#### 3.4 動的破壊シミュレーションによる連動性評価

### (1)業務の内容

(a) 業務題目 動的破壊シミュレーションによる連動性評価

(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	加瀬 祐子

(c) 業務の目的

地震時変位量や断層形状、速度構造等を考慮した動的破壊シミュレーションを実施し、そ れぞれの活動時の地震後経過時間に応じた震源モデルを推定する。その結果をもとに連動可 能性とその条件を検討する。

- (d) 3 ヵ年の年次実施業務の要約
- 1) 平成 29 年度:

断層帯で近年生じた地震の震源過程に関する既存資料の収集整理をおこなった。主 に 2014 年長野県北部の地震の震源モデルについての研究をまとめ、周辺断層との連 動性を検討する上で必要な情報を整理した。

2) 平成 30 年度:

既存資料および前年度の調査結果を基に、動力学的破壊シミュレーションのための コード整備をおこなった。

3) 令和元年度:

既存資料および本課題で得られた成果を反映した動力学的震源モデルを構築し、 動力学的破壊シミュレーションをおこなった。地震時変位量や活動履歴、テクトニッ ク応力場を考慮してセグメントの応力降下量を変化させ、連動可能性とその条件を 検討した。

### (2) 令和元年度の成果

(a) 業務の要約

動的破壊シミュレーションを基に、連動可能性とその条件を議論するためには、断層帯 の置かれた条件を反映した動力学的震源モデルを構築する必要がある。今年度は、糸魚川 ー静岡構造線断層帯中北部区間と中南部区間を対象として、震源モデルを構築し、連動可 能性について調べた。その結果、中北部区間北端もしくは南端から破壊が始まる場合には、 連動可能であるが、1イベントあたりの変位量の調査結果と調和的なすべり量を得るため には、相当大きな応力降下量を設定する必要があることがわかった。これは、中北部区間 と中南部区間だけではなく、北部区間や南部区間を含めたより広い範囲での連動による変 位量である可能性があることを示している。 (b) 業務の成果

本業務では、主に、地形・地質学的データに基づいて断層形状と応力場を想定し、その 条件下で物理的に起こりうる破壊過程を数値計算で求めるという手順で、動力学的震源モ デルを構築する。これにより、対象とする断層の置かれた条件を反映し、実現性の高い地 震シナリオを求める。本業務は、糸魚川-静岡構造線断層帯北部~中南部区間を対象とし ているが、ここでは、連動可能性を検討する対象として、糸魚川-静岡構造線断層帯中北 部区間と中南部区間をモデル化する。

断層モデル(図1)は、3.1で推定された断層形状を基に、中北部区間は走向N20°W で長さ34km、中南部区間には屈曲があり、北側は走向N20°Wで長さ5km、南側は走向N39° Wで長さ21km とし、中北部区間と中南部区間の境界は、走向方向に2.6km、法線方向に 5.2kmのジョグを形成しているとする。中北部、中南部共に、幅は15kmで、傾斜角は鉛直 とする。

最大主圧縮応力(σ<sub>1</sub>)の向きは、3.3、および、応力テンソルインバージョン結果(文 部科学省研究開発局・他,2010)よりN60°W、大きさは、3.3より

σ<sub>1</sub> = 30.0 z [MPa] (z [km]は深さ)

とした。文部科学省研究開発局・他(2010)より、この地域では横ずれ応力場となっていることから、中間主応力( $\sigma_2$ )は鉛直でかぶり圧に等しいとし、Takeda et al. (2004)に基づき、表1で示す半無限均質構造を仮定すると、

 $\sigma_2 = 26.95 \text{ z [MPa]}$ 

となった。また、最小主圧縮応力(σ<sub>3</sub>)は、応力比(σ<sub>2</sub> - σ<sub>3</sub>)/(σ<sub>1</sub> - σ<sub>3</sub>)が走向 N20<sup>°</sup> Wの領域では 0.39、走向 N39<sup>°</sup> Wの領域では 0.55 であること(文部科学省研究開発局・他, 2010)から、走向 N20<sup>°</sup> Wの領域では

 $\sigma_3 = 25.0 \text{ z [MPa]}$ 

走向 N39° ₩の領域では

 $\sigma_3 = 23.22 \text{ z [MPa]}$ 

# となった。

破壊開始領域を仮定し、破壊の始まる領域の応力降下量を

 $\Delta \tau = a z [MPa]$ 

として、1回の活動によるすべり量を概ね再現できるような比例係数 a を試行錯誤的に求める。

1回の活動によるすべり量について、地震調査研究推進本部(2015)では、中北部区間で6~9m程度の左横ずれ、中南部区間で6m程度以上の左横ずれとしている。中北部区間では、松本盆地東縁断層の豊科高家地点で最新の活動に伴って 7.1±3.6mの左横ずれ

(近藤・他, 2019)、島内地点で最新の活動に伴って 6.2~6.9mの左横ずれ(近藤・他, 2006)、牛伏寺断層の並柳地点で最新の活動に伴って 7.5±1.5mの左横ずれ(奥村・他, 1994)が認められている。また、中南部区間では、釜無山断層群の金沢下地点で最新の活動に伴って 2.8~5.2mの左横ずれ(三浦・他, 2001)が認められている。これらの値を満たすようなパラメータを探索することになる。

破壊の始まる領域の応力降下量の比例係数aを仮定し、静水圧条件が成り立つとすると、

動摩擦係数 ( $\mu_d$ ) を決めることができる。更に、破壊の始まる区間での強度と応力降下量の比(S値; Andrews, 1976; Das and Aki, 1977)を1.6と仮定すると、静摩擦係数( $\mu_s$ )が決まる。このときの摩擦係数は、破壊の始まる領域の走向によって異なるが、動摩擦係数で概ね 0.06~0.17 程度である。

破壊の始まる領域の走向、および、応力降下量の比例係数 a を変えて摩擦係数を求め、 それぞれの領域にはたらく剪断応力、動摩擦応力、静摩擦応力を、それぞれの走向につい て求めたものを図2に示す。走向N20°Wの領域から破壊が始まる場合の走向N39°Wの領 域のS値は1.6より小さく(図2a)、走向N39°Wの領域から破壊が始まる場合の走向N20° Wの領域のS値は1.6より大きい(図2b)。したがって、いずれの領域から破壊が始まる としても、走向N20°Wの領域よりも走向N39°Wの領域のほうが相対的に破壊しやすい応 力場にあることがわかる。

断層面の境界条件には、Coulomb の破壊基準とすべり弱化の摩擦構成則(Ida, 1972; Andrews, 1976)を仮定し、弾性体の運動方程式を数値的に解くことによって、断層面上の 破壊伝播過程を求めた。臨界すべり量(Dc)は、全セグメント共通で0.50mとした。

数値計算には、差分法(Kase and Kuge, 2001)を用いた。空間グリッド間隔は、断層面 内方向に 200m、断層面外方向に 200m、時間刻みは、0.02 秒とした。

上記の条件で、破壊開始領域および応力降下量の比例係数 a を変えて数値計算をおこない、実際の1回の活動によるすべり量と調和的になる a を探索した。

中北部区間北端から破壊が始まる場合、応力降下量が 0.7z [MPa]以上で、中北部区間全体に破壊が広がるようになる(図3a)。このとき、地表のすべり量は最大でも3m以下で、 中北部区間の3地点での1回の活動によるすべり量を満たすことはできない。応力降下量 が1.1z [MPa]になると、中北部区間と中南部区間が連動するようになり、中南部区間の金 沢下地点での1回の活動によるすべり量を満たす(図3b)。応力降下量が 1.4z [MPa]にな ると、中北部区間の豊科高家地点でも1回の活動によるすべり量を満たすようになり(図 3c)、応力降下量が 1.8z [MPa]になると、更に、中北部区間の並柳地点でも1回の活動に よるすべり量を満たすようになる(図3d)。しかし、応力降下量が 2.0z [MPa]になると、 中北部区間の破壊がS波速度以上で伝播するようになり、中南部区間が連動しなくなる(図 3e)。したがって、4地点すべてで1回の活動によるすべり量を満たすことはできない。 しかし、このとき、中北部区間の島内地点の1回の活動によるすべり量を満たしており、 破壊する中北部区間の3地点での1回の活動によるすべり量を満たすことは可能である。 ただし、この場合の平均の応力降下量は 15.0 [MPa]、Mo 1.2×10<sup>20</sup> [Nm]、Mw7.3 となり、 長さ 34kmの断層面積に比して地震モーメントが大きすぎることに注意が必要である。

中北部区間南端から破壊が始まる場合、応力降下量が 0.7z [MPa]以上で、中北部区間全体に破壊が広がるようになる (図4a)。中北部北端から破壊が始まる場合と同様、中北部区間の3地点での1回の活動によるすべり量を満たすことはできない。応力降下量が 1.3z [MPa]になると、中北部区間と中南部区間が連動するようになり、中北部区間の豊科高家地点と中南部区間の金沢下地点での1回の活動によるすべり量を満たす (図4b)。応力降下量が 1.7z [MPa]以上になると、中北部区間の破壊がS波速度以上で伝播するようになり、中南部区間が連動しなくなる (図4c)。応力降下量が 1.8z [MPa]になると、中北部区間の 並柳地点でも1回の活動によるすべり量を満たすようになる (図4d)。更に、応力降下量 が 2.0z [MPa]になると、中北部区間の島内地点の1回の活動によるすべり量を満たすよう になり(図4e)、破壊する中北部区間の3地点での1回の活動によるすべり量を満たす。

中北部区間南端から破壊が始まる場合の方が、北端から破壊が始まる場合よりも連動し にくいのは、破壊がある程度以上の距離を伝播してくることによって、別の断層に乗り移 りやすくなるディレクティビティ効果が現れていると解釈できる。

中南部区間北端から破壊が始まる場合、応力降下量が 0.4z [MPa]以上で、中南部区間全体に破壊が広がるようになる(図 5 a)。このとき、中南部区間の破壊は、S波速度以上で伝播する。これは、中南部区間の北側は走向 N20°Wで、南側は走向 N39°Wであり、南側は相対的に破壊しやすいためである。地表のすべり量は最大でも 2.5m以下で、中南部区間の1地点での1回の活動によるすべり量を満たすことはできない。応力降下量が 1.0z [MPa]になると、中南部区間の金沢下地点での1回の活動によるすべり量を満たす(図 5 b)。応力降下量が 2.0z [MPa]までの範囲では、中北部区間が連動することはない(図 5 c)。

中南部区間北端から破壊が始まる場合は、中南部区間の形状から、中南部区間南側の応 力降下量が相対的に大きく、すべり量が大きくなりやすいため、中北部区間に与える応力 変化も大きくなるものの、中北部区間は相対的に破壊しにくい応力状態にあるため、連動 できないと考えられる。

中南部区間南端から破壊が始まる場合、応力降下量が 0.7z [MPa]以上で、中南部区間の 走向 N39°Wの領域全体に破壊が広がるようになる(図 6 a)。中南部区間北端から破壊が始 まる場合と同様、中南部区間の1地点での1回の活動によるすべり量を満たすことはでき ない。応力降下量が 1.1z [MPa]になると、中南部区間全体に破壊が広がるようになるが、 中南部区間の1地点での1回の活動によるすべり量を満たすことはできない(図 6 b)。応 力降下量が 1.4z [MPa]になると、中南部区間の金沢下地点での1回の活動によるすべり量 を満たすようになる(図 6 c)。応力降下量が 1.6z [MPa]以上になると、中南部区間の破壊 がS波速度以上で伝播するようになる(図 6 d)。応力降下量が 2.0z [MPa]までの範囲では、 中北部区間が連動することはない(図 6 e)。

中南部区間南端から破壊が始まる場合、中北部区間北端から破壊が始まる場合と同様に ディレクティビティ効果が期待できるにもかかわらず、中北部区間は連動しない。中南部 区間南端から始まった破壊は、中南部区間北側の走向 N20°W の領域に到達すると応力降 下量が小さくなり、すべり量が小さめになる。更に、中北区間部の走向は N20°W であるた め、中南部区間よりも破壊しにくい応力状態にあるため、連動できないと考えられる。

340





図1 本研究で用いた断層モデル。基図は、電子国土 web で作成。



図2 初期剪断応力(実線)、初期静摩擦応力(破線)、初期動摩擦応力(点線)の動 摩擦係数(μ<sub>d</sub>)の値に対する変化。応力降下量の比例係数 a の値が 0.5~2.0 の範囲で の結果を示す。黒細線は走向 N20° W の領域、赤太線は走向 N39° W の領域にはたらく応 力。(a)走向 N20° W の領域から破壊が始まる場合。(b)走向 N39° W の領域から破壊が 始まる場合。



図3 中北部北端から破壊が始まる場合の破壊過程の例。それぞれ、下段が断層面上 の破壊時刻、中段が断層面上のすべり量、上段の赤線が地表でのすべりの分布、緑線 が実際の1回の活動によるすべり量の範囲を示す。(a)応力降下量の比例係数が0.7の 場合。(b)応力降下量の比例係数が1.1の場合。(c)応力降下量の比例係数が1.4の場 合。(d)応力降下量の比例係数が1.8の場合。(e)応力降下量の比例係数が2.0の場

合。



図4 中北部南端から破壊が始まる場合の破壊過程の例。図の詳細は、図3と同じ。 (a)応力降下量の比例係数が0.7の場合。(b)応力降下量の比例係数が1.3の場合。(c) 応力降下量の比例係数が1.7の場合。(d)応力降下量の比例係数が1.8の場合。(e)応 力降下量の比例係数が2.0の場合。



図5 中南部北端から破壊が始まる場合の破壊過程の例。図の詳細は、図3と同じ。 (a)応力降下量の比例係数が0.4の場合。(b)応力降下量の比例係数が1.0の場合。 (c)応力降下量の比例係数が2.0の場合。



図6 中南部南端から破壊が始まる場合の破壊過程の例。図の詳細は、図3と同じ。 (a)応力降下量の比例係数が0.7の場合。(b)応力降下量の比例係数が1.1の場合。 (c)応力降下量の比例係数が1.4の場合。(d)応力降下量の比例係数が1.6の場合。(e) 応力降下量の比例係数が2.0の場合。

(c) 結論ならびに今後の課題

糸魚川-静岡構造線断層帯北部~中南部区間のうち、中北部区間と中南部区間を対象と して、震源モデルを構築し、連動可能性を検討した。

中北部区間北端、もしくは、南端から破壊が始まる場合には、中北部区間と中南部区間が 連動する可能性がある。しかし、連動する場合でも、1回の活動によるすべり量を観測量の ある4地点すべてで満たすためには、相当大きな応力降下量を設定する必要があり、断層面 積に比して、地震モーメントが大きくなりすぎる。そのため、得られている観測量は、より 広い範囲での、すなわち、北部区間や南部区間も含めた連動によるすべり量であることを検 討する必要がある可能性がある。

謝辞:図はGeneric Mapping Tool version 5.4.4 (Wessel et al., 2013) で作成しました。

(d) 引用文献

- Andrews, D.J., Rupture velocity of plane strain shear cracks, J. Geophys. Res., 81, 5679-5687, 1976.
- Das, S. and K. Aki, A numerical study of two-dimensional spontaneous rupture propagation, Geophys. J. R. Astro., 50, 643-668, 1977.
- Ida, Y., Cohesive force across the tip of a longitudinal-shear crack and Griffith's specific surface energy, J. Geophys. Res., 77, 3796-3805, 1972.

地震調査研究推進本部,糸魚川-静岡構造線断層帯の長期評価(第二版),60p,2015.

Kase, Y. and K. Kuge, Rupture propagation beyond fault discontinuities: significance of fault strike and location, Geophys. J. Int., 147, 330-342, 2001.

近藤久雄・遠田晋次・奥村晃史・高田圭太,糸魚川-静岡構造線活断層系・松本盆地東縁 断層南部に沿う左横ずれ変位地形,地学雑誌,115,208-220,2006.

近藤久雄・木村治夫・杉戸信彦・下釜耕太・佐伯健太郎・川島裕貴・亀高正男・高岡宏之,

糸魚川-静岡構造線断層帯・松本盆地東縁断層南部における最新活動時期と横ずれ変位 量,日本活断層学会 2019 年度秋季学術大会,0-7,2019.

三浦大助・幡谷竜太・宮腰勝義・井上大栄・小俣雅志・宮脇明子・田中竹延・宮脇理一郎,

糸魚川-静岡構造線活断層系中部の最近の断層活動(その2)-釜無山断層群金沢下ト レンチ調査結果-,地球惑星科学関連学会合同大会,Jm-P012,2001.

文部科学省研究開発局・国土交通省国土地理院・東京大学地震研究所,糸魚川-静岡構造線断層帯における重点的な調査観測平成17~21年度成果報告書,362p,2010.

奥村晃史・下川浩一・山崎晴雄・佃 栄吉,糸魚川-静岡構造線活断層系の最近の地震活動-牛伏寺断層・松本市並柳地区トレンチ発掘調査-,地震第2輯,46,425-438,1994.

Takeda, T, H. Sato, T. Iwasaki, N. Matsuta, S. Sakai, T. Iidaka, and A. Kato, Crustal structure in the northern Fossa Magna region, central Japan, modeled from refraction/wide-angle reflection data, Earth Planets Space, 56, 1293-1299, 2004.

Wessel, P. and W. H. F. Smith, New, improved version of the Generic Mapping Tools

released, EOS Trans. AGU, 79, 579, 1998.

## (3) 平成 29~令和元年度の成果

(a) 業務の要約

動的破壊シミュレーションを基に、連動可能性とその条件を議論するためには、断層帯 の置かれた条件を反映した動力学的震源モデルを構築する必要がある。初めに、糸魚川ー 静岡構造線断層帯で近年生じた地震として、2014年長野県北部の地震を対象に、震源モデ ルについての情報を収集し、本業務の動的破壊シミュレーションのプロトタイプとして、 この地震の動力学的震源モデルを構築し、周辺断層との相互作用を検討した。発震機構解 とCMT 解、および、余震分布を基に、南北2枚のセグメントと破壊開始点となる鉛直なセ グメントの3面からなる単純な断層モデルを仮定し、強震波形インバージョン結果と概ね 調和する破壊伝播過程を再現できた。また、過去の活動履歴を考慮して南側セグメントの 応力降下量を小さくすることで、観察された地表での最大上下変位量を説明することもで きることから、各断層面の活動履歴を考慮してモデルを設定することにより、より起こり うる破壊過程を再現できる可能性を示した。

続いて、各点の走向、傾斜角が滑らかに変化する断層面上での動力学的破壊過程を差分 法で計算するため、一般座標系を直交座標系に mapping する手法を用いて、シミュレーシ ョンに用いるコードを改良した。また、均質半無限弾性体にある鉛直横ずれ断層、および、 傾斜角 60°の正断層に、深さに依存する初期応力場がはたらく場合の破壊過程について、 本事業で開発したコードでの計算結果が検証済のコードによる計算結果とよく一致してい ることを確認した。

最後に、糸魚川-静岡構造線断層帯中北部区間と中南部区間を対象として、震源モデル を構築し、連動可能性について調べた。その結果、中北部区間北端もしくは南端から破壊 が始まる場合には、連動可能であるが、1イベントあたりの変位量の調査結果と調和的な すべり量を得るためには、相当大きな応力降下量を設定する必要があることがわかった。 これは、中北部区間と中南部区間だけではなく、北部区間や南部区間を含めたより広い範 囲での連動による変位量である可能性があることを示している。

(b) 業務の成果

1) 2014 年長野県北部の地震の動力学的震源モデル

糸魚川-静岡構造線断層帯で近年生じた地震として、2014年長野県北部の地震の動力学 的震源モデルを構築し、周辺断層との相互作用を検討した。この地震については、Ando et al. (2017)が、Panayotopoulos et al. (2016)の断層形状に基づく複雑な断層モデルを用 いて、動力学的破壊過程を検討している。それに対し、本業務の目的は、地震発生前の、 あらかじめ詳細な断層形状がわからない活断層帯における連動型地震の発生可能性と連動 条件を明らかにすることであるから、できるだけ単純な断層モデルを用いて、破壊過程を 説明できる動力学的震源モデルを構築することを試みた。

本業務では、主に、地形・地質学的データに基づいて断層形状と応力場を想定し、その 条件下で物理的に起こりうる破壊過程を数値計算で求めるという手順で、動力学的震源モ デルを構築する。これにより、対象とする断層の置かれた条件を反映し、実現性の高い地 震シナリオを求める。糸魚川-静岡構造線断層帯北部~中南部区間を対象とした動的破壊 シミュレーションに先立ち、既に地震が発生し、地震学・測地学的データも用いることの できる 2014 年長野県北部の地震の動力学的震源モデルを構築し、周辺断層との相互作用 を考慮したシミュレーションを試みた。

断層モデル(図7(a))は、発震機構解(気象庁,2014)、CMT 解(防災科学技術研究所, 2014)、および、余震分布(今西・内出,2015)を基に決定した。この地震では、発震機構 解とCMT 解が異なる。余震分布(図7(b))から、主として、南北2枚の断層面が破壊した と考えられ、その走向、傾斜角は、CMT 解の高角東傾斜の面と調和的である。そこで、主た る断層面として、走向N20°Eで、長さ12.1kmの北側セグメントと、長さ13kmの南側セグ メントを設定した。一方、破壊開始点付近の余震分布を発震機構解の2枚の節面に対応す る鉛直断面に投影すると、低角の面(図7(c))よりも高角の面(図7(d))との対応がよ いことから、破壊開始点のあるセグメントとして、長さ6km、幅3.5kmの鉛直なセグメン トを、北側セグメントと南側セグメントをつなぐように設定した。

主たる断層面のうち、南側セグメントは、既知の神城断層北部に対応し、地表変位が観察されている(例えば、勝部・他,2017)。一方、北側セグメントでは、地表変位は観察されておらず、対応する活断層も知られていない(例えば、勝部・他,2017)。そこで、余震分布も参考に、断層上端の深さは、北側セグメントで2km、南側セグメントで0kmとした。 断層下端の深さは、両セグメントとも12kmとした。また、傾斜角は、余震分布、InSARデータの解析結果(矢来・他,2015)、および、神城断層の地表トレースの位置を基に、深さ2kmより浅いところでは45°、深いところでは60°とした。

最大主圧縮応力(σ<sub>1</sub>)の向きは、応力テンソルインバージョン結果(文部科学省研究開 発局・他, 2010)より N60<sup>°</sup>W、大きさは、ボーリング孔での水圧破砕実験結果(Tanaka, 1986)より

σ<sub>1</sub> = 53.0 z [MPa] (z [km]は深さ)

とした。Takeda et al. (2004)に基づき、表2で示す水平2層構造を仮定し、最小主圧縮 応力( $\sigma_3$ )は鉛直でかぶり圧に等しく、静水圧条件が成り立つとすると、

 $\sigma_3 = \sigma_{\text{litho}} - \sigma_{\text{fluid}}$ 

(σ<sub>1itho</sub>は静岩圧応力、σ<sub>fluid</sub>は間隙流体圧)なので、深さ2km以浅では

 $\sigma_3 = 14.7 \text{ z [MPa]}$ 

2 km 以深では

 $\sigma_3 = 16.7 \text{ z} - 3.0 \text{ [MPa]}$ 

とした。また、中間主応力( $\sigma_2$ )は、応力比( $\sigma_2 - \sigma_3$ ) / ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) = 0.42(文部科 学省研究開発局・他, 2010) から、深さ2km以浅では

 $\sigma_2 = 30.8 \text{ z [MPa]}$ 

2 km 以深では

 $\sigma_2 = 31.8 \text{ z} - 1.8 \text{ [MPa]}$ 

となった。

断層面の境界条件には、Coulombの破壊基準とすべり弱化の摩擦構成則(Andrews, 1976) を仮定し、弾性体の運動方程式を数値的に解くことによって、断層面上の破壊伝播過程を 求めた。臨界すべり量(Dc)は、全セグメント共通で0.10mとした。 数値計算には、斜め座標系の差分法(Kase, 2010)に、鉛直セグメントを計算するための直交座標系の差分法を入れ子構造にしたコードを用いた。空間グリッド間隔は、南北2枚のセグメントの断層面内方向に 0.1km、鉛直セグメントの断層面内方向に 0.087km、断層面外方向に 0.05km、時間刻みは、0.005 秒とした。

上記の条件で、摩擦係数を変えて数値計算をおこない、実際の破壊過程と調和的になる 摩擦係数を探索した。本研究では、最終的に、南北2枚のセグメントの静摩擦係数は0.488、 動摩擦係数は0.470、鉛直セグメントの静摩擦係数は0.0894、動摩擦係数は0.0400を用い た。平均的な応力降下量は、南北2枚のセグメントで2.6MPa、鉛直セグメントで10.3MPa となった。

南北2セグメントが同じ応力条件にある場合の破壊過程を、図8に示す。鉛直セグメン トで始まった破壊は、北側セグメントの鉛直セグメント下端部付近の破壊を励起し、北側 セグメント全体に破壊が広がっていった。一方、南側セグメントでは、鉛直セグメントの 破壊による応力変化では、破壊を励起するには不十分で、むしろ北側セグメントの破壊に よる応力変化によって破壊が励起された。そのため、南側セグメントの破壊は、北側セグ メントより2秒程度遅れて広がった。これは、強震波形インバージョンの結果(例えば、 引間・他,2015;堀川,2015)とも調和的である。

このときのすべりのピークは、北側セグメントの深部と、南側セグメントの浅部に現れた。北側セグメントの最大すべりは0.83mで、引間・他(2015)のインバージョン結果とも調和的である。ただし、地震モーメントは6.7×10<sup>18</sup> Nm、地表での最大上下変位量は1.25 mとなり、観測された地震モーメント2.9×10<sup>18</sup> Nm(防災科学技術研究所, 2014)や観測された地表上下変位量1.04m(廣内・他, 2015)よりも大きかった。

南側セグメント付近では、1986年に M5.9、1998年に M5.0の地震が発生した。そのため に、北側セグメントに比べて、南側セグメントの応力降下量が小さい可能性があると考え、 地表での最大上下変位量が観測値と調和的になるよう、南側セグメントの応力降下量を探 索した。その結果、南側セグメントの応力降下量を 75%としたとき(図9)、地表での最 大上下変位量が 1.04mとなり、観測値と一致した。しかし、このときの地震モーメントは 5.7×10<sup>18</sup> Nm となり、観測値よりもまだ大きかった。本研究では、南側セグメント全面で 応力降下量を小さくしたが、過去の地震規模が小さいため、断層深部のみの応力降下量を 小さくするなどの検討が必要と考えられる。

	X 4			
上端の深さ	[m]	P波速度	S波速度 [m/s]	密度 [kg/m <sup>3</sup> ]
		[m/s]		
0		4100	2300	2500
2000		5900	3400	2670

表2 本研究で用いた速度構造モデル。



 図7 本研究で用いた断層モデル。(a)断層面展開図(上図)と鉛直断面図(下図)。
 (b)断層モデルと余震分布の地表面投影図(左図)と各領域の断層面(黒実線)に直交 する鉛直断面への投影図(右図)。赤星は震源位置を示す。



図7 (c)余震分布の地表面投影図(左図)と破壊開始点付近の各領域の発震機構解の 低角な節面(黒実線)に直交する鉛直断面への投影図(右図)。



図7 (d)余震分布の地表面投影図(左図)と破壊開始点付近の各領域の発震機構解の 高角な節面(黒実線)に直交する鉛直断面への投影図(右図)。



図8 南北2セグメントが同じ応力条件にある場合のすべり(a)、すべり速度(b)、初期値で規格化した剪断応力(c)、および、初期値で規格化した法線応力(d)のスナップ ショット。時刻10秒のすべり分布図には、各点のすべりベクトルの向きも示す。



図 9 南側セグメントの応力降下量を 75%とした場合のすべり (a)とすべり速度 (b)の スナップショット。時刻 10 秒のすべり分布図には、各点のすべりベクトルの向きも示

2) 動力学的破壊シミュレーションのためのコードの開発と検証

3. 3で示されたような各点の走向、傾斜角が滑らかに変化する断層面上での動力学的 破壊過程を差分法で計算するため、一般座標系を直交座標系に mapping した差分法コード の開発をおこなった。この手法は、2次元問題については井上(1996)、3次元問題で走向 が変化する鉛直断層について Kase and Day (2006)、傾斜角が変化する断層について Kase (2010)、3次元一般断層について Zhang et al. (2014)が適用している。Zhang et al. (2014)では、速度-応力で定式化しているが、本業務では、変位で定式化し、Kase and Day (2006)、Kase (2010) と同様に、Ilan and Loewenthal (1976)の自由表面の定式化を断 層面の定式化に応用することで、計算の安定性を向上させている。

3次元半無限均質弾性体中に断層面があるモデルを考える。自発的な破壊伝播過程を計 算するためには、断層面の境界条件と地表面の自由境界条件を与えて、弾性体の波動方程 式を解くことになる。断層面の境界条件としては、Coulombの破壊条件とすべり弱化の摩 擦構成則(Ida, 1972; Andrews, 1976)を与える。破壊していない領域では、速度と traction のすべての成分が、断層面を挟んで連続である。剪断応力が静摩擦応力(静摩擦係数と法 線応力の積)に達したところでは、すべりが始まり、tractionのすべての成分と、速度の 法線方向成分が断層面を挟んで連続、かつ、すべりと剪断応力はすべり弱化の摩擦構成則 に従い、動摩擦応力(動摩擦係数と法線応力の積)まで低下する。

非平面の断層面を扱うため、直交座標系(*x*, *y*, *z*)中に断層面形状に沿った一般座標系 (ξ, η, ζ)を設定する(図 10)。すると、直交座標系(*x*, *y*, *z*)は、一般座標系(ξ, η, ζ)の関数として

$$x = x(\xi, \eta, \zeta)$$
$$y = y(\xi, \eta, \zeta)$$
$$z = z(\xi, \eta, \zeta)$$

と表現されるので、空間偏微分オペレータは、

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial\xi}{\partial x}\frac{\partial}{\partial\xi} + \frac{\partial\eta}{\partial x}\frac{\partial}{\partial\eta} + \frac{\partial\zeta}{\partial x}\frac{\partial}{\partial\zeta}$$
$$\frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial\xi}{\partial y}\frac{\partial}{\partial\xi} + \frac{\partial\eta}{\partial y}\frac{\partial}{\partial\eta} + \frac{\partial\zeta}{\partial y}\frac{\partial}{\partial\zeta}$$
$$\frac{\partial}{\partial z} = \frac{\partial\xi}{\partial z}\frac{\partial}{\partial\xi} + \frac{\partial\eta}{\partial z}\frac{\partial}{\partial\eta} + \frac{\partial\zeta}{\partial z}\frac{\partial}{\partial\zeta}$$

と変換される。これらのオペレータを用いて、( $\xi$ , $\eta$ , $\zeta$ )を直交座標系へ mapping し、波動方 程式や traction を書き下すことによって、直交座標系で解くことができるようになる。

コードの検証のため、SCEC/USGS spontaneous rupture code verification project (Harris et al., 2009, 2011, 2018) で検証済のコードによる計算結果と比較した。

初めに、均質半無限弾性体にある鉛直横ずれ断層に、深さに依存する初期応力場がはた らく場合の破壊過程(図11a; Harris et al., 2009のTPV8)について、比較をおこなっ た。比較対象としては、Harris et al. (2009)の検証に参加した Kase and Kuge (2001) のコードを用いた。本事業のコードでの計算結果(図11bの赤点線)は、比較対象のコー ドでの計算結果(図11bの黒線)とよく一致している。

次に、均質半無限弾性体にある傾斜角 60°の正断層に、深さに依存する初期応力場がは たらく場合の破壊過程(図 12a; Harris et al., 2009の TPV10)について、比較をおこな った。比較対象としては、Harris et al. (2009)の検証に参加した Kase (2010)のコードを用いた。本事業のコードでの計算結果(図 12b の赤点線)は、比較対象のコードでの計算結果(図 12b の黒線)とよく一致している。



図 10 座標系の mapping のイメージ図。Zhang et al. (2014) に加筆。



図 11 (a) 均質半無限弾性体にある鉛直横ずれ断層に、深さに依存する初期応力場が はたらくモデル (Harris et al., 2009)。(b)破壊時刻(上)と最終すべり量(下)の 比較。黒線はKase and Kuge (2001)のコードでの計算結果、赤点線は本事業のコード での計算結果。



図 12 (a) 均質半無限弾性体にある傾斜角 60°の正断層に、深さに依存する初期応力 場がはたらくモデル (Harris et al., 2009)。(b)破壊時刻(上)と最終すべり量 (下)の比較。黒線はKase (2010)のコードでの計算結果、赤点線は本事業のコード での計算結果。

3) 糸魚川-静岡構造線断層帯中北部区間および中南部区間の連動性

連動可能性を検討する対象として、糸魚川-静岡構造線断層帯中北部区間と中南部区間 をモデル化する。

断層モデル(図13)は、3.1で推定された断層形状を基に、中北部区間は走向N20° Wで長さ34km、中南部区間には屈曲があり、北側は走向N20°Wで長さ5km、南側は走向 N39°Wで長さ21kmとし、中北部区間と中南部区間の境界は、走向方向に2.6km、法線方向 に5.2kmのジョグを形成しているとする。中北部、中南部共に、幅は15kmで、傾斜角は鉛 直とする。

最大主圧縮応力(σ<sub>1</sub>)の向きは、3.3、および、応力テンソルインバージョン結果(文 部科学省研究開発局・他,2010)よりN60°W、大きさは、3.3より

σ<sub>1</sub> = 30.0 z [MPa] (z [km]は深さ)

とした。文部科学省研究開発局・他(2010)より、この地域では横ずれ応力場となっていることから、中間主応力( $\sigma_2$ )は鉛直でかぶり圧に等しいとし、Takeda et al. (2004)に基づき、表3で示す半無限均質構造を仮定すると、

 $\sigma_2 = 26.95 \text{ z [MPa]}$ 

となった。また、最小主圧縮応力(σ<sub>3</sub>)は、応力比(σ<sub>2</sub> - σ<sub>3</sub>)/(σ<sub>1</sub> - σ<sub>3</sub>)が走向 N20<sup>°</sup> Wの領域では 0.39、走向 N39<sup>°</sup> Wの領域では 0.55 であること(文部科学省研究開発局・他, 2010)から、走向 N20<sup>°</sup> Wの領域では

 $\sigma_3 = 25.0 \text{ z [MPa]}$ 

走向 N39° Wの領域では

 $\sigma_3 = 23.22 \text{ z [MPa]}$ 

となった。

破壊開始領域を仮定し、破壊の始まる領域の応力降下量を

 $\Delta \tau = a z [MPa]$ 

として、1回の活動によるすべり量を概ね再現できるような比例係数 a を試行錯誤的に求める。

1回の活動によるすべり量について、地震調査研究推進本部(2015)では、中北部区間 で6~9m程度の左横ずれ、中南部区間で6m程度以上の左横ずれとしている。中北部区 間では、松本盆地東縁断層の豊科高家地点で最新の活動に伴って 7.1±3.6mの左横ずれ (近藤・他, 2019)、島内地点で最新の活動に伴って 6.2~6.9mの左横ずれ(近藤・他,

2006)、牛伏寺断層の並柳地点で最新の活動に伴って 7.5±1.5mの左横ずれ(奥村・他, 1994)が認められている。また、中南部区間では、釜無山断層群の金沢下地点で最新の活動に伴って 2.8~5.2mの左横ずれ(三浦・他, 2001)が認められている。これらの値を満たすようなパラメータを探索することになる。

破壊の始まる領域の応力降下量の比例係数 a を仮定し、静水圧条件が成り立つとすると、 動摩擦係数 ( $\mu_d$ )を決めることができる。更に、破壊の始まる区間での強度と応力降下量 の比 (S値; Andrews, 1976; Das and Aki, 1977)を 1.6 と仮定すると、静摩擦係数 ( $\mu_s$ )が決まる。このときの摩擦係数は、破壊の始まる領域の走向によって異なるが、動摩擦 係数で概ね 0.06~0.17 程度である。

破壊の始まる領域の走向、および、応力降下量の比例係数 a を変えて摩擦係数を求め、

それぞれの領域にはたらく剪断応力、動摩擦応力、静摩擦応力を、それぞれの走向につい て求めたものを図 14 に示す。走向 N20°Wの領域から破壊が始まる場合の走向 N39°Wの 領域のS値は 1.6 より小さく(図 14a)、走向 N39°Wの領域から破壊が始まる場合の走向 N20°Wの領域のS値は 1.6 より大きい(図 14b)。したがって,いずれの領域から破壊が始 まるとしても、走向 N20°Wの領域よりも走向 N39°Wの領域のほうが相対的に破壊しやす い応力場にあることがわかる。

断層面の境界条件には、Coulomb の破壊基準とすべり弱化の摩擦構成則(Ida, 1972; Andrews, 1976)を仮定し、弾性体の運動方程式を数値的に解くことによって、断層面上の 破壊伝播過程を求めた。臨界すべり量(Dc)は、全セグメント共通で 0.50mとした。

数値計算には、差分法(Kase and Kuge, 2001)を用いた。空間グリッド間隔は、断層面 内方向に 200m、断層面外方向に 200m、時間刻みは、0.02 秒とした。

上記の条件で、破壊開始領域および応力降下量の比例係数 a を変えて数値計算をおこ ない、実際の1回の活動によるすべり量と調和的になる a を探索した。

中北部区間北端から破壊が始まる場合、応力降下量が 0.7z [MPa]以上で、中北部区間全体に破壊が広がるようになる (図 15a)。このとき、地表のすべり量は最大でも3m以下で、 中北部区間の3地点での1回の活動によるすべり量を満たすことはできない。応力降下量が1.1z [MPa]になると、中北部区間と中南部区間が連動するようになり、中南部区間の金沢下地点での1回の活動によるすべり量を満たす(図 15b)。応力降下量が1.4z [MPa]になると、中北部区間の豊科高家地点でも1回の活動によるすべり量を満たすようになり(図 15c)、応力降下量が1.8z [MPa]になると、更に、中北部区間の並柳地点でも1回の活動によるすべり量を満たすようになる(図 15c)。したがって、4地点すべてで1回の活動によるすべり量を満たすことはできない。しかし、このとき、中北部区間の島内地点の1回の活動によるすべり量を満たすことは可能である。 ただし、この場合の平均の応力降下量は15.0 [MPa]、Mo 1.2×10<sup>20</sup> [Nm]、Mw7.3 となり、長さ34kmの断層面積に比して地震モーメントが大きすぎることに注意が必要である。

中北部区間南端から破壊が始まる場合、応力降下量が 0.7z [MPa]以上で、中北部区間全体に破壊が広がるようになる(図 16a)。中北部北端から破壊が始まる場合と同様、中北部区間の3地点での1回の活動によるすべり量を満たすことはできない。応力降下量が 1.3z [MPa]になると、中北部区間と中南部区間が連動するようになり、中北部区間の豊科高家地点と中南部区間の金沢下地点での1回の活動によるすべり量を満たす(図 16b)。応力降下量が 1.7z [MPa]以上になると、中北部区間の破壊が S 波速度以上で伝播するようになり、中南部区間が連動しなくなる(図 16c)。応力降下量が 1.8z [MPa]になると、中北部区間の 並柳地点でも1回の活動によるすべり量を満たすようになる(図 16d)。更に、応力降下量が 2.0z [MPa]になると、中北部区間の島内地点の1回の活動によるすべり量を満たすようになり、

中北部区間南端から破壊が始まる場合の方が、北端から破壊が始まる場合よりも連動し にくいのは、破壊がある程度以上の距離を伝播してくることによって、別の断層に乗り移 りやすくなるディレクティビティ効果が現れていると解釈できる。 中南部区間北端から破壊が始まる場合、応力降下量が 0.4z [MPa]以上で、中南部区間全体に破壊が広がるようになる(図 17a)。このとき、中南部区間の破壊は、S波速度以上で伝播する。これは、中南部区間の北側は走向 N20°Wで、南側は走向 N39°Wであり、南側は相対的に破壊しやすいためである。地表のすべり量は最大でも 2.5m以下で、中南部区間の1地点での1回の活動によるすべり量を満たすことはできない。応力降下量が 1.0z [MPa]になると、中南部区間の金沢下地点での1回の活動によるすべり量を満たす(図 17b)。応力降下量が 2.0z [MPa]までの範囲では、中北部区間が連動することはない(図 17c)。

中南部区間北端から破壊が始まる場合は、中南部区間の形状から、中南部区間南側の応 力降下量が相対的に大きく、すべり量が大きくなりやすいため、中北部区間に与える応力 変化も大きくなるものの、中北部区間は相対的に破壊しにくい応力状態にあるため、連動 できないと考えられる。

中南部区間南端から破壊が始まる場合、応力降下量が 0.7z [MPa]以上で、中南部区間の 走向 N39°Wの領域全体に破壊が広がるようになる(図 18a)。中南部区間北端から破壊が 始まる場合と同様、中南部区間の1地点での1回の活動によるすべり量を満たすことはで きない。応力降下量が1.1z [MPa]になると、中南部区間全体に破壊が広がるようになるが、 中南部区間の1地点での1回の活動によるすべり量を満たすことはできない(図 18b)。応 力降下量が 1.4z [MPa]になると、中南部区間の金沢下地点での1回の活動によるすべり量 を満たすようになる(図 18c)。応力降下量が 1.6z [MPa]以上になると、中南部区間の破壊 がS波速度以上で伝播するようになる(図 18d)。応力降下量が 2.0z [MPa]までの範囲で は、中北部区間が連動することはない(図 18e)。

中南部区間南端から破壊が始まる場合、中北部区間北端から破壊が始まる場合と同様にデ イレクティビティ効果が期待できるにもかかわらず、中北部区間は連動しない。中南部区 間南端から始まった破壊は、中南部区間北側の走向 N20°Wの領域に到達すると応力降下 量が小さくなり、すべり量が小さめになる。更に、中北区間部の走向は N20°W であるた め、中南部区間よりも破壊しにくい応力状態にあるため、連動できないと考えられる。

362





図 13 本研究で用いた断層モデル。基図は、電子国土 web で作成。



図 14 初期剪断応力(実線)、初期静摩擦応力(破線)、初期動摩擦応力(点線)の動 摩擦係数(μ<sub>d</sub>)の値に対する変化。応力降下量の比例係数 a の値が 0.5~2.0 の範囲で の結果を示す。黒細線は走向 N20°Wの領域、赤太線は走向 N39°Wの領域にはたらく応 力。(a)走向 N20°Wの領域から破壊が始まる場合。(b)走向 N39°Wの領域から破壊が 始まる場合。



図 15 中北部北端から破壊が始まる場合の破壊過程の例。それぞれ、下段が断層面上 の破壊時刻、中段が断層面上のすべり量、上段の赤線が地表でのすべりの分布,緑線 が実際の1回の活動によるすべり量の範囲を示す。(a)応力降下量の比例係数が0.7の 場合。(b)応力降下量の比例係数が1.1の場合。(c)応力降下量の比例係数が1.4の場 合。(d)応力降下量の比例係数が1.8の場合。(e)応力降下量の比例係数が2.0の場



図 16 中北部南端から破壊が始まる場合の破壊過程の例。図の詳細は、図 15 と同じ。 (a)応力降下量の比例係数が 0.7 の場合。(b)応力降下量の比例係数が 1.3 の場合。(c) 応力降下量の比例係数が 1.7 の場合。(d)応力降下量の比例係数が 1.8 の場合。(e)応 力降下量の比例係数が 2.0 の場合。



図 17 中南部北端から破壊が始まる場合の破壊過程の例。図の詳細は、図 15 と同じ。
 (a)応力降下量の比例係数が 0.4 の場合。(b)応力降下量の比例係数が 1.0 の場合。
 (c)応力降下量の比例係数が 2.0 の場合。



図 18 中南部南端から破壊が始まる場合の破壊過程の例。図の詳細は、図 15 と同じ。 (a)応力降下量の比例係数が 0.7 の場合。(b)応力降下量の比例係数が 1.1 の場合。 (c)応力降下量の比例係数が 1.4 の場合。(d)応力降下量の比例係数が 1.6 の場合。 (e)応力降下量の比例係数が 2.0 の場合。

(c) 結論ならびに今後の課題

初めに、2014年長野県北部の地震の動力学的震源モデルを構築し、周辺断層との相互作用 を検討した。南北2枚のセグメントと破壊開始点となる鉛直なセグメントの3面からなる単 純な断層モデルで、強震波形インバージョン結果と概ね調和する破壊の伝播過程と最大すべ りを再現できた。また、過去の活動履歴を考慮して南側セグメントの応力降下量を小さくす ることで、観察された地表での最大上下変位量を説明することもでき、各断層面の活動履歴 を考慮する必要性を示した。ただし、全体の地震モーメントはやや大きめに計算されるため、 南側セグメントの応力降下量の与え方に、更なる工夫が必要である。

続いて、糸魚川ー静岡構造線断層帯北部〜中南部区間を対象としたシミュレーションをお こなうため、各断層面の走向と傾斜角を反映できるよう、一般座標系を直交座標系にmappin gする手法を用いて、シミュレーションに用いるコードを改良した。コードの検証として、均 質半無限弾性体にある鉛直横ずれ断層、および、傾斜角60°の正断層に、深さに依存する初 期応力場がはたらく場合の破壊過程について、検証済のコードによる計算結果と比較し、本 事業で開発したコードでの計算結果がよく一致していることを確認した。

最後に、糸魚川-静岡構造線断層帯北部~中南部区間のうち、中北部区間と中南部区間を 対象として、震源モデルを構築し、連動可能性を検討した。中北部区間北端、もしくは、南 端から破壊が始まる場合には、中北部区間と中南部区間が連動する可能性がある。しかし、 連動する場合でも、1回の活動によるすべり量を観測量のある4地点すべてで満たすために は、相当大きな応力降下量を設定する必要があり、断層面積に比して、地震モーメントが大 きくなりすぎる。そのため、得られている観測量は、より広い範囲での、すなわち、北部区 間や南部区間も含めた連動によるすべり量であることを検討する必要がある可能性がある。 そのためには、一般座標系コードの検証およびシミュレーションが更に必要である。

謝辞:図はGeneric Mapping Tool version 5.4.4 (Wessel et al., 2013) で作成しました。

(d) 引用文献

- Ando, R., K. Imanishi, Y. Panayotopoulos, and T. Kobayashi, Dynamic rupture propagation on geometrically complex fault with along-strike variation of fault maturity: insights from the 2014 Northern Nagano earthquake, Earth Planets Space, 69, doi:10.1186/s40623-017-0715-2, 2017.
- Andrews, D.J., Rupture velocity of plane strain shear cracks, J. Geophys. Res, 81, 5679-5687, 1976.
- Das, S. and K. Aki, A numerical study of two-dimensional spontaneous rupture propagation, Geophys. J. R. Astro., 50, 643-668, 1977.

防災科学技術研究所, 2014年11月22日長野県北部の地震(F-netによるメカニズム解), http://www.hinet.bosai.go.jp/topics/n-nagano141122/?LANG=ja&m=mecha, 2014.

Harris, R.A., M. Barall, R. Archuleta, E. Dunham, B. Aagaard, J.P. Ampuero, H. Bhat, V. Cruz-Atienza, L. Dalguer, P. Dawson, S. Day, B. Duan, G. Ely, Y. Kaneko, Y. Kase, N. Lapusta, Y. Liu, S. Ma, D. Oglesby, K. Olsen, A. Pitarka, S. Song, and E. Templeton, The SCEC/USGS dynamic earthquake rupture code verification exercise, Seism. Res. Let., 80, 119-126, doi:10.1785/gssrl.80.1.119, 2009.

- Harris, R.A., M. Barall, D.J. Andrews, B. Duan, S. Ma, E.M. Dunham, A.-A. Gabriel,
  Y. Kaneko, Y. Kase, B.T. Aagaard, D.D. Oglesby, J.-P. Ampuero, T.C. Hanks, and
  N. Abrahamson, Verifying a computational method for predicting extreme ground
  motion, Seism. Res. Let., 82, 638-644, doi:10.1785/gssrl.82.5.638, 2011.
- Harris, R.A., M. Barall, B. Aagaard, S. Ma, D. Roten, K. Olsen, B. Duan, D. Liu, B. Luo, K. Bai, J.-P. Ampuero, Y. Kaneko, A.-A. Gabriel, K. Duru, T. Ulrich, S. Wollherr, Z. Shi, E. Dunham, S. Bydlon, Z. Zhang, X. Chen, S.N. Somala, C. Pelties, J. Tago, V.M. Cruz-Atienza, J. Kozdon, E. Daub, K. Aslam, Y. Kase, K. Withers, and L. Dalguer, A suite of exercises for verifying dynamic earthquake rupture codes, Seism. Res. Let., 89, 1146-1162, doi:10.1785/0220170222, 2018. 引間和人・中村亮一・植竹富一, 2014年長野県北部の地震 (M<sub>1</sub>6.7)の震源過程~震源近傍
- の広帯域地震波形を考慮した解析~,日本地震学会2015年度秋季大会,S15-14,2015. 廣内大助・松多信尚・杉戸信彦・熊原康博・石黒聡士・金田平太郎・後藤秀昭・楮原京子・ 中田高・鈴木康弘・渡辺満久・澤祥・宮内崇裕,2014年神城断層地震変動地形調査グル ープ,糸魚川ー静岡構造線北部に出現した2014年長野県北部の地震(神城断層地震) の地表地震断層,活断層研究,43,149-162,2015.
- 堀川晴央, 断層近傍の強震記録から推定される 2014 年の長野県北部の地震の破壊過程(その2), 日本地震学会 2015 年度秋季大会, S08-P17, 2015.
- Ida, Y., Cohesive force across the tip of a longitudinal-shear crack and Griffith's specific surface energy, J. Geophys. Res., 77, 3796-3805, 1972.

Ilan, A. and D. Loewenthal, Instability of finite difference schemes due to boundary conditions in elastic media, Geophys. Prospect., 24, 431-453, 1976.

今西和俊・内出崇彦,2014年長野県北部の地震の前震と余震の震源パラメータの特徴,日本地球惑星科学連合2015年大会,SSS30-11,2015.

井上智広,動力学的モデルによる断層近傍の強震動分布予測,東京大学修士論文,1996. 地震調査研究推進本部,糸魚川-静岡構造線断層帯の長期評価(第二版),60p,2015.

- Kase, Y. and K. Kuge, Rupture propagation beyond fault discontinuities: significance of fault strike and location, Geophys. J. Int., 147, 330-342, 2001.
- Kase, Y. and S. M. Day, Spontaneous rupture processes on a bending fault, Geophys. Res. Let., 33, L10302, 2006.
- Kase, Y., Slip-length scaling law for strike-slip multiple segment earthquakes based on dynamic rupture simulations, Bull. Seism. Soc. Am., 100, 473-481, 2010.
- 勝部亜矢・近藤久雄・谷口薫・加瀬祐子,2014 年長野県北部の地震(Mw6.2)に伴う地表地 震断層の分布と変位量,地質学雑誌,123,1-21,2017.

気象庁, 地震月報(カタログ編) 2014年11月, 2014.

- 近藤久雄・遠田晋次・奥村晃史・高田圭太,糸魚川-静岡構造線活断層系・松本盆地東縁 断層南部に沿う左横ずれ変位地形,地学雑誌,115,208-220,2006.
- 近藤久雄・木村治夫・杉戸信彦・下釜耕太・佐伯健太郎・川島裕貴・亀高正男・高岡宏之,
- 糸魚川-静岡構造線断層帯・松本盆地東縁断層南部における最新活動時期と横ずれ変位 量,日本活断層学会 2019 年度秋季学術大会,0-7,2019.
- 三浦大助・幡谷竜太・宮腰勝義・井上大栄・小俣雅志・宮脇明子・田中竹延・宮脇理一郎,
- 糸魚川-静岡構造線活断層系中部の最近の断層活動(その2)-釜無山断層群金沢下ト レンチ調査結果-,地球惑星科学関連学会合同大会,Jm-P012,2001.
- 文部科学省研究開発局・国土交通省国土地理院・東京大学地震研究所,糸魚川-静岡構造線断層帯における重点的な調査観測平成17~21年度成果報告書,362p,2010.
- 奥村晃史・下川浩一・山崎晴雄・佃栄吉,糸魚川-静岡構造線活断層系の最近の地震活動 -牛伏寺断層・松本市並柳地区トレンチ発掘調査-,地震第2輯,46,425-438,1994.
- Panayotopoulos, Y., N. Hirata, A. Hashima, T. Iwasaki, S. Sakai, and H. Sato, Seismological evidence of an active footwall shortcut thrust in the Northern Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line derived by the aftershock sequence of the 2014 M6.7 Northern Nagano earthquake, Tectonophysics, 679, 15-28, 2016.
- Takeda, T, H. Sato, T. Iwasaki, N. Matsuta, S. Sakai, T. Iidaka, and A. Kato, Crustal structure in the northern Fossa Magna region, central Japan, modeled from refraction/wide-angle reflection data, Earth Planets Space, 56, 1293-1299, 2004.
- Tanaka, Y., State of crustal stress inferred from in situ stress measurements, J. Phys. Earth, 34, S57-S70, 1986.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith, New, improved version of the Generic Mapping Tools released, EOS Trans. AGU, 79, 579, 1998.
- 矢来博司・小林友勝・森下遊・山田晋也・飛田幹男, ALOS-2の SAR 干渉解析で捉えられた 長野県北部の地震の地殻変動,日本地球惑星科学連合 2015 年大会,STT54-02, 2015.
- Zhang, Z., W. Zhang, and X. Chen, Three-dimensional curved grid finite-difference modelling for non-planar rupture dynamics, Geophys. J. Int., 199, 860-879, doi:10.1093/gji/ggu308, 2014.