

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	上級主任研究員	内出 崇彦
国立研究開発法人 産業技術総合研究所	研究員	椎名 高裕
国立研究開発法人 産業技術総合研究所	副研究部門長	今西 和俊

(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った。震源断層周辺の微小地震分布から断層形状を推定した。

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た。

(2) 令和4年度の成果

(a) 業務の要約

中央構造線断層帯周辺の震源分布、震源メカニズム解分布から、地下における断層の位置を検討した。また、周辺の応力場が断層をすべらせやすいかどうかを検討した。震源分布と震源メカニズム解の分布からは、北傾斜と鉛直断層のいずれのモデルに対しても明確な証拠はなく、どちらかのモデルだけを採択すべきであるという結論を得ることはできなかった。いずれのモデルでも現在の応力場で断層がすべりやすいが、特に鉛直断層の方がすべりやすいことがわかった。

(b) 業務の成果

1) 日本全国内陸部ストレスマップによる中央構造線断層帯周辺の応力場

四国地方の中央構造線断層帯周辺の応力場を概観するため、全国内陸部ストレスマップ (Uchide et al., 2022) から当地域を抜き出し、令和3年度に引き続き検討した。ま

た、燧灘において中央構造線から北傾斜に並ぶ地震活動について、それらの地震の震源メカニズム解を調べ、地震の並びとの対応関係を確認した。

図1に、中央構造線周辺における水平主圧縮軸方位 (Uchide et al., 2022) を示す。令和3年度にも見たように、水平主圧縮軸が概ね東西方向を向いている。燧灘から香川県西部にかけては、水平主圧縮軸が30度ほど時計回りに回転している。図2に、応力場の方向をビーチボールにより示す。四国の中央構造線沿いでは、横ずれ断層型の応力場が認められる。

次に、Uchide et al. (2022) の応力場によって、中央構造線断層帯が活動しやすいかどうかを、二つの指標によって評価した。指標の一つはSlip Tendencyである。Morris et al. (1996) による定義では、断層面上の剪断応力の絶対値を法線応力の絶対値で割ったものであり、これをさらに摩擦係数で除したのもよく用いられる。しかし、Uchide et al. (2022) による応力インバージョン解析では応力の絶対値が求められないため、この定義をそのまま使うことができない。そこで、Yukutake et al. (2015) に倣って、以下の3つの仮定に基づいて応力の絶対値を推定し、Slip Tendencyを計算する。

- 所与の応力場で最もすべりやすい断層面が静水圧下ですべる。
- 摩擦係数は0.6を使用する。
- 水平面にかかる法線応力はかぶり圧に等しい。

もう一つの指標は、Fault Instability (Vavryčuk et al., 2013) である。これは、ある断層面が、所与の応力場に対して最も破壊しやすい断層面の向きにどの程度近いを示すもので、

$$I = \frac{\tau - \mu(\sigma - \sigma_1)}{\tau_c - \mu(\sigma_c - \sigma_1)}$$

と書ける。ここで、 τ と σ は断層に掛かる剪断応力と法線応力、 μ は摩擦係数、 τ_c と σ_c は最も破壊しやすい断層面に掛かる剪断応力と法線応力、 σ_1 は最大主圧縮応力を示す。

評価の際は、国立研究開発法人防災科学技術研究所のJ-SHISに収録されている断層面モデルを使用した。中央構造線断層帯では傾斜角40度の北傾斜の断層面と鉛直の断層面が想定されているため、両者に対して、Slip TendencyとFault Instabilityを計算した。

図3に計算結果を示す。いずれの指標でも、いずれの傾斜角でも、中央構造線断層帯は応力場によってすべりやすいことを示している。特に、鉛直傾斜の断層面の方がいずれの指標でも非常に高い値を示しており、非常にすべりやすいことを示唆している。ここで、応力の絶対値が推定できていないため、この計算値を以って発生時期に関して議論できるものではないことには注意を要する。

図4に、中央構造線断層帯付近で発生した地震の震源メカニズム解 (Uchide et al., 2022; 内出・他, 2022) を断面図上で示す。震源メカニズム解はHASHコード (Hardebeck and Shearer, 2002) を用いて求めたものであるが、そのうち、精度の良い「Aランク」「Bランク」「Cランク」のものを図示している。震源分布は北傾斜に並んでいるように見えるが、震源メカニズムの節面は必ずしもその方向に並んでいない。一方、断面(d)においては、ほぼ鉛直の節面を持つ震源メカニズム解が、ほぼ鉛直に並んでいるが、他の断面ではそのような傾向が明らかでない。震源メカニズムや震源位置の分布だけでは、北傾斜と鉛直の断層面のいずれが震源断層として妥当であるかはわからない。

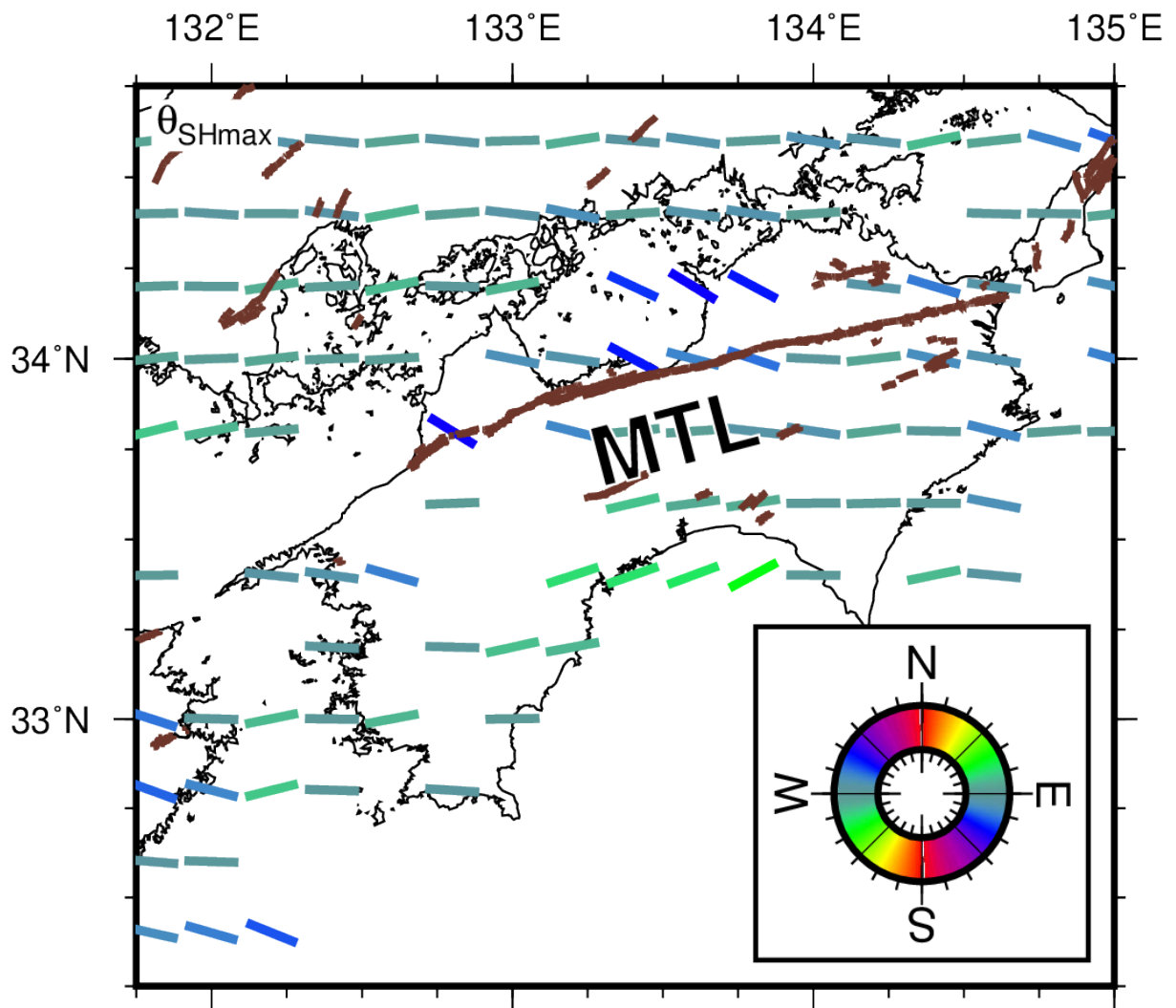


図1 全国内陸部ストレスマップ (Uchide et al., 2022) による、四国地域の水平主圧縮軸方位。色と棒で水平主圧縮軸方位を表示した。茶色線は中田・今泉 (2002) による地表活断層の位置を示す。

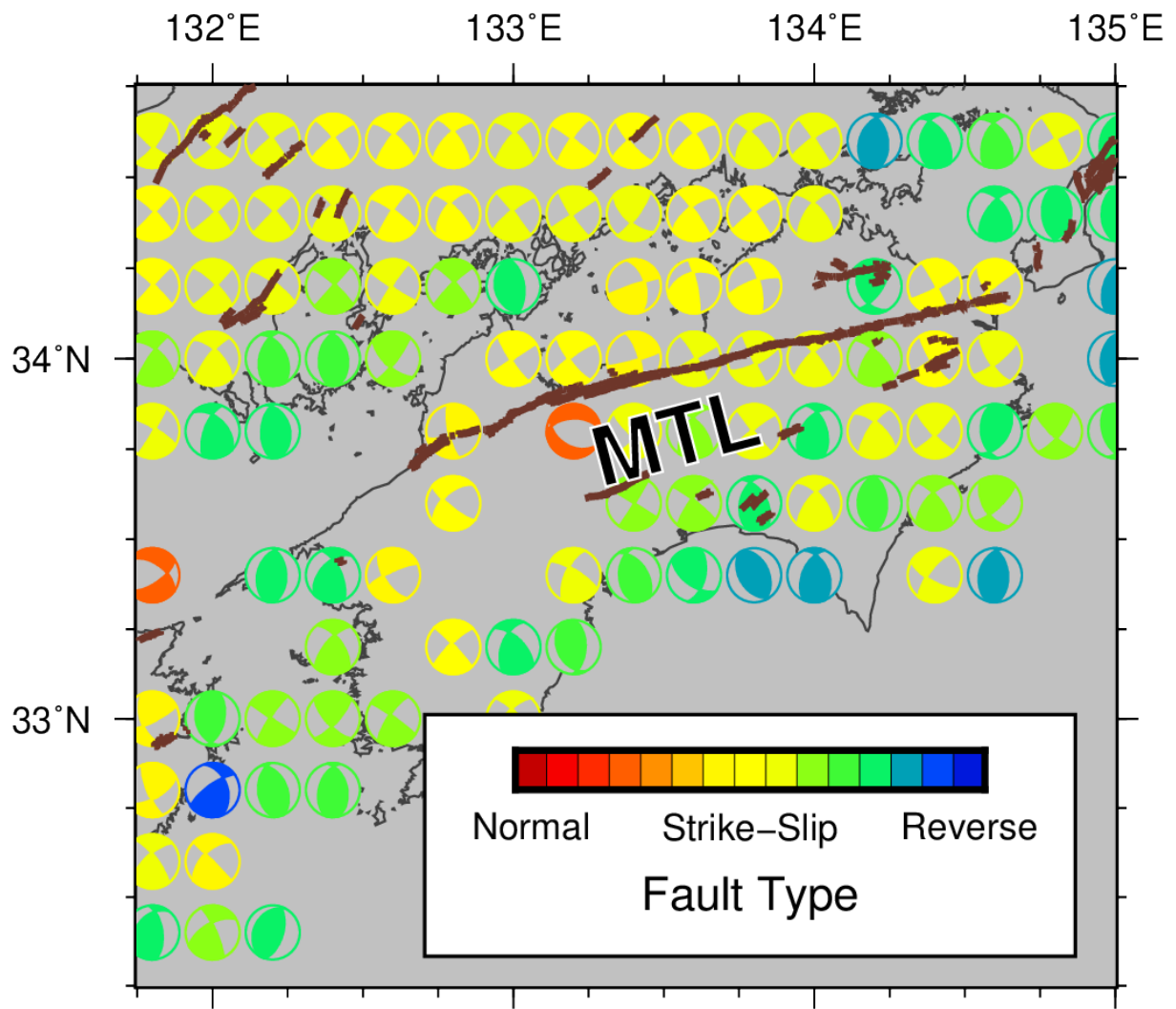


図2 全国内陸部ストレスマップ (Uchide et al., 2022) による応力軸の方向をビーチボールで示した。Shearer et al. (2006) に従って、断層タイプより色付けした。茶色線は中田・今泉 (2002) による地表活断層の位置を示す。

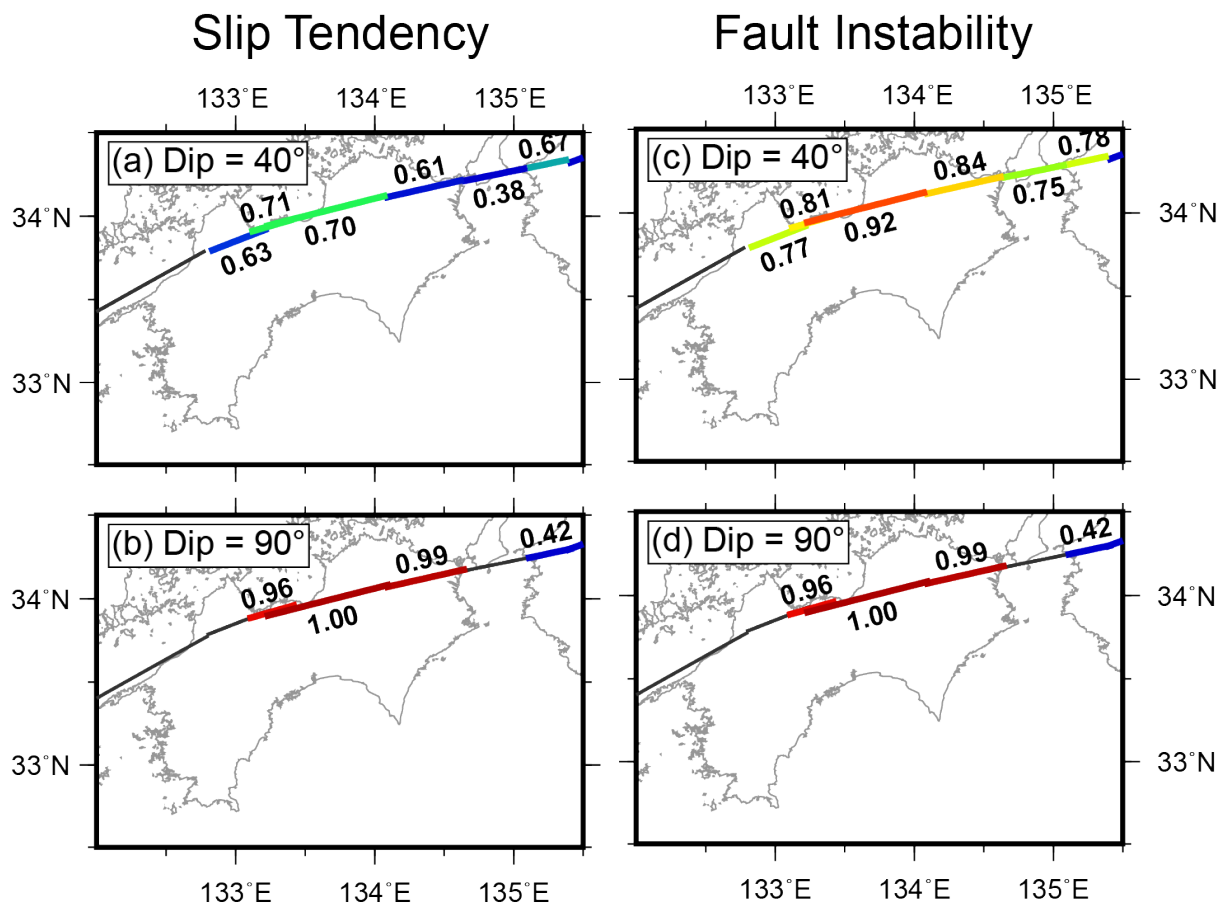


図3 全国内陸部ストレスマップ (Uchide et al., 2022) で示された応力場情報を用いて計算した、断層のすべりやすさの評価。(a) 傾斜角40度の断層モデルに対して計算したSlip Tendency。(b) 鉛直断層モデルに対して計算したSlip Tendency。(c) 傾斜角40度の断層モデルに対して計算したFault Instability。(d) 鉛直断層モデルに対して計算したFault Instability。

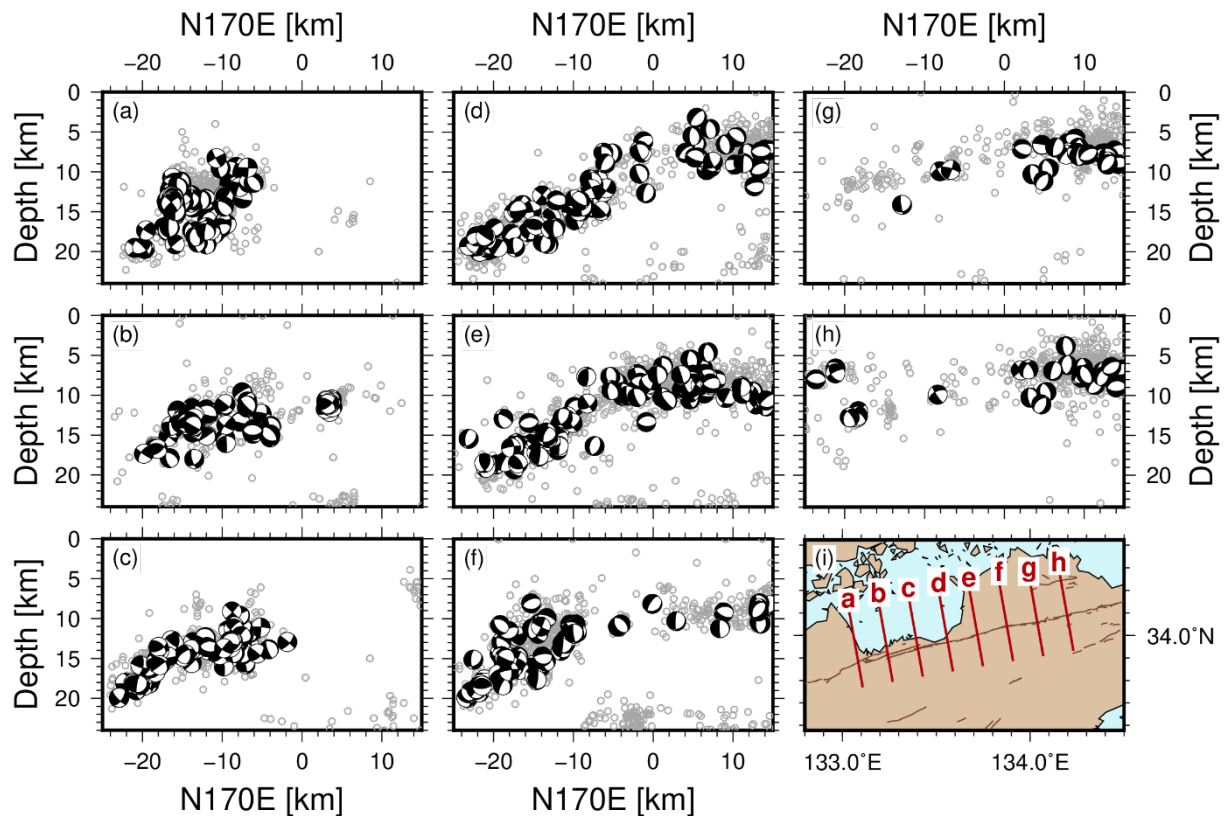


図4 中央構造線断層帯付近で発生した地震の震源メカニズム解 (Uchide et al., 2022; 内出・他, 2022) の分布。(a)~(h) 断面図。図の左方向がほぼ北 (N170E)、右方向がほぼ南を向いている。震源メカニズム解を示すビーチボールは横から見た下半球投影 (視点から遠い側の半球への投影) で描画した。(i) 各断面の位置。茶色線は中田・今泉 (2002) による地表活断層の位置を示す。

(c) 結論

中央構造線断層帯周辺の震源分布、震源メカニズム解分布から、地下における断層の位置を検討した。また、周辺の応力場が断層をすべらせやすいかどうかを検討した。震源分布と震源メカニズム解の分布からは、北傾斜と鉛直断層のいずれのモデルに対しても明確な証拠はなく、どちらかのモデルだけを採択すべきであるという結論を得ることはできなかった。いずれのモデルでも現在の応力場で断層がすべりやすいが、特に鉛直断層の方がすべりやすいことがわかった。

謝辞：気象庁一元化震源カタログを使用いたしました。図はGeneric Mapping Tools (Wessel and Smith, 1991) で作成しました。

(d) 引用文献

Hardebeck, J. L. and P. M. Shearer, A new method for determining first-motion focal mechanisms, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 92, 2264-2276, 2002. doi: 10.1785/0120010200.

Morris, A., D. A. Ferrill, and D. B. Brent Henderson, Slip-tendency analysis and

- fault reactivation, *Geology*, 24, 275-278, 1996. doi: 10.1130/0091-7613(1996)024<0275:STAAFR>2.3.CO;2.
- 中田 高・今泉俊文, 活断層詳細デジタルマップ, 東京大学出版会, 2002.
- Shearer, P. M., G. A. Prieto, and E. Hauksson, Comprehensive analysis of earthquake source spectra in Southern California, *J. Geophys. Res.*, 111, B06303, 2006. doi: 10.1029/2005JB003979.
- Uchide, T., T. Shiina, and K. Imanishi, Stress map of Japan: Detailed nationwide crustal stress field inferred from focal mechanism solutions of numerous microearthquakes, *J. Geophys. Res.*, 127, e2022JB024036, 2022. doi: 10.1029/2022JB024036.
- 内出崇彦・椎名高裕・今西和俊, 日本全国内陸部の地殻内応力マップと微小地震の発震機構解のデジタルデータ, 地質調査総合センター研究資料集, no. 738, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2022.
- Vavryčuk, V., F. Bouchaala, and T. Fischer, High-resolution fault image from accurate locations and focal mechanisms of the 2008 swarm earthquakes in West Bohemia, Czech Republic, *Tectonophysics*, 590, 189-195, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2013.01.025>.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith, Free software helps map and display data, *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 72, 441, 1991.
- Yukutake, Y., T. Takeda, and A. Yoshida, The applicability of frictional reactivation theory to active faults in Japan based on slip tendency analysis, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 411, 188-198, 2015. doi: 10.1016/j.epsl.2014.12.005.

(3) 令和2年度～令和4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の特徴を調べるため、文献調査並びに地震波走時トモグラフィ解析を実施した。その結果、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ことがわかった。さらに、この3次元速度構造モデルを用いて微小地震の震源再決定を行い、中央構造線北部で北側に傾斜する震源分布が得られた。震源分布と震源メカニズム解の分布からは、北傾斜と鉛直断層のいずれのモデルに対しても明確な証拠はなく、どちらかのモデルだけを採択すべきであるという結論を得ることはできなかった。全国内陸部ストレスマップを用いて当該地域における応力場の傾向を概観したところ、四国地域における水平主圧縮軸方位が概ね東西方向を向いている中、燧灘から香川県西部にかけての地域では、中央構造線南部に比べて北部では30度ほど時計回りに回転していることが分かった。北傾斜と鉛直の断層いずれも現在の応力場で断層がすべりやすいが、特に鉛直断層の方がすべりやすいことがわかった。

(b) 業務の成果

1) 四国地方の地震波速度構造

a) 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5～7）。このような地震波速度分布は深さ20～30km程度まで確認できる（図8、図9）。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10）。

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

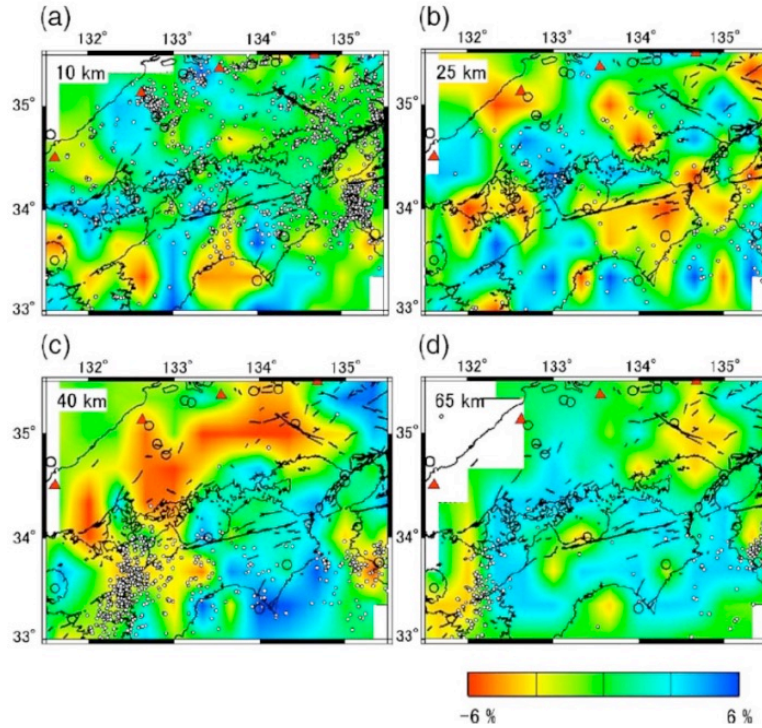


図5 Ikeda et al. (2006) により推定された中国・四国地方の3次元P波速度偏差構造の水平断面図。白丸が微小地震、中抜円は1987年から1996年に発生したマグニチュード5以上の地震、赤三角は第四紀火山を示す。

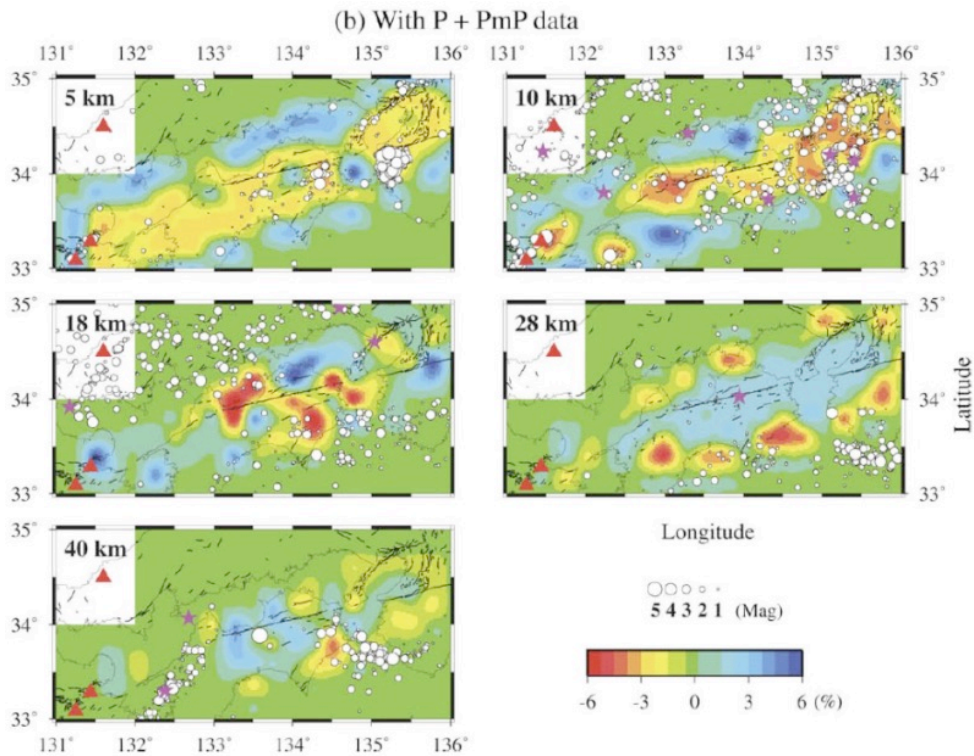


図6 Gupta et al. (2009) により推定された中央構造線付近の3次元P波速度偏差構造の水平断面図。白丸が2003年から2007年に発生した微小地震、星は1925年から2000年に発生したマグニチュード4.5以上の地震を示す。赤三角は活火山あるいは第四紀火山。

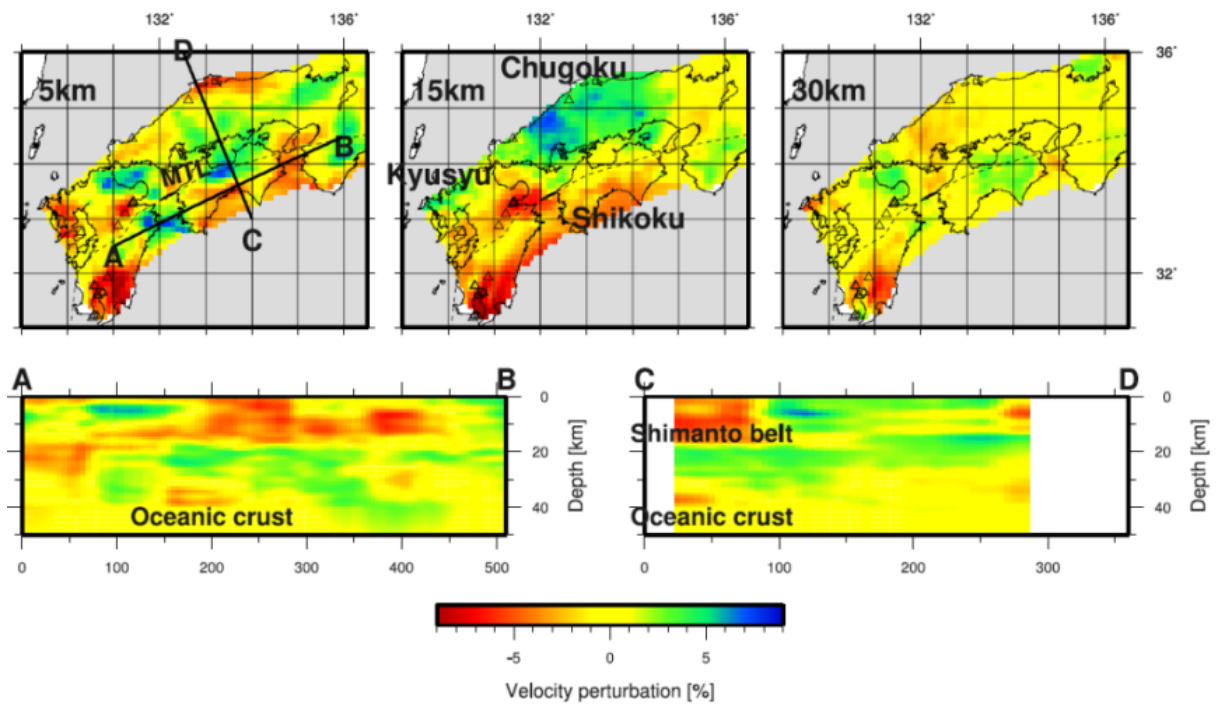


図7 常時雑微動解析から推定された3次元S波速度偏差構造の(上)水平断面図と(下)鉛直断面図(Nishida et al., 2008)。

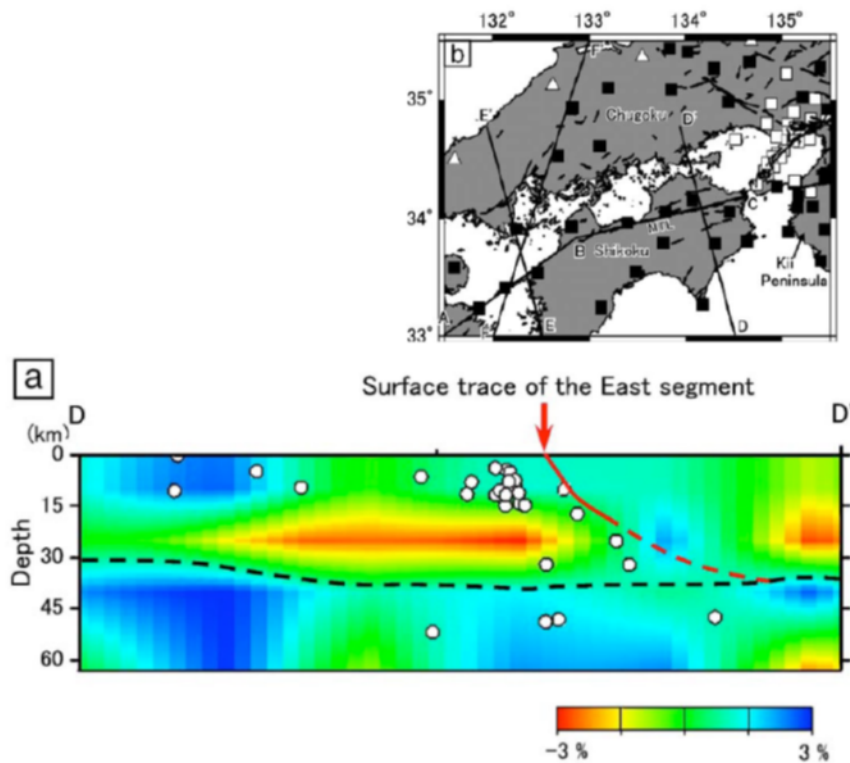


図8 Ikeda et al. (2006) により推定された中国・四国地方の3次元P波速度偏差構造の鉛直断面図。白丸が微小地震を示す。赤矢印は中央構造線の地表トレースの位置を表し、赤実線と赤破線はおおよそ中央構造線を地下に延長した際の位置を表す。黒破線はフィリピン海プレート上面深さを表す。

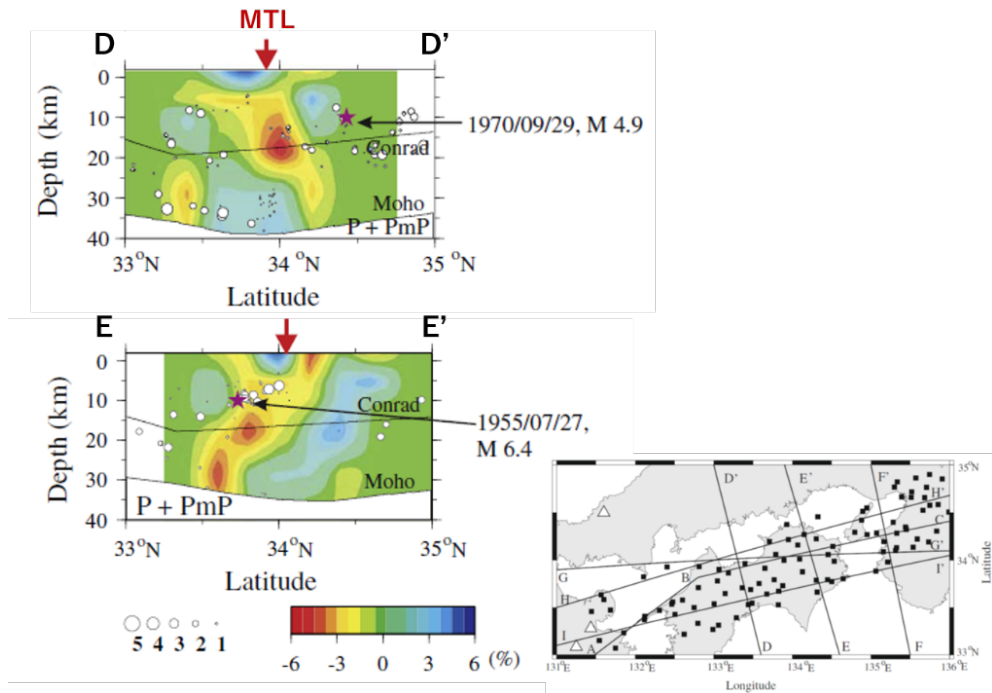


図9 Gupta et al. (2009) により推定された中央構造線付近の3次元P波速度偏差構造の鉛直断面図。白丸が微小地震、星はマグニチュード4.5以上の地震を示す。赤矢印は中央構造線 (MTL) の地表トレースの位置を表す。

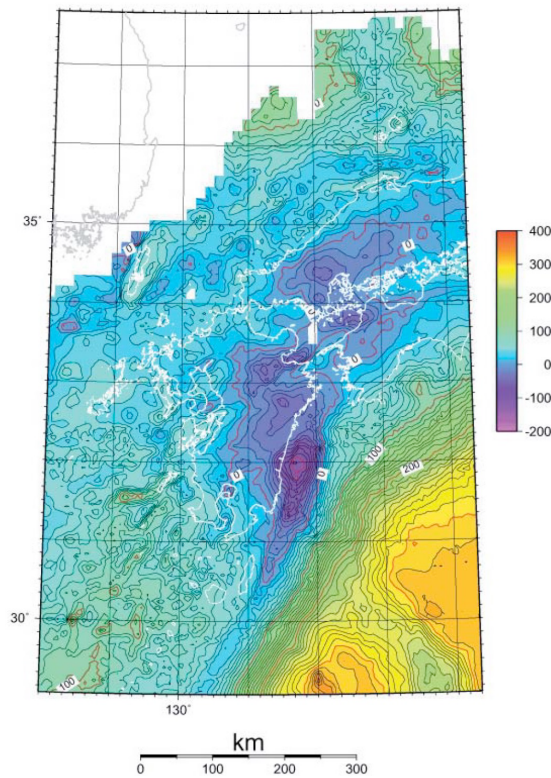


図10 九州・四国・中国地方周辺のブーゲー重力異常図 (植田, 2005)。2,670kg/m³の密度を仮定。コンターは10mGal間隔。

b) 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0～50km以内の地震を使用した。解析範囲(図11)に分布する地震は19,201個、観測点が222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452,527個と344,917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0.17秒から0.08秒、S波で0.25秒から0.12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12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5～10km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20km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20km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。

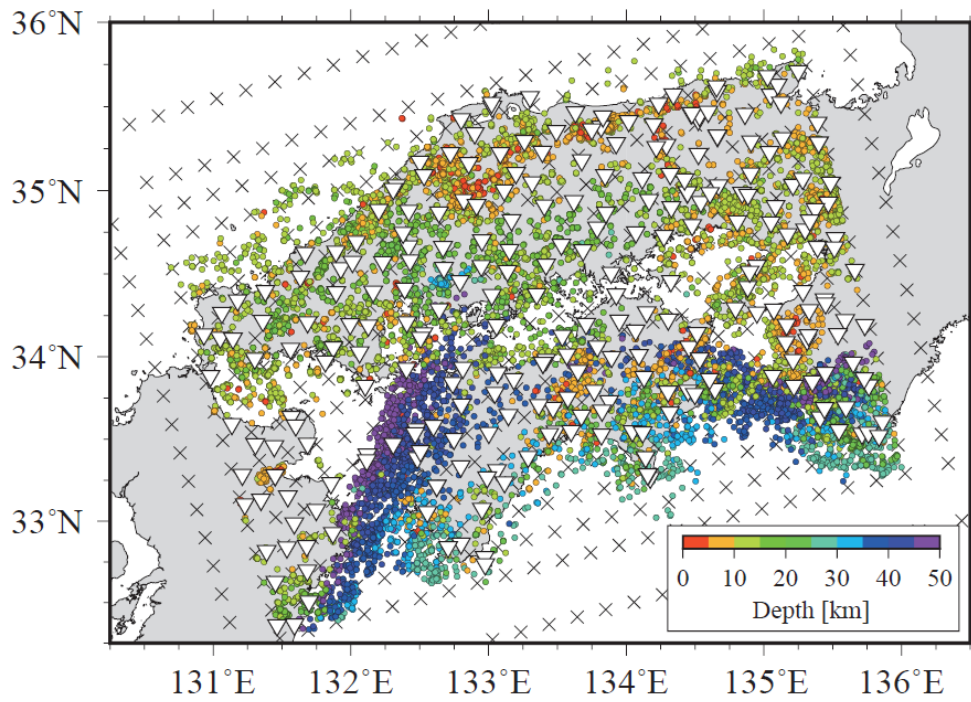


図11 本研究で実施した地震波走時トモグラフィの解析領域。使用した地震を色付き丸、観測点を白逆三角で示す。×印は速度グリッドの位置。

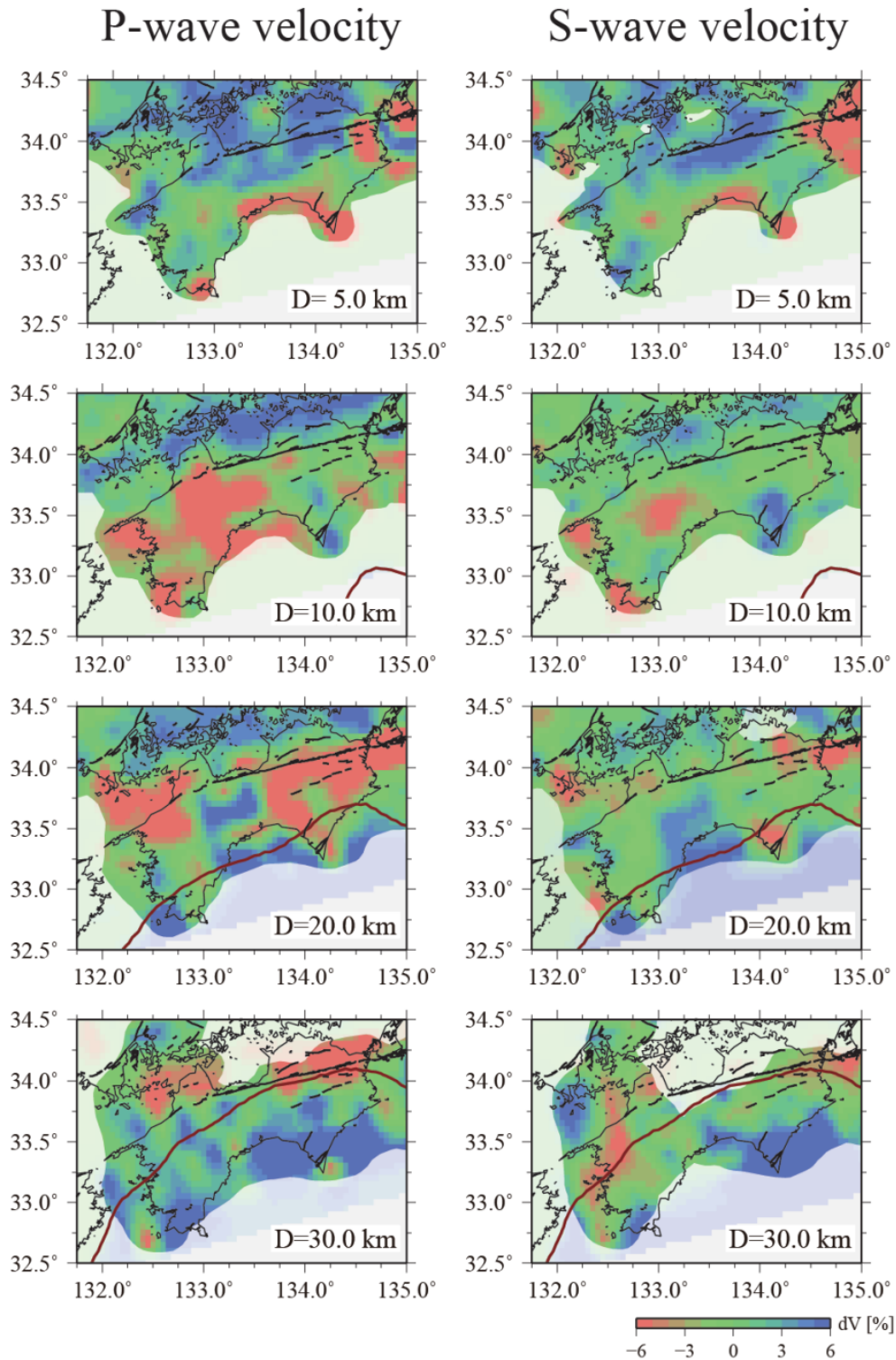


図12 中央構造線周辺の（左）P波速度偏差構造と（右）S波速度偏差構造の水平断面図。深さ（D）が5km、10km、20km、30kmの結果を示す。信頼度の低い領域は白マスクを重ねている。赤実線はフィリピン海プレートの深さ（弘瀬・他，2008）。黒線は活断層の地表トレース。

2) 微小地震の震源再決定

本事業で構築した3次元地震波速度構造に対して、微小地震の震源位置の再決定を行った。震源再決定にはDouble-Difference Tomography法 (Zhang and Thurber, 2003; 2006) の枠組みを利用した。震源再決定の対象は2005年から2020年に発生したマグニチュード0.0~1.4、震源深さが0~30kmの108,403個である。

地震波トモグラフィ解析の過程で再決定したマグニチュード1.5以上の地震を含めた、四国周辺の震源分布の鉛直断面図を図13に示す。また、図14は中央構造線付近を拡大した鉛直断面図である。再決定後の震源分布からは、中央構造線南部で比較的広い深さ範囲に地震が分布すること、および北側で北傾斜した活動が認められる。特に燧灘付近(図14d-f)では地震発生域が急激に深くなる。

中央構造線を境にした地震活動の変化は、地震発生層下限の分布としても現れる。図15ではマグニチュード1.0以上の地震から計算されたD90の分布を示す。再決定後の震源深さの下限を「深さ30km」と「フィリピン海プレート上部境界より5km浅部」のいずれか浅い深さとした。なお、D95やD100として地震発生層下限を定義することでその深さは変化し得るが、中央構造線の北側では、南側に比べてより深い領域で地震が発生している傾向は共通して確認できる(図16)。

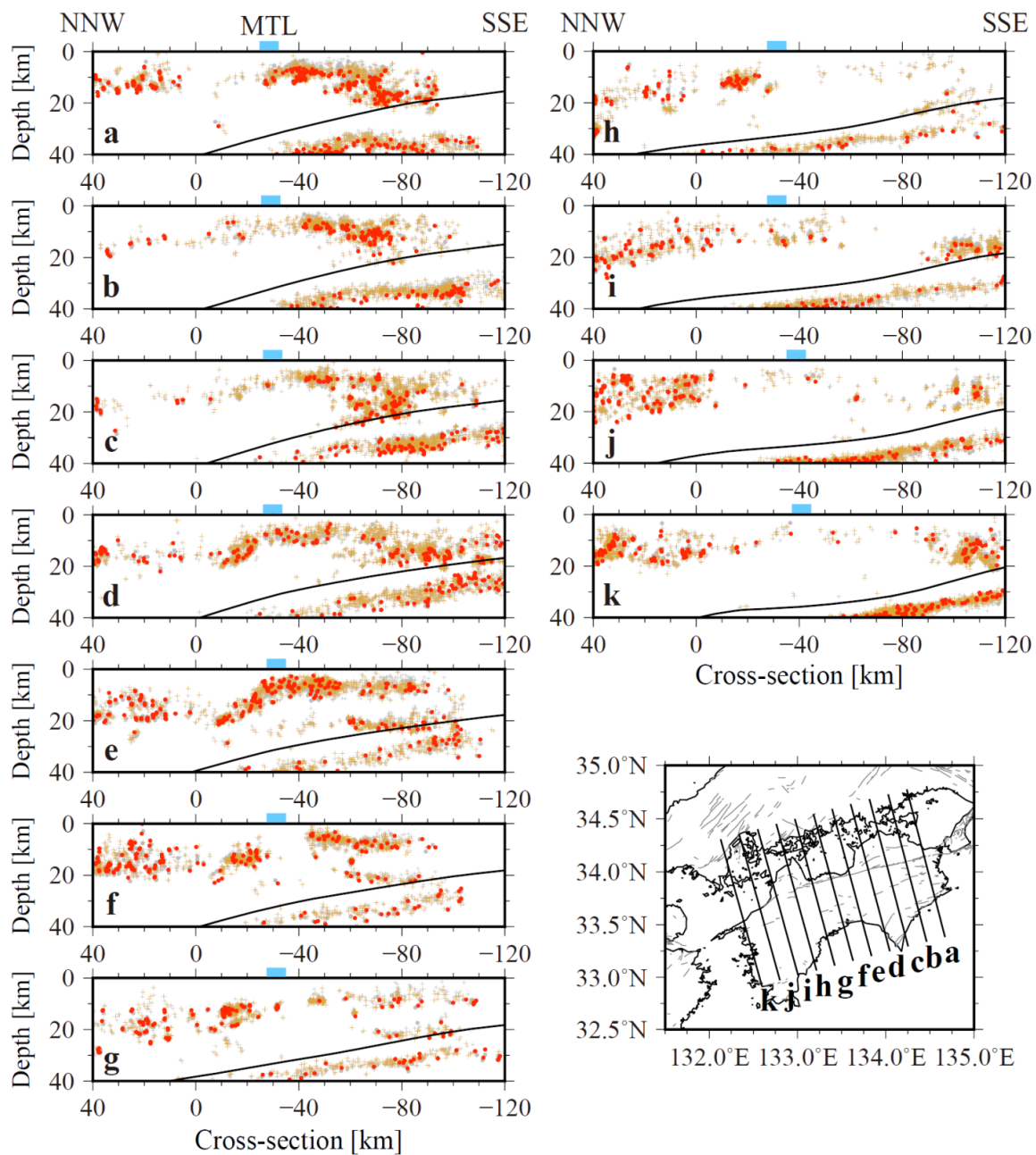


図13 四国周辺の震源分布の鉛直断面図。気象庁の震源位置を灰クロス（マグニチュード0.0～1.4）と灰丸（マグニチュード1.5以上）、再決定後の震源位置をオレンジ色のクロス（マグニチュード0.0～1.4）と赤丸（マグニチュード1.5以上）でそれぞれ示す。黒線はフィリピン海プレート上部境界（弘瀬・他，2008）である。青四角は各測線上における中央構造線（MTL）の地表位置を表す。

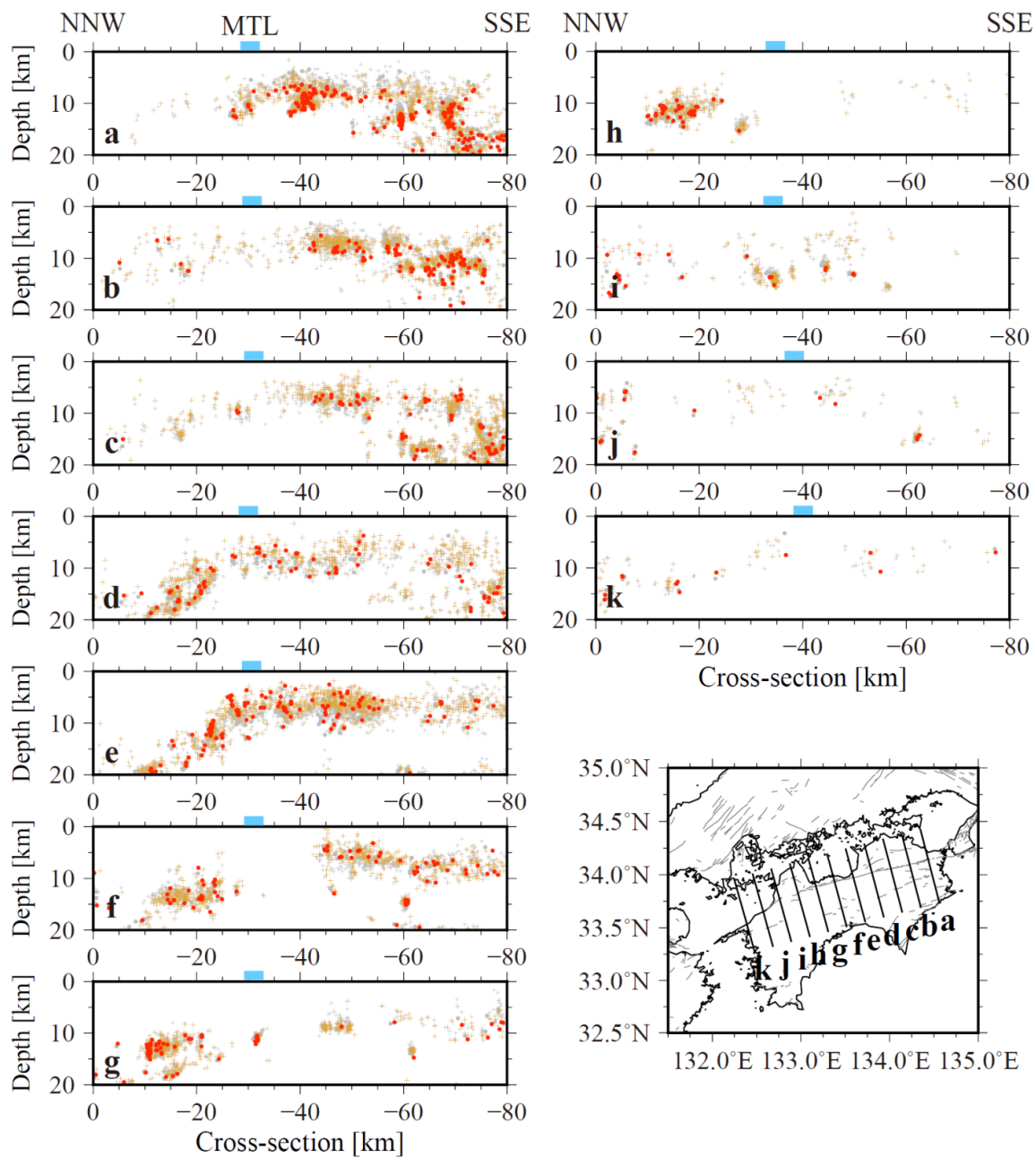


図14 中央構造線周辺の震源分布の鉛直断面図。気象庁の震源位置を灰クロス（マグニチュード0.0～1.4）と灰丸（マグニチュード1.5以上）、再決定後の震源位置をオレンジ色のクロス（マグニチュード0.0～1.4）と赤丸（マグニチュード1.5以上）でそれぞれ示す。

青四角は各測線上における中央構造線（MTL）の地表位置を表す。

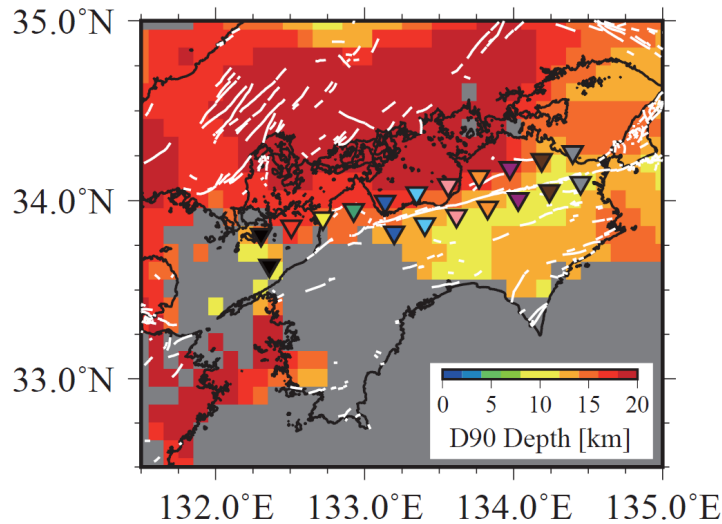


図 15 四国周辺の D90 の深さ分布。グリッドを中心にした 30km 四方に 15 個以上の地震 (マグニチュード 1.0 以上) が分布する領域を示す。

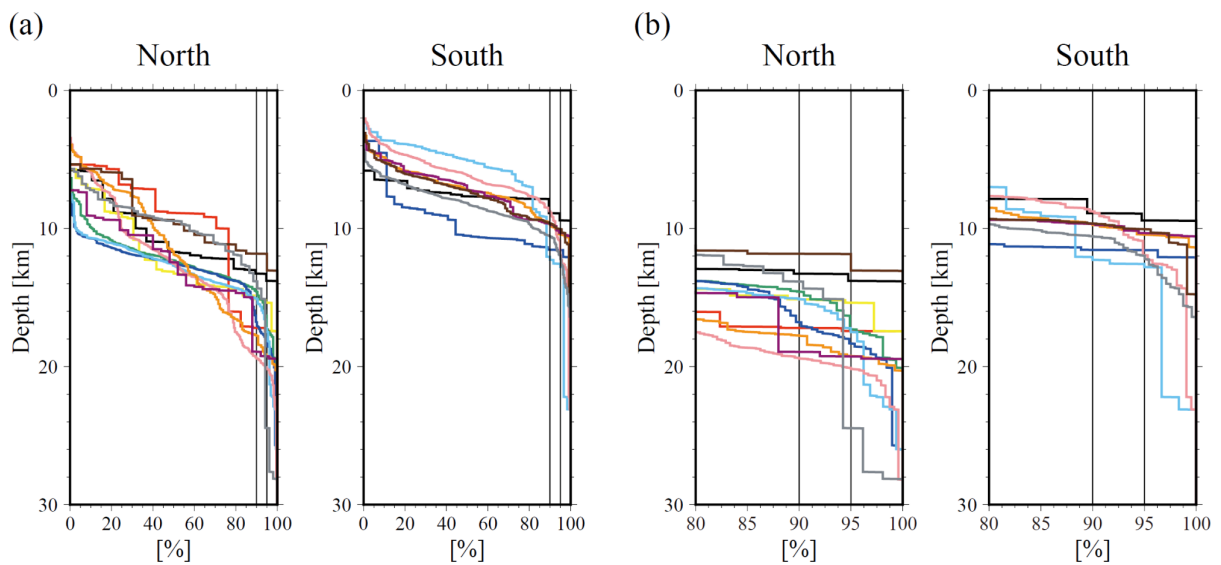


図 16 中央構造線の南北における累積地震発生数の変化。累積頻度は色の対応する図 15 中の逆三角の地点で計算した。黒線は D90 と D95 に対応。(b)は累積頻度が 80-100%の部分を拡大。

3) 中央構造線断層帯周辺の応力場

a) 震源メカニズム解による応力場の概観

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17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20km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。

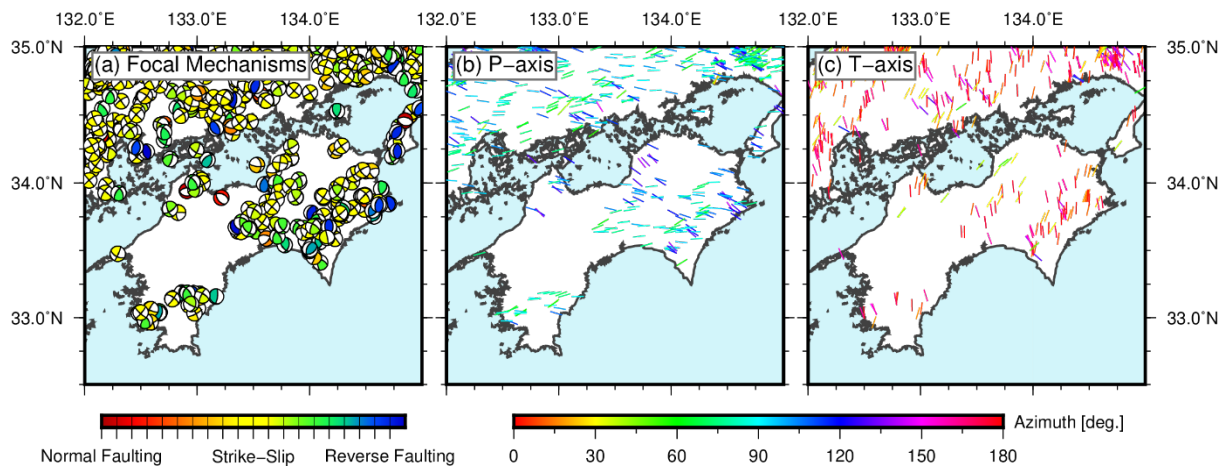


図17 日本全国内陸部震源メカニズム解カタログ (Uchide, 2020) による (a) 震源メカニズム解、(b) P軸方位、(c) T軸方位を示す。P軸・T軸方位については、傾斜が30度未満のもののみを描画した。

b) 日本内陸部ストレスマップによる中央構造線断層帯周辺の応力場

四国地方の中央構造線断層帯周辺の応力場を概観するため、全国内陸部ストレスマップ (Uchide et al., 2022) から当地域を抜き出した。また、燧灘において中央構造線から北傾斜に並ぶ地震活動について、それらの地震の震源メカニズム解を調べ、地震の並びとの対応関係を確認した。

図18に、中央構造線周辺における水平主圧縮軸方位 (Uchide et al., 2022) を示す。水平主圧縮軸は概ね東西方向を向いている。燧灘から香川県西部においては、中央構造線を境に水平主圧縮軸方位が異なる。中央構造線南部に比べて、北部では30度ほど時計回りに回転し、北西-南東方向を示すようになる。図19に、応力場の方向をビーチボールにより示す。四国の中央構造線沿いでは、横ずれ断層型の応力場が認められる。ここで、全国応力地図は緯度・経度とも0.2度間隔 (南北方向約22km、東西方向約18km) のグリッドを敷いて得られたものであり、それ以上細かいことは議論できないことに注意を要する。

次に、Uchide et al. (2022) の応力場によって、中央構造線断層帯が活動しやすいかどうかを、二つの指標によって評価した。指標の一つはSlip Tendencyである。Morris et al. (1996) による定義では、断層面上の剪断応力の絶対値を法線応力の絶対値で割ったものであり、これをさらに摩擦係数で除したのもよく用いられる。しかし、Uchide et al. (2022) による応力インバージョン解析では応力の絶対値が求められないため、この定義をそのまま使うことができない。そこで、Yukutake et al. (2015) に倣って、以下の3つの仮定に基づいて応力の絶対値を推定し、Slip Tendencyを計算する。

- 所与の応力場で最もすべりやすい断層面が静水圧下ですべる。

- 摩擦係数は0.6を使用する。
- 水平面にかかる法線応力はかぶり圧に等しい。

もう一つの指標は、Fault Instability (Vavryčuk et al., 2013) である。これは、ある断層面が、所与の応力場に対して最も破壊しやすい断層面の向きにどの程度近いかを示すもので、

$$I = \frac{\tau - \mu(\sigma - \sigma_1)}{\tau_c - \mu(\sigma_c - \sigma_1)}$$

と書ける。ここで、 τ と σ は断層に掛かる剪断応力と法線応力、 μ は摩擦係数、 τ_c と σ_c は最も破壊しやすい断層面に掛かる剪断応力と法線応力、 σ_1 は最大主圧縮応力を示す。

評価の際は、国立研究開発法人防災科学技術研究所のJ-SHISに収録されている断層面モデルを使用した。中央構造線断層帯では傾斜角40度の北傾斜の断層面と鉛直の断層面が想定されているため、両者に対して、Slip TendencyとFault Instabilityを計算した。

図20に計算結果を示す。いずれの指標でも、いずれの傾斜角でも、中央構造線断層帯は応力場によってすべりやすいことを示している。特に、鉛直傾斜の断層面の方がいずれの指標でも非常に高い値を示しており、非常にすべりやすいことを示唆している。ここで、応力の絶対値が推定できていないため、この計算値を以って発生時期に関して議論できるものではないことには注意を要する。

図21に、中央構造線断層帯付近で発生した地震の震源メカニズム解 (Uchide et al., 2022; 内出・他, 2022) を断面図上で示す。震源メカニズム解はHASHコード (Hardebeck and Shearer, 2002) を用いて求めたものであるが、そのうち、精度の良い「Aランク」「Bランク」「Cランク」のものを図示している。震源分布は北傾斜に並んでいるように見えるが、震源メカニズムの節面は必ずしもその方向に並んでいない。一方、断面(d)においては、ほぼ鉛直の節面を持つ震源メカニズム解が、ほぼ鉛直に並んでいるが、他の断面ではそのような傾向が明らかでない。震源メカニズムや震源位置の分布だけでは、北傾斜と鉛直の断層面のいずれが震源断層として妥当であるかはわからない。

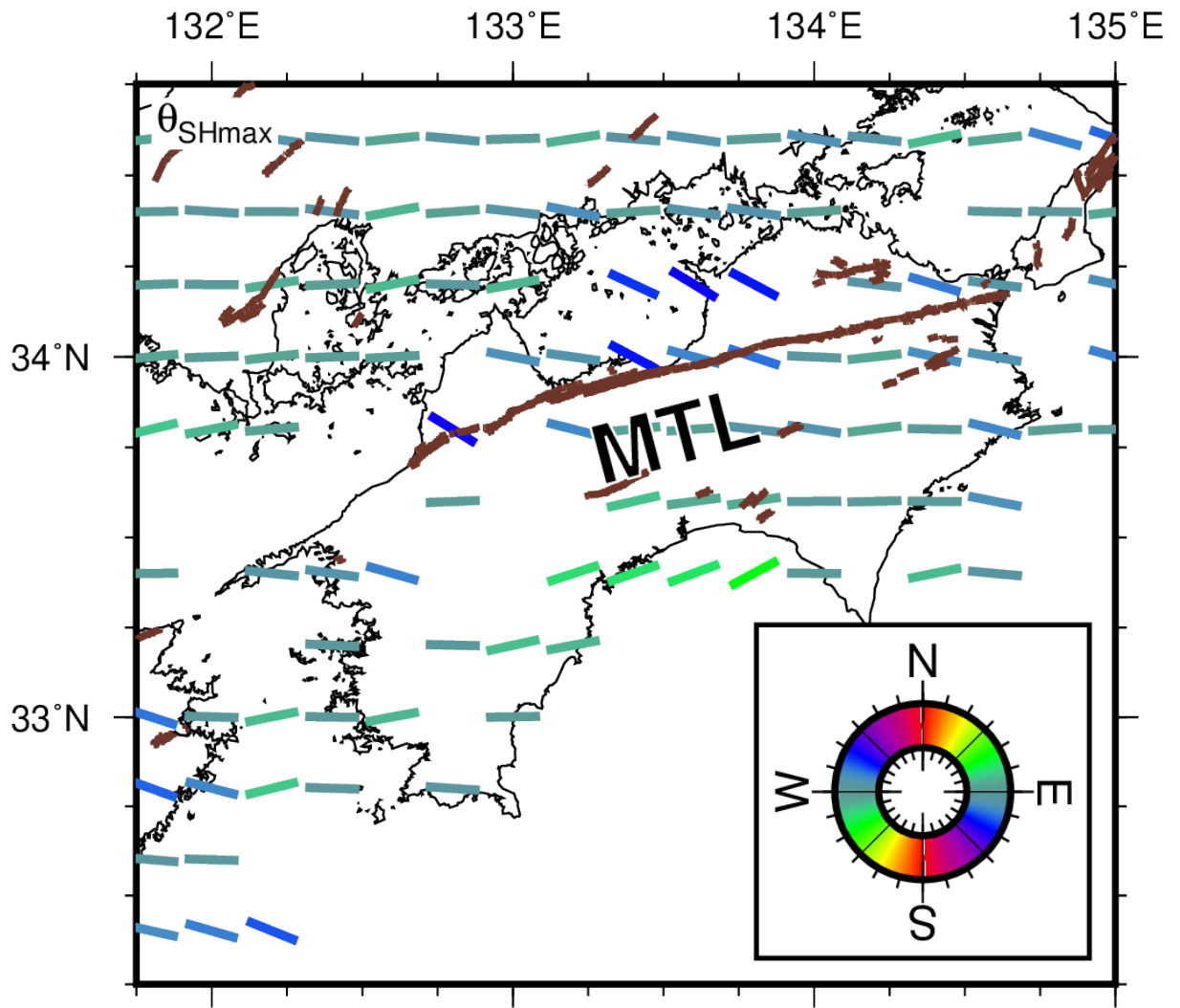


図 18 全国内陸部ストレスマップ (Uchide et al., 2022) による、四国地域の水平主圧縮軸方位。色と棒で水平主圧縮軸方位を表示した。茶色線は中田・今泉 (2002) による地表活断層の位置を示す。

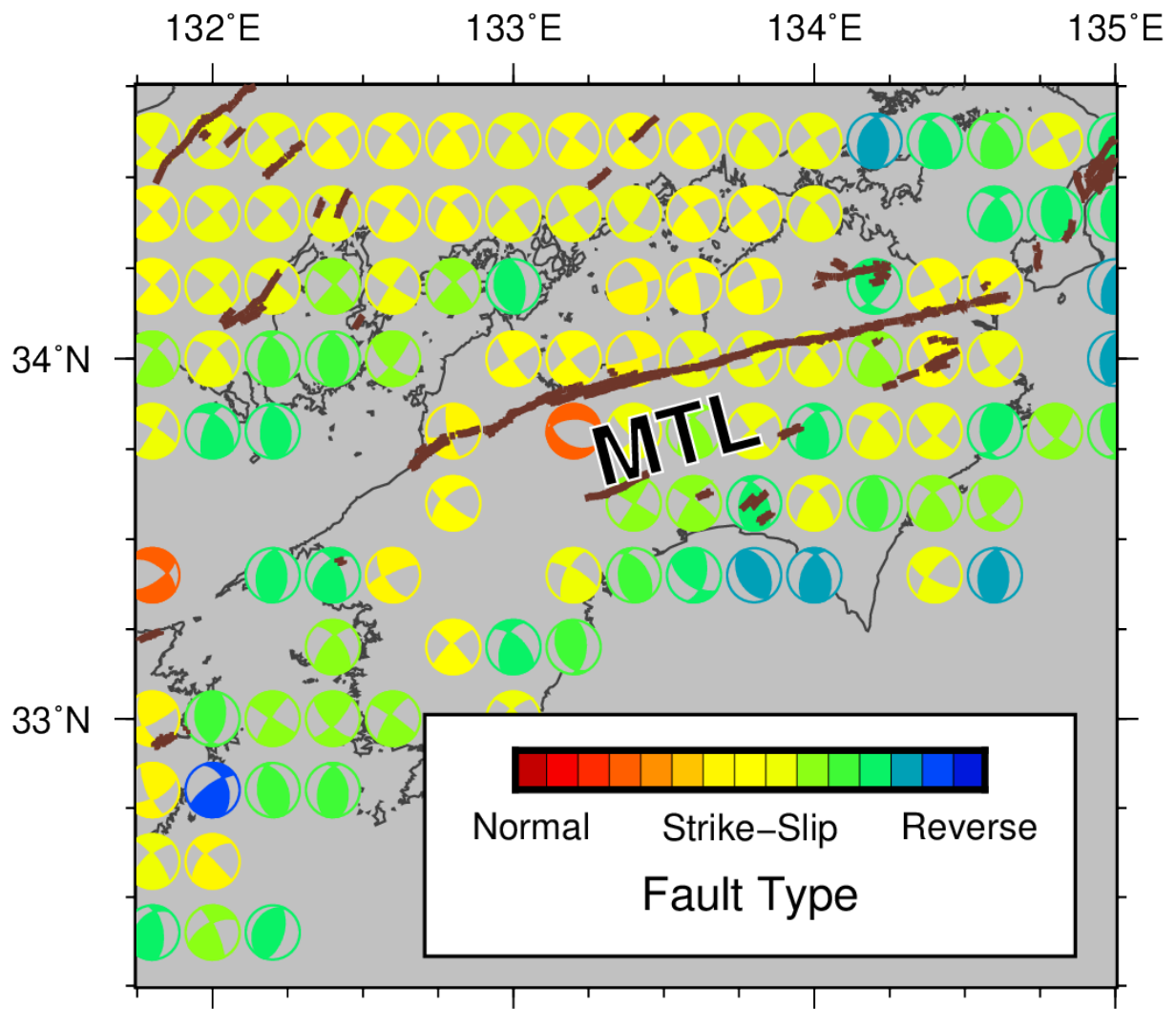


図19 全国内陸部ストレスマップ (Uchide et al., 2022) による応力軸の方向をビーチボールで示した。Shearer et al. (2006) に従って、断層タイプより色付けした。茶色線は中田・今泉 (2002) による地表活断層の位置を示す。

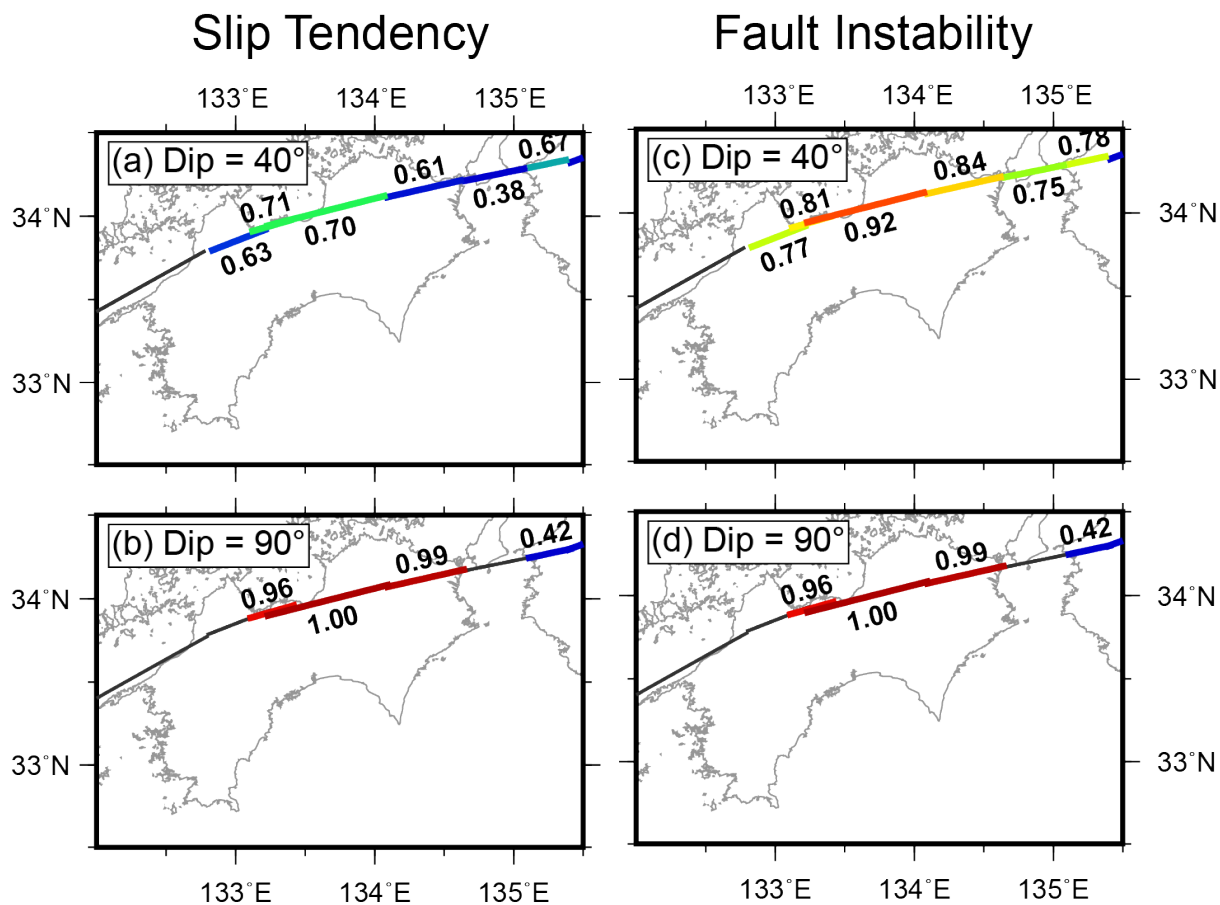


図20 全国内陸部ストレスマップ (Uchide et al., 2022) で示された応力場情報を用いて計算した、断層のすべりやすさの評価。(a) 傾斜角40度の断層モデルに対して計算したSlip Tendency。(b) 鉛直断層モデルに対して計算したSlip Tendency。(c) 傾斜角40度の断層モデルに対して計算したFault Instability。(d) 鉛直断層モデルに対して計算したFault Instability。

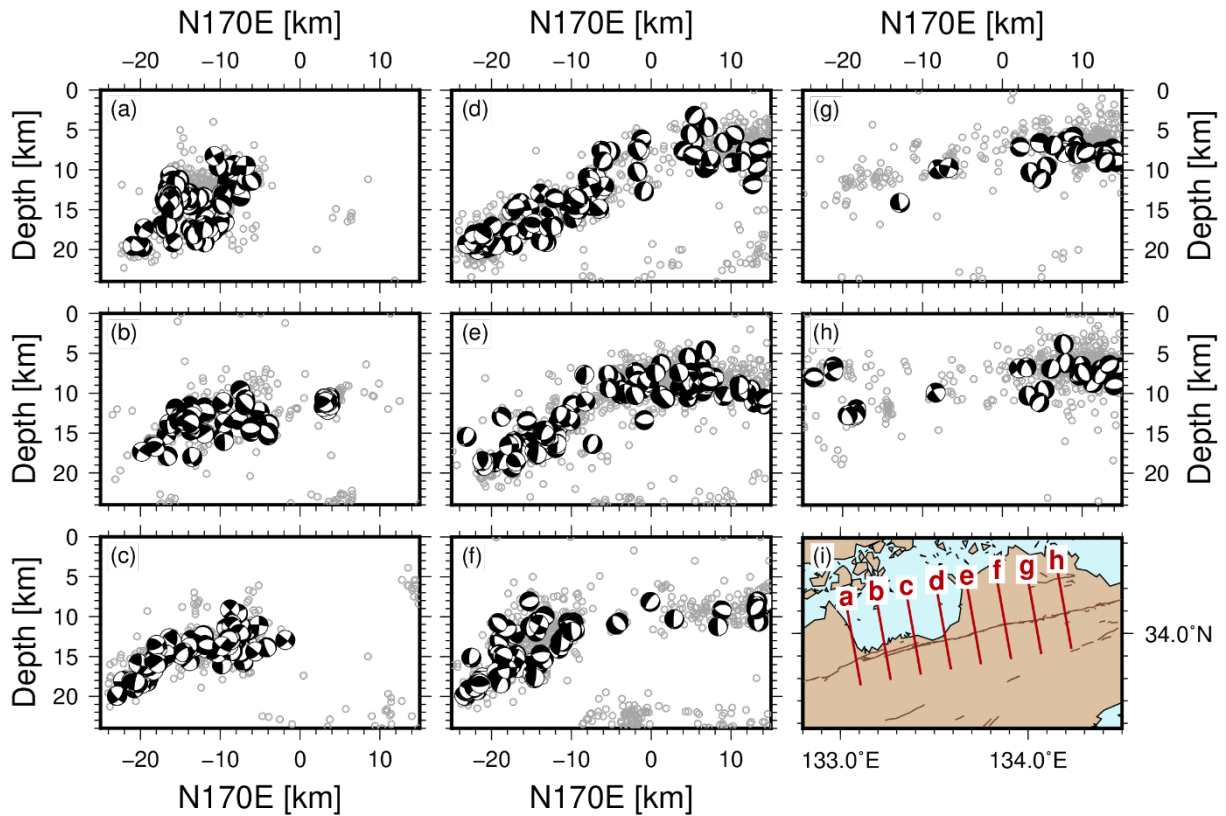


図21 中央構造線断層帯付近で発生した地震の震源メカニズム解 (Uchide et al., 2022; 内出・他, 2022) の分布。(a)~(h) 断面図。図の左方向がほぼ北 (N170E)、右方向がほぼ南を向いている。震源メカニズム解を示すビーチボールは横から見た下半球投影 (視点から遠い側の半球への投影) で描画した。(i) 各断面の位置。茶色線は中田・今泉 (2002) による地表活断層の位置を示す。

(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。また、この構造モデルを用いて微小地震の震源再決定を行い、中央構造線の北側で北側に傾斜する地震活動の分布を確認した。全国内陸部ストレスマップ用いて当該地域における応力場の傾向を概観したところ、四国地域における水平主圧縮軸方位が概ね東西方向を向いている中、燧灘から香川県西部にかけての地域では、中央構造線南部に比べて北部では30度ほど時計回りに回転していることが分かった。震源分布と震源メカニズム解の分布からは、北傾斜と鉛直断層のいずれのモデルに対しても明確な証拠はなく、どちらかのモデルだけを採択すべきであるという結論を得ることはできなかった。いずれのモデルでも現在の応力場で断層がすべりやすいが、特に鉛直断層の方がすべりやすいことがわかった。

さらに議論を進めるためには、地震検出や地震観測の強化によって地震データを充実させ、震源位置や震源メカニズム解の3次元分布を検討する必要がある。

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.
- Hardebeck, J. L., and P. M. Shearer, A new method for determining first-motion focal mechanisms, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 92, 2264-2276, 2002. doi:10.1785/0120010200.
- 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.
- Morris, A., D. A. Ferrill, and D. B Brent Henderson, Slip-tendency analysis and fault reactivation, *Geology*, 24, 275-278, 1996. doi: 10.1130/0091-7613(1996)024<0275:STAAFR>2.3.CO;2.
- 中田 高・今泉俊文, 活断層詳細デジタルマップ, 東京大学出版会, 2002.
- 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.
- Shearer, P. M., G. A. Prieto, and E. Hauksson, Comprehensive analysis of earthquake source spectra in Southern California, *J. Geophys. Res.*, 111, B06303, 2006. doi: 10.1029/2005JB003979.
- 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.
- Uchide, T., T. Shiina, and K. Imanishi, Stress map of Japan: Detailed nationwide crustal stress field inferred from focal mechanism solutions of numerous

- microearthquakes, *J. Geophys. Res.* 127, e2022JB024036, 2022. doi: 10.1029/2022JB024036.
- 内出崇彦・椎名高裕・今西和俊, 日本全国内陸部の地殻内応力マップと微小地震の発震機構解のデジタルデータ, 地質調査総合センター研究資料集, no. 738, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2022.
- 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.
- Vavryčuk, V., F. Bouchaala, and T. Fischer, High-resolution fault image from accurate locations and focal mechanisms of the 2008 swarm earthquakes in West Bohemia, Czech Republic, *Tectonophysics*, 590, 189-195, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2013.01.025>.
- Wessel, P., and W. H. F. Smith, Free software helps map and display data, *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 72, 441, 1991.
- Yukutake, Y., T. Takeda, and A. Yoshida, The applicability of frictional reactivation theory to active faults in Japan based on slip tendency analysis, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 411, 188-198, 2015. doi: 10.1016/j.epsl.2014.12.005.
- 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.