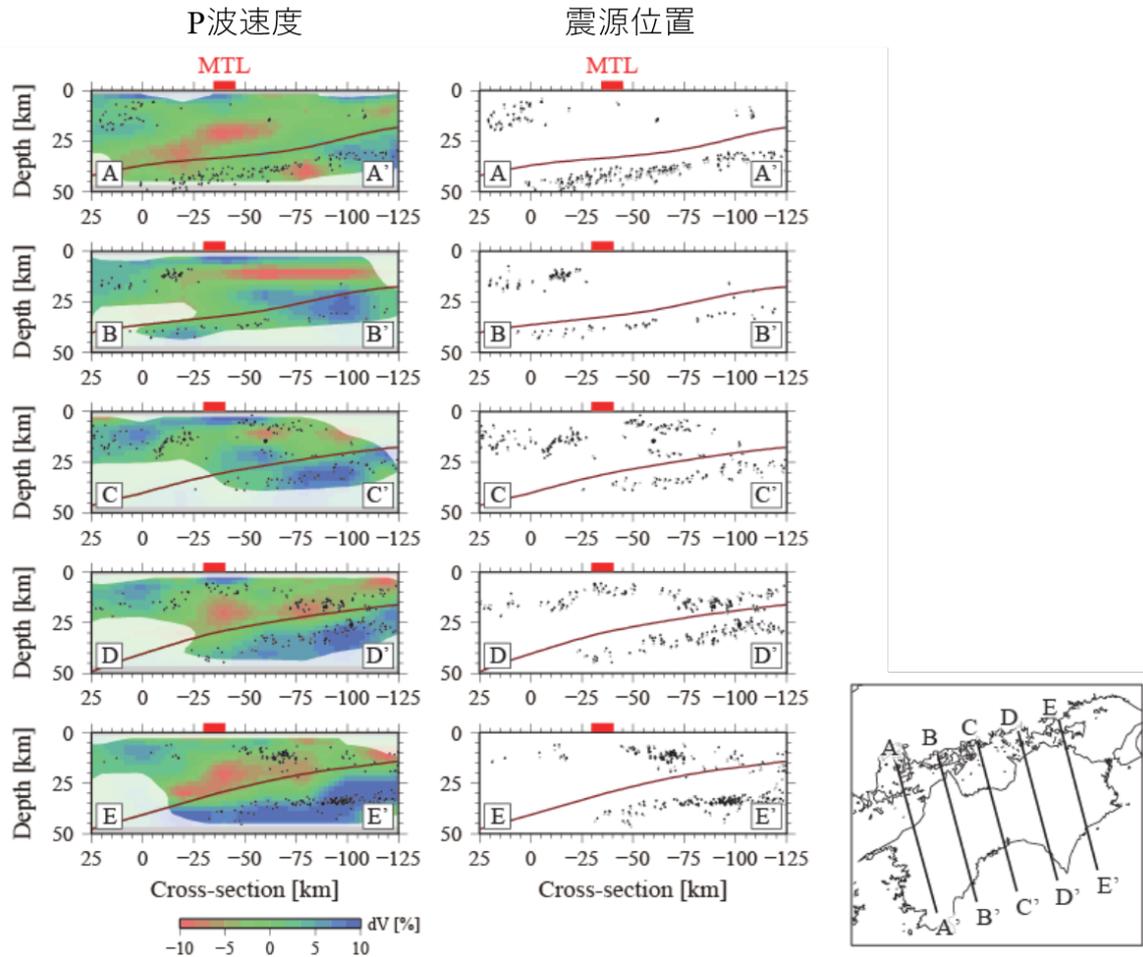


図9 中央構造線周辺の（左）P波速度偏差構造の鉛直断面図と（右）再決定前後での震源位置の分布。断面から水平方向に10 km以内に分布する地震の再決定後の震源位置を黒点で、再決定前（気象庁一元化震源カタログ）の震源位置を灰点で示す。赤実線はフィリピン海プレートの深さ（弘瀬・他，2008）。

3) 日本全国内陸部震源メカニズム解カタログによる応力場の概観

次年度以降、四国地方の中央構造線付近で発生した微小地震の震源メカニズム解を決定し、応力場の推定を行う予定であるが、その前に、日本全国内陸部震源メカニズム解カタログ（Uchide, 2020）から当地域の地震を抜き出して、震源メカニズム解の傾向を概観した。図10に、Uchide（2020）による震源メカニズム解とそのP軸及びT軸を示す。Uchide（2020）では、2005年から2019年までに海岸線の内側で20 km以浅において発生したマグニチュード1.5以上の地震を解析の対象としている。P軸が概ね東西方向を、T軸が概ね南北方向を向いている。これは東西圧縮が支配的な日本列島の応力場と整合的である。詳しく見ると、四国北東部でP軸方位が北西-南東方向になっており、中央構造線付近を境に応力軸方位が変わっている可能性がある。また、四国西部では地震活動が極めて低調で、Uchide（2020）によって解析された地震がない地域が広がっている。

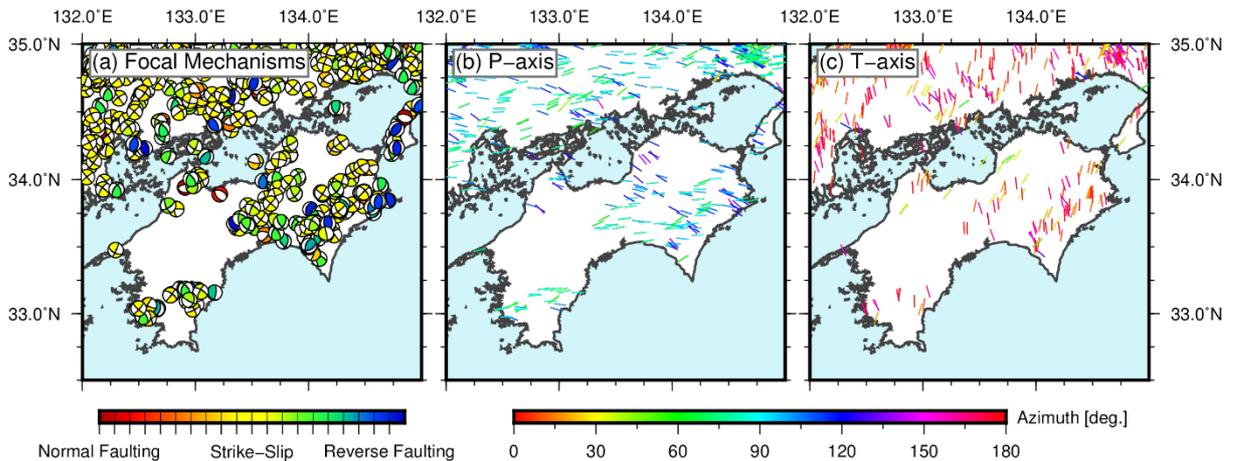


図10 日本全国内陸部震源メカニズム解カタログ (Uchide, 2020) による (a) 震源メカニズム解、(b) P 軸方位、(c) T 軸方位を示す。P 軸・T 軸方位については、傾斜が30度未満のもののみを描画した。

(c) 結論ならびに今後の課題

文献調査および地震波走時トモグラフィ解析により四国地方の中央構造線周辺の3次元地震波速度構造を調査した。四国地方の地震波速度は、中央構造線を挟んで北側では速く、南側では遅いという空間的特徴を確認した。このような3次元地震波速度構造を考慮した場合、地殻内部で発生した地震の震源深さは、気象庁一元化震源カタログに比べて数km程度浅くなる可能性がある。日本全国内陸部震源メカニズム解カタログから四国地方の地震を抜き出して検討したところ、四国ではP軸が概ね東西方向を向いており、広域的な東西圧縮の応力場と整合的であることがわかった。また、四国東部では中央構造線を境に南北で応力軸方位が異なる可能性が示された。

謝辞: 気象庁一元化震源カタログを使用いたしました。走時解析と波形解析においては、防災科学技術研究所 Hi-net、気象庁、東京大学地震研究所、京都大学防災研究所の定常観測網のデータを利用しました。図はGeneric Mapping Tools (Wessel and Smith, 1991) で作成しました。

(d) 引用文献

- Gupta, S., D. Zhao, M. Ikeda, S. Ueki, and S.S. Rai, Crustal tomography under the Median Tectonic Line in Southwest Japan using P and PmP data, *J Asian Earth Sci*, 35, 377-390, 2009. doi:10.1016/j.jseaes.2009.01.004
- 弘瀬冬樹・中島淳一・長谷川昭, Double-Difference Tomography 法による関東地方の3次元地震波速度構造およびフィリピン海プレートの形状の推定, *地震* 2, 60, 123-138, 2008.
- Ikeda, M., D. Zhao, and Y. Ohno, Crustal structure, fault segmentation, and activity of the Median Tectonic Line in Shikoku, Japan, *Tectonophysics*, 412, 49-60, 2006. doi:10.1016/j.tecto.2005.10.001

- 今西和俊・内出崇彦・椎名高裕・松下レイケン・中井未里, 中国地域の地殻内応力マップの作成, 地質調査研究報告, 72, 23-40, 2021.
- Matsubara, M., H. Sato, K. Uehira, M. Mochizuki, and T. Kanazawa, Three-dimensional seismic velocity structure beneath Japanese Islands and surroundings based on NIED seismic networks using both inland and offshore events, *J Disaster Res*, 12, 844-857, 2017.
- National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, NIED Hi-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2019. doi:10.17598/NIED.0003
- Nishida, K., H. Kawakatsu, and K. Obara, Three-dimensional crustal S wave velocity structure in Japan using microseismic data recorded by Hi-net tiltmeters, *J Geophys Res*, 113, B10302, 2008. doi:10.1029/2007JB005395
- Uchide, T., Focal mechanisms of small earthquakes beneath the Japanese islands based on first-motion polarities picked using deep learning, *Geophys J Int*, 223, 1658-1671, 2020. doi: 10.1093/gji/ggaa401
- 植田義夫, 日本列島とその周辺海域のブーゲー重力異常 (2004年版), 海洋情報部研究報告, 41, 1-26, 2005.
- 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, 65, 123-145, 2002.
- Wessel, P., & Smith, W. H. F., Free software helps map and display data, *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 72, 441, 1991.
- Zhang, H., and C. Thurber, Double-difference tomography: The method and its application to the Hayward Fault, California, *Bull Seismol Soc Am*, 93, 1875-1889, 2003. doi:10.1785/0120020190
- Zhang, H., and C. Thurber, Development and applications of double-difference seismic tomography, *Pure Appl Geophys*, 163, 373-403, 2006. doi:10.1007/s00024-005-0021-y