

長大な活断層帯で発生する地震の評価手法
の高度化に関する調査研究

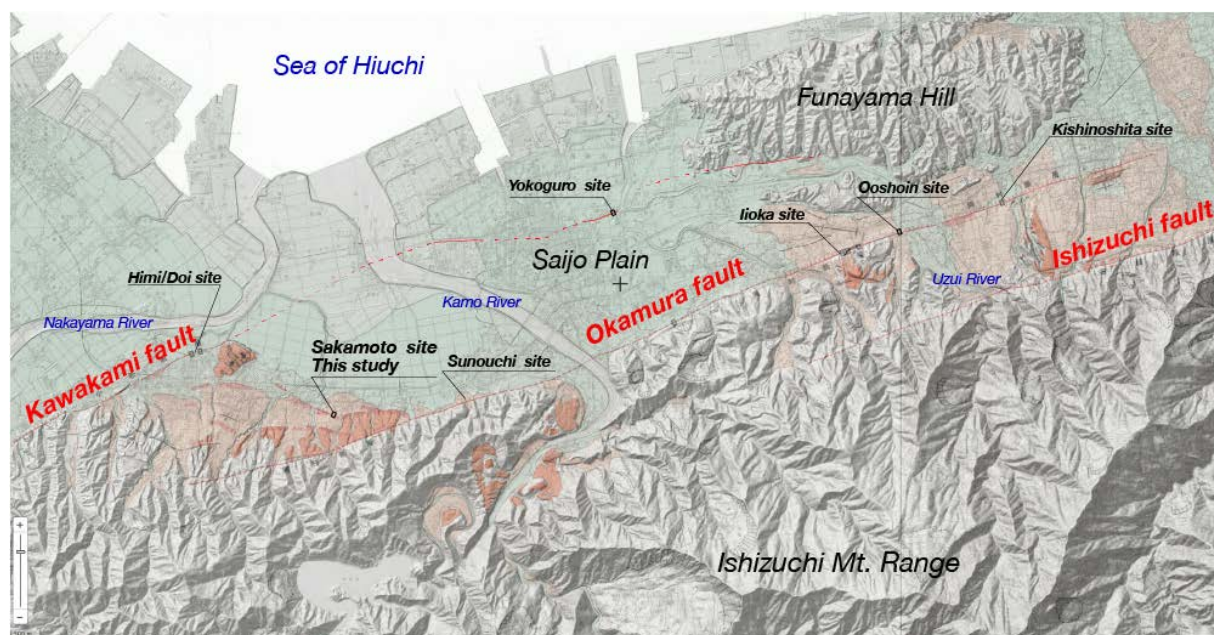
令和5年度成果報告書

令和6年5月

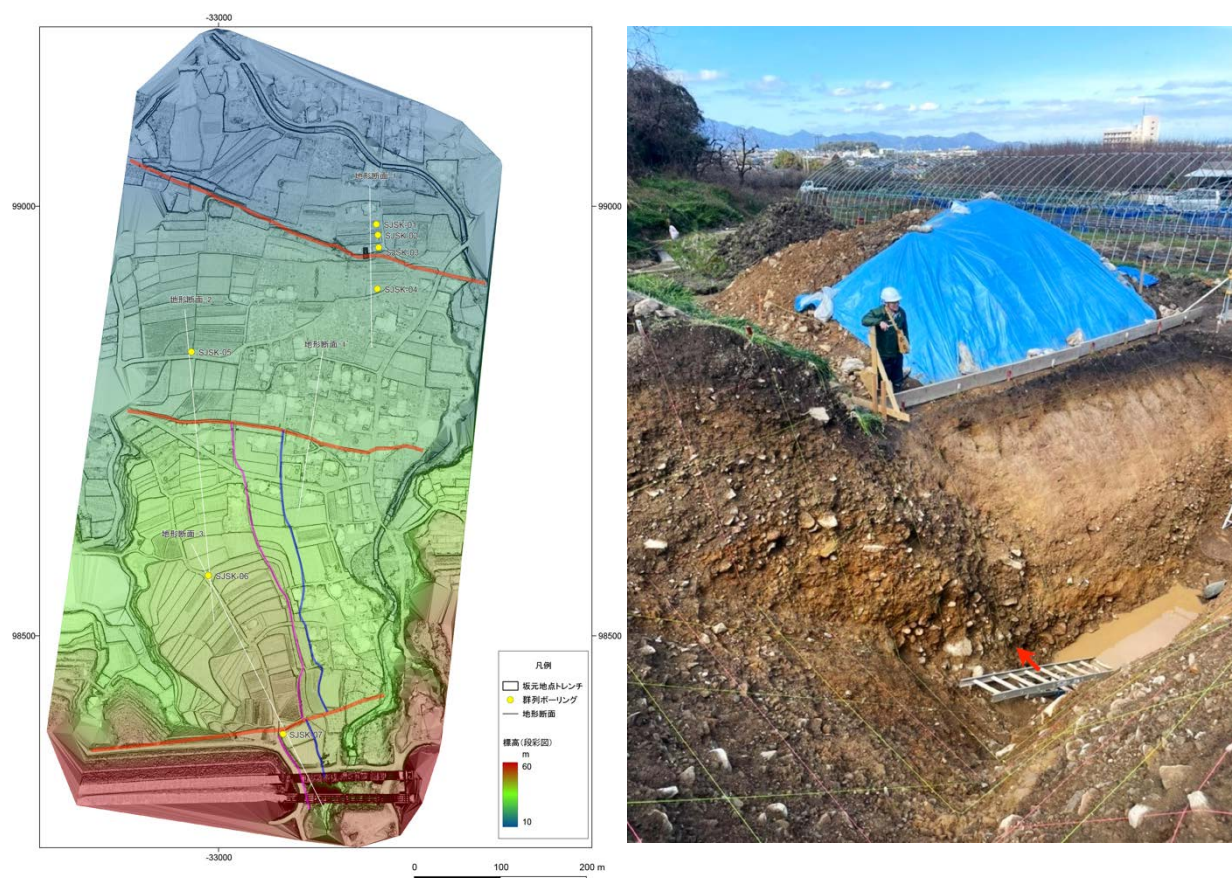
文部科学省研究開発局
国立研究開発法人産業技術総合研究所

本報告書は、文部科学省の科学技術基礎調査等委託事業による委託業務として、国立研究開発法人産業技術総合研究所、公益財団法人地震予知総合研究振興会、国立研究開発法人防災科学技術研究所が実施した令和5年度「長大な活断層帯等で発生する地震の評価手法の高度化に関する調査研究」の成果を取りまとめたものです。

1. 1 複数回の変位履歴を復元するための活断層調査

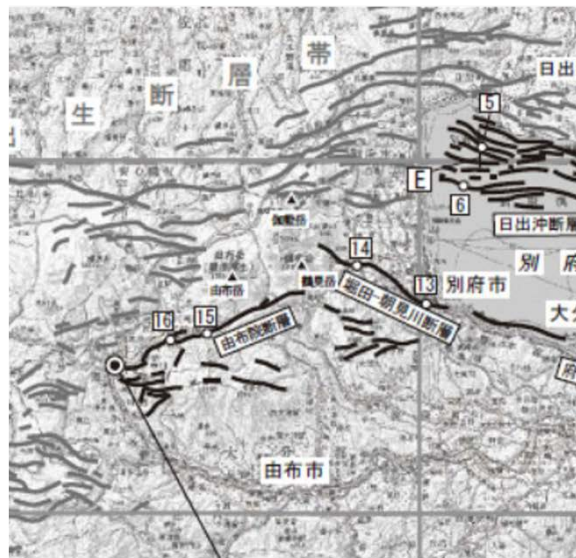


石鎚山脈北縁区間（岡村断層）と石鎚山脈北縁西部区間（川上断層）の境界付近における活断層分布。国土地理院・地理院活断層図（中田・他，1998；堤・他，1998）に加筆。

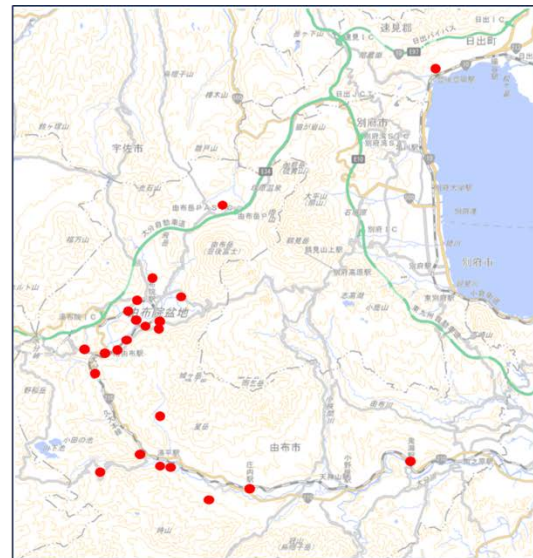


（左図）西条市坂元地区周辺のドローン LiDAR による地形陰影図。（右図）坂元地区トレンチで露出した高角北傾斜の活断層。赤矢印が活断層の位置。

1. 2 歴史文書の収集分析に基づく地震活動の検討



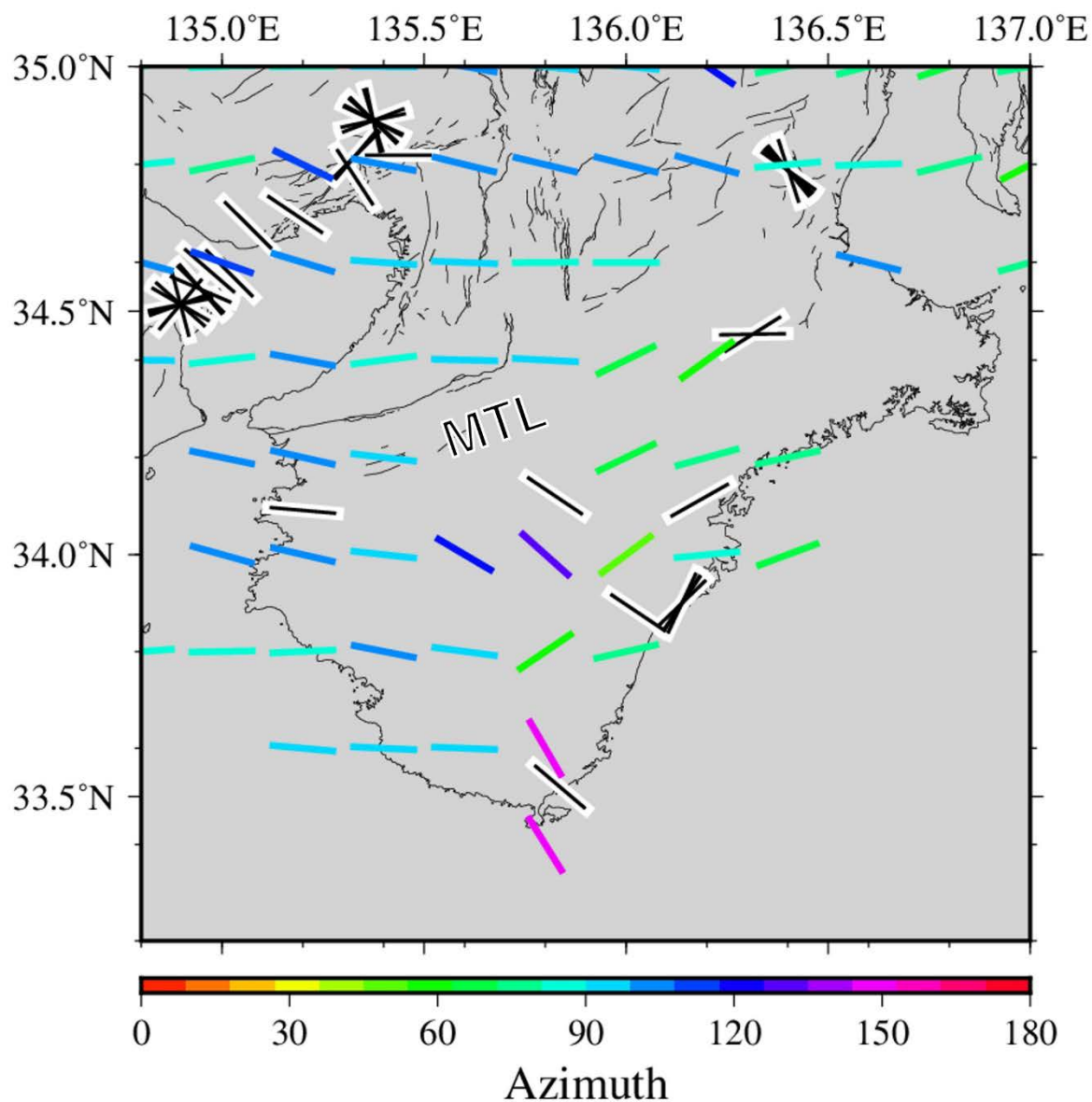
中央構造線断層帯・豊予海峡―由布院区間
地震本部Web より引用 (2024 年4月13日閲覧)
https://www.jishin.go.jp/regional_seismicity/rs_katsudanso/rs_chuokozosen/



史料から判明する被害地域
都司(2019)を参考に作成

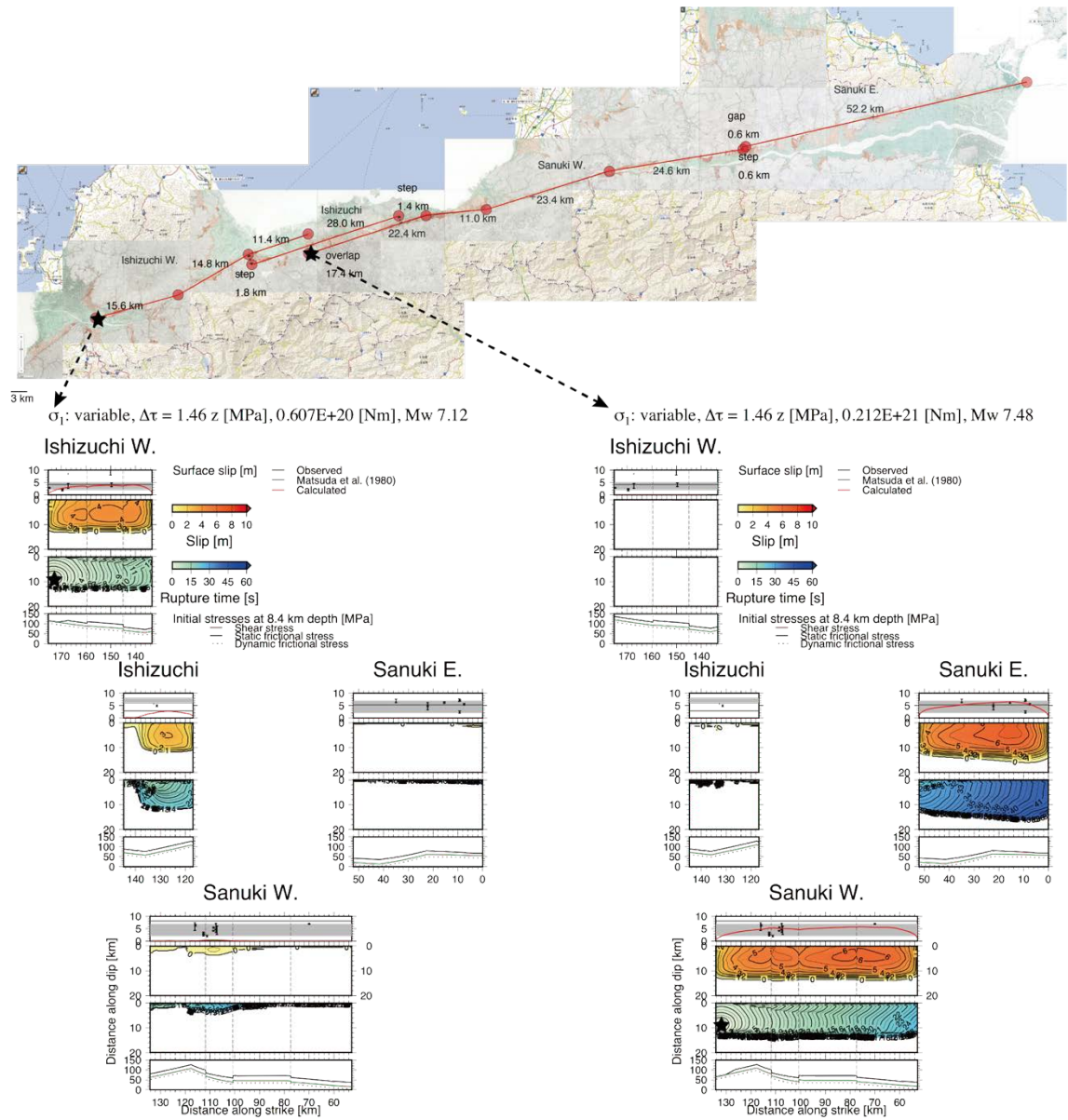
1703 年 12 月 31 日（元禄 16 年 11 月 23 日）の豊後地震の被害地域と推定される震源断層。

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



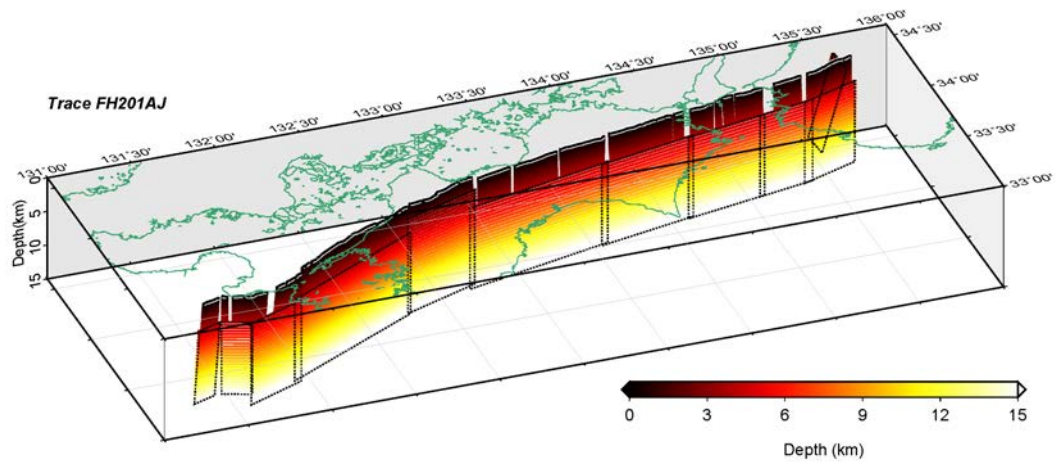
全国内陸部ストレスマップによる紀伊半島周辺の水平主圧縮軸方位の分布。中央構造線断層帯周辺では概ね東西方向に圧縮軸を持つ応力場として地殻応力場が特徴付けられる。

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

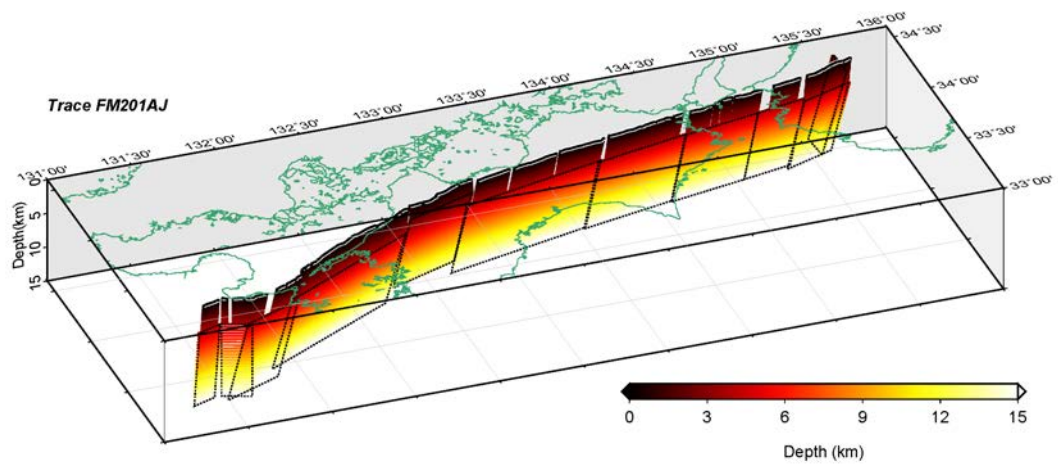


活動履歴を考慮した応力場モデルから推測される最新活動の破壊過程の例。

4 長大な活断層帯における強震動予測手法の高度化



傾斜角：高角度



傾斜角：中角度

地表断層の詳細位置をモデル化し既往の地下深部の矩形断層と接続して中央構造線断層帯全体の新たな震源断層モデルを作成した。

目 次

グラビア

1. プロジェクトの概要	1
2. 業務の実施体制	3
3. 研究報告	
3. 1 活断層の変位履歴及び歴史史料に基づく連動履歴の解明	4
3. 1. 1 複数回の変位履歴を復元するための活断層調査	4
3. 1. 2 歴史文書の収集分析に基づく地震活動の検討	43
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	47
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	55
3. 4 長大な活断層帯における強震動予測手法の高度化	70
4. 全体成果概要	86
5. 成果の論文発表・口頭発表等	88
6. むすび	90
7. 外部評価委員会	92

1. プロジェクトの概要

(1) 調査研究の方針と観点

本研究課題では、我が国の主要活断層帯で最も長大であり活動度が高い断層帯の1つである中央構造線断層帯の四国陸域を中心に、これまで未解明であった連動型地震の発生確率の算出や連動条件の検討、地表付近の詳細な断層位置形状を反映した強震動計算を目的とした調査研究を実施する。四国地域の活断層の長期評価（地震調査委員会，2017）では、「複数の活動区間や隣接する活断層帯の連動など、活断層で発生する多様な地震を考慮した評価手法についての検討も、今後進めていく必要がある」との課題が提起されている。

令和2年度から令和4年度にかけて、連動型巨大地震の発生可能性の評価手法や地震発生確率の算出手法を開発・実用化するため、「連動型地震の発生予測のための活断層調査研究」（以下、「過年度事業」という）を実施した。その結果、過去の活動を調査して連動型地震の発生履歴を明らかにすることにより、長期間の平均的な連動型地震の発生確率を算出する手法等を開発した。しかし、過年度事業の手法では、例えば平均活動間隔に対して比較的最近に活動した区間を含む場合など、応力蓄積状況を考慮した連動型地震の発生可能性を評価できていないという課題がある。

また、長大な活断層帯においては、活断層の走向や傾斜が空間的に変化している場合がある。しかし、強震動評価のために震源断層モデルを設定する場合は、必ずしも実際の変化する走向や傾斜に整合していない簡略化したモデルを設定している場合が多い。そのため、実際に起こり得る強震動を正確に評価できていない可能性がある。本事業では、断層モデルを実際の断層運動により整合したモデルとし、より正確に強震動評価をする手法を提案する。

そのため、従前の知見と過年度事業の結果を踏まえて、本研究課題では地震調査研究推進本部の連動型地震に関する新たな評価手法や高度化した手法を提案することを目標とする。事業終了後には、地震調査研究推進本部地震調査委員会の関係委員会において、本事業で構築した連動型地震の評価手法について提案し、長期評価や全国地震動予測地図の高度化へ貢献することを目指す。

(2) 調査研究の内容

本研究課題では、主要活断層帯から生じる連動型巨大地震の発生可能性と連動条件、地表近傍の断層位置形状を反映した強震動計算手法等を検討することを目的とし、四国陸域の中央構造線断層帯を主な対象として、次の5つのサブテーマについて調査研究を遂行する。

サブテーマ1：活断層の変位履歴及び歴史史料に基づく連動履歴の解明

サブテーマ1-1：複数回の変位履歴を復元するための活断層調査

過去の地震時変位量を複数回復元する調査を実施し、変位量が地震毎にどのように変化したかを明らかにして、連動イベントと非連動イベントを判別する。変位履歴から連動型イベントの発生間隔を明らかにし、国内外の事例も踏まえて、最新活動からの経過時間等を考慮した連動確率を算出する評価手法について検討する。

サブテーマ1-2：歴史文書の収集分析に基づく地震活動の検討

中央構造線断層帯の周縁に位置する四国・中国・九州地域で起きた地震活動を歴史史料

から抽出する。

サブテーマ 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

断層帯周辺の地殻応力場の情報を整理し、三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。

サブテーマ 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

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等を検討する。

サブテーマ 4：長大な活断層帯における強震動予測手法の高度化

地表付近の詳細な断層位置形状を反映した断層モデル構築と地震動計算等を実施し、より正確な強震動評価手法を検討する。

以上の知見を総合し、実証的な調査観測データと理論的な数値計算の両面から、複数の断層区間による連動型巨大地震の評価手法を構築する。

このうち、国立研究開発法人産業技術総合研究所ではプロジェクトの総合的推進及びサブテーマ 1—1、2、3、公益財団法人地震予知総合研究振興会ではサブテーマ 1—2、国立研究開発法人防災科学技術研究所ではサブテーマ 4 に関する調査研究を実施する。

2. 業務の実施体制

この調査研究事業は、国立研究開発法人産業技術総合研究所を中心とした体制を構築し、関係する研究機関および研究者の参加・協力を得て実施する。調査観測代表機関は、産業技術総合研究所とする。

研究を効果的に実施するため、関係する専門分野の外部有識者を招聘して外部評価委員会（事務局は産業技術総合研究所）を設置する。

調 査 観 測 項 目	担 当 機 関	担 当 者
研究代表者	国立研究開発法人 産業技術総合研究所	近藤 久雄
1－1 複数回の変位履歴を復元するための活断層調査		
	国立研究開発法人 産業技術総合研究所	近藤 久雄
	一般財団法人 電力中央研究所	木村 治夫
	学校法人 同志社大学	堤 浩之
1－2 歴史文書の収集分析に基づく地震活動の検討		
	公益財団法人 地震予知総合研究振興会	榎原 雅治
	公益財団法人 地震予知総合研究振興会	水野 嶺
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		
	国立研究開発法人 産業技術総合研究所	椎名 高裕
	国立研究開発法人 産業技術総合研究所	内出 崇彦
	国立研究開発法人 産業技術総合研究所	今西 和俊
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		
	国立研究開発法人 産業技術総合研究所	加瀬 祐子
	国立研究開発法人 産業技術総合研究所	浦田 優美
4 長大な活断層帯における強震動予測手法の高度化		
	国立研究開発法人 防災科学技術研究所	森川 信之
	国立研究開発法人 防災科学技術研究所	藤原 広行
	国立研究開発法人 防災科学技術研究所	岩城 麻子

3. 研究報告

3. 1 活断層の変位履歴及び歴史史料に基づく連動履歴の解明

3. 1. 1 複数回の変位履歴を復元するための活断層調査

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 複数回の変位履歴を復元するための活断層調査

(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	近藤 久雄
一般財団法人	電力中央研究所	上席研究員	木村 治夫
学校法人	同志社大学	教授	堤 浩之

(c) 業務の目的

過去の地震時変位量を複数回復元する調査を実施し、変位量が地震毎にどのように変化したかを明らかにして、連動イベントと非連動イベントを判別する。変位履歴から連動型イベントの発生間隔を明らかにし、国内外の事例も踏まえて、最新活動からの経過時間等を考慮した連動確率を算出する評価手法について検討する。

(d) 3 ヶ年の年次実施業務の要約

1) 令和5年度：

四国陸域の活動区間において、過去の地震時変位量を複数回明らかにするための変位履歴調査を実施した。その結果と周辺断層における既往の活動時期・地震時変位量等を整理した。

2) 令和6年度：

四国陸域の活動区間において、過去の地震時変位量を複数回明らかにするための変位履歴調査を実施する。その結果と周辺断層における既往の活動時期・地震時変位量等を整理する。

3) 令和7年度：

四国陸域の活動区間において、過去の地震時変位量を複数回明らかにするための変位履歴調査を実施する。その結果と既往の活動時期・地震時変位量等を整理し、四国陸域4区間の変位履歴をとりまとめる。さらに、過去の連動型イベントの頻度を明らかにし、最新活動からの経過時間を考慮した連動型地震の発生確率の算出手法について検討する。

(2) 令和5年度の成果

(a) 業務の要約

四国陸域の中央構造線断層帯・石鎚山脈北縁区間と石鎚山脈北縁西部区間の境界付近を主な対象として変位履歴を解明するため、次の地形地質調査を実施した。石鎚山脈北縁区

間・岡村断層の西端付近に位置する西条市坂元地区において、ドローン LiDAR 計測、トレンチ調査、ボーリング調査を実施し、過去 3 回の活動時期と活動間隔、地震時変位量等を明らかにした。その結果、最新活動は西暦 660 年以降に生じ、1596 年文禄伊予地震に対応する可能性が高く、先行するイベントの発生年代は約 1.3～1.8 万年前、さらに前の活動は約 2.9 万年前頃と推定された。これらをもとに最近 3 回の活動間隔は 11200～18200 年程度と推定され、周辺断層の活動間隔 1000～1500 年よりも有意に長いことが明らかとなった。また、各イベントの地震時上下変位量は、それぞれ 1.5m、1.0m、1.7m と計測された。河成段丘面上の累積変位とボーリング調査による年代をもとに、周辺に分布する 3 条の活断層の平均変位速度は、それぞれ 0.2mm/yr（上下）、0.1mm/yr（上下）、0.9mm/yr（横ずれ：岡村断層）と推定された。以上の結果、最新活動は西暦 1596 年文禄（慶長）地震に伴い、石鎚山脈北縁区間と石鎚山脈北縁西部区間が連動したイベントと判断され、坂元地区の活動は岡村断層単独のイベントを示すのではなく、少なくとも両区間が連動したイベントを反映すると考えられる。このように、横ずれ断層における上下変位の変位履歴に基づき過去の連動型イベントを判別し、連動間隔を算出する手法を初めて提示した。

(b) 業務の成果

1) 石鎚山脈北縁区間・岡村断層における西条市坂元地区の変位履歴調査

a) 調査地点の概要

石鎚山脈北縁区間は、石鎚山脈北縁の山麓より北側の平野部を延びる、長さ約 29km の岡村断層からなる（図 1～3）。岡村断層では、従来から先駆的なトレンチ調査が多数実施され、最新活動は 15 世紀以降、平均活動間隔は 1500～1800 年、今後 30 年以内の地震発生確率は 0.01% 以下（Z ランク）と評価されている（地震調査研究推進本部地震調査委員会，2017）。

過年度事業の令和 4 年度には、新居浜市大生院地区においてドローン LiDAR 調査、トレンチ調査を実施し、過去 2 回の活動時期と活動間隔、地震時変位量を明らかにした。最新活動は西暦 1440 年以降に生じ、1596 年文禄地震に対応する可能性が高い。先行するイベントは、西暦 1250～1400 年に限定された。これらをもとに最近 2 回の活動間隔は 200～350 年と推定され、これは従来の岡村断層の活動間隔 1500～1800 年よりも有意に短い。また、地震時変位量として、最新活動に伴い右横ずれ変位 5.7m、上下変位 1.1m、イベント 2 に伴い右横ずれ変位 2.6m、上下変位 0.5m が推定された。最新の地震時変位量と地震断層長のスケーリング則から、最新活動の範囲は 60km もしくはそれ以上と推定された（近藤・他，2023）。

今年度に調査を実施した西条市坂元地区は岡村断層の西端付近に位置し、大生院地区から西へ約 10km、岡村断層の西端から東へ約 3 km の地点である（図 3）。周辺では、岡村断層が西へ向かって分岐し、盆地内に主に 2 条の正断層が発達する。これらの正断層は、岡村断層と川上断層の右ステップに伴い形成されたプリアパート盆地を構成する（後藤・中田，2000）。また、周辺は岡村断層（石鎚山脈北縁区間）が単独で活動した際に区間の西端にあたるため、地表地震断層の末端付近で変位量は小規模と予想される。一方、川上断層との連動イベントが生じた際には、全体の地震規模が大きく変位量も大きくなると期待されるため、調査地周辺の岡村断層や正断層で生じる変位量も大きくなる可能性が高い。な

お、このステップオーバーは、幅約 2 km で 10° の走向変化を伴っており、四国陸域の中央構造線断層帯の中で最大規模の断層不連続である。つまり、断層帯全体が連動するイベント（以下、全連動イベント）があるとすれば、この区間境界を破壊が乗り越える必要がある。よって、坂元地区周辺で得られる連動イベントの頻度や発生間隔は、全連動イベントの最大値を示すことも期待される。

今年度の調査は、具体的な変位履歴を複数回明らかにし、これらの仮説と考えを検証するため、坂元地区周辺においてドローン LiDAR 調査、トレンチ調査、ボーリング調査を実施した。

b) ドローン LiDAR 調査

西条市坂元地区では、岡村断層と派生して延びる正断層の通過位置や段丘崖の横ずれ量を正確に把握するため、米軍撮影の空中写真判読と段丘面区分図の作成、ドローン LiDAR による 0.1m メッシュの DEM を作成した。段丘面区分図を図 4、ドローン LiDAR による地形陰影図を図 5 に示す。

調査地周辺にみられる段丘面は、石鎚山脈から西条平野へ北流する小河川が形成する扇状地性の段丘面である（図 4）。ここでは、段丘面の高度分布や開析の程度、後述するトレンチ・ボーリングの層序をもとに、高位から H 1 面、H 2 面、M 1 面、M 2 面、L 1 面、L 2 面の 6 面に区分した。最低位の L 2 面は、H 面および M 面を開析する谷沿いに分布する。また、扇状地状に拡がり沖積低地へ埋没する分布形態を示し、後述の年代値からみても最終氷期極相期の低海面期に瀬戸内海方向へ向かって発達した扇状地とみられる。

山地と盆地の境界付近を延びる横ずれ断層である岡村断層と、盆地内を延びる複数の正断層は、それらの河成段丘面上に低断層崖、撓曲崖、活背斜、段丘崖の横ずれといった、典型的な変位地形を形成する。山麓沿いの岡村断層は、断続的に右雁行配列を伴い分布し、岡村断層の中央部付近の極めて直線的な断層分布と異なる。この分布形態は、坂元地区周辺では、岡村断層の西端付近で変位量が西へ向かって減少する可能性を示唆する。

今回の調査によって、山麓沿いの岡村断層に沿って横ずれ地形が新たに認定された。M 1 面と M 2 面、M 2 面と L 1 面の間に形成された段丘崖は、岡村断層を境にそれぞれ 33.3 m、26.2m の累積的な横ずれ変位を受ける。ここでは、横ずれに伴い見かけ上は南側低下の逆向き低断層崖も新たに検出された。これらの累積的な横ずれ変位と年代に基づく、横ずれ平均変位速度については、下記で詳述する。

c) トレンチ調査

坂元地区のトレンチ調査は、L 1 面と L 2 面を境し、最も盆地側（北側）を延びる正断層を横断して実施した（図 4，5）。ここでは、用地の制限から断層直交方向のトレンチを 1 孔のみ掘削した（図 6）。また、断層変位および変形帯、段丘面の層序を確認するため、近傍で SJSK-01～04 孔のボーリングを掘削した。

i) トレンチ壁面の層序と年代

トレンチ壁面には、下位から L 1 面を構成する扇状地礫層、低下側を埋積して L 2 面を構成する扇状地礫層、主に低下側を埋積する細粒堆積層と腐植質シルト層、人工改変土層、

複数の明瞭な鉛直～高角な断層が出現した。露出した断層は明瞭な剪断を伴い、全ての自然堆積層を切断ないし変形させる。大局的には、断層は北傾斜 60～80° 程度と高角であり、派生する分岐断層はほぼ鉛直に上方へ進展する構造を示す。地層の分布や層相の特徴を基に、Ⅰ～Ⅹ 層に区分した。トレンチ調査地周辺の平面図を図 6、トレンチの展開図を図 7、トレンチ壁面のスケッチを図 8～10、放射性炭素同位体年代測定の結果を表 1 に示す。以下では、それらの層相と特徴、年代について記載する。なお、放射性炭素同位体年代測定結果の暦年較正は、Ramseys (1995 ; 2009) を基に Reimer et al. (2020) の較正曲線を使用し、2 σ に対応する暦年代を西暦もしくは cal BP で表記する。

Ⅰ層：本層は、砂礫混じりシルトで、田畑耕作土（および旧耕作土または田畑の底土）、畦畔土、および埋め土からなる。トレンチ壁面では、トレンチ掘削に伴い、耕作土を事前に除去して保全したため、スケッチからは厚さ 20cm 程度除かれている。田畑耕作土の層相：暗褐色の礫混じりのシルトからなる。植物根、細～中礫を含む。畦畔土の層相：暗褐色の砂礫混じり砂質シルト～極細粒砂からなる。植物根、細～中礫を含む。埋め土の層相：褐色～赤褐色の砂礫混じり砂質シルト～極細粒砂からなる。植物根、細～中礫、下位の黄褐色のシルトや砂を含む。

Ⅱ層：本層は断層の隆起側のみ分布する。耕作土の直下であることから断層低下側のみ分布するⅢ層とほぼ同時期の堆積物と推定される。層相：上部は黒褐色の砂礫混じりのシルトからなる。下部は黒褐～暗褐色の有機質シルトの基質支持の礫層である。礫種は風化砂岩の角～亜角礫、礫径 2～240mm、平均径 10～20mm で、礫の淘汰は悪く特に定向性はみられない。トレンチ壁面南西側では、上部は角～亜角礫、中部は亜角～円礫（亜円礫主体）の礫層からなり、下部は淡褐色礫混じり極細粒～細粒砂を挟む。その細粒砂に含まれる礫は径 2～10mm の風化砂岩からなる円礫主体である。

Ⅲ層：本層は断層の低下側では細粒な有機質シルトを主体とし、隆起側は粗粒な砂礫を主体とする。本調査では断層の隆起側をⅢa、低下側をⅢb とした。

Ⅲa 層：黒褐色有機質シルトからなる。ところどころに礫を含む。トレンチ内では北側に向かい層厚が増す。西壁面のⅢa 層から連続的に採取した試料の年代測定の結果、断層低下側の W01 付近で上部から下部にかけて 1,280±30 y. B. P（西暦 660～820 年）、1,290±30 y. B. P（西暦 660～770 年）、1,480±30 y. B. P（西暦 550～640 年）の年代値が得られた（図 7，表 1）。また、断層低下側の E07 付近で 1,400±30 y. B. P（西暦 600～670 年）の年代値が得られた。以上から本層の形成時期は、西暦 550～820 年頃と推定される。

Ⅲb 層：黒褐色の有機質シルト混じり砂礫からなる。上部は角～亜角礫を主体とし、下部は亜円礫を主体とする亜角～円礫である。トレンチ南西側において下部に淡褐色の礫混じり極細粒～細粒砂を挟む。その砂層に含まれる礫は径 2～10mm の風化砂岩の円礫主体である。トレンチ E07～08 付近および W08～W09 付近に断層変位が認められる。

Ⅳ層：本層は断層の低下側のみ分布する。黄褐色の礫混じり砂質シルトからなる。上部は淘汰が悪く、砂の散在部やレンズ状の砂や礫を挟む。断層変位は認められないが、Ⅳ層の下面は低崖（南）へ向かって撓みあがっており、主断層の変位に伴って変形を生じたとみられる。下部では、一部に橙色火山灰質シルトを挟む。低下側のⅣ層・W05 付近で採取した試料を火山灰分析した結果、鬼界アカホヤテフラ（K-Ah；町田・新井, 2003）が得られた。K-Ah の降下年代は、7165～7303 calBP（Smith et al., 2013）と知られている。試料

には砂粒子や不純物を含み、降灰後の再堆積であることを示すものの、火山ガラスの含有量が比較的多く、ガラス片は摩耗されていない。そのため、IV層の堆積年代はK-Ahの降下年代と概ね同時代と判断した。以上から、本層の形成時期は7,300年前頃と推定される。

V層：本層は断層の低下側のみに分布するフラッドローム層で、上部は褐色砂質シルトからなり、わずかに砂や礫を含む。下部は淡～明褐色砂質シルトからなり上位に比べて粘土分を多く含む。V層上部には明瞭な剪断はみられないが、最下部が下位のVI層と明瞭な断層関係にある。また、層厚は断層を境に北側で厚く、南へ向かって減少し、低崖にアバットして堆積する。西壁面では、グリッドW01～W05では概ね水平な堆積構造を示すものの、W06～07の断層帯近傍では断層変位・変形に伴い明瞭に北へ傾斜する。断層低下側のW05付近で連続的に採取した試料は、上部から下部にかけて、それぞれ9,880±40 y.B.P (11200～11400 calBP)、11,930±40 y.B.P (13600～14000 calBP)、13,440±40 y.B.P (16000～16300 calBP)、11,410±40 y.B.P (13200～13400 calBP)、15,150±50 y.B.P (18300～18700 calBP)、14,410±50 y.B.P (17400～17800 calBP)の年代値が得られた。これらの年代測定結果は、一部で年代値と層準が逆転している。これは、砂粒子などを含む堆積状況や一部に円柱状の腐植質シルト分が多い層相がみられるため、再堆積の影響や植物根の影響が推定される。以上から本層の形成時期は1.1～1.8万年前と推定される。

VI層：本層は断層の低下側のみに分布する。黄褐～灰褐色を呈する。礫は径2～30mmの円礫～亜角礫を多量に含み、少量の角礫も含む。径50～150mm（最大径は180mm）の大礫を多く含む部分が所々にレンズ状～層状になって数枚分布する。礫径の大きなものは亜角礫を主体とし、上部の0.2～0.3m区間では亜円礫も多い。礫率は、上部の0.2～0.3m区間は30～40%、その下位は60～80%である。上部では礫の長軸方向がほぼ水平となっている。礫種は大部分が細粒～中粒の砂岩で、次いでシルト～泥岩、ごくわずかの凝灰質岩からなる。礫表面の一部が褐色化しているものが多く、風化礫と判断される。基質は、上部では上位層に類似した粘土～シルト分からなり砂分は少ない。下部は粘土～シルト質の中粒砂からなる。W05付近より南側では、VII層の層相と類似したシルトのレンズが2枚挟在する。下面は明瞭な浸食面で、みかけ北に10～20度で傾斜した波長0.2～0.4m程度の緩やかな波曲をなす。北面の一部では、有機質シルトがレンズ状に挟まれている。

VII層：明黄褐色を呈する火山灰混じりのシルトからなり、砂や礫が混じる不均質な層相をなす。径2～10mm（最大径30mm）の礫をごく少量、所々に含む。礫は亜角礫～亜円礫で、礫種は砂岩～シルト岩からなる。北部では北傾斜70度程度で並行する割れ目状の小さな溝が見られる。グリッドE05～E06およびW06付近に明瞭な断層変位が認められる。

低下側のW05付近で採取した試料を火山灰分析した結果、始良Tnテフラ(AT; 町田・新井, 2003)が得られた。本層は、ATテフラの噴出年代である約29,000年前以降であることは確実である。ただし、試料には砂粒子や不純物を含み、火山ガラスがリワークの再堆積であることを示すものの、上述のK-Ahよりもさらに多量の火山ガラスを含有する。そのため、VII層の堆積年代は、ATの降下年代と概ね同時代と判断した。以上から、本層の形成時期は約29,000年前頃と推定される。

VIII層：黄褐～褐灰色を呈する砂礫層であり、L1面を構成する段丘礫層である。礫は径5～50mm、70～150mm（多量）、最大径250mmの礫からなる。礫率は60～70%である。層状の構造は認められず、パッチ状に径の小さな礫または径の大きな礫が密集して分布する。

亜円礫を主体とし、亜角礫も含む。礫種は細粒～中粒の砂岩を主体とし、シルト～泥岩からなる。一部の礫の表面は褐色化する。基質はシルト混じりの中粒砂からなる。E06～E09 付近および W06～W09 付近の断層沿いでは、剪断に伴う礫の再配列がみられ、初生的な堆積構造はみられない程度に砂礫とマトリックスが混在する。グリッド E05～E06 および W06 付近に明瞭な断層変位が認められる。

断層隆起側の E07～E08 で $5,530 \pm 30$ y. B. P の年代値が得られた。しかし、この年代は AT よりも下位の層準に比して著しく新しい年代となっている。採取位置が開口割れ目付近であること、植物根の可能性もある産状からみて、上位の新しい地層に含まれる腐植およびフミン酸を含む地下水に汚染されている可能性が高い。そのため、この年代値はⅧ層の堆積年代を示すものではないと判断した。

Ⅸ層：橙灰～黄褐色、褐灰色を呈する砂礫層であり、礫は径 2～30mm を主体とし、50～80mm、まれに径 100mm 大の礫を含む。礫率は 30～40% である。南壁面東部では、北東-南西走向で北へ 50 度程度で傾斜する構造が認められる。礫の長軸方向は北へ 50～60 度で傾斜するものが多い。亜角礫～亜円礫からなり、径 30mm 以下の礫には円礫も認められる。層準により亜角礫と亜円礫の割合が変化する。礫種は細粒～中粒の砂岩を主体とし、シルト～泥岩からなる。砂では礫表面が桃灰～黄褐色を帯びるものが多い。下面より 0～30cm 程度上位では厚さ 3cm 前後の黒色の帯状部分が見られる。黒色帯状部は緩やかに波曲しており、北東-南西走向で北へ 30 度程度で傾斜する。基質は、黒色帯状部を境にして上下で少し異なる。帯状部上位の東部ではシルト混り中粒砂、西部ではシルト質中粒砂からなる。その帯状部下位は砂質シルト～粘土である。下位層は全体的に 50 度程度北へ傾斜する。その境界は明瞭な不整合面を示す。下位層の礫が本層に取り込まれている部分がある。E06～E09 付近および W06～W09 付近に断層変位が認められる。本層からは、年代値に関する試料は得られなかった。

Ⅹ層：灰白色（砂岩礫の色調）、橙灰色（礫径の小さな層、上面沿いの部分）を呈する。礫は径 5～50mm、80～150mm、巨礫として 300mm（板状、硬質）、380mm（亜円礫、硬質）、350mm（軟質、黄灰色）、600mm（軟質、不定形）が見られる。礫率は 70～80% である。不明瞭ながら、礫径の大きな層と小さな層が認められる。その層理面の方向は東-西走向で北に 50 度程度で傾斜する。亜角礫を主体とし、礫径が小さいほど亜円礫が多くなる。礫種は細粒～中粒の砂岩を主体とし、シルト～泥岩からなる。径が大きなものはほぼすべて砂岩である。一部の砂岩には、ハンマーの打撃で容易に割れる程度に軟質化しているものがあり、それらは黄褐～褐灰色を呈する。基質は、層準とは無関係に場所によって色調が変化し、橙灰～黄褐～灰褐色を呈する。シルト混じり中粒砂を主体とし、一部はシルト質である。トレンチ底付近の E06～E07 付近および W06～W07 付近でⅧ層と明瞭な断層関係で接する。本層からは、年代値に関する試料は得られなかった。

ii) 古地震イベントの解釈と発生間隔

トレンチ壁面に露出した断層と地層の被覆・切断関係、撓曲変形の程度、上下変位量の差異をもとに、最近の古地震イベントを認定した。以下では、新しいものからイベント 1～3 と呼称し、それぞれの認定根拠と発生年代について記述する。

イベント 1 は、人工改変土層 I 層直下まで進展する複数の断層により、認定される。グ

リッド E07 および W09 付近の断層は、Ⅲa 層以下の全ての地層を切断し、人工改変土層に覆われている。Ⅲa 層とⅢb 層を境する断層は必ずしも明瞭ではないが、少なくともⅢa 層の最下部が断層により切断されることが確実である。よって、イベント 1 はⅢ層堆積後、I 層堆積（人工改変）前に生じた。

イベント 1 の発生年代は、Ⅲa 層から得られた 1280 ± 30 y. B. P（西暦 660～770 年）が地層の妥当な堆積年代として最も新しく、これ以降に限定される。7 世紀から 1596 年文禄地震までの間に、四国陸域の中央構造線断層帯が活動した歴史地震の記録は知られていない（例えば、地震調査研究推進本部地震調査委員会，2017）。よって、イベント 1 は 1596 年文禄の一連の大地震（例えば、宇佐美・他，2013；石橋，2019；榎原，2020）に対応する可能性がある。過年度事業においても、岡村断層の最新活動は 1596 年文禄伊予地震に対応すると考えられている（近藤・他，2023）。以下では、イベント 1 の発生は西暦 660 年以降と考え、既往調査研究と同様に、1596 年文禄地震相当と判断して検討を進める。

イベント 2 は、主断層から派生した最も北側の断層が、V 層の最下部およびⅥ層以下の地層を切断し、V 層最上部に覆われることで認定される。この断層は、Ⅵ層以下の地層に明瞭な上下変位を生じており、断層直近のみで約 1 m である。ただし、この変位量には、断層帯内部で北傾斜するⅥ層の変形量については含まれていない。Ⅵ層は、低下側を埋積して西へ向かって流下した砂礫層であり、低崖に対してアバットして堆積する。一方、V 層・フラッドローム層の最下部は、Ⅵ層と明瞭な断層関係にある。断層の傾斜は極僅かに南傾斜であり、断層南側のⅥ層はオーバーハングして V 層最下部と接している。よってイベント前に V 層最下部が既に堆積していたことが確実である。以上から、イベント 2 は、V 層最下部の堆積後、V 層上部の堆積前に生じた。

イベント 2 の発生年代は、V 層から連続的に採取した年代試料から制約できる。西壁面では V 層の最下部から最上部にかけて、概ね 20cm 間隔で 6 個のバルク試料から年代値を得た。これらは、既述のように逆転する年代値を含むが、全体として下位から上位へ約 1.5 万年前から約 1 万年前にかけて堆積したと考えられる。Ⅵ層を切断する断層の上端と年代試料との位置関係からみて、イベント層準は 11410 ± 40 y. B. P（13200～13400 calBP）と 14410 ± 50 y. B. P（17400～17800 calBP）の間に位置する。よって、ここではイベント 2 の発生年代を約 1.3～1.8 万年前と判断した。

イベント 3 は、Ⅷ層・段丘礫層堆積後、Ⅶ層堆積前に生じた。トレンチ東壁面では E09 付近、西壁面では W07 付近の副断層は、いずれもⅧ層を切断し上位のⅦ層に覆われている。また、断層帯全体を挟んだ両側でⅧ層上面の比高は 4.2m であり、最近 2 回の累積変位量 2.5m よりも大きい。すなわち、Ⅷ層はより多くのイベントに伴う上下変位を受けていることが確実である。よって、イベント 3 はⅧ層堆積後、Ⅶ層堆積前に生じたと判断した。

イベント 3 の発生年代は、下限を示す年代試料は得られていないものの、Ⅶ層から AT が検出されているため、約 2.9 万年前頃と推定される。Ⅷ層は約 2.9 万年前以前に堆積した L 1 面を構成する段丘礫層であり、最終氷期に発達した扇状地礫層である。これは周辺の地形発達や段丘面区分と年代観からみても矛盾しない。よって、イベント 3 の発生年代は約 2.9 万年前と考えられる。

以上から、西条市坂元地区において過去 3 回の古地震イベントが検出された。各イベントの発生年代に基づく活動間隔は、イベント 1 と 2 で 12800～18200 年、イベント 2 と 3 で

11200～15800 年程度と算出される。イベント 1 と 3 の時間間隔を 2 で除した場合、平均活動間隔は 14300 年程度である。これらの活動間隔は、周辺の岡村断層や川上断層の活動間隔が、それぞれ 1500～1800 年、700～1300 年と推定されている（地震調査研究推進本部地震調査委員会，2017）のに対して有意に長い。

iii) 各イベントに伴う地震時変位量

イベント 1～3 に伴う地震時変位量は、上下変位のみ計測可能である。トレンチで露出した高角～ほぼ鉛直の断層面形状からみて、実際は横ずれ成分も伴う可能性が高いが、正断層上のトレンチであるため、ここでは主成分である上下変位のみについて検討する。なお、断層面の形状と応力方位が長期間で劇的に変化しない限りは、イベント毎の横ずれ成分・上下変位成分の比は変化しない。

イベント 1 の上下変位量は、トレンチを掘削した土地境界の低崖およびⅢ層下面を変位基準として計測した。いずれも比高 1.5m 程度である。イベント 1 はⅢ層堆積後に生じたため、これらがイベント 1 に伴う上下変位量を示す。

イベント 1 および 2 に伴う累積変位量は、Ⅵ層上面を基準に計測した。Ⅵ層は低崖に対してアバットして堆積し、南へ向かって層厚を減じているため、さらに先行するイベントで形成されていた変動崖の比高を埋積して堆積したとみられる。イベント 2 の発生前にⅥ層がこの比高を完全に埋積していたと仮定すると、隆起側のⅧ層上面とⅥ層上面がほぼ水平だったと考えることができる。この場合、累積上下変位量は 2.5m と計測できる。一方、Ⅵ層が比高を埋積する途中でイベント 2 が生じた場合、Ⅷ層上面とⅥ層上面の比高は累積変位量としては過大になる。ここで、グリッド E07 と E09 付近の主断層に伴う上下変位をみると、イベント 1 に伴うⅧ層上面とⅢ層上面の変位量は同程度である。よって、主断層はイベント 1 で活動したものの、イベント 2 では変位しておらず、イベント 2 は最も北側の副断層が主に活動した。したがって、イベント 2 の発生前にⅥ層上面がほぼ水平に堆積していたという仮定が妥当であり、最近 2 回の累積上下変位量は 2.5m と考えられる。以上から、イベント 1 の上下変位量 1.5m を差し引きして、イベント 2 に伴う地震時上下変位量は 1.0m と算出される。

イベント 1～3 の累積変位量は、上述のように、Ⅷ層上面を基準として断層帯全体を挟んだ両側で 4.2m と計測できる。よって、最近 2 回の累積変位量を差し引きして、イベント 3 の地震時上下変位量は 1.7m と求まる。

以上から、西条市坂元地区トレンチにおける地震時上下変位量は、イベント 1 : 1.5m、イベント 2 : 1.0m、イベント 3 : 1.7m であることが明らかとなった。

d) 地形地質断面に基づく平均変位速度の検討

ドローン LiDAR による地形断面図にボーリング調査の層序を加えて地形地質断面図を作成し、各段丘面毎の累積変位量や年代の検討、平均変位速度の推定をおこなった。掘削したボーリングは合計 7 孔であり、トレンチ地点周辺の地形断面-1 に沿って断層低下側の L 2 面で 3 孔 (SJSK-01～03 孔) と隆起側の L 1 面上で 1 孔 (SJSK-04 孔)、地形断面-2 に沿って断層低下側の L 1 面上で 1 孔 (SJSK-05 孔) と隆起側の M 1 面上で 1 孔 (SJSK-06 孔)、地形断面-3 に沿って断層南側の M 2 面上で 1 孔 (SJSK-07 孔) である。また、同一の地形

面上で形成された撓曲崖/低断層崖の比高を計測するため、L 1 面上で地形断面-1' を作成した。ボーリングの各孔では、段丘面を構成する砂礫層と一部で AT 火山灰を検出した。また、M 2 面の SJSK-07 孔のみで断層破碎帯を伴う和泉層群の基盤岩が露出した。ボーリングコアの写真を図 11、柱状図を図 12 に示す。また、地形断面-1 ～ 3 および 1' に沿う地形地質断面図を図 13～16 に示す。以下では、地形地質断面に基づく累積上下変位量と平均変位速度、岡村断層沿いで計測された累積横ずれ量と平均変位速度について略述する。

i) L 1 面の累積変位量と平均変位速度

トレンチは L 1 面と L 2 面を境する活断層上で掘削し、両地形面の構成層が確認された。トレンチ用地周辺よりも長い測線で累積変位量を計測するため、地形断面-1 を基にトレンチ・ボーリング層序を加味して検討した（図 13）。その結果、地形断面上の撓曲崖の比高は 3.5m であるものの、L 1 面構成層である VII 層・砂礫層の上面を計測した場合、比高 5.8m と計測された。これらの差異は、低下側を L 2 面構成層（11～18ka）が埋積し、L 1 面構成層の上面が埋没しているためである。VII 層の直上には約 2.9 万年前の AT 火山灰がみいだされ、火山ガラスの含有量やガラス片の角が摩耗されていない形態から、VII 層の堆積年代はほぼこれと同時代とみなせる。よって、累積上下変位量 5.8m を約 2.9 万年で除して、0.2mm/yr の上下変位速度が推定された。

また、この活断層トレースの南側では、概ね並走して L 1 面および M 1 面を切断する低断層崖が延びる。この正断層トレースに沿う上下平均変位速度を推定するため、隆起側と低下側が同一の L 1 面となる地形断面-1' を作成した（図 14）。この測線では、低崖の比高は 1.8m と計測される。L 1 面構成層の年代は上記の通り、約 2.9 万年前とみられるため、0.06mm/yr の上下平均変位速度が算出された。

ii) M 1 面の累積変位量

地形断面-2 は、隆起側の M 1 面、低下側の L 1 面を境する撓曲崖を横断して作成した（図 14）。M 1 面は北へ向かって撓み下がり、断層推定位置で L 1 面との比高が 6.4m となる。両地形面のボーリング層序では、M 1 面を構成する砂礫層である X 層は、低下側のボーリング（SJSK-05 孔）では地表から深さ 5 m 前後に位置し、上位を L 1 面構成層に覆われる。隆起側の M 1 面の勾配を低下側の M 1 面構成層の上面に外挿して、M 1 面構成層の比高を計測した場合、累積上下変位量は 12.3m と計測された。M 1 面の形成年代は直接的には不明である。ただし、上記の L 1 面にもとづく上下変位速度が 0.06mm/yr であるため、ここでも同程度である可能性が高い。

iii) 岡村断層の横ずれ平均変位速度

石鎚山脈と西条平野の境界付近には、岡村断層が断続的に延び、ドローン LiDAR によって段丘崖の累積的な横ずれ量が計測された。M 1 面と M 2 面、M 2 面と L 1 面の間に形成された段丘崖は、岡村断層を境にそれぞれ 33.3m、26.2m の累積的な右横ずれ変位を受ける。横ずれ平均変位速度を算出するため、各段丘面の構成層と形成年代、形成史について検討する。

M1 面と M 2 面については、直接的に形成年代を示す年代試料が得られていない。一方、L 1 面の形成年代については、上述のように AT 火山灰降灰頃の約 29ka と推定される。ま

た、M1面とL1面で掘削したボーリングでは、いずれも地表から深さ15mまで段丘礫層が確認されており、氷期ないし亜氷期の堆積段丘であると判断できる。M2面上で掘削したSJSK-07孔では、地表下3mに破碎した和泉層群が露出する。そのため、M2面は浸食段丘であり、M1面の堆積段丘後に形成されたフィロストラス性の段丘面と考えられる。L1面は、年代から判断して、MIS2の最終氷期の堆積段丘面である。また、さらに下位のL2面は、トレンチの低下側に広く分布し、沖積低地に埋没する最終氷期極相期の18ka頃以降に形成された段丘面である。トレンチに露出したL2面構成層の中で、段丘礫層(VI層)の直上を覆うフラッドローム層(V層)最下部からも約18kaの年代測定結果が得られている。

これらを踏まえて、M2面とL1面を境する段丘崖は、次の段丘形成史によって年代を限定することができる。浸食段丘であるM2面形成後、河谷の浸食基準面が低下し、M2面を浸食する側刻が開始された。その後、L1面を構成する砂礫層が厚く堆積し、現在のL1面の高さまで約29ka頃に埋積を終えてL1面が形成された。さらに河谷の浸食基準面が低下し、L2面の形成が始まるとともに、最終氷期極相期の海水準最低下期頃の約18kaから11kaにかけてL2面が形成された。

この段丘形成史に基づけば、M2面とL1面を境する段丘崖は、L1面が形成を終了した約29ka頃と判断できる。この年代値によって26.2mの累積変位量を除して、0.9mm/yrが求まる。さらに保守的な年代を考慮すれば、段丘崖の形成時期はL2面形成開始以前の18ka以前である。この場合、平均変位速度の最大値として1.9mm/yrが推定される。以上から、M2面とL1面の段丘崖を基準として、右横ずれ平均変位速度の最良推定値として0.9mm/yr、推定幅を考慮した場合 1.4 ± 0.5 mm/yr (0.9~1.9 mm/yr)が推定された。

2) プルアパート盆地の形成と連動イベントとの関係

坂元地区周辺で複数分岐する活断層毎に平均変位速度を整理した(図17)。トレンチを掘削した最も北側の正断層では上下変位速度0.2mm/yr、中央の正断層では上下変位速度0.06mm/yr、最も南側の岡村断層では右横ずれ平均変位速度0.9mm/yrである。この結果は、坂元地区が岡村断層の西端付近に位置しても、依然として上下変位速度よりも横ずれ変位速度が大きいことを示す。また、プルアパート盆地を形成する正断層のうち、最も盆地側(北側)の活断層がより速い変位速度と高い活動性をもつことが示された。したがって、坂元地区トレンチで得られた変位履歴は、プルアパート盆地の形成に寄与する正断層の活動性として代表性を持つ。

西条平野は、岡村断層と川上断層の右ステップにより形成されたプルアパート盆地と考えられている(後藤・中田, 2000)。すなわち、両断層の地震時の横ずれ運動に対応して局所的な引張場が形成され、その地震時変位が地形・地質学的な長期間に累積した結果、周辺の山地と盆地の分化が進んだ。プルアパート盆地が形成されるためには、岡村断層及び派生する北側低下の正断層と、川上断層及び派生する南側低下の正断層の平均変位速度が同程度でバランスしている必要がある。そうではなく、仮に岡村断層の変位速度が川上断層よりも著しく大きい場合、岡村断層と派生する北側低下の正断層の変位速度が大きくなり、プルアパート盆地ではなくハーフグラabenが形成される。川上断層の変位速度が大きければ、その逆向きのハーフグラabenの構造が形成される。

両断層の活動間隔をみると、それぞれ 1500～1800 年、700～1300 年であり、川上断層がやや高い頻度（最大で 2.6 倍程度）で活動したと推定される。それぞれの断層がこの頻度で単独イベントを繰り返したとしても、断層端部で生じるわずかな上下変位がプルアパート盆地の形成に寄与するとは考えにくい。一般に、地震断層末端付近で生じる地震時変位量は数十 cm かそれ以下のオーダーであり、末端に向かうにつれて変位が減少し 0 になる。仮に、両断層の地震時上下変位量が同程度の場合、川上断層の頻度が高いため累積上下変位も結果として大きくなり、川上断層側の累積沈降量が大きいハーフグラabenとなる。しかし現実にはプルアパート盆地が形成されているため、両断層が同時に活動するイベントでメートルオーダーの上下変位と沈降を生じる必要がある。すなわち、プルアパート盆地の形成に最も寄与するイベントは、岡村断層と川上断層の連動イベントであるとみなせる。

坂元地区トレンチで露出した断層と地震時変位量からみて、同地点ではイベント毎に 1.0～1.7m 程度の北側低下の上下変位が繰り返されている。1596 年文禄伊予地震相当のイベントでは、岡村断層と川上断層を含む石鎚山脈北縁西部区間が連動し、1.5m 程度の上下変位が生じたとみられる。これらのデータは盆地内を延びる正断層のうち、最も北側のトレース上のみで計測したものであるが、プルアパート盆地の形成に寄与するイベントであることは確実である。したがって、坂元地区で復元された変位履歴は、岡村断層と川上断層が連動したイベントを示しており、その連動間隔は 11200～18200 年程度と推定される。

この結果は、過年度事業で推定した石鎚山脈北縁西部区間と石鎚山脈北縁区間の連動間隔 2600～2900 年よりも長いものとなっている。この連動間隔は、地震時変位量を考慮せず、両区間で過去の活動時期が重なるイベントを連動型イベントとみなして算出したものである（近藤・他、2023）。今回推定した連動間隔は、活動時期だけでなく地震時変位量も加味して検討した結果であり、妥当性が高いと考えられる。すなわち、活動時期が重なるという根拠は、各イベント年代の推定幅に入っているだけであり、個別試料の年代測定誤差が最小でも±30 年であることを鑑みれば、実際の連動型イベントが数分で生じる現象に対して時間解像度が不足している。したがって、可能な限り連動型イベントの候補に伴う地震時変位量を復元し、連動/非連動の判別をおこなうことが信頼度の高い連動履歴の復元にとって重要であることが示された。

このように、今年度は、横ずれ断層の端部付近で生じる上下変位とその変位履歴を基に、過去の連動型イベントを判別可能であることを初めて具体的に提示した。本来は、横ずれ断層の地震時変位量を復元するためには、3D トレンチ調査等によって複数回の地震時変位量を明らかにする必要がある。しかし、日本の活断層は市街地周辺に分布することも多く、必ずしも 3D トレンチを掘削できる広大な調査適地が存在するとは限らない。上下変位の場合、深さ方向に情報を増やすことが必要ではあるものの、水平方向に広く調査地が必要なわけではない。このような場合、活動区間の境界付近で上下変位に基づく変位履歴を復元できれば、過去の連動型イベントを判別し、その頻度や連動間隔を推定可能と期待される。

(c) 結論ならびに今後の課題

令和 5 年度は、中央構造線断層帯の石鎚山脈北縁西部区間の川上断層と石鎚山脈北縁区

間の岡村断層の境界付近を主な対象として、変位履歴に基づく連動性評価を実施するための基礎的なデータを野外地形地質調査により取得した。特に、横ずれ断層に沿う上下変位量に基づく変位履歴によって過去の連動型イベントを判別する新たな評価手法を確立するため、川上断層と岡村断層のステップオーバーに伴い形成されたプルアパート盆地において、最も活動的な正断層上で変位履歴を明らかにした。その結果を基に、区間境界を破壊が進展し、プルアパート盆地の形成に寄与するイベントを連動型イベントと判別する考えを検証した。

石鎚山脈北縁区間・岡村断層の西端付近に位置する坂元地区において、ドローン LiDAR 計測、トレンチ調査、ボーリング調査を実施した。周辺の活断層分布は、南から石鎚山脈と西条平野の境界付近を延びる岡村断層、平野内を岡村断層から分岐して延びる主に2条の正断層からなる。トレンチ調査は、最も北側の平野内を延びる正断層上で実施し、過去3回の活動時期と活動間隔、地震時上下変位量を明らかにした。最新活動は西暦660年以降に生じ、先行研究で指摘されている1596年文禄地震、特に9月1日の伊予地震に対応する可能性が高い。先行するイベントは約1.3～1.8万年前、さらに先行するイベントは約2.9万年前に限定された。これらをもとに最近3回の活動間隔は11200～18200年程度と推定され、従来の岡村断層の活動間隔1500～1800年よりも有意に長い。そのため、岡村断層単独のイベントとは異なるタイプの地震イベントであることを示す。また、各イベントに伴う地震時変位量は、それぞれ1.5m、1.0m、1.7mと計測された。

さらに、空中写真判読と地形分類、トレンチ・ボーリング調査による層序と年代に基づき、調査地周辺に分布する河成段丘面の区分と編年をおこない、3条の活断層それぞれについて平均変位速度を算出した。岡村断層で新たにみいだした段丘崖の累積横ずれ量26.2mと段丘面の年代約2.9万年前を基に、横ずれ変位速度が最良推定値として0.9 mm/yrと推定された。また、北側を分岐して延びる正断層上で0.06 mm/yr、トレンチを掘採した最も北側の正断層で0.2 mm/yrの上下平均変位速度を推定した。これらの結果、トレンチでみられる変位履歴は、プルアパート盆地形成に寄与する相対的に大規模なイベントであり、少なくとも川上断層と岡村断層が連動したイベントで生じたものと考えられる。したがって、石鎚山脈北縁西部区間と石鎚山脈北縁区間の連動間隔は、11200～18200年程度と推定された。この連動間隔は、過年度事業において活動時期のみから推定した2600～2900年よりも長く、連動型イベントの判別に地震時変位量を考慮する必要性が確認された。

以上のように、令和5年度は、横ずれ断層の区間境界付近で形成される上下変位や平均変位速度、活構造をもとに、上下変位の変位履歴から連動型イベントを判別する手法を新たに提示した。中央構造線断層帯全体の連動性評価を高い信頼度でおこなうためには、引き続き調査手法の改良をおこない、より多地点で効率的に多数回の変位履歴を復元していく必要がある。さらに、これまでの連動型地震の発生確率算出はポアソン過程に基づいて実施しており、BPTモデルなど他の統計モデルによる評価手法も持続的に検討し、連動確率算出手法の高度化を図っていく必要がある。

謝辞：野外調査の実施にあたり愛媛県県民環境部危機管理課、西条市経営戦略部危機管理課の各位にご協力を頂きました。掘削調査地の地権者及び耕作者の方々には、調査の趣

旨をご理解頂き、土地の使用と掘削をご快諾頂きました。西条市坂元トレンチでは、広島大・奥村晃史氏、四国総研・池田倫治氏ら諸氏、壁面の解釈や周辺の地形地質について有益な議論を頂きました。皆様に記して御礼申し上げます。

(d) 引用文献

榎原雅治, 文禄五年豊後地震に関する文献史学からの検討, 日本歴史, 865, 18-36, 2020.

後藤秀昭・中田 高, 四国の中央構造線活断層系: 詳細断層線分布図と資料, 広島大学総合地誌研究資料センター, 35, 2000.

石橋克彦, 同時代史料による文禄五年閏七月九日 (1596. 9. 1) の伊予・豊後地震, 地震第2輯, 72, 69-89, 2019.

近藤久雄・木村治夫・後藤秀昭・堤 浩之, 変位履歴に基づく連動性評価のための活断層調査. 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, 「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, 3-239, 2023.

地震調査研究推進本部地震調査委員会, 「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)」, 162pp, 2017.

町田 洋・新井房夫, 「新編火山灰アトラス-日本列島とその周辺」, 東京大学出版会, 336pp, 2003.

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.

Ramsey, C.B., Radiocarbon calibration and analysis of stratigraphy: the OxCal program. Radiocarbon, 37(2), 425-430, 1995.

Ramsey, C.B., Bayesian analysis of radiocarbon dates. Radiocarbon, 51(1), 337-360, 2009

Reimer, P., Austin, W., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P., Bronk Ramsey, C., Butzin, M., Cheng, H., Edwards, R., Friedrich, M., Grootes, P., Guilderson, T., Hajdas, I., Heaton, T., Hogg, A., Hughen, K., Kromer, B., Manning, S., Muscheler, R., Palmer, J., Pearson, C., van der Plicht, J., Reimer, R., Richards, D., Scott, E., Southon, J., Turney, C., Wacker, L., Adolphi, F., Büntgen, U., Capano, M., Fahrni, S., Fogtmann-Schulz, A., Friedrich, R., Köhler, P., Kudsk, S., Miyake, F., Olsen, J., Reinig, F., Sakamoto, M., Sookdeo, A., and Talamo, S., The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0-55 cal kBP). Radiocarbon, 62, 2020.

産業技術総合研究所 (2021) 活断層データベース 2021 年 7 月 13 日版.

<https://gbank.gsj.jp/activefault/>

Smith, V. C., R. A. Staff, S. P. E. Blockley, C. Bronk Ramsey, T. Nakagawa, D. F. Mark, K. Takemura and T. Danhara, Identification and correlation of visible tephras in the Lake Suigetsu SG06 sedimentary archive, Japan: chronostratigraphic markers for synchronising of east Asian/west Pacific palaeoclimatic records across the last 150 ka. Quaternary Science Reviews, 67,

121-137, 10.1016/j.quascirev.2013.01.026, 2013.

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.

宇佐美龍夫・石井 寿・今村隆正・武村雅之・松浦律子, 「日本被害地震総覧 599-2012」, 東京大学出版会, 東京, 694p, 2013.

表 1 西条市坂元地区における放射性炭素同位体年代測定の結果

sample	type of material	Measured Radiocarbon Age (y.B.P.)		Conventional Radiocarbon Age (y.B.P.)		cal	13C	Pretreatment	Unit
E-6.85	organic sediment	1360	30	1400	30	95.4% probability(95.4%) 600 – 666 cal AD (1350 – 1284 cal BP)	-22.81	acid washes	Ⅲa
E-7.5	organic sediment	5500	30	5530	30	95.4% probability(95.4%) 4446 – 4336 cal BC (6395 – 6285 cal BP)	-23.00	acid washes	Ⅶ (or Ⅲb)
W1.0 +16.52	organic sediment	1450	30	1480	30	95.4% probability(95.4%) 550 – 644 cal AD (1400 – 1306 cal BP)	-23.17	acid washes	Ⅲa
W1.0 +16.75	organic sediment	1250	30	1290	30	95.4% probability(95.4%) 659 – 774 cal AD (1291 – 1176 cal BP)	-22.64	acid washes	Ⅲa
W1.0 +16.82	organic sediment	1250	30	1280	30	95.4% probability(89.8%) 662 – 774 cal AD (1288 – 1176 cal BP) (5.6%) 790 – 821 cal AD (1160 – 1129 cal BP)	-22.89	acid washes	Ⅲa
W5 +15.24	organic sediment	14360	50	14410	50	95.4% probability(95.4%) 15870 – 15422 cal BC (17819 – 17371 cal BP)	-22.24	acid washes	V
W5 +15.42	organic sediment	15110	50	15150	50	95.4% probability(66.7%) 16698 – 16451 cal BC (18647 – 18400 cal BP) (28.7%) 16446 – 16320 cal BC (18395 – 18269 cal BP)	-22.27	acid washes	V
W5 +15.60	organic sediment	11360	40	11410	40	95.4% probability(94.6%) 11407 – 11224 cal BC (13356 – 13173 cal BP) (0.8%) 11448 – 11440 cal BC (13397 – 13389 cal BP)	-22.18	acid washes	V
W5 +15.80	organic sediment	13390	40	13440	40	95.4% probability(95.4%) 14381 – 14082 cal BC (16330 – 16031 cal BP)	-21.69	acid washes	V
W5 +16.26	organic sediment	9820	40	9880	40	95.4% probability(87.6%) 9406 – 9260 cal BC (11355 – 11209 cal BP) (7.8%) 9447 – 9420 cal BC (11396 – 11369 cal BP)	-21.36	acid washes	V
W5 +16.02	organic sediment	11850	40	11930	40	95.4% probability(56.3%) 11923 – 11789 cal BC (13872 – 13738 cal BP) (24.7%) 12067 – 11974 cal BC (14016 – 13923 cal BP) (9.7%) 11761 – 11701 cal BC (13710 – 13650 cal BP) (4.7%) 11685 – 11659 cal BC (13634 – 13608 cal BP)	-20.17	acid washes	V

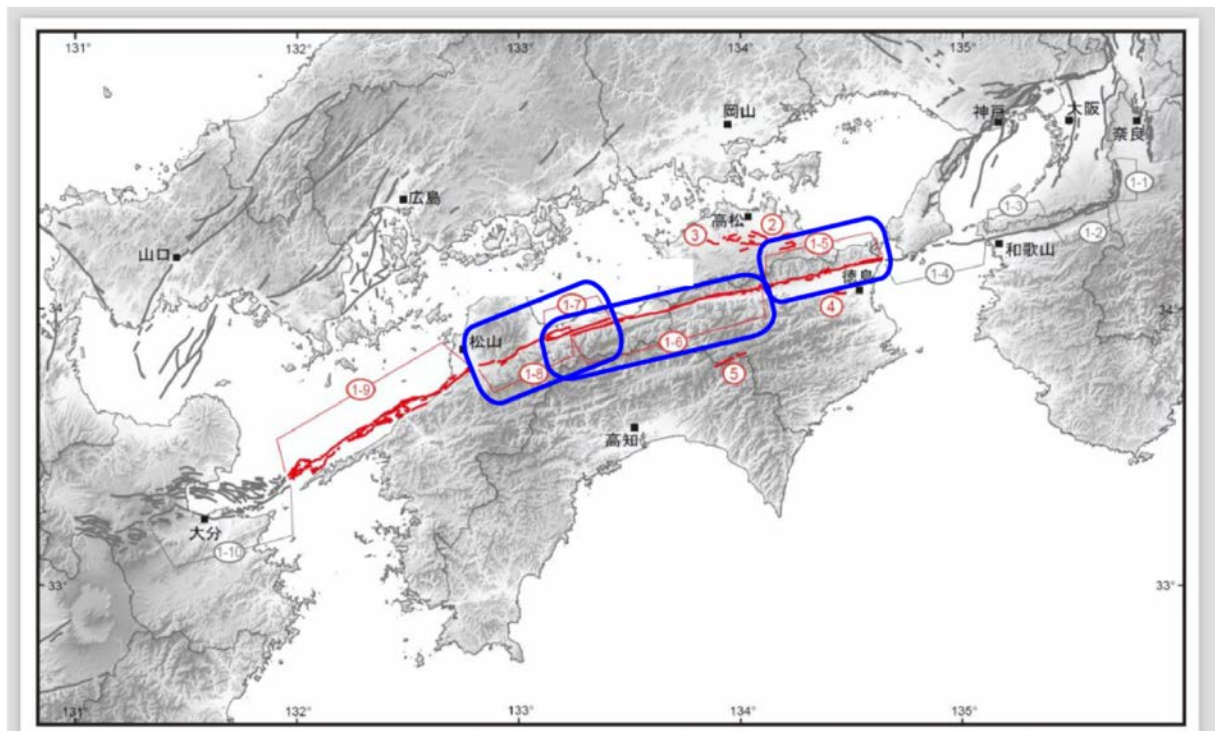


図1 中央構造線断層帯（四国）の位置と本研究で対象とする活動区間。
地震調査研究推進本部地震調査委員会（2017）に加筆。

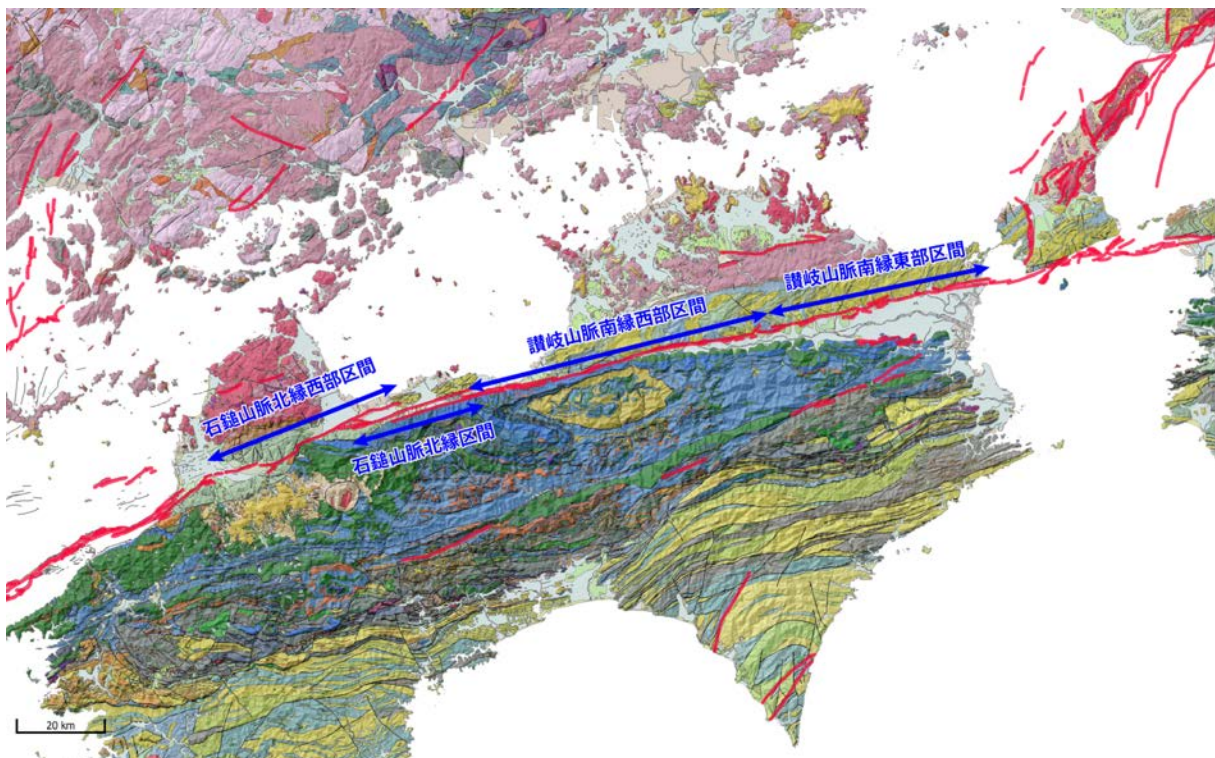


図2 中央構造線断層帯・讃岐山脈南縁東部区間及び西部区間の分布と位置。
基図は、産総研活断層データベース・地質図Navi、国土地理院陰影起伏図。

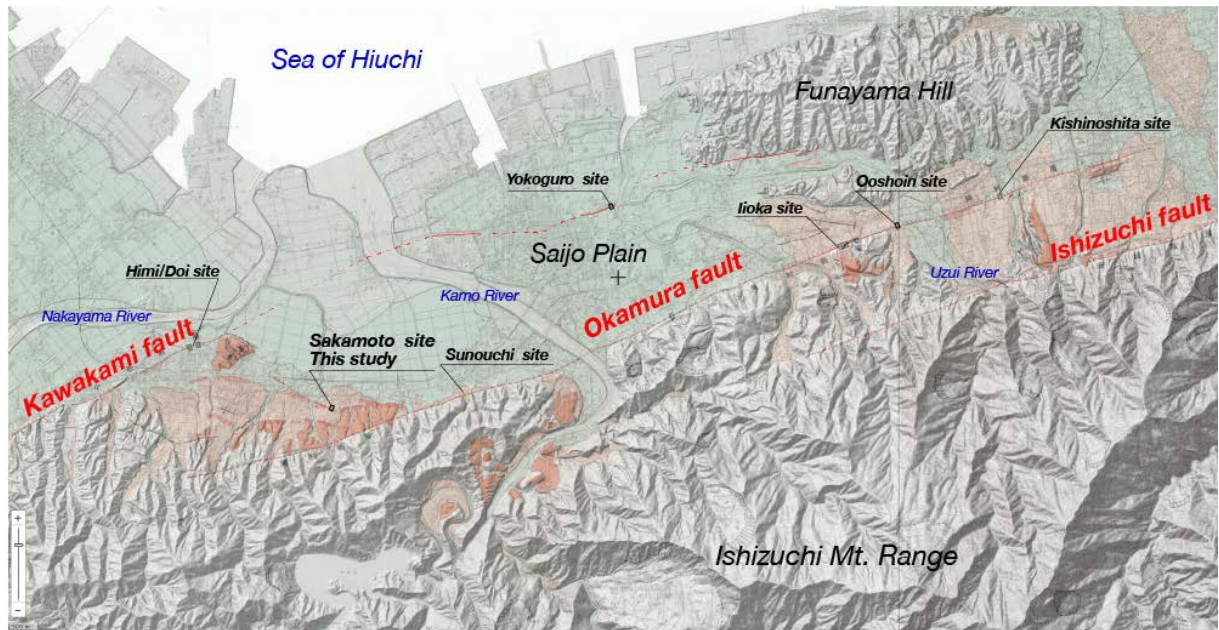


図3 石鎚山脈北縁区間と石鎚山脈北縁西部区間の境界付近の活断層分布。
 国土地理院・地理院活断層図（中田・他，1998；堤・他，1998）に加筆。

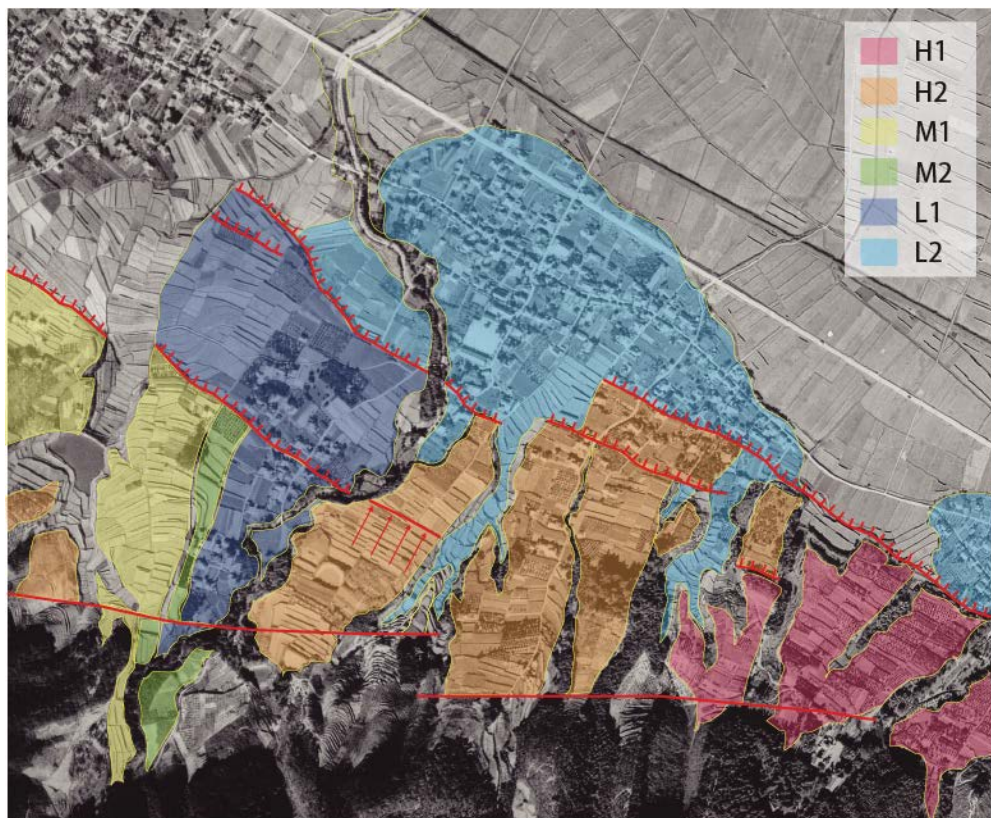


図4 西条市坂元地区周辺の地形分類図。
 活断層線を赤色線（ケバは低下側）で示す。H1～L2面は扇状地性の河成段丘面。
 基図は米軍撮影の空中写真（USA-R525-2-113）。

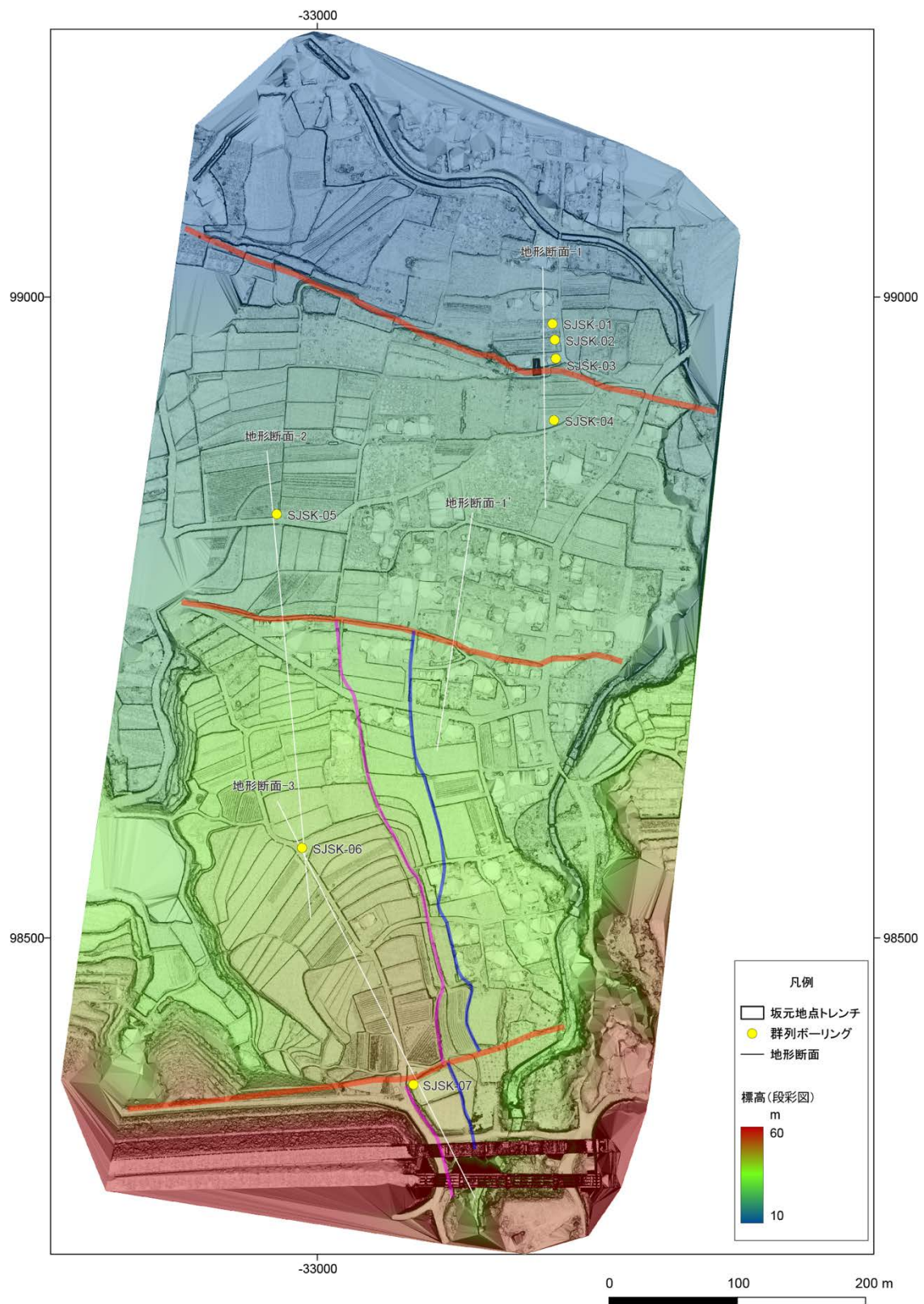


図5 西条市坂元地区周辺の高精細 DEM。
活断層線を赤色線（ケバは低下側）で示す。基図はドローン LiDAR による 0.2m メッシュ DEM。黄色の丸印はボーリングの位置。

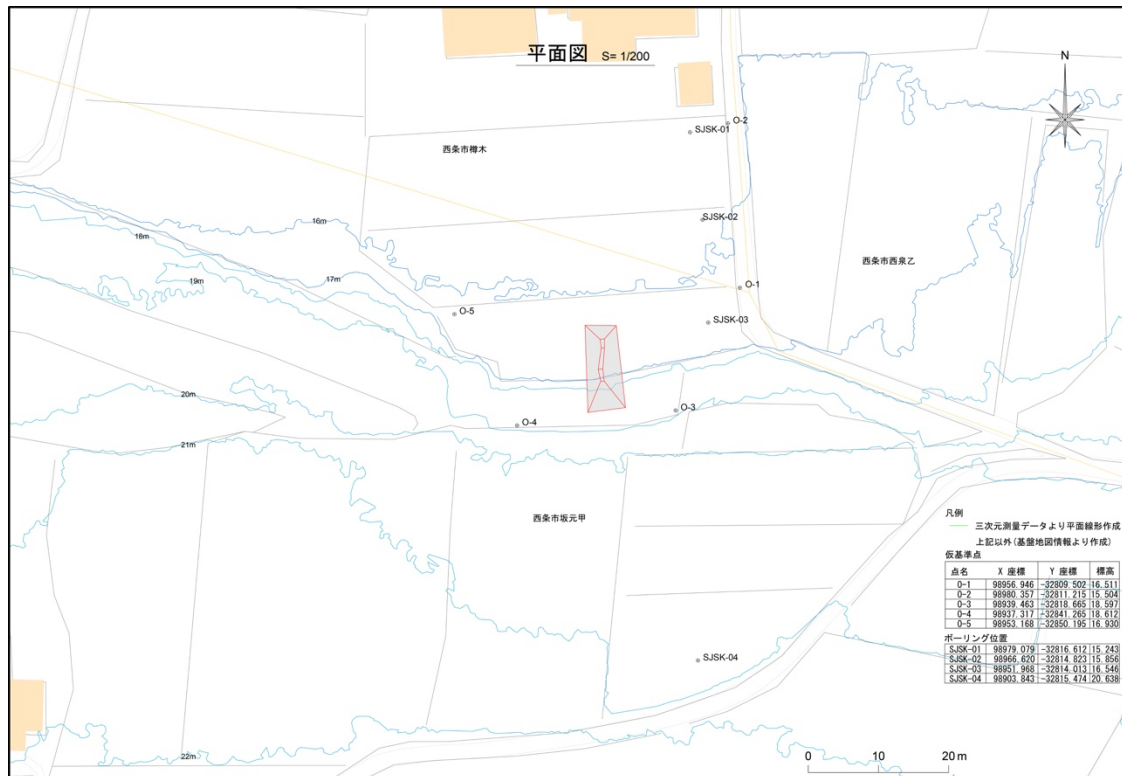


図6 西条市坂元地区トレンチ調査地周辺の平面図。
中央の矩形がトレンチ。SJSK-01～04 がボーリングの位置。

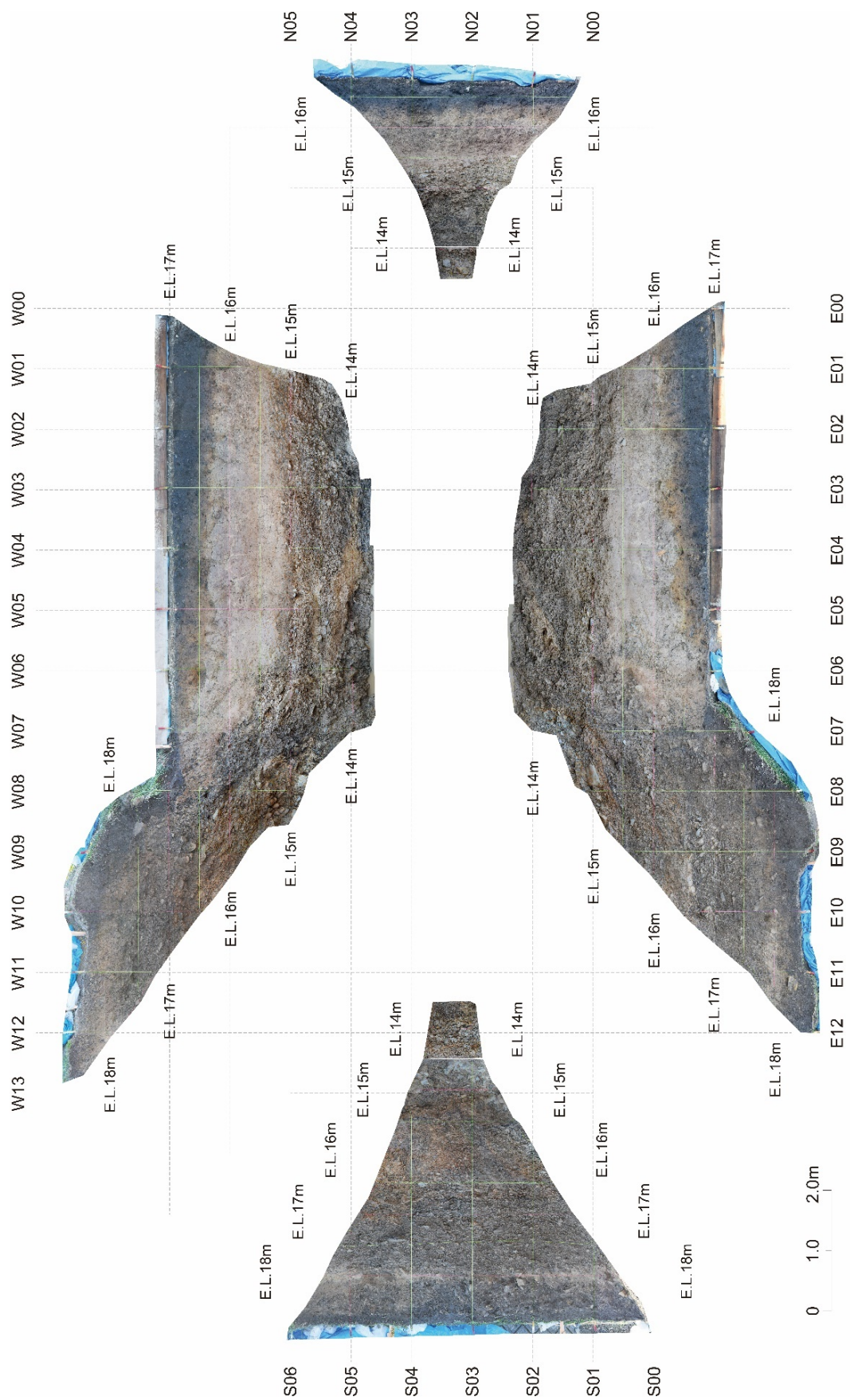


図7 西条市坂元地区トレンチの展開図（写真）。

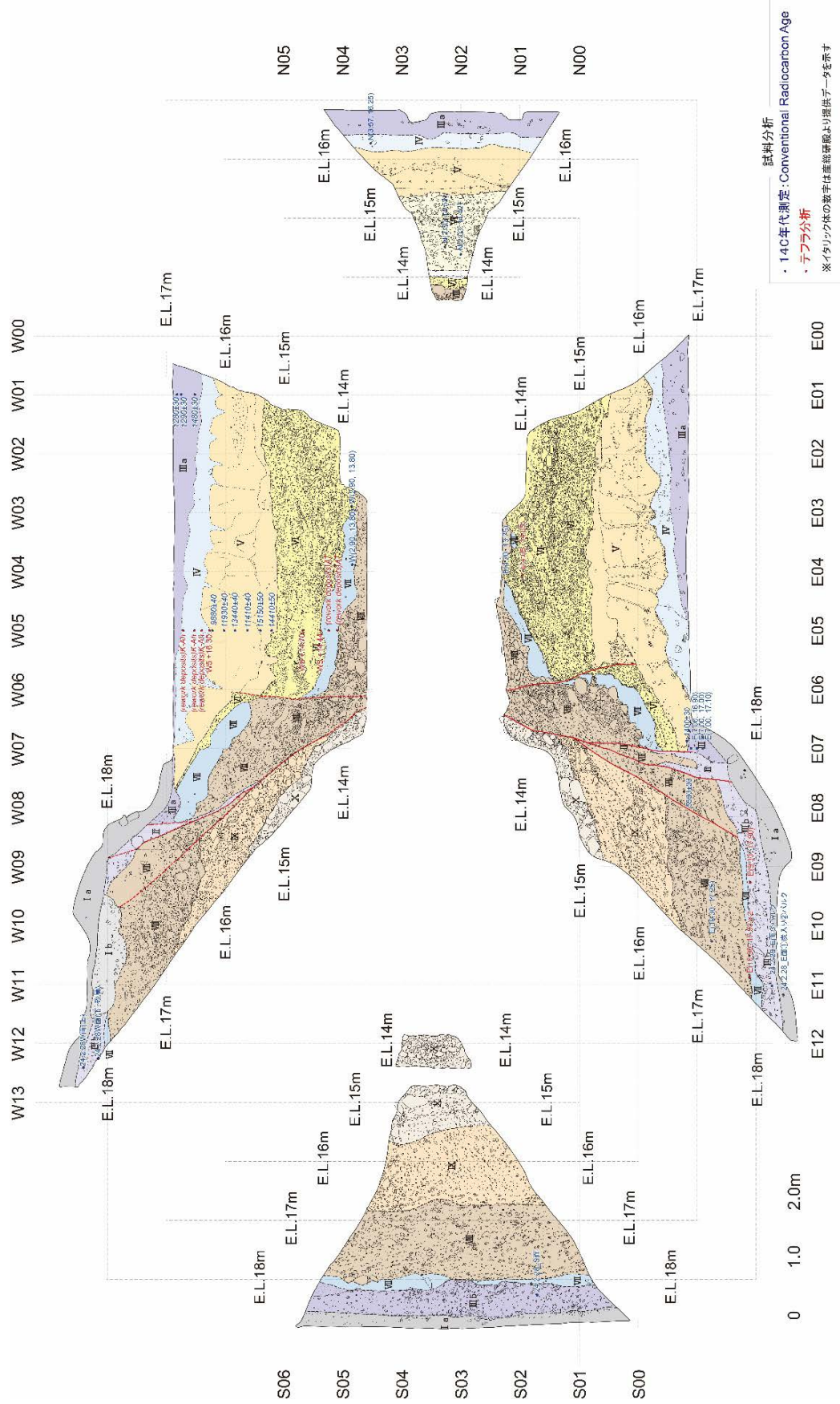


図8 西条市坂元地区トレンチの展開図 (スケッチ)。

調査件名：令和5年度中央構造線断層帯の変位履歴調査

調査孔名：SJSK-01

深 度：0.00～15.00 m

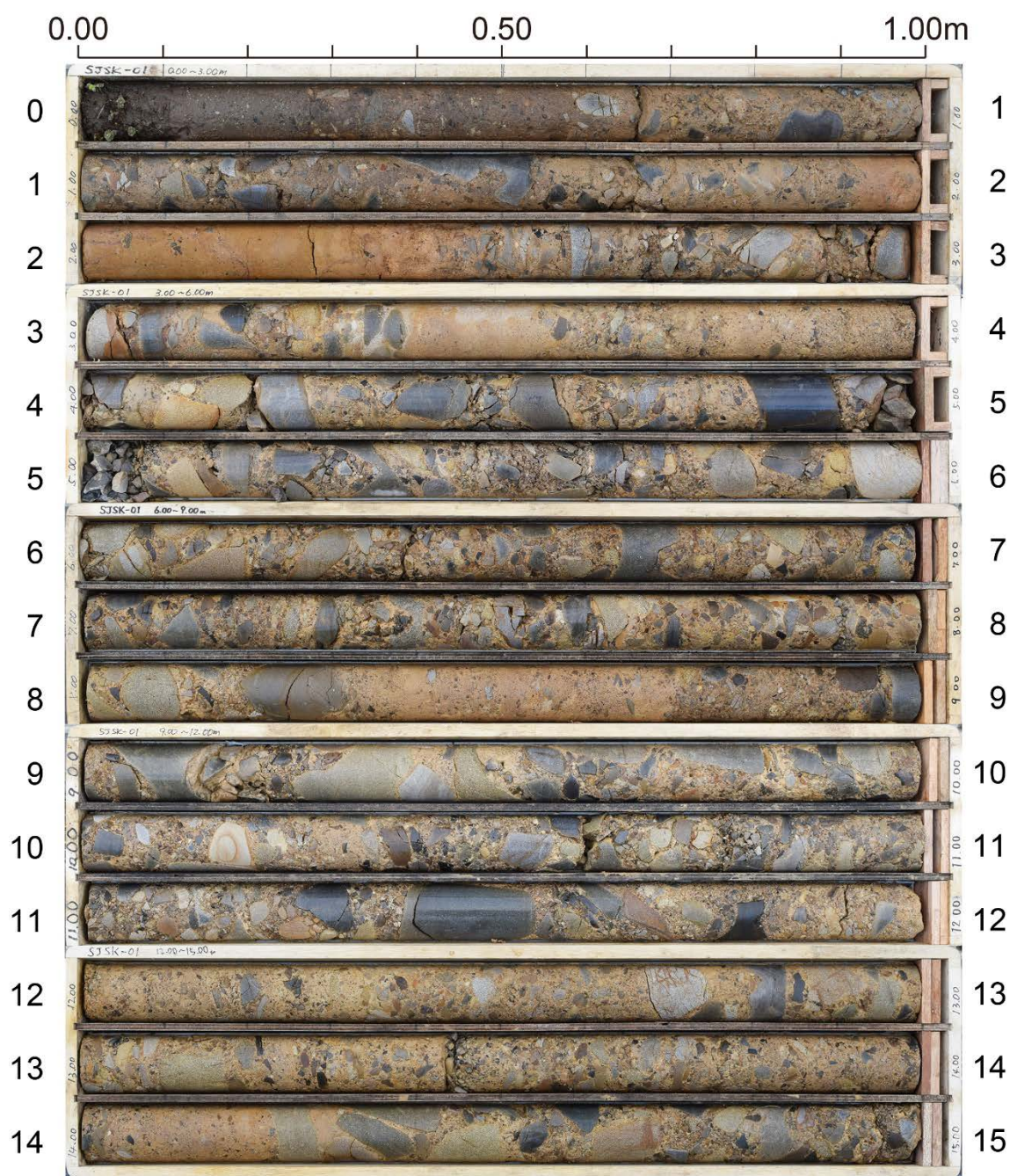


図 11 西条市坂元地区におけるボーリングコアの写真。

調査件名: 令和5年度中央構造線断層帯の変位履歴調査

調査孔名: SJSK-02

深 度 : 0.00~15.00 m

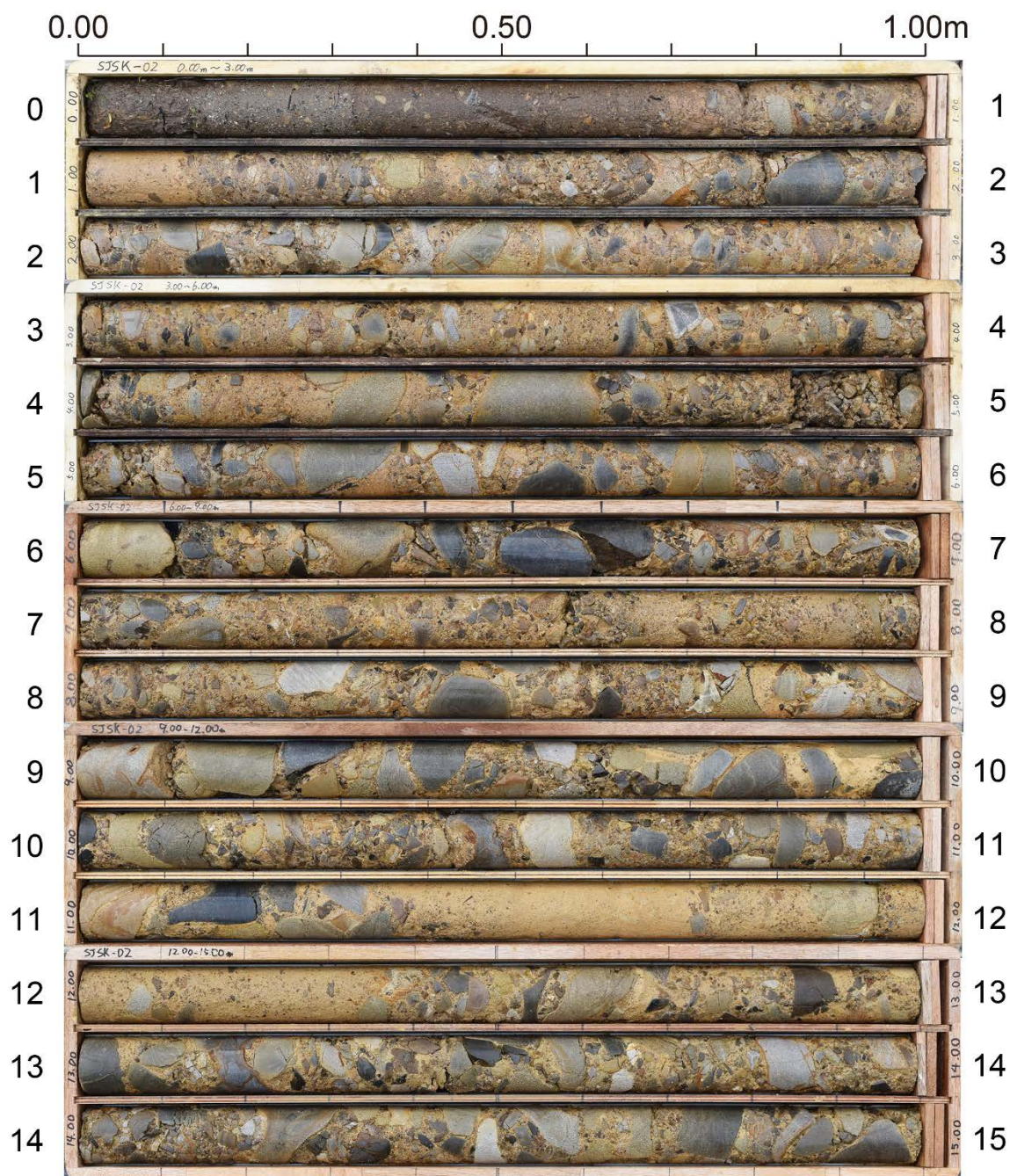


図 11 西条市坂元地区におけるボーリングコアの写真 (続き)。

調査件名：令和5年度中央構造線断層帯の変位履歴調査

調査孔名：SJSK-03

深 度：0.00～15.00 m

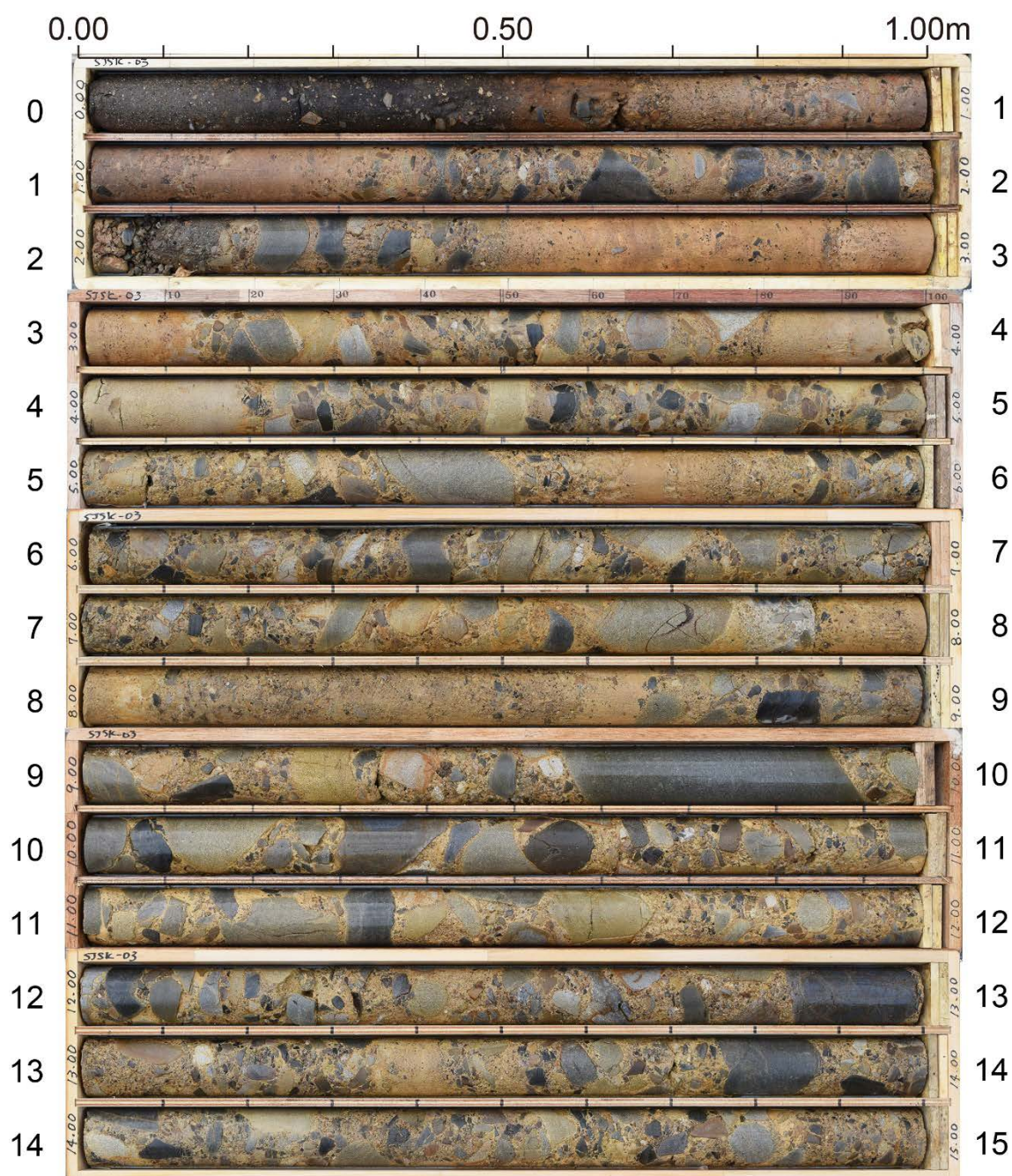


図 11 西条市坂元地区におけるボーリングコアの写真（続き）。

調査件名：令和5年度中央構造線断層帯の変位履歴調査

調査孔名：SJSK-04

深 度：0.00～15.00 m

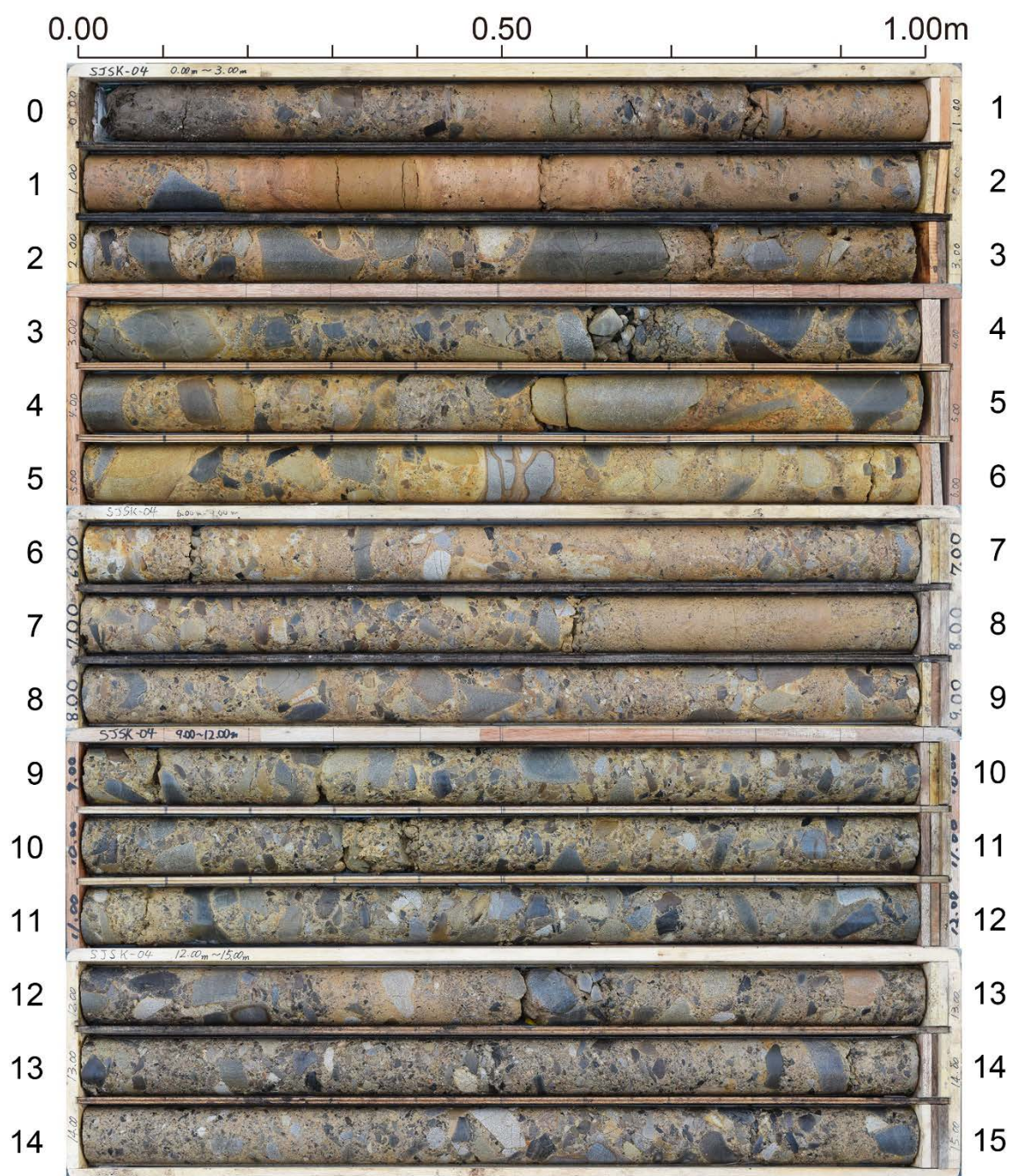


図 11 西条市坂元地区におけるボーリングコアの写真（続き）。

調査件名：令和5年度中央構造線断層帯の変位履歴調査

調査孔名：SJSK-05

深 度：0.00～15.00 m

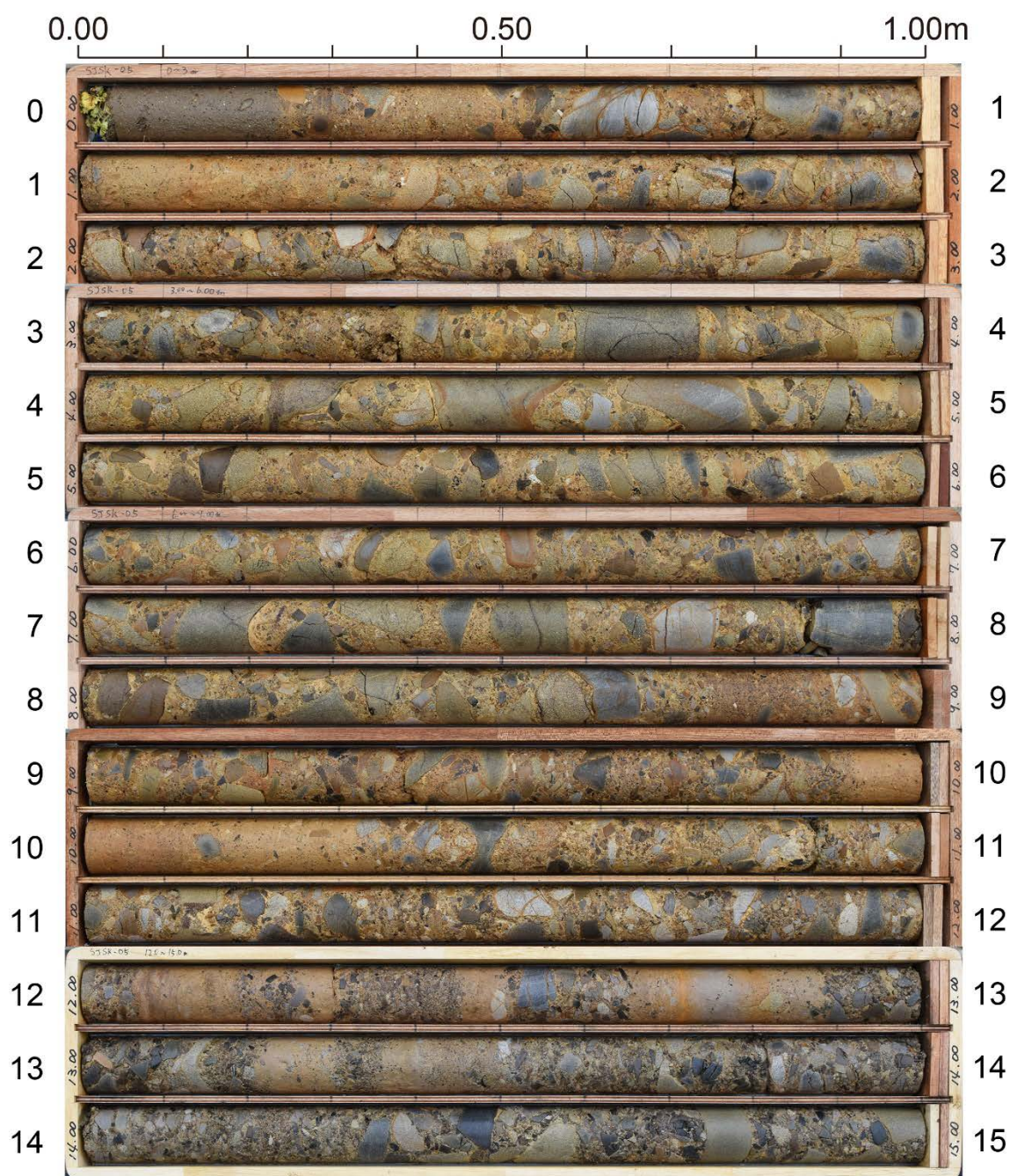


図 11 西条市坂元地区におけるボーリングコアの写真（続き）。

調査件名: 令和5年度中央構造線断層帯の変位履歴調査

調査孔名: SJSK-06

深度: 0.00~15.00 m

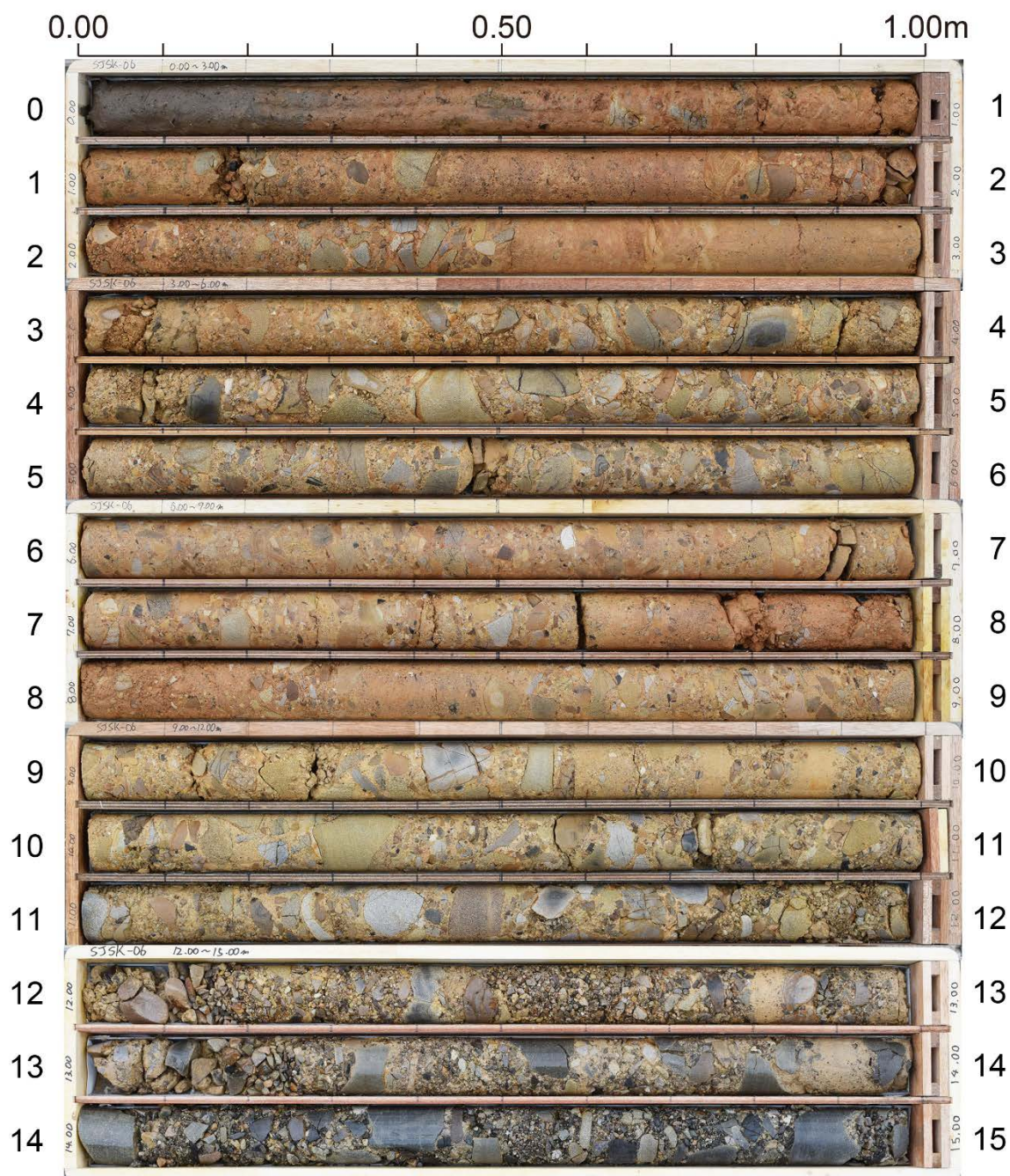
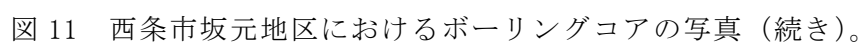


図 11 西条市坂元地区におけるボーリングコアの写真 (続き)。

深度 : 0.00~15.00 m



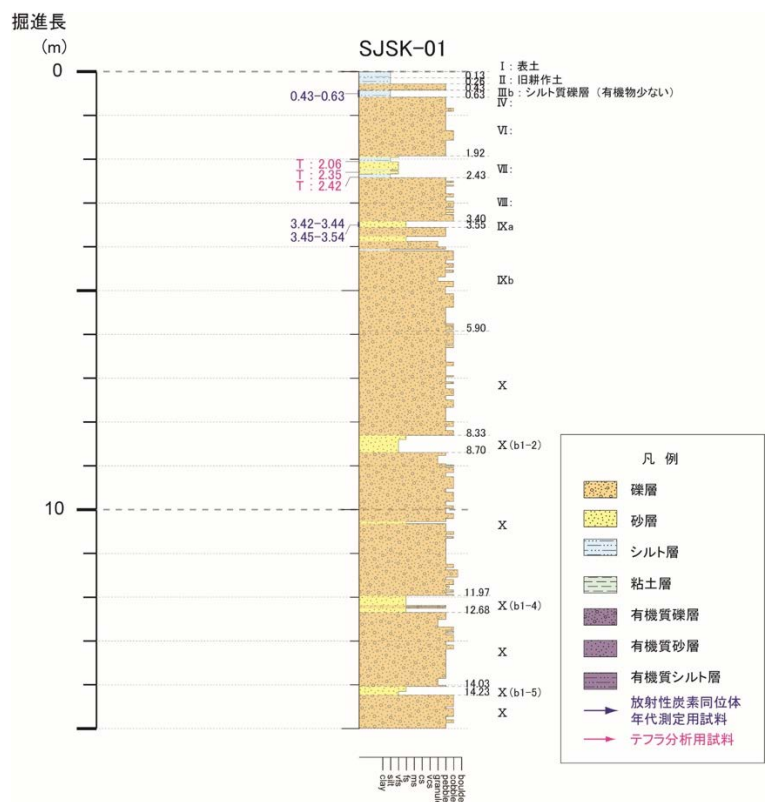


図 12 西条市坂元地区におけるボーリングコアの柱状図。

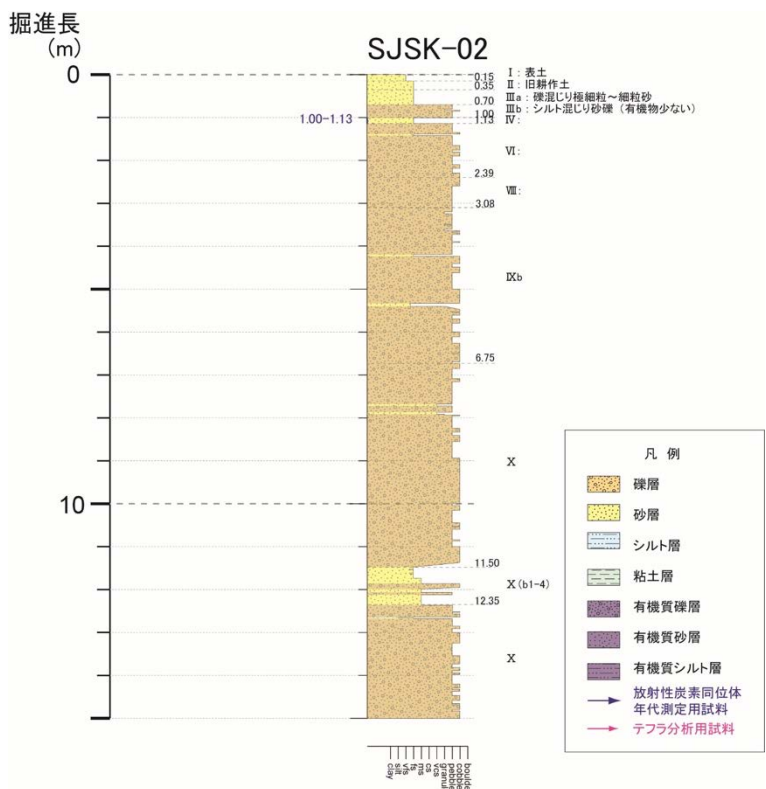


図 12 西条市坂元地区におけるボーリングコアの柱状図 (続き)。

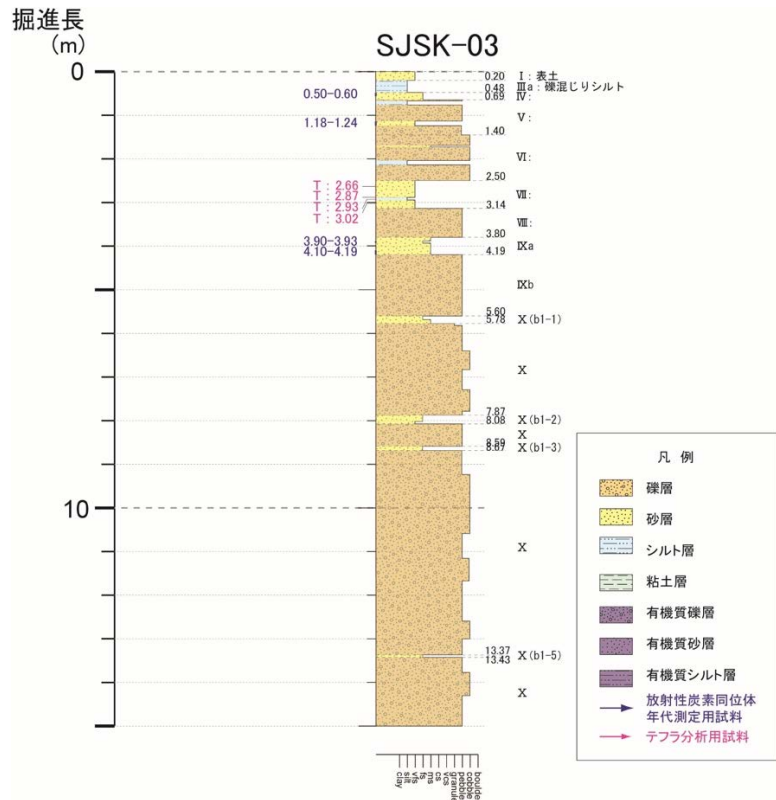


図 12 西条市坂元地区におけるボーリングコアの柱状図（続き）。

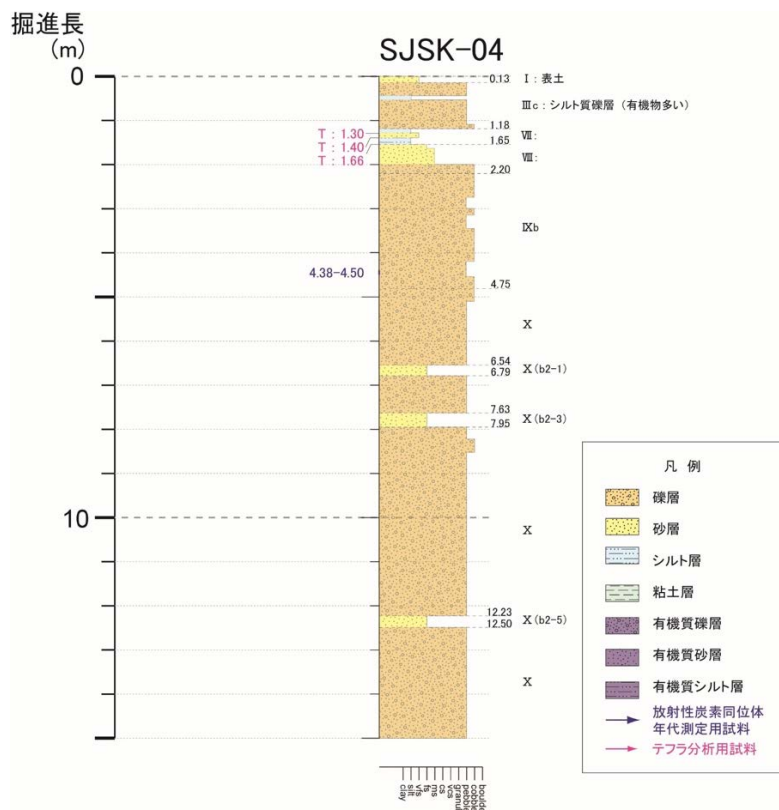


図 12 西条市坂元地区におけるボーリングコアの柱状図（続き）。

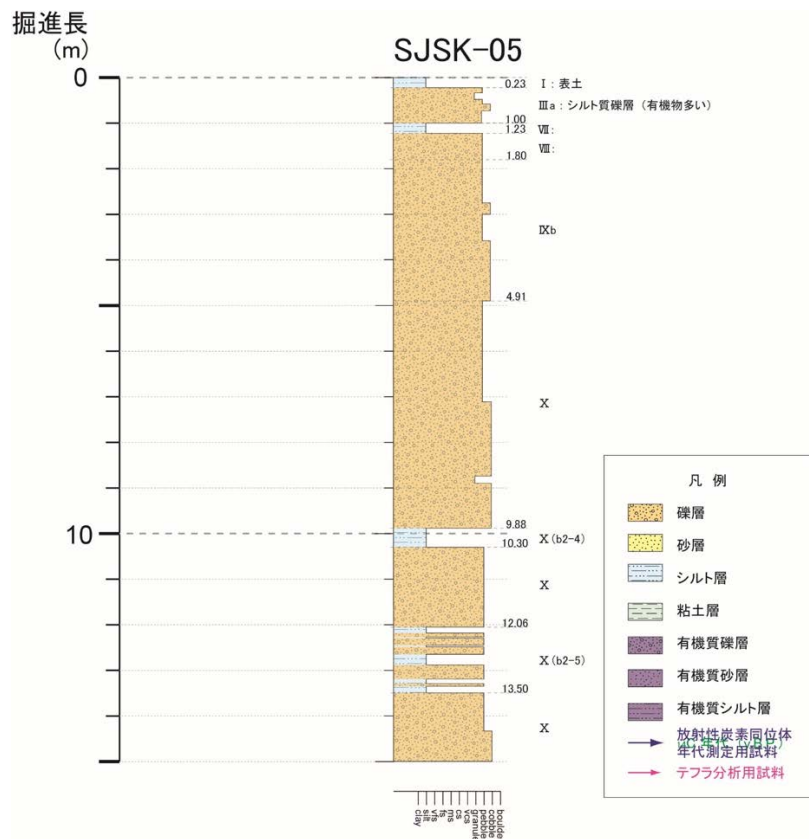


図 12 西条市坂元地区におけるボーリングコアの柱状図 (続き)。

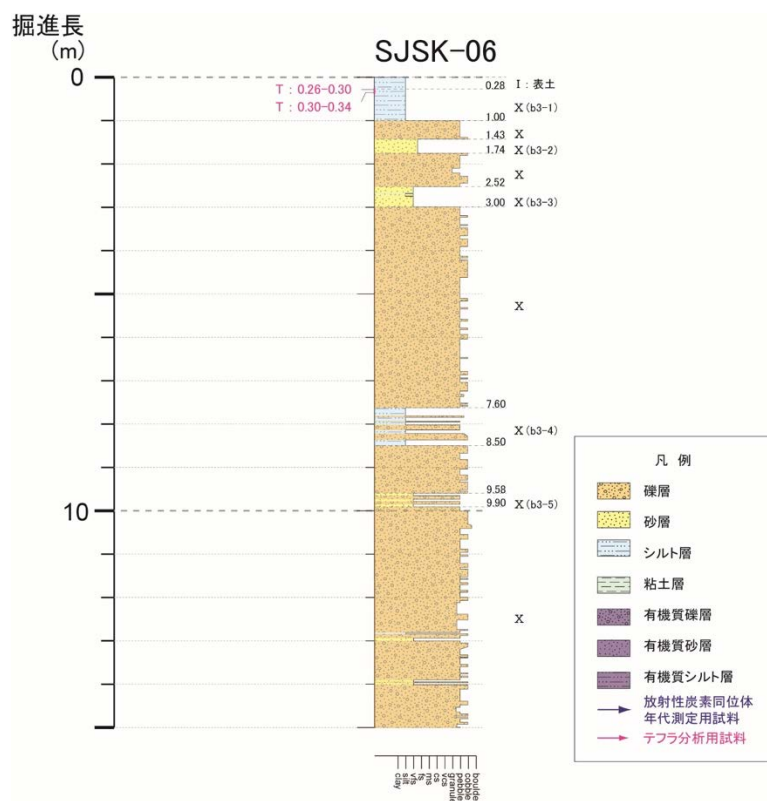
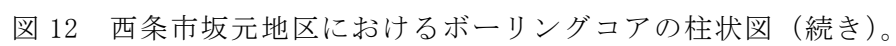


図 12 西条市坂元地区におけるボーリングコアの柱状図 (続き)。



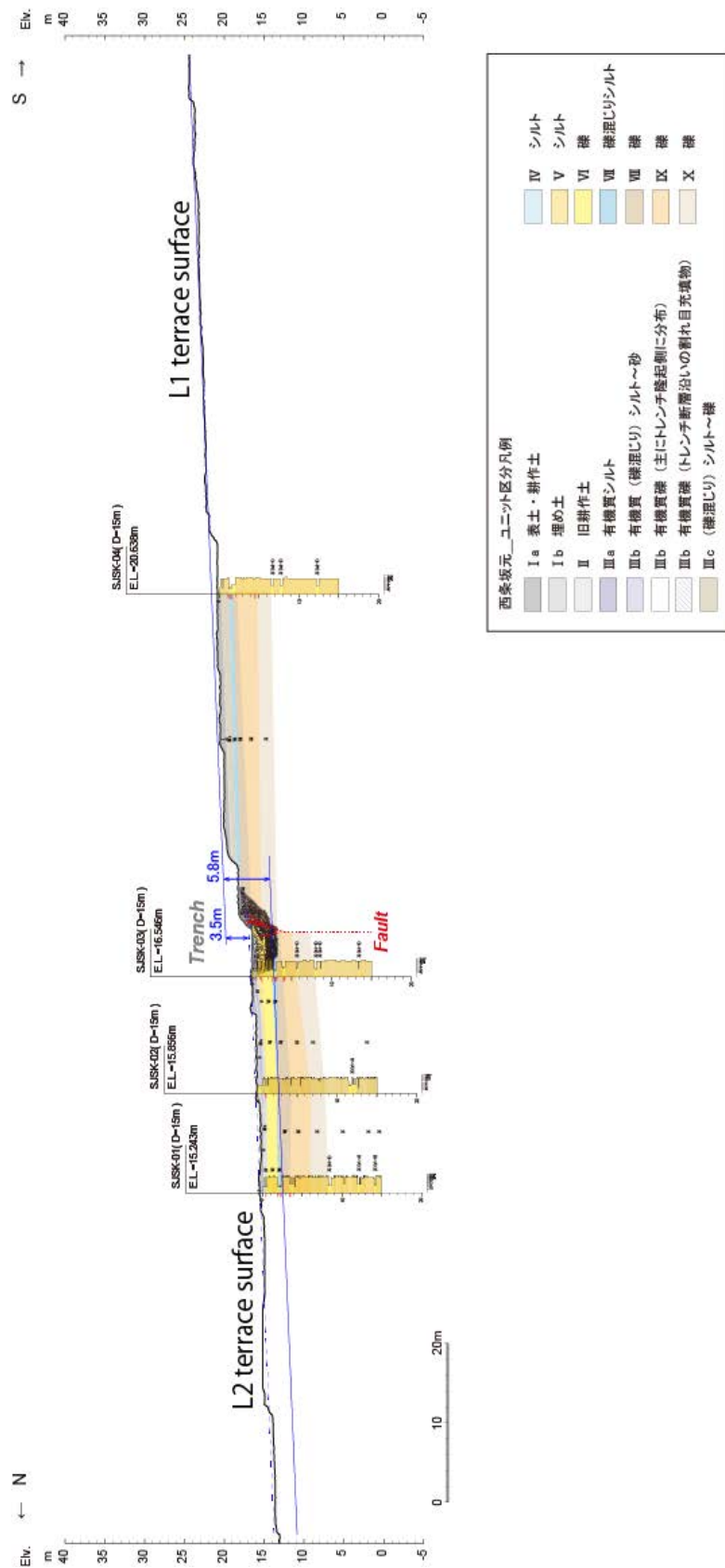


図 13 西条市坂元地区のトレンチ調査地周辺の地形地質断面図（地形断面-1）。
測線の位置は、図 5 に示す。

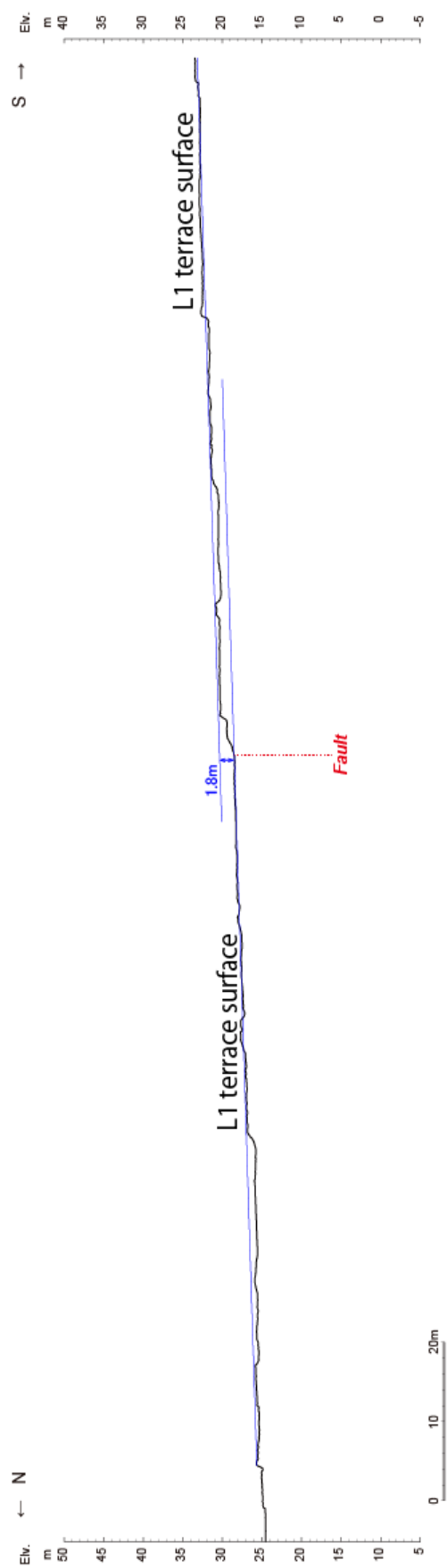


図 14 西条市坂元地区のトレンチ調査地周辺の地形地質断面図（地形断面-1'）。
測線の位置は、図 5 に示す。

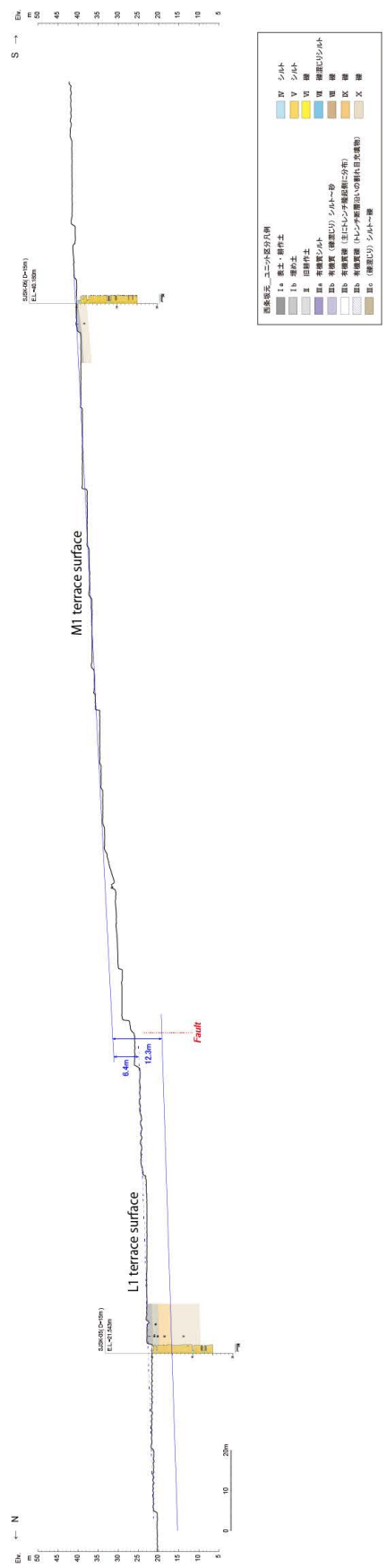


図 15 西条市坂元地区のトレンチ調査地周辺の地形地質断面図（地形断面-2）。
測線の位置は、図 5 に示す。

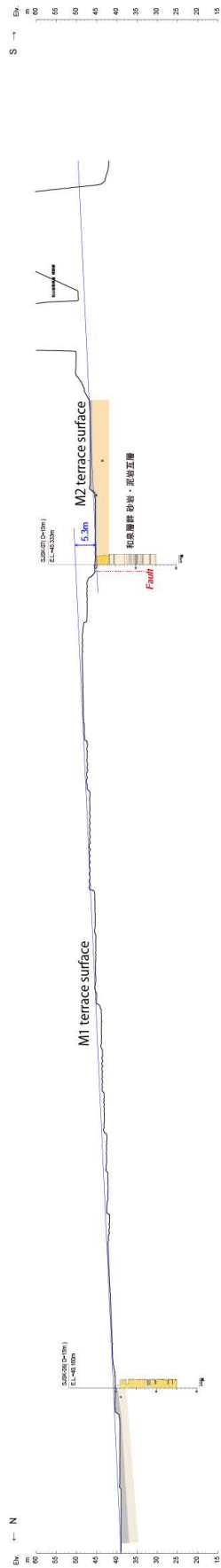


図 16 西条市坂元地区のトレンチ調査地周辺の地形地質断面図（地形断面-3）。
測線の位置は、図 5 に示す。

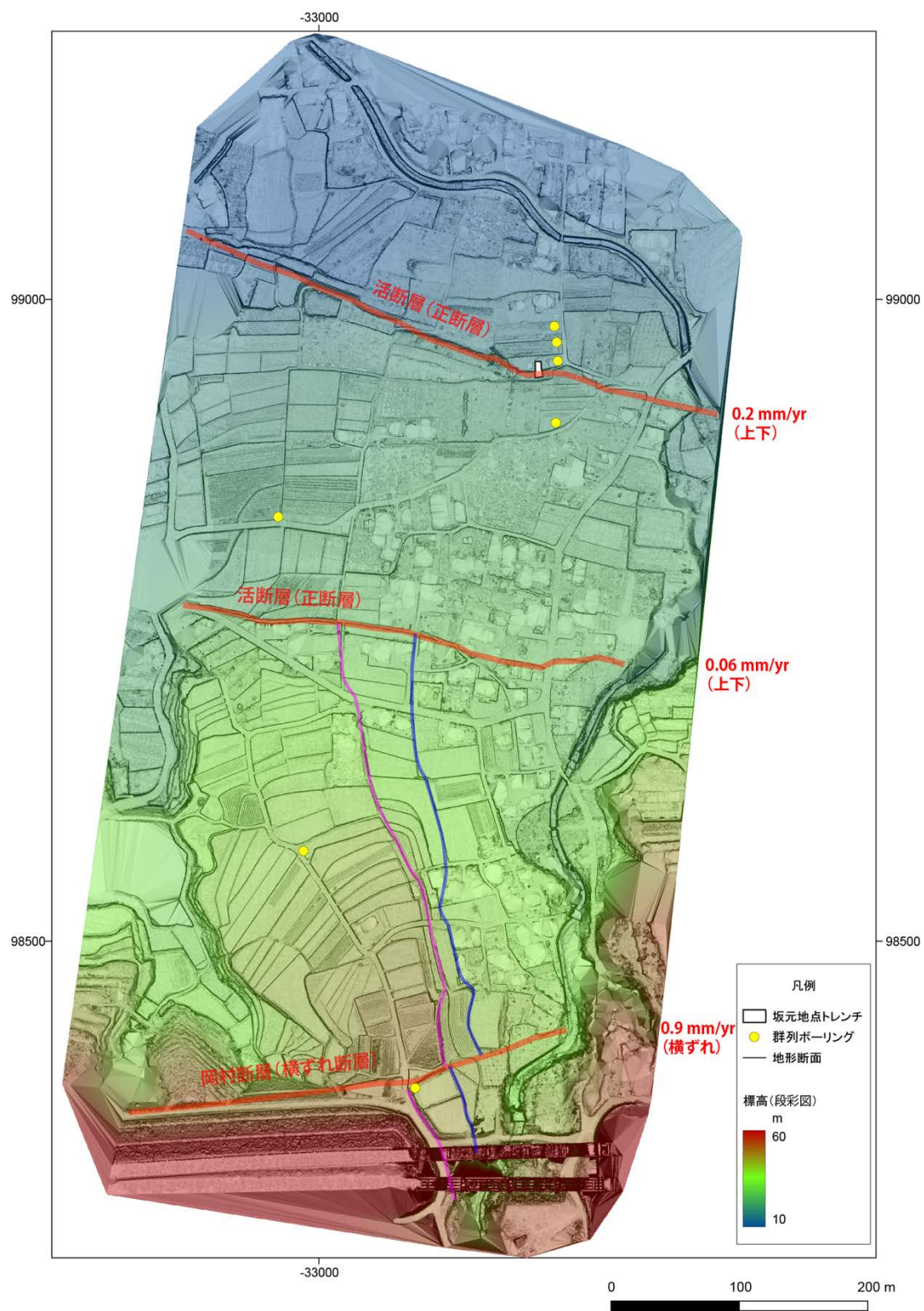


図 17 西条市坂元地区周辺の活断層分布と平均変位速度。

3. 1. 2 歴史文書の収集分析に基づく地震活動の検討

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 歴史文書の収集分析に基づく地震活動の検討

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
公益財団法人 地震予知総合研究振興会	副主席主任研究員	榎原 雅治
公益財団法人 地震予知総合研究振興会	特任研究員	水野 嶺

(c) 業務の目的

中央構造線断層帯の周縁に位置する四国・中国・九州地域で起きた地震活動を歴史史料から抽出する。

(d) 年度毎の実施業務の要約

1) 令和5年度：

中央構造線の周縁の活断層帯で起きた地震活動を歴史史料から抽出した。香川県域の史料のほか、地震史料としては未調査の愛媛県宇和島市・大分県佐伯市・熊本県熊本市の史料の調査に着手した。

2) 令和6年度：

中央構造線の周縁の活断層帯で起きた地震活動を歴史史料から抽出する。愛媛県北部の史料のほか、地震史料としては未調査の愛媛県宇和島市・大分県佐伯市・熊本県熊本市などの史料の調査を継続する。

3) 令和7年度：

中央構造線の周縁の活断層帯で起きた地震活動を歴史史料から抽出する。広島県域の史料のほか、地震史料としては未調査の愛媛県宇和島市・大分県佐伯市・熊本県熊本市などの史料の調査を継続する。

(2) 令和5年度の成果

(a) 業務の要約

中央構造線の周辺に位置する四国・九州地域の近世の日記史料を主たる対象として、機器による地震観測が開始される以前の有感地震情報を収集した。日記史料を対象としたのは、同一地点での有感地震が、同一人物によって記録されており、有感地震の長期的な変動状況を均質な基準で把握できる可能性が高いためである。また被害を出した大きな地震だけでなく、中小の地震についても把握できると考えられる。

本年度は香川県多度津藩・愛媛県宇和島藩・大分県佐伯藩の公用日記、および熊本県熊本藩士の日記を調査し、既刊の地震史料集に未収録の地震情報を収集した。また 1703 年 12 月 31 日に豊後（現在の大分県）、1853 年 3 月 28 日に伊予（現在の愛媛県）で被害を生

じさせた地震について検討した。

(b) 業務の成果

1) 香川県立ミュージアム所蔵「多度津藩政資料」のうち、文化 11 年（1814）～安政 4 年（1857）の藩日記、同所蔵「高松松平家歴史資料」のうち「恵公実録」宝永元年（1704）～享保 20 年（1735）、「懐公実録」享保 20 年（1705）～元文 4 年（1739）を部分調査した。

2) 宇和島伊達文化保存会所蔵「宇和島伊達家文書」のうち、元禄 8 年（1695）～宝永 7 年（1710）、享保 12 年（1727）～20 年（1737）、文化 7 年（1810）～安政 4 年（1857）を部分調査した。また宇和島市立中央図書館架蔵の俳句集「波留富久路」を調査し、地震情報として信頼に足る史料であることを確認した。

3) 佐伯市歴史資料館所蔵の「佐伯藩政資料」のうち、安永 4 年（1775）～明治 2 年（1869）の「郡方町方日記」を調査した。

4) 熊本大学寄託「永青文庫史料」のうち「機密間日記」天保 15 年（1844）～安政 2 年（1855）、同「古閑家日記」のうち文政 11 年（1828）～慶応 4 年（1868）、熊本博物館所蔵「加賀山家資料」のうち「日録」天保 2 年（1831）～明治 4 年（1871）を調査した。

5) 上記史料については各所蔵機関において調査し、既刊の地震史料集に未収録の地震に関する情報を収集することができた。出張期間中に判読・記録できる量には限りがあるため、史料撮影専門の業者による撮影を行い、出張終了後に撮影データによって調査を行った。

(c) 結論ならびに今後の課題

1) 1841 年 11 月 3 日に伊予灘付近を震央とする地震が発生し、九州や西瀬戸内海地域で広く感知されているが、多度津でも感知されていたことを確認した。

2) 1853 年 3 月 28 日に発生した地震は伊予吉田で家屋被害を生じさせており（「波留富久路」による）、中央構造線に属する断層が関連する可能性がある。周辺地域での調査を続ける必要がある。

3) 1703 年 12 月 31 日に発生した地震は、元禄関東地震と同日のほぼ同時刻に発生し、大分県由布院付近で死者と多くの家屋被害を出している。一方で、被害の大きさに反して被害地域は局所的で、都司（2019）も指摘しているように、中央構造線断層帯・豊予海峡―由布院区間の由布院断層で発生した断層地震である可能性が高いと考えられる（図 1）。ただし都司（2019）は大分県臼杵では関東地震を感知した 2 時間後に発生した地震とするが、関東地震は宇和島では感知されていないこと、延岡での地震の時間表記では関東地震と豊後地震を区別できないこと、当時の時刻表記には曖昧さがあることなどから、関東地震が九州で感知されたかについてはなお検討の余地がある。

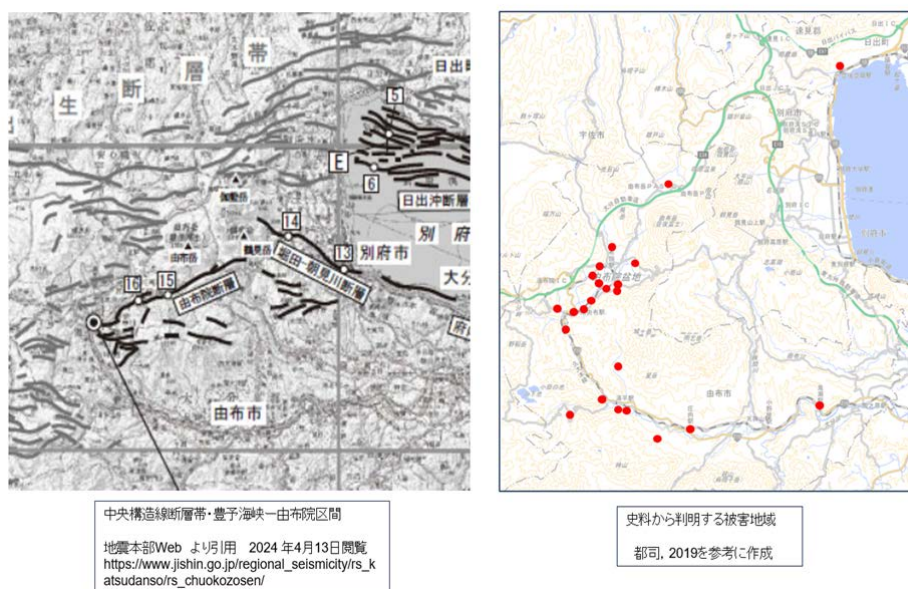


図1 1703 年 12 月 31 日(元禄 16 年 11 月 23 日)豊後地震の被害地域と推定される震源断層

4) 1703 年に先行する 5 年間には宇和島では頻繁に地震が記録されており（表 1）、それぞれがどのような地震であったか、周辺地域に対象史料を広げて検討することが今後の課題である。

表 1 元禄11年・13年・15年の宇和島での有感地震記録

宇和島藩日記より作成

史料名	史料記述年月日	地震発生日時	史料本文	史料備考	※既刊史料集校訂
宇和島藩国元日記(日記 御祐重所)	元禄8年1月19日	元禄8年1月19日	十九日、晴陰風吹、今晚地震、	T1-13	
宇和島藩国元日記(日記 御祐重所)	元禄8年3月22日	元禄8年3月22日	廿二日、天気能、卯后刻地震、／(後略)	T1-13	
宇和島藩国元日記(日記 御祐重所)	元禄8年5月14日	元禄8年5月14日	十四日、陰晴、申上刻地震、又少地震、酉下刻少地震、／(後略)	T1-13	
宇和島藩国元日記(日記 御祐重所)	元禄8年8月18日	元禄8年8月18日	十八日、快晴、昼過方雨降、未下刻地震、／(後略)	T1-13	
宇和島藩国元日記(日記 御祐重所)	元禄8年8月24日	元禄8年8月24日	廿四日、曇、辰刻少地震、	T1-13	
宇和島藩国元日記(日記 御祐重所)	元禄8年10月6日	元禄8年10月6日	六日、今晚丑中刻強地震、又午上刻少震動、少雨降、	T1-13	※少動→少震動
宇和島藩国元日記(宗利公日記 御祐重所)	元禄11年2月19日	元禄11年2月19日	十九日、曇、辰中刻地震、／(後略)	T1-15	
宇和島藩国元日記(宗利公日記 御祐重所)	元禄11年7月14日	元禄11年7月14日	十四日、天気能、巳刻地震、／(後略)	T1-15	
宇和島藩国元日記(大控)	元禄11年9月21日	元禄11年9月21日	廿一日、晴、／(中略)／一、御隨居様今日幸天江御出被遊、申ノ刻地震余程後候事、	T1-6	※既刊史料集漏れ
宇和島藩国元日記(宗利公日記 御祐重所)	元禄11年10月5日	元禄11年10月5日	五日、天気能、辰上刻少地震、同下刻強地震、／(後略)	T1-15	
宇和島藩国元日記(宗利公日記 御祐重所)	元禄11年10月7日	元禄11年10月7日	七日、天気能、辰中刻少地震、	T1-15	
宇和島藩国元日記(宗利公日記 御祐重所)	元禄11年10月8日	元禄11年10月8日	八日、天気能、暮時方戌刻迄大小地震三度、／(後略)	T1-15	
宇和島藩国元日記(宗利公日記 御祐重所)	元禄11年10月9日	元禄11年10月9日	九日、天気能、巳上刻少地震、	T1-15	
宇和島藩国元日記(宗利公日記 御祐重所)	元禄11年10月10日	元禄11年10月10日	十日、天気能、午下刻地震、／(後略)	T1-15	
宇和島藩国元日記(宗利公日記 御祐重所)	元禄11年10月11日	元禄11年10月11日	十一日、雨降、卯刻少地震、／(後略)	T1-15	
宇和島藩国元日記(宗利公日記 御祐重所)	元禄11年10月12日	元禄11年10月12日	十二日、天気能、辰下刻地震、戌中刻又、／(後略)	T1-15	
宇和島藩国元日記(宗利公日記 御祐重所)	元禄11年10月17日	元禄11年10月17日	十七日、天気能、午下刻地震、	T1-15	
宇和島藩国元日記(宗利公日記 御祐重所)	元禄12年1月26日	元禄12年1月26日	廿六日、曇、未刻方雨、申刻二地震、／(後略)	T1-16	
宇和島藩国元日記(宗利公日記 御祐重所)	元禄13年7月5日	元禄13年7月5日	五日、晴曇、午刻少地震、未ノ刻雨暫、下刻降止、／(後略)	T1-17	※既刊史料集漏れ
宇和島藩国元日記(宗利公日記 御祐重所)	元禄13年7月22日	元禄13年7月22日	廿二日、晴曇、辰下刻地震、／(後略)	T1-17	
宇和島藩国元日記(宗利公日記 御祐重所)	元禄13年7月24日	元禄13年7月24日	廿四日、辰刻ヨリ強雨、巳中刻小止、晴曇小雨、亥刻地震、	T1-17	※既刊史料集漏れ
宇和島藩国元日記(宗利公日記 御祐重所)	元禄13年8月5日	元禄13年8月5日	五日、少雨折々降、酉中刻地震、／(後略)	T1-17	
宇和島藩国元日記(宗利公日記 御祐重所)	元禄13年9月2日	元禄13年9月2日	二日、晴曇、戌刻地震、／(後略)	T1-17	
宇和島藩国元日記(宗利公日記 御祐重所)	元禄13年11月26日	元禄13年11月26日	廿六日、少雨、寅中刻地震、／(後略)	T1-17 11月27日発生の可能性あり	
宇和島藩国元日記(宗利公日記 御祐重所)	元禄15年4月21日	元禄15年4月21日	廿一日、晴曇、未刻地震、(後略)	T1-18	※既刊史料集漏れ
宇和島藩国元日記(宗利公日記 御祐重所)	元禄15年8月4日	元禄15年8月4日	四日、天気能、酉中刻地震、	T1-18	
宇和島藩国元日記(宗利公日記 御祐重所)	元禄15年8月20日	元禄15年8月20日	廿日、晴曇、卯中刻地震、／(後略)	T1-18	
宇和島藩国元日記(宗利公日記 御祐重所)	元禄15年閏8月10日	元禄15年閏8月10日	十日、天気能、申刻過地震、／(後略)	T1-18	
宇和島藩国元日記(宗利公日記 御祐重所)	元禄15年9月24日	元禄15年9月24日	廿四日、曇、卯刻過地震、	T1-18	
宇和島藩国元日記(宗利公日記 御祐重所)	元禄16年2月21日	元禄16年2月21日	廿一日、曇、未刻少地震、其後小雨、／(後略)	T1-19	

(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－湯布院），
https://www.jishin.go.jp/regional_seismicity/rs_katsudanso/rs_chuokozosen/
 （2024 年 4 月 13 日閲覧）。

都司嘉宣，元禄 16 年 11 月 23 日寅刻（1703 年 12 月 31 日，午前 4 時）豊後国府内藩領の地震，歴史地震，34，147-153，2019。

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。

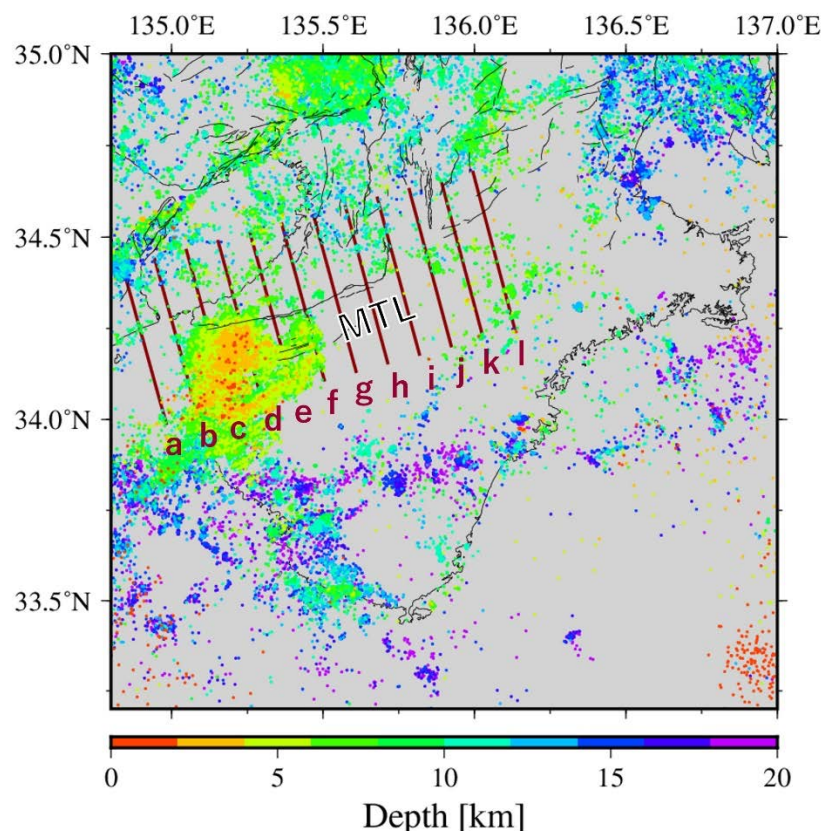


図1 気象庁一元化震源カタログによる紀伊半島の中央構造線断層帯(MTL)周辺の震源分布。丸は震央位置であり、その色は震源深さを表す。黒線は中田・今泉(2002)による地表活断層の位置を示す。赤線は図2に示す鉛直断面図の測線である。

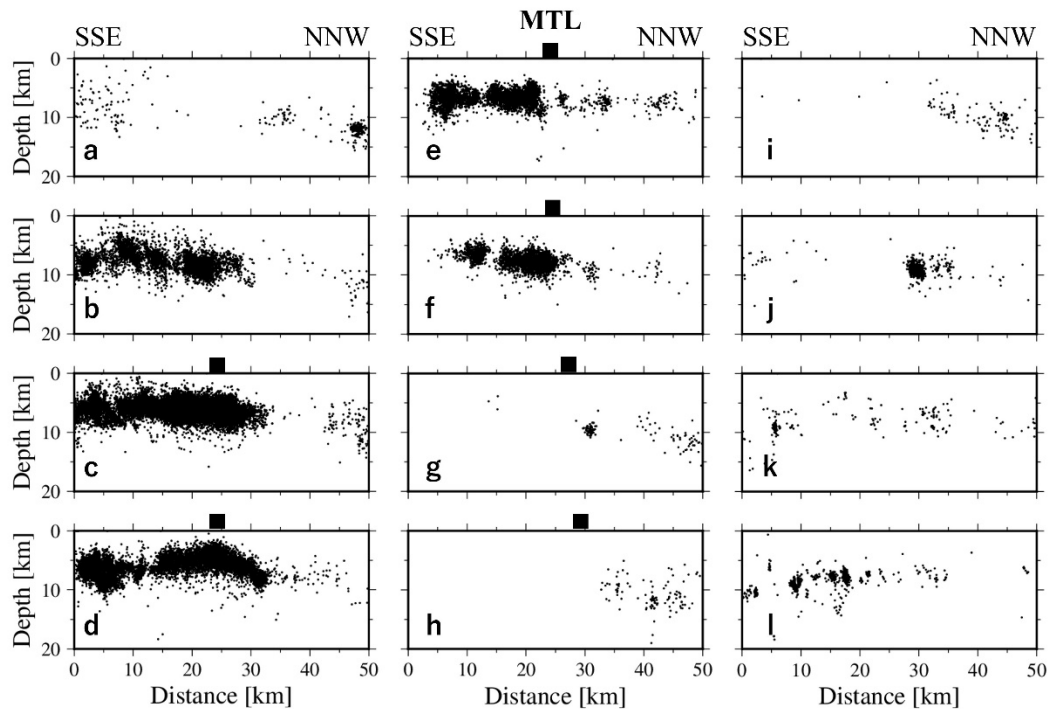


図2 中央構造線断層帯（MTL）周辺の鉛直断面図。黒丸は測線から5 km以内に位置する地震の震源分布である。黒四角は地表の中央構造線断層帯の地表位置を表す。測線位置は図1に示す。

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。

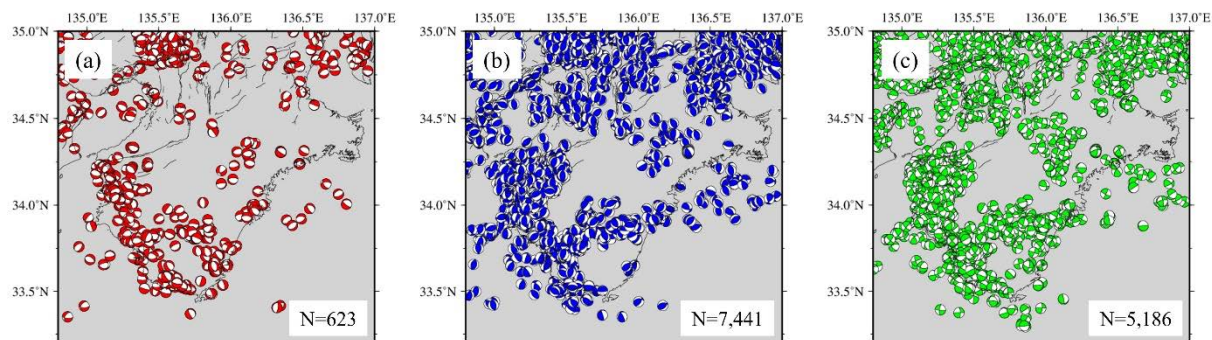


図3 全国内陸部ストレスマップ (Uchide et al., 2022; 内出・他, 2022) による紀伊半島周辺の震源メカニズム解の分布：(a)正断層型、(b)逆断層型、(c)横ずれ断層型。黒線は中田・今泉（2002）による地表活断層の位置を示す。Nは震源メカニズム解の数を表す。

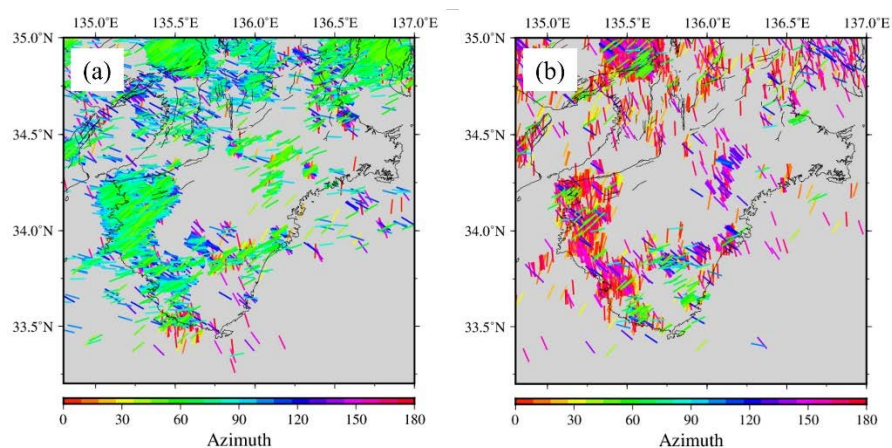


図4 全国内陸部ストレスマップ (Uchide et al., 2022; 内出・他, 2022) による紀伊半島周辺の(a)主圧力軸方位、(b)主張力軸方位の分布。プランジ角が水平から30度以内のメカニズム解の主圧力軸、主張力軸を抽出し、その方位を棒と色で示す。黒線は中田・今泉（2002）による地表活断層の位置を示す。

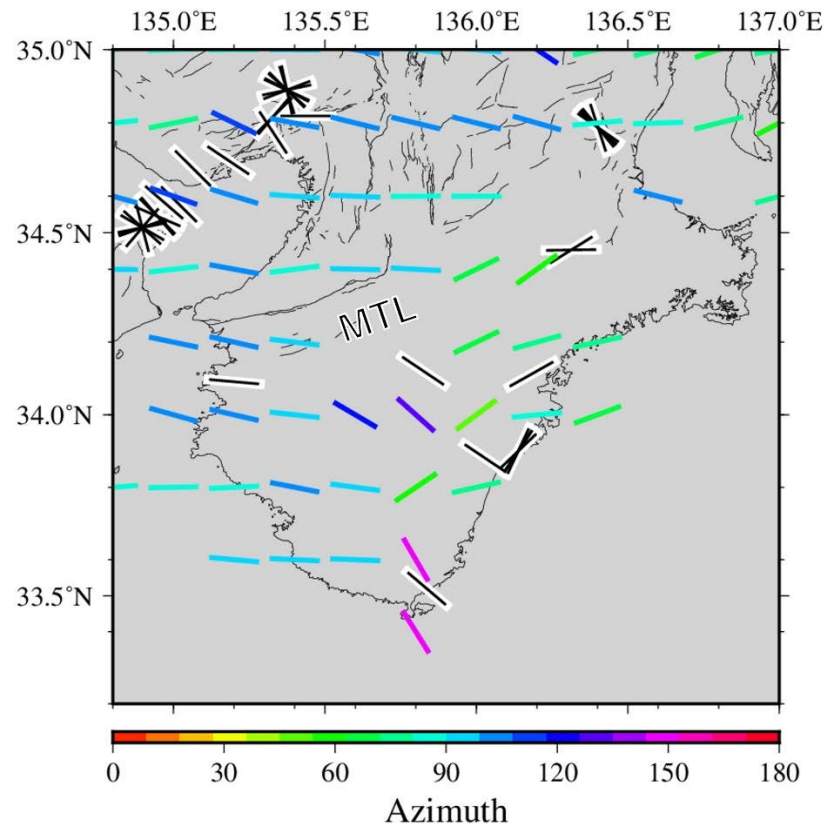


図5 全国内陸部ストレスマップ (Uchide et al., 2022; 内出・他, 2022) による紀伊半島周辺の水平主圧縮軸方位の分布。色と棒で水平主圧縮軸方位を示す。黒棒の向きは原位応力測定による水平主圧縮軸方位 (e. g., Tanaka, 1986; 産業技術総合研究所, 2024) を示す。黒線は中田・今泉 (2002) による地表活断層の位置を示す。

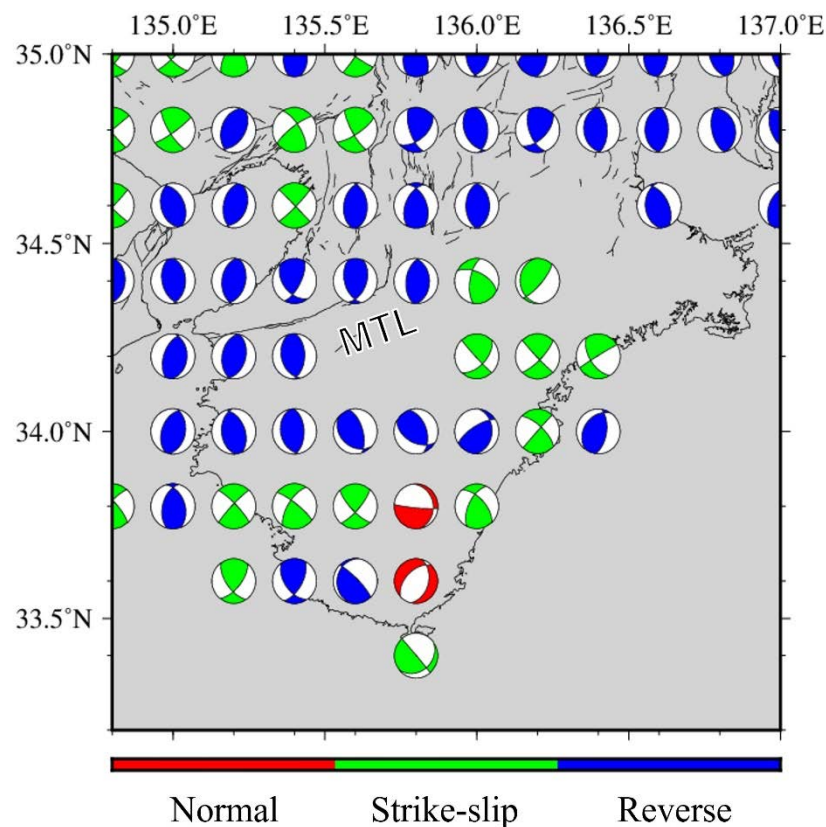


図6 全国内陸部ストレスマップ (Uchide et al., 2022; 内出・他, 2022) による紀伊半島周辺の地殻応力場の特徴。ビーチボールは断層タイプにより色分けした (赤：正断層型、緑：横ずれ断層型、青：逆断層型)。黒線は中田・今泉 (2002) による地表活断層の位置を示す。

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.

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1km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。

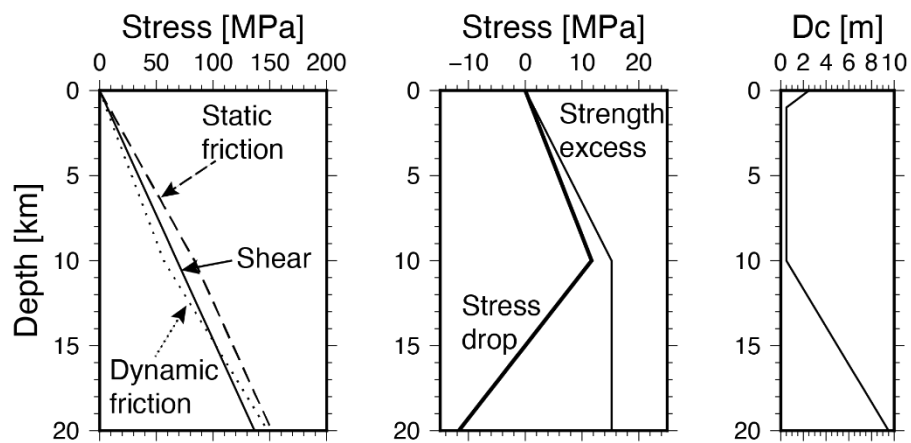


図2 本研究で用いた応力場モデルの深さプロファイル。

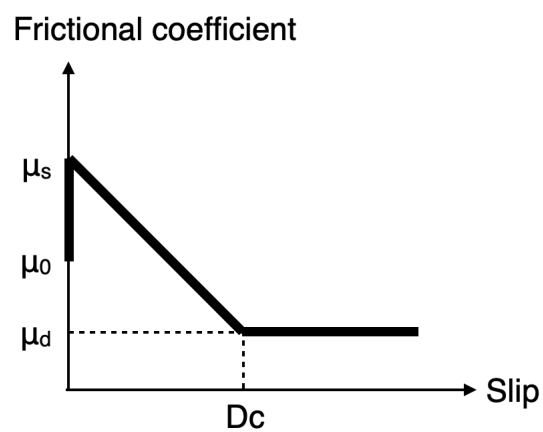


図3 本研究で用いたすべり弱化的摩擦構成則。 μ_0 は摩擦係数の初期値で、初期剪断応力を法線応力で割った値である。

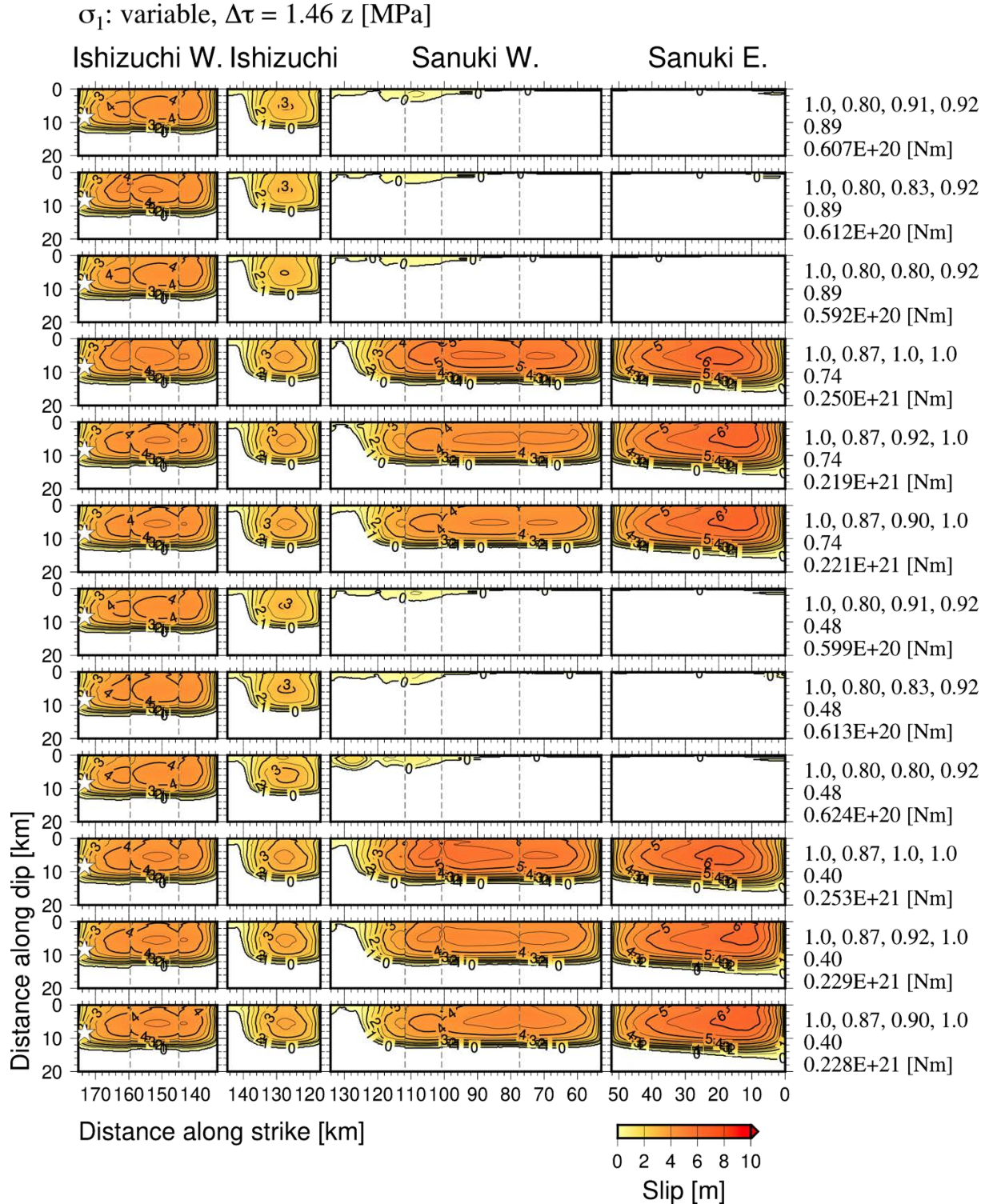


図4 最新活動として推定されるすべり分布。右端の数値は、上から、それぞれの区間の最新イベント直前の地震後経過率（左から、石鎚山脈北縁西部区間、石鎚山脈北縁区間、讃岐山脈南縁西部区間、讃岐山脈南縁東部区間の値）、現在の地震後経過率、地震モーメントを示す。(a) 石鎚山脈北縁西部区間西端に破壊開始領域（星印）が仮定される場合。

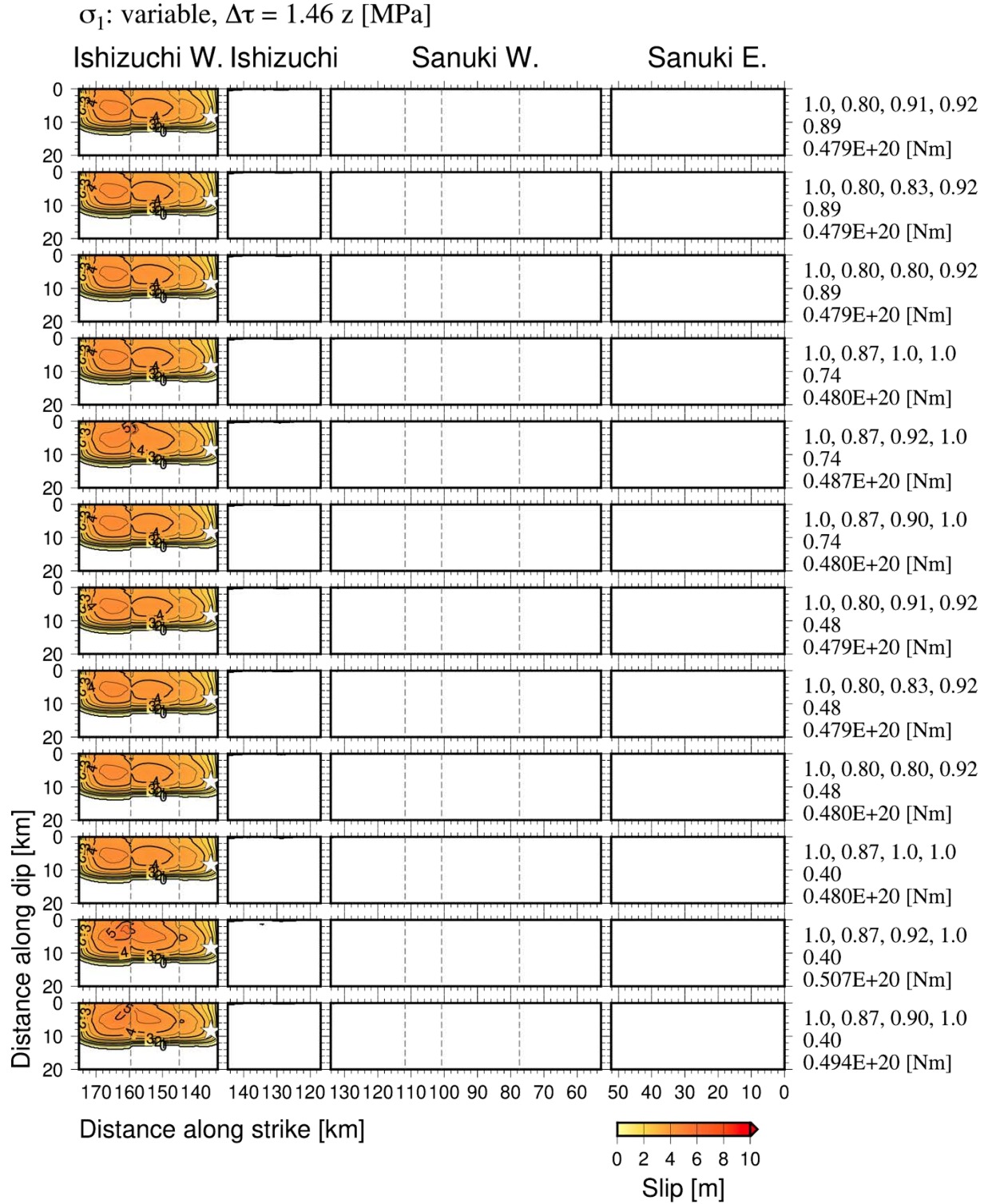


図4 (b) 石鎚山脈北縁西部区間東端に破壊開始領域（星印）が仮定される場合。

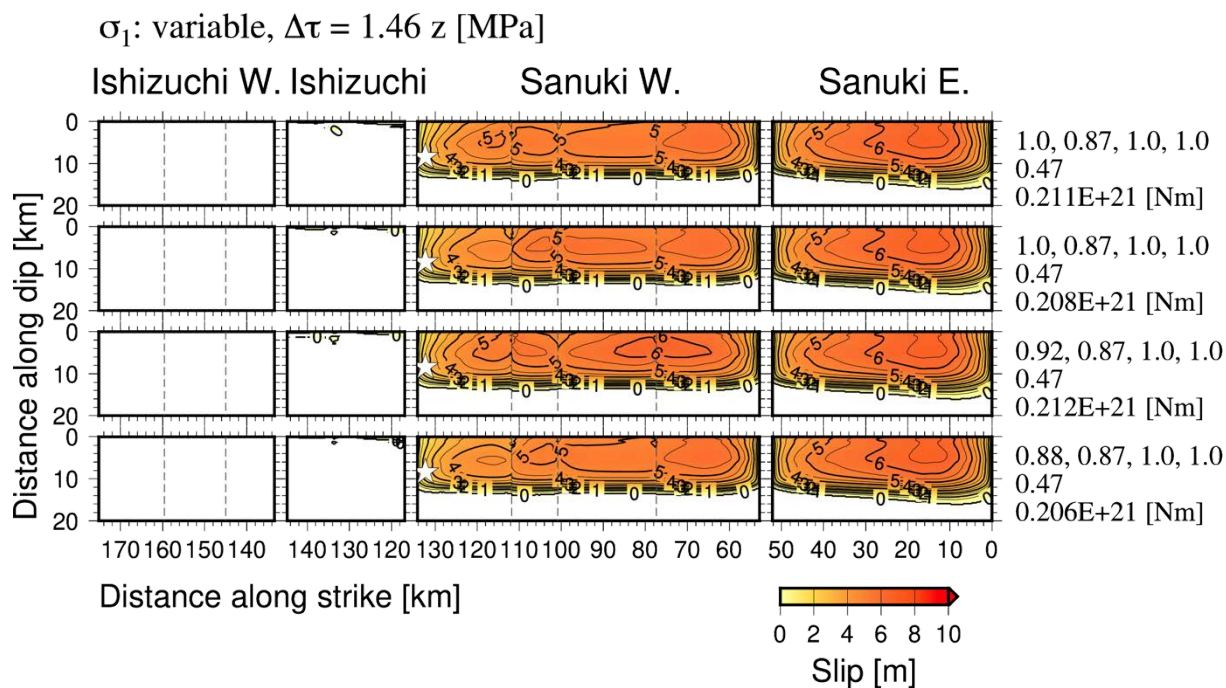


図4 (c) 讃岐山脈南縁西部区間西端に破壊開始領域（星印）が仮定される場合。

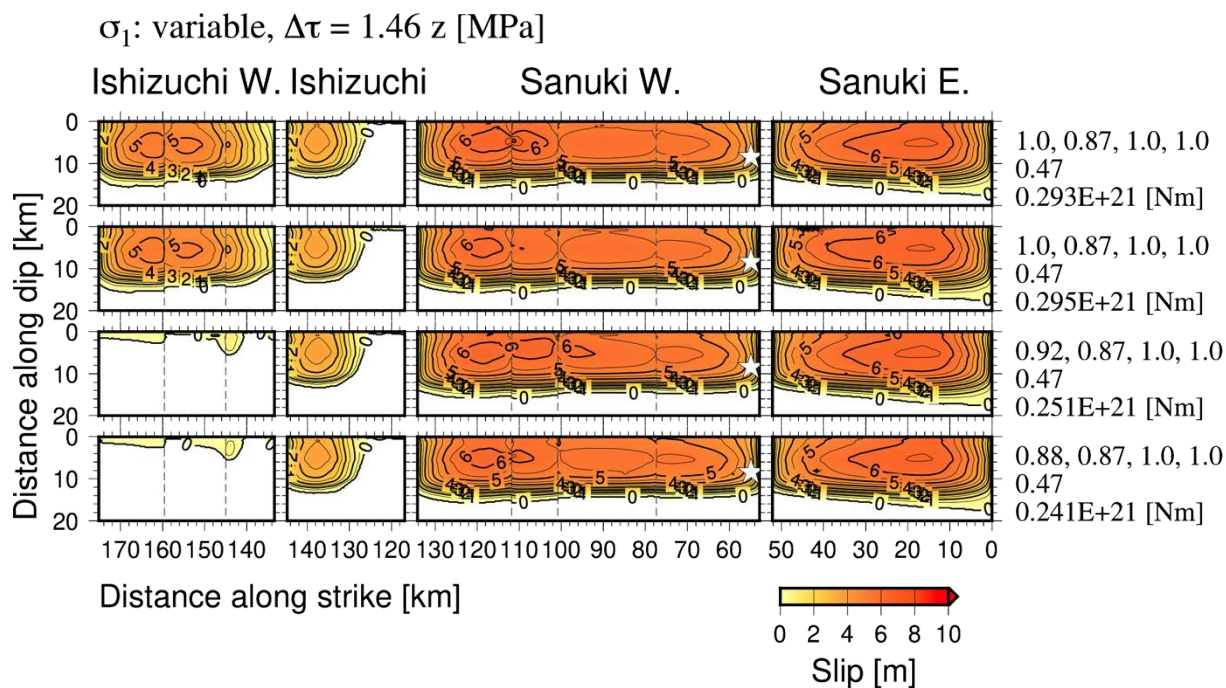


図4 (d) 讃岐山脈南縁西部区間東端に破壊開始領域（星印）が仮定される場合。

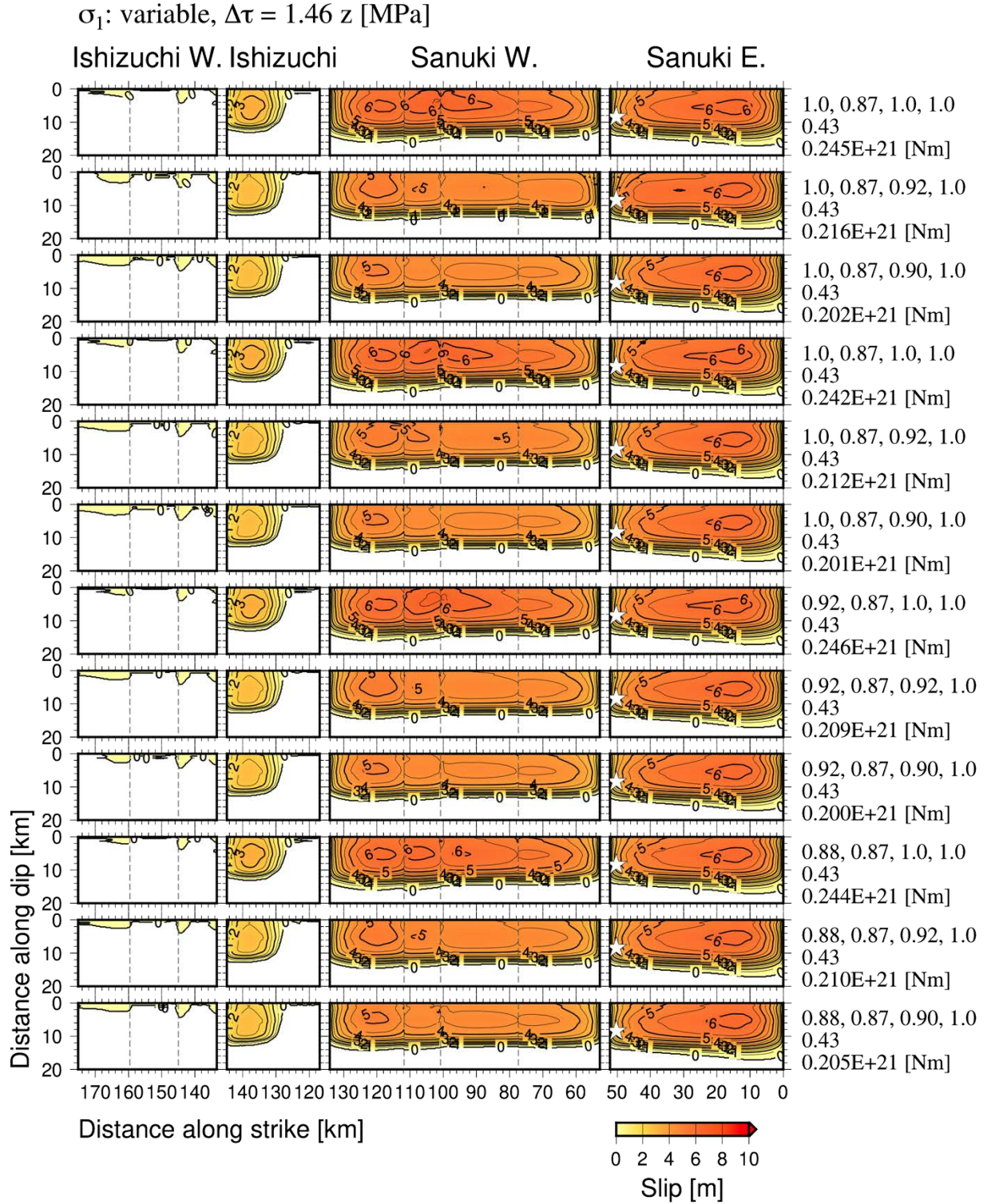


図4 (e) 讃岐山脈南縁東部区間西端に破壊開始領域（星印）が仮定される場合。

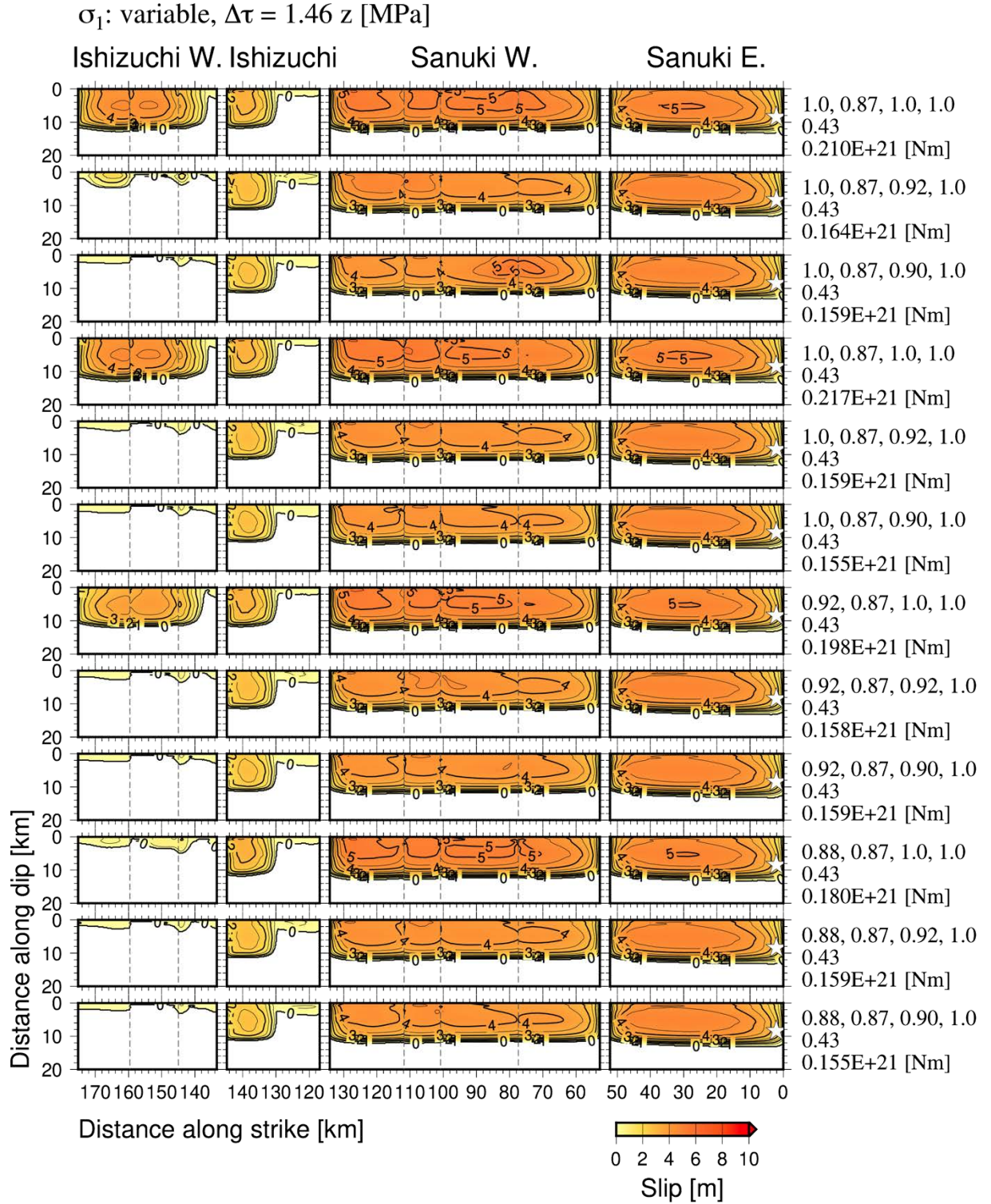


図4 (f) 讃岐山脈南縁東部区間東端に破壊開始領域（星印）が仮定される場合。

(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.

3. 4 長大な活断層帯における強震動予測手法の高度化

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 長大な活断層帯における強震動予測手法の高度化

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立研究開発法人防災科学技術研究所	主任研究員	森川 信之
国立研究開発法人防災科学技術研究所	部門長	藤原 広行
国立研究開発法人防災科学技術研究所	主任研究員	岩城 麻子

(c) 業務の目的

長大な活断層帯においては、活断層の走向や傾斜が空間的に変化している場合がある。しかし、強震動評価のために震源断層モデルを設定する場合は、必ずしも実際の変化する走向や傾斜に整合していない簡略化したモデルを設定している場合が多い。そのため、実際に起こり得る強震動を正確に評価できていない可能性がある。本事業では、断層モデルを実際の断層運動により整合したモデルとし、より正確に強震動評価をする手法を提案する。

(d) 3か年の年次実施業務の要約

1) 令和5年度：

長大な断層帯を対象として、地表断層をできるだけ詳細にモデル化し、地震発生層内の矩形断層と接続した震源断層モデルを作成した。地表断層の端点を直線で結んだモデルとともに簡便法による強震動計算を行い、詳細なモデル化の強震動予測結果への影響を示した。また、過去に長大な断層で発生した地震の震源断層モデルに関する既往文献等を収集した。

2) 令和6年度：

令和5年度に設定した震源断層モデルについて、地震発生層より浅い震源断層におけるすべりを一様とした場合の詳細法による強震動計算を行い、地表断層の端点を直線で結んだモデルとの違いを示す。また、収集した文献等について地震発生層より浅い震源断層におけるすべり量や分布、震源断層全体のスケーリング則について検証する。

3) 令和7年度：

令和5年度に設定した震源断層モデルについて、地震発生層より浅い震源断層におけるすべりを非一様とした場合の詳細法による強震動計算を行い、令和6年度に実施した一様にしたモデルおよび地表断層端点を直線で結んだモデルとの違いを示す。また、長大な断層における地表断層をできるだけ詳細にモデル化する具体的な手順をまとめる。

(2) 令和 5 年度の成果

(a) 業務の要約

強震動評価の高精度化のため、中央構造線断層帯全体が同時に活動する地震を対象として、地表断層をできるだけ詳細にモデル化し、全国地震動予測地図で用いられている地震発生層内の矩形断層と接続した震源断層モデルを作成した。地表断層の端点を直線で結んだモデルとともに地震動予測式を用いて、最大速度、計測震度に加え、最大加速度および減衰定数 5 % の加速度応答（周期 0.1 秒、1 秒および 5 秒）の計算を面的に行い、強震動予測結果において、断層最短距離が 20km 程度離れた地域まで詳細な地表断層のモデル化による影響が現れることを示した。また、長大断層のスケーリング則の妥当性確認に用いるため、ニュージーランドの 2016 年 Kaikoura（カイクウラ）地震、トルコの 2023 年 Kahramanmaras（カフラマンマラシュ）地震と Elbistan（エルビスタン）地震を対象として、主に震源インバージョン解析に関する 13 の既往文献と公開されている強震動記録を収集した。

(b) 業務の成果

1) 震源断層モデルの作成

地震調査研究推進本部による「全国地震動予測地図 2020 年版」（地震調査研究推進本部地震調査委員会、2021b；以下「2020 年版」という）における中央構造線断層帯全体が同時に活動する地震を対象として、地表断層を詳細にモデル化した震源断層モデルを作成した。まず、地表断層位置（図 1 の赤線および薄赤線）データのうち、できるだけ長い区間となるものを「2020 年版」の矩形断層モデル（図 1 の青線）と接続する地表断層として選定した（図 1 の赤線）。次に、選定された地表断層と矩形断層モデルの上端を接続した（図 2）。なお、「2020 年版」では、傾斜角が異なる 2 通りのモデルが設定されているため、それぞれについて上記の 2 通りの震源断層モデルを作成した。また、「2020 年版」の矩形断層を地表までそのまま延長した震源断層モデルも作成した（図 3）。

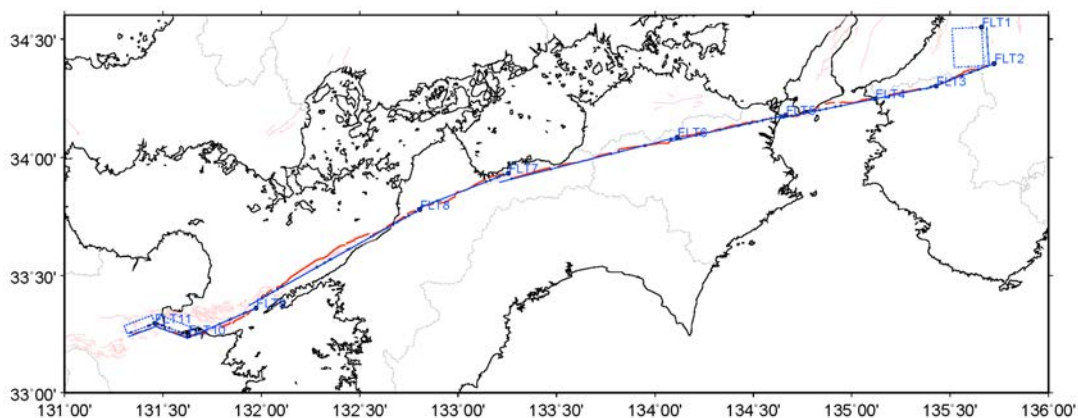
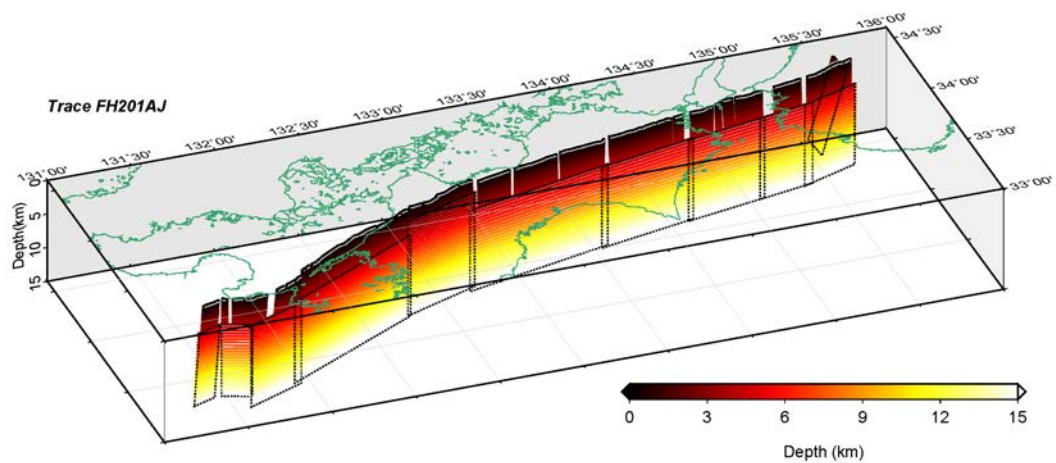
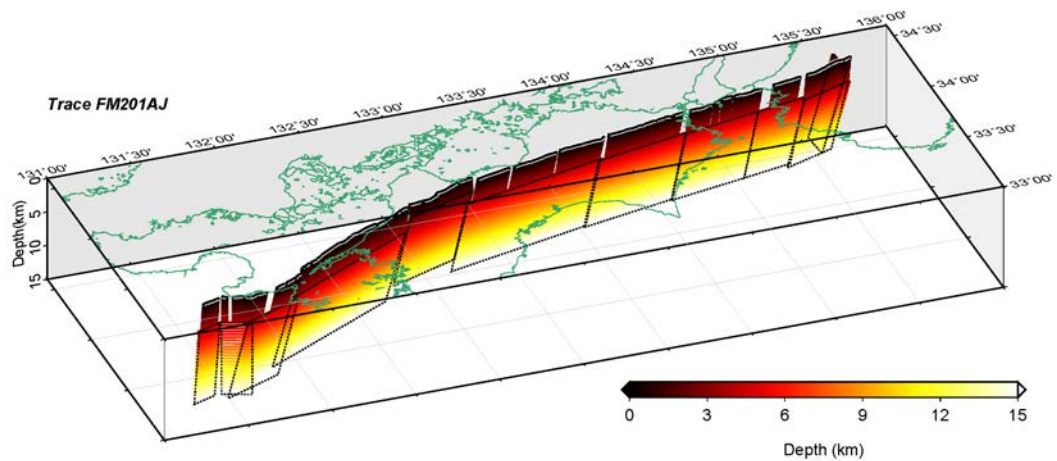


図 1 地表断層トレース（薄赤線）、モデル化に採用した地表トレース（赤線）と「全国地震動予測地図 2020 年版」における震源断層モデル（青線）。

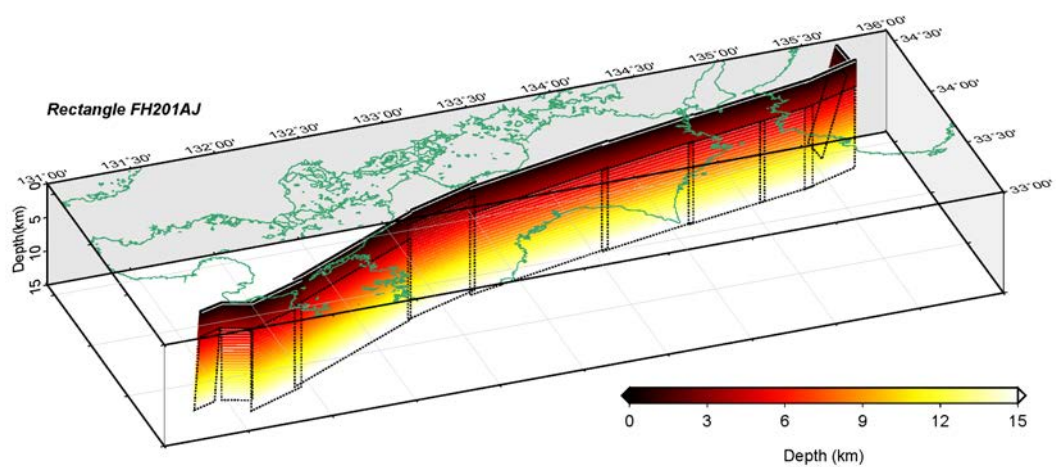


傾斜角：高角度



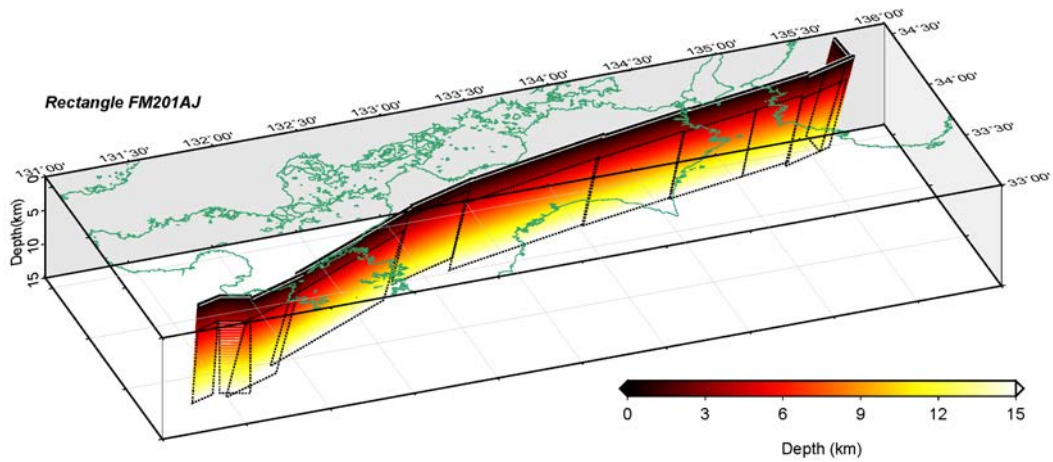
傾斜角：中角度

図 2 作成した震源断層モデル（地表断層を詳細にモデル化）



傾斜角：高角度

図 3 a 作成した震源断層モデル（矩形断層モデルを地表までそのまま延長）



傾斜角：中角度

図 3 b 作成した震源断層モデル（矩形断層モデルを地表までそのまま延長）

2) 地震動予測式（簡便法）による地震動計算

1) で作成した 4 通りの震源断層モデルを対象に強震動計算を実施した。計算地点については、地表断層から 3 km 以内については 1/4 地域メッシュの中心、それ以外は 3 次地域メッシュの中心毎に地表断層から 100km 以内を包含する範囲に対して設定した。対象とする地震動強さ指標と地震動予測式は「2020 年版」あるいは応答スペクトルに関する地震動ハザード評価（試作版）（地震調査研究推進本部地震調査委員会、2022）で用いられている以下とした。

○司・翠川（1999）の式に基づく最大速度（ PGV ）および計測震度（ I ）

司・翠川（1999）の工学的基盤（硬質地盤）上における最大速度（ PGV_b ）は(1)式で表される。藤本・翠川（2006）の表層 30m の平均 S 波速度（ $AVS30$ ）と最大速度増幅率の関係式を用いて最大速度を(2)式で求める。

$$\log_{10} PGV_b = 0.58M_w + 0.0038H - 1.29 - \log_{10}(X + 0.0028 \cdot 10^{0.5M_w}) - 0.002X \quad (1)$$

$$\log_{10} PGV = \log_{10} PGV_b - 0.8521 \log_{10}(AVS30/600) \quad (2)$$

ここで、 M_w は地震のモーメントマグニチュード、 H は震源断層の中心深さ（km）、 X は断層最短距離（km）である。計測震度は、藤本・翠川（2005）の関係式

$$I = 2.002 + 2.603 \cdot \log_{10} PGV - 0.213 \cdot \{\log_{10} PGV\}^2 \quad (3)$$

を用いて最大速度より換算する。なお、本検討で対象とする範囲はほぼすべての計算地点で計測震度 4 以上となるため、計測震度 4 以上の場合の式である（3）式のみを用いる。

○Morikawa and Fujiwara（2013）に基づく最大速度、計測震度、最大加速度および減衰定数 5 % の加速度応答スペクトル（周期 0.1 秒、1 秒および 5 秒）

Morikawa and Fujiwara（2013）の地震動予測式は以下で表される。

$$\log_{10} pre = a \cdot (M_w' - 16)^2 + c + bX - \log_{10}(X + d \cdot 10^{0.5M_w'}) + G_d + G_s \quad (4)$$

ここで、 pre は地震動強さ指標（ただし、計測震度の場合は「 $\log_{10} pre$ 」を「 $pre/2$ 」）、 a 、 b 、 c 、 d は回帰係数である。 G_d および G_s はそれぞれ深部地盤と浅部地盤に関する補正項で

あり、以下で表される。

$$G_d = p_d \cdot \log_{10}(\max[D_{\min}, D_{1400}]/D_0) \quad (5)$$

$$G_s = p_s \cdot \log_{10}(\min[V_{\max}, AVS30]/V_0) \quad (6)$$

ここで、 D_{1400} は評価地点における $V_s=1400\text{m/s}$ 層上面までの深さ (m) である。係数 p_d 、 $D_{\min}$ 、 D_0 、 p_s 、 $V_{\max}$ 、 V_0 の値については、Morikawa and Fujiwara (2013) から見直された森川・藤原 (2023) を用いる。

地下構造モデルは「2020 年版」で用いられている若松・松岡 (2020；浅部地盤 J-SHIS V4) および地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2021a；深部地盤 J-SHIS V3.2) とした。3 次地域メッシュの中心の計算地点においては、浅部地下構造モデルのパラメータは 3 次地域メッシュの中心付近の 1/4 地域メッシュ (1/4 地域メッシュコードの下 2 桁が「41」) の値を代表値として用いた。設定した計算地点における AVS30 の分布図を図 4 に示す。

司・翠川 (1999) に基づく地震動強さ分布を図 5 および図 6 に、Morikawa and Fujiwara (2013) に基づく地震動強さ分布を図 7～図 12 に示す。 M_w は高角度のモデルで 7.8、中角度のモデルで 7.9 と「2020 年版」で設定されている値としている。それぞれ、矩形断層をそのまま地表まで延長した震源モデルによる地震動強さ分布と両者の違いを併せて示している。両者の違いの図は地表断層を詳細にモデル化した場合と矩形断層モデルを地表まで延長した場合の地震動強さの比の自然対数 (計測震度の場合は差) を示しており、地表断層を詳細にモデル化した場合の地震動強さが大きい場合は赤で、矩形断層モデルを地表まで延長した場合の地震動強さが大きい場合は青で表示している。

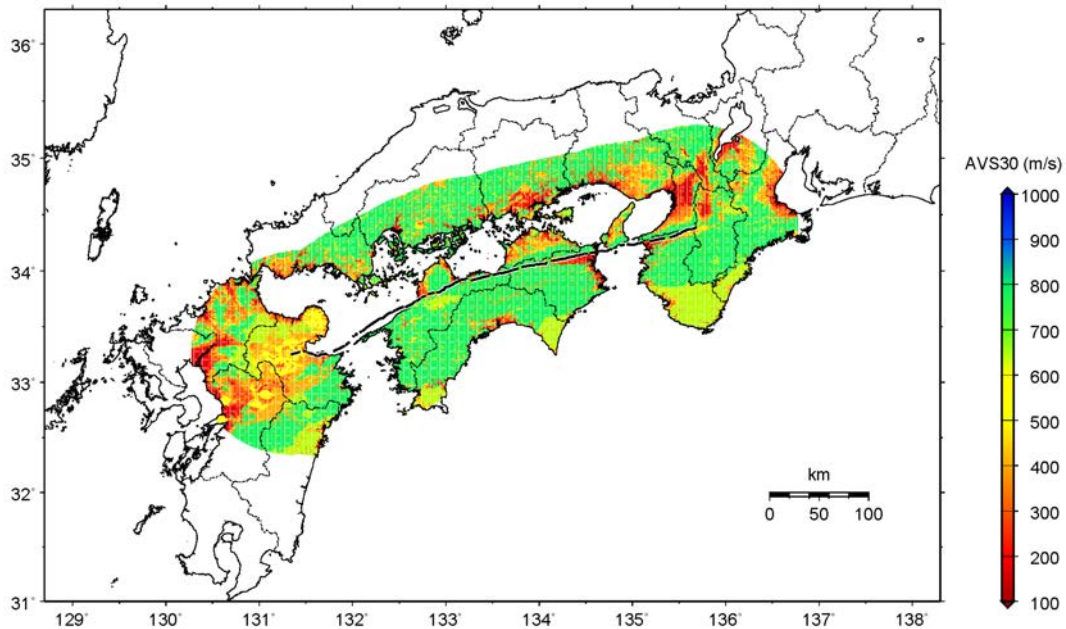
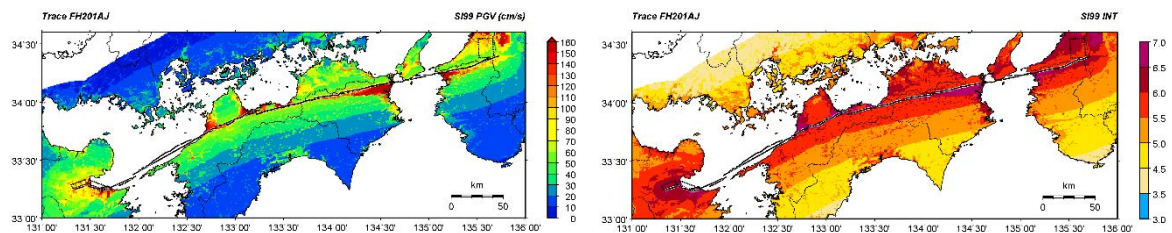
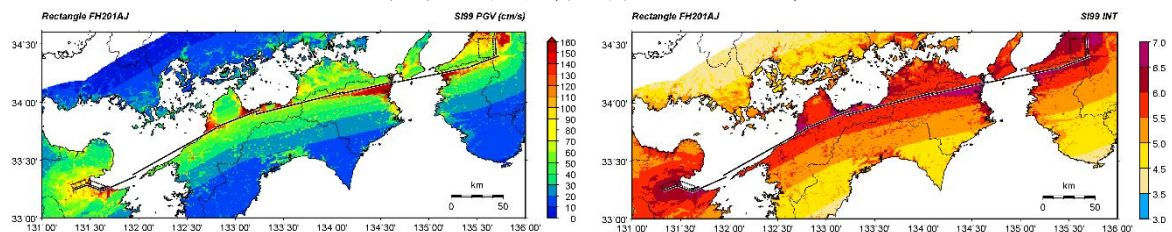


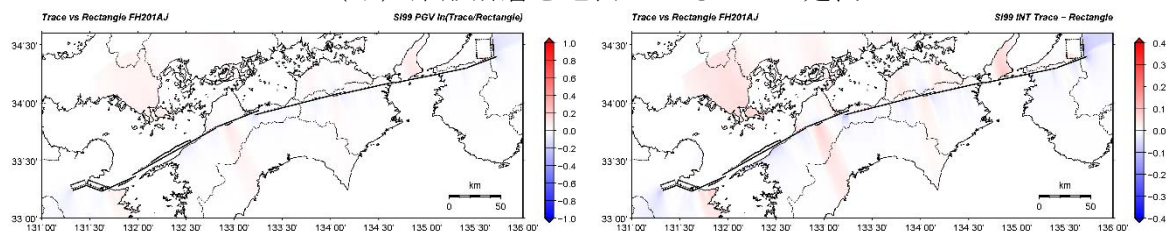
図 4 計算範囲と若松・松岡 (2020) の表層 30m の平均 S 波速度 (AVS30) 分布



(ア) 地表断層を詳細にモデル化



(イ) 矩形断層を地表までそのまま延長

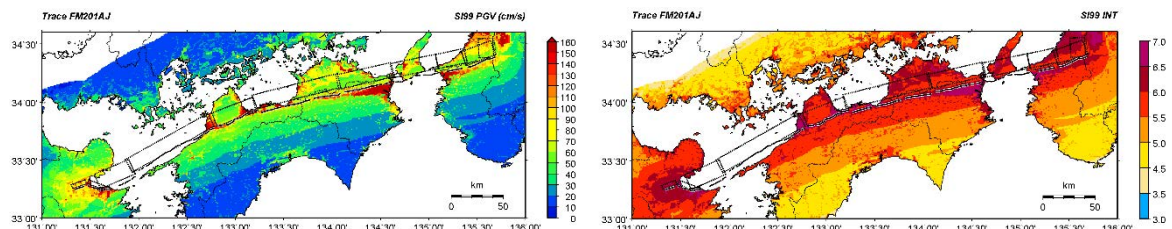


(ア) / (イ)

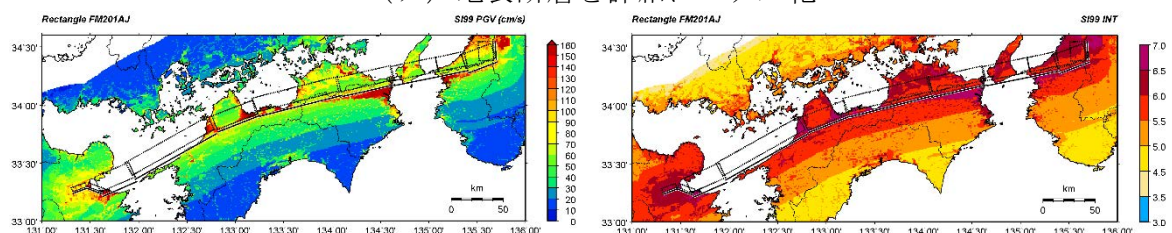
(ア) - (イ)

図5 司・翠川 (1999) に基づく地震動計算結果 (高角度; $M_w 7.8$)

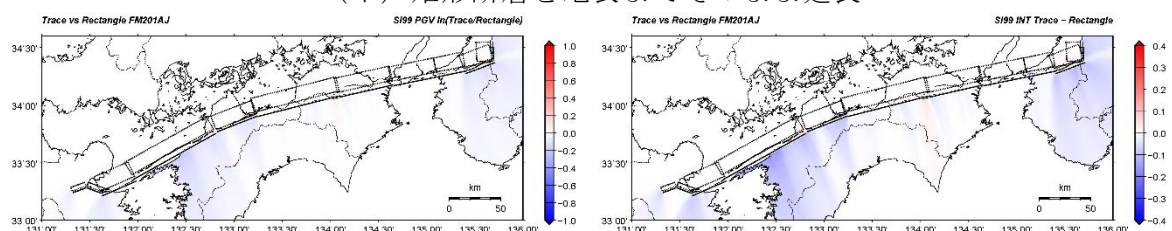
左: 最大速度、右: 計測震度



(ア) 地表断層を詳細にモデル化



(イ) 矩形断層を地表までそのまま延長

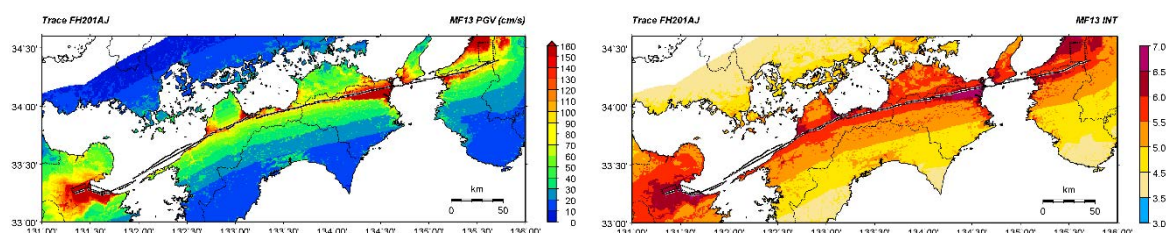


(ア) / (イ)

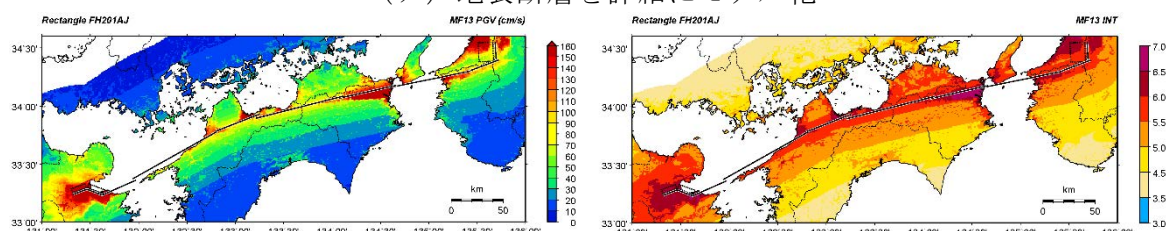
(ア) - (イ)

図6 司・翠川 (1999) に基づく地震動計算結果 (中角度; $M_w 7.9$)

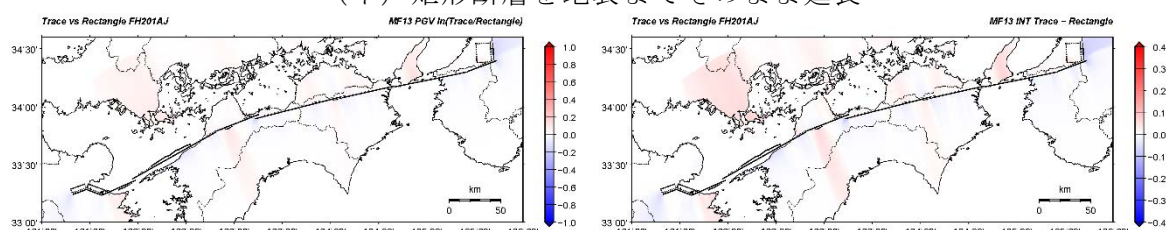
左: 最大速度、右: 計測震度



(ア) 地表断層を詳細にモデル化



(イ) 矩形断層を地表までそのまま延長

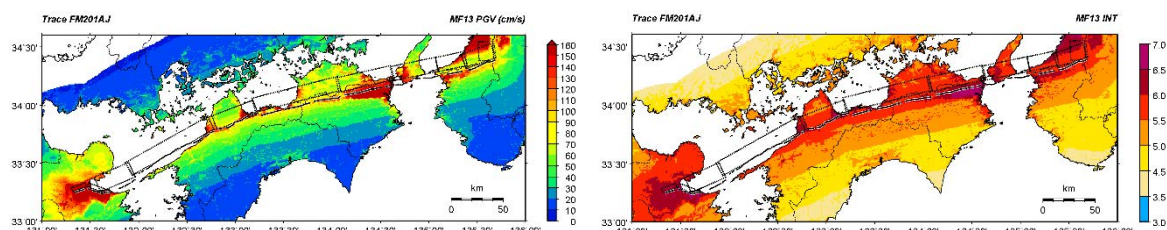


(ア) / (イ)

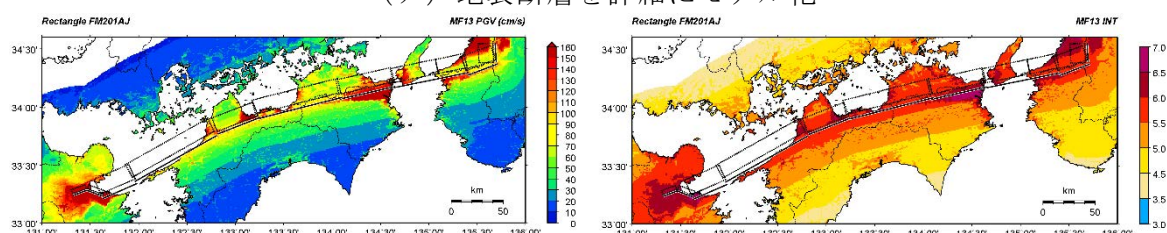
(ア) - (イ)

図7 Morikawa and Fujiwara (2013)に基づく地震動計算結果 (高角度; $M_w 7.8$)

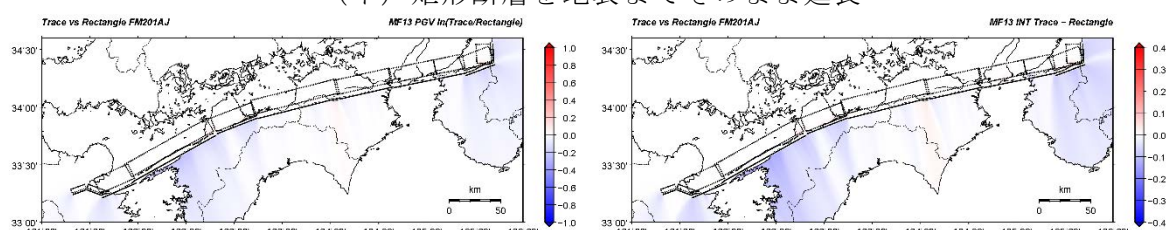
左: 最大速度、右: 計測震度



(ア) 地表断層を詳細にモデル化



(イ) 矩形断層を地表までそのまま延長

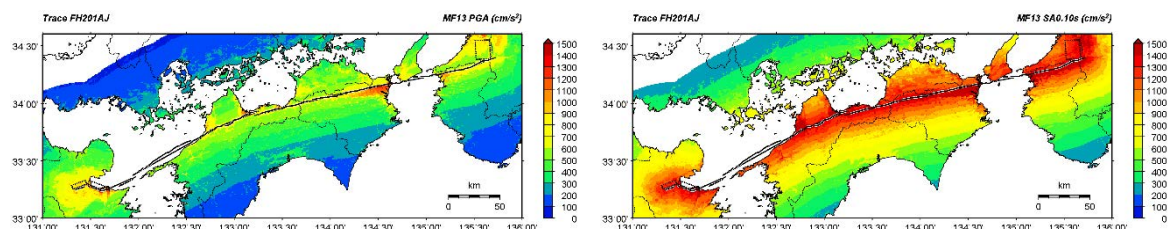


(ア) / (イ)

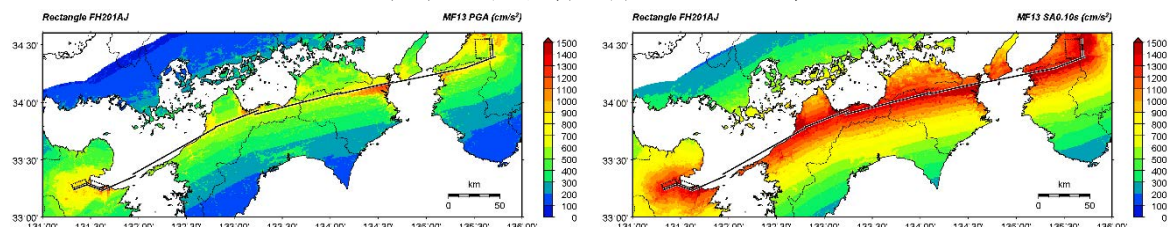
(ア) - (イ)

図8 Morikawa and Fujiwara (2013)に基づく地震動計算結果 (中角度; $M_w 7.9$)

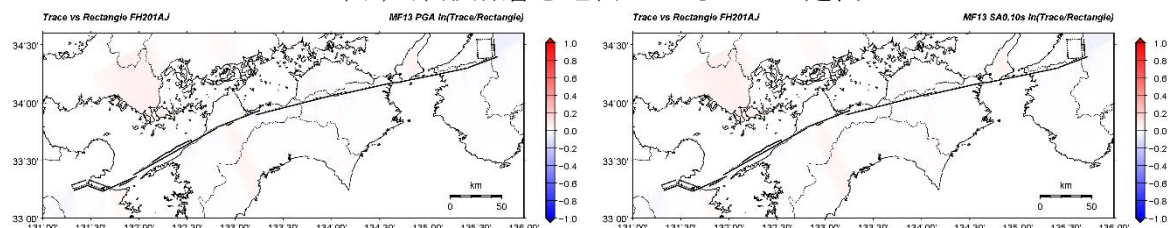
左: 最大速度、右: 計測震度



(ア) 地表断層を詳細にモデル化



(イ) 矩形断層を地表までそのまま延長

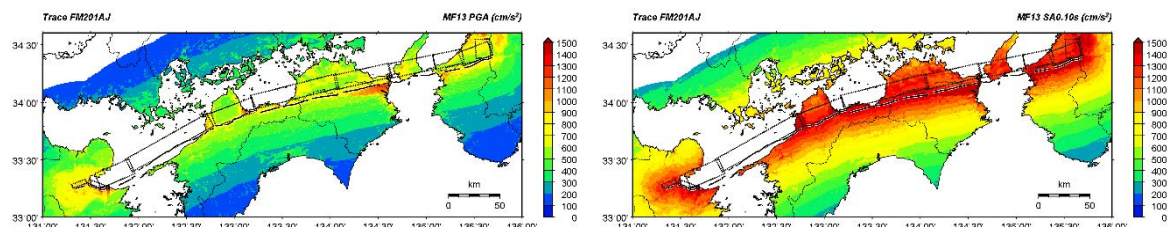


(ア) / (イ)

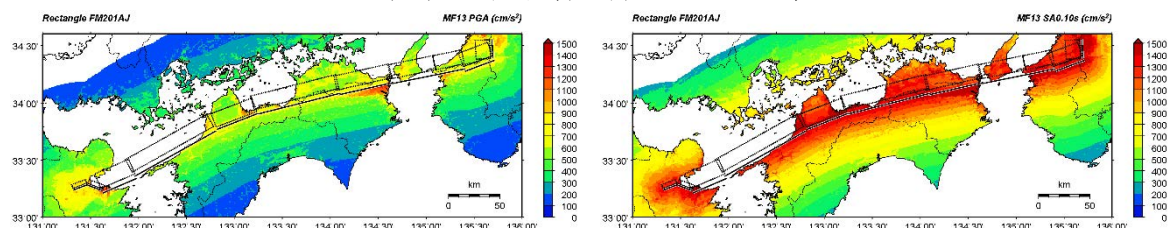
(ア) / (イ)

図9 Morikawa and Fujiwara (2013) に基づく地震動計算結果 (高角度; $M_w 7.8$)

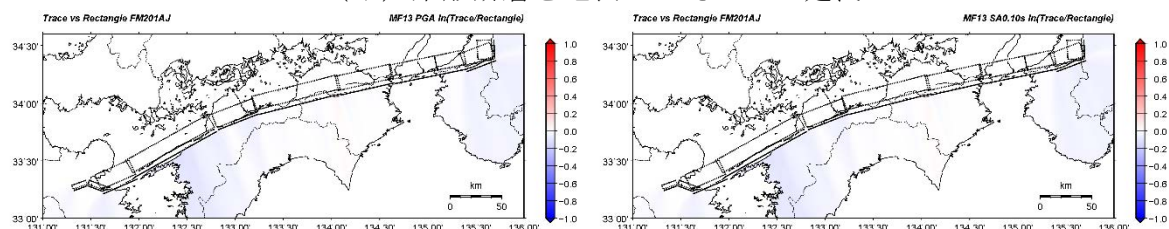
左: 最大加速度、右: 減衰定数 5 % の加速度応答スペクトル (周期 0.1 秒)



(ア) 地表断層を詳細にモデル化



(イ) 矩形断層を地表までそのまま延長

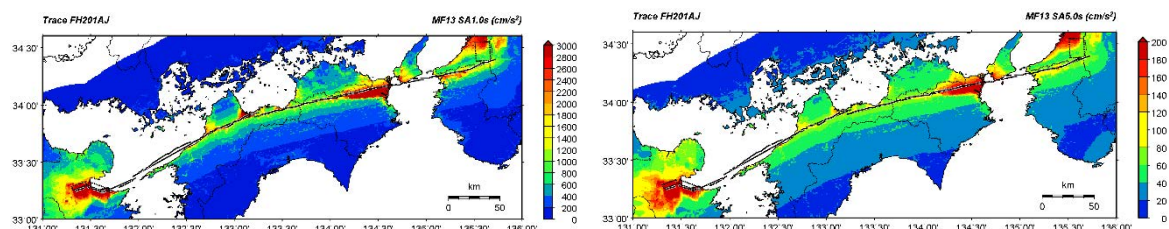


(ア) / (イ)

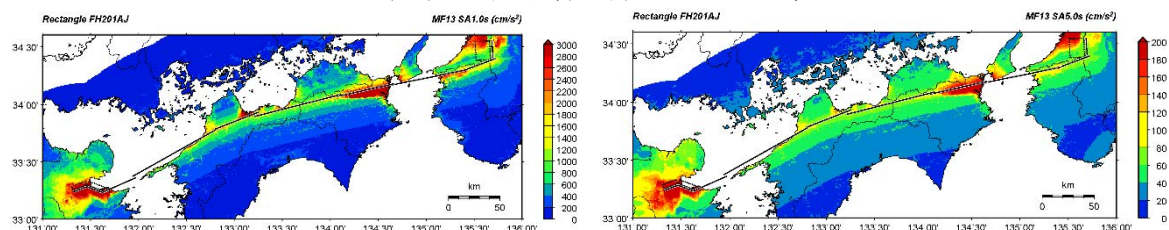
(ア) / (イ)

図10 Morikawa and Fujiwara (2013) に基づく地震動計算結果 (中角度; $M_w 7.9$)

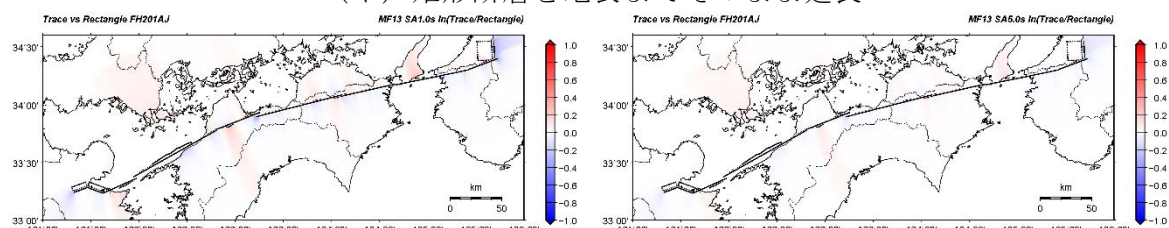
左: 最大加速度、右: 減衰定数 5 % の加速度応答スペクトル (周期 0.1 秒)



(ア) 地表断層を詳細にモデル化



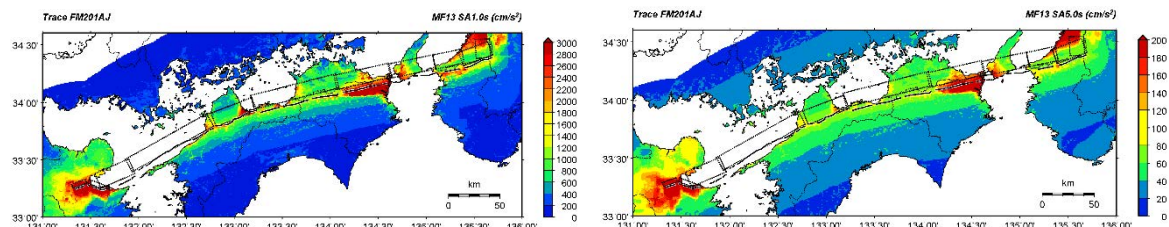
(イ) 矩形断層を地表までそのまま延長



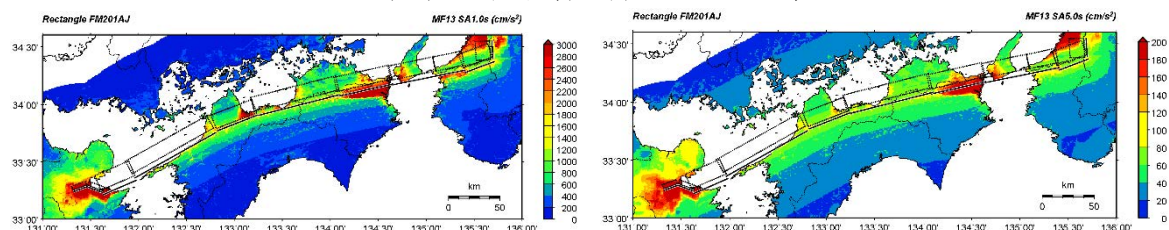
(ア) / (イ)

(ア) / (イ)

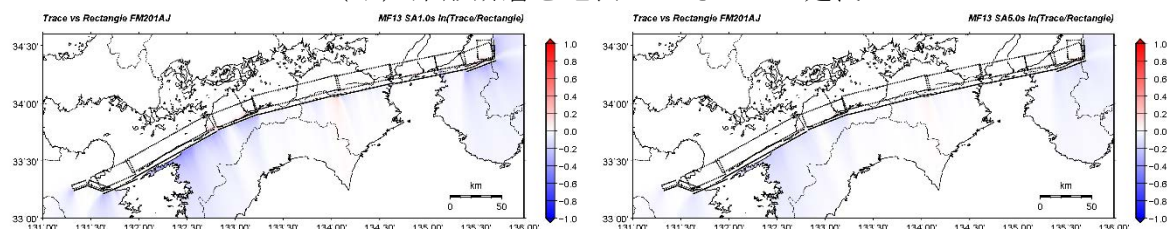
図 11 Morikawa and Fujiwara (2013) に基づく地震動計算結果 (高角度; $M_w 7.8$)
減衰定数 5 % の加速度応答スペクトル (左: 周期 1 秒、右: 周期 5 秒)



(ア) 地表断層を詳細にモデル化



(イ) 矩形断層を地表までそのまま延長



(ア) / (イ)

(ア) / (イ)

図 12 Morikawa and Fujiwara (2013) に基づく地震動計算結果 (中角度; $M_w 7.9$)
減衰定数 5 % の加速度応答スペクトル (左: 周期 1 秒、右: 周期 5 秒)

地表断層近傍では地震動強さ分布には大きな差は見られない。地震動予測式には近距離において振幅の頭打ち項が考慮されているが、本検討で対象とした中央構造線断層帯の全区間が同時に活動する地震は規模が大きいためこの頭打ちとなる距離の範囲も大きくなる。結果として、地表断層近傍での断層最短距離の数 km 以内の差は、算定される地震動強さにはそれほど大きな影響を与えないこととなる。一方で、地表断層から 10~20km 程度離れた地域において差が見られる。特に中角度の場合は、傾斜と反対の南側で地震動がやや小さくなる地域が比較的断層から遠方まで広がっている。

3) 長大断層のスケーリング則検討のための文献収集

全国地震動予測地図作成で用いられている「震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)」(地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2020)では、長大断層に対する震源断層面積と地震モーメントとの関係として、Murotani et al. (2015) によるスケーリング則が採用されているが、検討に用いられている地震は世界的にまだ少ない。Murotani et al. (2015) 以後、2016 年にはニュージーランドで、2023 年にはトルコで 2 つの長大断層における地震が発生した。そこで、長大断層に関するスケーリング則の妥当性を確認するため、これらの地震を対象とした主として震源インバージョン解析が行われた既往研究の文献を収集した。また、これらの地震では震源近傍(地表断層から数 km 以内)の強震動記録が得られ公開されている。長大断層ならびに震源断層近傍の強震動予測、特に地震動予測式の妥当性確認を可能にするこれらの地震における強震動記録についても収集した。

Kaikoura (カイクウラ) 地震は 2016 年 11 月 13 日 11 時 2 分(協定世界時、以下同)に、ニュージーランド南島北東部の深さ約 15 km を震源として発生した $M_w7.8$ の地震である。Kaikoura 地震では、西南西―東北東方向に走る Marlborough (マルボロ) 断層系の南端部に沿って約 180km の距離の範囲で断層破壊が生じ、20 本を超える地表断層が確認されている(Litchfield et al., 2018)。ここでは、デジタルデータが入手可能な 4 つの震源インバージョン解析による震源モデルを収集し整理した。これらのモデルの概要を表 1 にまとめる。震源インバージョン解析では、活断層だけでなく、沈み込むプレートの境界面も破壊したとするモデルも提示されている(Hamling et al., 2017; Wang et al., 2018)。また、Kaikoura 地震では多数の強震波形記録が得られており、これらの記録はニュージーランド GeoNet の Strong Motion Data Products (<https://data.geonet.org.nz/seismic-products/strong-motion/volume-products/>) から公開されている。図 13 に、震源域に近い観測点の加速度波形およびそのフーリエスペクトルを示す。

Kahramanmaras (カフラマンマラシュ) 地震は、2023 年 2 月 6 日 1 時 17 分に、トルコの Narli (ナルリ)―Pazarcik (パザルジュク) 断層の深さ約 10km で発生し、East Anatolian (東アナトリア) 断層帯に断層破壊が乗り移った $M_w7.8$ の地震である。さらにこの地震の約 9 時間後、約 90km 北側の Cardak (チャルダック) 断層帯で、2 月 6 日 10 時 24 分に深さ約 14km を震源とする $M_w7.5$ の Elbistan (エルビスタン) 地震が発生した。二つの地震を対象とした震源インバージョン解析に加え、Kahramanmaras 地震については、主に短周期地震動の生成に着目した強震動生成域モデルも提案されている。ここではそれらの研究による震源モデルを収集し整理した。Kahramanmaras 地震のモデルの概要を表 2 に、Elbistan 地震の概要を表 3 にまとめる。

表1 震源インバージョンによる Kaikoura 地震の震源モデル

	強震動	遠地 実体波	測地	断層面積 [km ²]	地震モーメント [Nm]	最大すべり [m]
Hamling et al. (2017)	×	×	○	21,712	1.0×10^{21}	24.9
Holden et al. (2017)	○	×	×	23,050	$M_w 7.9$	26.1
Wang et al. (2018)	○	○	○	12,726	1.04×10^{21}	14.2
Xu et al. (2018)	×	×	○	9,147	7.35×10^{20}	18.4

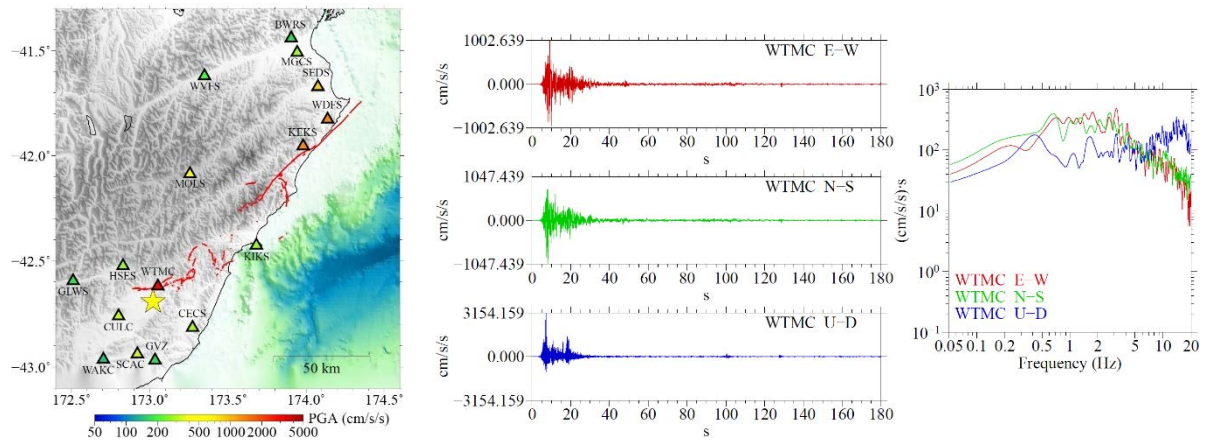


図13 Kaikoura 地震の観測加速度波形（フィルタ無）およびそのフーリエスペクトルの例。波形の0秒は発震時、地図中の黄色星は破壊開始点、赤線は Langridge et al. (2016) の地表断層。

表2 Kahramanmaras 地震の震源モデル

	強震動	遠地 実体波	測地*	断層面積 [km ²]	地震モーメント [Nm]	最大すべり [m]
Mai et al. (2023)	×	○	×	9,125	1.03×10^{21}	>7
	×	×	I	9,125	6.13×10^{20}	
Barbot et al. (2023)	×	×	I	7,400	5.40×10^{20}	8
Goldberg et al. (2023)	○	○	I, G	16,200	7.92×10^{20}	11
Melgar et al. (2023)	○	×	G	7,000	6.51×10^{20}	9
Jia et al. (2023)	×	×	I, G	8,400	不明	>8
	○	○	I, G	8,400	不明	
Delouis et al. (2023)	○	×	G	10,875	$M_w 7.3$	8
He et al. (2023)	×	×	I	10,320	5.30×10^{20}	8
Liu et al. (2023)	○	○	G	17,640	7.10×10^{20}	8.1
Satoh (2024)**	○	×	×	1,004	6.431×10^{19}	

*I: InSAR, G: GNSS

**Satoh (2024) のモデルは強震動生成域のみの値

表 3 Elbistan 地震の震源モデル

	強震動	遠地 実体波	測地*	断層面 積[km ²]	地震モーメント[Nm]	最大す べり[m]
Mai et al. (2023)	×	○	×	4,750	5.03×10^{20}	>8
	×	×	I	4,750	3.32×10^{20}	
Barbot et al. (2023)	×	×	I	3,720	3.30×10^{20}	12
Goldberg et al. (2023)	○	○	I, G	5,850	5.05×10^{20}	11
Melgar et al. (2023)	○	×	G	3,200	3.64×10^{20}	7
Jia et al. (2023)	×	×	I, G	4,200	不明	
	○	○	I, G	4,200	不明	>10
He et al. (2023)	×	×	I	6,120	4.06×10^{20}	8
Liu et al. (2023)	○	○	G	12,375	5.00×10^{20}	11

*I:InSAR, G:GNSS

Kahramanmaras 地震および Elbistan 地震では、断層近傍での強震動記録が得られている。これらの記録はトルコの Ministry Of Interior Disaster And Emergency Management Presidency (AFAD; <https://en.afad.gov.tr/>) から公開されている。図 14 に Kahramanmaras 地震で観測された加速度波形の例を示す。

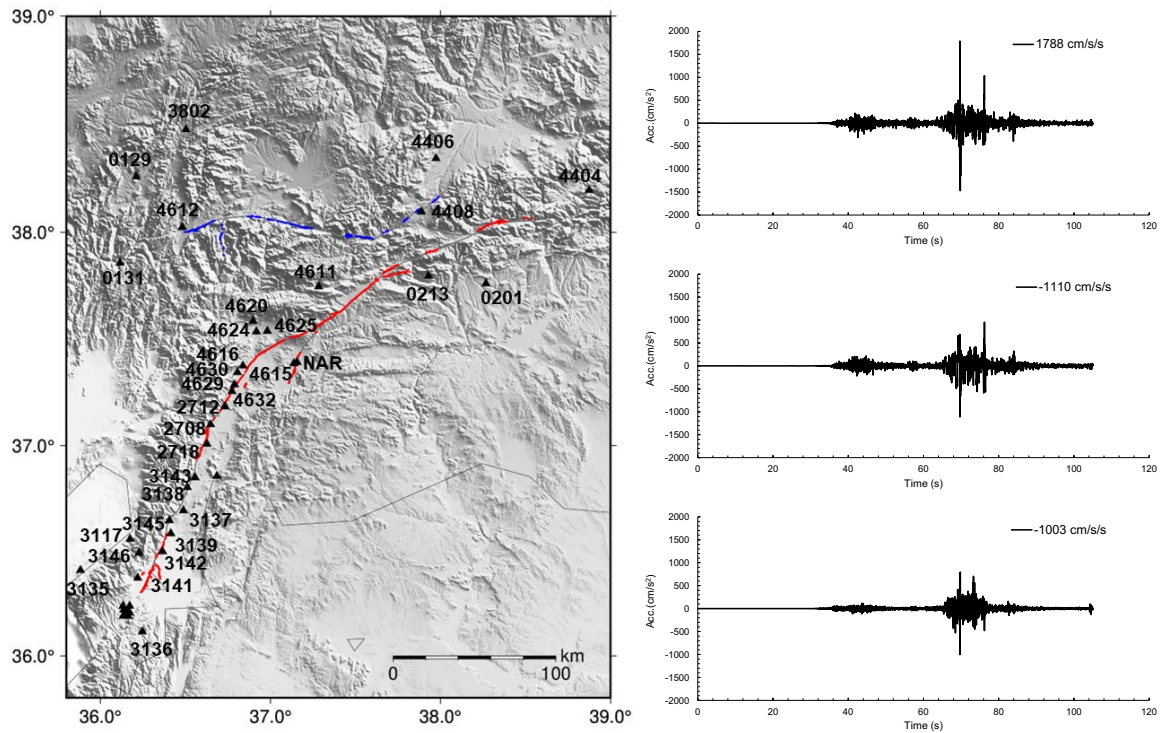


図 14 Kahramanmaras 地震の波形例 (2712 観測点 ; 上から NS、EW、UD 成分)

(c) 結論並びに今後の課題

中央構造線断層帯全体が同時に活動する地震を対象として、地震動予測地図で用いられている地震発生層内の矩形断層と地表断層トレース形状を接続する震源断層モデルを作成した。このとき、地表断層形状をできるだけ詳細にモデル化した。矩形断層を地表までそのまま延長した震源断層モデルとあわせて、地震動予測式に基づく強震動計算と結果の比較を行った。地震動予測式で考慮されている地表断層近傍における振幅の頭打ちによって震源断層モデルによる地震動強さの違いはほとんど見られなかったが、地表断層位置が乖離している周辺ではやや遠方（数 10km）において違いが見られた。

2016 年 11 月 13 日にニュージーランドで発生した Kaikoura 地震 (Mw7.8)、2023 年 2 月 6 日に発生した Kahramanmaras 地震 (Mw7.8) と Elbistan 地震 (Mw7.5) の計 3 つの地震の主に震源インバージョン解析結果を収集するとともに震源パラメータ等の整理を行った。ただし、本検討対象の 3 つの地震に対しては断層面のトリミング操作を実施しておらず、解析時の設定値のままである。従って、これらの 3 つの地震を対象にスケーリング則の比較検討を行うためには、震源インバージョン解析で得られた断層面のすべり分布に基づいて Somerville et al. (1999) の規範に従ってトリミング操作を実施して震源断層面積を抽出することが必要となる。また、2024 年 1 月 1 日に発生した能登半島地震 (Mw7.5) も長大断層で発生した地震である。この地震に関する震源インバージョン解析等も進められており、今後、それらの結果についても収集して検討に加える必要がある。

(d) 引用文献

- Barbot, S., H. Luo, T. Wang, Y. Hamiel, O. Piatibratova, M. T. Javed, C. Braitenberg, and G. Gurbuz, Slip distribution of the February 6, 2023 Mw 7.8 and Mw 7.6, Kahramanmaras, Turkey earthquake sequence in the East Anatolian Fault Zone, *Seismica*, 2(3), 2023.
- Delouis, B., M. van den Ende, and J.-P. Ampuero, Kinematic rupture model of the 6 February 2023 Mw7.8 Turkey earthquake from a large set of near-source strong-motion records combined with GNSS offsets reveals intermittent supershear rupture, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2023.
- Disaster and Emergency Management Authority (AFAD), 06-02-2023 10:17:32, Pazarcik (Kahramanmaras) MW 7.7, <https://deprem.afad.gov.tr/event-detail/408326>, 2023.
- Disaster and Emergency Management Authority (AFAD), 06-02-2023 19:24:47, Elbistan (Kahramanmaras) MW 7.6, <https://deprem.afad.gov.tr/event-detail/408491>, 2023.
- 藤本一雄・翠川三郎, 近年の強震記録に基づく地震動強さ指標による計測震度推定法, 地域安全学会論文集, 7, 241-246, 2005.
- 藤本一雄・翠川三郎, 近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均 S 波速度の関係, 日本地震工学会論文集, 6(1), 11-22, 2006.
- Goldberg, D. E., T. Taymaz, N. G. Reitman, A. E. Hatem, S. Yolsal-Cevikbilen, W. D. Barnhart, T. S. Irmak, D. J. Wald, T. Ocalan, W. L. Yeck, B. Ozkan, J. A. Thompson Jobe, D. R. Shelly, E. M. Thompson, C. B. DuRoss, P. S. Earle, R. W. Briggs, H. Benz, C. Erman, A. H. Dogan, and C. Altuntas, Rapid characterization

- of the February 2023 Kahramanmaras, Turkiye, earthquake sequence, The Seismic Record, 3(2), 156-167, 2023.
- Hamling, I. J., S. Hreinsdóttir, K. Clark, J. Elliott, C. Liang, E. Fielding, N. Litchfield, P. Villamor, L. Wallace, T. J. Wright, E. D’Anastasio, S. Bannister, D. Burbidge, P. Denys, P. Gentle, J. Howarth, C. Mueller, N. Palmer, C. Pearson, W. Power, P. Barnes, D. J. A. Barrell, R. Van Dissen, R. Langridge, T. Little, A. Nicol, J. Pettinga, J. Rowland, and M. Stirling, Complex multifault rupture during the 2016 M_w 7.8 Kaikōura earthquake, New Zealand, Science, Vol. 356, Issue 6334, 2017.
- He, L., G. Feng, W. Xu, Y. Wang, Z. Xiong, H. Gao, and X. Liu, Coseismic kinematics of the 2023 Kahramanmaras, Turkey earthquake sequence from InSAR and optical data, Geophys. Res. Lett., 50(17), 2023.
- Holden, C., Y. Kaneko, E. D’Anastasio, R. Benites, B. Fry, and I. J. Hamling, The 2016 Kaikōura earthquake revealed by kinematic source inversion and seismic wavefield simulations: Slow rupture propagation on a geometrically complex crustal fault network, Geophys. Res. Lett., 44(22), 11320-11328, 2017.
- Jia, Z., Z. Jin, M. Marchandon, T. Ulrich, A.-A. Gabriel, W. Fan, P. Shearer, X. Zou, J. Rekoske, F. Bulut, A. Garagon, and Y. Fialko, The complex dynamics of the 2023 Kahramanmaras, Turkey, Mw 7.8-7.7 earthquake doublet, Science, 381(6661), 985-990, 2023.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 震源断層を特定した地震の強震動予測手法 (「レシピ」), https://www.jishin.go.jp/main/chousa/20_yosokuchizu/recipe.pdf, 2020.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 関東地方の浅部・深部統合地盤構造モデル (2021年版), https://www.jishin.go.jp/evaluation/strong_motion/underground_model/integrateion_model_kanto_2021/, 2021a.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 全国地震動予測地図 2020 年版, https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/shm_report/shm_report_2020/, 2021b.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 応答スペクトルに関する地震動ハザード評価 (試作版), https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/sh_response_spectrum/, 2022.
- Langridge, R. M., W. F. Ries, N. J. Litchfield, P. Villamor, R. J. Van Dissen, D. J. A. Barrell, M. S. Rattenbury, D. W. Heron, S. Haubrock, D. B. Townsend, J. M. Lee, K. R. Berryman, A. Nicol, S. C. Box, and M. W. Stirling, The New Zealand Active Faults Database, New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 59(1), 86-96, 2016.
- Liu, C., T. Lay, R. Wang, T. Taymaz, Z. Xie, X. Xiong, T. S. Irmak, M. Kahraman, and C. Erman, Complex multi-fault rupture and triggering during the 2023 earthquake doublet in southeastern Turkiye, Nature Communications, 14(5564), 2023.

- Litchfield, N. J., P. Villamor, R. J. Van Dissen, A. Nicol, P. M. Barnes, D. J. A. Barrell, J. R. Pettinga, R. M. Langridge, T. A. Little, J. J. Mountjoy, W. F. Ries, J. Rowland, C. Fenton, M. W. Stirling, J. Kearse, K. R. Berryman, U. A. Cochran, K. J. Clark, M. Hemphill-Haley, N. Khajavi, K. E. Jones, G. Archibald, P. Upton, C. Asher, A. Benson, S. C. Cox, C. Gasston, D. Hale, B. Hall, A. E. Hatem, D. W. Heron, J. Howarth, T. J. Kane, G. Lamarche, S. Lawson, B. Lukovic, S. T. McColl, C. Madugo, J. Manousakis, D. Noble, K. Pedley, K. Sauer, T. Stahl, D. T. Strong, D. B. Townsend, V. Toy, J. Williams, S. Woelz, and R. Zinke, Surface rupture of multiple crustal faults in the 2016 M_w 7.8 Kaikōura, New Zealand, earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(3B), 1496-1520, 2018.
- Mai, P. M., T. Aspiotis, T. A. Aquib, E. V. Cano, D. Castro-Cruz, A. Espindola-Carmona, B. Li, X. Li, J. Liu, R. Matrau, A. Nobile, K. H. Palgunadi, M. Ribot, L. Parisi, C. Suhendi, Y. Tang, B. Yalcin, U. Avsar, Y. Klinger, and S. Jonsson, The Destructive earthquake doublet of 6 February 2023 in south - Central Turkiye and Northwestern Syria: Initial observations and analyses, *The Seismic Record*, 3(2), 105-115, 2023.
- Melgar, D., T. Taymaz, A. Ganas, B.W. Crowell, T. Ocalan, M. Kahraman, V. Tsironi, S. Yolsal-Cevikbilen, S. Valkaniotis, T. S. Irmak, T. Eken, C. Erman, B. Ozkan, A.H. Dogan, and C. Altuntas, Sub- and super-shear ruptures during the 2023 M_w 7.8 and M_w 7.6 earthquake doublet in SE Turkiye, *Seismica*, 2(3), 2023.
- Morikawa, N. and H. Fujiwara, A new ground motion prediction equation for Japan applicable up to M_9 mega-earthquake, *Journal of Disaster Research*, 8, 878-888, 2013.
- 森川信之・藤原広行, Morikawa and Fujiwara (2013) に基づく地震動予測式, <https://www.j-shis.bosai.go.jp/labs/mf2013/>, 2023.
- Murotani, S., S. Matsushima, T. Azuma, K. Irikura, and S. Kitagawa, Scaling relations of source parameters of earthquakes occurring on inland crustal mega-fault system, *Pure and Applied Geophysics*, 172, 1371-1381, 2015.
- Satoh, T., Broadband source model of the 2023 M_w 7.8 Turkiye earthquake from strong-motion records by isochrone backprojection and empirical Green's function method, *Seismol. Res. Lett.*, 95(2A), 584-595, 2024.
- Somerville, P.G., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith, and A. Kowada, Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seismol. Res. Lett.*, 70, 59-80, 1999.
- 司宏俊・翠川三郎, 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, *日本建築学会構造系論文集*, 523, 63-70, 1999.
- 若松加寿江・松岡昌志, 地形・地盤分類 250m メッシュマップの更新, *日本地震工学会誌*, 40, 24-27, 2020.

- Wang, T., S. Wei, X. Shi, Q. Qiu, L. Li, D. Peng, R. J. Weldon, and S. Barbot, The 2016 Kaikōura earthquake: Simultaneous rupture of the subduction interface and overlying faults, *Earth and Planetary Science Letters*, 482, 44–51, 2018.
- Xu, W., G. Feng, L. Meng, A. Zhang, J. P. Ampuero, R. Bürgmann, and L. Fang, Transpressional rupture cascade of the 2016 M_w 7.8 Kaikoura earthquake, New Zealand, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(3), 2396–2409, 2018.

4. 全体成果概要

本研究課題では、我が国の主要活断層帯で最も長大であり活動度が高い断層帯の1つである中央構造線断層帯の四国陸域を中心に、これまで未解明であった連動型地震の発生確率の算出や連動条件の検討、地表付近の詳細な断層位置形状を反映した強震動計算を目的とした調査研究を実施する。さらに、その結果を踏まえて、地震調査研究推進本部の連動型地震に関する新たな評価手法や高度化した手法を提案することを目標とする。本年度は、石鎚山脈北縁区間と石鎚山脈北縁西部区間の境界付近、中央構造線断層帯周縁地域、紀伊半島の中央構造線を主な対象として、以下の調査研究を実施した。

サブテーマ1-1「複数回の変位履歴を復元するための活断層調査」では、中央構造線断層帯・石鎚山脈北縁区間と石鎚山脈北縁西部区間の境界付近を主な対象として変位履歴を解明するため、次の地形地質調査を実施した。石鎚山脈北縁区間・岡村断層の西端付近に位置する西条市坂元地区において、ドローンLiDAR計測、トレンチ調査、ボーリングを実施し、過去3回の活動時期と活動間隔、地震時変位量等を明らかにした。その結果、最新活動は西暦660年以降に生じ、従来の1596年文禄伊予地震に対応する可能性が高く、先行するイベントの発生年代は約1.3～1.8万年前、さらに前の活動は約2.9万年前頃と推定された。これらをもとに最近3回の活動間隔は11200～18200年程度と推定され、周辺断層の1000～1500年よりも有意に長いことが明らかとなった。また、各イベントの地震時上下変位量は、それぞれ1.5m、1.0m、1.7mと計測された。河成段丘面上に形成された累積変位とボーリング調査による年代をもとに、周辺に分布する3条の活断層の平均変位速度は、それぞれ0.2mm/yr（上下）、0.1mm/yr（上下）、0.9mm/yr（横ずれ：岡村断層）と推定された。以上の結果、最新活動は西暦1596年文禄（慶長）地震に伴い、石鎚山脈北縁区間と石鎚山脈北縁西部区間が連動したイベントと判断され、坂元地区の活動は岡村断層単独のイベントを示すのではなく、少なくとも両区間が連動したイベントを反映すると考えられる。このように、横ずれ断層における上下変位の変位履歴に基づき過去の連動型イベントを判別し、連動間隔を算出する手法を初めて提示した。

サブテーマ1-2「歴史文書の収集分析に基づく地震活動の検討」では、中央構造線の周辺に位置する四国・九州地域の近世の日記史料を主たる対象として、機器による地震観測が開始される以前の有感地震情報を収集した。日記史料を対象としたのは、同一地点での有感地震が、同一人物によって記録されており、有感地震の長期的な変動状況を均質な基準で把握できる可能性が高いためである。また被害を出した大きな地震だけでなく、中小の地震についても把握できると考えられる。本年度は香川県多度津藩・愛媛県宇和島藩・大分県佐伯藩の公用日記、および熊本県熊本藩士の日記を調査し、既刊の地震史料集に未収録の地震情報を収集した。また1703年12月31日に豊後（現在の大分県）、1853年3月28日に伊予（現在の愛媛県）で被害を生じさせた地震について検討した。

サブテーマ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」では、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。

サブテーマ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」では、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。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。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、変位履歴調査の結果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。

サブテーマ4「長大な活断層帯における強震動予測手法の高度化」では、強震動評価の高精度化のため、中央構造線断層帯全体が同時に活動する地震を対象として、地表断層をできるだけ詳細にモデル化し、全国地震動予測地図で用いられている地震発生層内の矩形断層と接続した震源断層モデルを作成した。地表断層の端点を直線で結んだモデルとともに地震動予測式を用いて、最大速度、計測震度に加え、最大加速度および減衰定数5%の加速度応答（周期0.1秒、1秒および5秒）の計算を面的に行い、詳細なモデル化による強震動予測結果において、断層最短距離が20km程度離れた地域まで影響が現れることを示した。また、長大断層のスケーリング則の妥当性確認に用いるため、ニュージーランドの2016年Kaikoura（カイクウラ）地震、トルコの2023年Kahramanmaras（カフラマンマラシュ）地震とElbistan（エルビスタン）地震を対象として、主に震源インバージョン解析に関する13の既往文献と公開されている強震動記録を収集した。

以上のように、今年度の成果として、1—1）石鎚山脈北縁区間と石鎚山脈北縁西部区間における上下変位に基づく変位履歴と連動型イベント判別手法の提示、1—2）香川県多度津藩・愛媛県宇和島藩・大分県佐伯藩の公用日記、および熊本県熊本藩士の日記に基づく、新たな有感地震情報の収集、2）紀伊半島の中央構造線断層帯周辺における微小地震メカニズム解に基づく東西圧縮の応力場推定とすべりやすさの検討、3）活動履歴に基づく最新活動直前の応力場を考慮した動的破壊シミュレーションと四国陸域の連動パターンの再現、4）詳細な地表断層分布を考慮した震源モデル作成と簡便な地震動予測式による試算、海外の強震動記録と文献の収集、などの新たな知見が得られた。

5. 成果の論文発表・口頭発表等

(1-1) 複数回の変位履歴を復元するための活断層調査

(a) 成果の論文発表・口頭発表等

なし

(b) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(1-2) 歴史文書の収集分析に基づく地震活動の検討

(a) 成果の論文発表・口頭発表等

なし

(b) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(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

(a) 成果の論文発表・口頭発表等

なし

(b) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(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

(a) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
加瀬祐子・ 浦田優美・	動力学的震源モデルから推定される中央構造線断層帯（四国陸	日本地震学会 2023 年度秋 期大会	令和 5 年 10 月

近藤久雄	域) の最新イベント像		
------	-------------	--	--

(b) 特許出願, ソフトウェア開発, 仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(4) 長大な活断層帯における強震動予測手法の高度化

(a) 成果の論文発表・口頭発表等

なし

(b) 特許出願, ソフトウェア開発, 仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

6. むすび

本研究課題では、我が国の主要活断層帯で最も長大な活断層である中央構造線断層帯を対象として、特に四国陸域で生じ得る連動型巨大地震を評価するため、これまで未解明であった連動型地震の発生確率の算出や連動条件の検討、を目的とした調査研究を3カ年の計画で実施する。最終的な成果は、連動型地震に関する新たな評価手法や高度化した手法を地震調査研究推進本部に提案することを目標とし、「活断層の長期評価手法（暫定版）」や全国地震動予測地図に反映されることを目指すものである。

中央構造線断層帯は、我が国で最も長大で活動度が高い主要活断層帯の1つであり、これまでも様々な研究機関で活断層調査や重点的な調査観測、前回事業である「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）」が実施されてきた。これらの既往調査研究成果に加え、本研究課題では新たなテーマを加えた5つのサブテーマで成果の共有や連携を図りつつ、連動型巨大地震の評価手法を開発・改良するための調査研究を実施した。

1—1）複数回の変位履歴を復元するための活断層調査では、過年度事業の成果を踏まえて、石鎚山脈北縁西部区間と石鎚山脈北縁区間で変位履歴調査等を実施した。その結果、1596年文禄伊予地震に対応される最新活動では、岡村断層の西端部で上下変位1.5mを生じ、石鎚山脈北縁西部区間と石鎚山脈北縁区間が連動した可能性が追認された。また、先行する2回の活動を含めた連動間隔が11200～18200年程度と推定された。さらに、調査地域に分布する主に3条の活断層について、岡村断層の平均変位速度を0.9 mm/yr（横ずれ）、北側を分岐して延びる正断層上で0.06 mm/yr（上下）、トレンチを掘削した最も北側の正断層で0.2 mm/yr（上下）の平均変位速度を推定した。これらによって、横ずれ断層端部で生じる上下変位に基づく変位履歴から過去の連動型イベントを判別可能であることが示された。引き続き調査手法の改良をおこない、より多地点で効率的に多数回の変位履歴を復元していく必要がある。

1—2）歴史文書の収集分析に基づく地震活動の検討では、次の新たな知見を得た。1841年11月3日に伊予灘付近を震央とする地震が発生し、九州や西瀬戸内海地域で広く感知されているが、多度津でも感知されていたことを確認した。1853年3月28日に発生した地震は伊予吉田で家屋被害を生じさせており、中央構造線に属する断層が関連する可能性について調査を続ける必要がある。1703年12月31日に発生した地震は、元禄関東地震と同日のほぼ同時刻に発生し、大分県由布院付近で死者と多くの家屋被害を出している。一方で、被害の大きさに反して被害地域は局所的で、中央構造線断層帯・豊予海峡一由布院区間の由布院断周辺で発生した地震である可能性が高い。1703年に先行する5年間には宇和島では頻繁に地震が記録されており、それぞれがどのような地震であったか、周辺地域に対象史料を広げて検討することが今後の課題である。

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では、主に既往の日本全国内陸部ストレスマップに基づいて、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。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、特に南北走向の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。

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では、四国陸域の中央構造線断層帯の4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。

4) 長大な活断層帯における強震動予測手法の高度化では、中央構造線断層帯全体が同時に活動する地震を対象として、地震動予測地図で用いられている地震発生層内の矩形断層と地表断層トレース形状を接続する震源断層モデルを作成した。このとき、地表断層形状をできるだけ詳細にモデル化した。矩形断層を地表までそのまま延長した震源断層モデルとあわせて、地震動予測式に基づく強震動計算と結果の比較を行った。地震動予測式に考慮されている地表断層近傍における振幅の頭打ちによって震源断層モデルによる地震動強さの違いはほとんど見られなかったが、地表断層位置が乖離している周辺ではやや遠方(数10km)において違いが見られた。また、2016年11月13日にニュージーランドで発生したKaikoura地震(Mw7.8)、2023年2月6日に発生したKahramanmaras地震(Mw7.8)とElbistan地震(Mw7.5)の計3つの地震の主に震源インバージョン解析結果を収集するとともに震源パラメータ等の整理を行った。今後、これらの3つの地震を対象にスケーリング則の比較検討を行うためには、震源インバージョン解析で得られた断層面のすべり分布に基づいてSomerville et al. (1999)の規範に従ってトリミング操作を実施して震源断層面積を抽出することが必要となる。また、2024年1月1日に発生した能登半島地震(Mw7.5)も長大断層で発生した地震である。この地震に関する震源インバージョン解析等も進められており、今後、それらの結果についても収集して検討に加える必要がある。

以上のように、初年度にあたる令和5年度は、各サブテーマの調査研究成果で多数の新たな知見が得られた。次年度以降も引き続き、調査研究計画に沿って連動型地震の新たな手法の開発や改良に取り組んでいく。

7. 外部評価委員会

7. 1 活動報告

「長大な活断層帯で発生する地震の評価手法に関する調査研究」外部評価委員会（第1回）

日時 令和6年3月29日（金） 10時00分～12時00分
場所 国立研究開発法人産業技術総合研究所（オンライン）
議事 1. 事業全体の概要と計画
2. 研究項目毎の計画と今年度の進捗状況
3. その他

7. 2 外部評価委員会構成員

（第1回）

○委員

1. 有識者

国立大学法人岡山大学理学部地球科学科	隈元 崇委員長
国立研究開発法人海洋研究開発機構地震津波予測研究観測センター	堀 高峰委員
国立大学法人東京大学地震研究所	三宅弘恵委員

2. 受託機関の研究者

国立研究開発法人産業技術総合研究所活断層・火山研究部門	近藤久雄（研究代表者）
一般財団法人電力中央研究所サステナブルシステム研究本部	木村治夫
学校法人同志社大学	堤 浩之
公益財団法人地震予知総合研究振興会	榎原雅治
国立研究開発法人産業技術総合研究所活断層・火山研究部門	椎名高裕
国立研究開発法人産業技術総合研究所活断層・火山研究部門	内出崇彦
国立研究開発法人産業技術総合研究所活断層・火山研究部門	加瀬祐子
国立研究開発法人産業技術総合研究所活断層・火山研究部門	浦田優美
国立研究開発法人防災科学技術研究所	森川信之
国立研究開発法人防災科学技術研究所	岩城麻子

○オブザーバー

1. 委託元

文部科学省研究開発局地震・防災研究課	佐藤壮紀
文部科学省研究開発局地震・防災研究課	上野貴史