

3. 3 活動履歴を考慮した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 活動履歴を考慮した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
国立研究開発法人 産業技術総合研究所	主任研究員	浦田 優美

(c) 業務の目的

活動履歴や地震時変位量等を考慮した動的破壊シミュレーションについて、エネルギー収支による連動可能性のスクリーニングとともに実施し、連動可能性とその条件を検討する。

(d) 年度毎の実施業務の要約

1) 令和5年度：

最新活動の地震後経過時間と地震時変位量を説明できる震源モデルを推定した。

2) 令和6年度：

前年度の成果等を基に、次の活動で起こり得る震源モデルのプロトタイプを検討する。

3) 令和7年度：

本課題で得られた成果等を基に、最新活動の震源モデルを見直すとともに、次の活動で起こり得る連動のパターンを検討する。

(2) 令和5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、中央構造線断層帯讃岐山脈南縁東部区間、同西部区間、石鎚山脈北縁区間、同西部区間を対象として、活動履歴の情報を基に、最新活動直前の応力場を推定し、これを反映した動的破壊シミュレーションをおこなった。その結果、破壊開始点の位置と各区間の最新活動直前の地震後経過率によって、5つの連動パターンが得られ、変位履歴と調和的なパターンとして、讃岐山脈南縁東部区間と同西部区間が連動するパターン、および、石鎚山脈北縁区間と同西部区間が連動するパターンが得られた。

(b) 業務の成果

1) 断層モデル

断層モデルと媒質モデルは、文部科学省・産業技術総合研究所（2023）に従い、以下の

ように決定した。

断層モデル各区間の走向と長さは、都市圏活断層図（後藤・他，1998；中田・他，1998；岡田・他，1998；堤・他，1998；後藤・他，1999；中田・他，1999；岡田・他，1999；堤・他，1999；中田・他，2009；岡田・他，2009；岡田・他，2014）を基に決定した（図1）。

傾斜角について、地震調査研究推進本部（2017）では、中角度と高角度を併記しているが、文部科学省・産業技術総合研究所（2023）を参考に、高角度（鉛直）の場合のみを扱うこととした。また、断層幅を 20km とした。以上のように決定した断層モデルの各パラメータを、表1にまとめる。

媒質は和泉層群、三波川変成岩、四万十帯の水平3層構造とし、伊藤・他（1996）、Ito et al.（1996）、Nakajima and Hasegawa（2007）の紀伊半島・中国四国地方のモデル、文部科学省・東京大学地震研究所（2020）、日本列島基盤岩類物性データベース（大熊・金谷，2007）を参考に、表2のように仮定した。

2) 広域応力場モデル

広域応力場の最大主圧縮応力（ σ_1 ）および最小主圧縮応力（ σ_3 ）の向きは、全国 0.2° メッシュ応力方位データ（Uchide et al., 2022；文部科学省・産業技術総合研究所，2023）の σ_1 の向きを断層走向に沿ってスムージングし、それに直交する方位を σ_3 の向きとした。

最大主圧縮応力（ σ_1 ）の大きさは、応力測定データ（Tanaka，1986；斎藤・他，1988）より、

$$\sigma_1 = 34.0 z \text{ [MPa]}$$

とした。ただし、 z [km] は深さである。最小主圧縮応力（ σ_3 ）は応力方位データ（Uchide et al., 2022）の応力比の値から求めた。また、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（ σ_2 ）は鉛直でかぶり圧に等しいとした。これら広域応力場と断層形状から、断層面各点での初期剪断応力と法線応力が得られる。

破壊の始まる領域の応力降下量の深さプロファイルは、深さ 10km まで深さに比例して増え、10km 以深では深さとともに減少し、15km で応力降下量はゼロとなり、15km 以深では負の応力降下量となる、とした。また、臨界すべり量（ D_c ）は、深さ 1 km まで深さとともに減少し、1～10km では一定値で、10km 以深では深さとともに増加すると仮定した。このような仮定の下、深さ 10km までの応力降下量の比例定数の値を変えて予備的な計算をおこない、断層長と地表のすべり量のスケーリング則（松田・他，1980）を満たすプロファイルを探索した結果、応力降下量の比例定数として、1.46 を得た。

3) 最新活動直前の応力場モデル

1)、2) で設定した断層形状と広域応力場モデルから得られる「現在」の応力場と、断層の活動履歴に関する情報から、「最新活動直前」の応力場モデルを構築する。ここでは、加瀬・関口（2018）が地震動予測のための地震シナリオ作成に用いた方法を応用した。

活動履歴に関するパラメータは、地震調査研究推進本部（2017）の長期評価による値を基とした（表3）。最新活動時期が西暦 1600 年より新しいことはないと仮定し、平均活動間隔と最新の 1 つ前の活動の年代について、それぞれ 100 年刻みで組み合わせ、最新活動時期が履歴と合致する、もしくは、最も近くなる組み合わせを抽出した。最新の 1 つ前の

活動時期に平均活動間隔を加えた年代が最も古い区間から最新活動の破壊が始まると考えると、最新活動の破壊が始まりうる区間は、石鎚山脈北縁西部区間、讃岐山脈南縁西部区間、同東部区間となった。更に、破壊開始点は、破壊が始まりうる区間の両端いずれかと考えると、最新活動直前の応力場モデルを 56 通り作成することとなった。

破壊が終了した時点で、剪断応力は動摩擦応力に戻ると考えると、動摩擦応力は、「現在」の剪断応力から、応力降下量に「現在」の地震後経過率を乗じたものを引いた値となる。これを法線応力で割ったものを、動摩擦係数 (μ_d) とした。その値は、破壊の始まる領域の走向によって異なるが、概ね 0.2~0.5 程度となった。更に、破壊開始点での強度と応力降下量の比 (S 値; Andrews, 1976; Das and Aki, 1977) を 1.3 と仮定して静摩擦係数 (μ_s) を求め、ここでの動摩擦係数との差 (モデル毎に一定値で、0.10~0.13) を、各点の動摩擦係数に足した値を、各点の静摩擦係数とした。このときの破壊の始まる領域の応力に関するパラメータの深さプロファイルを図 2 に示す。

4) 断層面の境界条件

断層面の境界条件には、Coulomb の破壊基準とすべり弱化的摩擦構成則 (図 3; 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。また、断層面上で一様な cohesion を考慮し、内田・他 (2002)、古谷 (2015) を参考に、0.02MPa と仮定した。

5) 数値計算手法

数値計算には、差分法 (Kase and Day, 2006) 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、0.01 秒とした。

上記の条件で、破壊開始領域を変えて数値計算をおこない、得られたすべり量分布と、実際の 1 回の活動によるすべり量を比較した。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 (2017) では、讃岐山脈南縁東部区間で 2~7 m 程度の右横ずれ、讃岐山脈南縁西部区間で 2~7 m 程度の右横ずれ、石鎚山脈北縁区間で 6~8 m 程度の右横ずれ、石鎚山脈北縁西部区間で 2~5 m 程度の右横ずれ、としている。また、最新活動に伴うすべり量分布については、堤・後藤 (2006) にまとめられている値を用いた。

6) シミュレーション結果

最新活動直前の応力場モデルを 56 通りについて、動的破壊シミュレーションをおこなった結果、破壊開始点の位置と各区間の最新活動直前の地震後経過率によって、以下の 5 通りの連動パターンを得た (図 4)。

4 区間すべてが連動：石鎚山脈北縁西部区間西端から破壊し、石鎚山脈北縁区間の最新活動直前の地震後経過率が 0.87 以上のモデル、讃岐山脈南縁西部区間東端から破壊し、石鎚山脈北縁西部区間の最新活動直前の地震後経過率が 1.0 のモデル、および、讃岐山脈南縁東部区間東端から破壊し、讃岐山脈南縁西部区間の最新活動直前の地震後経過率が 1.0、かつ、石鎚山脈北縁西部区間の最新活動直前の地震後経過率が 0.92 以上のモデルで、この連動パターンが得られた。このときの M_w は、7.5~7.6 であった。

石鎚山脈北縁区間、讃岐山脈南縁西部区間、同東部区間の 3 区間が連動：讃岐山脈南縁

西部区間東端から破壊し、石鎚山脈北縁西部区間の最新活動直前の地震後経過率が 0.92 以下のモデル、讃岐山脈南縁東部区間西端から破壊するモデル、および、讃岐山脈南縁東部区間東端から破壊し、讃岐山脈南縁西部区間の最新活動直前の地震後経過率が 0.92 以下、もしくは、石鎚山脈北縁西部区間の最新活動直前の地震後経過率が 0.88 以下のモデルで、この連動パターンが得られた。このときの M_w は、7.4~7.5 であった。

石鎚山脈北縁西部区間と石鎚山脈北縁区間が連動：石鎚山脈北縁西部区間西端から破壊し、石鎚山脈北縁区間の最新活動直前の地震後経過率が 0.80 以下のモデルで、この連動パターンが得られた。このときの M_w は、7.1 であった。

讃岐山脈南縁西部区間と讃岐山脈南縁東部区間が連動：讃岐山脈南縁西部区間西端から破壊するモデルで、この連動パターンが得られた。このときの M_w は、7.5 であった。

石鎚山脈北縁西部区間のみが破壊：石鎚山脈北縁西部区間東端から破壊するモデルで、この連動パターンが得られた。このときの M_w は、7.1 であった。

上記 5 通りの連動パターンのうち、変位履歴（サブテーマ 1-1）と調和的なシミュレーション結果は、石鎚山脈北縁西部区間と石鎚山脈北縁区間が連動する場合、および、讃岐山脈南縁西部区間と讃岐山脈南縁東部区間が連動する場合、の 2 通りである。これらのモデルの変位履歴に関するパラメータについて、表 4 にまとめる。

石鎚山脈北縁区間の最新活動直前の地震後経過率が、他の 3 区間に比べて低いため、この区間が連動するか、また、連動した場合には、隣の区間（石鎚山脈北縁西部区間、もしくは、讃岐山脈南縁西部区間）を連動させられるかが、連動のパターンを決める要素となっている。また、石鎚山脈北縁西部区間、石鎚山脈北縁区間、讃岐山脈南縁西部区間の 3 区間が短距離でオーバーラップしているため（図 1）、隣り合う区間だけではなく、更に 1 つ先の区間、すなわち、石鎚山脈北縁西部区間と讃岐山脈南縁西部区間の相互作用も連動に影響することが、連動のパターンを複雑にしている。そのため、モデルにより、最新活動直前の地震後経過率が 1.0 の区間が連動しなかったり、1.0 未満の区間が連動したりしており、最新活動直前の地震後経過率が 1.0 未満の区間の取扱に注意が必要であることがわかる。

表 1 本研究で用いた断層モデルのパラメータ。讃岐山脈南縁東部区間と同西部区間の間は、幅 0.6km の左ステップで長さ 0.6km のギャップで、讃岐山脈南縁西部区間と石鎚山脈北縁区間の間は、幅 1.4km の右ステップで長さ 17.4km のオーバーラップで、石鎚山脈北縁区間と同西部区間の間は、幅 1.8km の右ステップで長さ 11.4km のオーバーラップで区切られている。

区間名	讃岐山脈南縁西部 (Sanuki W.)				讃岐山脈南縁東部 (Sanuki E.)
走向	N71.8°E	N84.2°E	N72.9°E	N80.8°E	N77.3°E
長さ [km]	22.4	11.0	23.4	24.6	52.2
傾斜角		90°			90°
地震発生層の深さ [km]		20			20
幅 [km]		20			20

区間名	石鎚山脈北縁西部 (Ishizuchi W.)			石鎚山脈北縁 (Ishizuchi)
走向	N74.4°E	N60.2°E	N71.8°E	N71.8°E
長さ [km]	15.6	14.8	11.4	28.0
傾斜角		90°		90°
地震発生層の深さ [km]		20		20
幅 [km]		20		20

表 2 本研究で用いた速度構造モデル。

上端の深さ [m]	P 波速度 [m/s]	S 波速度 [m/s]	密度 [kg/m ³]
0	3000	1700	2450
1000	5800	3000	2650
6000	6100	3600	2680

表 3 区間ごとの活動履歴を考慮した場合に用いた活動履歴の数値。

区間名	石鎚山脈北縁西部 (Ishizuchi W.)	石鎚山脈北縁 (Ishizuchi)	讃岐山脈南縁西部 (Sanuki W.)	讃岐山脈南縁東部 (Sanuki E.)
平均活動間隔 [年]	700～1300	1500～1800	1100～1500	900～1200
1 つ前の 活動の 活動時期 [年]	0～800	200～1500	400～900	0～300
最新活動時期 [年]	1400～1600	1400～1600	1500～1600	1500～1600

表 4 変位履歴と調和的なモデルのパラメータセット。

(a) 石鎚山脈北縁西部区間と石鎚山脈北縁区間が連動するモデル。

区間名	石鎚山脈北縁西部 (Ishizuchi W.)		石鎚山脈北縁 (Ishizuchi)	讃岐山脈南縁西部 (Sanuki W.)			讃岐山脈南縁 東部 (Sanuki E.)
平均活動 間隔 [年]	1300	700	1500	1100	1200	1000	1200
1 つ前の 活動の 活動時期 [年]	100	700	200	400	400	600	300
最新活動 時期[年]	1400	1400	1700	1500	1600	1600	1500

(b) 讃岐山脈南縁西部区間と同東部区間が連動するモデル。

区間名	石鎚山脈北縁西部 (Ishizuchi W.)				石鎚山脈北縁 (Ishizuchi)	讃岐山脈 南縁西部 (Sanuki W.)	讃岐山脈 南縁東部 (Sanuki E.)
平均活動 間隔 [年]	700	1300	1300	800	1500	1100	1200
1 つ前の 活動の 活動時期 [年]	800	200	300	800	200	400	300
最新活動 時期[年]	1500	1500	1600	1600	1700	1500	1500



図1 本研究で用いた断層モデル。地理院地図（国土地理院）に加筆。

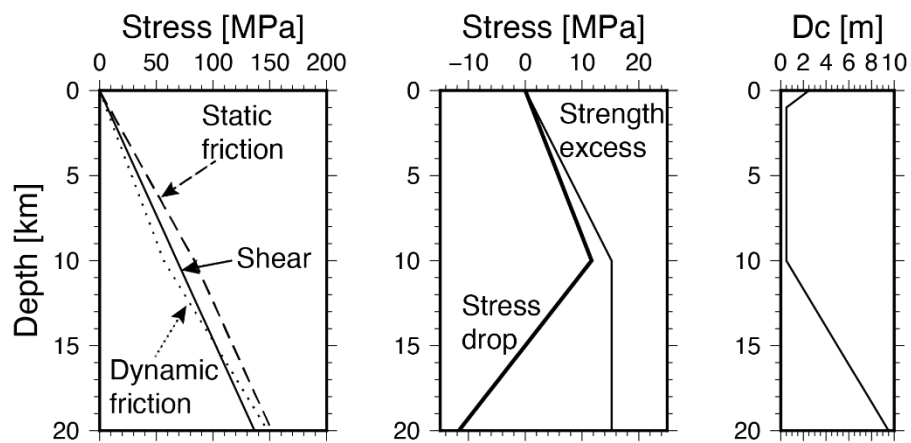


図2 本研究で用いた応力場モデルの深さプロファイル。

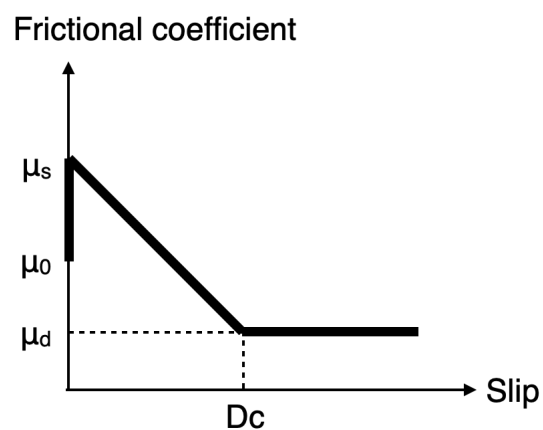


図3 本研究で用いたすべり弱化的摩擦構成則。 μ_0 は摩擦係数の初期値で、初期剪断応力を法線応力で割った値である。

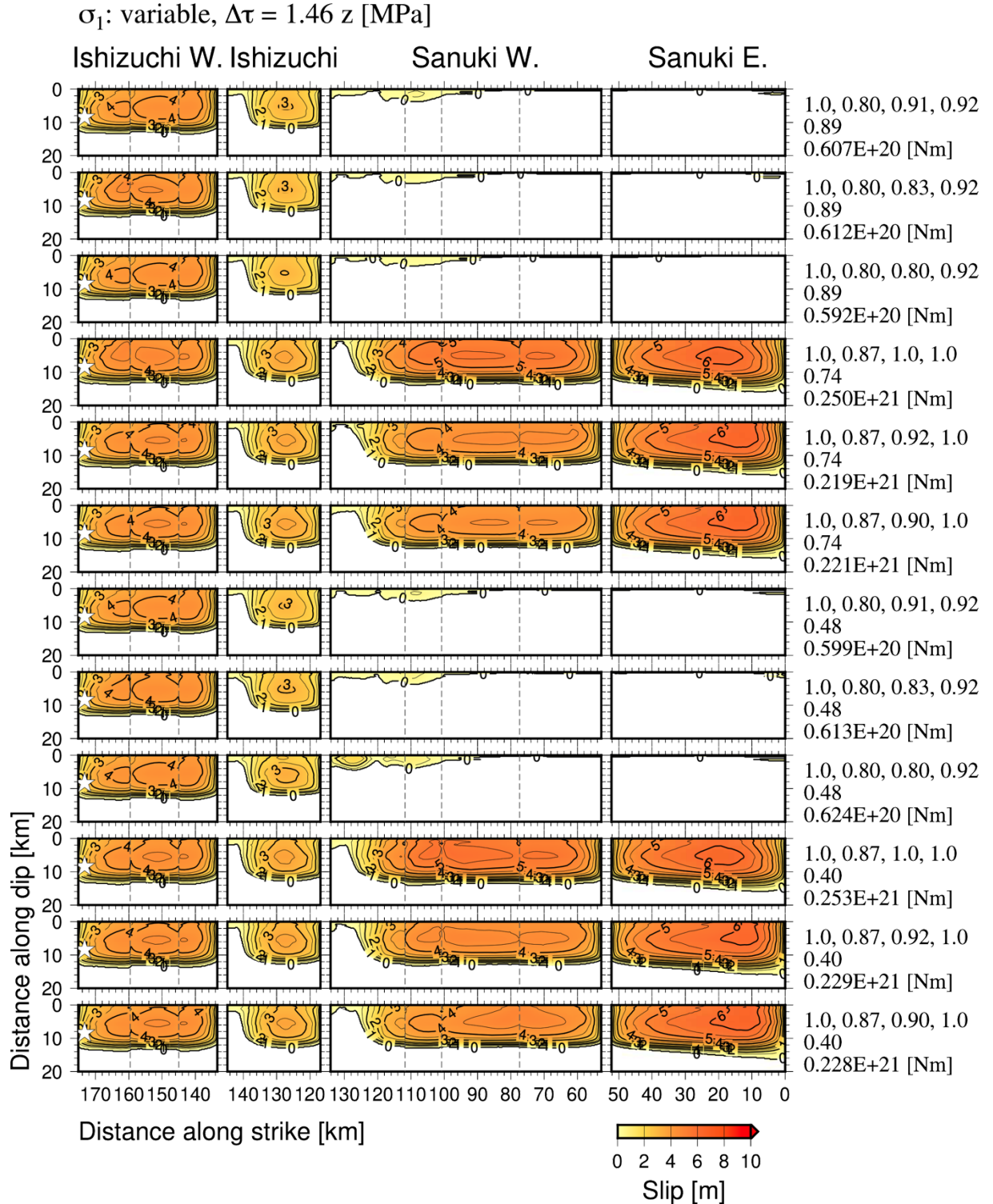


図4 最新活動として推定されるすべり分布。右端の数値は、上から、それぞれの区間の最新イベント直前の地震後経過率（左から、石鎚山脈北縁西部区間、石鎚山脈北縁区間、讃岐山脈南縁西部区間、讃岐山脈南縁東部区間の値）、現在の地震後経過率、地震モーメントを示す。(a) 石鎚山脈北縁西部区間西端に破壊開始領域（星印）が仮定される場合。

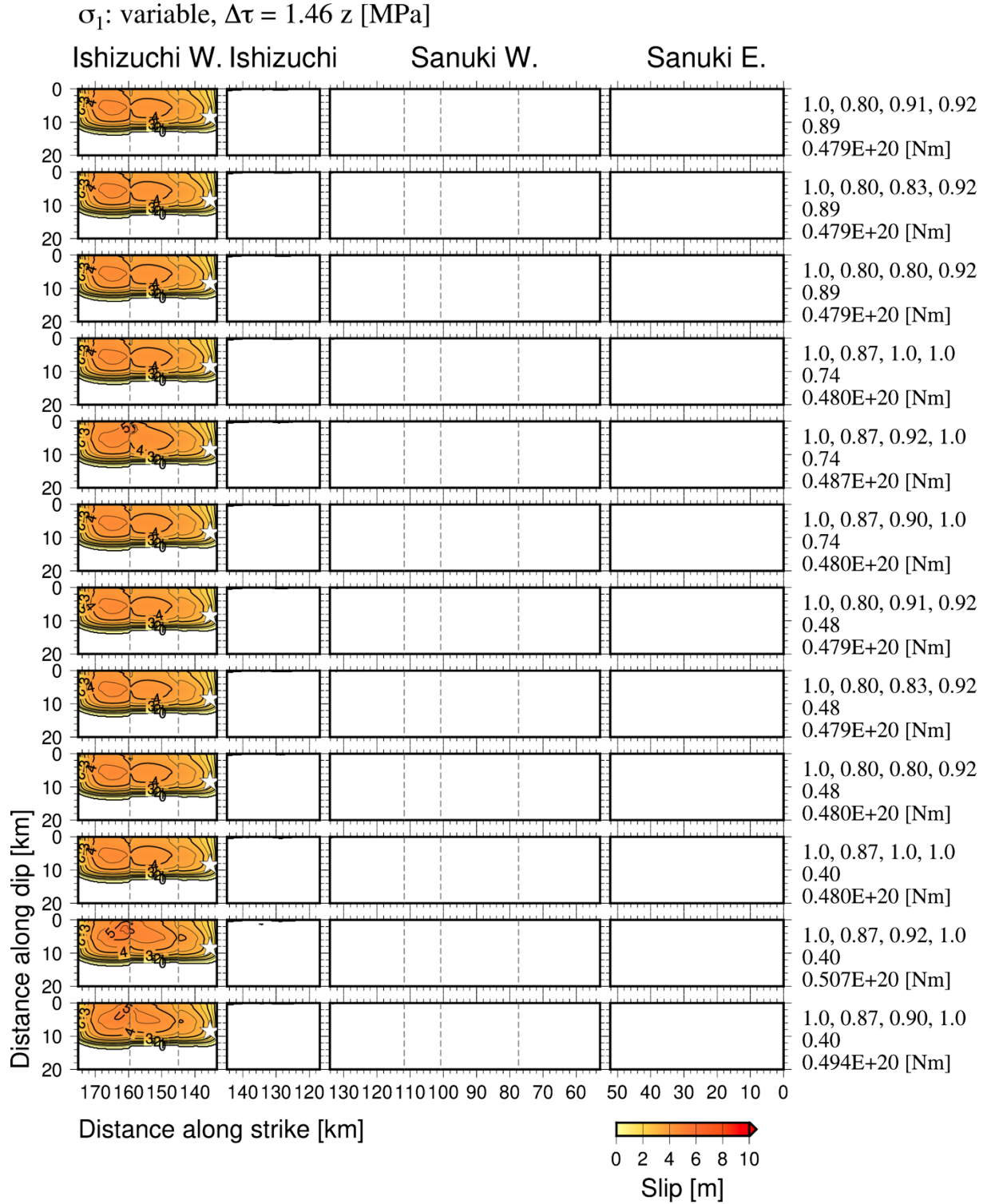


図4 (b) 石鎚山脈北縁西部区間東端に破壊開始領域（星印）が仮定される場合。

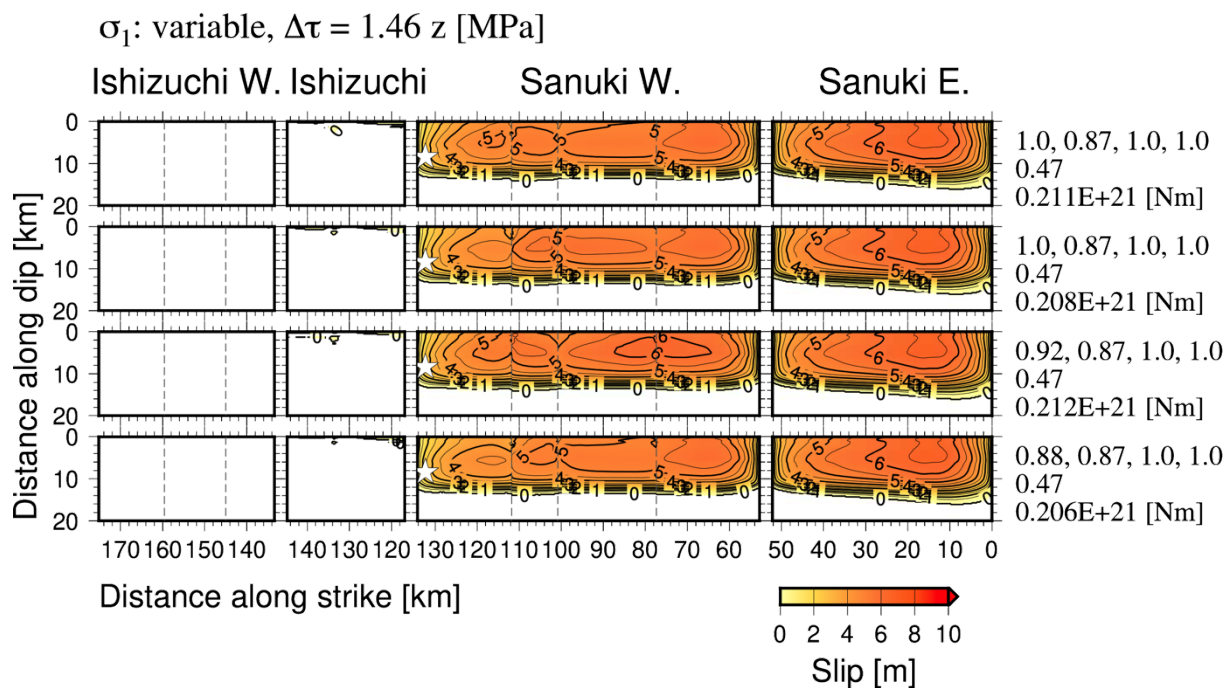


図4 (c) 讃岐山脈南縁西部区間西端に破壊開始領域（星印）が仮定される場合。

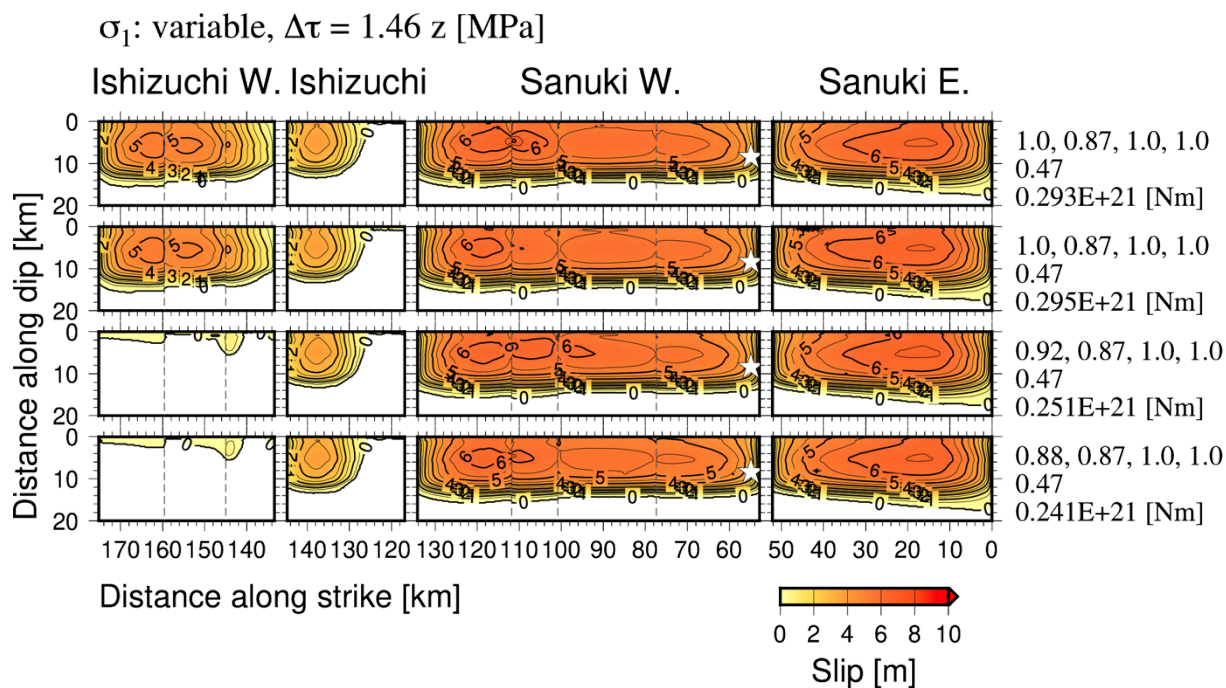


図4 (d) 讃岐山脈南縁西部区間東端に破壊開始領域（星印）が仮定される場合。

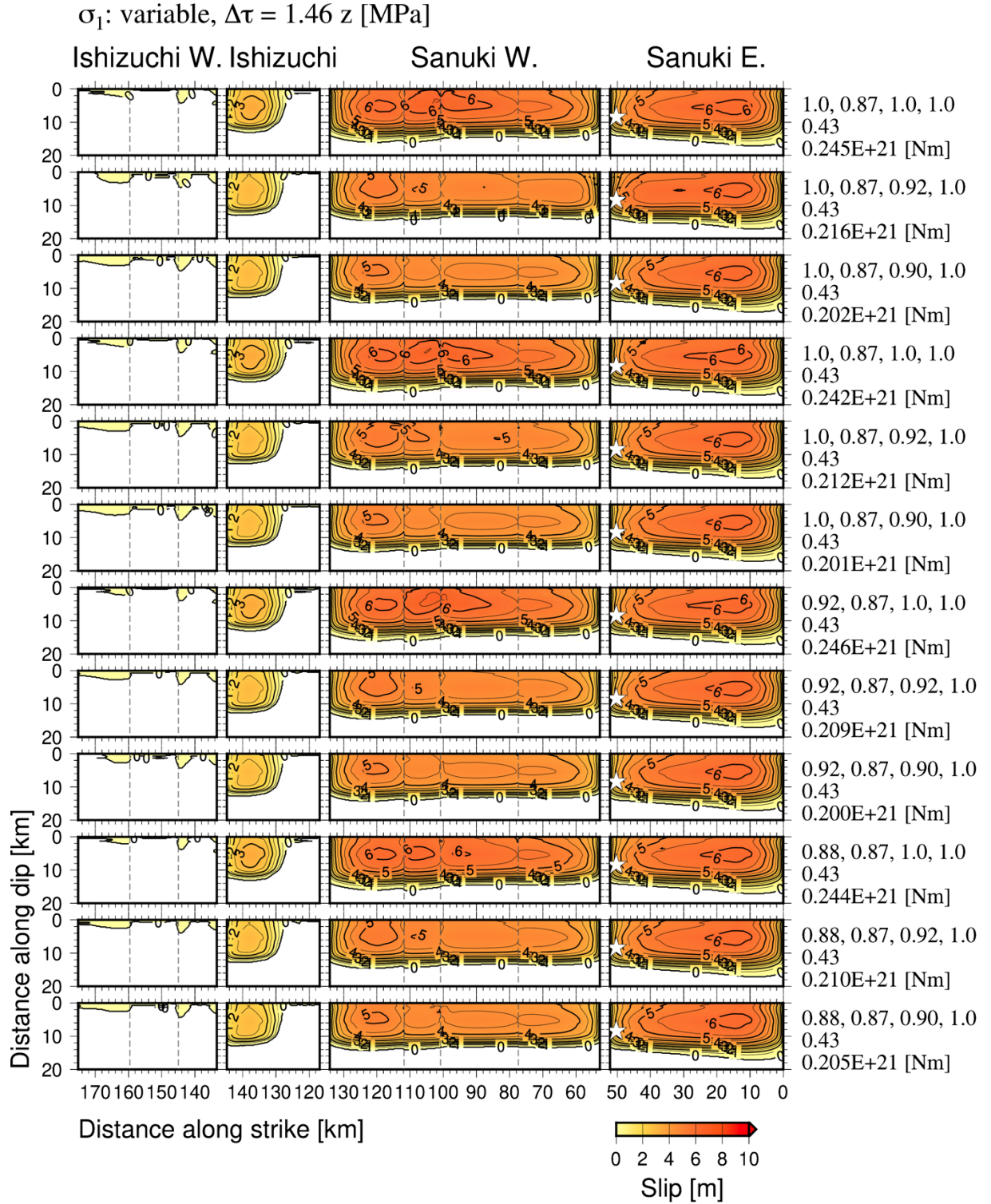


図4 (e) 讃岐山脈南縁東部区間西端に破壊開始領域（星印）が仮定される場合。

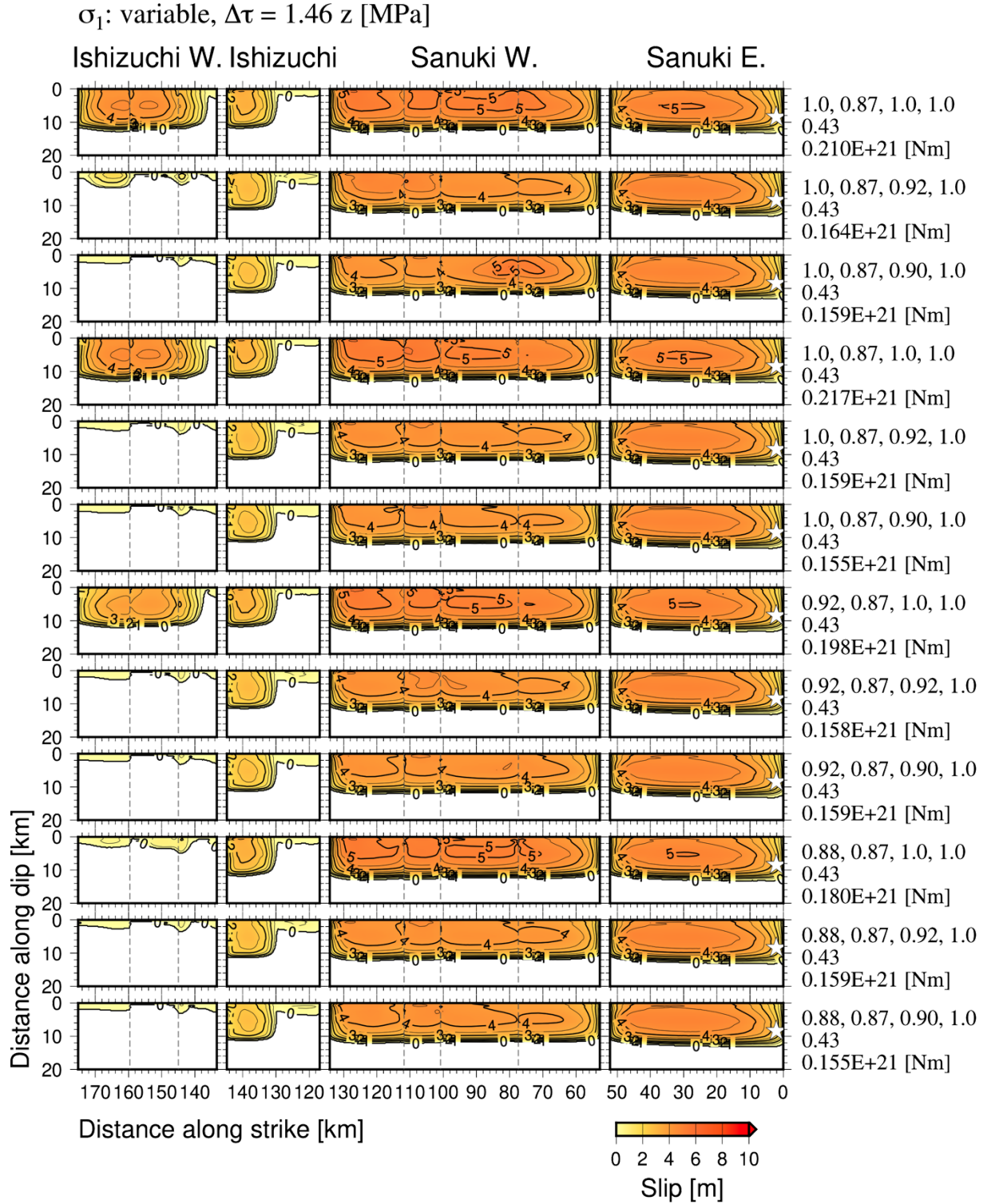


図4 (f) 讃岐山脈南縁東部区間東端に破壊開始領域（星印）が仮定される場合。

(c) 結論ならびに今後の課題

中央構造線断層帯讃岐山脈南縁東部区間、同西部区間、石鎚山脈北縁区間、同西部区間を対象として、活動履歴の情報を基に、最新活動直前の応力場を推定し、これを反映した動的破壊シミュレーションにより、最新活動で起こり得た連動のパターンを整理した。その結果、破壊開始点の位置と各区間の最新活動直前の地震後経過率によって、5つの連動パターンが得られた。そのうち、変位履歴と調和的なパターンとして、讃岐山脈南縁東部区間と同西部区間が連動するパターン、および、石鎚山脈北縁区間と同西部区間が連動するパターンが得られた。

次年度以降、本年度成果で得られた最新活動の連動パターンが変位履歴と調和的となる震源モデルについて、最新活動における4区間全体の活動を確認するとともに、次の活動における地震後経過率を反映した応力場モデルを作成し、エネルギー収支による連動可能性のスクリーニングと動的破壊シミュレーションにより、震源のプロトタイプを検討する。

謝辞：図はGeneric Mapping Tool version 6.4.0 (Wessel et al., 2019) 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.
- 古谷綱崇, 四国西南日本外帯地すべりにおけるすべり面決定法に関する研究, 徳島大学博士論文, 110p, 2015.
- 後藤秀昭・丹羽俊二・中田 高・岡田篤正・堤 浩之, 1:25,000 都市圏活断層図「松山」, 国土地理院, 1998.
- 後藤秀昭・中田 高・岡田篤正・堤 浩之・丹羽俊二・小田切聡子, 1:25,000 都市圏活断層図「池田」, 国土地理院, 1999.
- 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.
- 伊藤谷生・井川 猛・足立幾久・伊勢崎修弘・平田 直・浅沼俊夫・宮内崇裕・松本みどり・高橋通浩・松澤進一・鈴木雅也・石田啓祐・奥池司郎・木村 学・國友孝洋・後藤忠徳・澤田臣啓・竹下 徹・仲谷英夫・長谷川修一・前田卓哉・村田明広・山北 聡・山口和雄・山口 覚, 四国中央構造線地下構造の総合物理探査, *地質学雑誌*, 102, 346-460, 1996.
- Ito, T., T. Ikawa, S. Yamakita, and T. Maeda, Gently north-dipping Median Tectonic Line (MTL) revealed by recent seismic reflection studies, southwest Japan, *Tectonophysics*, 264, 51-63, 1996.
- 地震調査研究推進本部, 中央構造線断層帯(金剛山地東縁一由布院)の長期評価(第二版), 162p, 2017.

- Kase, Y. and S.M. Day, Spontaneous rupture processes on a bending fault, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L10302, doi:10.1029/2006GL025870, 2006.
- 加瀬祐子・関口春子, 地形・地質学的データに基づく応力分布を用いた動力学的震源モデル, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会 SSS14-13, 2018.
- 松田時彦・山崎晴雄・中田 高・今泉俊文, 1896 年陸羽地震の地震断層, 地震研究所彙報, 55, 795-855, 1980.
- 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研究 令和 2～4 年度成果報告書, 406p, 2023.
- 文部科学省・東京大学地震研究所, 活断層の評価に関する調査研究「断層帯深部形状の評価に関する活断層調査研究」 平成 29～令和元年度成果報告書, 246p, 2020.
- Nakajima, J. and A. Hasegawa, Tomographic evidence for the mantle upwelling beneath southwestern Japan and its implications for arc magmatism, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 254, 90-105, 2007.
- 中田 高・後藤秀昭・岡田篤正・堤 浩之・丹羽俊二, 1:25,000 都市圏活断層図「西条」, 国土地理院, 1998.
- 中田 高・後藤秀昭・岡田篤正・堤 浩之・丹羽俊二・小田切聡子, 1:25,000 都市圏活断層図「高松南部」, 国土地理院, 1999.
- 中田 高・後藤秀昭・岡田篤正・堤 浩之・丹羽俊二・小田切聡子, 1:25,000 都市圏活断層図「脇町 (第 2 版)」, 国土地理院, 2009.
- 大熊茂雄・金谷 弘, 近畿地方西部地域, 中国地方東部地域および北海道地方南部地域, PB-Rock 21 (日本列島基盤岩類データベース), RIO-DB (研究情報公開データベース), 87, 産業技術総合研究所, 2007.
- 岡田篤正・堤 浩之・中田 高・後藤秀昭・丹羽俊二, 1:25,000 都市圏活断層図「郡中」, 国土地理院, 1998.
- 岡田篤正・堤 浩之・中田 高・後藤秀昭・丹羽俊二・小田切聡子, 1:25,000 都市圏活断層図「徳島」, 国土地理院, 1999.
- 岡田篤正・堤 浩之・中田 高・後藤秀昭・丹羽俊二・小田切聡子, 1:25,000 都市圏活断層図「川島 (第 2 版)」, 国土地理院, 2009.
- 岡田篤正・楮原京子・熊原康博・澤 祥・廣内大助, 1:25,000 都市圏活断層図「鳴門海峡」, 国土地理院, 2014.
- 斎藤敏明・石田 毅・寺田 孚・田中 豊, 実測結果に基づくわが国の地下岩盤内の初期地圧状態の検討, 土木学会論文集, 394, III-9, 71-78, 1988.
- Tanaka, Y., State of crustal stress inferred from in situ stress measurements, *J. Phys. Earth*, 34, S57-S70, 1986.
- 堤 浩之・後藤秀昭, 四国の中央構造線断層帯の最新活動に伴う横ずれ変位量分布, 地震 第 2 輯, 59, 117-132, 2006.
- 堤 浩之・岡田篤正・中田 高・後藤秀昭・丹羽俊二, 1:25,000 都市圏活断層図「新居浜」, 国土地理院, 1998.
- 堤 浩之・岡田篤正・中田 高・後藤秀昭・丹羽俊二・小田切聡子, 1:25,000 都市圏活断層図「伊予三島」, 国土地理院, 1999.

- 内田純二・矢田部龍一・横田公忠・高田修三, 和泉層群における切戸のり面の崩壊特性と土質力学的検討, 土木学会論文集, 715, III-60, 179-186, 2002.
- 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.
- Wessel, P., J.F. Luis, L. Uieda, R. Scharroo, F. Wobbe, W.H.F. Smith, and D. Tian, The Generic Mapping Tools version 6, Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 20, 5556-5564, 2019. doi:10.1029/2019GC008515.