

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）。

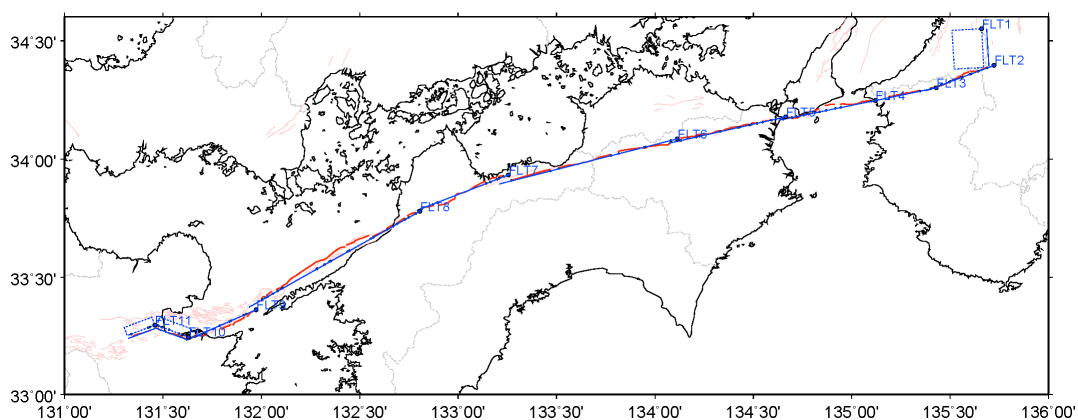
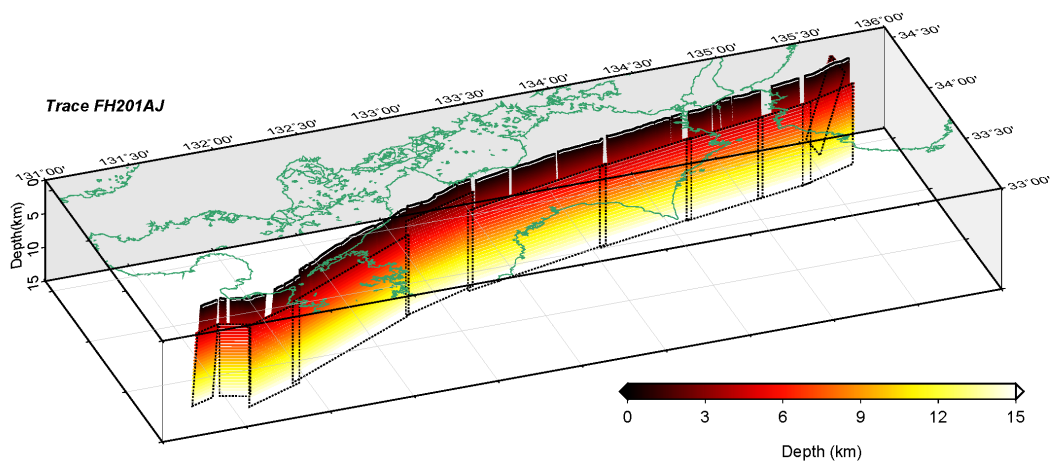
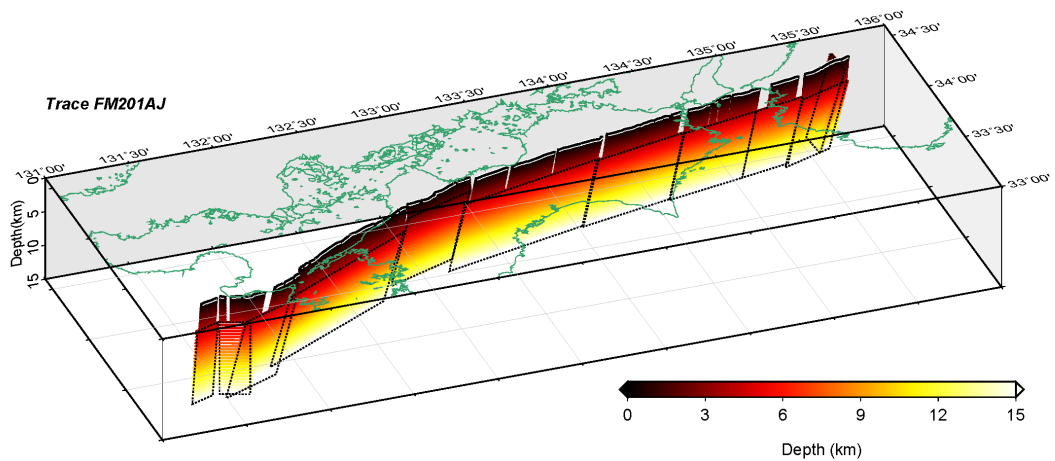


図 1 地表断層トレース（薄赤線）、モデル化に採用した地表トレース（赤線）と「全国地震動予測地図 2020 年版」における震源断層モデル（青線）。

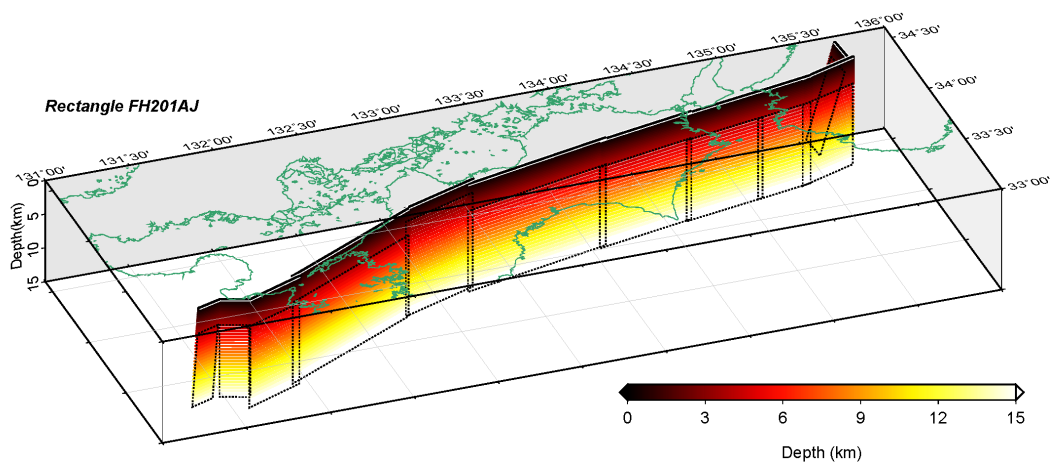


傾斜角：高角度



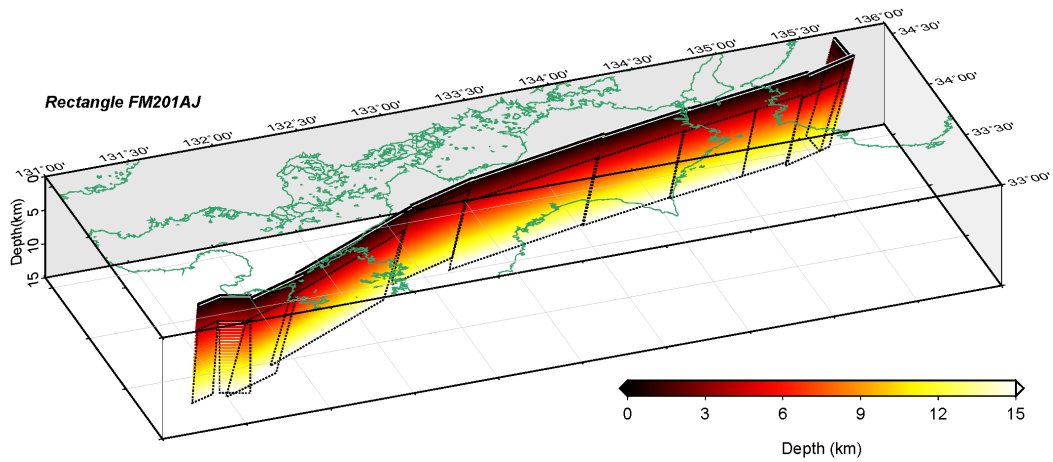
傾斜角：中角度

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。

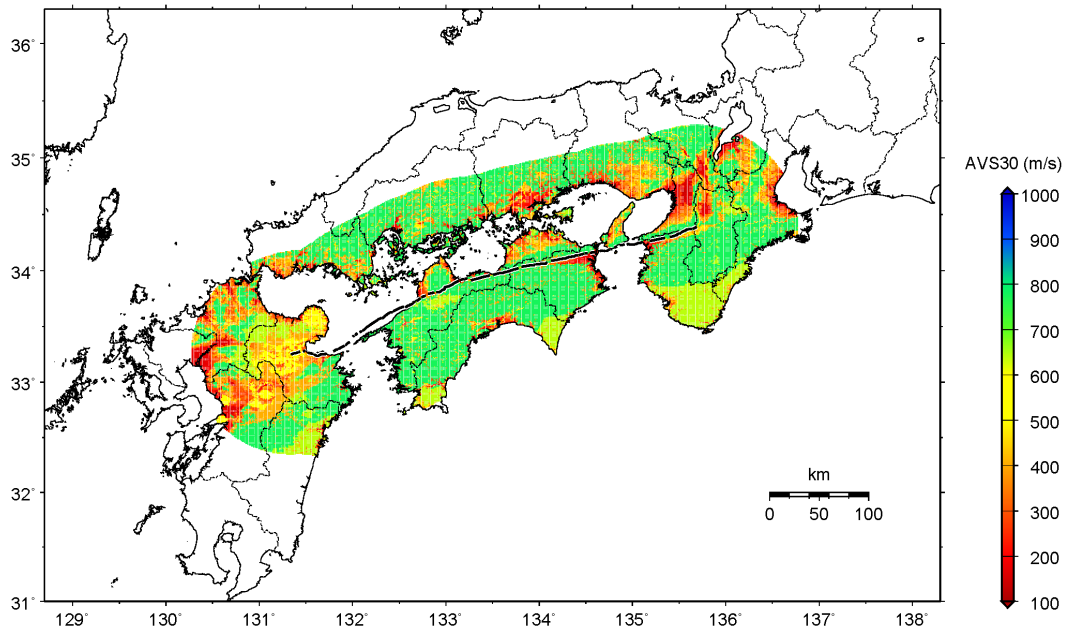
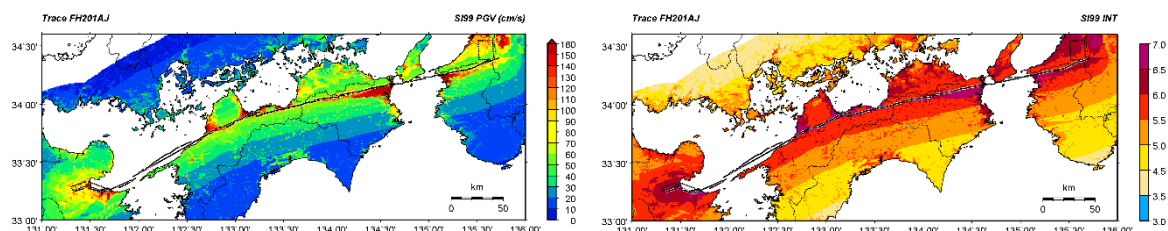
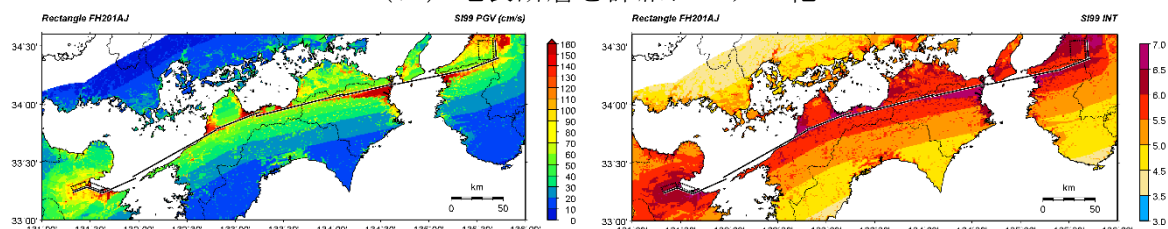


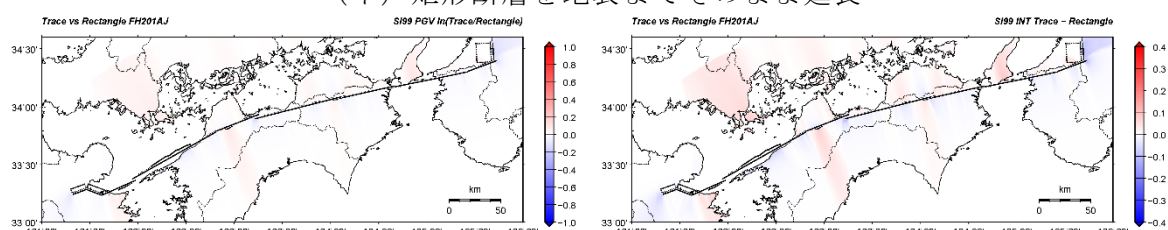
図 4 計算範囲と若松・松岡 (2020) の表層 30m の平均 S 波速度 (AVS30) 分布



(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

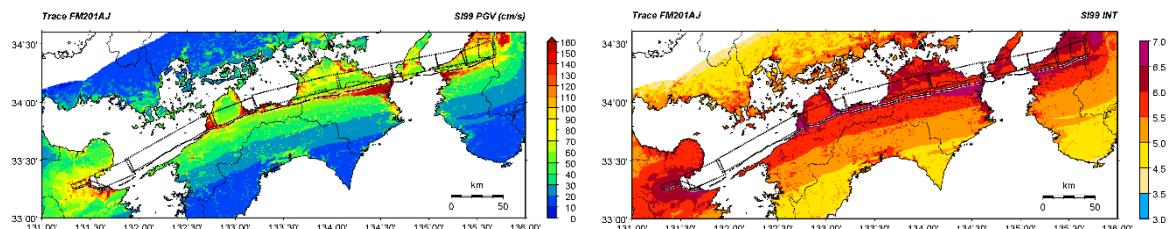


(ア) / (イ)

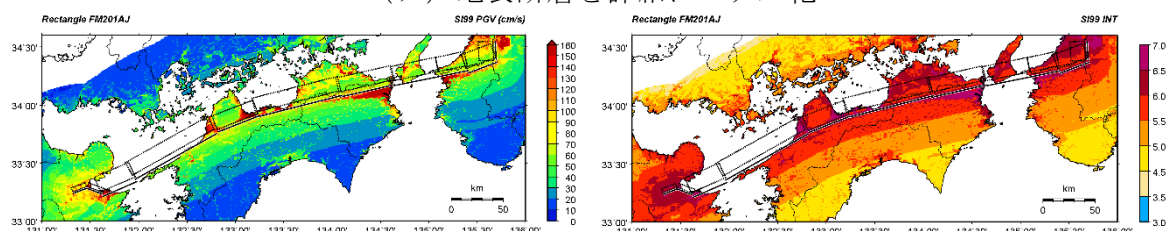
(ア) - (イ)

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

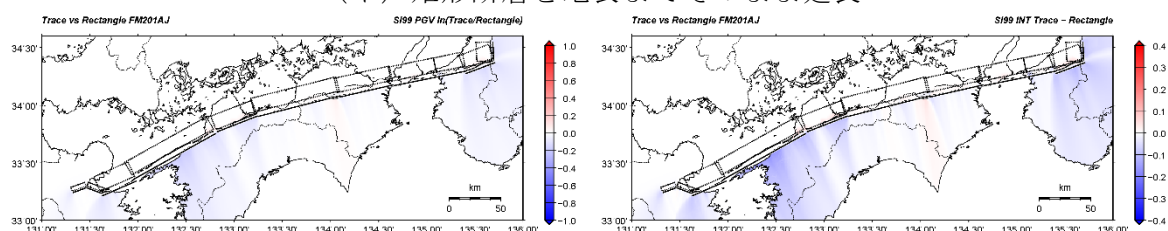
左: 最大速度、右: 計測震度



(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

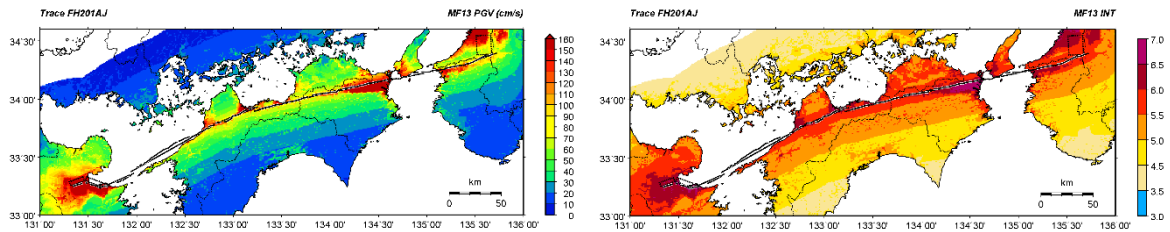


(ア) / (イ)

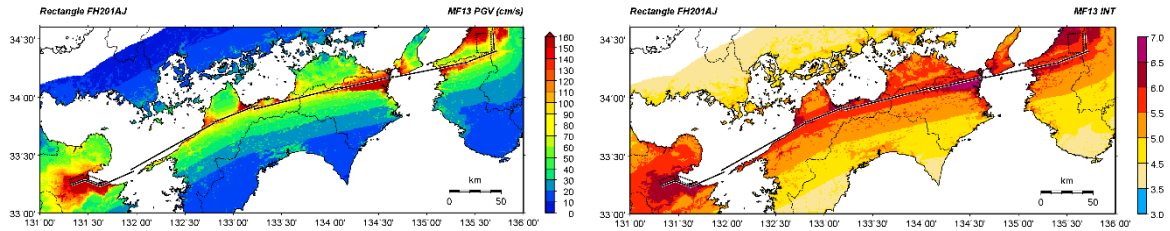
(ア) - (イ)

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

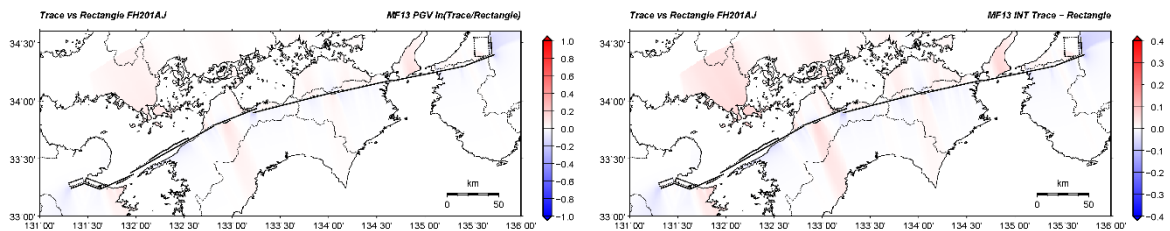
左: 最大速度、右: 計測震度



(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

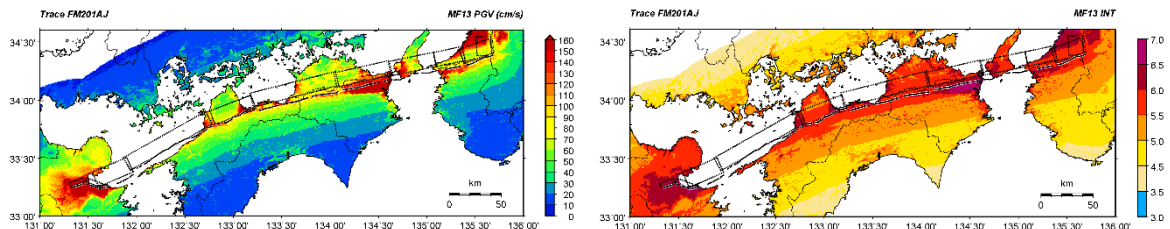


(ア) / (イ)

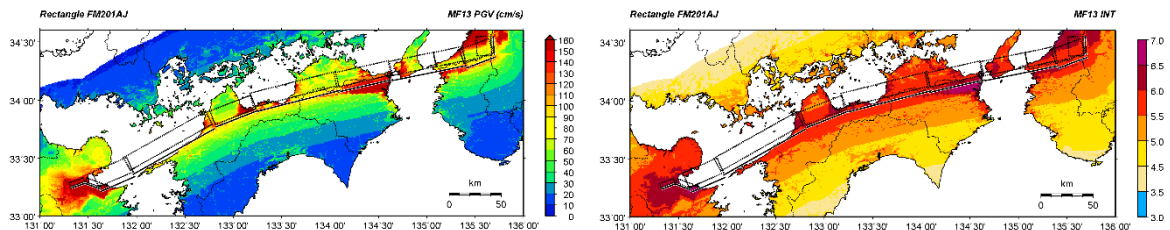
(ア) - (イ)

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

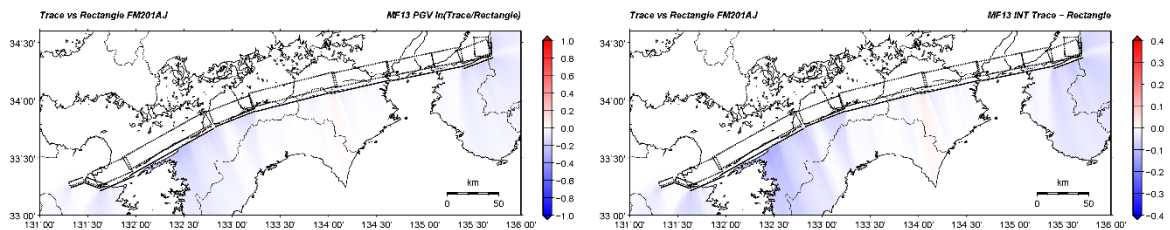
左: 最大速度、右: 計測震度



(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

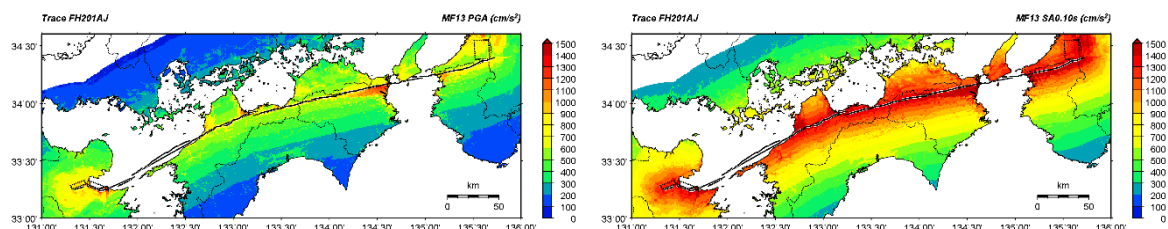


(ア) / (イ)

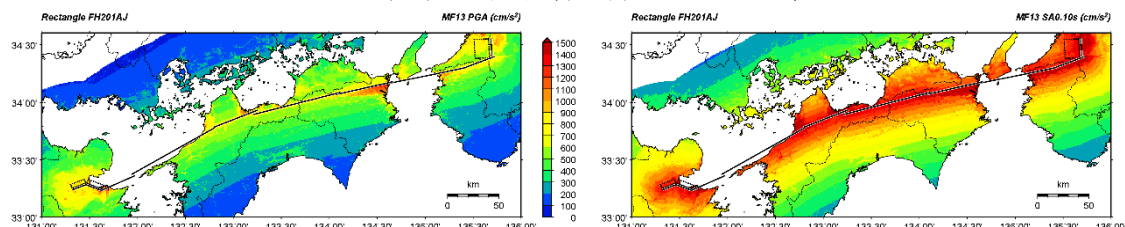
(ア) - (イ)

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

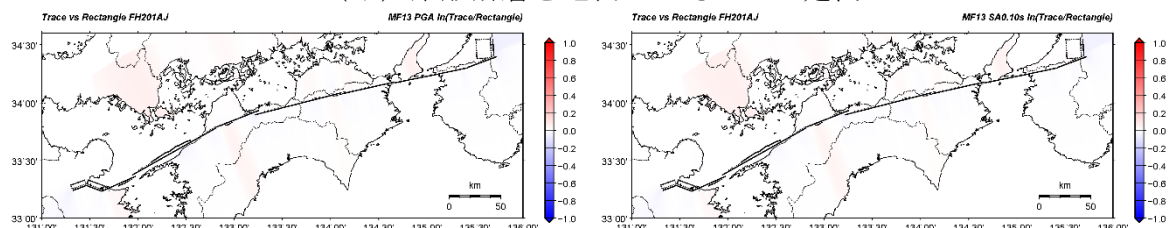
左: 最大速度、右: 計測震度



(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

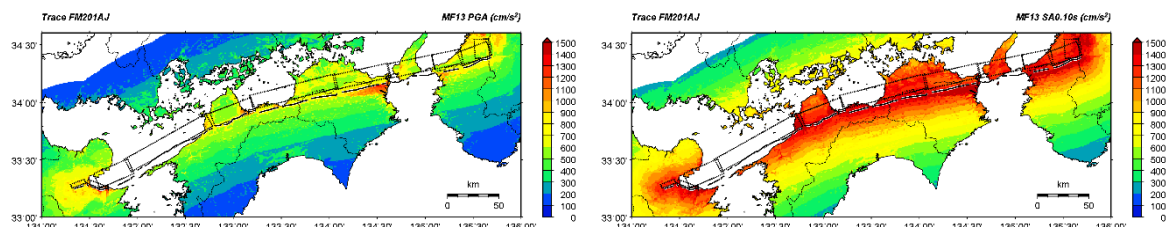


(ア) / (イ)

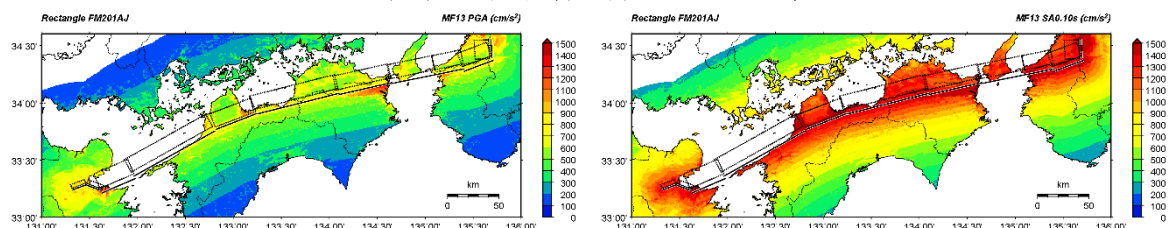
(ア) / (イ)

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

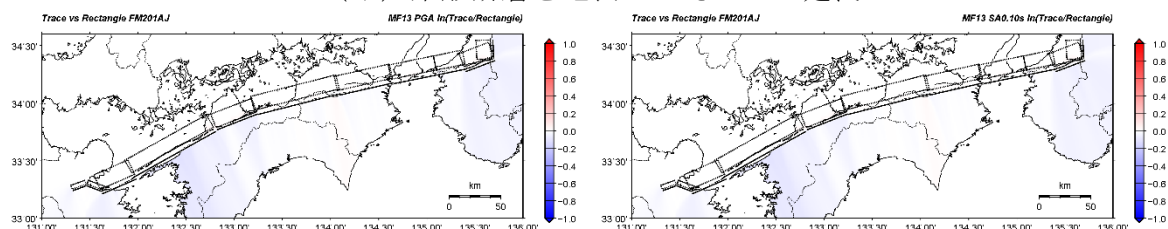
左: 最大加速度、右: 減衰定数 5 % の加速度応答スペクトル (周期 0.1 秒)



(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

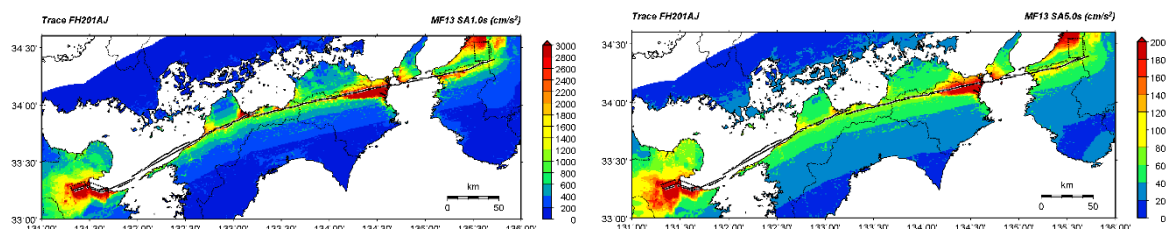


(ア) / (イ)

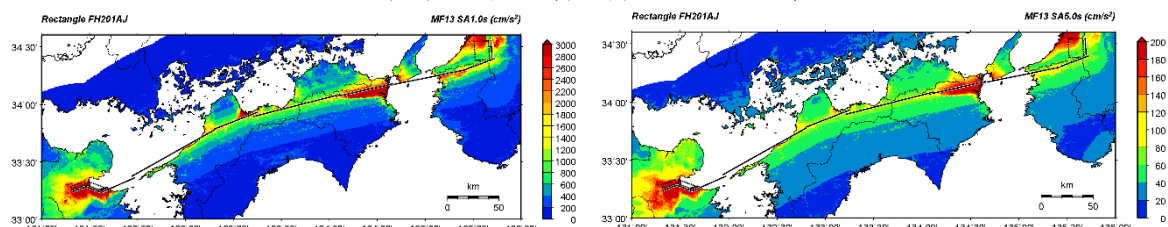
(ア) / (イ)

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

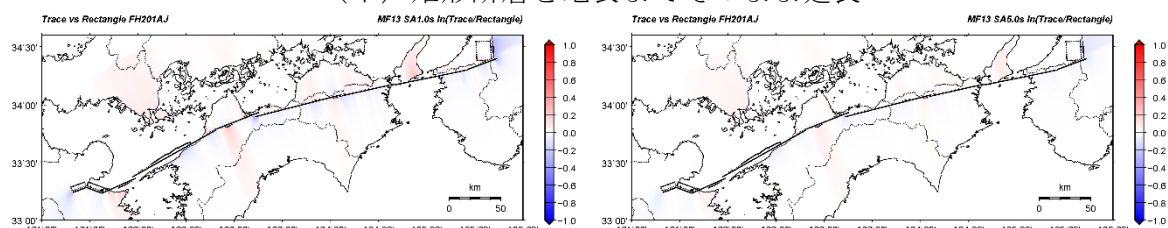
左: 最大加速度、右: 減衰定数 5 % の加速度応答スペクトル (周期 0.1 秒)



(ア) 地表断層を詳細にモデル化



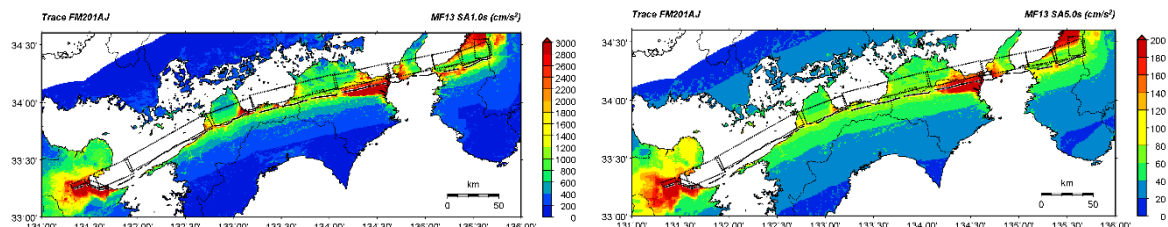
(イ) 矩形断層を地表までそのまま延長



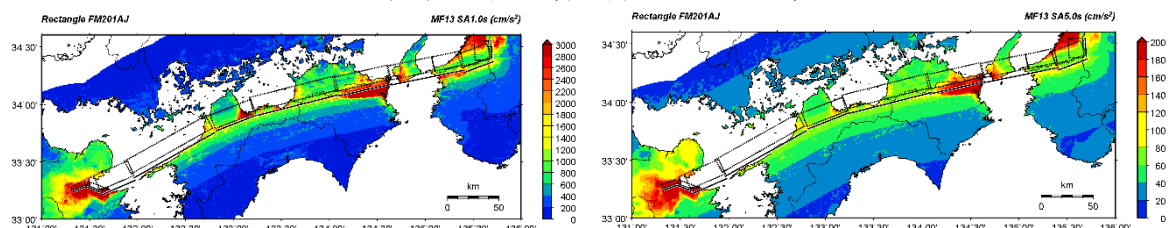
(ア) / (イ)

(ア) / (イ)

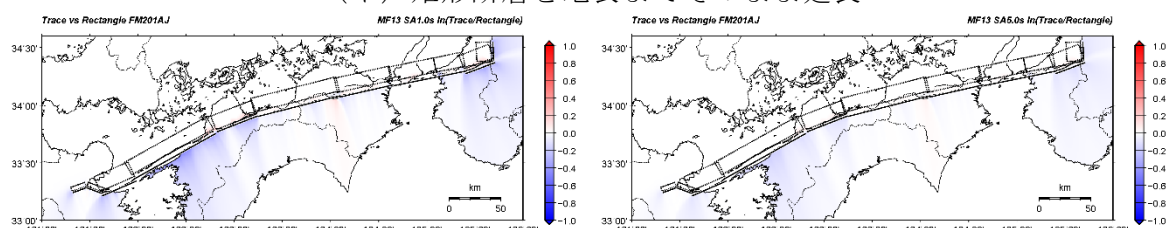
図 11 Morikawa and Fujiwara (2013) に基づく地震動計算結果 (高角度; $M_w 7.8$)
減衰定数 5 % の加速度応答スペクトル (左: 周期 1 秒、右: 周期 5 秒)



(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 (パザルジック) 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

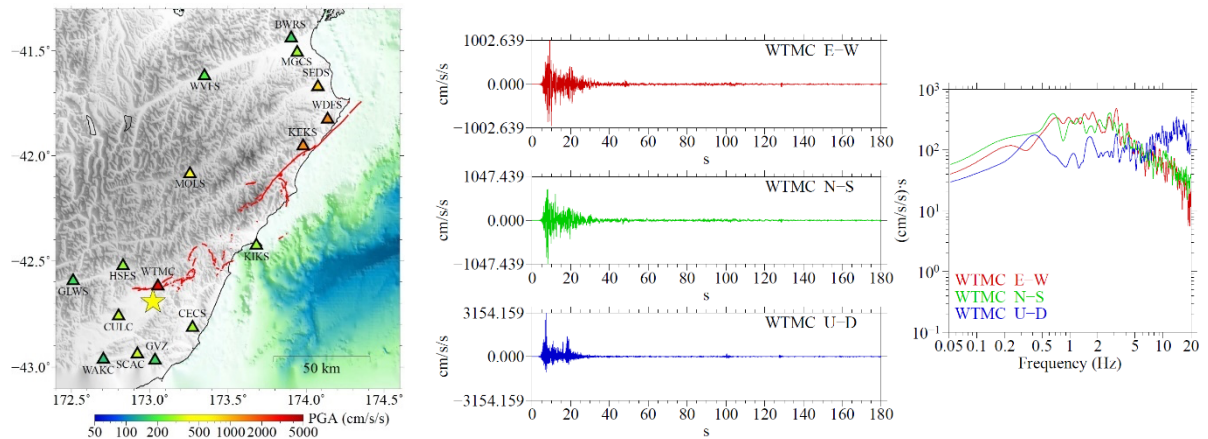


図13 Kaikoura 地震の観測加速度波形（フィルタ無）およびそのフーリエスペクトルの例。波形の0秒は発震時、地図中の黄色星は破壊開始点、赤線は Langridge et al. (2016) の地表断層。

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。

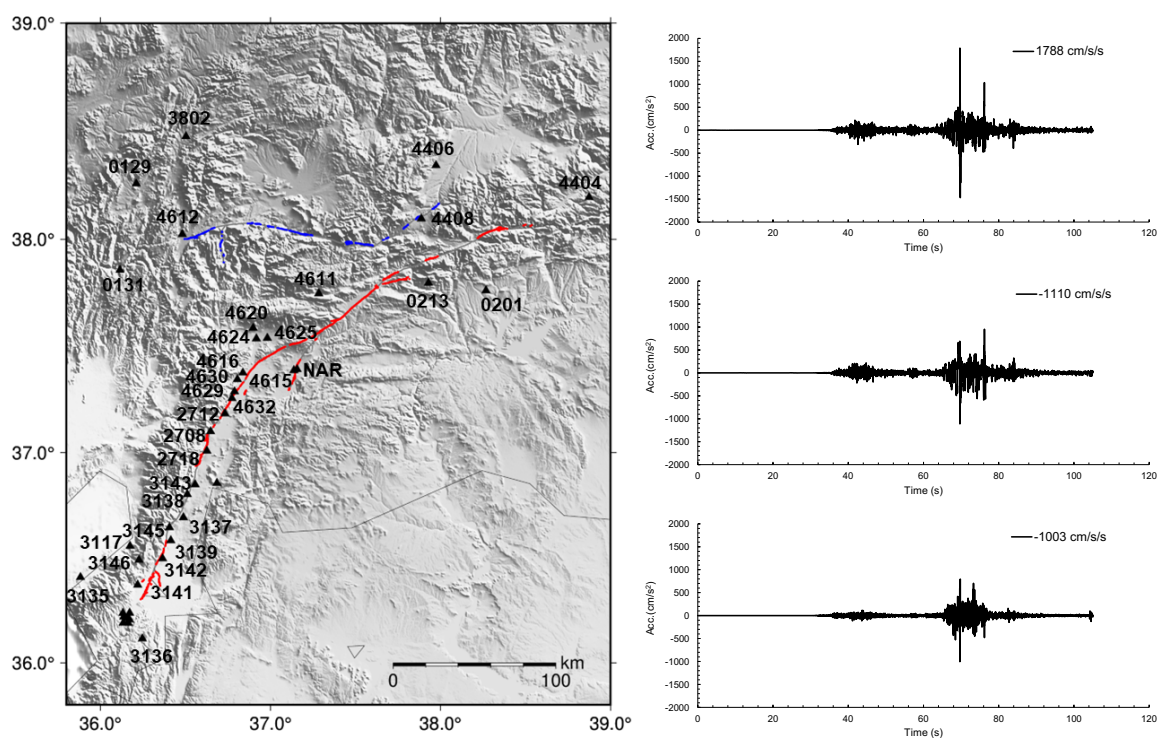


図 14 Kahramanmaras 地震の波形例 (2712 観測点 ; 上から NS、EW、UD 成分)

(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, M_w 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.