

3. 2 地殻応力場と震源断層形状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	椎名 高裕
国立研究開発法人 産業技術総合研究所	研究グループ付	内出 崇彦
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

断層帯周辺の地殻応力場の情報を整理し、3次元速度構造を用いて微小地震の震源位置を精密に再決定する。また、地震の震源分布やメカニズム解を用いて震源断層の地下形状を推定する。

(d) 年度毎の実施業務の要約

1) 令和5年度：

対象断層帯周辺で発生した地震のメカニズム解や地殻応力場の情報を整理し、対象断層帯に適切な地殻応力場を提示した。

2) 令和6年度：

三次元地震波速度構造を用い、対象断層帯周辺で発生した地震の震源再決定を行う。地震の震源分布から地震発生層の下限深さを検討する。

3) 令和7年度：

断層帯周辺の微小地震の分布やメカニズム解から断層形状を推定し、地殻応力場や隣接する断層セグメントとの関係を検討する。

(2) 令和5年度の成果

(a) 業務の要約

紀伊半島の中央構造線断層帯及びその周辺で発生した地殻内地震の分布を概観するとともに、震源メカニズム解や地殻応力場の情報を整理した。また、当該地域の応力場が断層帯の断層をすべらせやすいかどうかを検討した。当該地域で発生した微小地震は主に逆断層型あるいは横ずれ断層型のメカニズム解を持つ。これらの震源メカニズム解から、紀伊半島の中央構造線断層帯周辺では概ね東西方向に圧縮軸を持つ応力場が示され、横ずれ成分を含む東西圧縮の逆断層場として特徴付けられることがわかった。この応力場は、逆断層型の断層をすべりやすくするセンスに作用し、特に南北走向の逆断層型の断層が想定される金剛山地東縁区間では断層が非常にすべりやすくなっていると考えられる。一方で、当該地域では応力場の深さ変化が報告されており、上部地殻浅部

で横ずれ断層型の応力場が支配的になることで根来区間及び五条谷区間の断層がすべりやすくなっている可能性がある。

(b) 業務の成果

1) 地殻内地震の震源分布の概観

まず、紀伊半島周辺の地震活動を概観し、その特徴の把握を行った。対象とする紀伊半島の中央構造線断層帯は紀伊半島を東西に横切る断層帯で、うち西部の根来区間、五条谷区間、金剛山地東縁区間が活断層として認定されている(地震調査研究推進本部, 2017)。

図1は気象庁一元化震源カタログに掲載されている2003年から2020年までに発生したマグニチュード0.5以上の地震の震源分布を示す。震源深さ範囲は0~20kmである。また、中央構造線断層帯周辺における北北西-南南東の鉛直断面図を図2に示す。断層帯の南側では、根来区間から五条谷区間の西端付近にかけて活発な群発地震活動が起きている(図1, 図2 b-f)。一方、それより東側では地震の発生が非常に乏しいことがわかる(図1, 図2 g-j)。断層帯北側では活動度はやや低いものの、定常的な地震活動が確認できる。なお、地震は概ね15km以浅に分布する。

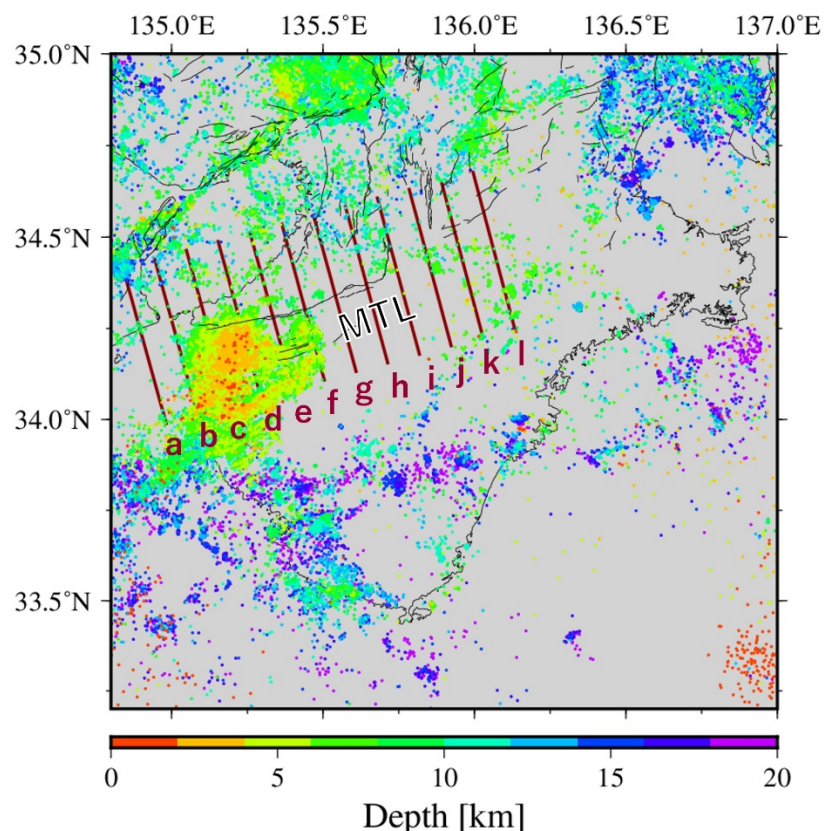


図1 気象庁一元化震源カタログによる紀伊半島の中央構造線断層帯 (MTL) 周辺の震源分布。丸は震央位置であり、その色は震源深さを表す。黒線は中田・今泉 (2002) による地表活断層の位置を示す。赤線は図2に示す鉛直断面図の測線である。

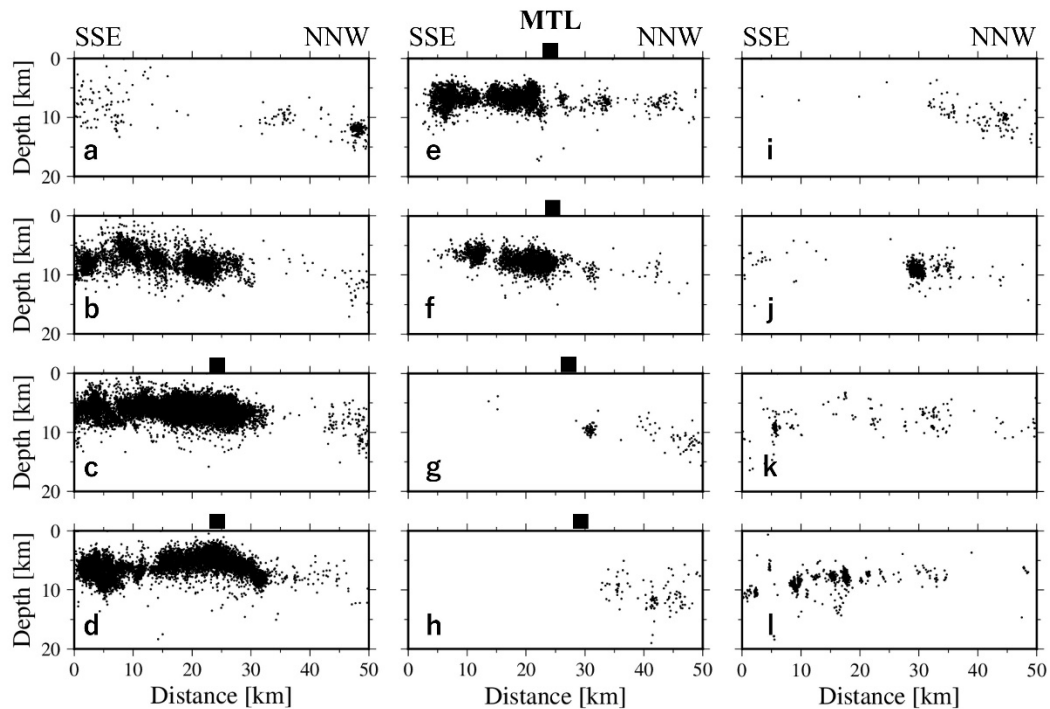


図2 中央構造線断層帯（MTL）周辺の鉛直断面図。黒丸は測線から5 km以内に位置する地震の震源分布である。黒四角は地表の中央構造線断層帯の地表位置を表す。測線位置は図1に示す。

2) 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地殻応力場

全国内陸部ストレスマップ（Uchide et al., 2022; 内出・他, 2022）から紀伊半島部分を抜き出し、中央構造線断層帯周辺の地殻応力場を検討した。

震源メカニズム解とその主圧力軸（P軸）、主張力軸（T軸）（Uchide et al., 2022）を図3と図4にそれぞれ示す。P軸とT軸はそれぞれのプレンジ角が水平から30度以内であるものを抽出した。中央構造線断層帯周辺では主に逆断層型と横ずれ断層型の地震が発生し、そのP軸は概ね東西方向、T軸は概ね南北方向を向いていることが認められる。

次に、図5はこれらの震源メカニズム解を用いた応力インバージョンにより推定された水平主圧縮軸（Uchide et al., 2022）を示す。水平主圧縮軸方位から中央構造線断層帯周辺では概ね東西方向に圧縮軸を持つ応力場が示される。参考までに、図5には原位置応力測定結果による水平主圧縮軸方位も示しているが、応力インバージョンの結果と概ね調和的である。また、推定された応力場をビーチボールで表現すると、紀伊半島の中央構造線断層帯周辺の応力場は横ずれ成分を含む、東西圧縮の逆断層場として特徴付けられる（図6）。ただし、中央構造線周辺では、逆断層型の地震だけでなく、横ずれ断層型の地震も多く発生している（図3b-c）。したがって、実際の応力場は、逆断層型と横ずれ断層型の2つの断層タイプの地震が発生しやすい場であると考えられる。

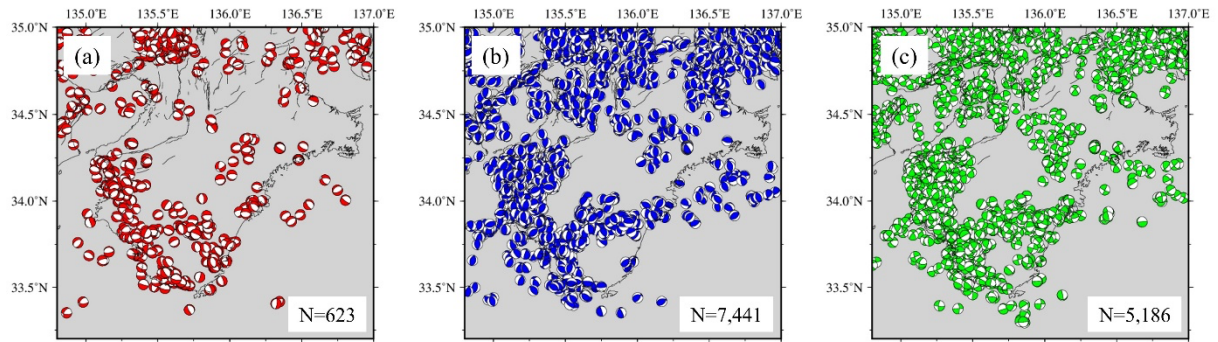


図3 全国内陸部ストレスマップ (Uchide et al., 2022; 内出・他, 2022) による紀伊半島周辺の震源メカニズム解の分布：(a)正断層型、(b)逆断層型、(c)横ずれ断層型。黒線は中田・今泉（2002）による地表活断層の位置を示す。Nは震源メカニズム解の数を表す。

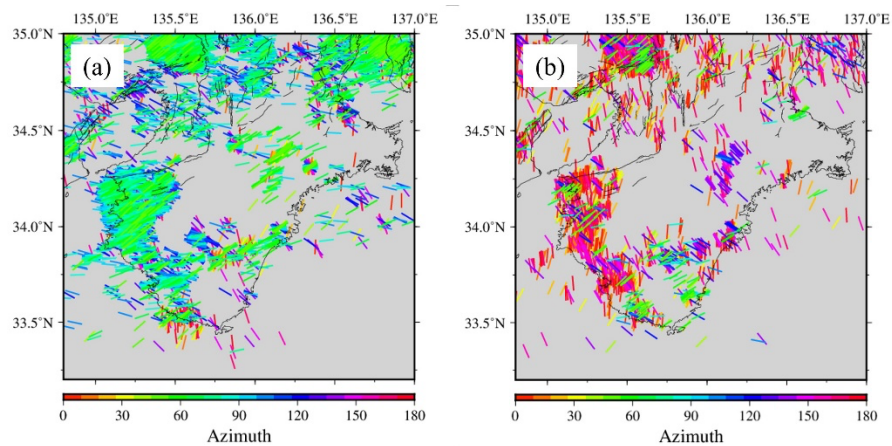


図4 全国内陸部ストレスマップ (Uchide et al., 2022; 内出・他, 2022) による紀伊半島周辺の(a)主圧力軸方位、(b)主張力軸方位の分布。プランジ角が水平から30度以内のメカニズム解の主圧力軸、主張力軸を抽出し、その方位を棒と色で示す。黒線は中田・今泉（2002）による地表活断層の位置を示す。

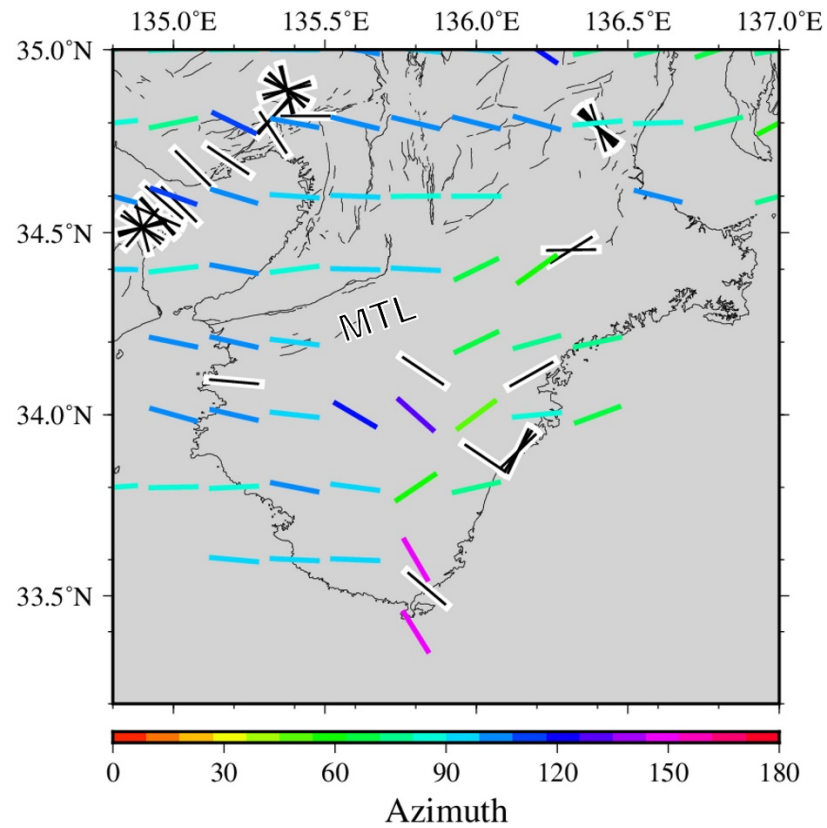


図5 全国内陸部ストレスマップ (Uchide et al., 2022; 内出・他, 2022) による紀伊半島周辺の水平主圧縮軸方位の分布。色と棒で水平主圧縮軸方位を示す。黒棒の向きは原位応力測定による水平主圧縮軸方位 (e. g., Tanaka, 1986; 産業技術総合研究所, 2024) を示す。黒線は中田・今泉 (2002) による地表活断層の位置を示す。

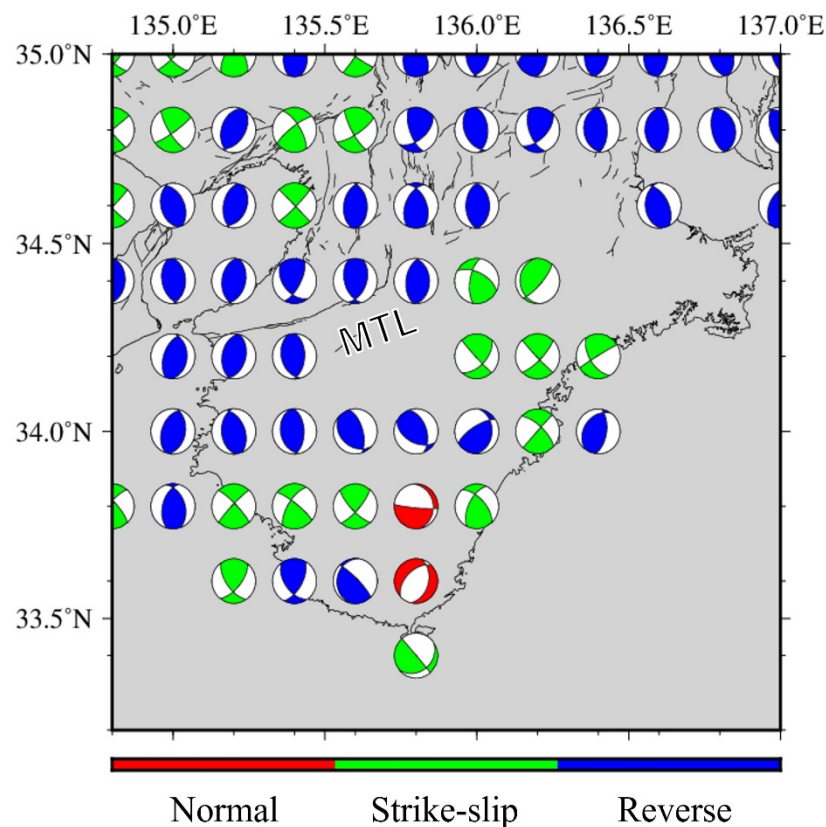


図6 全国内陸部ストレスマップ (Uchide et al., 2022; 内出・他, 2022) による紀伊半島周辺の地殻応力場の特徴。ビーチボールは断層タイプにより色分けした (赤：正断層型、緑：横ずれ断層型、青：逆断層型)。黒線は中田・今泉 (2002) による地表活断層の位置を示す。

3) 断層のすべりやすさの検討

Uchide et al. (2022) では応力インバージョンで特徴付けられた東西圧縮の逆断層型の応力場に対する断層のすべりやすさを Slip Tendency (e.g., Morris et al., 1996; Yukutake et al., 2015) と Fault Instability (Vavryčuk et al., 2013) の2つの指標を用いて評価した。紀伊半島の中央構造線断層帯のうち、金剛山地東縁区間では Slip Tendency が 0.8 程度以上、Fault Instability が 0.9 程度という高い値となる (Uchide et al., 2022)。金剛山地東縁区間では南北走向を持つ逆断層すべりが想定されており、東西圧縮の応力場において非常にすべりやすいことが示唆される。根来区間および五条谷区間では鉛直な断層モデルと北落に 40 度傾斜する断層モデルに対する断層のすべりやすさが評価された (Uchide et al., 2022)。北落に 40 度傾斜する断層モデルの場合、根来区間では Slip Tendency は 0.7 程度、Fault Instability は 0.8 程度であり、五条谷区間では Slip Tendency と Fault Instability は共に 0.5 程度である。一方、鉛直断層モデルの場合、根来区間では Slip Tendency と Fault Instability がともに 0.4 程度であり、五条谷区間では Slip Tendency は 0.6 程度、Fault Instability は 0.5 程度である。したがって、東西圧縮の逆断層型の応力場においては北落に 40 度傾斜する断

層モデルがよりすべりやすい傾向にあることがうかがえる。ただし、Maeda et al. (2018) は、Uchide et al. (2022) とは独立に、紀伊半島西部の群発地震活動域周辺で発生した地震のメカニズム解を推定し、深さ方向に応力場が変化することを指摘した。Maeda et al. (2018) によると深さ 6 km 程度以浅では東西圧縮の横ずれ断層型、それより深い深さでは東西圧縮の逆断層型の応力場が支配的となる。四国の中央構造線断層帯に対する議論 (Uchide et al., 2022; 文部科学省研究開発局・産業技術総合研究所, 2023) と同様に、根来区間及び五条谷区間でも、東西圧縮の横ずれ断層型の応力場が支配的になる上部地殻浅部では鉛直な断層がすべりやすくなっている可能性がある。

(c) 結論ならびに今後の課題

主に日本全国内陸部ストレスマップ (Uchide et al., 2022) に基づいて、紀伊半島の中央構造線断層帯周辺の応力場を検討した。当該断層帯周辺では、概ね東西方向に圧縮軸を持つ応力場が卓越し、横ずれ成分を含む東西圧縮の逆断層場として特徴付けられることがわかった。水平主圧縮応力軸方位については、震源メカニズム解による推定結果 (Uchide et al., 2022) と原位置応力推定による結果 (e.g., Tanaka, 1986; 産業技術総合研究所, 2024) は概ね調和的である。東西圧縮の逆断層場は逆断層型の断層をすべりやすくするセンスに作用し、特に金剛山地東縁区間では断層が非常にすべりやすいことがわかった。また、根来区間及び五条谷区間では、応力場の深さ変化が報告されており、上部地殻浅部で東西圧縮の横ずれ断層型の応力場が支配的になることで鉛直な断層においてもすべりが生じやすくなっている可能性がある。

謝辞：気象庁一元化震源カタログを使用いたしました。図は Generic Mapping Tools (Wessel and Smith, 2013) で作成しました。

(d) 引用文献

地震調査研究推進本部，中央構造線断層帯（金剛山地東縁－由布院）の長期評価（第二版），2017.

Maeda, S., T. Matsuzawa, T. Shinji, K. Yoshida, and H. Katao, Complex microseismic activity and depth-dependent stress field changes in Wakayama, southwestern Japan, *Earth, Planets, and Space*, 70, 21, 2018. doi:10.1186/s40623-018-0788-6.

文部科学省研究開発局・産業技術総合研究所，連動型地震の発生予測のための活断層調査 令和 2～4 年度成果報告書，258-263p, 2023.

Morris, A., D. A. Ferrill, and D. Brent Henderson, Slip-tendency analysis and fault reactivation, *Geology*, 24, 275-278, 1996.

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.

産業技術総合研究所，地殻応力データベース，
<https://gbank.gsj.jp/crstress/history.html>（2024 年 3 月 13 日閲覧）.

Tanaka, Y., State of crustal stress inferred from in site stress measurements, *Journal of physics on the earth*, 37, S57-S70, 1986.

- 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:10.1016/j.tecto.2013.01.025.
- Wessel, P., W. H. F. Smith, R. Scharroo, J. Luis, and F. Wobbe, Generic Mapping Tools: Improved Version Released. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 94, 409–410, 2013.
- 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.