

### 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	総括研究主幹	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る。

#### (2) 令和3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地域で地震波走時トモグラフィ解析を実施した。本年度は解析する領域や条件を再検討することで3次元地震波速度構造モデルを構築した。加えて、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示された。これらの地震の震源メカニズム解はある程度、この北傾斜の傾向に沿った節面を持っているが、中にはそこからずれているものも見られた。全国応力地図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。

(b) 業務の成果

### 1) 地震波走時トモグラフィ

昨年度の結果をもとに解析する領域や条件を調整し、地震波走時トモグラフィ解析を実施することで中央構造線を含む地域の3次元速度構造モデルを構築した。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から、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の地震を収集した。解析範囲(図1)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。

本年度得られた地震波速度構造の水平断面図を図2に示す。昨年度の報告で認められた次の特徴は本年度の解析結果でも確認された：(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。

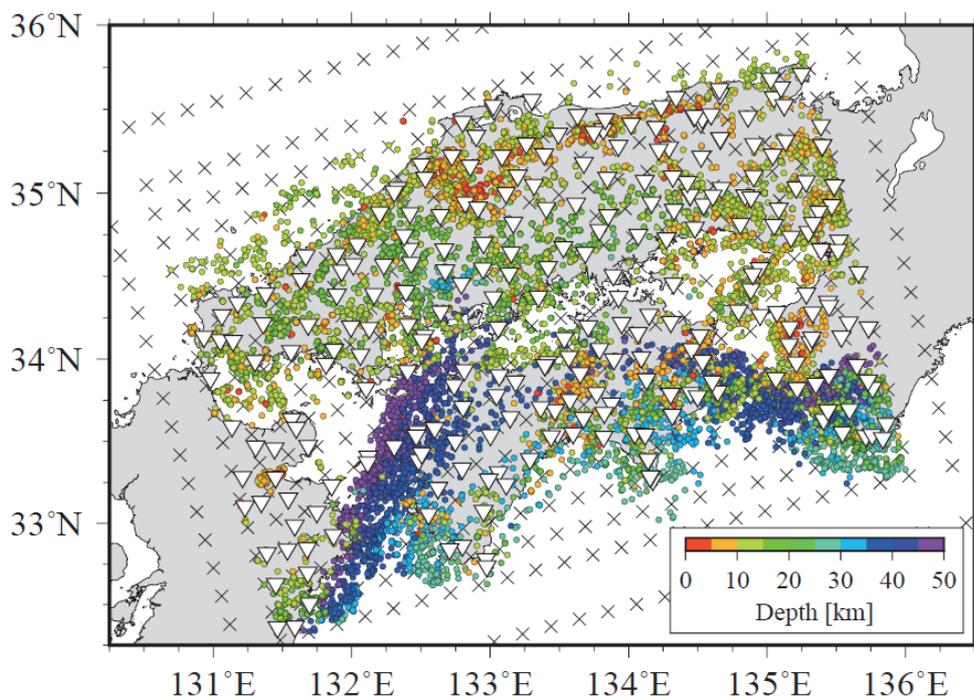


図1 地震波走時トモグラフィの解析領域。使用した地震を色付き丸、観測点を白逆三角で示す。×印は速度グリッドの位置。

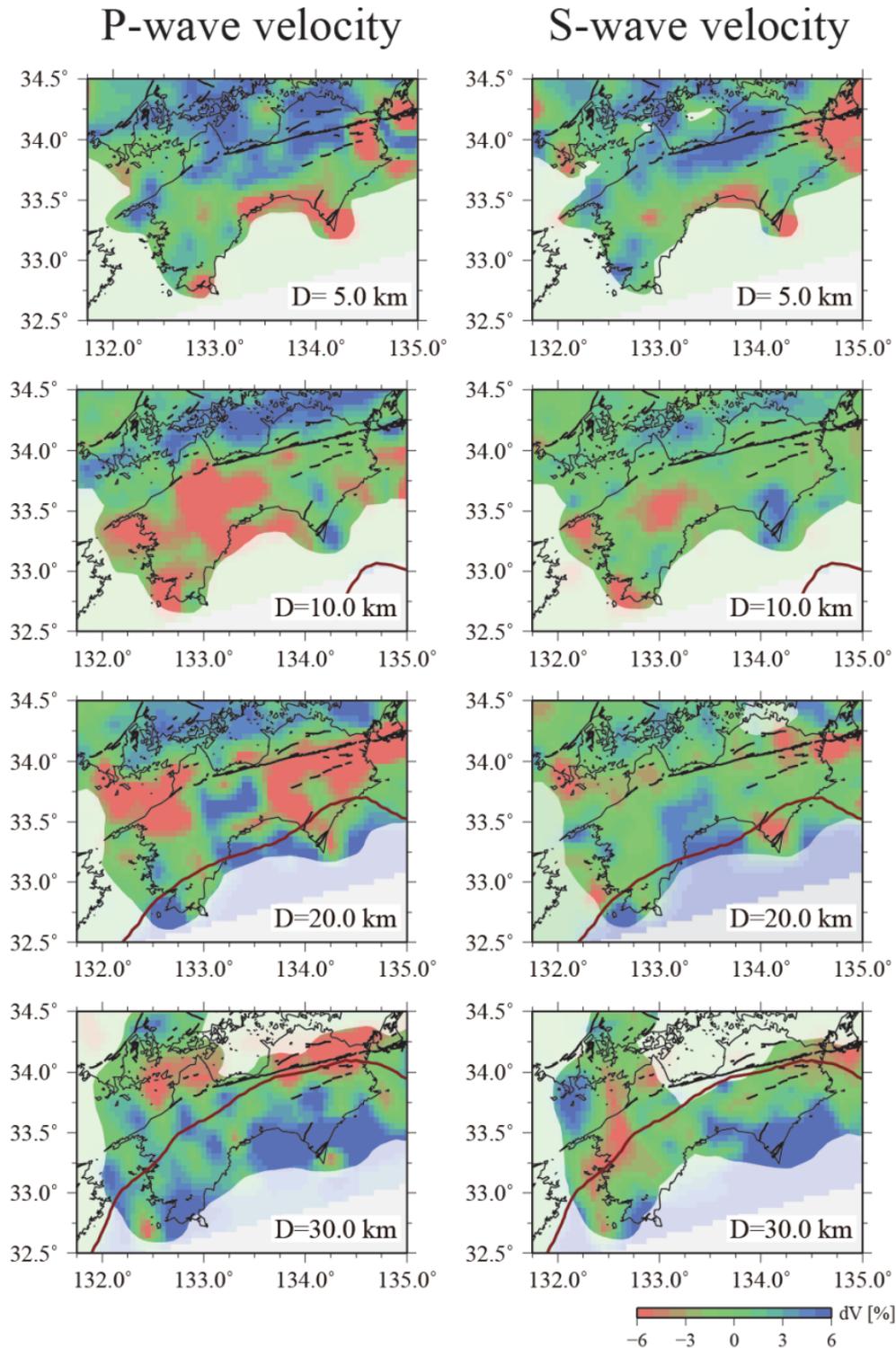


図2 中央構造線周辺の(左)P波速度偏差構造と(右)S波速度偏差構造の水平断面図。深さ(D)が5km、10km、20km、30kmの結果を示す。信頼度の低い領域は白マスクを重ねている。赤実線はフィリピン海プレートの深さ(弘瀬・他, 2008)。

## 2) 微小地震の震源再決定

本年度構築した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; 200

6)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3に示す。また、図4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4 d-f)では地震発生域が急激に深くなる。中央構造線から北傾斜の断層を考える場合、これらの地震が深部における断層の位置を示していると考えられる。

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5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6)。

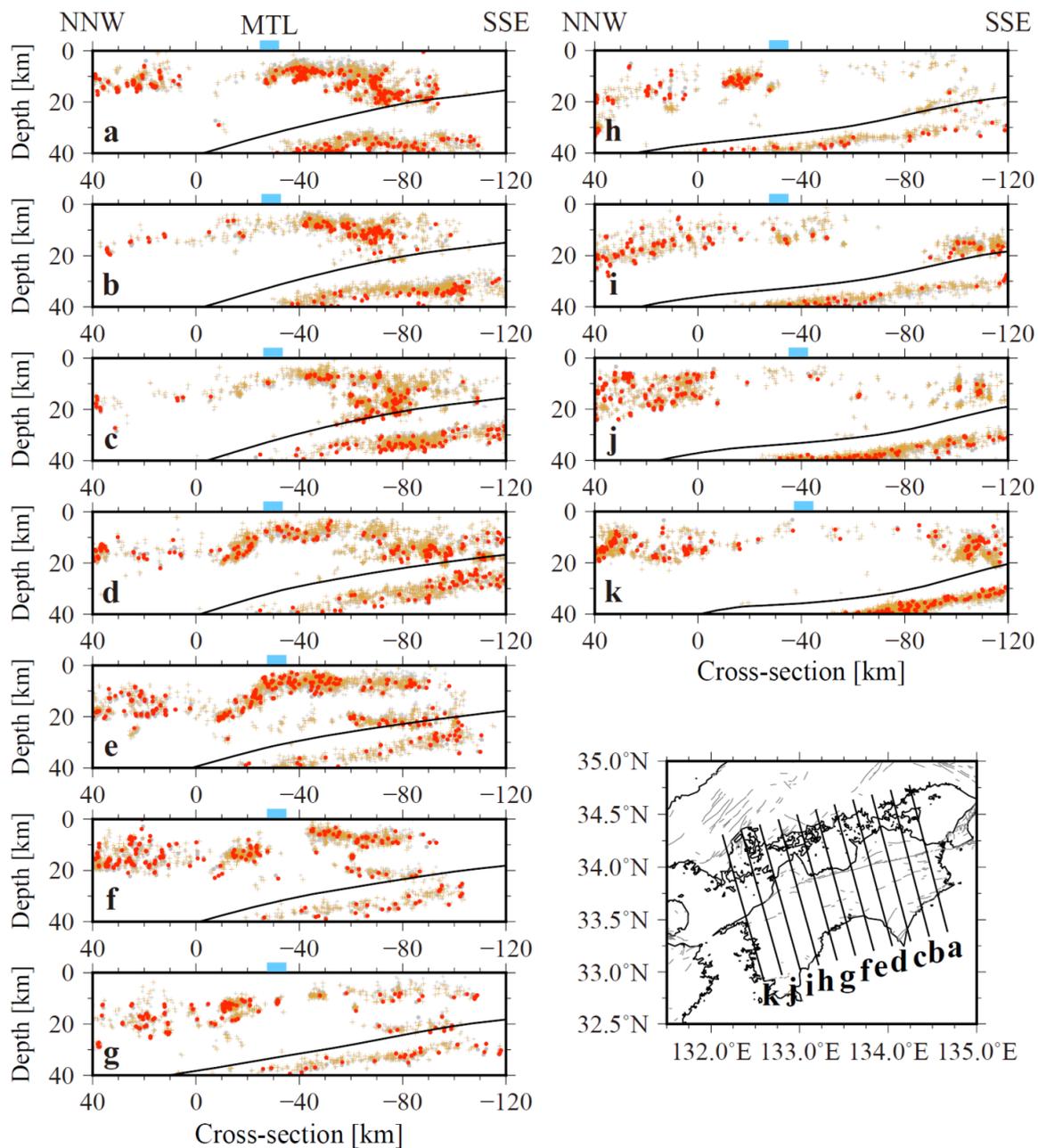


図3 四国周辺の震源分布の鉛直断面図。気象庁の震源位置を灰クロス（マグニチュード0.0～1.4）と灰丸（マグニチュード1.5以上）、再決定後の震源位置をオレンジ色のクロス（マグニチュード0.0～1.4）と赤丸（マグニチュード1.5以上）でそれぞれ示す。黒線はフィリピン海プレート上部境界（弘瀬・他，2008）である。青四角は各測線上における中央構造線（MTL）の地表位置を表す。

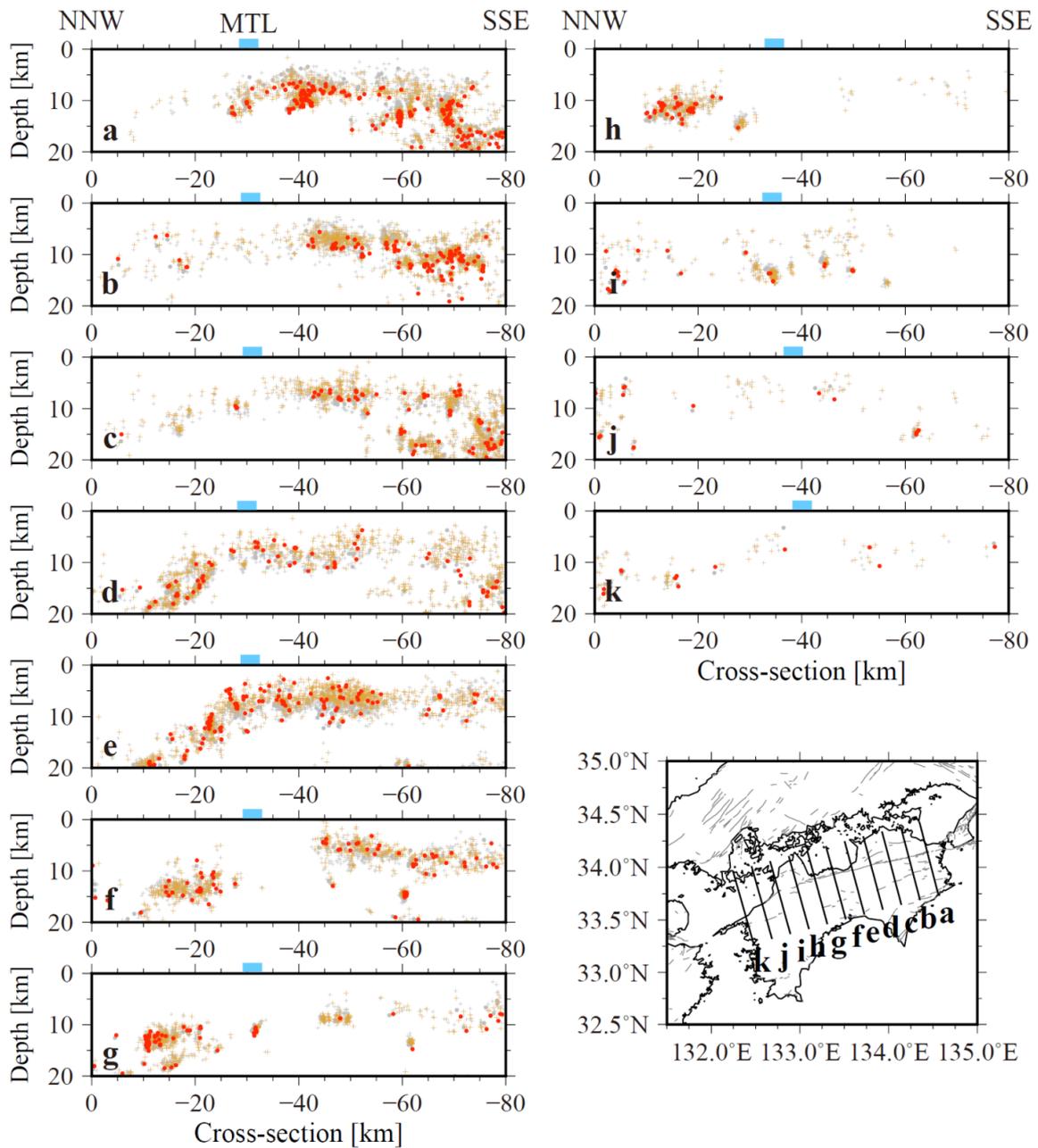


図4 中央構造線周辺の震源分布の鉛直断面図。気象庁の震源位置を灰クロス（マグニチュード0.0～1.4）と灰丸（マグニチュード1.5以上）、再決定後の震源位置をオレンジ色のクロス（マグニチュード0.0～1.4）と赤丸（マグニチュード1.5以上）でそれぞれ示す。青四角は各測線上における中央構造線（MTL）の地表位置を表す。

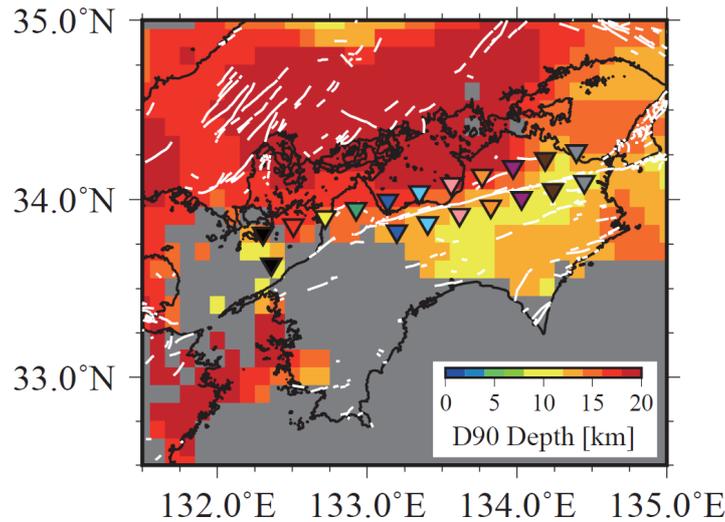


図5 四国周辺のD90の深さ分布。グリッドを中心にした30km四方に15個以上の地震（マグニチュード1.0以上）が分布する領域を示す。

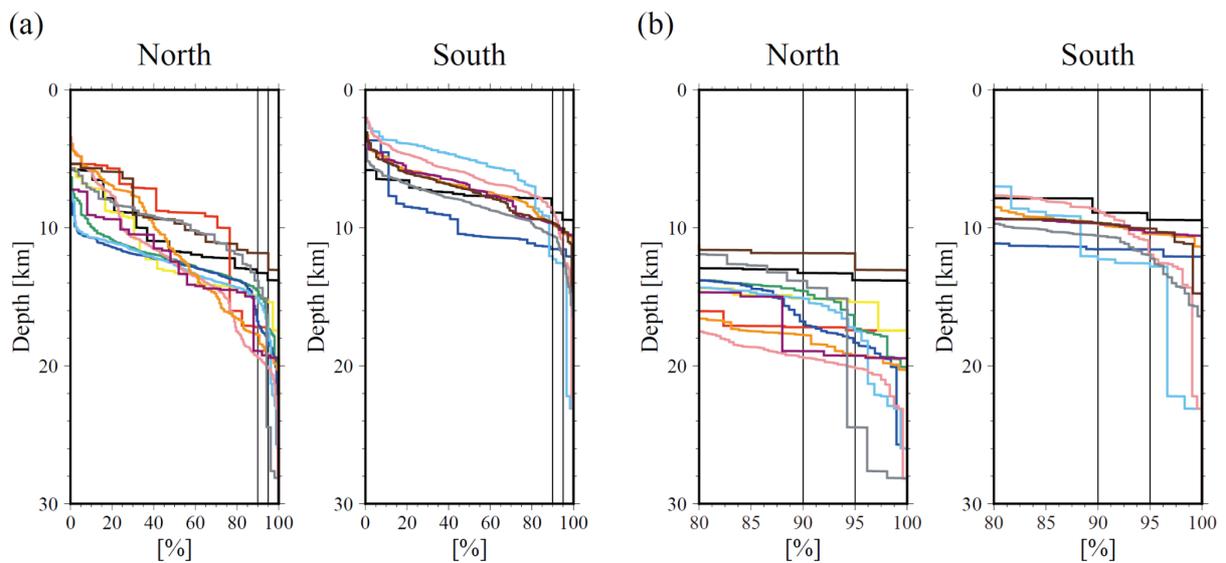


図6 中央構造線の南北における累積地震発生数の変化。累積頻度は色の対応する図5中の逆三角の地点で計算した。黒線はD90とD95に対応。(b)は累積頻度が80-100%の部分を拡大。

### 3) 日本全国応力地図による応力場の概観

四国地方の中央構造線周辺の応力場を概観するため、全国応力地図 (Uchide et al., under review) 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7に、中央構造線周辺における水平主圧縮軸方位 (Uchide et al., under review) 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。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。

図8に、燧灘で発生した地震の震源メカニズム解（Uchide et al., under review）を断面図上で示す。図3や図4では、断面fに相当する位置である。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」のみを図示している。地震の並びを見ると北傾斜（図8では右上－左下方向）であるが、震源メカニズム解はこの傾向にあった節面を持っているものが見られる一方、そこから明確にずれているものも見られた。北傾斜の断層や、地震活動では明確に見られなかった鉛直に近い断層について検討するには、さらに地震活動や震源メカニズム解等を精査する必要がある。

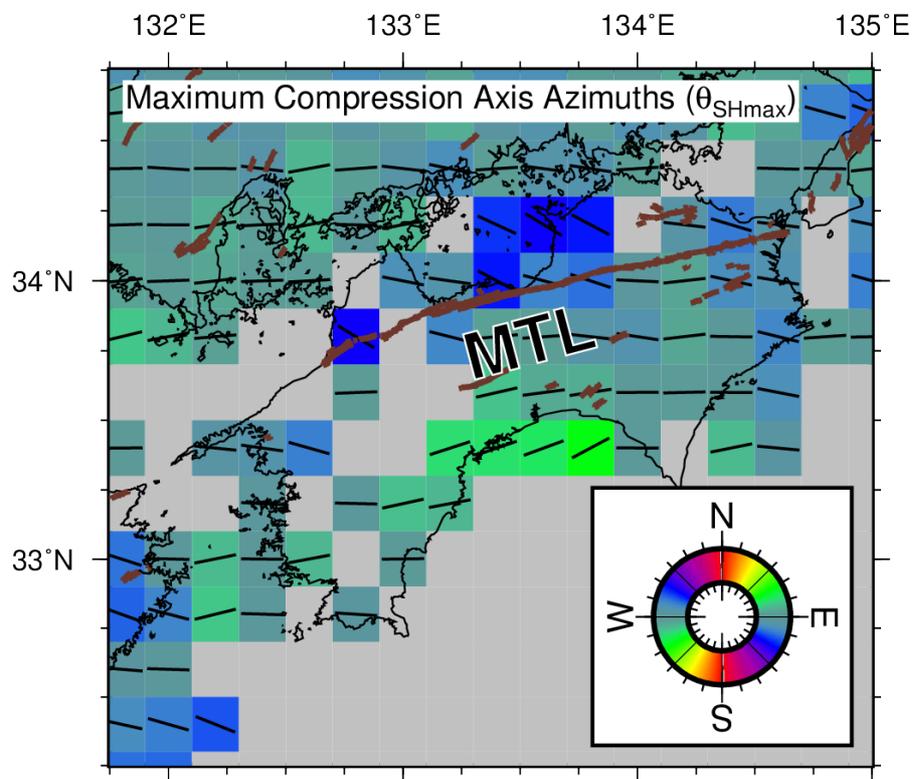


図7 全国応力地図（Uchide et al., under review）による、四国地域の水平主圧縮軸方位。色と棒で水平主圧縮軸方位を表示した。

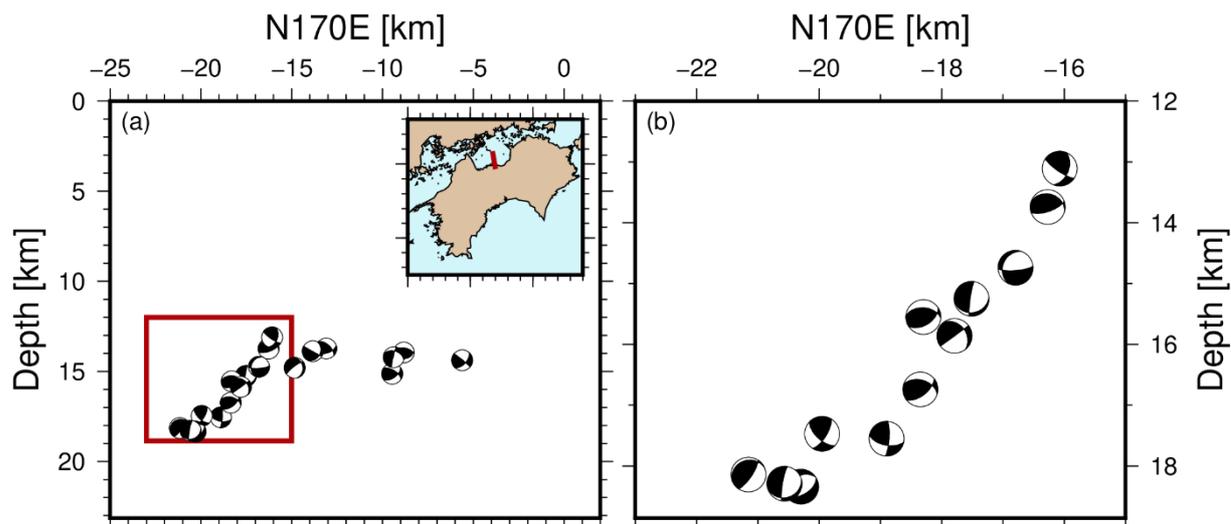


図8 燧灘で発生した地震の震源メカニズム解の分布。(a)右上の地図の赤線で示した位置での断面図。図の左方向がほぼ北 (N170E)、右方向がほぼ南を向いている。(b) (a)の赤四角で囲った部分の拡大図。いずれの図においても、震源メカニズム解を示すビーチボールは横から見た下半球投影 (視点から遠い側の半球への投影) で描画した。

#### (c) 結論ならびに今後の課題

地震波速度トモグラフィ解析の解析領域や条件を再検討し、四国地方周辺の3次元地震波速度構造モデルを構築した。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。これらの地震の震源メカニズム解はある程度、この北傾斜の傾向に沿った節面を持っているが、中にはそこからずれているものも見られた。全国応力地図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。震源メカニズム解と北傾斜の断層、あるいは、地震活動では明確に見られなかった鉛直に近い断層について検討するには、さらに地震活動や震源メカニズム解等を精査する必要がある。

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

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.
- 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.
- National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, NIED Hinet, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2019. doi:10.17598/NIED.0003.
- 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 Solid Earth, under review.
- 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., and W. H. F. Smith, 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.