

### 3. 2 速度構造不均質を考慮した精密震源決定

#### (1) 業務の内容

(a) 業務題目 速度構造不均質を考慮した精密震源決定

(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	研究グループ長	今西 和俊
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

(c) 業務の目的

近年観測された余震等を精密に再決定し、不均質を考慮した三次元地震波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) 3ヵ年の年次実施業務の要約

1) 平成 29 年度：

糸魚川－静岡構造線断層帯における地震波速度構造モデルの先行研究をレビューし、当該地域で震源決定を行うに際して適切な速度構造モデルの検討を行った。また、当初計画には入っていなかったが、2017 年 12 月 6 日に長野県中部で発生した地震 ( $M_j5.3$ ) とその余震に関して震源決定とメカニズム解推定を行い、松本盆地東縁断層帯の深部における活動である可能性を示した。

2) 平成 30 年度：

平成 29 年度の検討結果を踏まえた速度構造モデルを用い、2018 年 5 月 12 日に長野県北部で発生した地震 ( $M_j5.2$ ) とその余震に関して震源決定とメカニズム解を求め、断層形状と応力場を推定した。また既存カタログから牛伏寺断層直下の断層形状について考察を行った。

3) 平成 31 年度：

地震活動の下限が走向に伴って変化する原因について文献調査を行い、断層モデルの下限深度の設定について検討する。

#### (2) 平成 30 年度の成果

(a) 業務の要約

2018 年 5 月 12 日に長野県北部で発生した地震 ( $M_j5.2$ ) とその余震に関して震源決定とメカニズム解推定を行い、断層形状と応力場を推定した。震源決定およびメカニズム解推定の際には、平成 29 年度の検討結果を踏まえた速度構造モデルを用いた。また、高精度に推定された既存カタログをもとに、牛伏寺断層直下の断層形状について考察を行った。当初最終年度に予定していた

糸魚川－静岡構造線全域における応力場推定は、別プロジェクトによる研究が進み、1年前倒しで完了した。

## (b) 業務の成果

### 1) 2018年5月12日に発生した長野県北部の地震 ( $M_j5.2$ ) の解析

2018年5月12日の10時29分、長野県北部で深さ11kmを震源とする $M_j5.2$ の地震が発生した。この地震は2014年長野県北部の地震 ( $M_j6.7$ ) の余震域の南部で発生した地震であり、地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2015) の区分けに従うと、糸魚川－静岡構造線の北部区間に該当する (図1)。また、図2に気象庁によるP波初動解 (<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/mech/ini/fig/mc20180512102930.html>, 2019年3月15日確認)、CMT解 (<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/mech/cmt/fig/cmt20180512102930.html>, 2019年3月15日確認)、防災科学技術研究所のF-net解 ([http://www.fnet.bosai.go.jp/event/tdmt.php?\\_id=20180512012800&LANG=ja](http://www.fnet.bosai.go.jp/event/tdmt.php?_id=20180512012800&LANG=ja), 2019年3月15日確認)、本報告による推定解 (後述) を示す。いずれもやや横ずれ成分を含む逆断層型の解である。メカニズム解の一つの節面は南北に近い走向を持ち、直近の神城断層の地表トレースの走向と調和的である。以下では震源決定、メカニズム解推定、応力場推定を行った結果について報告する。

#### ・震源決定

解析には、本震の震央から概ね50km以内にある防災科学技術研究所のHi-net、気象庁、東京大学地震研究所の観測点の地震波形データを使用した (図3(a))。本震の波形例を図4に示す。解析対象とする地震として、2018年5月12日から2018年8月31日までに発生し、気象庁一元化震源カタログに含まれる20km以浅、マグニチュード0.5以上の106個を選んだ。これらの地震の震央を図3の緑の丸で示す。昨年度の検討を踏まえ、震源決定においては2つの一次元速度構造 (図3(b)) を仮定した。各観測点においてどちらの速度構造を適用するかについては、全観測点について同じ速度構造を使用して震源決定したときの走時残差やPanayotopoulos et al. (2014) の浅部構造を参考にして決定した。P波・S波の走時とP波初動極性は、WINシステム (ト部・東田, 1992) を用いて全て手動検出した。

震源決定はhypomh (Hirata and Matsu'ura, 1987) による震源決定と観測点補正值の決定を逐次的に行い、走時残差のRMS値の変化が見られなくなった3回目の結果を最終解とした。最終的な走時残差のRMS値は、P波は0.15秒から0.05秒へ、S波は0.28秒から0.14秒へ減少した。推定誤差は平均して水平方向に103m、鉛直方向に152mと見積もられる。この時の震源決定の結果を図5の赤丸で示す。気象庁一元化震源 (黒丸) と比較すると、震源がより集中するようになる。また、速度構造の不均質を考慮した結果、震央分布が全体にやや東に移動する傾向がみられる (図5(a))。断面図を見ると、気象庁一元化震源では不明瞭であったが、 $70^\circ$  で東傾斜する面状分布が確認できる (図5(b))。この面状分布の走向と傾斜角は気象庁、防災科研、本報告によるメカニズム解 (後述) の傾斜角 (図2) と基本的に調和的である。活断層の地表トレースは図5(b)の $x=-4\text{km}$ あたりに位置する。地表トレースとの位置関係から、断層形状は傾斜が浅部で緩くなると推定される (図5(b)の青の点線)。

図6に2014年長野県北部の地震 ( $M_j$ 6.7) の余震分布 (Imanishi and Uchide, 2017) と本報告で推定した2018年の活動の震源分布を比較する。2014年の解析では、図3(b)と同じ速度構造を用いている。2018年の活動は断面fに含まれており、その分布は2014年の地震の余震分布と調和的である。2018年の地震は、2014年の地震の時に壊れ残した場所で発生したと推定される。

#### ・メカニズム解推定

今西ほか (2013) に従い、P波初動の押し引きデータに加えてP波とS波の振幅値も同時に使い、メカニズム解を決定した。震源決定した地震のうち、P波初動の押し引きデータが15個以上ある地震に対して上記手法を適用し、最終的に84個のメカニズム解を推定した。推定できた最小の地震は  $M_j$  0.5 であり、メカニズム解と同時に推定されるモーメントマグニチュードは1.3となった。図7に推定されたメカニズム解の空間分布を示す。本震のメカニズム解については図2にも示している。Flohlich (1992) の定義に従うと、ほとんどの地震が逆断層成分と横ずれ成分の両方を持つタイプの地震である。図8(a)に全ての地震のP軸、B軸、T軸を下半球投影(等積投影)で、図8(b)にP軸とT軸の方位分布を地図上に示す。概ね北西-南東圧縮で特徴づけられる。

#### ・応力場推定

本報告で推定したメカニズム解に Michael (1984, 1987) の応力テンソルインバージョン法を適用し、応力場の推定を行った。図9に推定結果を示す。最大主応力  $\sigma_1$  はほぼ水平面内に作用し、北西-南東方向を示す。中間主応力  $\sigma_2$  と最小主応力  $\sigma_3$  はいずれも鉛直、水平面からずれている。これは、この地域が逆断層と横ずれの共存する場であることを意味している。最適解に対するミスフィット角(最適解から計算されるせん断応力方向とメカニズム解のすべり方向の間の角度)のヒストグラムを図9(b)に示す。ミスフィット角の平均値は  $2.7^\circ$  であり、対象領域は均一の応力場で説明できることがわかる (Michael, 1991)。最適解の応力比  $\phi$  は0.5と推定された。

## 2) 既存地震カタログによる牛伏寺断層の断層形状の考察

2002年10月に牛伏寺断層でまとまった地震活動があった(気象庁, 2002)。最大マグニチュードは2.8である。図10(a)に気象庁一元化カタログの震源分布を示すが、牛伏寺断層の直下で鉛直方向に分布している特徴が確認できる。活断層としての牛伏寺断層の断層面は、この地震活動や牛伏寺断層の運動センスが左横ずれであることを考慮し、高角傾斜の断層であると推定されている(地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2015)。Yano et al. (2017) は hypoDD (Waldhauser and Ellsworth, 2000) を使い、高精度な震源カタログを作成した。このカタログには2002年10月の活動も含まれており、その分布を図10(b)に示す。気象庁一元化カタログに比べると鉛直方向の分布が目立たなくなるものの、それでも鉛直な分布を示すことに変わりはない。精度の高い震源分布からも、この地震活動は牛伏寺断層の高角な断層面に沿った活動であると考えられる。

図11に地震活動から地下の断層形状を拘束できた場所を示す。2014年長野県北部の地震の余震分布 (Imanishi and Uchide, 2017)、2017年12月の長野県中部の地震の余震分布 (文部科学省研究開発局・国立研究開発法人産業技術総合研究所, 2018)、2018年5月の長野県北部の地震の余震分布 (本報告)、さらには前述の既存カタログからの考察した2002年10月の地震活動の余

震分布である。

(d) 結論ならびに今後の課題

昨年度の検討結果を踏まえた速度構造モデルを用い、2018年5月12日に発生した長野県北部の地震 ( $M_j5.2$ ) の震源決定とメカニズム解決定を行った。余震分布は約 $70^\circ$ の高角東傾斜を示し、2014年長野県北部の地震の余震分布の傾向と調和的であった。2018年の地震は、2014年の地震で壊れ残した場所で発生したと予想される。活断層の地表トレースとの位置関係から、傾斜角は浅部で緩くなると推定される。本震、余震のメカニズム解から推定される応力場は北西-南東圧縮の横ずれ成分を含む逆断層場を示す。牛伏寺断層に関しては、既存カタログから断層形状を考察した。この断層直下では2002年10月に特徴的な地震活動が発生しており、hypoDDを用いた精密震源結果からも活断層としての牛伏寺断層は、高角傾斜であることが支持された。

断層モデルの設定においては、断層の下限を何kmにするかも重要である。それには定常的に発生している地震活動の下限深さが鍵となるため、次年度では地震活動の下限が走向に伴って変化する原因について文献調査を行う予定である。

謝辞：気象庁一元化震源カタログを使用させて頂きました。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, 1998) で作成しました。

(e) 引用文献

Flohlich, C., Triangle diagrams: ternary graphs to display similarity and diversity of earthquake focal mechanism, *Phys. Earth Planet. Interiors*, 75, 193-198, 1992.

Hirata, N. and M. Matsu'ura, Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 47, 50-61, 1987.

Imanishi, K. and T. Uchide, Non-self-similar source property for microforeshocks of the 2014  $M_w$  6.2 Northern Nagano, central Japan, earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 5401-5410, doi:10.1002/2017GL073018, 2017.

今西和俊・武田直人・桑原保人, 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, DOI:10.4294/zisin.66.47, 2013.

今西和俊・内出崇彦・大谷真紀子・松下レイケン・中井未里, 関東地域の地殻内応力マップの作成, 地質調査研究報告, 2019 (受理).

地震調査研究推進本部地震調査委員会, 糸魚川-静岡構造線断層帯の長期評価 (第2版), 2015, [https://www.jishin.go.jp/main/chousa/15apr\\_chi\\_kanto/ka\\_21.pdf](https://www.jishin.go.jp/main/chousa/15apr_chi_kanto/ka_21.pdf) (2018年3月14日確認).

気象庁, 平成14年10月地震・火山月報 (防災編), 57p, 2002, <https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/gaikyo/monthly/200210/monthly200210.pdf>,

(2019年3月15日確認) .

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, 68p, 2002.

Michael, A. J., Determination of stress from slip data: faults and folds, *J. Geophys. Res.*, 89 (B13), 11,517-11,526, 1984.

Michael, A. J., Stress rotation during the Coalinga aftershock sequence, *J. Geophys. Res.*, 92 (B8), 7963-7979, 1987.

Michael, A. J., Spatial variations in stress within the 1987 Whittier Narrows, California, aftershock sequence: New techniques and results, *J. Geophys. Res.*, 96, 6303-6319, 1991.

文部科学省研究開発局・国立研究開発法人産業技術総合研究所, 活断層の評価に関する調査研究「活断層帯から生じる連動型地震の発生予測に向けた活断層調査研究」平成29年度成果報告書, 114p, 2018.

Panayotopoulos, Y., N. Hirata, H. Sato, A. Kato, K. Imanishi, Y. Kuwahara, I. Cho, T. Takeda, and Y. Asano, Investigating the role of the Itoigawa-Shizuoka tectonic line towards the evolution of the Northern Fossa Magna rift basin, *Tectonophysics*, 615-616, 12-26, 2014.

ト部卓・束田進也, WIN 微小地震観測網波形検測支援のためのワークステーション・プログラム(強化版), 地震学会予稿集, no.2, 331, 1992.

Waldhauser, F. and W. L. Ellsworth, A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward fault, California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90, 1353-1368, 2000.

Wessel, P. and Smith, W. H. F., New, improved version of the Generic Mapping Tools released. *EOS Trans. AGU*, 79, 579, 1998.

Yano T. E, T. Takeda, M. Matsubara, and K. Shiomi, Japan Unified high-resolution relocated catalog for earthquakes (JUICE): Crustal seismicity beneath the Japanese Islands. *Tectonophysics*, 702:19-28, doi:10.1016/j.tecto.2017.02.017, 2017.



図1 2018年5月12日に発生した長野県北部の地震 (M<sub>j</sub>5.2) の震央 (赤丸)。地震調査研究推進本部 地震調査委員会 (2015) の図2-1に加筆。

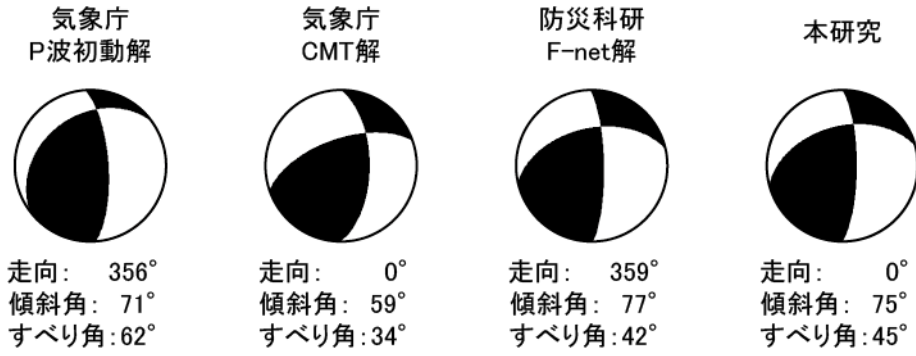


図2 2018年5月12日に発生した長野県北部の地震 (M<sub>j</sub>5.2) のメカニズム解。左から順番に気象庁のP波初動解、CMT解、防災科学技術研究所のF-net解、本研究の推定解を示す。気象庁CMT解とF-net解はベストダブルカップル解を示す。ビーチボールの下に、南北走向に近い節面の走向、傾斜角、すべり角を示す。

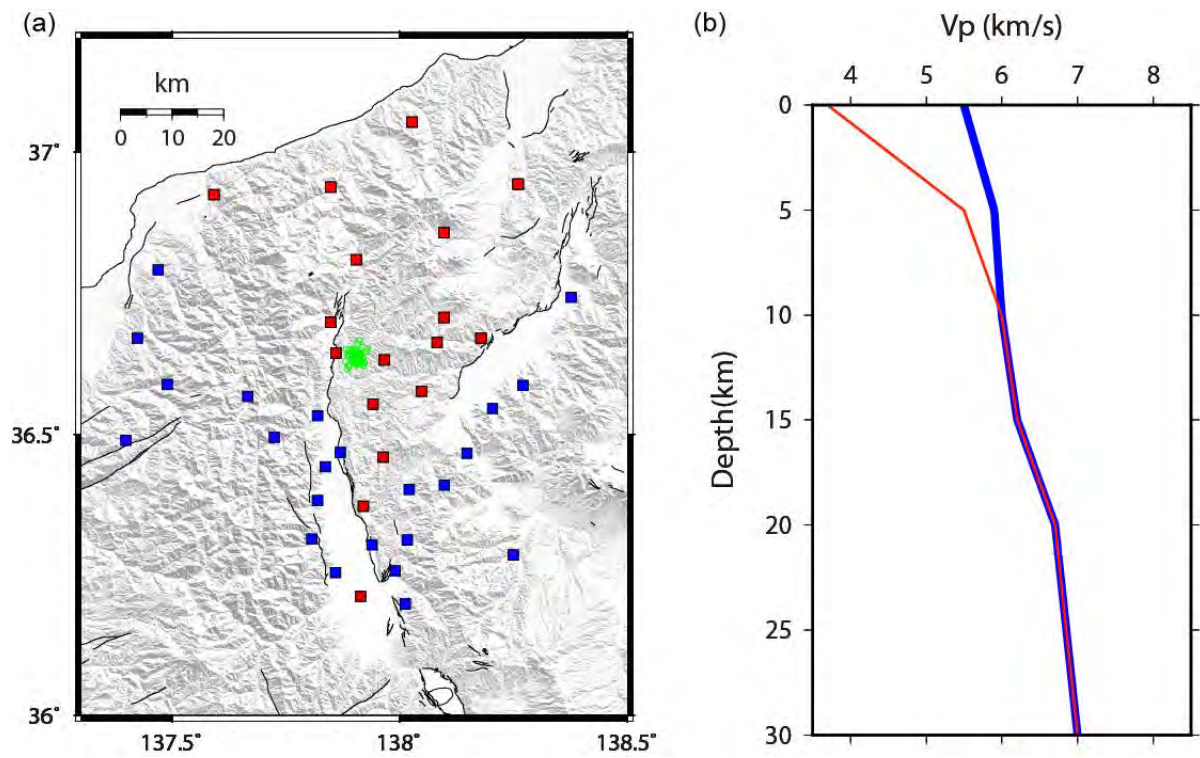


図3 (a) 解析対象の地震 (緑の丸) と観測点分布 (四角)。黒線は中田・今泉 (2002) による活断層線。背景の地形図は国土地理院の数値標高モデル (50m メッシュ)。 (b) 速度構造モデル。a の青の観測点には青色の速度構造を、赤の観測点には赤色の速度構造を仮定する。S 波速度は P 波速度の  $1/\sqrt{3}$  と仮定した。



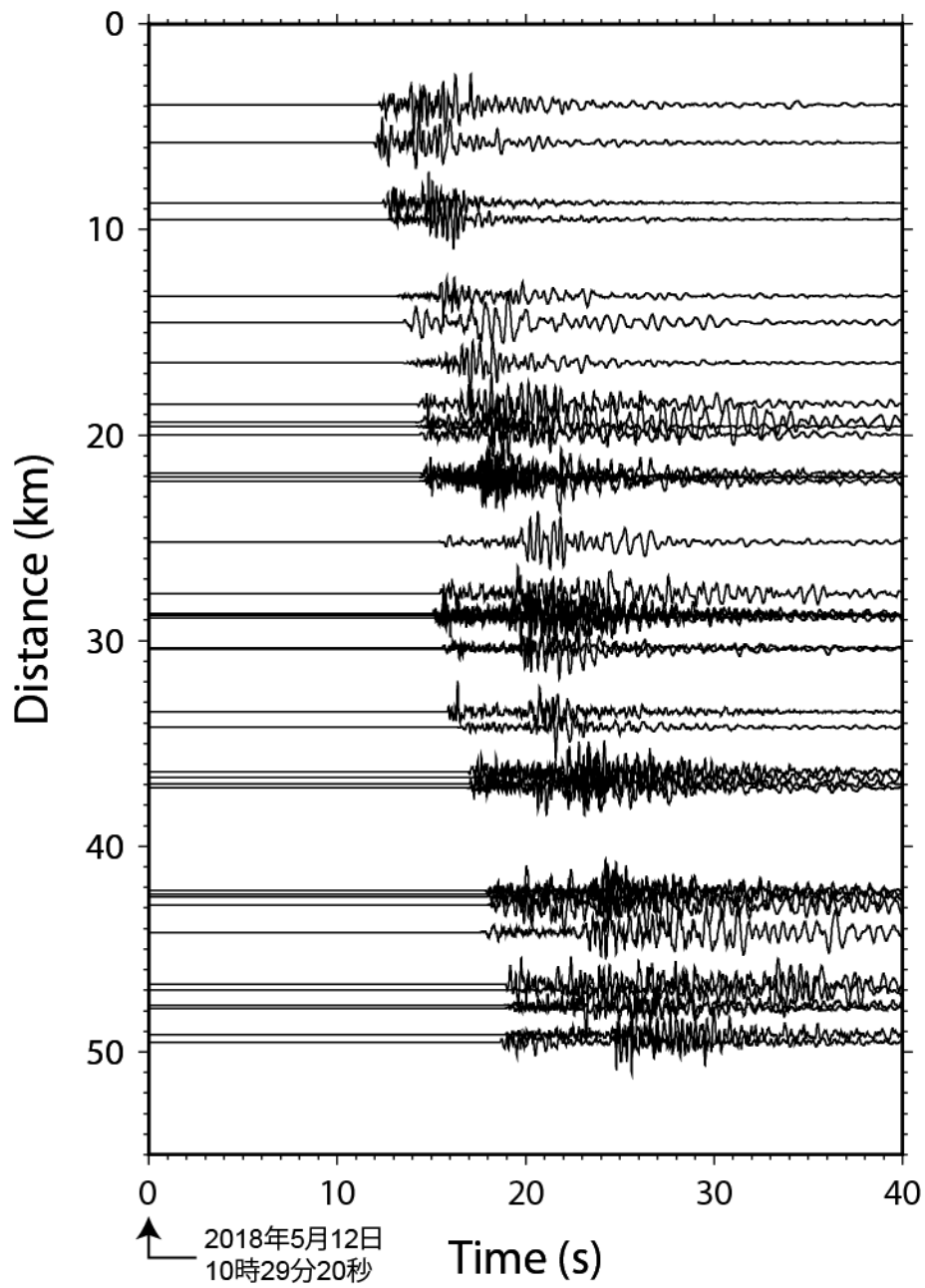


図4 2018年5月12日に発生した長野県北部の地震(M<sub>j</sub>5.2)の本震の観測波形例(上下動成分)。振幅値は各観測点の最大値により規格化している。

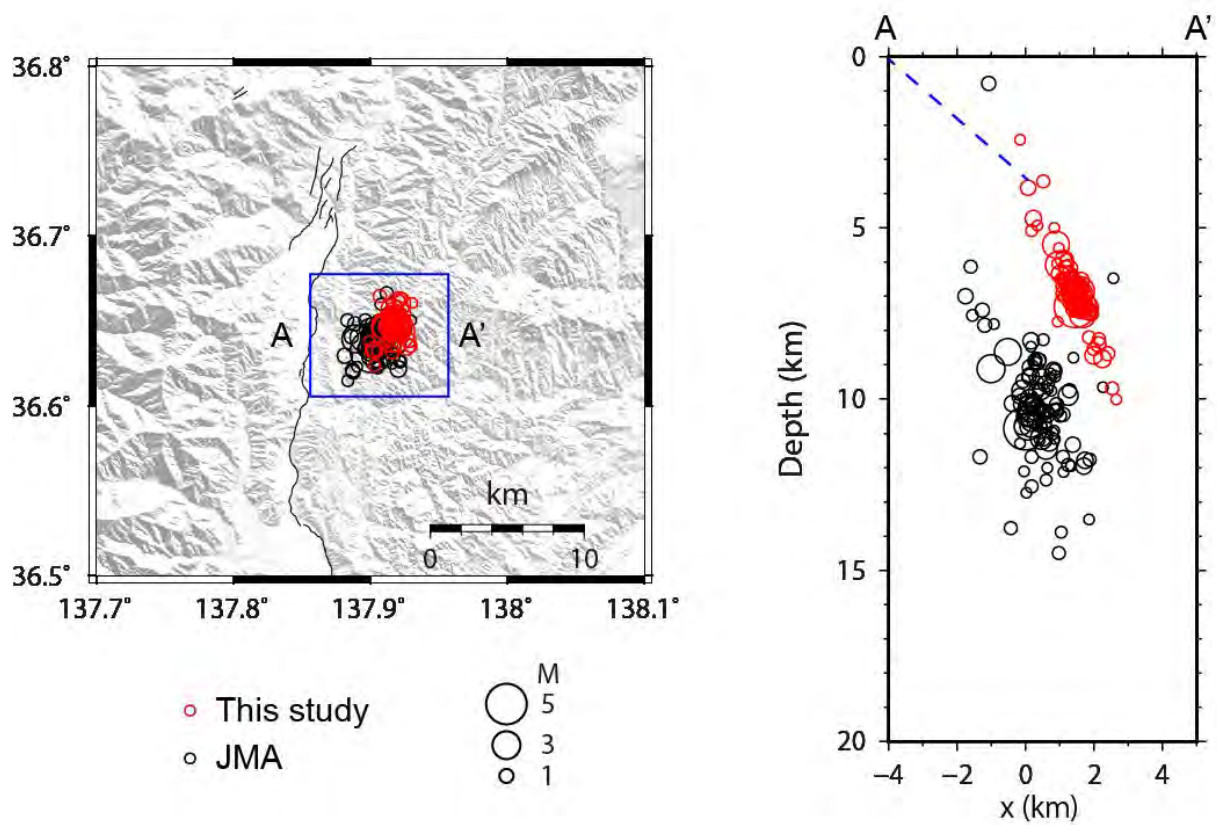


図5 震源決定結果。黒丸は気象庁一元化震源、赤丸は本研究による結果を示す。(左)震央分布。黒線は中田・今泉(2002)による活断層線。背景の地形図は国土地理院の数値標高モデル(50mメッシュ)。(右)東西断面図。青点線は地表トレースとの位置関係から推定した浅部の断層形状。

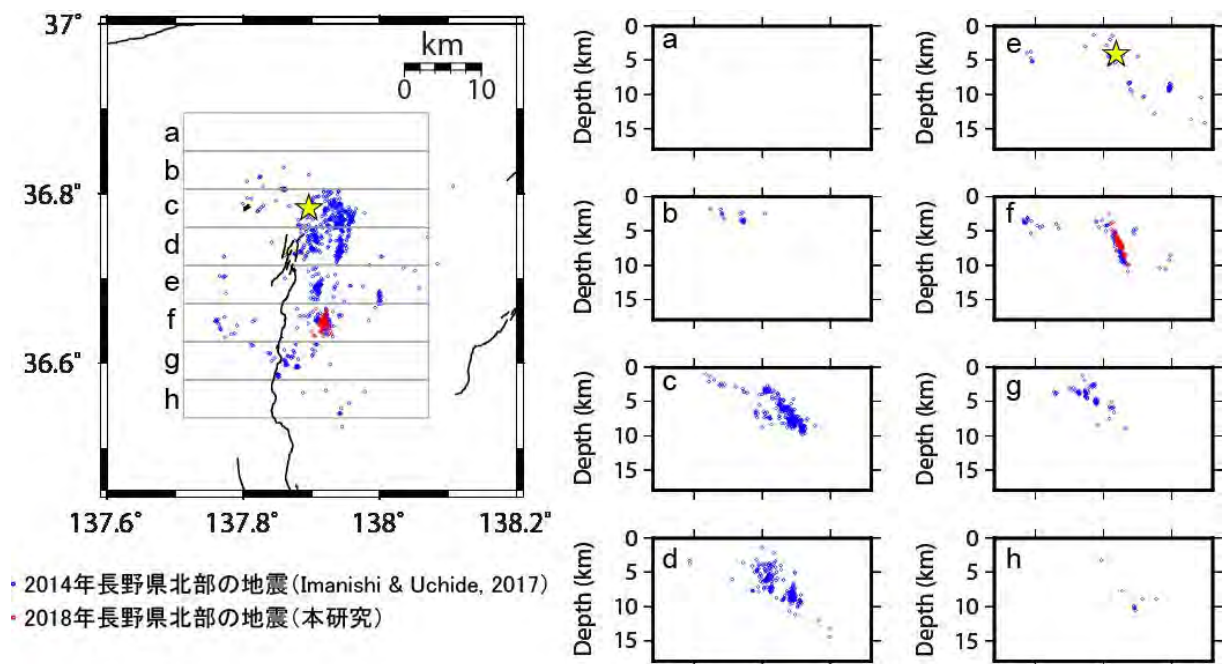


図6 2014年長野県北部の地震の余震分布 (Imanishi and Uchide, 2017) (青) と本研究で決定した2018年長野県北部の地震の余震分布 (赤)。黄色の星は2014年長野県北部の地震の本震。

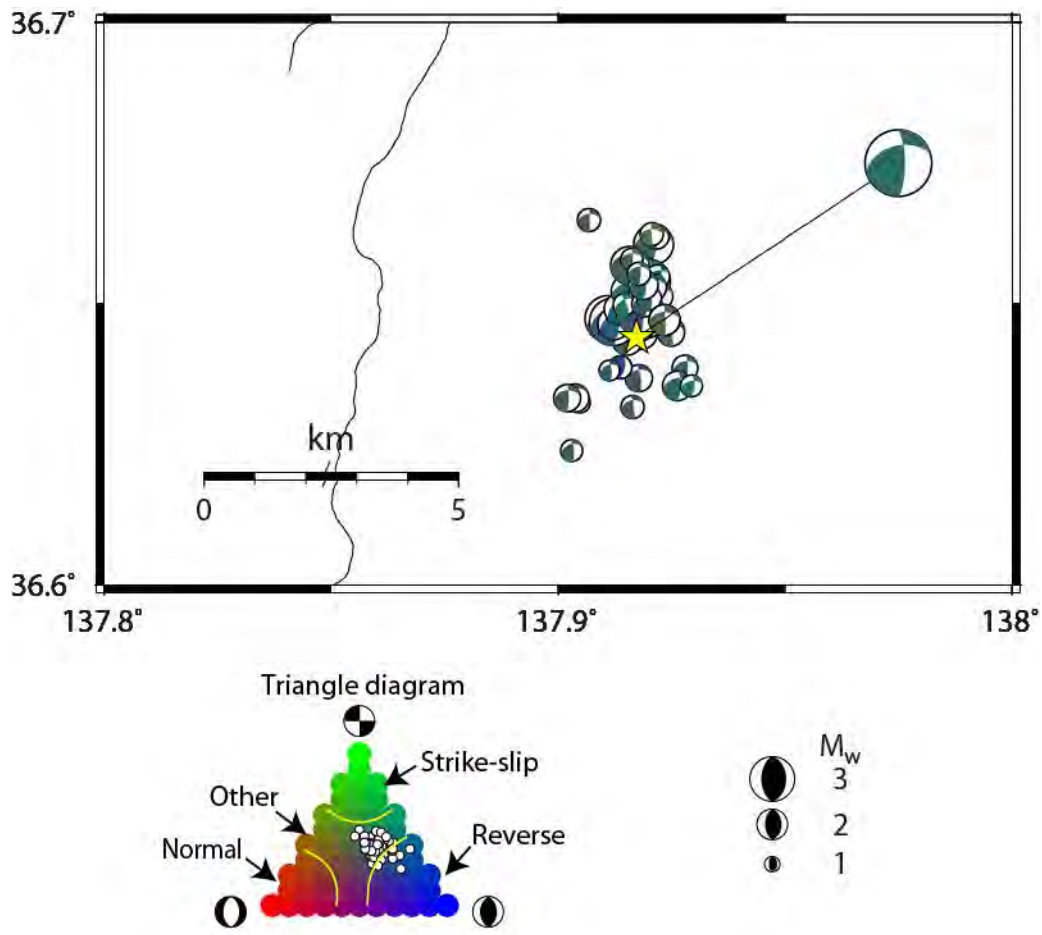


図7 推定された発震機構解。逆断層成分、横ずれ成分、正断層成分それぞれの強さの比率に応じてビーチボールの色分けをしている。Flohlich (1992) の三角ダイアグラムをカラー表示したものを下に示す。三角ダイアグラム上でのそれぞれの地震の位置を白丸で示す。ビーチボール（等積投影の下半球投影）の大きさはモーメントマグニチュード ( $M_w$ ) に比例する。黒線は中田・今泉 (2002) による活断層線。

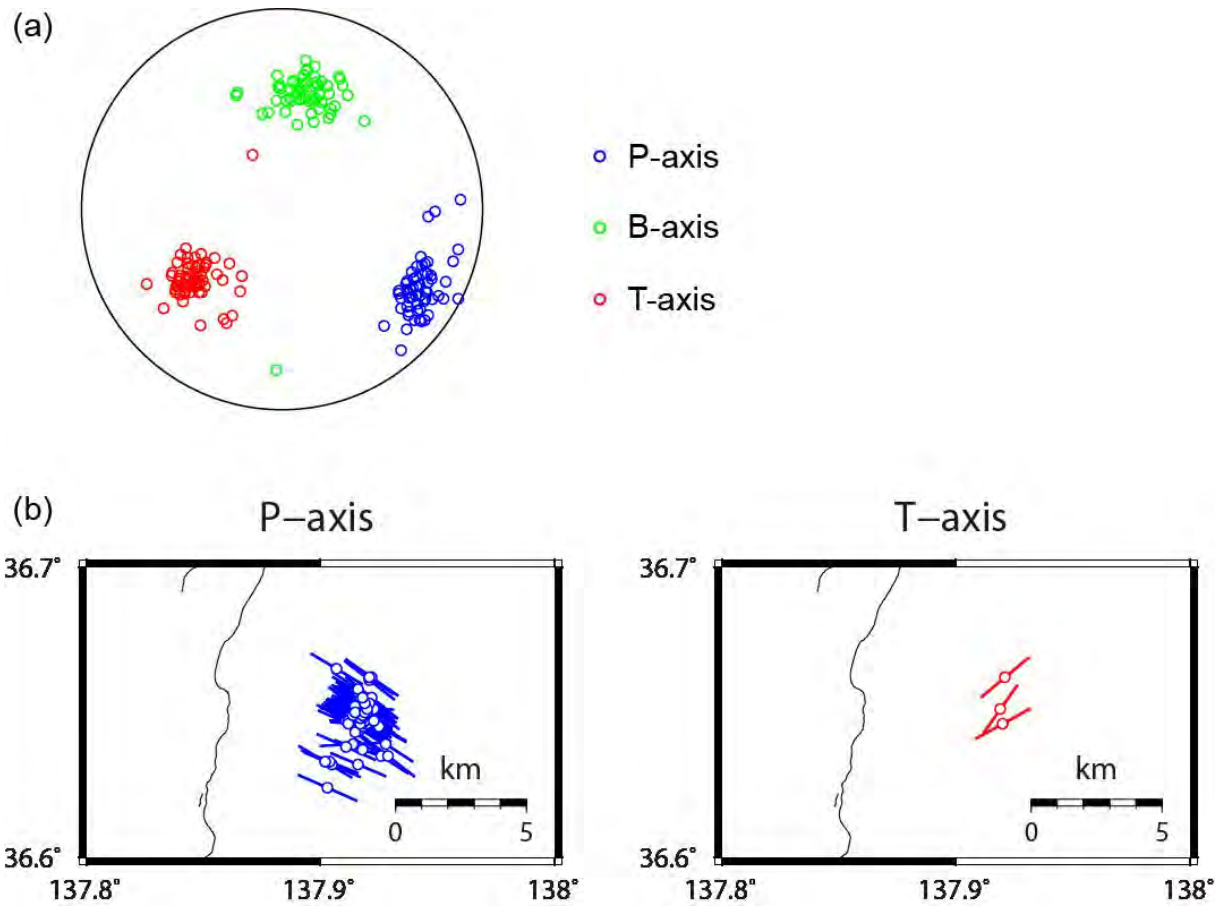


図8 (a) P軸、B軸、T軸の分布（等積投影の下半球投影）。(b) plunge角が30度以下の地震のP軸およびT軸方位分布。黒線は中田・今泉（2002）による活断層線。

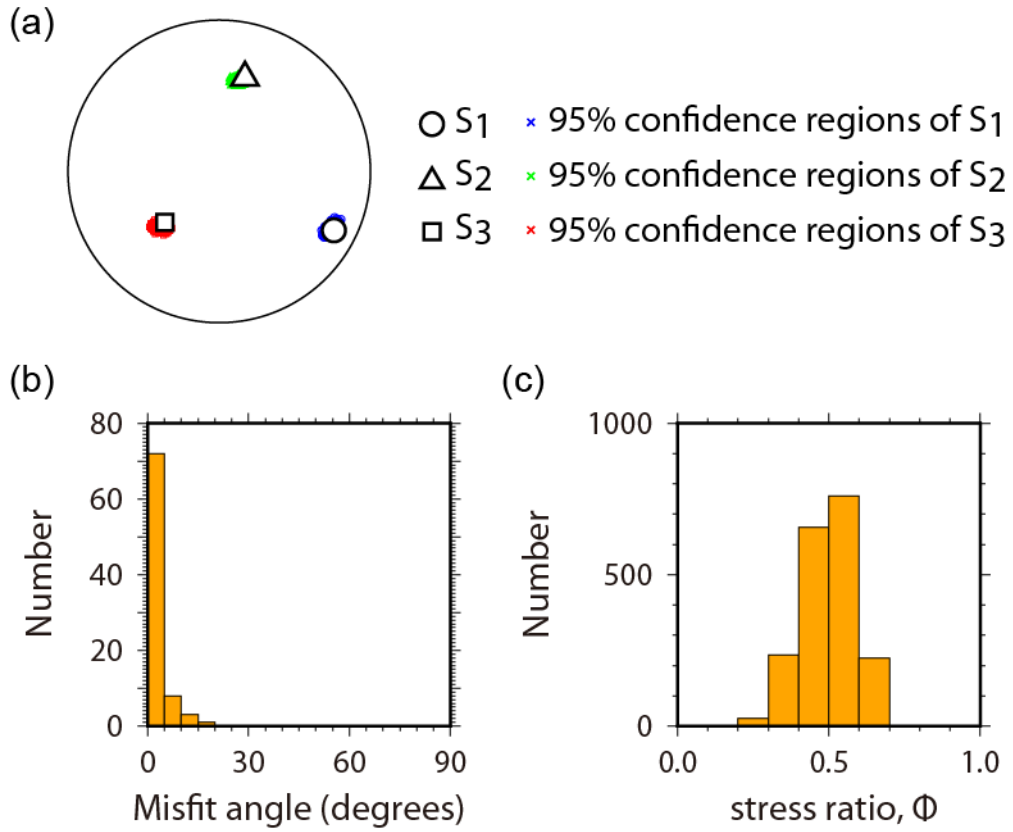


図9 応力テンソルインバージョン結果。(a) 主応力軸の最適解と95%信頼区間（等積投影の下半球投影）、(b) 最適解に対するミスフィット角（最適解から計算されるせん断応力方向と発震機構解のすべり方向の間の角度）のヒストグラム、(c)95%信頼区間に含まれる応力比  $\phi$  のヒストグラムをそれぞれ示す。

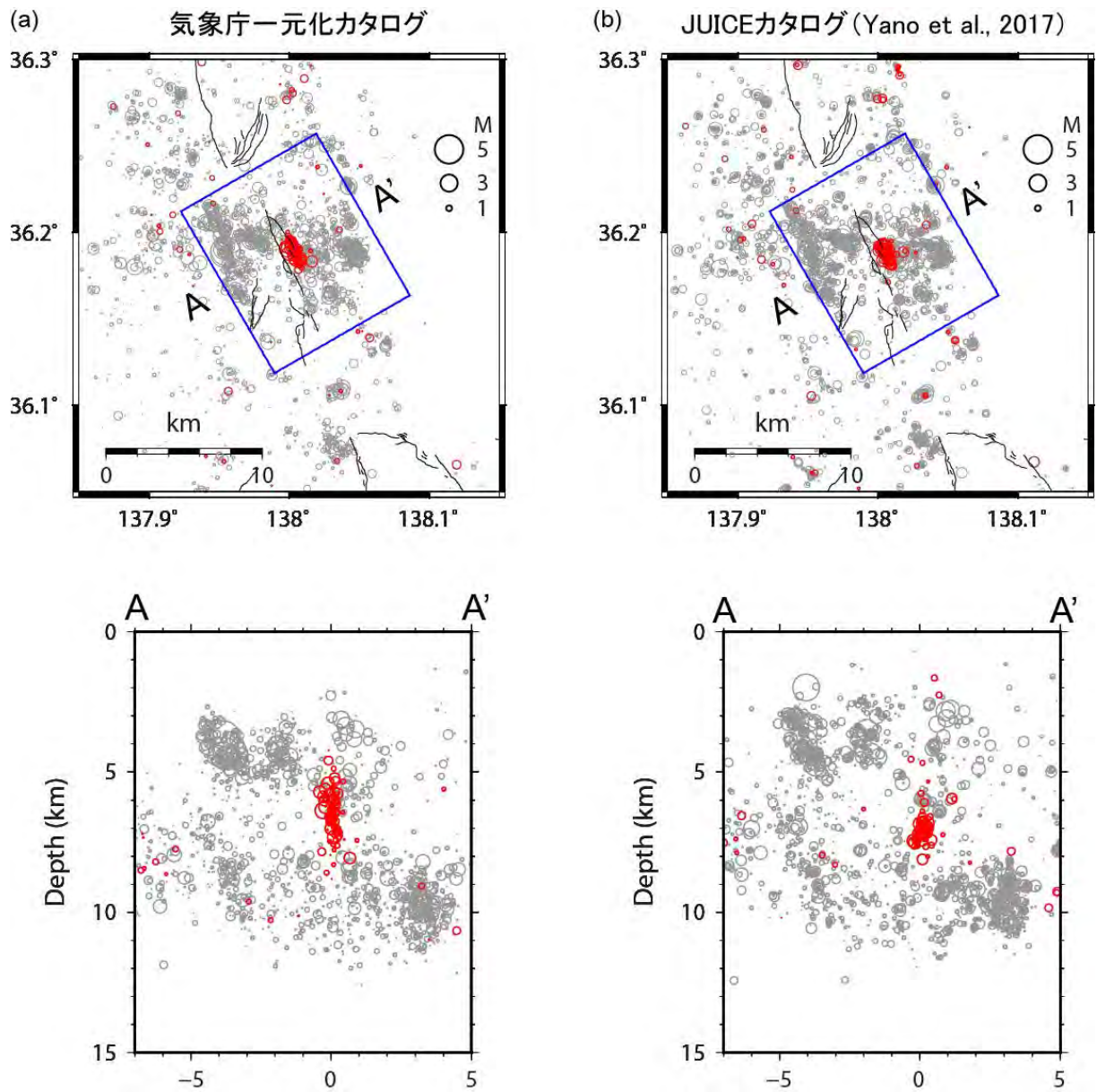


図10 牛伏寺断層周辺の震源分布。2002年10月の地震活動を赤丸で、2001年1月から2012年12月までの地震活動を灰色の丸で示す。(a) 気象庁一元化カタログ、(b) JUICEカタログ (Yano et al., 2018)。



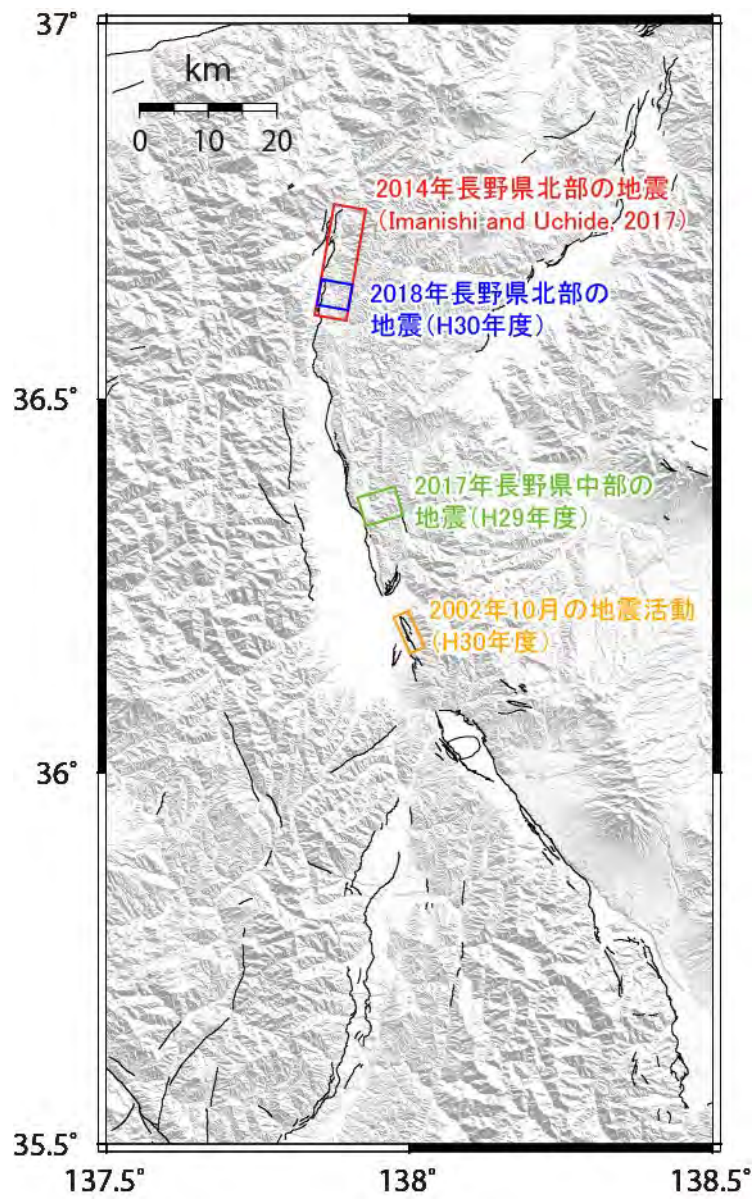


図 11 地震データから断層形状を推定した領域。