

3. 3. 2 地表変形を含む強震動予測の高度化

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 強震動予測のための調査研究：地表変形を含む強震動予測の高度化

(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	主任研究員	岩城 麻子
国立研究開発法人防災科学技術研究所	主任研究員	前田 宜浩

(c) 業務の目的

三浦半島断層群主部／武山断層帯を対象とした強震動予測の高度化に資するため、地表断層の位置形状をできるだけ詳細にモデル化するとともに地震発生層より浅い震源断層におけるすべり、ならびに地震発生が多様性を考慮した当該断層帯で発生する地震の震源断層モデル（シナリオ）群をサブテーマ1～3.1と連携して構築する。構築した震源モデル群とサブテーマ3.1で構築した地盤モデルを用いて面的な広帯域強震動計算を行い、断層近傍における永久変位を含む高精度化された強震動予測結果を平均値だけでなく幅とあわせて提示する。

(d) 3か年の年次実施業務の要約

1) 令和5年度：

強震動計算において地震発生層より浅い震源断層に適用するすべり時間関数の設定に関する最近の知見および情報を収集し整理した。具体的には、震源インバージョン解析、地震発生層より浅い震源断層のすべりを含む強震動計算の事例、すべり時間関数のモデル化に関する文献等を収集し、すべり時間関数の形状、パラメータについて整理した。

2) 令和6年度：

現行の三浦半島断層群（主部／武山断層帯）の地震動予測地図の震源断層モデルより浅部のすべりを考慮した震源断層モデルを設定し、令和5年度の検討結果に基づいてすべり時間関数を設定する。すべり量を同じとした場合でも、すべり時間関数の形状やパラメータを変えた場合に強震動予測結果（変位を含む波形、地震動分布）がどのように変わるか、差分法による周期1秒程度以上を対象とした地震動シミュレーションを行い比較する。また、「屏風山・恵那山断層帯及び猿投山断層帯（恵那山－猿投山北断層帯）における重点的な調査観測」で構築した地表断層の位置形状をできるだけ詳細にモデル化する手法を適用して、現行の地表断層トレースと地震発生層内の矩形震源断層と接続した震源断層モデルを作成し地震動計算を行う。現行の矩形震源断層をそのまま地表まで延長したモデルによる地震動計算結果と比較する。

3) 令和 7 年度 :

サブテーマ 1、2 および 3.1 の成果に基づいて、地表断層の詳細な形状を含む震源断層のモデルを構築する。このとき、活動区間や地中断層形状、アスペリティや破壊開始点位置などの不確かさを考慮して多様な数 10 以上の震源モデル群を構築する。サブテーマ 3.1 で構築した地下構造モデルおよび震源モデルを用いて、ハイブリッド合成法による強震動計算を面的に行う。令和 6 年度の感度解析結果と比較してサブテーマ 1、2 及び 3.1 の成果の強震動予測への効果を示すとともに、当該断層で発生する地震による地震動強さおよび永久変位の平均値分布と不確かさを考慮した幅を示す。

(2) 令和 5 年度の成果

(a) 業務の要約

強震動計算において地震発生層より浅い震源断層に適用するすべり時間関数の設定に関する最近の知見として、震源インバージョン解析 8 件、地震発生層より浅い震源断層のすべりを含む強震動計算の事例 4 件、すべり時間関数のモデル化に関する文献 3 件を収集し、すべり時間関数の形状と設定ならびに必要なパラメータについて整理した。地震発生層内のすべり速度時間関数として用いられている中村・宮武 (2000) による近似式と比べてすべり速度のピークとなる時間が遅い傾向が見られ、smoothed ramp 型関数、規格化 Yoffe 関数などによってモデル化されていることが分かった。

(b) 業務の成果

1) 震源インバージョン解析の事例

主に強震動記録を用いた震源インバージョン解析において、震源断層の地表付近におけるすべりが含まれている事例の 8 文献を収集した。以下に概要をまとめる。

a) 引間 (2012)

2011 年 4 月 11 日福島県浜通りの地震を対象に、マルチタイムウィンドウ法を用いたインバージョン解析を行い、すべり分布やすべり速度時間関数の空間分布を推定している。震源モデルは、井戸沢断層及び湯ノ岳断層に対応する 2 枚の断層面を設定している。インバージョン解析により得られた断層面状のすべり速度時間関数 (図 1) から、破壊開始点付近の深い領域では、タイムウィンドウの先頭から大きなすべり速度に達しているのに対し、浅い領域ではタイムウィンドウの中央或いは後半で最大すべり速度に達しており、形状に違いが見られるとしている。

b) 引間ほか (2015)

2014 年 11 月 22 日に長野県北部で発生した地震を対象に、マルチタイムウィンドウ法を用いたインバージョン解析を行い、すべり分布やすべり速度時間関数を推定している。深部及び浅部のすべり速度時間関数について比較・分析を行っており、深部のすべり速度時間関数は最大速度が大きく立ち上がりも早い、浅部は最大速度が小さく幅広の形状となっている (図 2)。

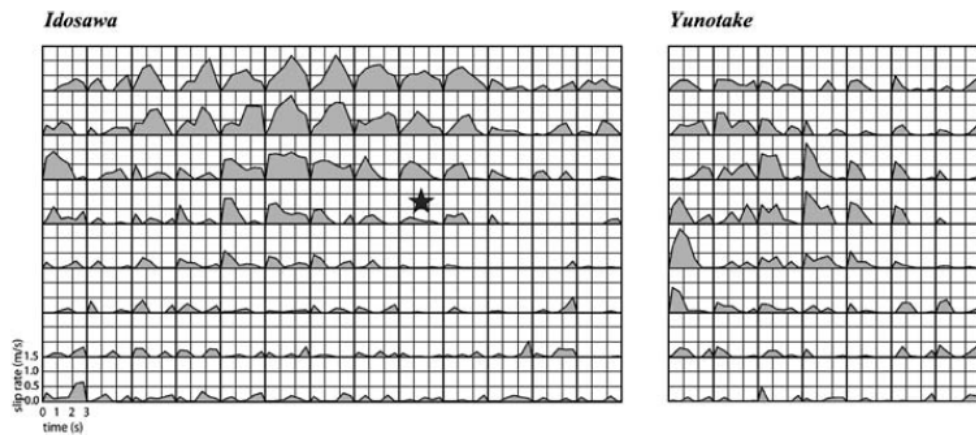


図1 福島県浜通りの地震の断層面上のすべり速度時間関数の分布（引間，2012）。

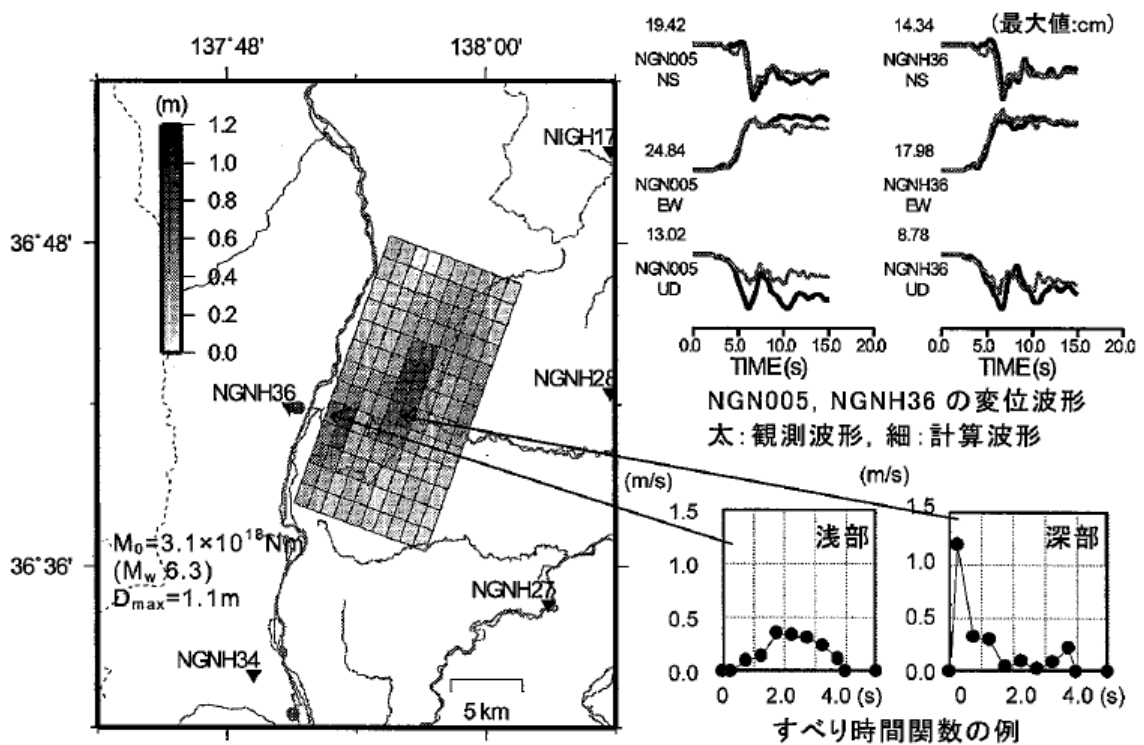


図2 長野県北部の地震の断層面上すべり分布（左）、理論波形と観測波形の比較（右上）およびすべり速度時間関数（右下）（引間ほか，2015）。

c) 引間（2016）

2016年熊本地震の本震と前震を対象に、マルチタイムウィンドウ法を用いたインバージョン解析を行い、すべり分布やすべり速度時間関数を推定している。速度構造モデルは観測点毎に与え、震源域で発生した小地震の観測記録を用いてチューニングを行っている。各要素断層におけるすべり速度時間関数は、1秒の幅を持つ

boxcar 型の関数を 6 個並べて表現している。図 3 に示すようにすべり速度時間関数は浅部において幅広の形状を有しており、深部との関数形状の違いが確認できる。

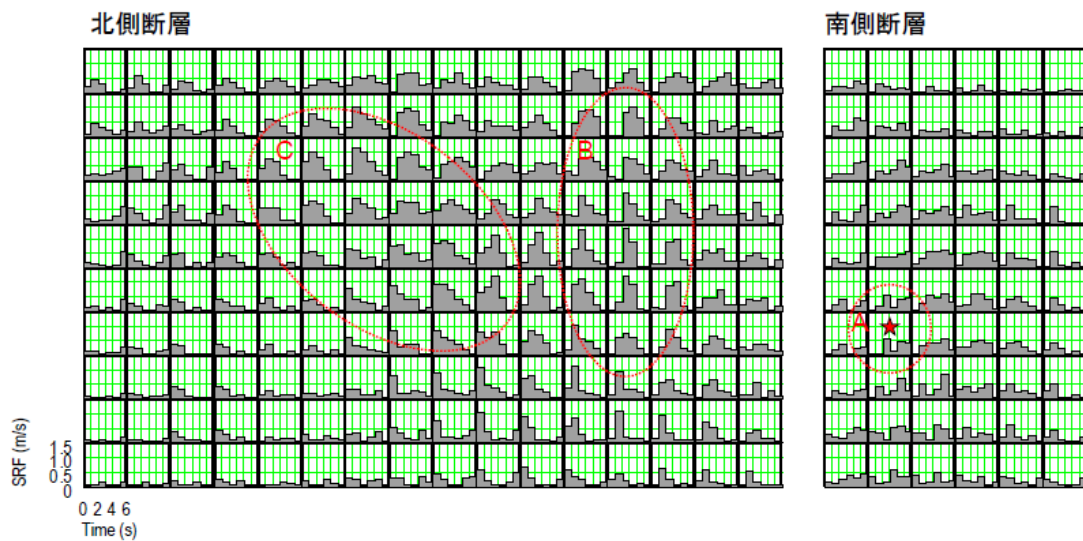


図 3 長野県北部の地震の断層面上すべり分布（左）、理論波形と観測波形の比較（右上）およびすべり速度時間関数（右下）（引間，2016）。

d) Asano and Iwata (2016)

2016 年熊本地震の最大前震と本震を対象に、マルチタイムウィンドウ線形波形インバージョン法を用いて、震源破壊過程を推定しており、すべり分布や破壊過程の分析を主に行っている。本震のモーメントレート関数において浅い部分の継続時間は深い部分よりも長くなっている（図 4 左）。

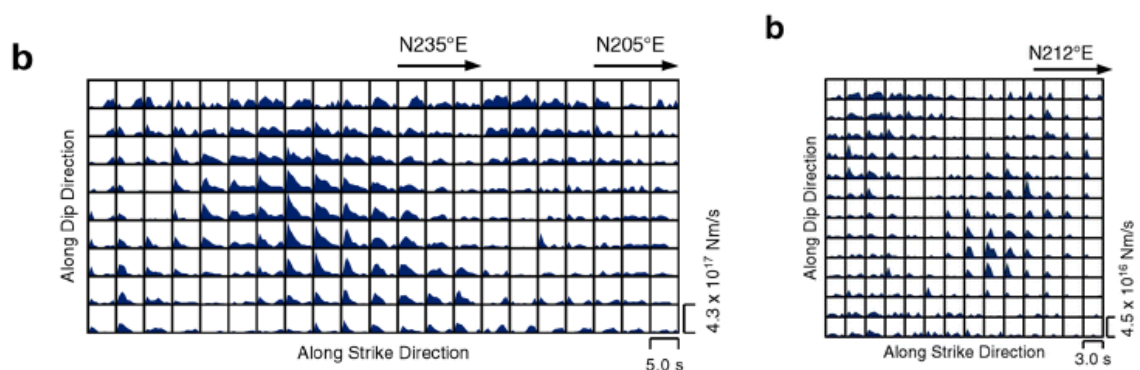


図 4 2016 年熊本地震本震（左）および最大前震（右）の断層面上のモーメントレート時間関数分布（Asano and Iwata, 2016）。

e) Asano and Iwata (2021)

インバージョン解析により 2016 年熊本地震本震の断層破壊過程を求めている。Asano and Iwata (2016) よりも要素断層内の点震源をより密に配置し、地表近くまで断層面をモデル化するなど、計算手法・計算条件を更新して再解析している。イン

バージョン解析により得られたモーメントレート時間関数は、地表付近では継続時間が長く、対称的な形状となっている（図5、図6）。

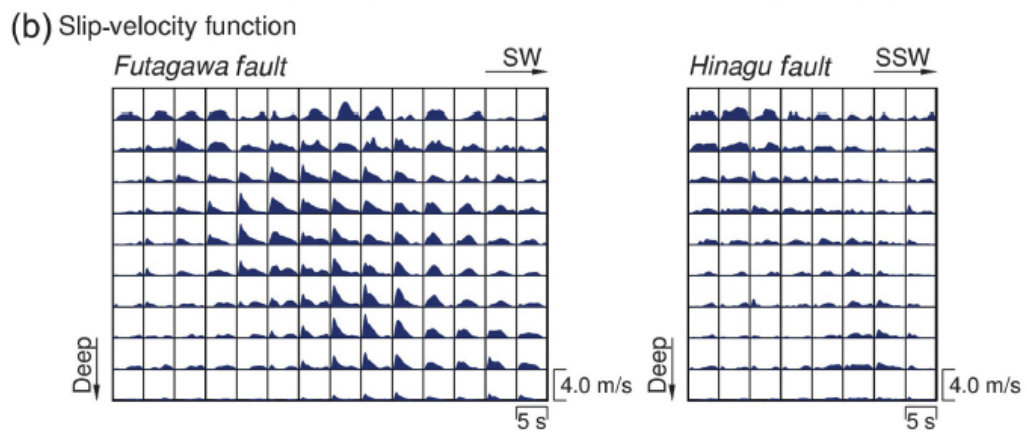


図5 2016年熊本地震本震の断層面上のモーメントレート時間関数分布（Asano and Iwata, 2021）。

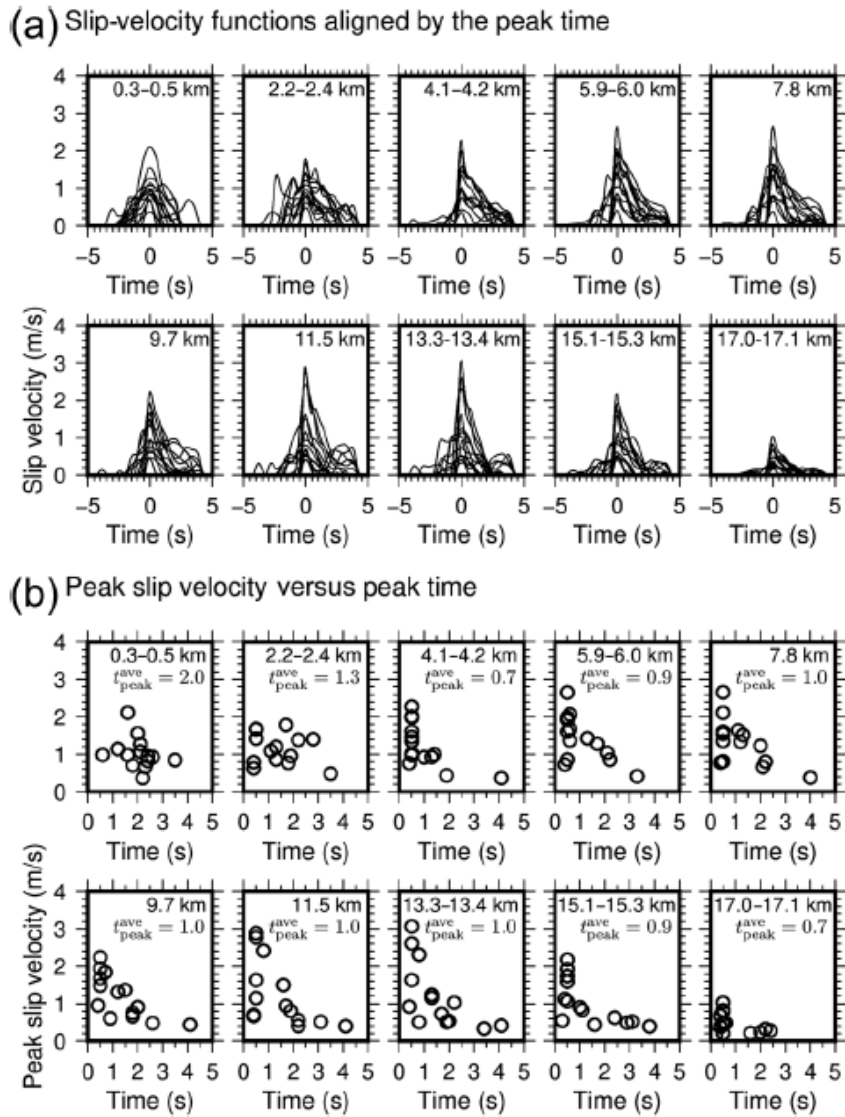


図6 2016年熊本地震本震の深さごとのすべり速度時間関数形状の比較(a)およびすべり速度が最大となる時間の比較(b) (Asano and Iwata, 2021)。

f) Yoshida et al. (2017)

強震観測データから2016年熊本地震本震の震源過程を推定するとともに、震源インバージョンモデルを用いて地殻変動パターンを説明している。地表付近のモーメントレート関数はピークが低くベル型であり継続時間が長い(図7)。

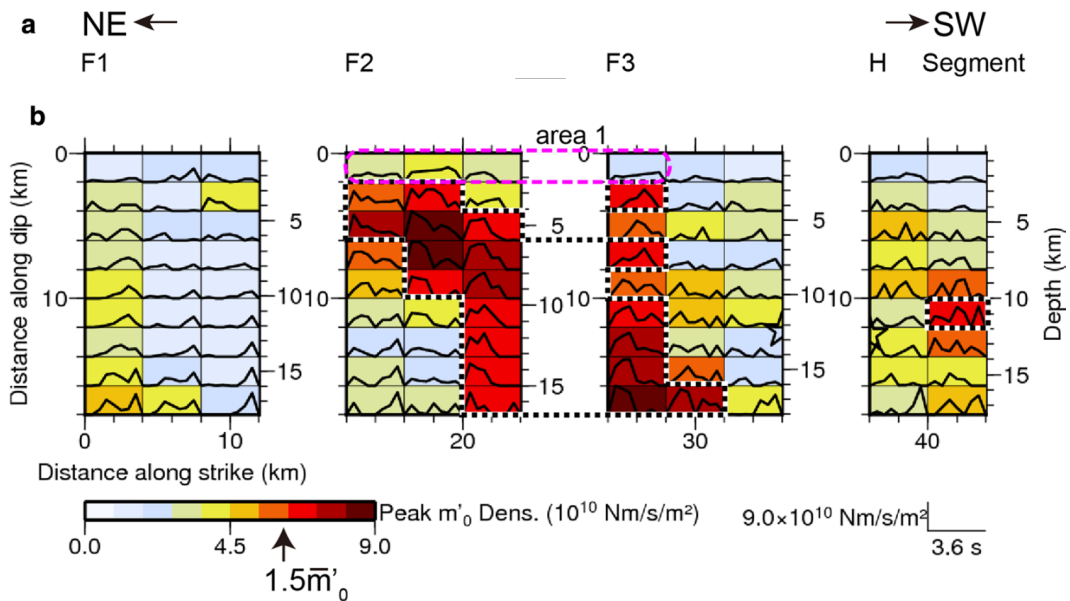


図7 2016年熊本地震本震の断層面上のすべり速度時間関数分布 (Yoshida et al., 2017)。

g) Kobayashi et al. (2017)

2016年熊本地震本震を対象として強震動、遠地地震、測地データのジョイントインバージョンを行った。図8右の太黒線枠内のすべり速度は最大で2 m/s以上、平均で1.8 m/sあり、上向きの破壊指向性、2つの断層面(F1、F2)のほぼ同時すべりとあわせて断層近傍で観測された極端なパルス状の波形が生じたと考えられる。

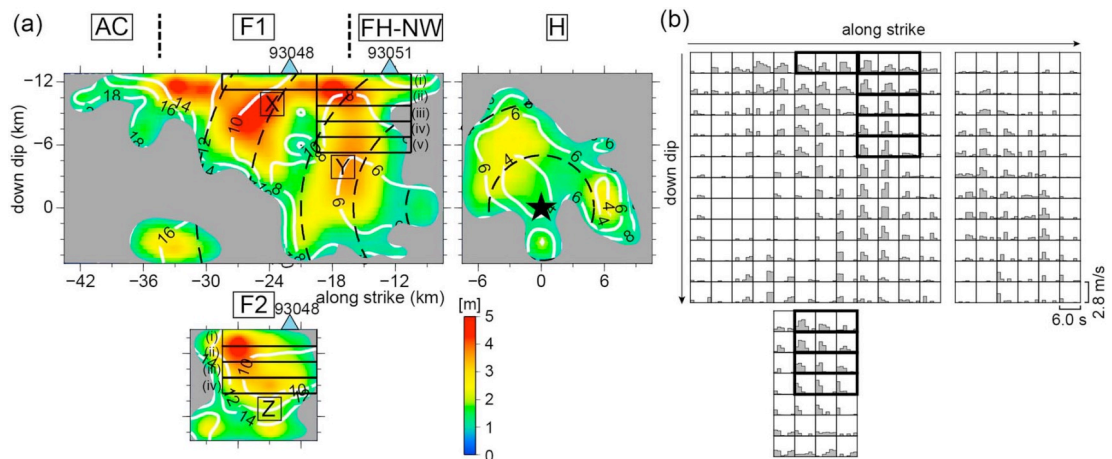


図8 2016年熊本地震本震の断層面上の1 m以上のすべり分布(左)と速度時間関数分布(右) (Kobayashi et al., 2017)。

h) Kubo et al. (2016)

2016年熊本地震本震について、複数の断層面から成る曲面形状の断層モデルを設定し、波形インバージョンにより、震源断層の破壊過程を推定している。要素断層におけるすべり速度時間関数が示されている(図9)が、その形状などについての言及

はない。

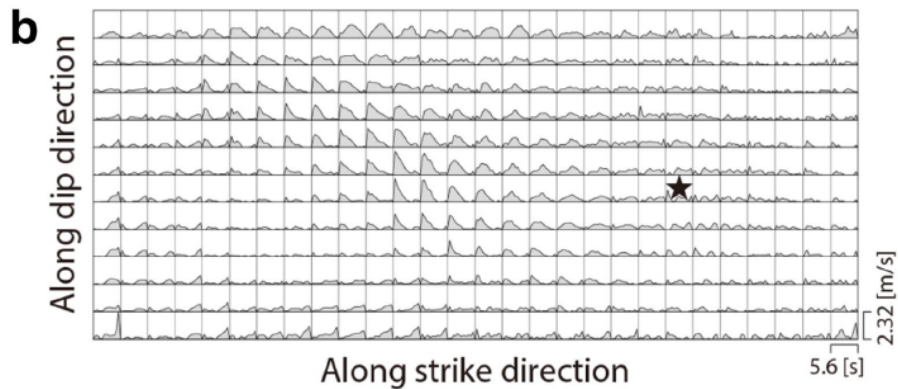


図9 2016年熊本地震本震の断層面上のすべり速度時間関数分布 (Kubo et al., 2016)。

2) 地震発生層より浅い震源断層のすべりを含む強震動シミュレーションの事例

広帯域強震動波形シミュレーションが行われている事例の4文献を収集した。以下に概要をまとめる。

a) 入倉・倉橋 (2017)

2016年熊本地震本震を対象に、強震動生成域 (Strong Motion Generation Area: SMGA) と長周期地震動生成域 (Long-period Motion Generation Area: LMGA) を持つ拡張特性化震源モデルを提案し、シミュレーションを行っている。すべり速度時間関数に Smoothed ramp 型関数を与え、離散化波数法 (Bouchon, 1981) により計算を行っている。断層近傍観測点に見られるフリリング・ステップを有する長周期地震動を再現するために、LMGA が観測記録の再現に必要なだとしている (図 10)。このとき、破壊伝播速度は SMGA、LMGA のいずれも 2.8km/s としているが、ライズタイムは SMGA 1.6 秒に対して LMGA では 2.5 秒と設定されている。

b) Irikura and Kurahashi (2020)

入倉・倉橋 (2017) と同様に、2016年熊本地震本震を対象に SMGA と LMGA を持つ拡張特性化震源モデルを設定し、強震動シミュレーションを行っている。入倉・倉橋 (2017) との最も大きな差異は、地震発生層内のすべり速度時間関数を中村・宮武 (2000) による近似式を与えていることである (図 11)。

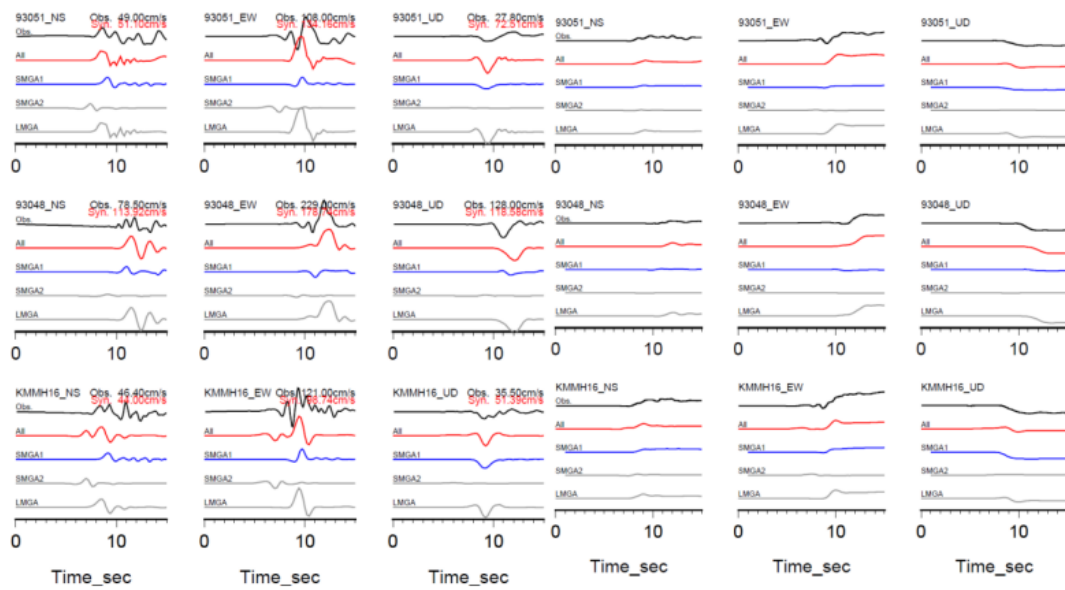


図 10 2016 年熊本地震本震を対象とした強震動シミュレーション結果（入倉・倉橋，2017）。
 黒：観測波形、赤：合成波形、青：SMGA1 による寄与、グレー：SMGS2、LMGA による寄与。

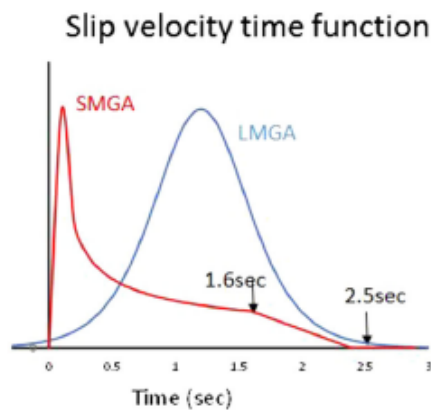


図 11 2016 年熊本地震本震を対象とした強震動シミュレーションで用いられているすべり速度時間関数（Irikura and Kurahashi, 2020）。
 赤：中村・宮武（2000）（SMGA に適用）、青：smoothed ramp 型関数（LMGA に適用）。

c) Ikutama et al. (2018)

深部断層（地震発生層内）に対しては現行の強震動予測レシピ等に基づき設定しつつ、浅部断層に対しては応力降下量がゼロと仮定したモデル化方法を提案している。2016 年熊本地震本震を対象にシミュレーション解析を実施し、検証を行っている。浅部のすべり速度時間関数に関する各パラメータの設定方法は下記の通りである。

■ 浅部大すべり域

- ・すべり量：断層長さより松田（1975）の関係式を用いて設定

- ・最大すべり速度：アスペリティ領域の半分
- ・ライズタイム：すべり量の2倍を最大すべり速度で除して求める

■ 浅部小すべり域

- ・すべり量：大すべり域のすべり量×（背景領域/アスペリティ領域）
- ・最大すべり速度：背景領域の半分
- ・ライズタイム：すべり量の2倍を最大すべり速度で除して求める

2016年熊本地震を対象に設定されたすべり速度関数は図12となっている。

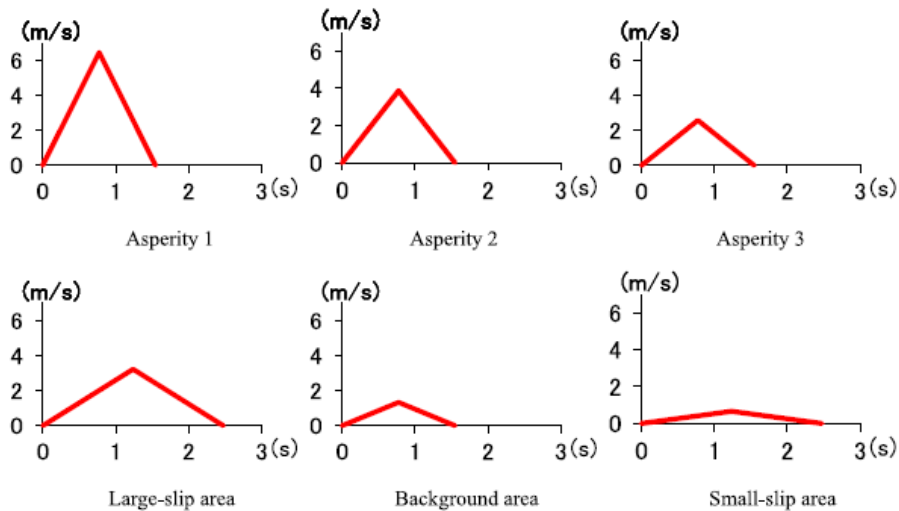


図12 2016年熊本地震本震を対象とした強震動シミュレーションで用いられているすべり速度時間関数 (Ikutama et al., 2018)。

d) 小穴ほか (2019)

2016年熊本地震で観測された断層近傍の永久変位を再現もしくは予測するため、現行の「レシピ」を活かしつつ、断層近傍の強震動と永久変位を再現できるような震源断層および浅部断層のモデルの設定を試みている。すべり速度時間関数は三角形関数を与えている。浅部断層のすべり速度時間関数は、Ikutama et al. (2018) の計算例および香川・他 (2004) の知見に基づき、大すべり域および背景領域それぞれの最大すべり速度を地震発生層内のアスペリティおよび背景領域の最大すべり速度の半分とする。また、浅部断層の各領域のすべり量を最大すべり速度で除してライズタイムを設定している (図13)。

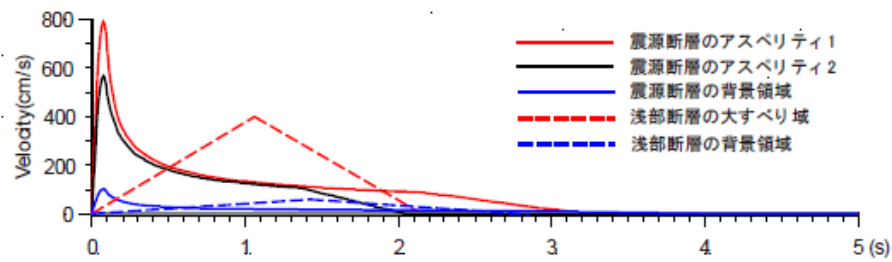


図 13 2016 年熊本地震本震を対象とした強震動シミュレーションで用いられているすべり速度時間関数（小穴ほか、2019）。

3) すべり速度時間関数のモデル化の事例

主に強震動記録を用いた震源インバージョン解析において、震源断層の地表付近におけるすべりが含まれている事例の 8 文献を収集した。以下に概要をまとめる。

a) 田中ほか（2017）

収集した複数の震源インバージョン結果の中から、余震観測記録を用いて観測点毎にグリーン関数をチューニングするなど、精度の高いグリーン関数を用いて導出されたと考えられる結果を分析対象として選択し、地震発生層以浅の平均的なすべり速度時間関数を設定し、その妥当性を検証している。選択された分析対象は、引間（2012）による 2011 年福島県浜通りの地震および引間ほか（2015）による 2014 年長野県北部の地震のインバージョン結果である。地震発生層以浅の平均的なすべり速度時間関数は、Tinti et al.（2005）による規格化 Yoffe 関数を用いて設定しており、すべり量 D 、最大すべり速度の時刻に関連する時間 τ_S 、およびライズタイムに関する時間 τ_R がパラメータとなっている（図 14）。当該文献では、インバージョン結果を踏まえ、 τ_S および τ_R の値は試行錯誤的に $\tau_S=1.2$ 、 $\tau_R=2.8$ としている。

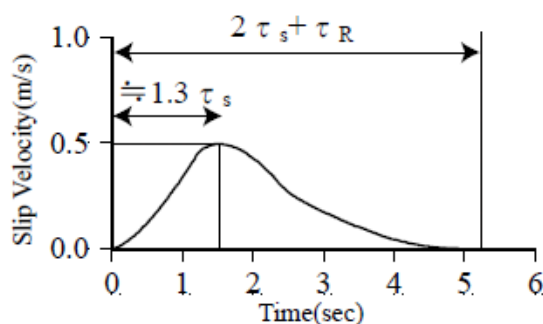


図 14 規格化 Yoffe 関数によるすべり速度時間関数のモデル（田中ほか、2017）。

b) 田中ほか（2018）

1992 年 Landers 地震、1999 年集集地震、2014 年長野県北部の地震、および 2016 年熊本地震のインバージョン結果を分析対象とし、規格化 Yoffe 関数を用いて地震発生層以浅の平均的なすべり速度時間関数をモデル化している。規格化 Yoffe 関数

を用いたすべり速度時間関数は、すべり量 D 、最大すべり速度の時刻に関連する時間 τ_S 、およびライズタイムに関する時間 τ_R がパラメータとなっている。当該文献では、 τ_S - D および τ_R - D の回帰式が提案されている（図 15）。

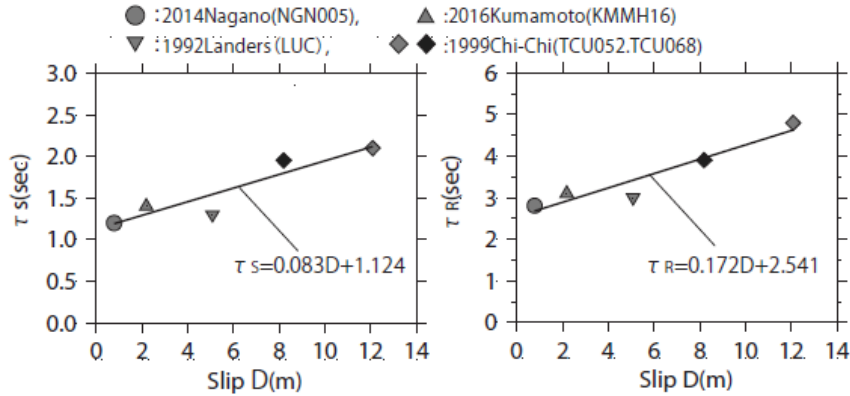


図 15 規格化 Yoffe 関数によるすべり速度時間関数のパラメータとすべり量の関係（田中ほか、2018）。

c) Pitarka et al. (2022)

2019 年 Ridgecrest 地震の断層近傍での地震動解析において、加速度応答スペクトルが周期 0.5~3 秒の範囲で観測記録よりも過大評価となっていた点に着目し、深さ依存性のあるすべり速度時間関数を提案している。簡便なモデルを用いて動力的断層破壊シミュレーションを実施しており、得られた断層面上のすべり量、すべり速度から、その深さ依存性をモデル化するために Liu et al. (2006) によるすべり速度時間関数

$$\dot{s}(t) = \begin{cases} A[0.7 - 0.7 \cos(\pi t/t_0) + 0.6 \sin(0.5\pi t/t_0)] & t < t_0 \\ A[1.0 - 0.8 \cos(\pi t/t_0) + 0.2 \cos(\pi(t-t_0)/(t_d-t_0))] & t_0 \leq t < 2t_0, \\ A[0.2 + 0.2 \cos(\pi(t-t_0)/(t_d-t_0))] & 2t_0 \leq t < t_d \end{cases}$$

を用いている。Liu et al. (2006) では、 $t_0 = 0.13 t_d$ とされている関係を、ここでは $t_0 = \beta t_d$ と一般化し、 β を

$$\beta = \begin{cases} 0.5 & z < 1 \text{ km} \\ 0.13 & z > 3 \text{ km} \end{cases}$$

として深さ 1 km と 3 km の間で線形に遷移するように改良を行っている。設定されるすべり速度時間関数は、深さ 1 km 以浅では最大すべり速度が小さく、スペクトル振幅も深さ 3 km 以深と比べて短周期成分で小さくなる（図 16）。

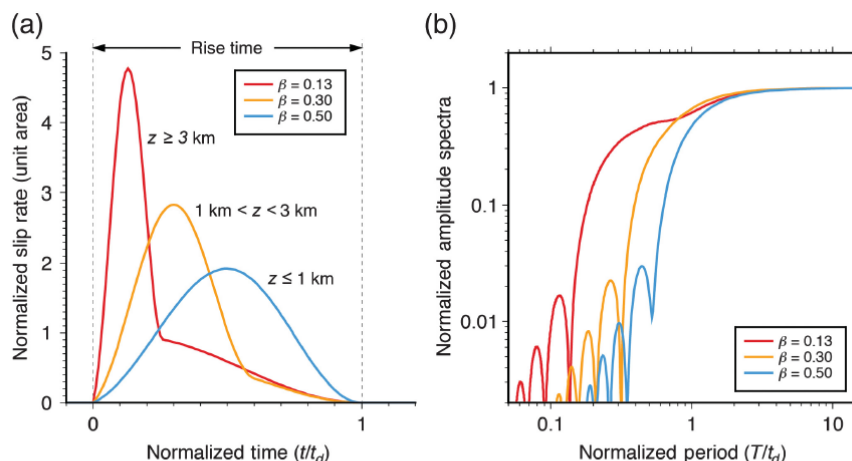


図 16 深さ依存性を考慮したすべり速度時間関数 (Pitarka et al., 2022)。

(c) 結論並びに今後の課題

震源インバージョン解析による震源モデルでは、「浅部（地震発生層より浅い地表付近）」のすべり速度（あるいはモーメントレート）時間関数は、「深部（地震発生層内）」のすべり時間関数よりもピーク時間が遅く、幅が広くなる傾向が多く見られた。

「浅部」のすべりを含む震源モデルによる強震動計算の事例で用いられているすべり速度時間関数は、「深部」は中村・宮武（2000）による近似式が用いられていることがほとんどであるが、「浅部」は smoothed ramp 型関数や三角形関数が用いられている。このとき、すべり量やすべりの継続時間（あるいはライズタイム）などのパラメータは、観測記録とのフィッティングから試行錯誤的に設定されていることが現状では多い。

震源インバージョン解析や動力的なモデルによる断層破壊シミュレーションなどの既往研究結果を踏まえて、「深部」とは形状が異なる「浅部」のすべり速度時間関数のモデルが提案されてきている。一方で、将来発生する地震を対象とする「強震動予測」に用いるためには、Smoothed ramp 型関数を含め、すべり量とすべりの継続時間に関するパラメータを別途に設定することが必要となる。

(d) 引用文献

Asano, K., and T. Iwata, Source rupture processes of the foreshock and mainshock in the 2016 Kumamoto earthquake sequence estimated from the kinematic waveform inversion of strong motion data, Earth Planets Space, 68:147, 2016.

Asano, K., and T. Iwata, Revisiting the Source Rupture Process of the Mainshock of the 2016 Kumamoto Earthquake and Implications for the Generation of Near-Fault Ground Motions and Forward-Directivity Pulse, Bull. Seism. Soc. Am., 111(5), 2426-2440, 2021.

- Bouchon, M., A simple method to calculate Green's function for elastic layered media, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 71(4), 959-971, 1981.
- 引間和人, 2011年4月11日福島県浜通りの地震 ($M_j7.0$) の震源過程—強震波形と再決定震源による2枚の断層面の推定—, *地震* 2, 64, 243-256, 2012.
- 引間和人・中村亮一・植竹富一, 2014年長野県北部の地震 ($M_j6.7$) の震源過程～震源近傍の広帯域地震波形を考慮した解析～, *日本地震学会講演予稿集 2015年度秋季大会*, S15-14, 2015.
- 引間和人, 強震波形を用いた2016年熊本地震の本震・前震の震源過程解析. *日本地震工学会第12回年次大会梗概集*, P4-17, 2016.
- Ikutama, S., T. Kawasato, Y. Kawakami, M. Noshō, A. Oana, K. Dan, H. Torita, and Y. Okada, Source modeling for prediction ground motions and permanent displacements very close to the fault trace, *Journal of Earthquake and Tsunami*, 12(4), 1841005, 2018.
- 入倉孝次郎・倉橋奨, 震源断層近傍の長周期地震動評価のための特性化震源モデルの拡張—2016年熊本地震 ($M_w 7.0$) の断層近傍地震動による検証—, *日本地震工学会大会 2017*, 2017.
- Irikura, K., S. Kurahashi, and Y. Matsumoto, Extension of Characterized Source Model for Long-Period Ground Motions in Near-Fault Area, *Pure and Applied Geophysics*, 177, 2021-2047, 2020.
- Kobayashi, H., K. Koketsu and H. Miyake, Rupture process of the 2016 Kumamoto earthquake sequence: Causes for extreme ground motions, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 6002-6010, 2017.
- Kubo, H., W. Suzuki, S. Aoi and H. Sekiguchi, Source rupture processes of the 2016 Kumamoto, Japan, earthquakes estimated from strong-motion waveforms, *Earth, Planets and Space*, 68:161, 2016.
- Liu, P., R. J. Archuleta, and S. H. Hartzell, Prediction of broad band ground-motion time histories: Hybrid low/high-frequency method with correlated random source parameters, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 96 (6), 2118-2130, 2008.
- 松田時彦, 活断層から発生する地震の規模と周期について, *地震* 2, 28, 269-283, 1975.
- 中村洋光・宮武隆, 断層近傍強震動シミュレーションのための滑り速度時間関数の近似式, *地震* 2, 53, 1-9, 2000.
- 田中信也・引間和人・久田嘉章, 震源インバージョンに基づく地震発生層以浅におけるすべり速度時間関数の評価, *日本地震工学会論文集*, 17(5), 1-15, 2017.
- 田中信也・金田惇平・引間和人・久田嘉章, 地表地震断層近傍における永久変位を含む長周期成分の地震動評価のための震源モデルの設定方法, *日本建築学会構造系論文集*, 752, 1525-1535, 2018.

- 小穴温子・壇一男・宮腰淳一・藤原広行・森川信之, 2016 年熊本地震を対象とした震源断層近傍における強震動評価手法に関する検討, 日本地震工学会論文集, 19(6), 76-91, 2019.
- Pitarka, A., R. Graves, K. Irikura, K. Miyakoshi, C. Wu, H. Kawase, A. Rodgers and D. McCallen, Refinements to the Graves-Pitarka Kinematic Rupture Generator, Including a Dynamically Consistent Slip-Rate Function, Applied to the 2019 Mw 7.1 Ridgecrest Earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., 112(1), 287-306, 2022.
- Tinti, E., E. Fukuyama, A. Piatanesi and M. Cocco, A Kinematic Source-Time Function Compatible with Earthquake Dynamics, Bull. Seism. Soc. Am., 95(4), 1211-1223, 2005.
- Yoshida, K., K. Miyakoshi, K. Somei and K. Irikura, Source process of the 2016 Kumamoto earthquake (Mj7.3) inferred from kinematic inversion of strong-motion records, Earth, Planets and Space, 69:64, 2017.