

中国地域の地殻内応力マップの作成

今西 和俊^{1,*}・内出 崇彦²・椎名 高裕²・松下 レイケン²・中井 未里²

IMANISHI Kazutoshi, UCHIDE Takahiko, SHIINA Takahiro, MATSUSHITA Reiken and NAKAI Misato (2021) Construction of Crustal Stress Map in Chugoku Region, western Japan. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 72 (1), p. 23–40, 14 figs, 3 tables.

Abstract: A crustal stress map of the Chugoku region, western Japan, was constructed from earthquake focal mechanism solutions. In order to increase the spatial resolution of the stress map, we included more data than the routine catalog by determining focal mechanisms of small earthquakes down to magnitude 1.5 in approximately the past 12 years. We obtained 2988 well-constrained solutions using P-wave polarity data and body wave amplitudes. We merged our focal mechanism catalog with the Japan Meteorological Agency earthquake catalog, which have become a source of information on the stress map. For each earthquake, we determined the type of stress field using rake angles and the direction of the maximum horizontal compressive stress (S_{Hmax}) based on P-, B-, and T-axes. We then computed the mean S_{Hmax} and type of stress field on a mesh interval of 10 km. Compared with previous stress maps in the present study area, our 10-km mesh stress map provides higher spatial resolution in stress fields. Our stress map shows that the area is predominantly strike-slip stress field with E-W compression but the stress orientation rotates clockwise by about 20° in the Sea of Japan side of Shimane and Tottori prefectures. Based on our stress map, we evaluated the fault reactivation potential of 30 active faults targeted by the Headquarters for Earthquake Research Promotion Investigation Committee (2016), revealing that 28 active faults satisfy the condition for reactivation under the present-day stress field and typical friction coefficient. The remaining two active faults are unfavorably oriented to the present-day stress field, requiring external factors such as a development of anomalous high fluid pressure and a stress triggering associated with the rupture of adjacent active faults for reactivation.

Keywords: stress map, Chugoku region, small earthquake, focal mechanism

要 旨

中国地域の地殻内応力マップを作成するため、過去12年間にわたるマグニチュード1.5以上の地震の発震機構解を決定した。気象庁一元化カタログもコンパイルし、10 kmメッシュの応力マップとして纏めた。小さな地震まで解析して発震機構解データを増やしたことで、先行研究よりも応力場の空間分解能を格段に高くすることができた。得られた応力マップから、この地域は東西圧縮の横ずれ場に卓越しているが、島根県・鳥取県の日本海側になると応力方位が時計回りに約 20° 回転して西北西–東南東方向を示すようになる様子が詳しくわかるようになった。応力マップをもとに活断層の活動性について評価を行ったところ、地震調査研究推進本部 地震調査委員会(2016)が評価対象とした中国地域の30の活断層のうち、現在の応力場、一般的な摩擦係数のもとで再活動する条件を満たしているのは28あることがわかった。

残りの2つの活断層は現在の応力場では動きにくく、再活動するためには、異常間隙水圧の発生や隣接する活断層の破壊に伴う応力変化でトリガーされるなどの外的要因が必要になると考えられる。

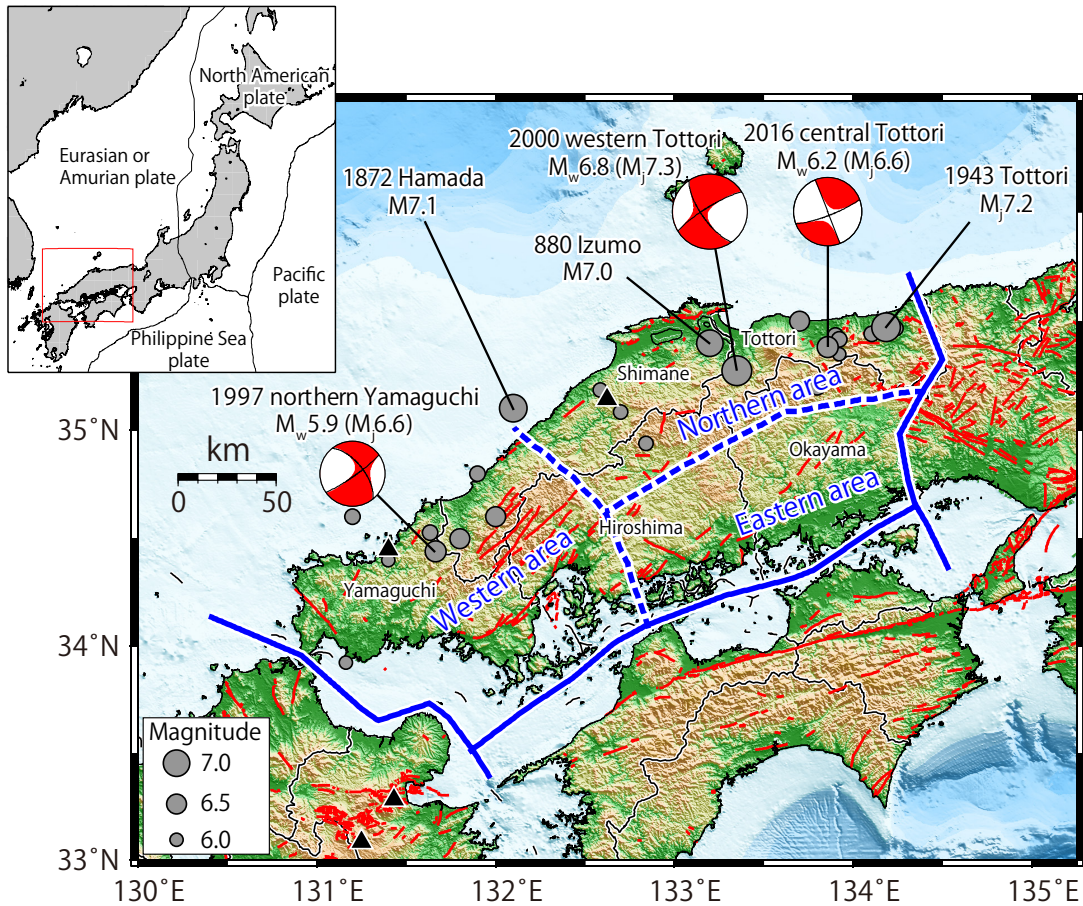
1. はじめに

プレートテクトニクス理論が認められてから、地震の原動力である応力の源はプレートの相対運動にあると考えられるようになった。しかし、応力に関するデータが蓄積されてくるにつれて、力の掛かり方は単純ではなく、プレート相対運動に起因する広域応力場から局所的にずれている領域も多くあることがわかってきた(例えば、Heidbach *et al.*, 2018 ; Lund Snee and Zoback, 2020)。特に世界的に見ても複雑なテクトニクスにある日本列島は、古くから激しい構造変形を受けており、その影響は応力場にも反映されていることが予想される。将来発生する地震の規模や切迫性を数値シミュレーションにより正し

¹ 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 研究戦略部 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Promotion Division)

² 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 活断層・火山研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Earthquake and Volcano Geology)

* Corresponding author: IMANISHI, K., Central 1, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8560 Japan. Email: imani@ni.aist.go.jp



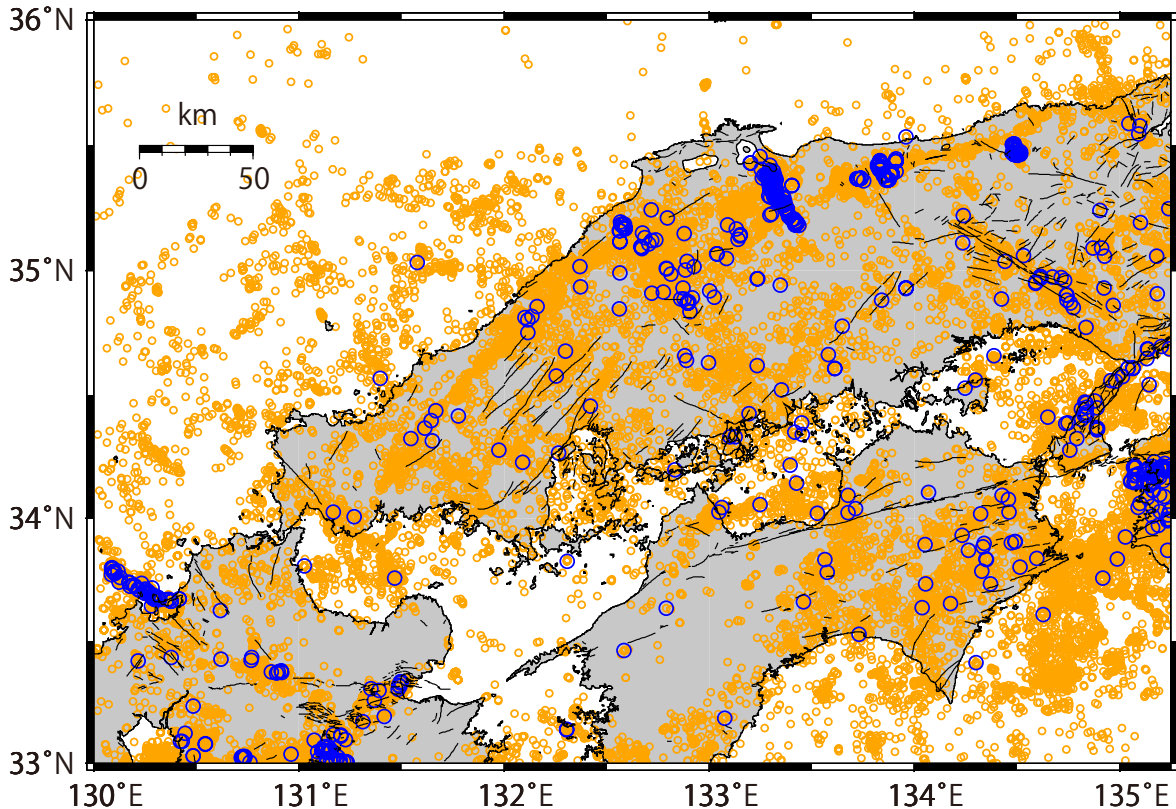
第1図 本研究の調査地域。青色の線は地震調査研究推進本部 地震調査委員会(2016)による中国地域の地域評価の評価対象地域を示す。灰色の丸は中国地域の浅い陸域で2018年8月までに発生したM6以上の地震(宇津(1999)及び1923年以降は気象庁一元化カタログによる)。ビーチボールは気象庁によるセントロイドモーメントテンソル解。赤線は活断層線(活断層研究会, 1991), 三角は活火山(気象庁, 2013)を示す。地形データは岸本(1999)により編集された海陸統合メッシュデータを使用。

Fig. 1 Target area of the present study. The blue lines represent the region of long-term evaluation of active faults in the Chugoku region by the Headquarters for Earthquake Research Promotion Investigation Committee (2016). Gray circles show shallow inland earthquakes larger than magnitude 6 in Chugoku area listed in Utsu (1999) and the Japan Meteorological Agency (JMA) catalog. The 'beach balls' represent the centroid moment tensor solutions by JMA. Red lines show active faults based on the Research Group for Active Faults of Japan (1991). Triangles are active volcanos (Japan Meteorological Agency, 2013). Topography is based on Kishimoto (1999).

く評価するためには、その地震が発生する場所の正確な応力場が不可欠である(例えば、Ando *et al.*, 2017; Ohtani and Imanishi, 2019)。しかし現状では情報が不十分な地域も多く、その整備が急務の課題となっている。

このような背景のもと、産業技術総合研究所地質調査総合センターは、微小地震解析による応力場推定を中心に高い空間分解能を持つ地殻内応力マップの整備を進めており、最初のケーススタディとして関東地域の10 kmメッシュの応力マップを公表した(今西ほか, 2019)。小さな地震まで解析してデータを増やしたことで、先行研究よりも応力場の空間分解能を格段に高くすることができた。我々は次の対象として中国地域に場所を移し、応

力マップを整備することとした。調査範囲は中国地域の活断層の地域評価(地震調査研究推進本部 地震調査委員会, 2016)の対象領域(第1図の青線の内側)に合わせており、山口県、広島県、島根県、岡山県、鳥取県、及び瀬戸内海の一部の島嶼部を含んでいる。中国地域は日本列島の中でも歪み速度が比較的小さい地域であるが、日本海側で880年出雲の地震(M7.0)、1872年浜田地震(M7.1)、1943年鳥取地震(Mj7.2)、2000年鳥取県西部地震(Mj7.3)などのマグニチュード7級の地震が発生しており、最近でも2016年鳥取県中部地震(Mj6.6)などの被害地震が起きている(Mは被害状況等から推定された歴史地震のマグニチュード、Mjは気象庁マグニチュー



第2図 深さ25 km以浅の定常的地震活動(オレンジの丸; 2000年1月~2018年8月, マグニチュード0以上)と発震機構解が決まっている地震(青丸, 1997年10月~2018年8月). 気象庁一元化カタログによる.

Fig. 2 M0+ background seismicity shallower than 25 km based on the JMA catalog (orange circles: January 2000–August 2018) and earthquakes whose focal mechanism solutions are listed in the catalog (blue circles: October 1997–August 2018).

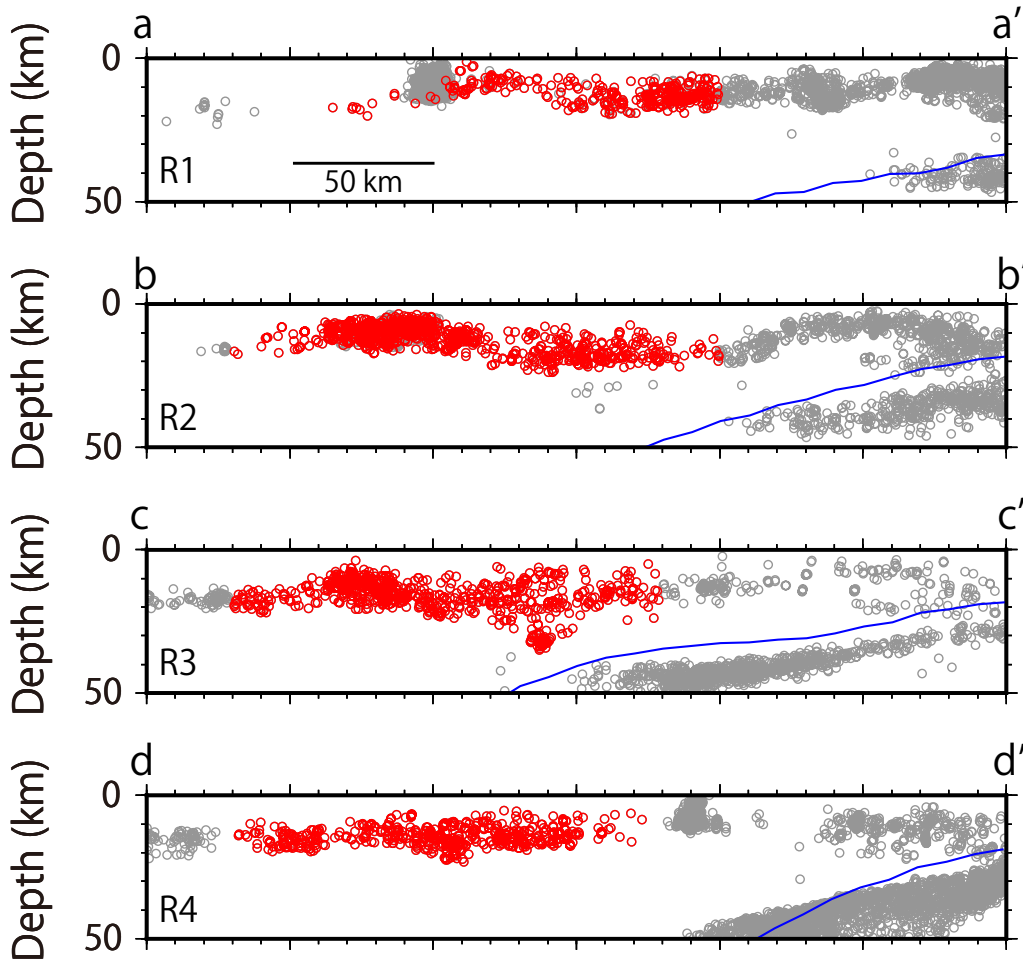
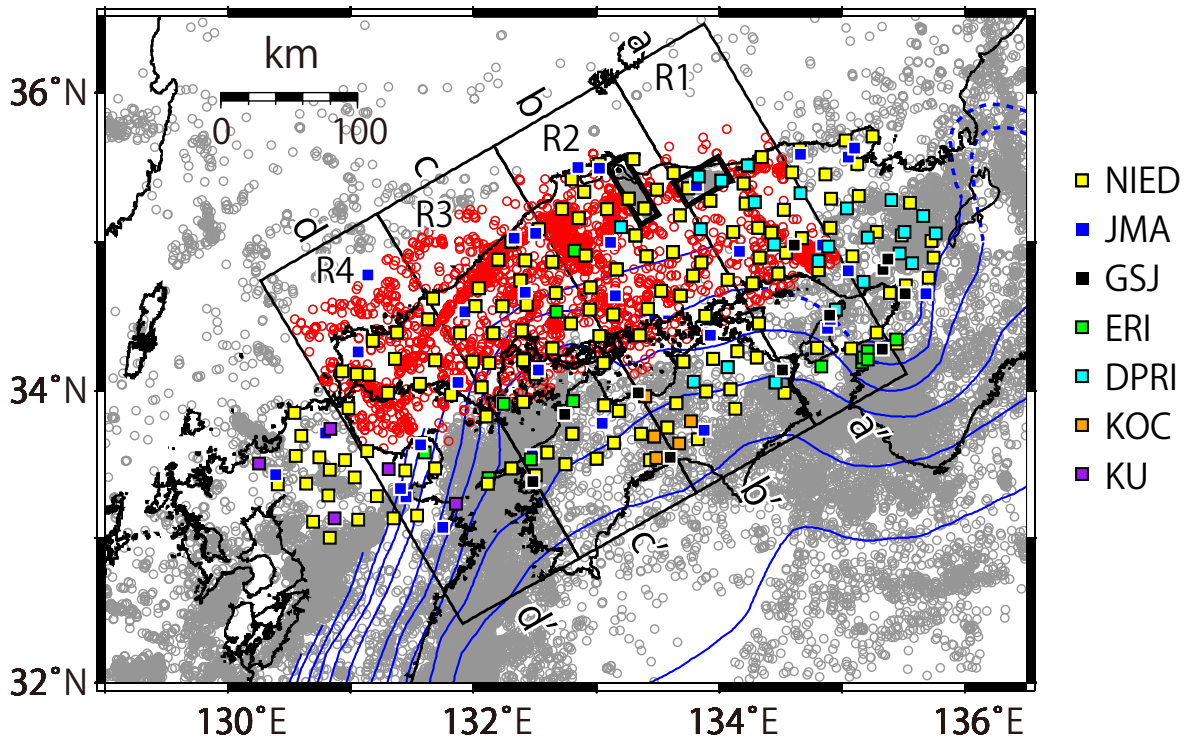
ド). また, 最近のデータを加えた全世界測位システム (Global Navigation Satellite System, GNSS) のデータ解析から, これら規模の大きい地震が発生している領域と重なるように歪み集中帯が存在することが報告されており (Nishimura and Takada, 2017), 現在注目されている地域でもある. 活断層はほとんどが横ずれ型であり, マグニチュード7を超えると予想される断層も多く分布している.

本研究では, 基盤的地震観測網のデータを用いてマグニチュード1.5以上の地震を解析し, 独自に発震機構解のカタログを作成する. さらに気象庁一元化カタログもコンパイルし, 今西ほか (2019) の手順に従い, 中国地域の10 kmメッシュの応力マップを作成する. 得られたマップは, この地域のテクトニクスの理解や将来の地震リスクを評価する上で重要な情報となる.

2. データ

第2図の青丸は1997年10月から2018年8月までの気象庁一元化カタログに含まれる深さ25 km以浅の地震のうち, 発震機構解が決まっている地震を示す. 2000年

鳥取県西部地震の余震域など一部の領域を除くと, 気象庁一元化カタログによる発震機構解が決まっていない場所が多いことがわかる. これは, 地震の規模が小さくなると, 一般的なP波初動を用いる方法では一意に解が決まりにくくなることに起因する. 気象庁の地震観測業務では, 検知能力に応じて地域毎に基準マグニチュードを設定し, その基準を超えた地震についてのみP波初動解を推定している. そのため陸域で発震機構解が決定されているのは, 概ねマグニチュード3.2以上に限られている (原田, 2004). そこで本研究では, 気象庁一元化カタログによる推定結果が不足している地域を中心に, 波形の振幅情報も加えて独自に発震機構解を推定することにした. 解析に使用する観測点は第3図の四角で示しており, 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 高感度地震観測網 (NIED Hi-net), 気象庁 (JMA), 東京大学地震研究所 (ERI), 京都大学防災研究所 (DPRI), 高知大学 (KOC), 九州大学 (KU), 産業技術総合研究所 (GSI) が管理する定常地震観測網が含まれる. それぞれの観測点には主に固有周波数1 Hzまたは2 Hzの高感度地震計が設置されており, 100 Hzサンプリングの連続記録が収録されてい



る。このうち、防災科学技術研究所と産業技術総合研究所の観測点にはボアホール型の地震計が設置されている (Okada *et al.*, 2004 ; Imanishi *et al.*, 2011b)。

解析対象とした地震の分布を第3図の赤丸で示す。一部の領域では解析効率を上げるため、半径0.5 km以内に他の地震が入らないように間引いた。間引く際にはマグニチュードの大きい地震を残した。解析データの期間とマグニチュードを第1表に示す。どの領域もマグニチュードの下限は1.5とした。本研究は陸側プレート (ユーラシアプレート、またはアムールプレート) の地殻内の地震を対象とするため、震源の深さは主に25 km以下である。領域3 (R3) の広島県東広島市の直下には深さ30 km前後にまとまった活動が見られるが、フィリピン海プレートの活動とは明らかに異なるため、解析対象に含めることにした。一方、2000年鳥取県西部地震の震源域 (領域2 (R2) の太枠) および2016年鳥取県中部地震の震源域 (領域1 (R1) の太枠) については、気象庁一元化カタ

(← p. 26)

第3図 解析対象の地震 (赤丸) および観測点分布 (四角)。黄: 防災科学技術研究所 (NIED), 青: 気象庁 (JMA), 黒: 産業技術総合研究所 (GSJ), 緑: 東京大学地震研究所 (ERI), 水色: 京都大学防災研究所 (DPRI), オレンジ: 高知大学 (KOC), 紫: 九州大学 (KU)。断面図を下に示す。各領域 (region) の地震情報は第1表を参照。灰色は2004年4月から2016年12月までのマグニチュード1.5以上の地震を示す。震源は気象庁一元化カタログによる。太線の長方形の枠内 (2000年鳥取県西部地震の震源域, 2016年鳥取県中部地震の震源域及びその周辺) の地震は解析対象から除外する。青線はフィリピン海スラブ上面の等深度線 (Baba *et al.*, 2002 ; Hirose *et al.*, 2008 ; Nakajima and Hasegawa, 2007)。

Fig. 3 Distributions of target earthquakes (red circles) and seismic stations (squares) used for the hypocenter and focal mechanism determination: yellow squares; National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED), blue squares; Japan Meteorological Agency (JMA), black squares; Geological Survey of Japan, AIST (GSJ); green squares; Earthquake Research Institute, University of Tokyo (ERI), light blue squares; Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University (DPRI); orange squares; Kochi University (KOC); purple squares; Kyushu University (KU). Vertical cross sections of the earthquake distribution along profiles are shown below. Refer to Table 1 for earthquake information of each region. Gray circles represent M1.5+ seismicity during the period from April 2004 to December 2016. Hypocenters are based on the JMA catalog. Earthquakes within bold rectangles (the source area of the 2000 western Tottori earthquake and the 2016 central Tottori earthquake) are excluded from the present analysis. The upper surfaces of the Philippine Sea slab (Baba *et al.*, 2002; Hirose *et al.*, 2008; Nakajima and Hasegawa, 2007) are shown by blue curves.

ログに十分な発震機構解が存在するため、解析対象から外した。また、震源決定及び発震機構解の推定精度を上げるため、気象庁が読み取り対象としていない観測点も含め、震央距離80 km以内で読み取りが可能な観測点全てのP波及びS波の到達時刻とP波初動極性を手動検出した。

3. 震源決定

震源決定に使用した速度構造を第2表に示す。これはWINシステム (<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/WIN/>) のデフォルトの速度構造であるが、東京大学地震研究所 広島地震観測所がルーチン処理で使用していた速度構造とほぼ同じであり、走時残差も小さかったことから、そのまま採用した。

実際の解析では、第3図の4つの領域毎に観測点補正值を用いた震源決定を行った。まず初めにHirata and Matsu'ura (1987) によるhypomhを用いて震源決定し、観測点毎に走時残差の平均値を計算して観測点補正值を求めた。次にこの観測点補正值を導入し、再度震源決定を行うという操作を複数回繰り返した。どの領域においても、繰り返し回数3回目以降は走時残差の二乗平均平方根 (RMS) 値の変化が見られなくなったことから、3回目の結果を最終の震源とした。RMS値の初期値と3回目の値を第3表に示す。Hirata and Matsu'ura (1987) の方法による最尤推定量の漸近的な分散共分散行列から見積られる推定誤差は平均して水平方向に140 m、鉛直方向に347 mである。震源決定結果を第4図の赤丸で示す。一般的な分布の傾向は気象庁一元化カタログの震源 (黒丸) と大きく変化しないが、沖合の震源がやや浅く求まる傾向がみられる。

4. 発震機構解の推定

本研究ではP波初動の押し引きデータに加えてP波とS波の振幅値 (変位スペクトルの低周波側のフラットレベル) も同時に使うことで、より多くの地震の発震機構解を推定することを試みた。本研究で扱う推定法はこれまでも多くの微小地震に適用されており、その有効性が示されている (例えば、Imanishi *et al.*, 2011a ; 今西ほか, 2013 ; Matsushita and Imanishi, 2015)。解析手法の詳細は今西ほか (2013) を参照されたい。実際の解析においてはP波初動の押し引きデータが10個以上ある地震に対して上記手法を適用した。解の品質はVariance Reduction (観測振幅値と理論振幅値の2乗残差を観測振幅値の2乗で正規化した量を100%から減じた量) とP波初動極性の一致度により判断した。本研究では、Variance Reductionが50%以上、P波初動極性の一致度が80%以上の場合を高品質の解と定義し、合計で2988イベントが高品質と判断された。

高品質の発震機構解の空間分布を第5図に示す。発

第1表 本研究で解析した地震の詳細

Table 1 Details of the earthquakes analyzed in the present study

Region	Period	Number	Magnitude
R1	April 6, 2004 – December 31, 2016	323	1.5 – 4.0
R2	April 5, 2004 – December 15, 2016	1487	1.5 – 5.4
R3	April 20, 2004 – December 22, 2016	772	1.5 – 4.0
R4	April 7, 2004 – December 24, 2016	595	1.5 – 4.2

第2表 震源と発震機構解の決定に用いたP波速度構造モデル。S波速度はP波速度の $1/\sqrt{3}$ と仮定。

Table 2 P-wave velocity structure model used for the determination of hypocenters and focal mechanisms. The S-wave velocity is assumed by scaling the P-wave velocity by a factor of $1/\sqrt{3}$.

Layer	h (km)	V_p (km/s)
1	0.0	5.5
2	4.0	6.1
3	14.6	6.7
4	31.5	8.0

第3表 P波およびS波の走時残差の二乗平均平方根(RMS値)の変化

Table 3 Changes in the root mean square (RMS) value of P- and S-wave travel-time residuals

Region	RMS value of P-wave (s)		RMS value of S-wave (s)	
	Initial	Final	Initial	Final
R1	0.09	0.06	0.26	0.13
R2	0.10	0.06	0.28	0.14
R3	0.08	0.07	0.24	0.16
R4	0.11	0.07	0.25	0.17

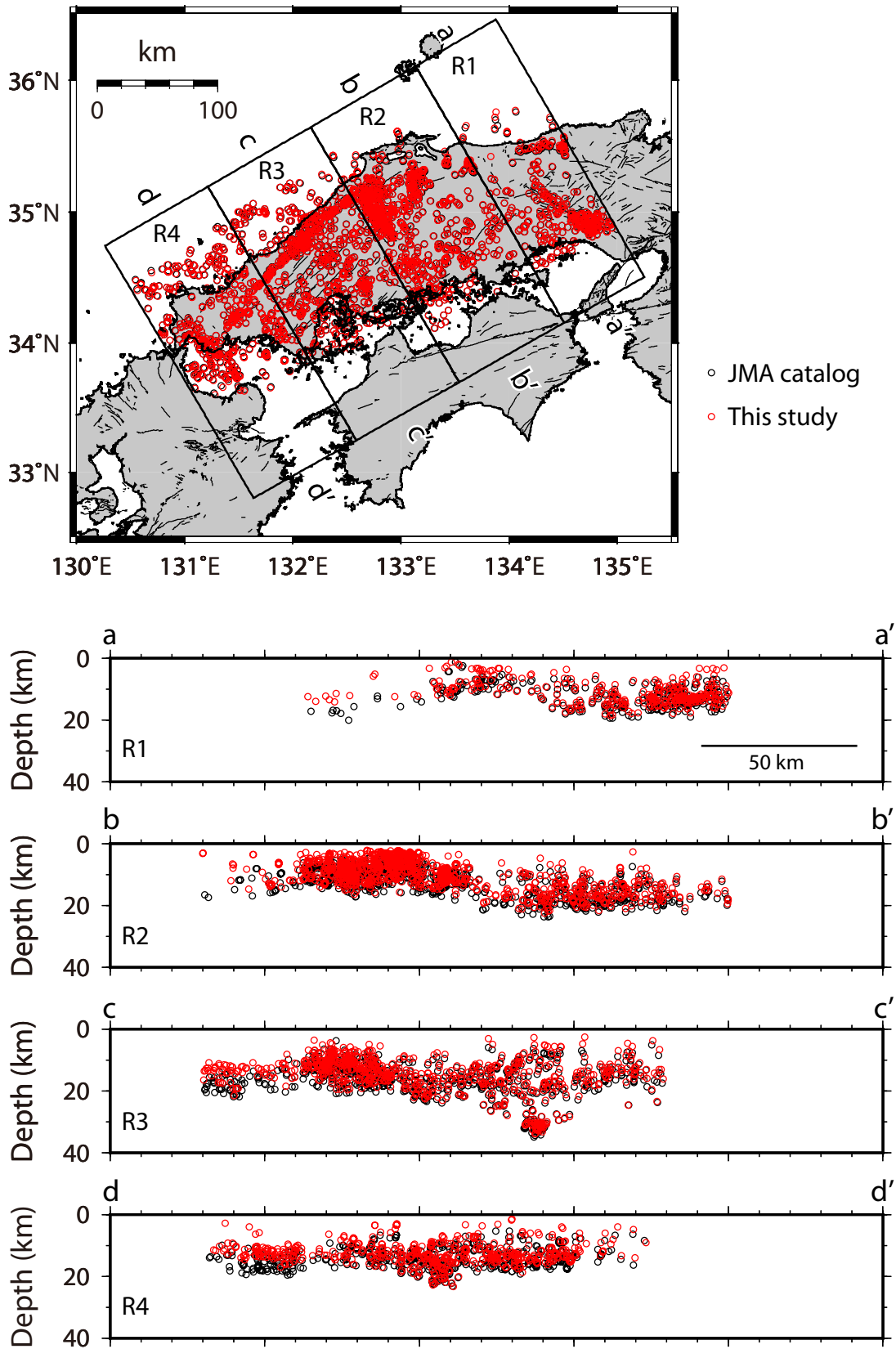
震機構解のタイプを視覚的に判断しやすくするためにFrohlich (1992)の三角ダイアグラムを使い、逆断層成分、正断層成分、横ずれ成分のそれぞれの比率に応じてビーチボールに色を付けている。Frohlich (1992)に従い断層タイプを定義すると、逆断層型が217イベント、横ずれ型が1792イベント、正断層型が57イベントとなった。いずれのタイプにも属さなかった地震は922イベントであるが、横ずれ成分に卓越する地震が多い。

次に応力方位を概観するために、P軸とT軸の方位分布を見てみる。本研究で推定した高品質の発震機構解2988イベントに加えて、気象庁一元化カタログに含まれる2000年鳥取県西部地震の震源域の109イベント、2016年鳥取県中部地震の震源域の38イベント、本研究の解析対象期間外(1997年10月1日～2014年3月31日及び、2017

年1月1日～2018年8月31日)で深さ25 km以浅の80イベント(合計227イベント)も表示対象とした。第6図にP軸とT軸の方位分布を示す。ただし、水平面内に近い軸を持つ解のみを比較するため、プレンジ角が15度以下のもののみを表示している(全発震機構解のうち、P軸は51%、T軸は57%)。P軸は東西から西北西-東南東、T軸は南北から北北東-南南西方向に卓越していることが確認できる。

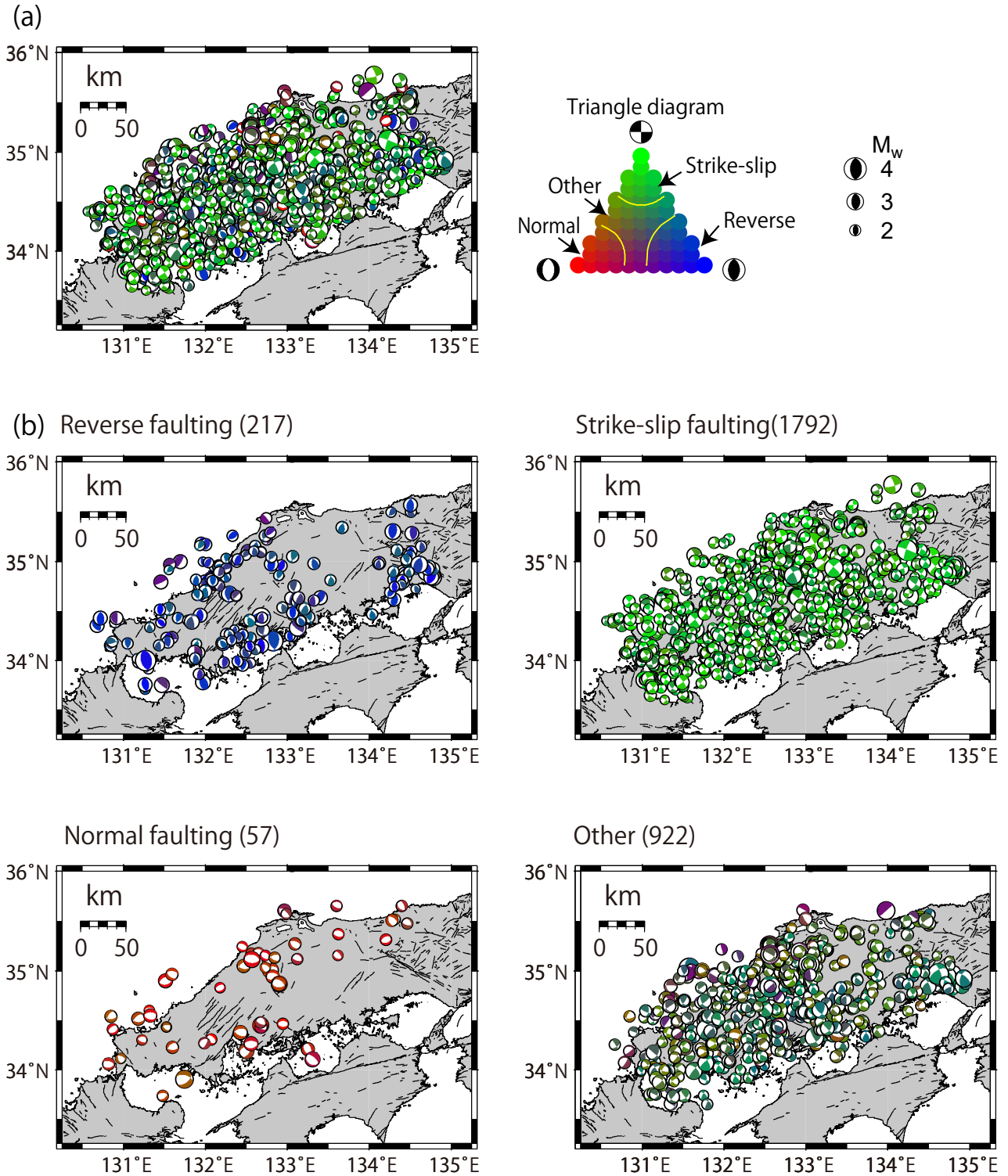
5. 地殻内応力マップの作成

応力マップの作成にあたって、本研究で推定した高品質の発震機構解2988イベント、気象庁一元化カタログに含まれる227イベントの合計3215イベントを使用する。第7図にこの発震機構解から推定された水平面方



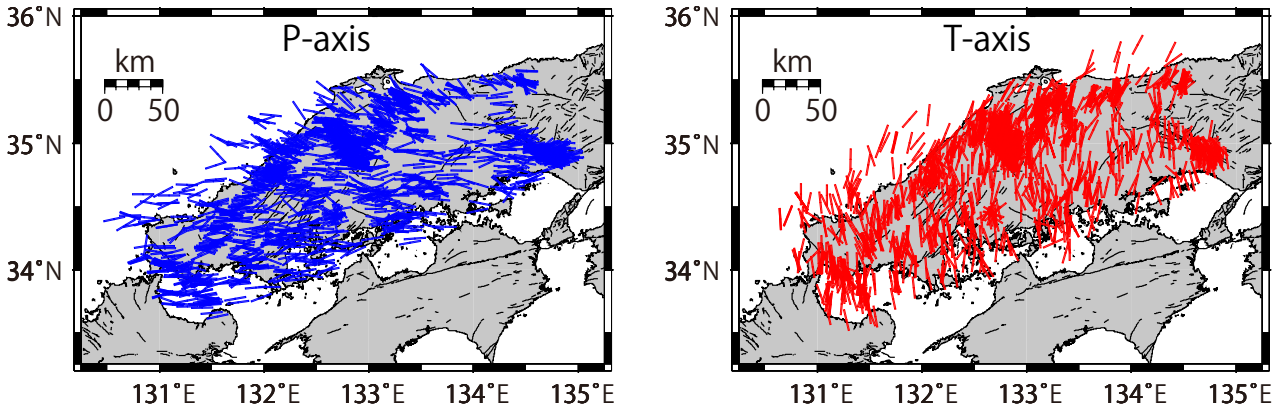
第4図 震源決定結果(赤丸). 黒丸は気象庁一元化カタログによる震源.

Fig. 4 Hypocenter distributions determined in the present study (red circles). Black circles indicate hypocenters of the JMA catalog.



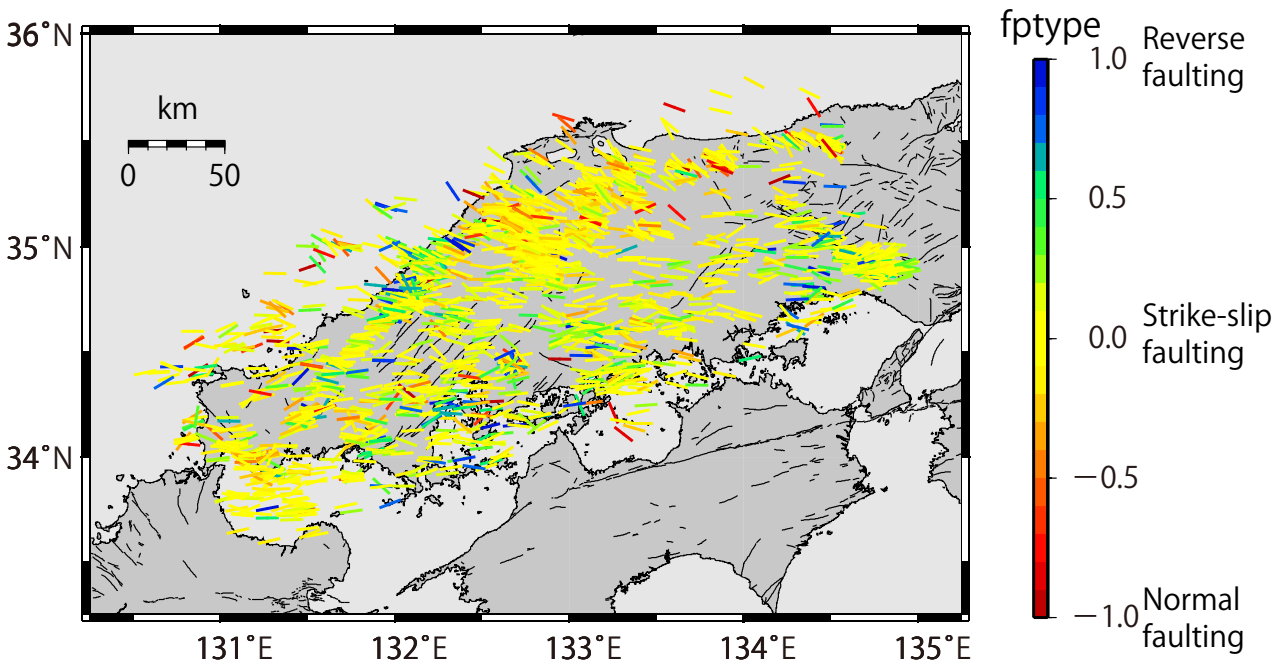
第5図 (a) 本研究で推定された発震機構解の空間分布(等積投影の下半球投影)。逆断層成分, 横ずれ成分, 正断層成分それぞれの強さの比率に応じてビーチボールを色分けしている。Frohlich (1992)の三角ダイアグラムをカラー表示したものを右上に示す。(b) それぞれの断層タイプの空間分布。括弧内の数字はそれぞれの断層タイプに属する地震の個数を示す。

Fig. 5 (a) Spatial distribution of focal mechanism solutions determined in the present study (lower hemisphere of an equal-area projection), where different colors are used to differentiate reverse- (blue), strike-slip- (green), and normal- (red) faulting mechanisms. A triangle diagram (Frohlich, 1992) with a color scale is presented in the upper right. (b) Distributions of focal mechanisms for each faulting mechanism. The number within each set of parentheses indicates the number of events for that faulting mechanism.



第6図 P軸およびT軸の空間分布. プランジ角が15°以下の地震のみ示す.

Fig.6 P- and T-axis distributions of focal mechanism solutions, the plunge angles of which are less than 15°.



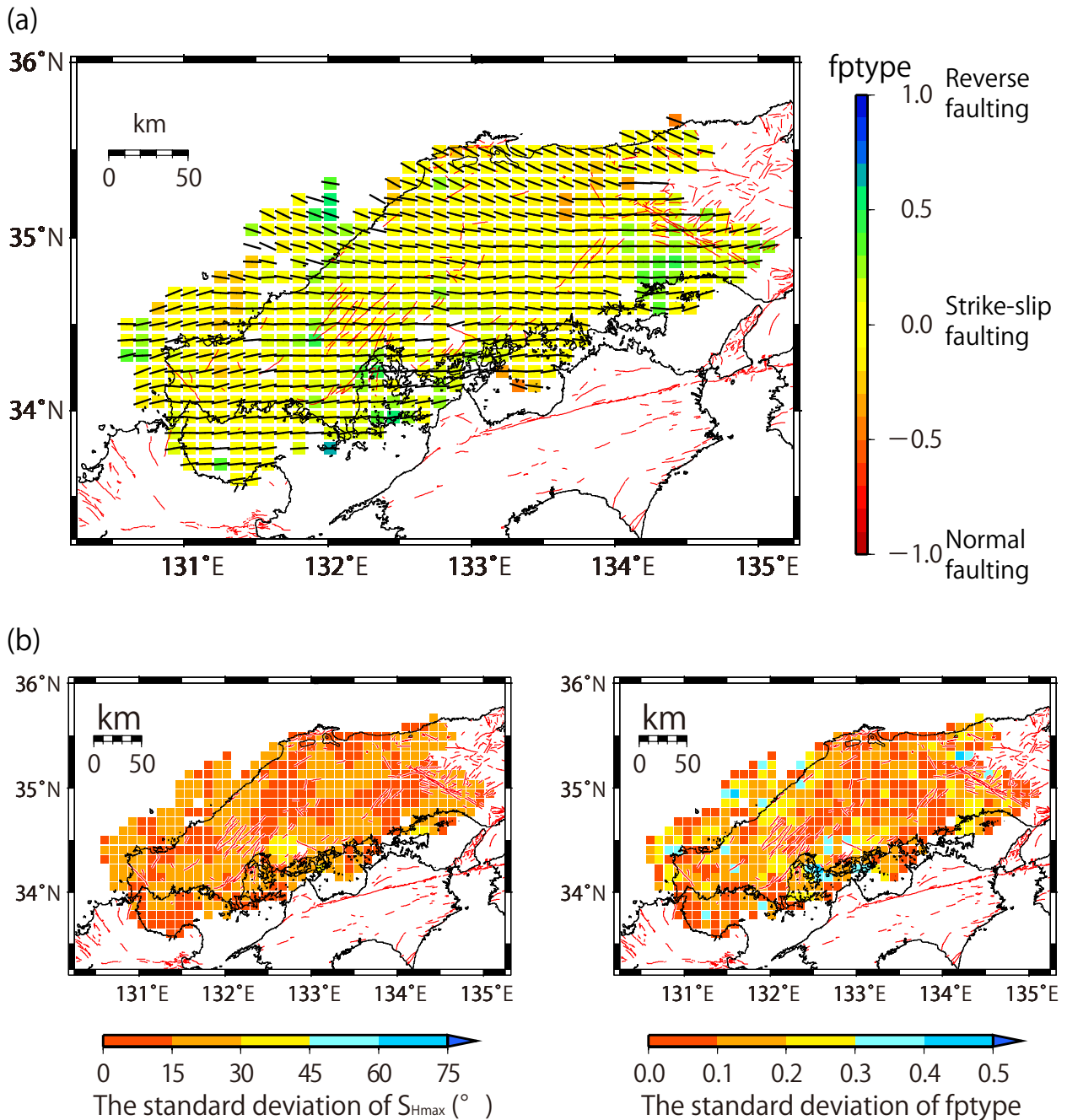
第7図 発震機構解から推定された S_{Hmax} 方位と応力場のタイプ. S_{Hmax} 方位はZoback (1992), 応力場のタイプはShearer *et al.* (2006)の定義に従う. 応力場のタイプはカラー表示している. 本研究で推定した発震機構解に加えて, 気象庁一元化カタログのデータもコンパイルしている.

Fig. 7 S_{Hmax} direction and type of stress field. The S_{Hmax} direction is based on the definition of Zoback (1992). The type of stress field is determined by Shearer *et al.* (2006) and is represented by color. Focal mechanisms listed in the JMA catalog is also compiled.

向に作用する最大圧縮応力方位 (S_{Hmax}) と応力場のタイプ (fptype) を示す. S_{Hmax} 方位はZoback (1992), fptypeはShearer *et al.* (2006)の定義に従っている. S_{Hmax} 方位は東西方向から西北西-東南東に卓越し, fptypeはゼロ付近の横ずれ場が卓越している. 詳細に見ると, 応力方位, 応力場のタイプともに地域性を持っている様子が伺える.

次に第7図の応力情報をもとに, 今西ほか(2019)の手順に従い, 10 kmメッシュの応力マップを作成する. 深

さ方向の応力場の変化はそれほど顕著に見られなかったことから, 空間方向にのみメッシュを設定した. メッシュを中心とした半径15 km以内にある地震が5イベント以上ある場合, S_{Hmax} とfptypeの平均を求め, そのメッシュの応力情報とする. 平均の際には今西ほか(2019)と同様にメッシュからの距離に応じたウェイトを与え, 重み付き平均を計算する. このようにして得られた応力マップを第8図aに, S_{Hmax} とfptypeの標準偏差を第8図bに

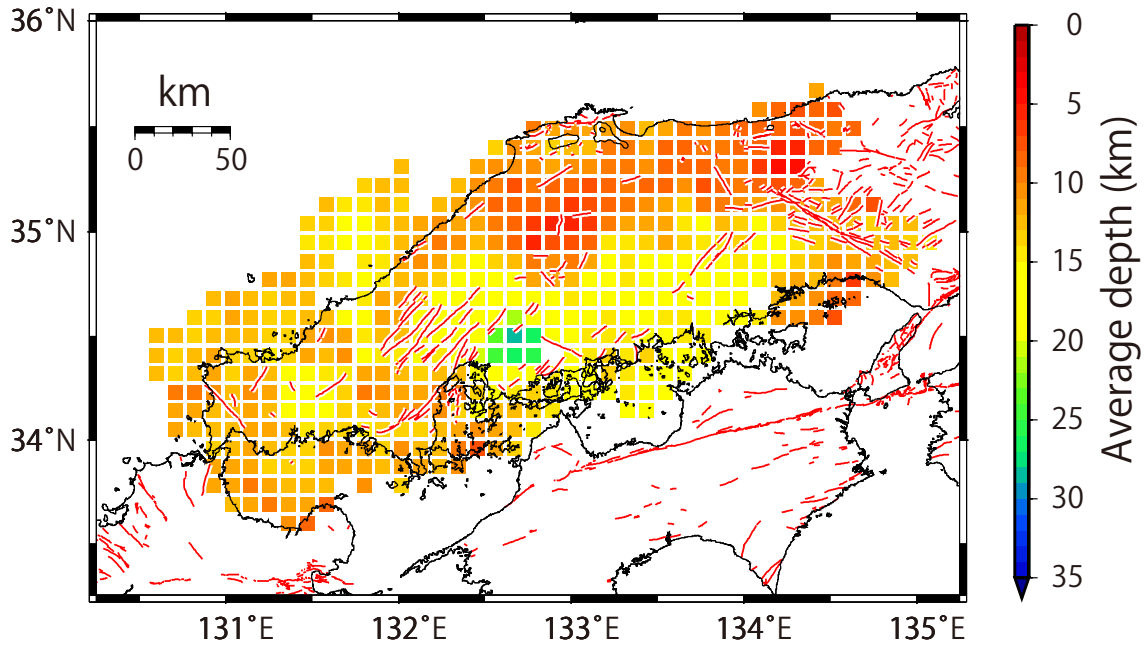


第8図 (a) 本研究で推定した中国地域の応力マップ。 S_{Hmax} 方位を直線で、応力場のタイプ (fptype) を背景のカラーで示す。 (b) S_{Hmax} および fptype の標準偏差。

Fig. 8 (a) Stress map in the Chugoku region determined in the present study. The S_{Hmax} orientation is indicated by a straight line, and the type of stress field is shown by the background color. (b) Standard deviation of S_{Hmax} and fptype.

示す。 S_{Hmax} の標準偏差で 45° を超えるメッシュは存在せず、ほとんどが 30° 以下に収まっている。 fptype の標準偏差は所々で大きい値を示すメッシュがあるが、大半が 0.3 以下に収まっている。このことから、この地域の応力場は 10 km の空間スケール内ではほぼ均一と見なして良いと判断できる。第9図は各メッシュの応力場推定に使用した地震の深さの平均値を示す。 D_{90} (その深さ以下に

90% 以上の地震が起こる深さ) の分布からも指摘されているように (Omuralieva *et al.*, 2012), 東経 $132.5^\circ \sim 134.5^\circ$, 北緯 35° 以南の領域は深めの地震が多い傾向がある。中でも北緯 34.5° , 東経 132.7° 付近を中心とする領域は特に深く、第4図の領域3 (R3) で確認できるように、局所的に 25 km から 35 km の深さにまとまった地震活動が起こっている (前述の東広島市直下の活動に対応)。第8



第9図 各メッシュの応力場を計算する際に使用した地震の平均深さ。

Fig. 9 Average depth of earthquakes used to compute the stress field of each mesh.

図bを見ると、この活動が起こっているメッシュは S_{Hmax} の標準偏差が大きく、また f_{type} の標準偏差も大きい傾向があり、応力場の不均一性が高い領域となっている。Nakajima and Uchida (2018)が関東地域で見つけた活動との類似性から、フィリピン海プレート境界から排出された水の上昇に伴う誘発地震活動の可能性もある。この地域の地震発生様式を検討する上で非常に重要な活動であるが、その実態に迫ることは本論文の目的を超えている。今後、地震活動の特性や地下深部構造の特徴も合わせて議論した上で、別の論文として報告する予定である。

第8図aを概観すると、この地域の応力場の特徴が確認できる。例えば、(1)概ね東西圧縮の横ずれ場で特徴づけられること (Huzita, 1980)、(2)島根県・鳥取県の日本海側では S_{Hmax} 方位が西北西-東南東方向を示すようになること (Kawanishi *et al.*, 2009)、(3)島根県の沖合や瀬戸内海の一部の領域に逆断層成分を含む場が存在すること (Terakawa and Matsu'ura, 2010)、などが挙げられる。データ数が増え、10 kmメッシュのマップとすることにより、これらの特徴がより確実に言ったと言える。

6. 議論

6.1 先行研究の応力マップとの比較

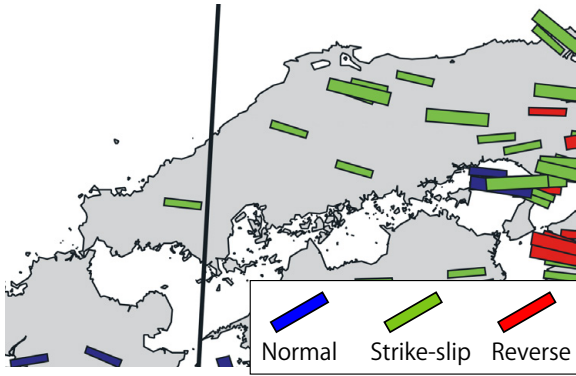
第10図a-dに代表的な4つの応力マップ (Townend and Zoback, 2006; Terakawa and Matsu'ura, 2010; Yukutake *et al.*, 2015; Saito *et al.*, 2018)を示す。比較のために本研究の結果を第10図fに示すが、第8図aと異なり、応力場のタイプに依存して S_{Hmax} 方位を示す直線に色を付けている。

研究毎に応力場の表現の仕方や色使いが異なるが、概ね東西圧縮の横ずれ場で特徴づけられること、島根県・鳥取県の日本海側で S_{Hmax} 方位が西北西-東南東方向を示すようになることなど、大局的な特徴は調和的であることがわかる。島根県の沖合や瀬戸内海の一部の領域に逆断層成分を含む場が存在している特徴はTerakawa and Matsu'ura (2010)で確認できる。また、一見して明らかのように、応力場の空間分解能は本研究が一番高い。これは、小さな地震の解析を行ったことで発震機構解のデータが増えたことに起因する。

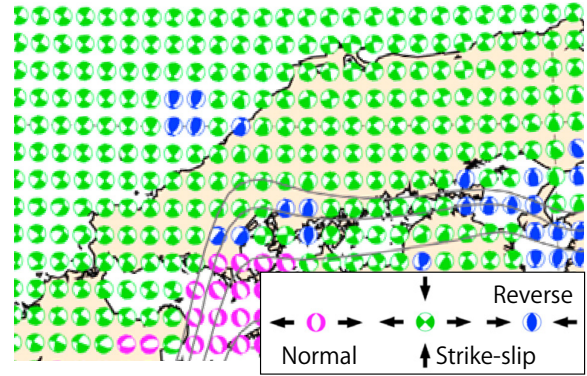
6.2 現在進行中の地殻変動との比較

関東地域や南カリフォルニアなどでは、地殻変動データから推定される圧縮歪みの方位と応力マップで示される S_{Hmax} 方位に類似性があることが報告されている (今西ほか, 2019; Yang and Hauksson, 2013)。このことは、地震データが少ない地域など、応力マップの空白域を埋める上で歪み速度の空間分布が重要な情報になり得ることを示唆している。そこで、同様の類似性が中国地域においても成り立つのかについて確認する。第10図eはGNSSにより推定された水平歪み速度を示す (国土地理院, 2011)。地震や余効変動の影響の少ない時期を選んで作成した図であるため、定常時の水平歪み速度を示していると見なせる。中国地域における水平歪み速度はフィリピン海プレートの沈み込みの影響を受けて北北西-南南東から南北方向の圧縮歪みを示しており、 S_{Hmax} 方位と広い範囲で一致していない。つまりこの地域では、地殻変

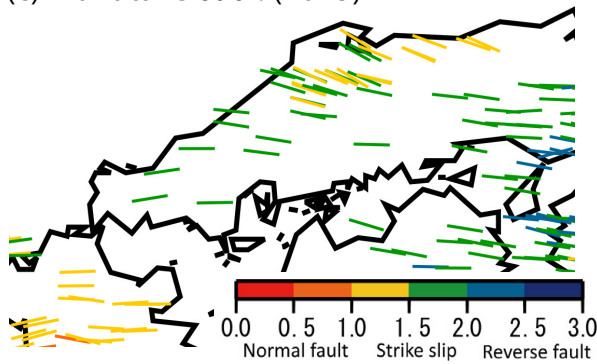
(a) Townend and Zoback (2006)



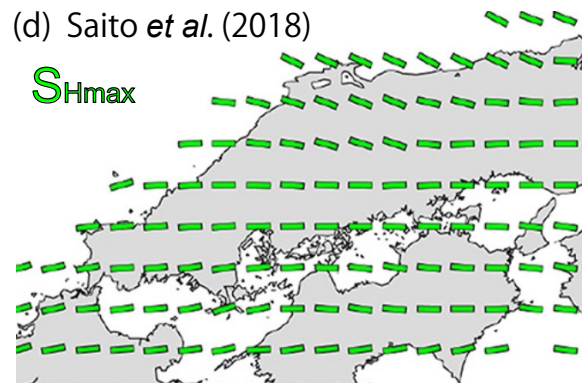
(b) Terakawa and Matsu'ura (2010)



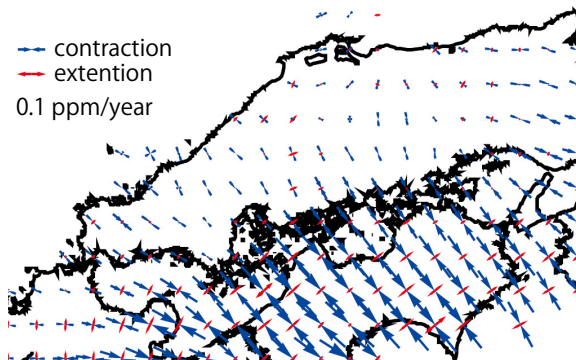
(c) Yukutake *et al.* (2015)



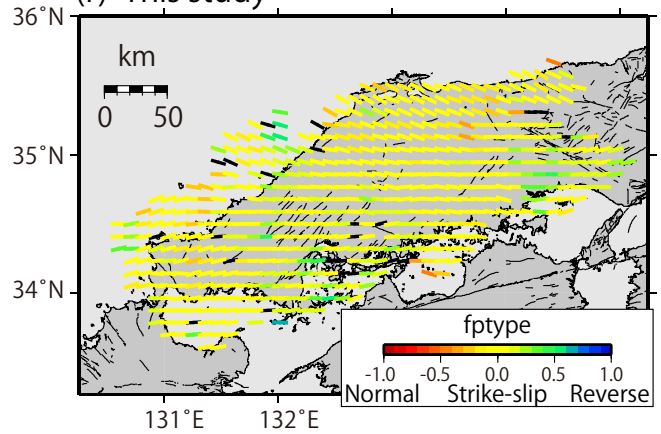
(d) Saito *et al.* (2018)



(e) GSI (2011)



(f) This study



第10図 本研究の応力マップと先行研究の比較. (a) Townend and Zoback (2006). (b) Terakawa and Matsu'ura (2010). (c) Yukutake *et al.* (2015). (d) Saito *et al.* (2018). (e) GNSSにより推定された水平歪み速度 (国土地理院, 2011). 基準期間は1999年1月1日~1999年1月15日, 比較期間は2000年1月1日~2000年1月15日. (f) 本研究. 第8a図と異なり, 応力場のタイプに依存して S_{Hmax} 方位を示す直線に色を付けている. 応力場のタイプが決められないメッシュ (f_{ptype} の標準偏差が0.3を超える場合)の S_{Hmax} 方位は黒の直線で示す.

Fig. 10 Stress map determined in the present study and those of previous studies: (a) Townend and Zoback (2006), (b) Terakawa and Matsu'ura (2010), (c) Yukutake *et al.* (2015), (d) Saito *et al.* (2018), (e) Horizontal strain rate derived from continuous GNSS measurements (Geospatial Information Authority of Japan, 2011). The reference period is from January 1 to January 15, 1999. The analyzed period is from January 1 to January 15, 2000. (f) Stress map determined in the present study. Unlike Fig. 8a, the line of S_{Hmax} orientation is colored depending on the type of stress field. Black lines show the S_{Hmax} orientation of the mesh at which the standard deviation of f_{ptype} exceeds 0.3.

動データは応力マップの情報源になり得ないことになる。

では、なぜ両者は一致しないのであろうか。それは、地殻変動データから推定される歪み速度と応力マップで示される応力は異なる時間スケールの現象を反映していることが大きな要因であろう(Wang, 2000)。西南日本の応力場が東西圧縮に卓越している理由については様々な議論がされてきたが、アムールプレートの東進による圧縮、あるいはフォッサマグナにおける東北日本と西南日本の衝突に伴う圧縮に起因するというモデルが一般に受け入れられている(例えば、Huzita, 1980; 石橋, 1995; 瀬野, 1995)。どちらのモデルが妥当であるのかは本論文の目的を超えるため深入りはしないが、いずれの場合も数百万年にわたり圧縮され続けてきた結果、強い東西圧縮場が形成されたと考えられる。一方、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う圧縮応力は100~200年ほどの周期で発生する南海トラフの大地震の度に解放されるため、長期的には蓄積されず、応力場に反映されにくいものと考えられる。

6.3 中国地域の応力区分

ほぼ同じ応力状態に支配されている地域は応力区(Zoback and Zoback, 1980)と呼ばれる。今西ほか(2019)は関東地域の応力マップから、関東地域は数十kmスケールの大小様々な形状の応力区から構成されていることを報告している。中国地域の応力マップ(第8図a)を見ると、島根県・鳥取県の日本海側の領域(応力区A、西北西-東南東方向の S_{Hmax})とそれ以外の領域(応力区B、ほぼ東西方向の S_{Hmax})の2つの応力区に区分できる。第11図aに境界の位置を示す。応力場のタイプに着目すると、逆断層成分を含む複数の応力区を定義することも可能である。しかし、応力方位の変化ほど明瞭ではないため、本論文ではさらに細分化することも可能であることを言及するに留めておく。

応力区Bの S_{Hmax} 方位に対して応力区Aの S_{Hmax} 方位は、時計回りに約20°回転している。このような応力方位の時計回りの回転が生じるメカニズムとして、下部地殻で右横ずれの非地震性すべり(もしくは変形)が生じているとするモデルが提案されている(Kawanishi *et al.*, 2009)。下部地殻の非地震性すべりまたは変形が上部地殻に応力集中を引き起こし、時計回りに応力軸が回転することが数値計算で示されている。またGNSSデータの分析により、応力区Aの領域に右横ずれを示す歪み集中帯が存在することが最近明らかにされている(Nishimura and Takada, 2017)。この歪み集中は、下部地殻において約5mm/年の右横ずれの相対運動が生じていれば説明できることが報告されている。この断層帯深部のすべり(または変形)は内陸地震の応力载荷機構としても注目されており(Iio *et al.*, 2002; Kenner and Segall, 2000)、定量的なモデルに進化させる上で中国地域は重要なテストフィー

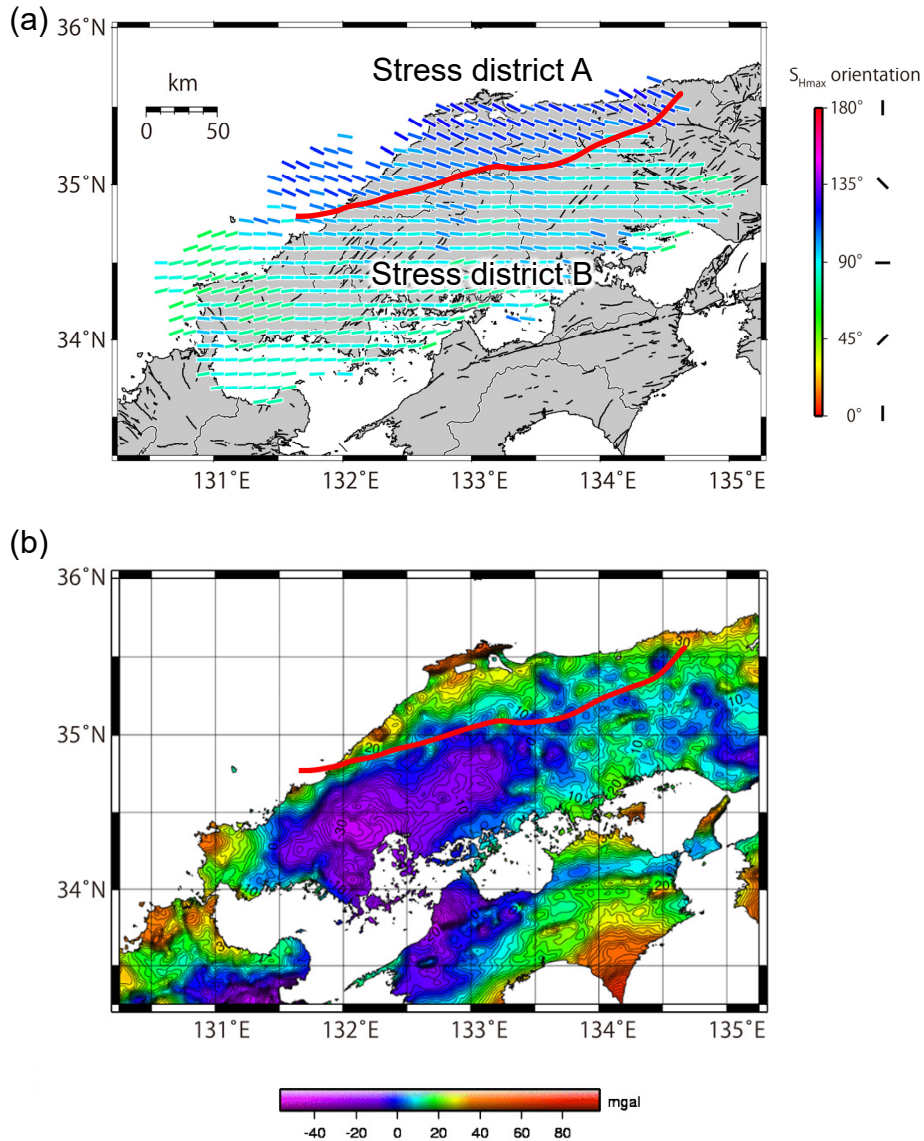
ルドになるであろう。

応力方位が変化する要因として、本論文では別の可能性についても言及したい。第11図bに産業技術総合研究所の重力データベース(GALILEO)で作成したブーゲー異常図を示す。応力区Aと高ブーゲー異常域が良く対応しており、応力区Aの下に高密度の岩体が分布していることが示唆される。塩田ほか(2002)は約9,500点の重力測定データを用いて、中国・四国地域の3次元密度構造を推定した。彼らの3次元密度構造の北西端がわずかに応力区Aと重なっており、地震発生層下部(深さ13km以深)に周囲よりも高密度の分布がイメージされている。以下では同様の高密度異常が応力区A全体に分布するものと考えて議論を進める。Sonder(1990)は一方向に密度異常帯が延びている場合、密度異常帯の上部には、その走向に直交する方向に σ' 、鉛直方向に $-\sigma'$ の偏差応力が作り出されることを示した(本論文では圧縮を正と仮定)。高密度異常の岩体が分布している場合は負の浮力が働き、密度異常帯の上部には圧縮力が作り出される。一方、低密度異常の岩体が分布している場合には正の浮力が働き、引張力が作り出される。Sonder(1990)はさらに、外部応力場にこの局所的な応力が重なることで、密度異常帯周辺の応力方位がどう変化するかを解析的に解いた。密度異常帯の走向と外部応力場の S_{Hmax} 方位の間の角度を θ 、 S_{Hmax} 方位と密度異常帯周辺の応力方位 S_H の間の角度を γ 、外部応力場の水平差応力を ΔS とすると、以下の関係式が成り立つ(幾何学的な関係を第12図の右下に示す)。

$$\tan 2\gamma = \sin 2\theta / (k - \cos 2\theta) \quad (1)$$

$$k = \Delta S / \sigma^L$$

第12図は正の k (つまり σ^L が圧縮力)に対して(1)式をプロットしたものである。密度異常帯に対してどのような方位から S_{Hmax} が掛かっているかに依存して、応力方位が時計回りに回転するか反時計回りに回転するかが決まることがわかる。図には示さないが、 k が負の時(σ^L が引張力の時)は第2及び第4象限にプロットされる。本研究の場合、 θ が約15°、 γ が約20°であるので、この2つの角度が満たされるためには、応力比 k が約1.5であると見積もられる(第12図の星印)。言い換えると、応力区Aの下に高密度の岩体が分布し、周囲からほぼ東西方向の S_{Hmax} 、約1.5 σ^L の大きさの水平差応力が掛かっているならば、応力区Aの応力方位が時計回りに約20°回転することを説明できる。Sonder(1990)のモデルは、応力方位の空間変化と地下構造の情報から絶対応力レベルを見積もることに活用できる。応力区A全域を含む3次元密度構造を明らかにした上で σ^L を見積もれば、 ΔS の推定が可能となる。この推定値は当該地域における地震発生のモデル化において重要な情報となる。



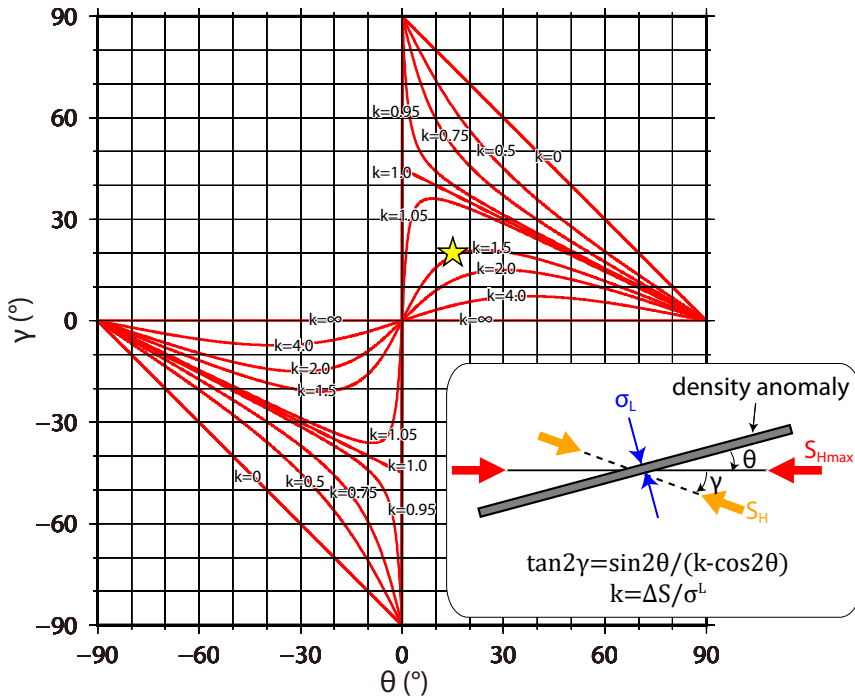
第11図 (a) S_{Hmax} 方位と中国地域の応力区. S_{Hmax} 方位を示す直線は方位角に応じて色付けされている. 赤線は応力区Aと応力区Bの境界を示す. (b) 假定密度2.67 g/cm³によるブーゲー異常図. 重力データベース (GALILEO) (https://gbank.gsj.jp/gravdb/index_En.php 閲覧日:2020年5月28日)により作成. 赤線は(a)と同様.

Fig. 11 (a) S_{Hmax} orientation and stress province in Chugoku region. The line of S_{Hmax} orientation is colored depending on the azimuth. A red curve corresponds to a boundary between stress province A and B. (b) Bouguer anomaly map computed for an assumed density of 2.67 g/cm³ by Gravity Database (GALILEO) (https://gbank.gsj.jp/gravdb/index_En.php, Accessed:2020-5-28). The red line is the same as in (a).

6.4 活断層との関係

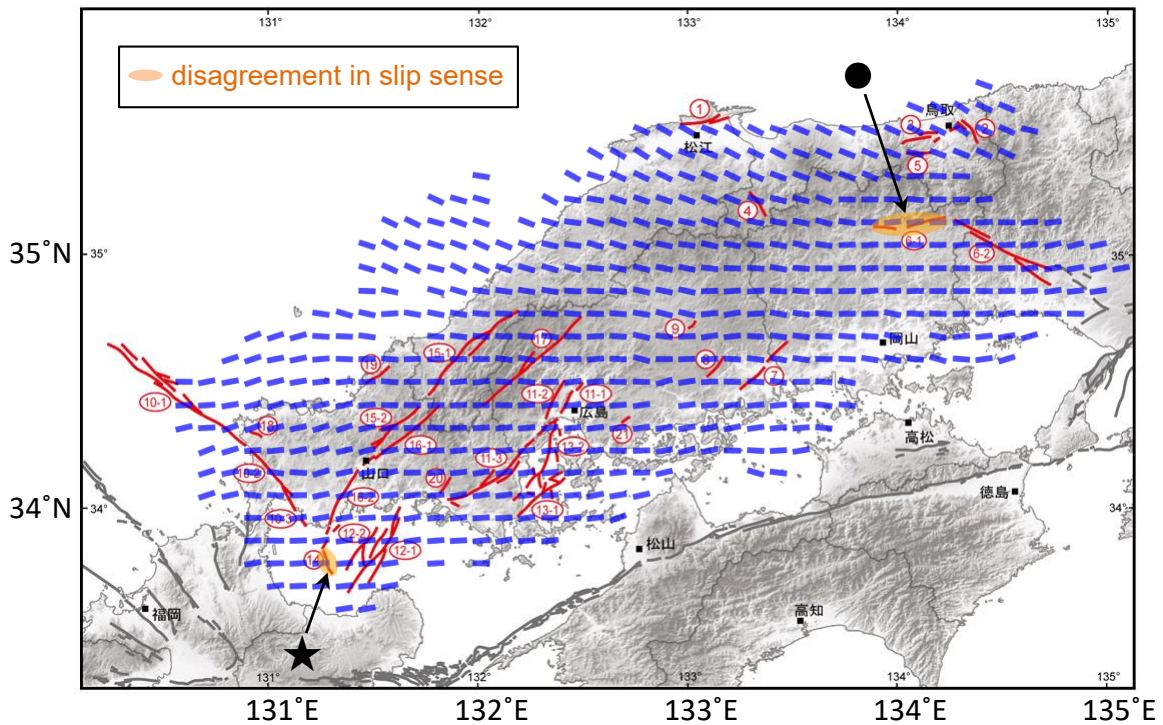
地震調査研究推進本部 地震調査委員会(2016)が評価対象とした中国地域の活断層は、那岐山断層帯を除き、全て横ずれを主体とするほぼ鉛直の断層である。横ずれ断層の場合、断層の走向と S_{Hmax} の間の角度(α)を調べることで、その断層が現在の応力場のもとで再活動できるかどうかを判断できる。第13図は地震調査研究推進本部 地震調査委員会(2016)が評価対象とした活断層に本研究で推定した S_{Hmax} を重ねて表示したものである。北北西-

南南東もしくは北西-南東に延びる活断層は左横ずれとして、東西もしくは北東-南西に延びる活断層は右横ずれとして動くことが直感的にわかる。前述の那岐山断層帯(第13図の丸)に関しては、断層変位地形から、北側が南側に対して相対的に隆起する断層であると推定されている。断層の走向と S_{Hmax} がほぼ平行であり、現在の応力場で縦ずれを起こすことは困難である。この断層が動くとなると、南東に位置する山崎断層帯主部の活動による応力擾乱によりトリガーされる、あるいは異常間隙水



第12図 (1)式から計算される密度異常帯周辺の応力方位の回転角(γ). θ は圧縮力(σ^L)を作り出す密度異常帯の走向と S_{Hmax} 方位の間の角度を示す. k は σ^L に対する水平差応力(ΔS)の比. 黄色の星は中国地域の観測から決められる θ と γ . 幾何学的な関係を右下に示す.

Fig. 12 Rotation of regional horizontal stresses (γ) as a function of θ , the angle between the strike of the density anomaly producing the horizontal uniaxial compression (σ^L) and the regional S_{Hmax} orientation, computed from equation (1). k is the ratio of horizontal differential stress (ΔS) relative to σ^L . An yellow star represents the angles of θ and γ determined from observation in Chugoku region. Inset shows geometry and defines angles.



第13図 地震調査研究推進本部 地震調査委員会(2016)で評価対象とされた活断層(赤線)の分布図にプロットした S_{Hmax} 方位(青線). オレンジで囲った断層は断層変位地形から推定される運動センスと応力場から推定される運動センスが一致しない活断層を示す. 基図は地震調査研究推進本部 地震調査委員会(2016)の図2(閲覧日:2020年6月5日参照).

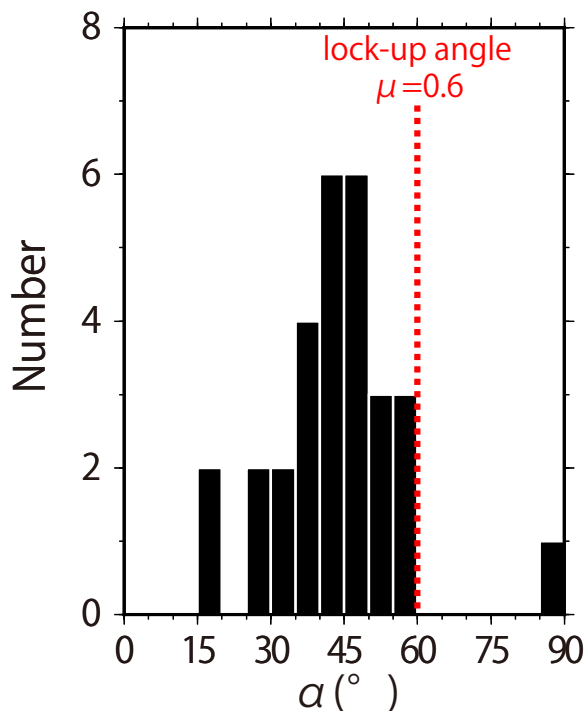
Fig. 13 S_{Hmax} orientation (blue lines) plotted on a distribution of active faults (red lines) evaluated by the Headquarters for Earthquake Research Promotion (2016). The active faults surrounded by orange indicate active faults whose slip sense estimated from the fault displacement topography is in disagreement with that estimated by the stress field. The base map is Fig. 2 by the Headquarters for Earthquake Research Promotion (2016) (Accessed:2020-06-05).

圧が発生する等の外的要因が必要と予想される。

より定量的に検討するため、第14図に那岐山断層帯を除いた29の活断層に対する α のヒストグラムを示す。ここで活断層の走向は地震調査研究推進本部 地震調査委員会(2016)より、 S_{Hmax} は該当する活断層周辺のメッシュの方位を抜き出して平均したものを採用した(メッシュの数は活断層の長さに応じて2~13個)。ある摩擦係数のもとで断層が再活動できる α の値には上限値があり、lock-up角と呼ばれている(Scholz, 2002)。一般的な摩擦係数0.6の場合、lock-up角は 60° である。1つの断層(宇部南方沖断層、第13図の星)を除き 60° 未満に収まっており、一般的な摩擦係数のもとで再活動し得ることがわかる。 α がlock-up角を超える宇部南方沖断層が動くためには、摩擦係数が非常に小さいか、間隙水圧が非常に高いかのいずれかの条件が必要である。しかし仮にこの条件が満たされたとしても、断層の走向と S_{Hmax} 方位との関係から期待される運動センスは左横ずれであり、断層変位地形から推定されている右横ずれと一致しない。前述の那岐山断層帯と同様に、この断層が動くためには、北に位置する小郡断層の活動による応力擾乱によりトリガーされる等の外的要因が必要と予想される。以上をまとめると、地震調査研究推進本部 地震調査委員会(2016)が評価対象とした中国地域の30の活断層のうち、第13図のオレンジで囲った2つの活断層(那岐山断層帯、宇部南方沖断層)を除き、現在の応力場、一般的な摩擦係数のもとで再活動する条件を満たしている。

7. 結論

本研究では独自に求めた2988イベントの発震機構解カタログに加えて、気象庁一元化カタログをコンパイルし、合計3215イベントの発震機構解から中国地域の10 kmメッシュの応力マップを作成した。小さな地震まで解析して発震機構解データを増やしたことで、先行研究よりも応力場の空間分解能が格段に高くなった。その結果、この地域は東西圧縮の横ずれ場に卓越しているが、島根県・鳥取県の日本海側になると応力方位が時計回りに約 20° 回転して西北西-東南東方向を示すようになる様子が詳しくわかるようになった。この特徴は先行研究からも指摘されていたが、本研究により応力方位が変化する境界を特定することができ、中国地域は主に2つの応力区からなることを示した。応力方位が変化する原因については、下部地殻における非地震性変形のほか、地震発生層深部の高重力異常帯に引き起こされる負の浮力による応力擾乱にある可能性を示した。最後に、推定した応力マップをもとに活断層の活動性について評価を行った。地震調査研究推進本部 地震調査委員会(2016)が評価対象とした中国地域の30の活断層のうち、28の活断層は現在の応力場、一般的な摩擦係数のもとで再活動する条件を満たしていることがわかった。一方、残り



第14図 中国地域の活断層の走向と S_{Hmax} 方位との角度(α)のヒストグラム。赤の点線は摩擦係数が0.6の場合のlock-up角。

Fig. 14 Histogram of the angle between fault strike and S_{Hmax} orientation (α) for active faults in Chugoku region. Dotted red line shows the lock-up angle for a friction coefficient of 0.6.

2つの活断層は現在の応力場のもとでは再活動しにくく、異常間隙水圧が発生するか、隣接する活断層の破壊にトリガーされるなど、外的要因が不可欠と考えられる。現在の地震調査研究推進本部の活断層の長期評価には応力情報が考慮されていないが、応力情報を加味することで、切迫性の高い活断層や再活動しにくい活断層の絞り込みが可能になるなど、活断層の長期評価の確度を高めていくことに繋がるであろう。

謝辞：本研究では気象庁カタログを使用し、波形解析においては産業技術総合研究所のデータに加え、防災科学技術研究所 Hi-net (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2019)、気象庁、東京大学地震研究所、京都大学防災研究所、高知大学、九州大学のデータを利用しました。発震機構解の推定では東京大学の井出 哲教授のプログラムを参考にさせていただきました。査読においては産業技術総合研究所地質調査総合センターの雷 興林博士から有益な意見を頂き、本稿の改善に大きく役立ちました。図はGeneric Mapping Tools (Wessel and Smith, 1998)で作成しました。なお、本研究は産業技術総合研究所地質調査総合センターによる戦略

的課題推進費「日本列島の応力マップ整備の加速化と不均一造構造場の成因の解明」(平成30年度)の補助を受けて実施しました。ここに記して感謝いたします。

文 献

- Ando, R., Imanishi, K., Panayotopoulos, Y. and Kobayashi, T. (2017) Dynamic rupture propagation on geometrically complex fault with along-strike variation of fault maturity: insights from the 2014 Northern Nagano earthquake. *Earth, Planets and Space*, **69**, 130, 1–13.
- Baba, T., Tanioka, Y., Cummins, P. R. and Uhira, K. (2002) The slip distribution of the 1946 Nankai earthquake estimated from tsunami inversion using a new plate model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **132**, 59–73.
- Frohlich, C. (1992) Triangle diagrams: ternary graphs to display similarity and diversity of earthquake focal mechanism. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **75**, 193–198.
- 原田智史(2004) 最近の地震観測の精度 ~気象庁における地震観測業務~. 地震予知連絡会会報, **71**, 780–786.
- Heidbach, O., Rajabi, M., Cui, X., Fuchs, K., Müller, B., Reinecker, J., Reiter, K., Tingay, M., Wenzel, F., Xie, F., Ziegler, M. O., Zoback, M. L. and Zoback, M. D. (2018) The World Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales. *Tectonophysics*, **744**, 484–498.
- Hirata, N. and Matsu'ura, M. (1987) Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **47**, 50–61.
- Hirose, F., Nakajima, J. and Hasegawa, A. (2008) Three-dimensional seismic velocity structure and configuration of the Philippine Sea slab in southwestern Japan estimated by double-difference tomography. *Journal of Geophysical Research*, **113**, B09315, 1–26.
- Huzita, K. (1980) Role of the Median Tectonic Line in the Quaternary tectonics of the Japanese islands. *Memoris of the Geological Society of Japan*, **18**, 129–153.
- Iio, Y., Sagiya, T., Kobayashi, Y. and Shiozaki, I. (2002) Water-weakened lower crust and its role in the concentrated deformation in the Japanese Islands. *Earth and Planetary Science Letters*, **203**, 245–253.
- Imanishi, K., Kuwahara, Y., Takeda, T., Mizuno, T., Ito, H., Ito, K., Wada, H. and Haryu, Y. (2011a) Depth-dependent stress field in and around the Atotsugawa fault, central Japan, deduced from microearthquake focal mechanisms: Evidence for localized aseismic deformation in the downward extension of the fault. *Journal of Geophysical Research*, **116**, B01305, 1–12.
- Imanishi, K., Takeda, N., Kuwahara, Y. and Koizumi, N. (2011b) Enhanced detection capability of non-volcanic tremor using a 3-level vertical seismic array network, VA-net, in southwest Japan. *Geophysical Research Letters*, **38**, L20305, 1–5.
- 今西和俊・武田直人・桑原保人(2013) 2011年東北地方太平洋沖地震の発生後に活発化した霞ヶ浦南端直下の正断層型地震活動. 地震2, **66**, 47–66.
- 今西和俊・内出崇彦・大谷真紀子・松下レイケン・中井未里(2019) 関東地域の地殻内応力マップの作成. 地質調査研究報告, **70**, 273–298.
- 石橋克彦(1995) 「アムールプレート東縁変動帯」における1995年兵庫県南部地震と広域地震活動(予報). 地質ニュース, no. 490, 14–21.
- 活断層研究会(1991) 新編「日本の活断層一分布と資料一」. 東京大学出版会, 東京, 437p.
- Kawanishi, R., Iio, Y., Yukutake, Y., Shibutani, T. and Katao, H. (2009) Local stress concentration in the seismic belt along the Japan Sea coast inferred from precise focal mechanisms: Implications for the stress accumulation process on intraplate earthquake faults. *Journal of Geophysical Research*, **114**, B01309, 1–14.
- Kenner, S. J. and Segall, P. (2000) A mechanical model for intraplate earthquakes: Application to the New Madrid seismic zone. *Science*, **289**, 2329–2332.
- 岸本清行(1999) 海陸を合わせた日本周辺のメッシュ地形データの作成: Japan250m.grd. 地質調査所研究資料集(GSJ Open-File Report), no. 353.
- 気象庁(2013) 日本活火山総覧(第4版), 気象業務支援センター.
- 国土地理院(2011) 日本全国の地殻変動. 地震予知連絡会会報, **86**, 8–21.
- Lund Snee, J. and Zoback, M. D. (2020) Multiscale variations of the crustal stress field throughout North America. *Nature Communications*, **11**, 1951.
- Matsushita, R. and Imanishi, K. (2015) Stress fields in and around metropolitan Osaka, Japan, deduced from microearthquake focal mechanisms. *Tectonophysics*, **642**, 46–57.
- Nakajima, J. and Hasegawa, A. (2007) Subduction of the Philippine Sea plate beneath southwestern Japan: Slab geometry and its relationship to arc magmatism. *Journal of Geophysical Research*, **112**, B08306, 1–18.
- Nakajima, J. and Uchida, N. (2018) Repeated drainage from megathrusts during episodic slow slip. *Nature Geoscience*, **11**, 351–356.
- National Research Institute for Earth Science and Disaster

- Resilience (2019) NIED Hi-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, doi:10.17598/NIED.0003.
- Nishimura, T. and Takada, Y. (2017) San-in shear zone in southwest Japan, revealed by GNSS observations. *Earth, Planets and Space*, **69**, 85, 1–6.
- Ohtani, M. and Imanishi, K. (2019) Seismic potential around the 2018 Hokkaido Eastern Iwate earthquake assessed considering the viscoelastic relaxation. *Earth, Planets and Space*, **71**:57, 1–15.
- Okada, Y., Kasahara, K., Hori, S., Obara, K., Sekiguchi, S., Fujiwara, H. and Yamamoto, A. (2004) Recent progress of seismic observation networks in Japan—K-NET and KiK-net-. *Earth, Planets and Space*, **56**, xv–xxviii.
- Omuralieva, A. M., Hasegawa, A., Matsuzawa, T., Nakajima, J. and Okada, T. (2012) Lateral variation of the cutoff depth of shallow earthquakes beneath the Japan Islands and its implications for seismogenesis. *Tectonophysics*, **518–519**, 93–105.
- Saito, T., Noda, A., Yoshida, K. and Tanaka, S. (2018) Shear strain energy change caused by the interplate coupling along the Nankai Trough: An integration analysis using stress tensor inversion and slip-deficit inversion. *Journal of Geophysical Research*, **123**, 5975–5986.
- Scholz, C. H. (2002) *The Mechanics of Earthquakes and Faulting* (2nd Edition). Cambridge University Press, 504p.
- 瀬野徹三 (1995) 東北—中部—西南日本の広域応力場. *地震* **2**, **48**, 539–546.
- Shearer, P. M., Prieto, G. A. and Hauksson, E. (2006) Comprehensive analysis of earthquake source spectra in southern California. *Journal of Geophysical Research*, **111**, B06303, 1–21.
- Sonder, L. J. (1990) Effects of density contrasts on the orientation of stresses in the lithosphere: Relation to principal stress directions in the Transverse Ranges, California. *Tectonics*, **9**, 761–771.
- 塩田昭夫・大野一郎・志知龍一・村上英記・小室裕明 (2002) 中国・四国地域の重力異常と3次元密度構造. *測地学会誌*, **48**, 243–257.
- Terakawa, T. and Matsu'ura, M. (2010) The 3-D tectonic stress fields in and around Japan inverted from centroid moment tensor data of seismic events. *Tectonics*, **29**, TC6008, 1–14.
- Townend, J. and Zoback, M. D. (2006) Stress, strain, and mountain building in central Japan. *Journal of Geophysical Research*, **111**, B03411, 1–11.
- 宇津徳治 (1999) 地震活動総説. 東京大学出版会, 東京, 896p.
- Wang, K. (2000) Stress-strain 'paradox', plate coupling, and forearc seismicity at the Cascadia and Nankai subduction zones. *Tectonophysics*, **319**, 321–338.
- Wessel, P. and Smith, W. H. F. (1998) New, improved version of the Generic Mapping Tools released. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, **79**, 579.
- Yang, W. and Hauksson, E. (2013) The tectonic crustal stress field and style of faulting along the Pacific North America Plate boundary in Southern California. *Geophysical Journal International*, **194**, 100–117.
- Yukutake, Y., Takeda, T. and Yoshida, A. (2015) The applicability of frictional reactivation theory to active faults in Japan based on slip tendency analysis. *Earth and Planetary Science Letters*, **411**, 188–198.
- 地震調査研究推進本部 地震調査委員会 (2016) 中国地域の活断層の長期評価 (第一版), https://www.jishin.go.jp/main/chousa/16jul_chi_chugoku/chu_honbun.pdf. (閲覧日: 2020年6月5日)
- Zoback, M. L. and Zoback, M. (1980) State of stress in the conterminous United States. *Journal of Geophysical Research*, **85**, 6113–6156.
- Zoback, M. L. (1992) First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project. *Journal of Geophysical Research*, **97**, 11,703–11,728.

(受付: 2020年7月14日; 受理: 2020年11月12日)