

5.1.2 2013 年淡路島付近の地震

① はじめに ―研究の目的と対象地震の概要―

強震動予測レシピにおいて、高精度な予測強震動を得るためには、実際に発生した地震の震源像を詳細に把握し、その知見を特性化震源モデルの構築に活かしていくことが重要である。現在広く用いられている特性化震源モデルの概念は、運動学的震源モデルの上に立脚しているが、断層破壊現象は本質的には動力学で表現される。近年、動的破壊過程に基づいた強震動シミュレーションに関する研究も発展を遂げており（例えば、Guatteri *et al.*, 2004）、震源での動力学パラメータをモデル化することは、強震動予測の高精度化、或いは特性化震源モデルの高度化において期待されることの1つであると考えられる。本研究は、動力学パラメータの知見を特性化震源モデルに組み込むことを目的とし、2013 年 4 月 13 日 5 時 33 分（日本時間）に淡路島付近で発生した M_w 5.8 の内陸地殻内地震（以下、2013 年淡路島付近の地震）の運動学的震源モデルから、断層面上での応力変化を推定し、アスペリティや背景領域での動力学パラメータの特徴を調べた。

2013 年淡路島付近の地震は、東北東－西南西方向に圧縮軸を持つ M_{JMA} 6.3 の逆断層型の地震で、気象庁一元化震源カタログの情報によると、1995 年兵庫県南部地震の震源断層の南西端付近の深さ 14.85 km に震源が推定されている（気象庁, 2013）。図 5.1.2-1 に示すように、本震に伴う余震の拡がり、北北西－南南東に走向をもつ西傾斜の分布を示している（気象庁, 2013）。国立研究開発法人防災科学技術研究所（以下、防災科学技術研究所）の広帯域地震観測網 F-net が公開している Centroid Moment Tensor (CMT) 解（福山・他, 1998）によると、地震モーメントは、 5.47×10^{17} Nm（モーメントマグニチュード M_w 5.8）であった。このように、地震規模は比較的小さい地震でありながら、観測された地震動は、兵庫県淡路市郡家（HYGP85）で最大震度 6 弱（図 5.1.2-2）、最大加速度 712 cm/s^2 （3 成分最大値）であった（気象庁, 2013）他、特に、震源近傍の強震観測点において、大きな加速度、速度記録が観測された（図 5.1.2-3、図 5.1.2-4）。例えば、淡路市志筑（HYGP82）においては、周期 1 秒付近で、震源を特定せず策定する地震動レベル（加藤・他, 2004）を超える地震動となった（図 5.1.2-5）。

染井・他 (2015) は、2013 年淡路島付近の地震において震源近傍で観測された強震動の生成メカニズムの解明や地震動記録を広帯域に再現し得る震源モデルの構築を目指し、近地強震波形（0.1-1.0 Hz）インバージョンによる運動学的震源モデルの推定、及び経験的グリーン関数法（Irikura, 1986）に基づく強震動生成領域（Strong Motion Generation Area; SMGA: Miyake *et al.*, 2003）の推定を行っている。震源近傍の 11 地点の強震観測点を対象とした震源インバージョンの結果は図 5.1.2-6 の通りであり、要点としては、1）すべりの大きな領域は、破壊開始点と、破壊開始点より南側浅部に拡がった。2）アスペリティ領域の破壊は破壊開始 0.6 秒後から始まり、1.8 秒後には終了した。3）震源近傍観測点の速度波形

(0.1-1.0 Hz) は, この震源インバージョンモデルによって概ね再現が可能である. 4) HYG025 の観測波形は, 震源破壊過程によって生じるフォワードディレクティビティ効果によって生成された可能性がある. といった事が明らかとなった. 本報では, 動力学パラメータを推定するための運動学的震源モデルとしてこの染井・他 (2015)の震源インバージョンモデルを参考にすることとする.

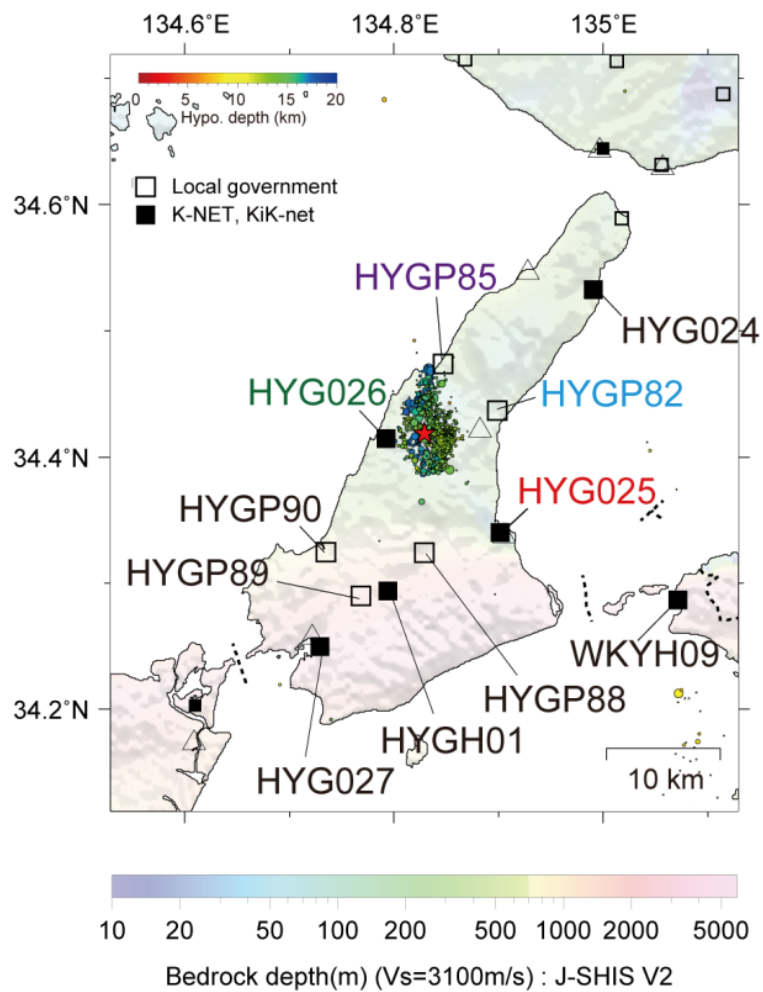


図 5.1.2-1 本震後 1 ヶ月間に震源周辺で発生した余震の空間分布と、解析に使用した強震観測点の分布。赤色星印は本震の震央位置。

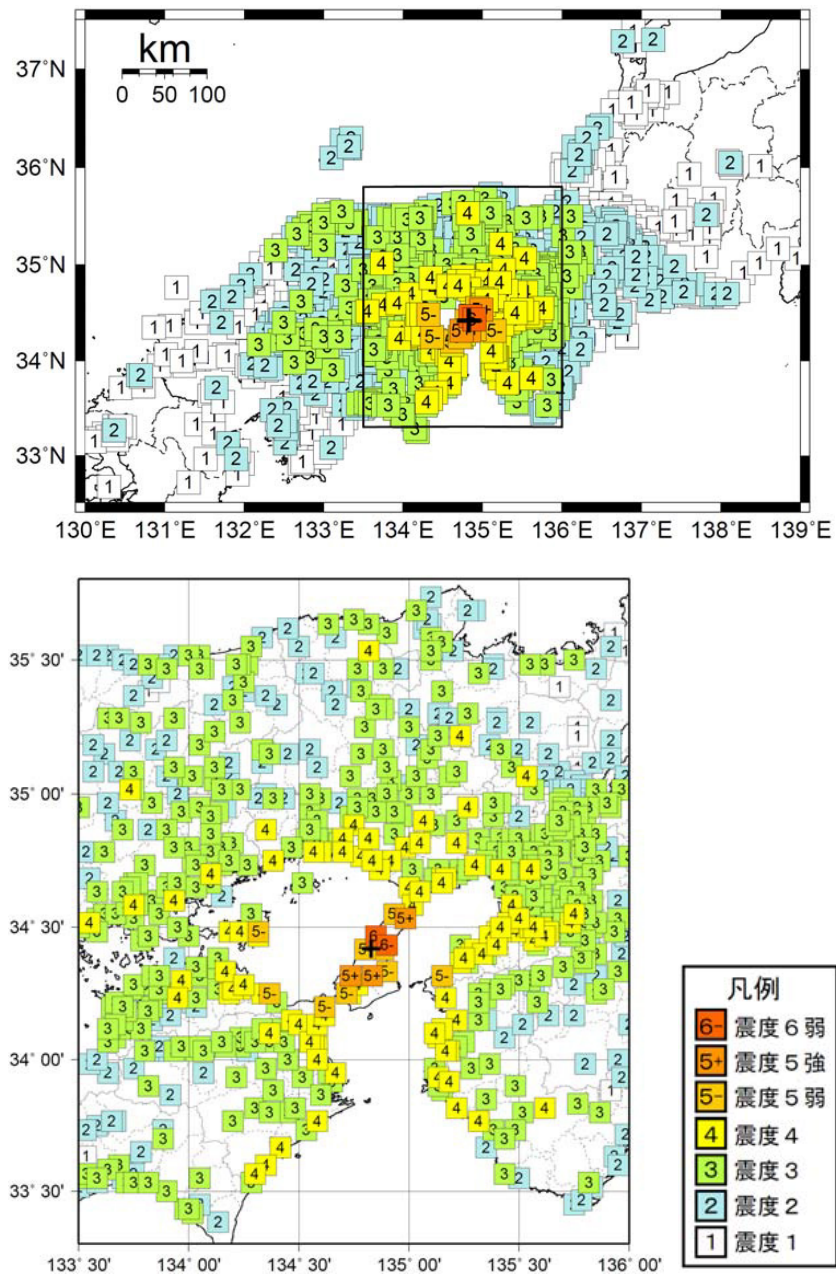


図 5.1.2-2 気象庁 (2013)による震度階分布図

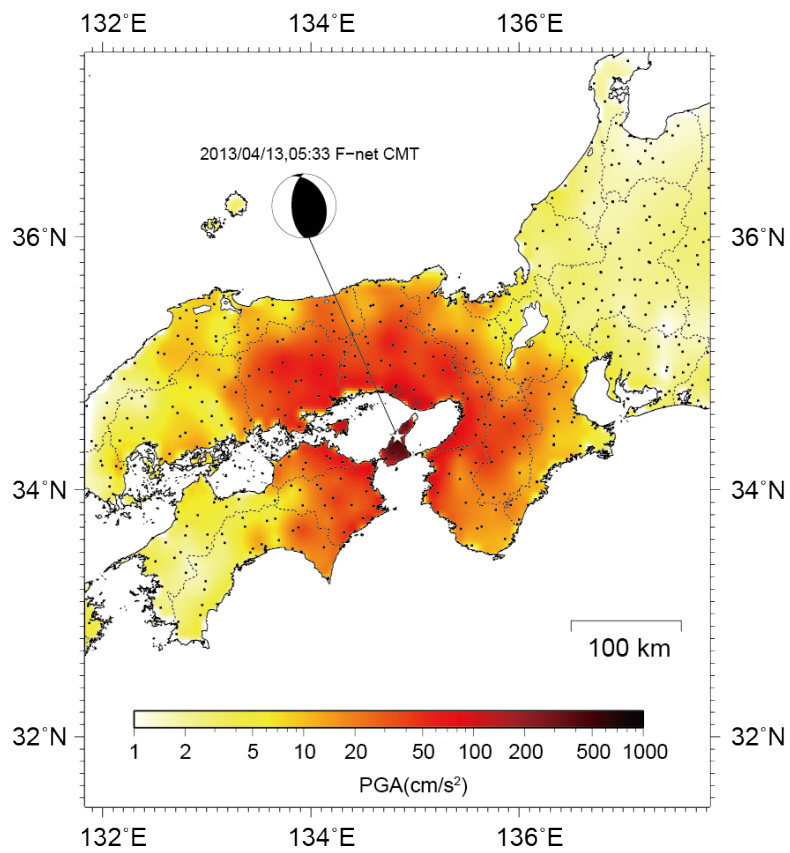


図 5.1.2-3 最大加速度分布. 星印は本震震央位置と F-net の CMT 解.

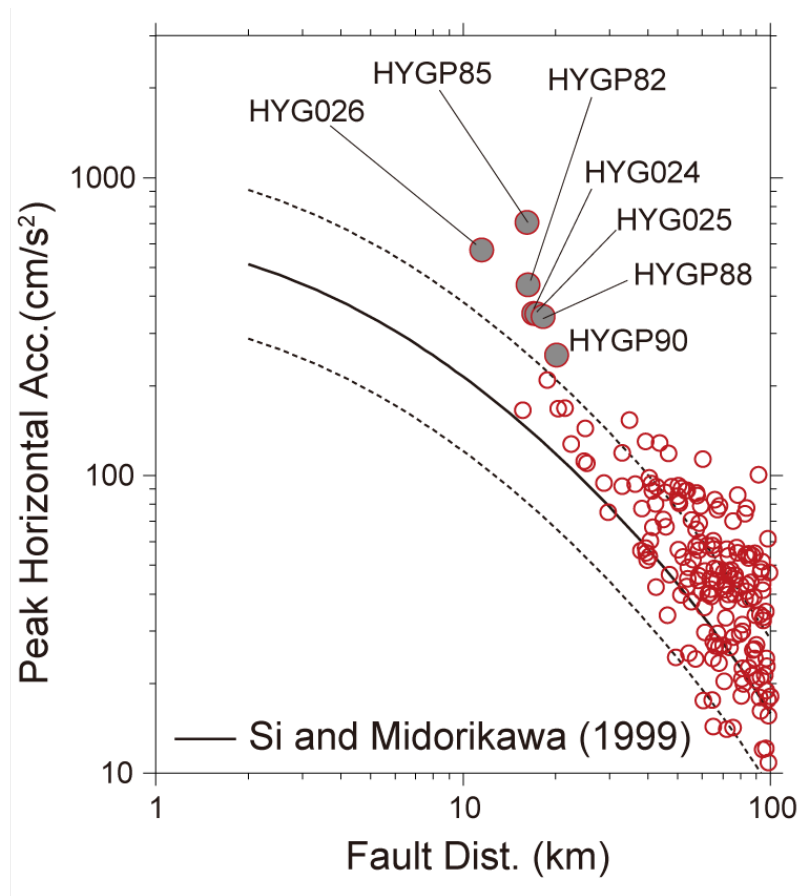


図 5.1.2-4 水平最大加速度と断層最短距離の関係. 黒色実線は, 司・翠川 (1999)の距離減衰式. 黒色破線は, 距離減衰式の $\pm 1\sigma$ の標準偏差.

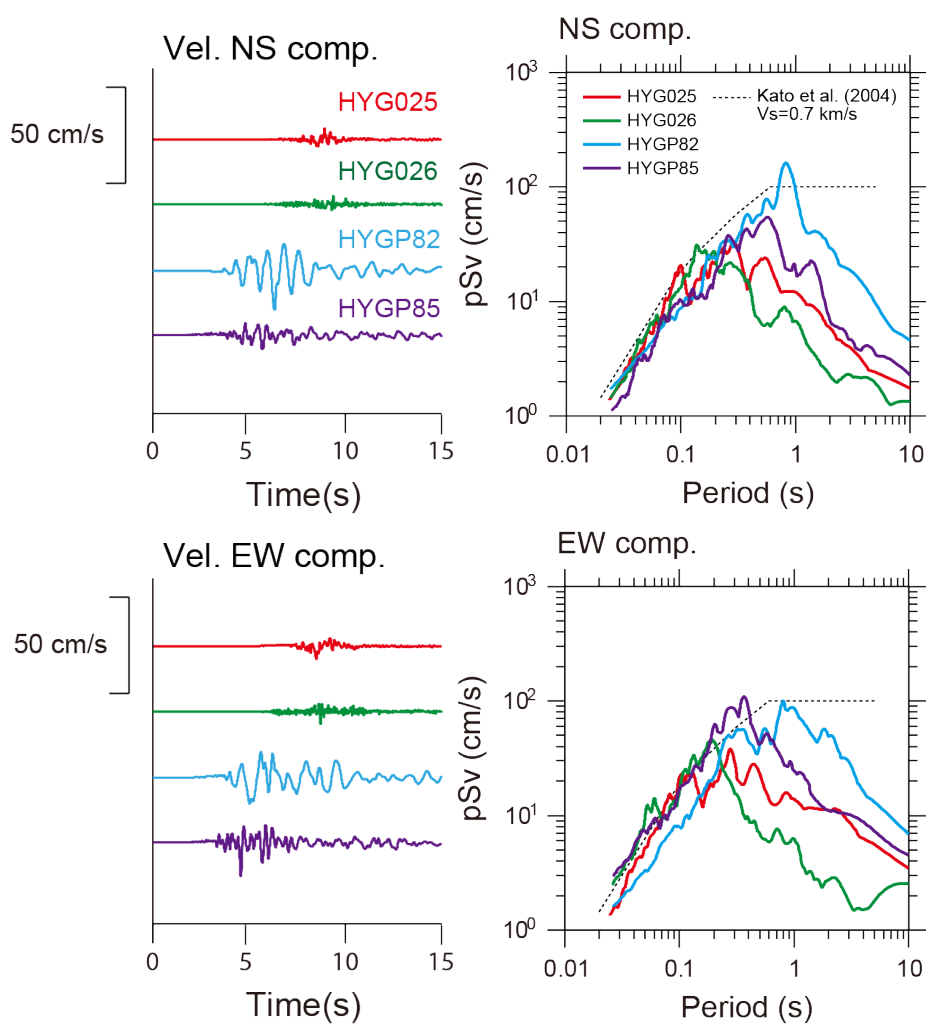


図 5.1.2-5 震源近傍の 4 観測点 (HYG025, HYG026, HYP82, HYP85) の左) 観測速度波形と右) 擬似速度応答スペクトル (減衰定数 5%)。破線は、加藤・他 (2004)による水平動の特定せず策定する地震動レベル (対象地盤の S 波速度 0.7 km/s 相当)。

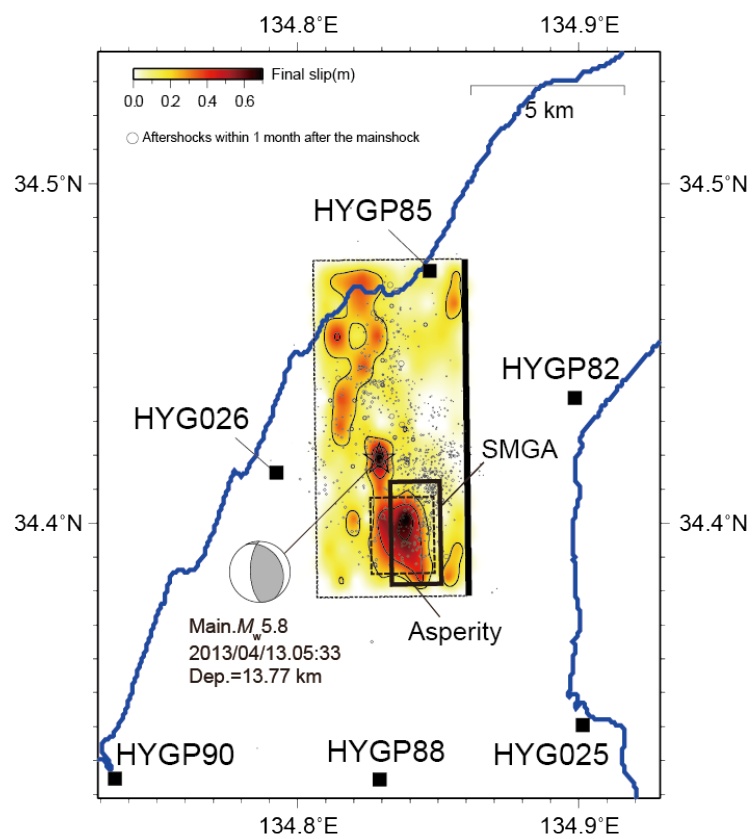


図 5.1.2-6 染井・他 (2015) によって推定された不均質すべり分布と SMGA 領域.

② 運動学的震源モデルの設定

本報では、前述したように染井・他 (2015)の震源インバージョンモデルを基にした解析を行う。このモデルは、近地強震波形 (0.1-1.0 Hz) を対象として、マルチタイムウィンドウ線形波形インバージョン手法 (Hartzell and Heaton, 1983) によって、断層面上のモーメント解放、或いはすべりの時空間発展の様子が推定されている。仮定している断層面は、断層走向角 N179°E、傾斜角 65°で、断層長さ 11 km、断層幅 11 km の 1 枚面とし、一辺が 1.0 km の正方形小断層によって 121 個の小断層に分割されている。各タイムウィンドウのすべり時間関数は、ライズタイム 0.4 秒の平滑化傾斜 (smoothed ramp) 関数で表現され、4 つのタイムウィンドウを 0.2 秒間隔で仮定することで、各小断層に 1.0 秒間の震源継続時間を許容した。また、第一タイムウィンドウの破壊伝播速度 (First Time Window Triggering Velocity: FTWTV) は、2600 m/s とした。インバージョンに使用するグリーン関数は、各観測点の 1 次元速度構造モデルから計算され、一部の観測点は、微動アレイ観測に基づくモデルのチューニングが行われ (染井・他, 2015)、全観測点の速度構造モデルの妥当性は、小地震を用いた地震動シミュレーションによって、確認がなされている。

使用する運動学的震源モデルの断層面上での最終すべり分布を図 5.1.2-7 に、地表投影したものを図 5.1.2-6 に、それぞれ示す。また、破壊の時空間発展の様子を表す断層面上のすべり量のスナップショットを図 5.1.2-8 に示す。断層面全体から解放された地震モーメントは 6.29×10^{17} Nm (M_w 5.8) であった。大きなすべりを生じた領域は破壊開始点よりも南側浅部に広がっており、主に南側浅部に向かって主要な破壊が進展したことがわかる。図 5.1.2-9 は、各小断層でのモーメントレート関数を示している。すべりの大きな領域、すなわち、Somerville *et al.* (1999)の基準によって特性化されたアスペリティ領域では、モーメントレート関数は、いわゆる Kostrov 型 (Kostrov, 1964) の形状を呈しており、断層面端部の一部を除き、大部分の小断層において、第一タイムウィンドウでピークモーメントレートを持つことがわかる。

後述するように、本報での動力学パラメータは、運動学的震源モデルを境界条件として、断層面上での応力時間変化を、運動方程式を解くことによって推定する。宮腰・他 (2005) は、運動学的震源モデルを境界条件として応力変化を推定する場合、モデルに対して適切な空間補間が必要であることを示している。染井・他 (2015)のオリジナル震源モデルは、 1.0×1.0 km の空間的なグリッドサイズである。本報では、さらにグリッドサイズの小さい、仔細な震源モデルを境界条件として使用するために、オリジナル震源モデルの 4 分の 1 となる 250×250 m のグリッドサイズに空間補間した震源モデル (以下、補間震源モデル) を作成した (図 5.1.2-10)。この際、オリジナル震源モデルの各小断層について、タイムウィンドウごとに、隣り合う小断層との間を双一次補間法によって補間した。補間したモデルは、オリジナルの震源モデルの地震モーメントを保存し、第一タイムウィンドウの破壊伝播速度もオリジナル震源モデルの 2400 m/s によって計算し、補間後の各小断層での破壊伝

播時間の遅れは考慮している．また，同一タイムウィンドウで，断層面端部（外縁部）の地震モーメントはゼロとして，断層面の外側では，すべり量が滑らかにゼロとなるように設定した．

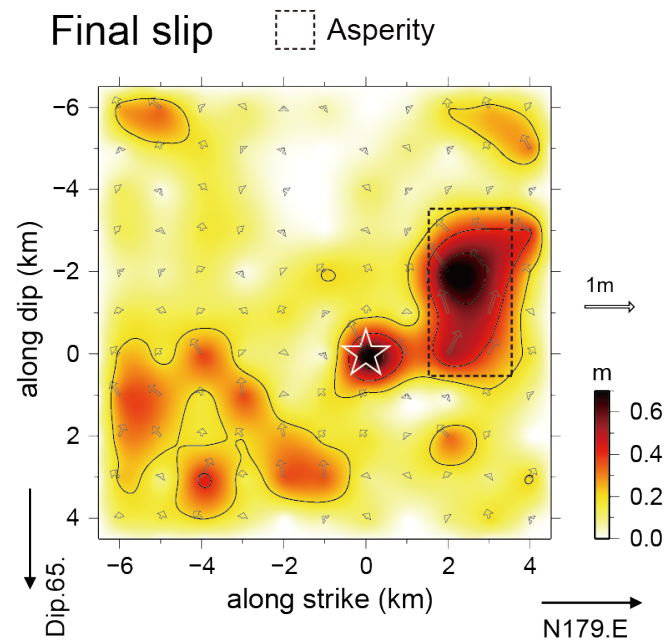


図5.1.2-7 断層面上での最終すべり量分布. 矢印は断層面上盤のすべり方向とすべり量を表している. コンターはすべり量を0.2 m間隔で示したもので, 星印は破壊開始点を示す. なお, 破線矩形領域は, Somerville *et al.* (1999)の基準で抽出されたアスペリティ領域である.

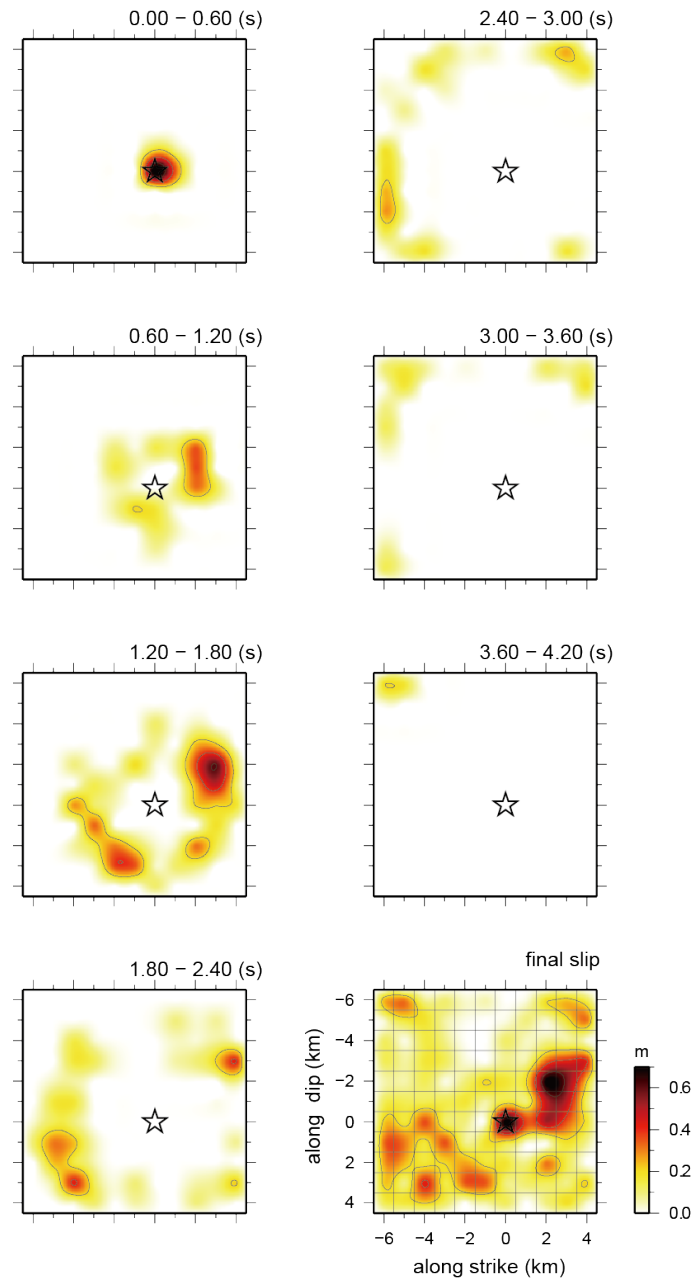


図5.1.2-8 破壊のスナップショット（時間間隔0.6秒のすべりの時空間発展の様子）。星印は破壊開始点を表す。

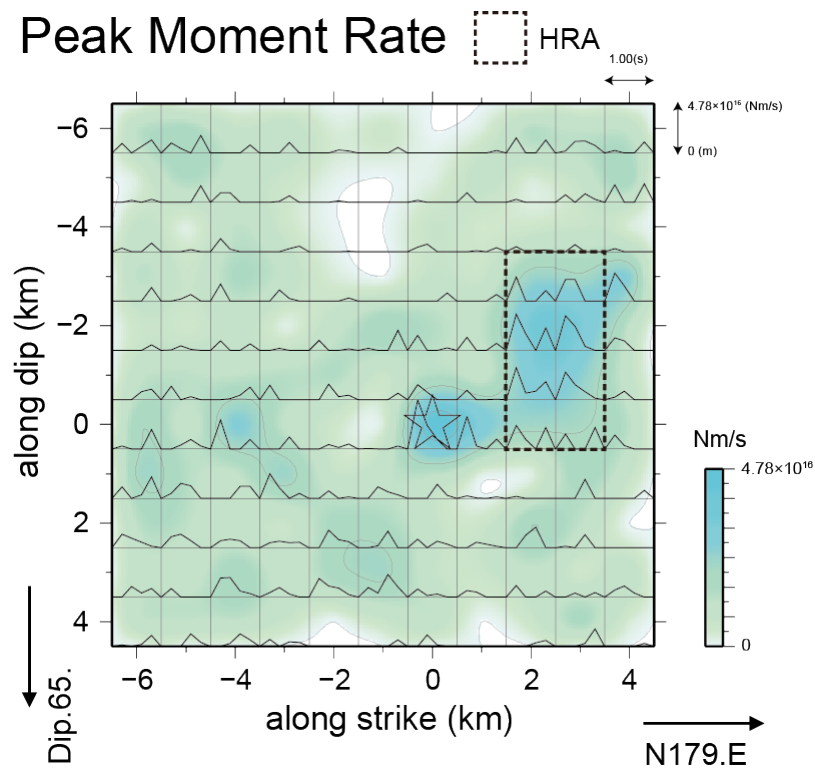


図5.1.2-9 ピークモーメントレートの分布と各小断層でのモーメントレート関数. 星印は破壊開始点, 破線矩形領域は, 吉田・宮腰 (2013) の基準によって抽出されたHRA (High peak-moment Rate Area) 領域を表す.

Final Slip

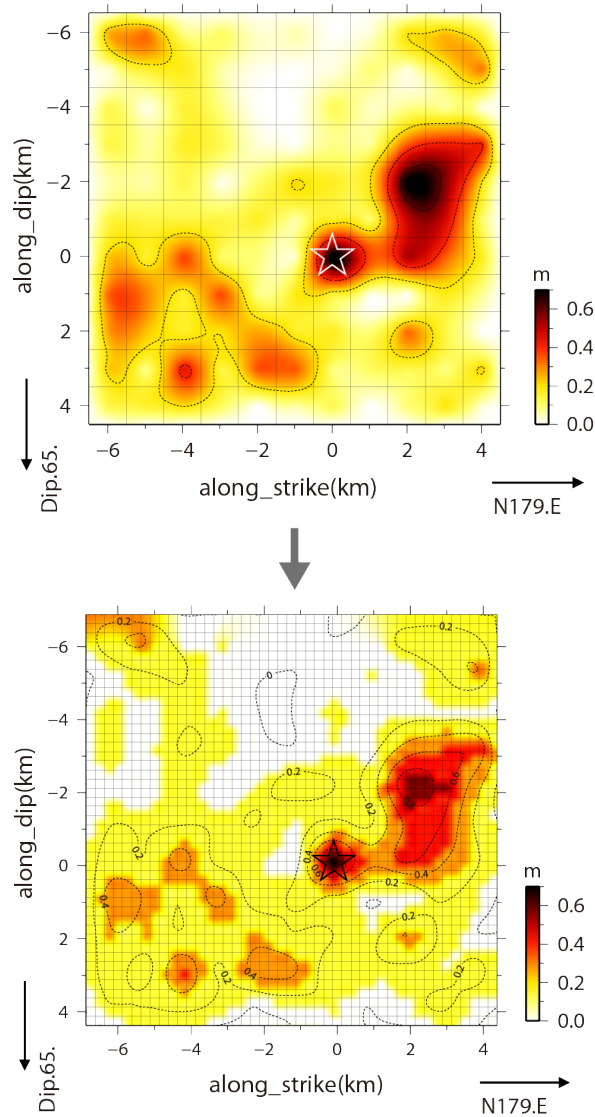


図5.1.2-10 補間前 (オリジナル) と補間後の最終すべり量分布. 星印は破壊開始点を表す.
上) 染井・他 (2015) のオリジナル震源モデル (グリッドサイズ1×1 km) . 下) 動力学パラメータ推定のために双一次補間によって作成した震源モデル (グリッドサイズ250×250 m) .

③ 応力時間変化の推定手法

断層面上での応力の時間変化は、②で作成した補間震源モデルの各小断層でのモーメント時間関数を境界条件として、運動方程式を3次元有限差分法 (Pitarka, 1999) で解くことで推定した (例えば, Graves, 1996, Ide and Takeo, 1997). この手法は、断層破壊による応力とすべり量の関係は線形であり、一方が時空間において完全に記述されていれば、他方は一意に求まることを利用したものである。応力の時空間関数とすべりの時空間関数が得られると、図 5.1.2-11 に示すように、応力-時間の関係や、応力-すべりの関係 (摩擦構成則) を評価することが可能となる。これらの関係に対して、例えば、すべり弱化則 (Ida, 1972) を仮定することで、動的応力降下量や破壊強度といった震源断層破壊における動力学パラメータを抽出することができる。

有限差分法の空間的な格子間隔は、補間震源モデルのグリッド間隔に対応するように、各座標軸方向に対して個別に設定した。ここで座標軸は、 x 軸方向を断層走向方向、 y 軸を断層直交方向、 z 軸を深さ方向とした。時間方向には、破壊開始から断層面全体の破壊が終了するまでの時間を考慮して全体で 4 秒間を 0.002 秒間隔で計算した。なお、本地震の震源域に設定する 1 次元速度構造モデルは、本震震央位置での防災科学技術研究所地震ハザードステーション (J-SHIS) の全国深部地盤モデル V2 (藤原・他, 2012) と福山・他 (1998) による地殻構造をコンパイルしたものを構築する (図 5.1.2-12)。

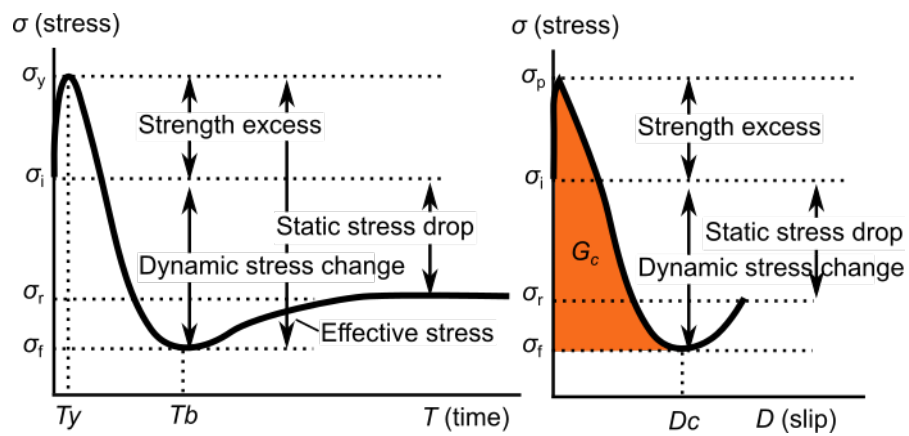


図 5.1.2-11 左) 応力と時間の関係, 右) 応力とすべり (摩擦構成則) の関係.

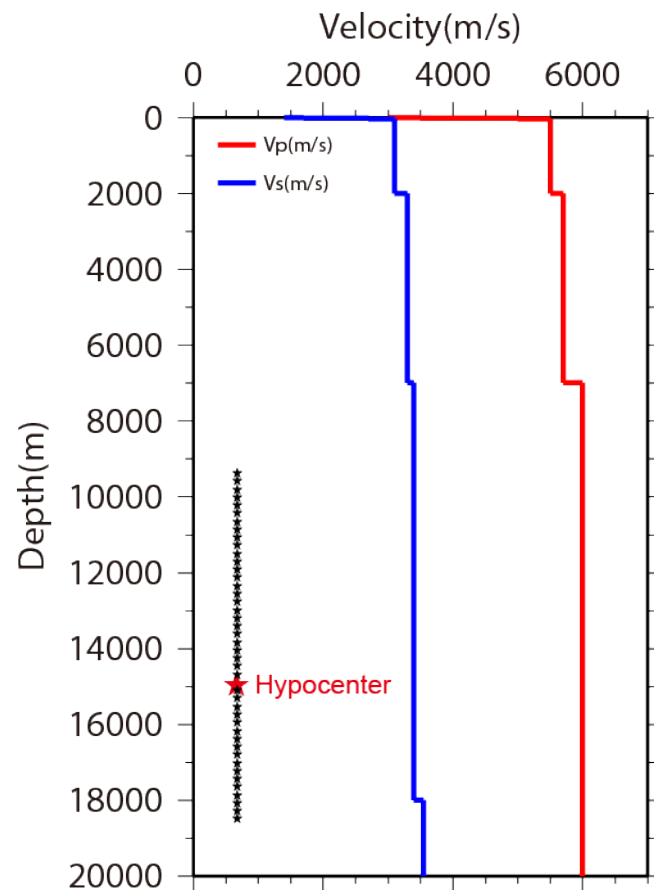


図 5.1.2-12 震源域で設定した速度構造モデル．赤色と青色は、それぞれ P 波と S 波速度を表す．黒色星印は、設定断層面の要素断層の中心点深さを表し、赤色星印は、震源深さを表す．

④ 推定された応力時空間変化

断層面上でのすべり量，すべり速度，計算された応力変化（応力降下量），応力変化速度（応力降下量レート）の時空間発展の様子を図 5.1.2-13 に示す．破壊フロントでの応力変化に注目すると，応力降下量，或いは応力降下量レートが負の値が広がっていく様子がわかる．これは応力が集中していることを表している．破壊フロントが過ぎた後は，断層面上の各所で振る舞いが異なるが，アスペリティ領域においては，概ね応力降下量，或いは応力降下量レートは正の値をとり，最終的には（静的に）応力降下を生じていることがわかる．また，各物理量の大きさに注目すると，すべりやすべり速度の大きなアスペリティ領域では，応力降下量，或いは応力降下量レートは大きいことがわかる．

図 5.1.2-14 に，幾つかの小断層における時間－応力の関係を示す．また，図 5.1.2-15 には，すべり－応力の関係（摩擦構成則）を示す．ここでは断層面上の特徴的な例とし，破壊開始点付近（ポイント A），アスペリティ領域内部（ポイント B），アスペリティ領域端部外側（ポイント C），背景領域（ポイント D）の 4 ヶ所の応力，時間，すべりの関係を示している．これらを相互に比較すると，すべり量の大きな破壊開始点，或いはアスペリティ内部のポイント A や B では応力が微かに上昇した後に，短時間で応力降下を生じ，その後，緩やかに静的応力降下量のレベルまで応力が上昇（回復）していく．これは典型的なすべり弱化則の様子を表している．一方で，アスペリティ外側のポイント C は，応力が上昇し続けた後に，微かに応力降下を生じるが，静的な変化としては応力上昇（応力集中）となっている．

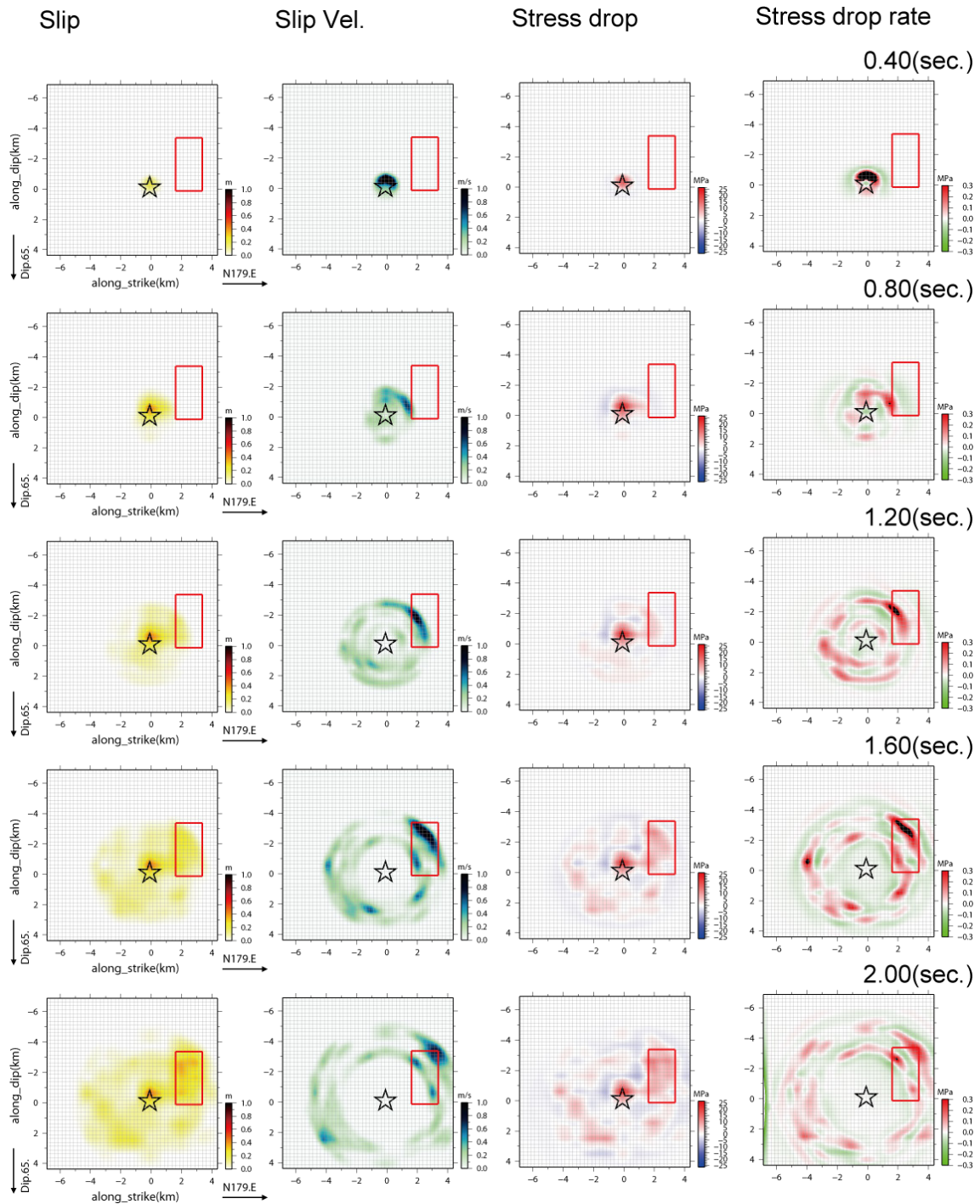


図 5.1.2-13 左から、断層面上でのすべり量、すべり速度、応力降下量、応力降下量レートのスナップショット（0.4–2.0 秒）．それぞれ 0.4 秒間隔で表示している．星印は破壊開始点，赤色矩形領域は特性化されたアスペリティ領域である．

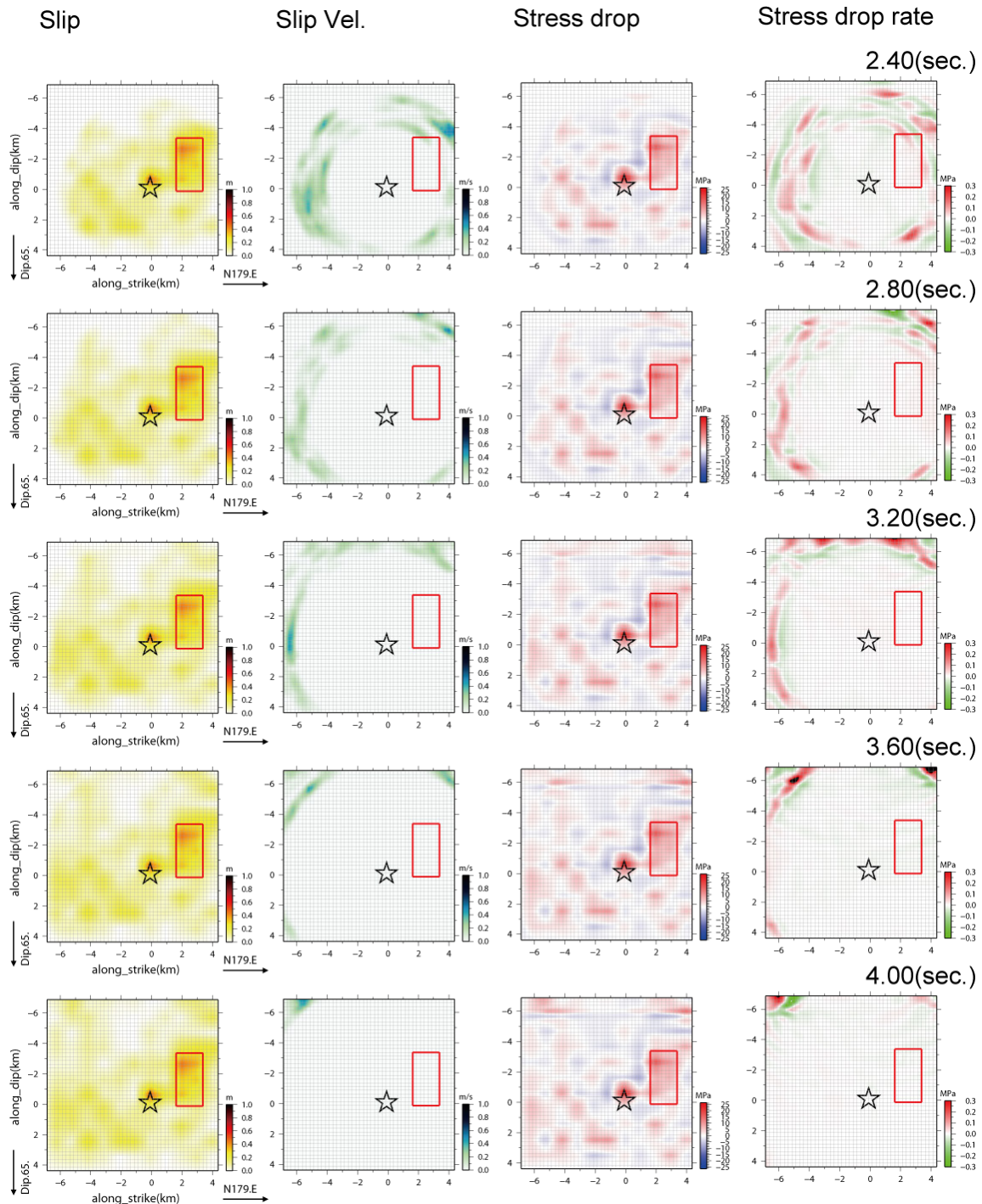


図 5.1.2-13 (続き) 左から、断層面上でのすべり量、すべり速度、応力降下量、応力降下量レートのスナップショット (2.4–4.0 秒) . それぞれ 0.4 秒間隔で表示している. 星印は破壊開始点, 赤色矩形領域は特性化されたアスペリティ領域である.

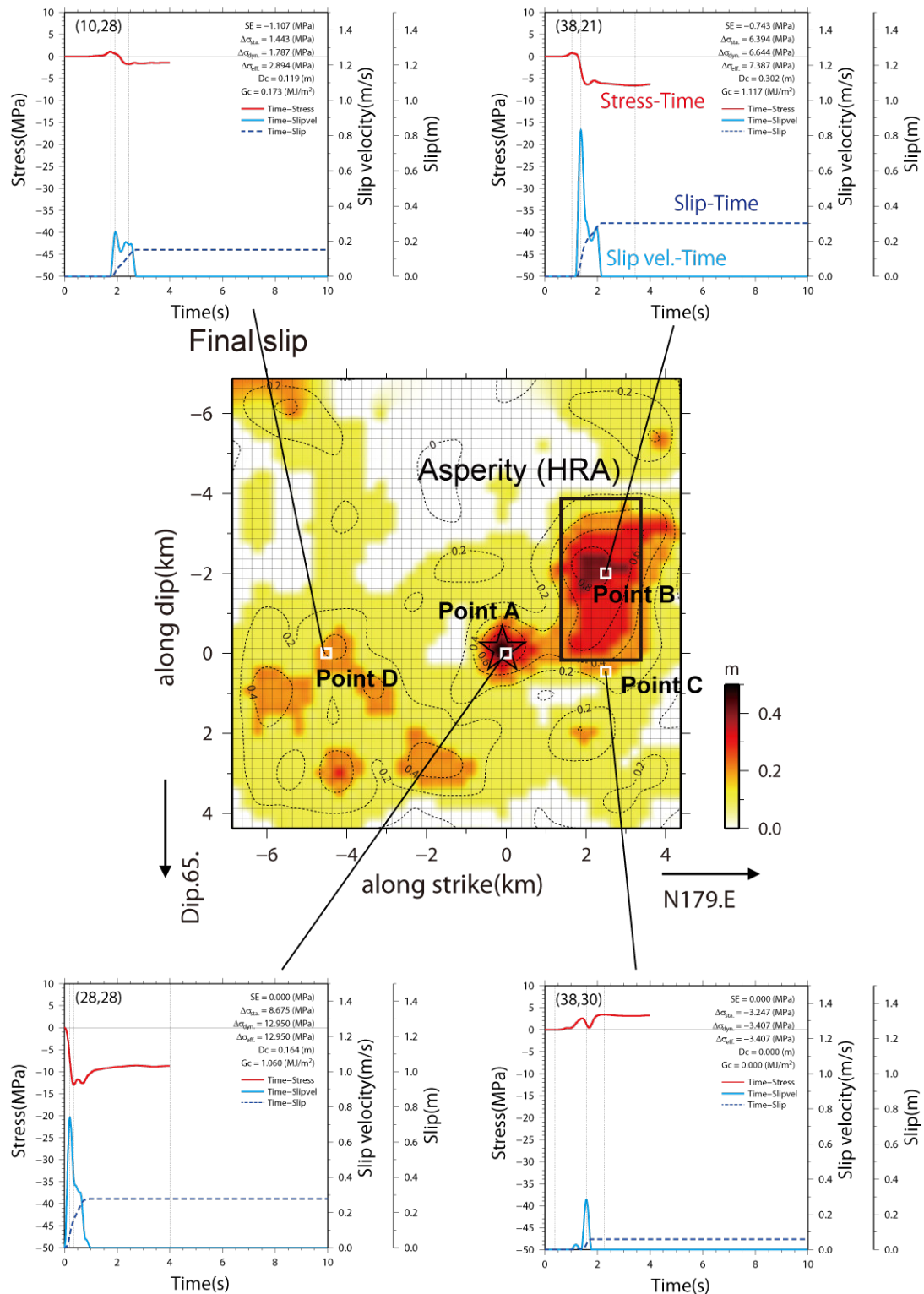


図 5.1.2-14 4つの小断層での応力-時間の関係（赤色実線）とすべり-時間（青色破線），及びすべり速度-時間（青色実線）の関係の例．断層面のコンターは最終すべり量，星印は破壊開始点，赤色矩形領域は，特性化されたアスペリティ領域．

⑤ 動力学パラメータの抽出

④で得られた、応力と時間、すべりに対応する変化をそれぞれパラメータ化することで動力学パラメータを抽出する。図 5.1.2-15 に、応力-時間、すべり、すべり速度の関係例から各動力学パラメータの抽出方法をまとめる。なお、本報で抽出する動力学パラメータは以下の 7 つである。①破壊強度 (Strength excess), ②動的応力降下量 (Dynamic stress drop : $\Delta\sigma_d$), ③静的応力降下量 (Static stress drop : $\Delta\sigma_s$), ④実効応力 (Effective stress : $\Delta\sigma_e$), ⑤臨界すべり量 (Critical Slip-weakening distance : D_c), ⑥Mikumo *et al.* (2003)による D_c (D_c'), ⑦破壊エネルギー (Fracture energy : G_c)。ここで破壊エネルギーは、図 5.1.2-11 に示すように、実効応力と臨界すべり量から計算できる。なお、動的応力降下量の計算の基準となる、時間変化の中での応力降下量の最大値をとる状況となることを、本報では応力が降伏した、と表現する。

図 5.1.2-16①-⑦に、上述した①-⑦の動力学パラメータの断層面上での分布を図示する。また、表 5.1.2-1①-⑦に、各動力学パラメータの断層面全体、アスペリティ領域、HRA 領域、背景領域での平均値と標準偏差を一覧としてまとめる。また、図 5.1.2-17 は、各動力学パラメータの断層全体での平均値を 1.0 とした場合のアスペリティ、HRA と背景領域のそれぞれの倍率を示したものである。この図から、破壊強度はアスペリティや背景領域といった領域による違いは少なく、一方で、各応力降下量や臨界すべり量、破壊エネルギーは、アスペリティの方が背景領域よりも明らかに大きいことがわかる。具体的には、動的応力降下量のアスペリティ領域の平均値は、断層全体の平均値の 3 倍以上であることがわかった。臨界すべり量は、最終すべり量の 50%程度であり、アスペリティでの D_c や D_c' は、断層全体の平均値の 2 倍から 3 倍程度であることが明らかとなった。

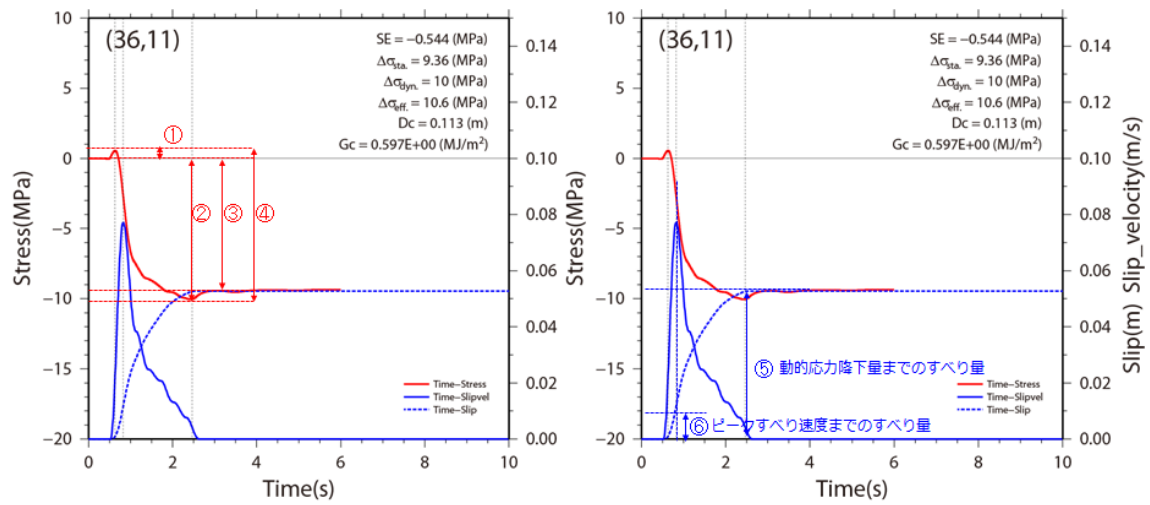


図 5.1.2-15 ポイント A での応力-すべりの関係（赤色実線），及びすべり-時間（青色破線），すべり速度-時間（青色実線）の関係．各動力学パラメータの抽出箇所を①-⑥で表している．それぞれ，①は破壊強度，②は動的応力降下量，③は静的応力降下量，④は実効応力，⑤は臨界すべり量，⑥は Mikumo *et al.* (2003) の定義による D_c である．

表 5.1.2-1① 破壊強度 (SE) の平均, 標準偏差, 最大, 最小値.

SE (MPa)	Average	Standard dev.	Max.	Min.
Asperity	0.93	± 0.39	6.14	0.00
HRA	0.93	± 0.39		
Off asp.	0.81	± 0.82		
Total	0.82	± 0.80		

表 5.1.2-1② 動的応力降下量 $\Delta\sigma_d$ の平均, 標準偏差, 最大, 最小値.

$\Delta\sigma_d$ (MPa)	Average	Standard dev.	Max.	Min.
Asperity	5.94	± 3.14	26.38	-7.84
HRA	5.94	± 3.14		
Off asp.	1.49	± 2.66		
Total	1.78	± 3.91		

表 5.1.2-1③ 静的応力降下量 $\Delta\sigma_s$ の平均, 標準偏差, 最大, 最小値.

$\Delta\sigma_s$ (MPa)	Average	Standard dev.	Max.	Min.
Asperity	5.14	± 3.28	24.51	-7.76
HRA	5.14	± 3.28		
Off asp.	0.68	± 2.65		
Total	0.98	± 2.91		

表 5.1.2-1④ 実効応力 $\Delta\sigma_e$ の平均, 標準偏差, 最大, 最小値.

$\Delta\sigma_s$ (MPa)	Average	Standard dev.	Max.	Min.
Asperity	6.86	± 3.03	26.56	-7.84
HRA	6.86	± 3.03		
Off asp.	1.17	± 2.70		
Total	1.86	± 2.95		

表 5.1.2-1⑤ 臨界すべり量 (D_c) の平均, 標準偏差, 最大, 最小値.

D_c (m)	Average	Standard dev.	Max.	Min.
Asperity	0.24	± 0.08	0.46	0
HRA	0.24	± 0.08		
Off asp.	0.06	± 0.06		
Total	0.08	± 0.08		

表 5.1.2-1⑥ D_c' の平均, 標準偏差, 最大, 最小値.

D_c' (m)	Average	Standard dev.	Max.	Min.
Asperity	0.25	± 0.08	0.46	0
HRA	0.25	± 0.08		
Off asp.	0.08	± 0.06		
Total	0.09	± 0.08		

表 5.1.2-1⑦ 破壊エネルギー G_c の平均, 標準偏差, 最大, 最小値.

G_c (MJ/m ²)	Average	Standard dev.	Max.	Min.
Asperity	0.95	± 0.68	6.16	0
HRA	0.95	± 0.68		
Off asp.	0.13	± 0.30		
Total	0.19	± 0.39		

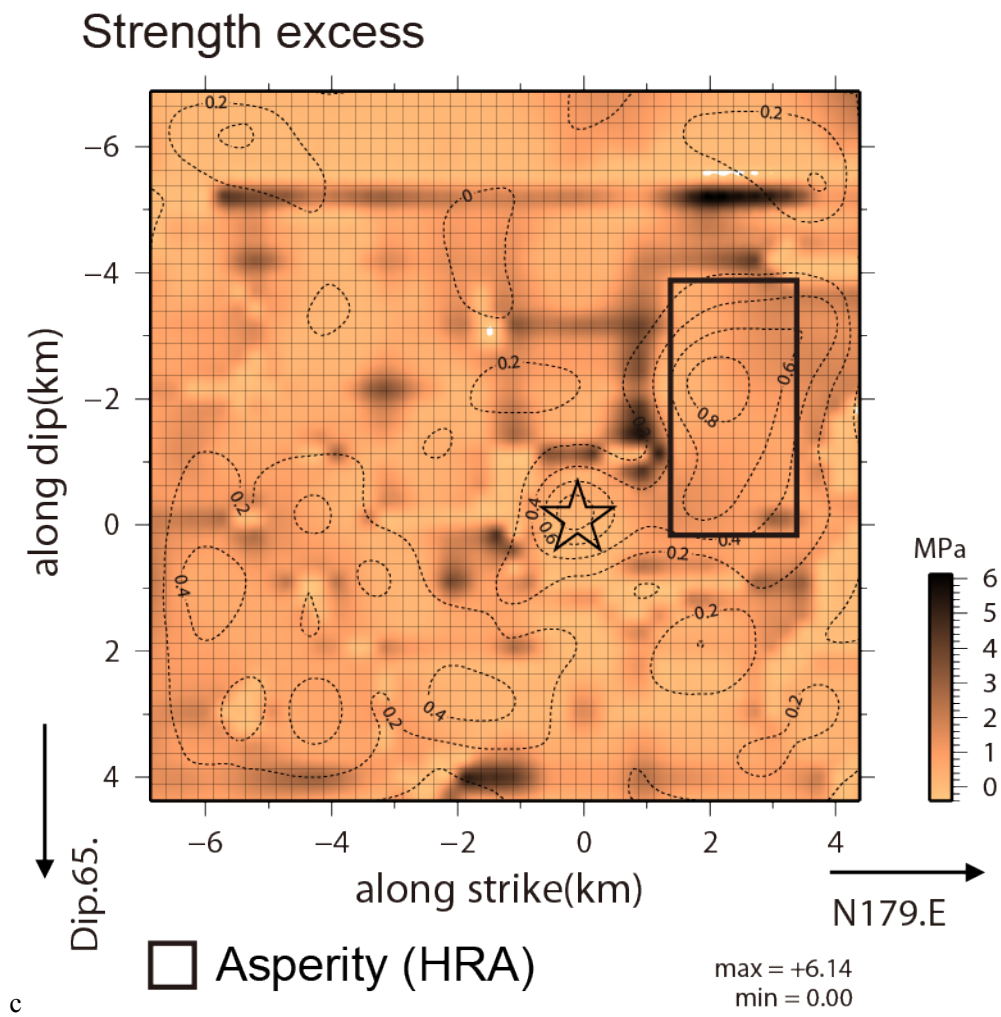


図 5.1.2-16① 断層面上での破壊強度 SE の分布. 破線コンターは最終すべり量を表す. 星印は破壊開始点, 赤色矩形領域は, 特性化されたアスペリティ領域.

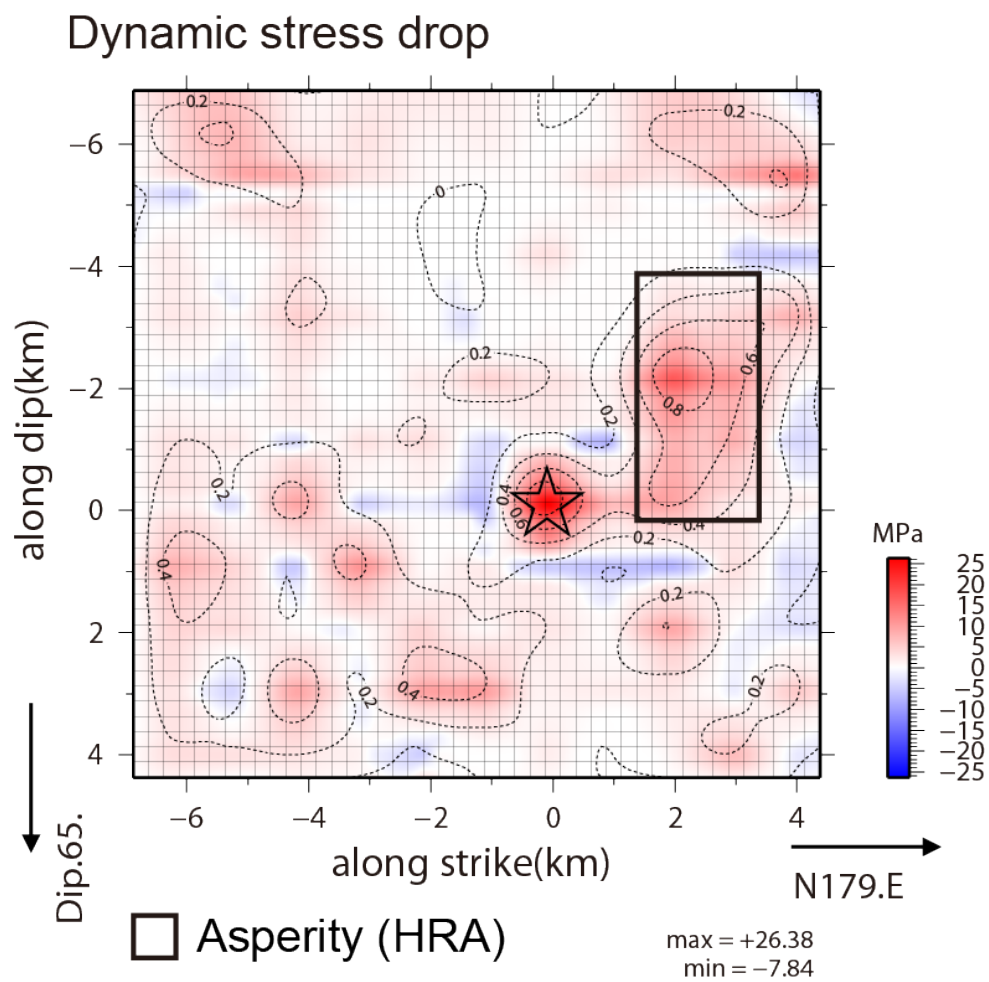


図 5.1.2-16② 断層面上での動的応力降下量 $\Delta\sigma_d$ の分布. 破線コンターは最終すべり量を表す. 星印は破壊開始点, 赤色矩形領域は, 特性化されたアスペリティ領域.

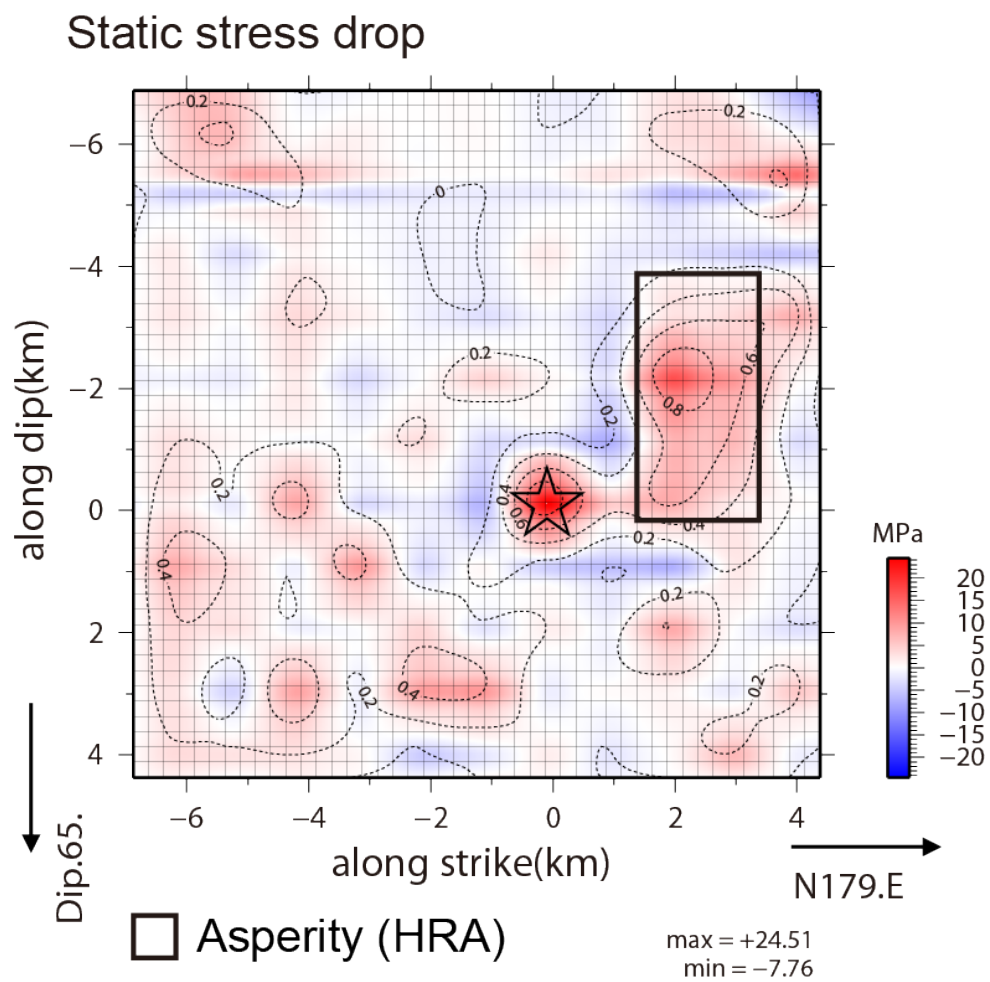


図 5.1.2-16③ 断層面上での静的応力降下量 $\Delta\sigma_s$ の分布. 破線コンターは最終すべり量を表す. 星印は破壊開始点, 赤色矩形領域は, 特性化されたアスペリティ領域.

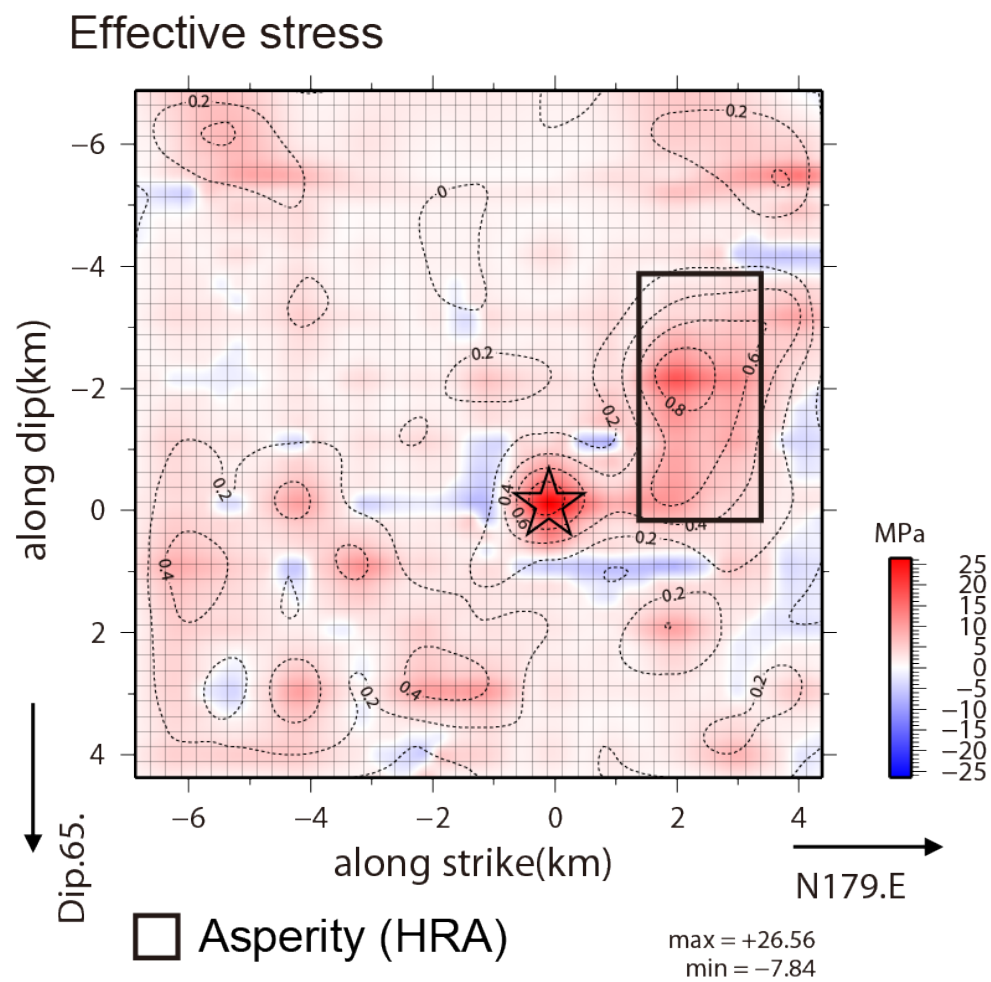


図 5.1.2-16④ 断層面上での実効応力 $\Delta\sigma_e$ の分布. 破線コンターは最終すべり量を表す. 星印は破壊開始点, 赤色矩形領域は, 特性化されたアスペリティ領域.

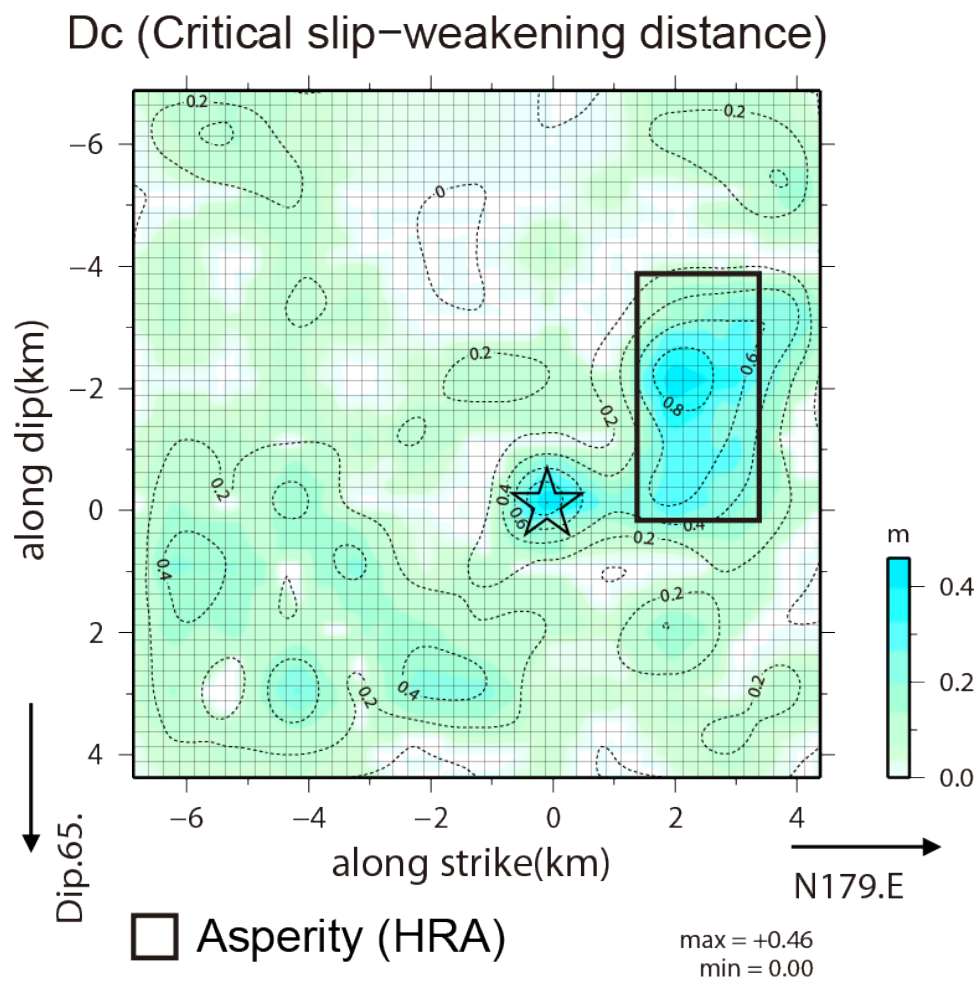


図 5.1.2-16⑤ 断層面上での臨界すべり量 D_c の分布. 破線コンターは最終すべり量を表す. 星印は破壊開始点, 赤色矩形領域は, 特性化されたアスペリティ領域.

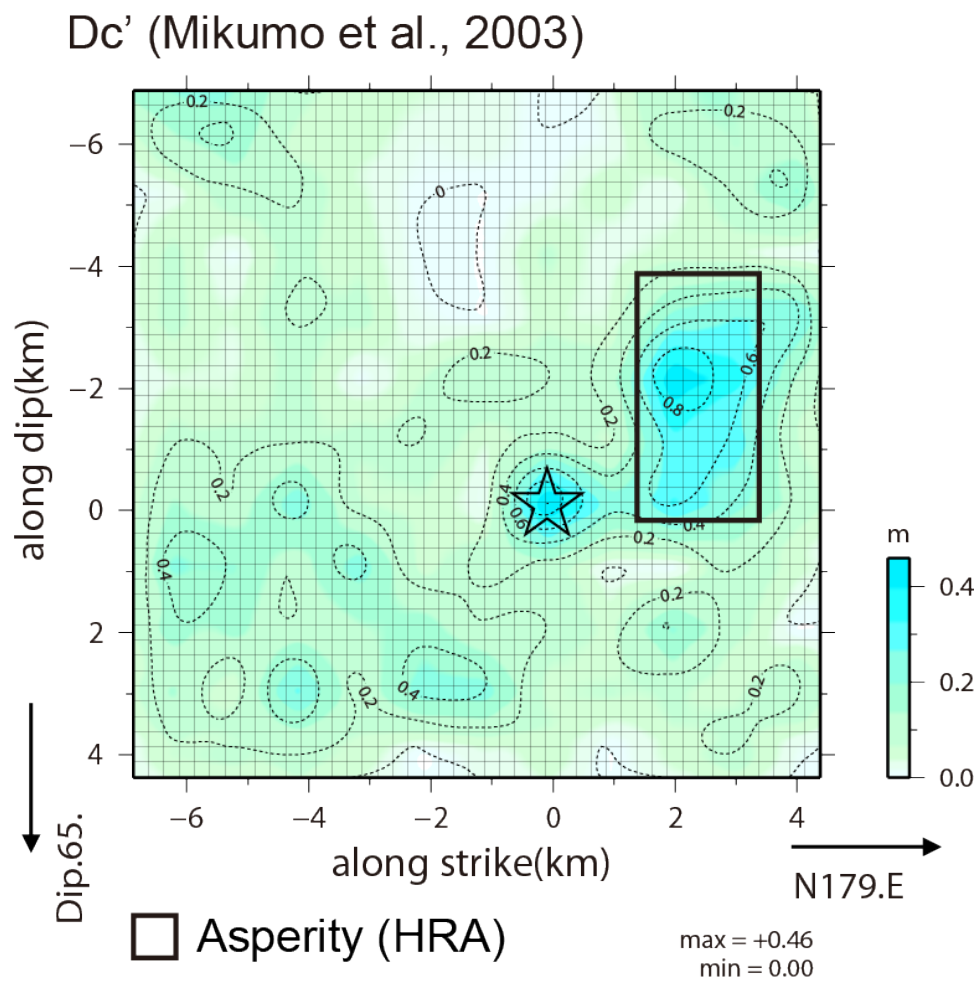


図 5.1.2-16⑥ 断層面上での D_c' の分布. 破線コンターは最終すべり量を表す. 星印は破壊開始点, 赤色矩形領域は, 特性化されたアスペリティ領域.

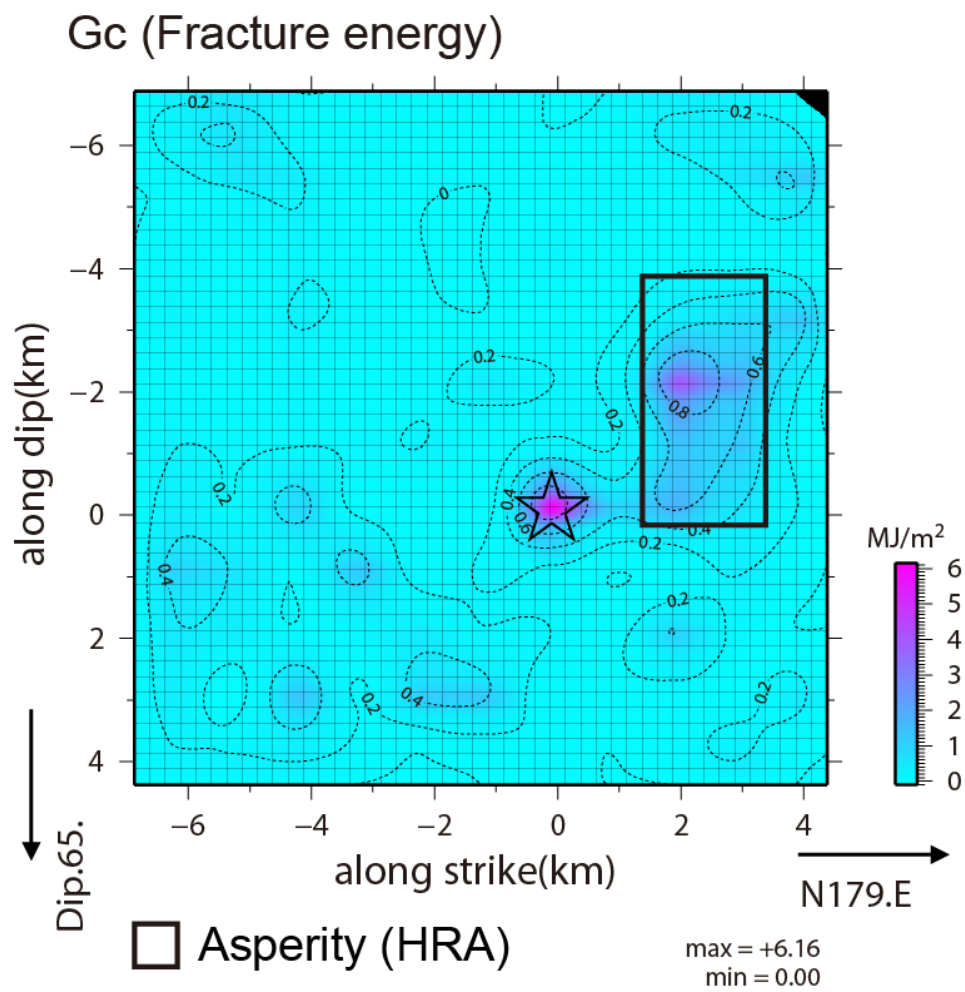


図 5.1.2-16⑦ 断層面上での破壊エネルギー G_c の分布. 破線コンターは最終すべり量を表す. 星印は破壊開始点, 赤色矩形領域は, 特性化されたアスぺリティ領域.

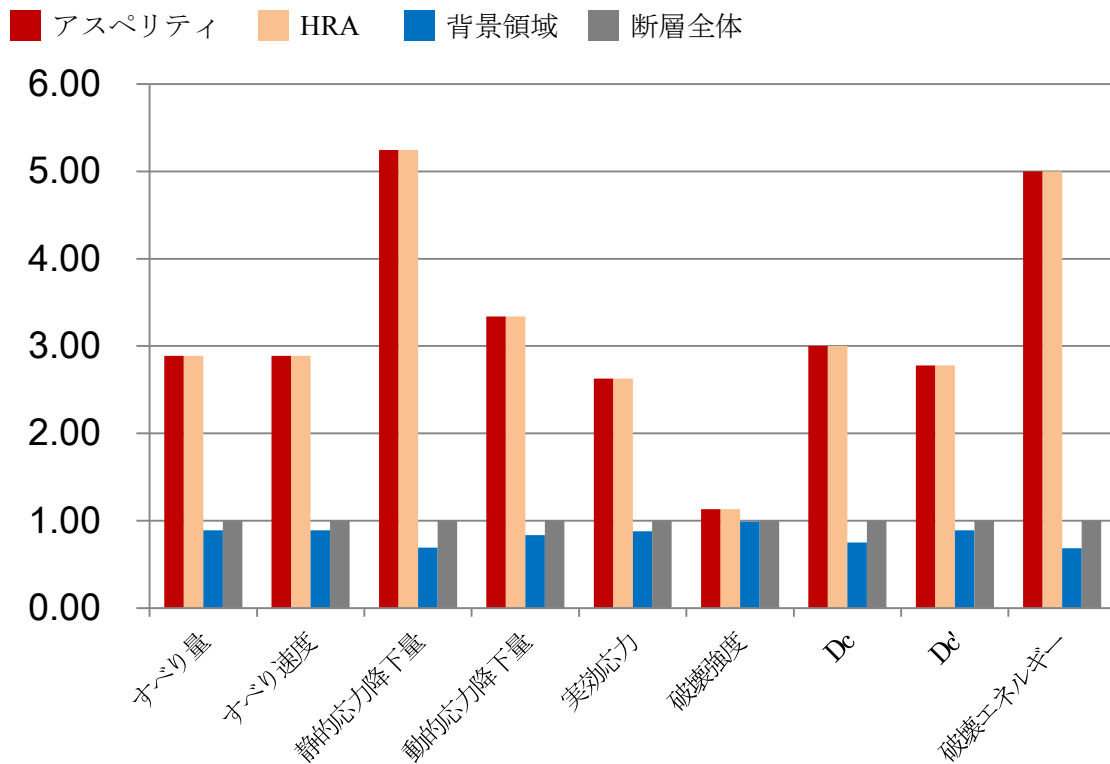


図 5.1.2-17 各動力学パラメータについて、断層全体での平均値を 1.0（灰色）とした場合のアスぺリティ（赤色）HRA（橙色）と背景領域（青色）の倍率.

⑥ 動力学パラメータの空間相関

震源パラメータの間で、具体的にどのパラメータとどのパラメータが相関しているかという問題は、特性化震源モデルを構築する上で重要な知見となり得る。Schmedes *et al.* (2010) は、動的破壊モデルのデータベースを構築した上で、統計的に整理し、動的破壊シミュレーションによって計算された震源パラメータの断層面上の空間的な相関関係 (Correlation) を定量的に評価した (図 5.1.2-18)。ここで得られた相関関係は、Crempien and Archuleta (2015) によってまとめられた広帯域地震動シミュレーション手法の震源モデル作成において基礎的な概念となっており、米国 Southern California Earthquake Center (SCEC) の Broadband Platform V14.3 Simulation Methods の 1 つとして検証が実施されている (Dreger *et al.*, 2015)。Schmedes *et al.* (2010) に倣い、本報においても、動力学パラメータを含めた断層面上での震源パラメータの分布を基に、パラメータ間の空間相関の表 (Correlation Matrix) を作成し、定量的な関係性評価を行った。

Correlation Matrix の結果を図 5.1.2-19 に示す。これを見ると、この地震では、以下の事が明らかとなる。1) 最終すべり量とすべり速度は、良い相関がある。2) 動的、静的応力降下量、及び実効応力は、良い相関がある。3) 破壊強度は、いずれの震源パラメータとも相関が無い。4) 動的、静的応力降下量、及び実効応力とすべり、及びすべり速度は、相関がある。5) すべり速度と D_c 、或いは D_c' とは相関がある。以上のパラメータ以外にも、抽出可能な震源パラメータはライズタイムや破壊伝播速度等もあり、これらのパラメータと各動力学パラメータの関係性について調べることは将来的な課題の 1 つであると言える。

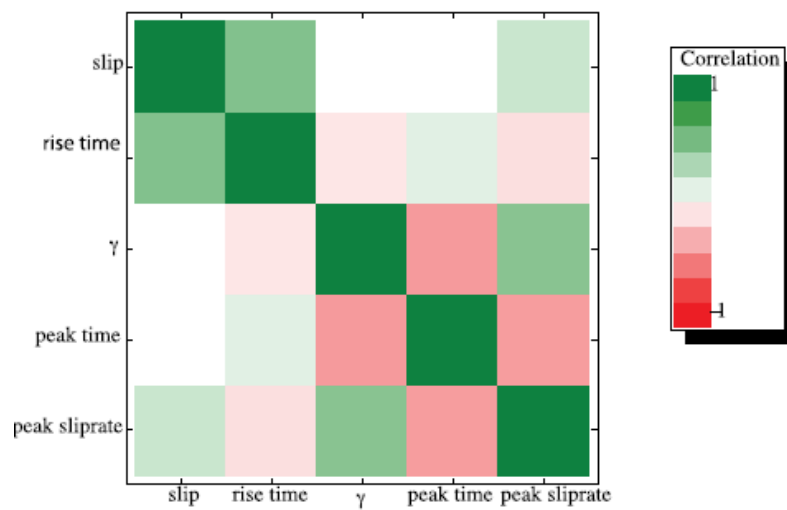


図 5.1.2-18 Schmedes *et al.* (2010) による，各震源パラメータの断層面上での空間相関の結果．緑色は相関が良く，赤色は相関が悪いことを表す．

		破壊強度	動的応力	臨界すべ	破壊エネ	静的応力	実効応力	すべり	すべり速度	Dc'
		SE	$\Delta\sigma_d$	D_c	G_c	$\Delta\sigma_s$	$\Delta\sigma_e$	D	D'	D_c'
破壊強度	SE	1.00	-0.06	0.00	-0.03	-0.26	0.21	0.00	0.00	0.00
動的応力	$\Delta\sigma_d$	-0.06	1.00	0.80	0.82	0.94	0.96	0.72	0.72	0.76
臨界すべ	D_c	0.00	0.80	1.00	0.83	0.80	0.79	0.90	0.90	0.96
破壊エネ	G_c	-0.03	0.82	0.83	1.00	0.81	0.79	0.76	0.76	0.83
静的応力	$\Delta\sigma_s$	-0.26	0.94	0.80	0.81	1.00	0.85	0.70	0.71	0.75
実効応力	$\Delta\sigma_e$	0.21	0.96	0.79	0.79	0.85	1.00	0.70	0.70	0.75
すべり	D	0.00	0.72	0.90	0.76	0.70	0.70	1.00	1.00	0.94
すべり速度	D'	0.00	0.72	0.90	0.76	0.71	0.70	1.00	1.00	0.94
Dc'	D_c'	0.00	0.76	0.96	0.83	0.75	0.75	0.94	0.94	1.00

Correlation

1.0

0.8

0.6

0.4

0.2

0.0

1.00

0.80

0.60

0.40

0.20

0.00

図 5.1.2-19 本報で得られた各震源パラメータの空間相関の結果。緑色は相関が良く、赤色は相関が悪いことを表す。

⑦ 破壊時間

ここでは、④で得られた動力学パラメータを用いて、断層面上での破壊時間の空間的なばらつきを考察する。図 5.1.2-20 は、破壊強度まで達する時間（破壊強度時間）を考慮した断層面上での破壊時間のコンター図である。第 1 タイムウィンドウ破壊伝播速度（2600 m/s）で震源から同心円状に伝播した場合（破線コンター）と比較すると、破壊強度時間は、空間的にばらついており、特に震源よりも南側、すなわちアスペリティ（或いは HRA）領域に向けては速く伝播しているように見える。一方で、それ以外の方向に対しては、破壊強度まで到達する時間が長いように見える。

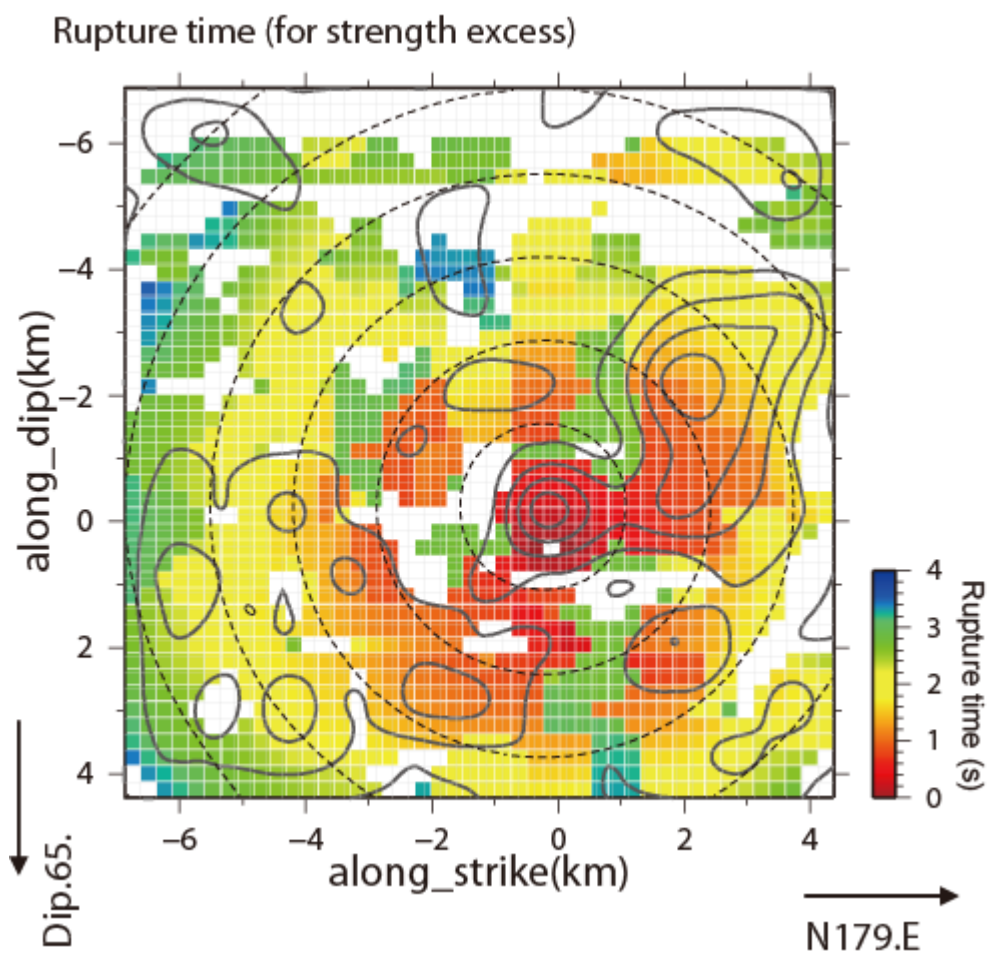


図 5.1.2-20 各要素断層での破壊強度までの時間（カラーコンター）．灰色線は，すべりのコンター，破線は破壊速度 2600 m/s の同心円破壊時間コンターを 0.5 秒間隔で示したものである．

⑧ おわりに

2013 年淡路島付近の地震を対象に、運動学的震源インバージョン結果（不均質すべりモデル：染井・他, 2015）に基づいて、断層面上での応力時空間変化を推定し、震源断層破壊にとって本質的な動力学パラメータの抽出を試みた。本報で得られた主な結果は以下の通りである。1) 臨界すべり量は、アスペリティ（HRA）領域の方が、背景領域よりも 2 倍から 3 倍程度大きい。2) アスペリティ（HRA）領域、および背景領域の臨界すべり量は、最終すべり量の 50%程度である。3) 静的、及び動的応力降下量は、アスペリティ（HRA）領域の方が背景領域よりも 3–5 倍程度大きい。4) D_c' と D_c は、すべりやすべり速度と良い相関を示す。5) 破壊強度まで達する時間は、アスペリティ（HRA）領域で早い傾向がある。ここで、アスペリティ領域は、運動学的震源インバージョンモデルのすべり量に基づいて特性化された領域であり、HRA 領域は、ピークモーメントレート分布に基づいて抽出された領域であるが、染井・他 (2015) のモデルでは、これらの領域は同一の場所に特定された。動力学パラメータの検討においては、他の震源パラメータ（破壊伝播速度等）との比較や、動力学パラメータ抽出の事例を増やすことでこれらの傾向の統計的特性を調べていく基本的資料となることも重要な成果の 1 つである。

⑧ 参考文献

- Aoi, S., Obara, K., Hori, S., Kasahara, K., and Okada, Y. (2000), New Japanese uphole/downhole strong-motion observation network: KiK-net, *Seism. Res. Lett.* 72, 239.
- Asano, K., and Iwata, T. (2011), Characterization of stress drops on asperities estimated from the heterogeneous kinematic slip model for strong motion prediction for inland crustal earthquakes in Japan, *Pure Appl. Geophys.*, 168, 105-116.
- Crempien, J. G. F., and Archuleta, R. J. (2015), UCSB method for simulation of broadband ground motion from kinematic earthquake sources, *Seism. Res. Lett.*, 86, 61-67.
- Dreger, D.S., Beroza, G.C., Day, S.M., Goulet, C.A., Jordan, T.H., Spudich, P.A., and Stewart, J.P. (2015), Validation of the SCEC Broadband Platform V14.3 Simulation Methods using pseudospectral acceleration data, *Seism. Res. Lett.*, 86, 15-16.
- 藤原広行・河合伸一・青井 真・森川信之・先名重樹・東 宏樹・大井昌弘・はお憲生・長谷川信介・前田宜浩・岩城麻子・若松加寿江・井元政二郎・奥村俊彦・松山尚典・成田 章 (2012), 東日本大震災を踏まえた地震ハザード評価の改良に向けた検討, 防災科学技術研究所研究資料, 第 379 号.
- 福山英一・石田瑞穂・D. S. Dreger・川井啓廉 (1998), オンライン広帯域地震データを用いた完全自動メカニズム決定, *地震* 2, 51, 149-156.
- Graves, R. W. (1996), Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 1091-1106.
- Guatteri, M., Mai, P. M., and Beroza, G. C. (2004), A pseudo-dynamic approximation to dynamic rupture models for strong ground motion prediction, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 94, 2051-2063.
- Hartzell, S. H., and Heaton, T. H. (1983), Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.* 73, 1553-1583.
- Ida, Y. (1972), Cohesive force across the tip of a longitudinal-shear crack and Griffith's specific surface energy, *J. Geophys. Res.*, 77, 3796-3805.
- Ide, S. and Takeo, M., (1997), Determination of constitutive relations of fault slip based on seismic wave analysis. *J. Geophys. Res.*, 102, 27379-27391.
- Irikura, K. (1986), Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, *Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp.*, Tokyo, 151-156.
- Kinoshita, S. (1998), Kyoshin-net (K-NET), *Seism. Res. Lett.* 69, 309-332.
- 気象庁 (2013), 平成25年2月地震・火山月報 (防災編), 気象庁編, 25-26.
- Kostrov, B. V. (1964), Self-similar problems of propagation of shear cracks, *J. Appl. Math. Mech.* 28, 1077-1087.
- Mikumo, T., Olsen, K. B., Fukuyama, E., and Yagi, Y. (2003), Stress-breakdown time and

- slip-weakening distance inferred from slip-velocity functions on earthquake faults. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 93, 264-282.
- Miyake, H., Iwata, T., and Irikura, K. (2003), Source characterization for broadband ground-motion simulation: Kinematic heterogeneous source model and strong motion generation area, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 93, 2531-2545.
- 宮腰 研・長 郁夫・堀家正則 (2005), 震源インバージョン結果に基づいた摩擦構成則の推定, 日本地震学会2005年秋季大会講演予稿集, P200.
- Pitarka, A. (1999), 3D Elastic finite-difference modeling of seismic motion using staggered grids with nonuniform spacing. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 89, 54-68.
- Schmedes, J., Archuleta, R. J., and Lavallée, D. (2010), Correlation of earthquake source parameters inferred from dynamic rupture simulations, *J. Geophys. Res.*, 115, -3805.
- 染井一寛・宮腰 研・凌 甦群 (2015), 微動アレイ観測に基づく 2013 年淡路島付近の地震 (Mw5.8) の震源周辺の強震観測点における地下速度構造モデルの推定, 物理探査学会 第 133 回学術講演論文集, 43-46
- 染井一寛・宮腰 研・倉橋 奨 (2015), 強震記録に基づく 2013 年 4 月 13 日淡路島付近の地震 (Mw5.8) の震源モデルの推定, 日本地震学会 2015 年秋季大会講演予稿集, S15-P05.
- Somerville, P., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Kagawa, T., Smith, N., and Kowada, A. (1999), Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seism. Res. Lett.*, 70, 59-80.
- 吉田邦一・宮腰 研・入倉孝次郎・羽田浩二 (2010), 震源インバージョンのためのレシーバー関数による速度構造の推定ー2008 年岩手・宮城内陸地震震源域周辺の観測点ー, 日本地震学会 2010 年秋季大会講演予稿集, P1-17.
- 吉田邦一・宮腰 研 (2013), ピークモーメントレート分布にもとづく 2011 年東北地方太平洋沖地震の特性化震源モデル, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会講演予稿集, SSS35-P03.

5.1.3 検討対象地震における動力学パラメータの整理

① 検討対象地震

本節では、運動学的震源インバージョン結果に基づいて推定された動力学パラメータの整理を行う。ここでは、2008 年岩手宮城内陸地震（2008 岩手宮城とする）、2013 年栃木県北部の地震（2013 栃木とする）、2013 年淡路島付近の地震（2013 淡路島とする）、2016 年熊本地震 4 月 16 日本震（2016 熊本本震とする）の日本国内の内陸地殻内地震の計 4 つの地震を整理の対象とする。表 5.1.3-1 に、これらの地震の諸元と、動力学パラメータ推定に用いた運動学的震源モデルを整理する。また、各地震の震央位置と F-net による CMT 解を図 5.1.3-1 に示す。さらに、図 5.1.3-2 に、各地震の検討で使用する運動学的震源モデル（不均質すべりモデル）を示す。なお、2016 熊本本震と 2013 淡路島の 2 地震については、本報の 5.1.1、及び 5.1.2 での検討内容である。

② 動力学パラメータの整理

検討対象地震に対して得られた動力学パラメータについて、運動学的震源モデルから抽出された HRA 領域、断層全体領域での平均値と標準偏差を表 5.1.3-2 に整理する。ここで整理する動力学パラメータは、静的応力降下量、動的応力降下量、実効応力、破壊強度、臨界すべり量 (D_c)、Mikumo *et al.* (2003) の定義に基づく臨界すべり量 (D_c')、破壊エネルギーの 7 つである。図 5.1.3-3 に、これらのパラメータを横軸を F-net による地震モーメント、縦軸をパラメータ値として HRA、全体断層領域について示す。また、同図の下のパネルには全体領域対する HRA での値の比を、同様に横軸を地震モーメントとして示してある。

まず、静的応力降下量、動的応力降下量、実効応力について（図 5.1.3-3①－③）、いずれの地震も HRA 領域の方が全体断層領域よりも応力降下量（実効応力）の値が大きいことが確認できる。地震によってその絶対値にばらつきはあるものの、比をみると 1.5－5 倍程度、HRA 領域の方が応力降下量（実効応力）の値が大きい。また、図 5.1.3-3①－③の各パネルの上図には、強震動予測レシピア（Irikura and Miyake, 2011）で扱われている、 S （全体面積）－ M_0 （地震モーメント）関係、 A （短周期レベル）－ M_0 （地震モーメント）関係から、実効応力－ M_0 （地震モーメント）の関係に焼き直した線も示してある。また、各パネルの下図には、この実効応力－ M_0 （地震モーメント）の関係と断層全体領域の平均応力降下量－ M_0 （地震モーメント）の関係から計算される比（ S ：全体断層面積／ S_a ：アスペリティ面積）を示してある。これらを参考に、今回推定された応力降下量、或いは実効応力を見ると、規模の大きい 2008 岩手宮城、2016 熊本本震の HRA 領域の平均応力降下量は、関係式から予測される実効応力と良い一致を示していることがわかる。一方で、規模の小さい 2013 栃木、2013 淡路島のそれらは、予測される実効応力よりもやや小さい。これは、抽出した HRA

領域の中に比較的応力降下量の小さい領域（小断層）も含まれていることが原因として考えられるかもしれない。また、比の方に注目すると、いずれの地震も予測される関係式よりもやや小さめに見積もられている。比については、HRA 領域の値が小さいか、断層全体領域の値が大きいのか、いずれかが考えられるが、ここでは系統的な傾向は見られない。今後、これらのデータセットの拡充をすることが重要であると考えられる。また、破壊強度に注目すると、HRA と断層全体領域の比が 1 付近にばらついていることから、HRA と断層全体で、値に大きな違いが無いことがわかる。

次に、臨界すべり量 D_c , D_c' に注目する。 D_c は、いずれの地震も HRA の方が大きく、比を見ると、2 倍から 3 倍程度大きいことがわかる。さらに、地震規模が大きいほど、臨界すべり量 D_c も比例して大きくなっている。また、 D_c , D_c' の平均値に大きな違いは無く、ここで抽出された臨界すべり量は、異なるアプローチ（定義）からでもほぼ同様の値が推定できることが示された。最後に、破壊エネルギーに注目すると、臨界すべり量とほぼ同じ傾向が確認でき、地震規模に比例していること、また、HRA 領域の方が 2 倍から 3 倍程度大きいことが確認できる。

強震動予測レシピにおいて、高精度な予測強震動を得るためには、実際に発生した地震の震源像を詳細に把握し、その知見を特性化震源モデルの構築に活かしていくことが重要である。現在広く用いられている特性化震源モデルの概念は、運動学的震源モデルの上に立脚しているが、断層破壊現象は本質的には動力学で表現される。本節のように、各領域でのパラメータの平均値を整理することによって、系統的な傾向を捉えることは、特性化震源モデルの高度化において期待されることの 1 つであると考えられ、今後も、動力学パラメータの抽出事例を増やし、さらに他の震源他の震源パラメータ（破壊伝播速度等）との比較することで、これらの統計的特性を調べていくことが重要であると言える。

表 5.1.3-1 検討対象地震の諸元

地震名	2008 岩手宮城	2013 栃木	2013 淡路島	2016 熊本本震
発生年月日	2008/06.14	2013/02/25	2013/04/13	2016/04/16
北緯 (度)	39.0298	36.8737	34.4188	32.7545
東経 (度)	140.8807	139.4128	134.8290	130.7630
深さ (km)	7.77	2.84	14.85	12.45
M_{JMA}	7.2	6.3	6.3	7.3
M_0 (Nm)*	2.72×10^{19}	5.54×10^{17}	5.47×10^{17}	4.42×10^{19}
M_w^*	6.9	5.8	5.8	7.1
すべりモデル	吉田・他 (2016)	染井・他 (2014)	染井・他 (2015)	Yoshida <i>et al.</i> (2017)

* F-net

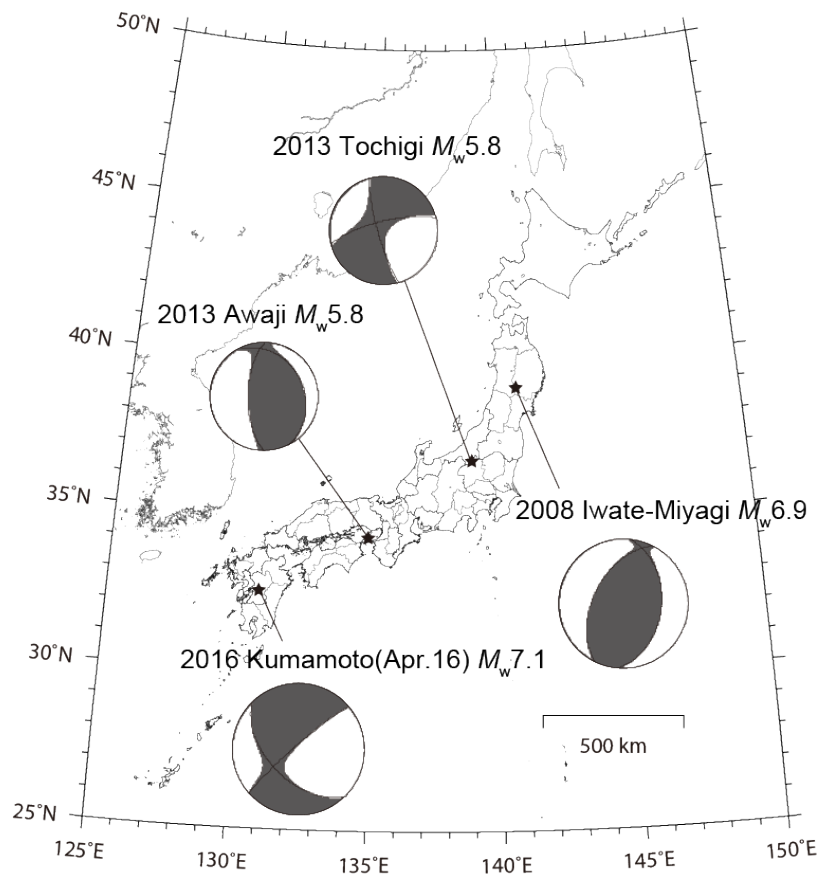
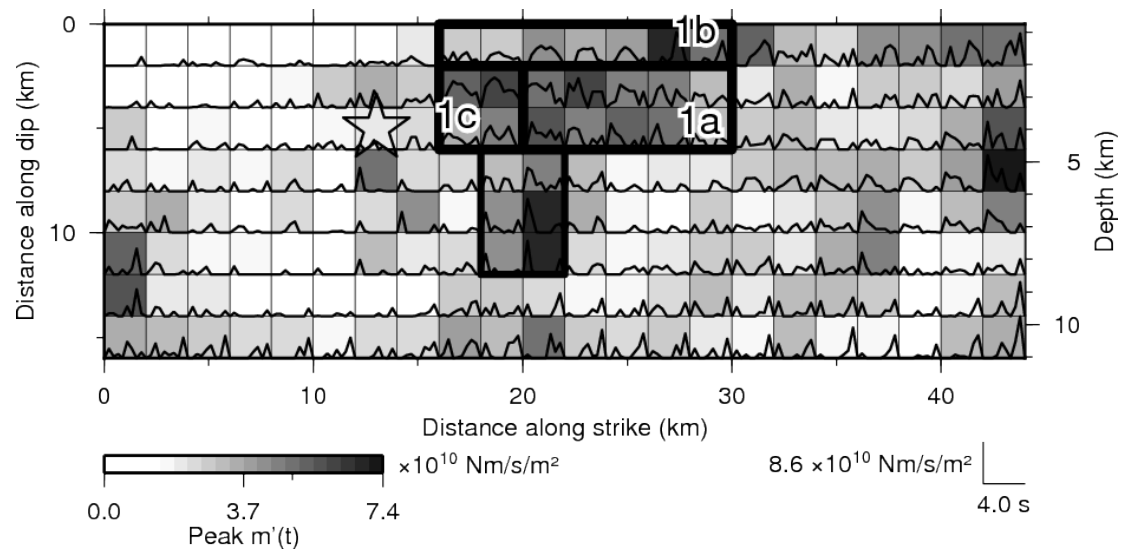


図 5.1.3-1 検討対象地震の震央分布と F-net の CMT 解の下半球投影図

2008 岩手宮城



2013 栃木

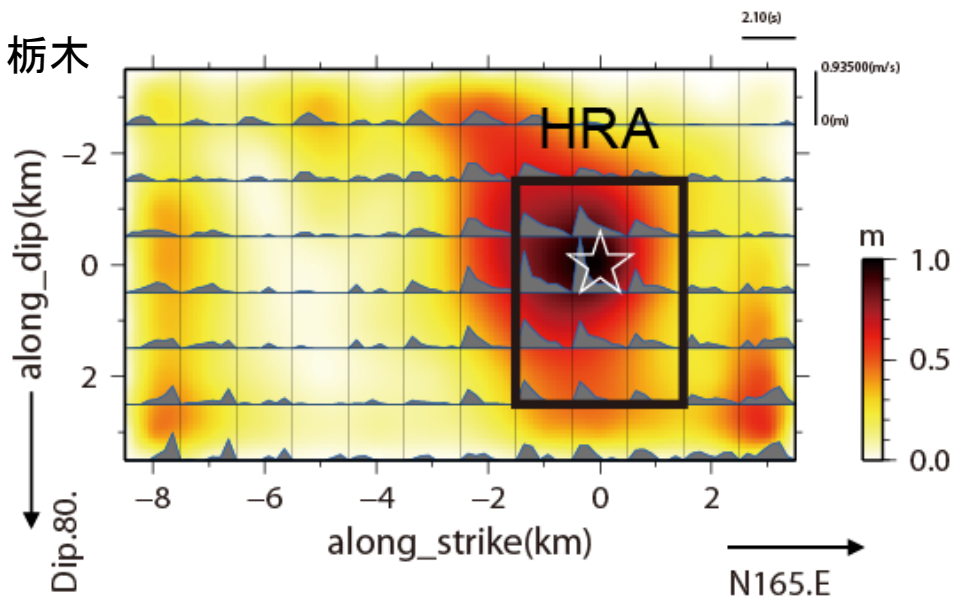
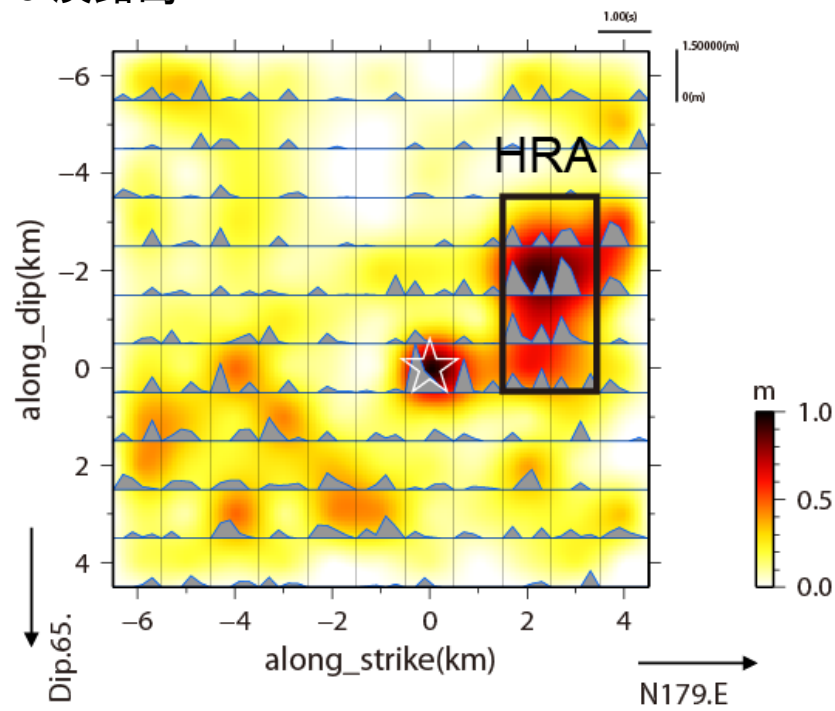


図 5.1.3-2 検討対象の運動学的震源モデル

2013 淡路島



2016 熊本本震

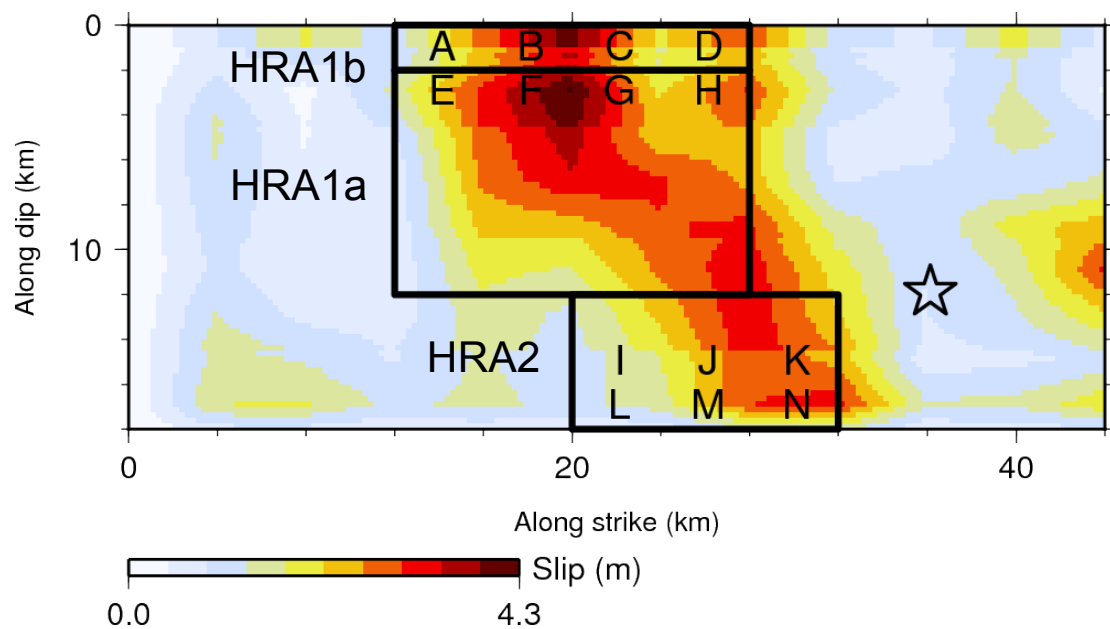


図 5.1.3-2 (続き) 検討対象の運動学的震源モデル

表 5.1.3-2① 推定した静的応力降下量の各領域での平均値と標準偏差

地震名	断層全体 (MPa)	
	平均値	標準偏差
2008 岩手宮城	4	±7
2013 栃木	1.9	±3.1
2013 淡路島	1.0	±2.9
2016 熊本本震	3.6	±7.4

地震名		HRA (MPa)	
		平均値	標準偏差
2008 岩手宮城	HRA1a	13	±7
	HRA1b	19	±12
	HRA1c	6	±7
	HRA2	5	±7
2013 栃木	HRA	6.0	±2.8
2013 淡路島	HRA	5.1	±3.3
2016 熊本本震	HRA1a	6.5	±5.0
	HRA1b	9.1	±5.9
	HRA2	6.7	±16.0

表 5.1.3-2② 推定した動的応力降下量の各領域での平均値と標準偏差

地震名	断層全体 (MPa)	
	平均値	標準偏差
2008 岩手宮城	7	±7
2013 栃木	2.2	±3.3
2013 淡路島	1.8	±3.9
2016 熊本本震	6.8	±6.4

地震名		HRA (MPa)	
		平均値	標準偏差
2008 岩手宮城	HRA1a	15	±7
	HRA1b	21	±12
	HRA1c	8	±6
	HRA2	10	±6
2013 栃木	HRA	6.7	±3.4
2013 淡路島	HRA	5.9	±3.1
2016 熊本本震	HRA1a	10	±4.6
	HRA1b	12	±5.3
	HRA2	11	±12

表 5.1.3-2③ 推定した実効応力の各領域での平均値と標準偏差

地震名	断層全体 (MPa)	
	平均値	標準偏差
2008 岩手宮城	9	±6
2013 栃木	2.9	±3.5
2013 淡路島	1.9	±3.0
2016 熊本本震	10.0	±6.0

地震名		HRA (MPa)	
		平均値	標準偏差
2008 岩手宮城	HRA1a	16	±7
	HRA1b	22	±11
	HRA1c	12	±5
	HRA2	12	±5
2013 栃木	HRA	7.7	±3.1
2013 淡路島	HRA	6.9	±3.0
2016 熊本本震	HRA1a	15	±4
	HRA1b	15	±6
	HRA2	17	±9

表 5.1.3-2④ 推定した破壊強度の各領域での平均値と標準偏差

地震名	断層全体 (MPa)	
	平均値	標準偏差
2008 岩手宮城	2	±3
2013 栃木	0.7	±0.6
2013 淡路島	0.8	±0.8
2016 熊本本震	3.5	±2.4

地震名		HRA (MPa)	
		平均値	標準偏差
2008 岩手宮城	HRA1a	1	±3
	HRA1b	0.2	±0.4
	HRA1c	4	±3
	HRA2	2	±2
2013 栃木	HRA	1.1	±0.5
2013 淡路島	HRA	0.9	±0.4
2016 熊本本震	HRA1a	4.4	±1.8
	HRA1b	2.5	±1.4
	HRA2	5.9	±5.3

表 5.1.3-2⑤ 推定した D_c の各領域での平均値と標準偏差

地震名	断層全体 (m)	
	平均値	標準偏差
2008 岩手宮城	0.9	± 0.8
2013 栃木	0.1	± 0.1
2013 淡路島	0.1	± 0.1
2016 熊本本震	1.3	± 1.0

地震名		HRA (m)	
		平均値	標準偏差
2008 岩手宮城	HRA1a	2.6	± 0.8
	HRA1b	3.0	± 0.9
	HRA1c	2.2	± 1.0
	HRA2	1.6	± 0.7
2013 栃木	HRA	0.3	± 0.1
2013 淡路島	HRA	0.2	± 0.1
2016 熊本本震	HRA1a	2.5	± 0.6
	HRA1b	2.9	± 0.7
	HRA2	1.3	± 1.2

表 5.1.3-2⑥ 推定した D_c' の各領域での平均値と標準偏差

地震名	断層全体 (m)	
	平均値	標準偏差
2008 岩手宮城	1.0	±1.4
2013 栃木	0.2	±0.1
2013 淡路島	0.1	±0.1
2016 熊本本震	0.6	±0.5

地震名		HRA (m)	
		平均値	標準偏差
2008 岩手宮城	HRA1a	2.6	±1.0
	HRA1b	2.4	±1.0
	HRA1c	3.9	±3.4
	HRA2	1.2	±0.7
2013 栃木	HRA	0.4	±0.1
2013 淡路島	HRA	0.3	±0.1
2016 熊本本震	HRA1a	1.0	±0.6
	HRA1b	0.9	±0.6
	HRA2	0.5	±0.5

表 5.1.3-2⑦ 推定した破壊エネルギーの各領域での平均値と標準偏差

地震名	断層全体 (MJ/m ²)	
	平均値	標準偏差
2008 岩手宮城	6	±10
2013 栃木	0.3	±0.4
2013 淡路島	0.2	±0.4
2016 熊本本震	15	±7

地震名		HRA (MJ/m ²)	
		平均値	標準偏差
2008 岩手宮城	HRA1a	21	±17
	HRA1b	31	±26
	HRA1c	16	±11
	HRA2	8	±9
2013 栃木	HRA	0.9	±0.5
2013 淡路島	HRA	1.0	±0.7
2016 熊本本震	HRA1a	15	±7
	HRA1b	19	±14
	HRA2	14	±16

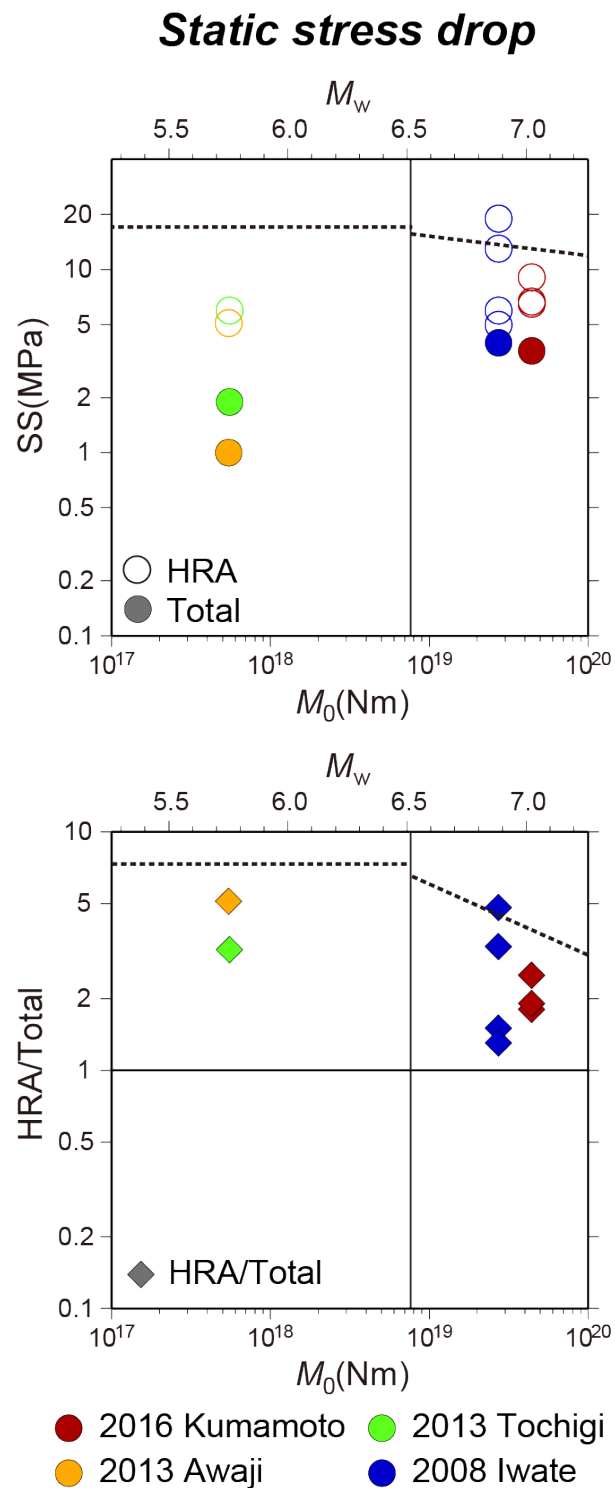


図 5.1.3-3① 検討対象地震の HRA 領域，全体領域での平均静的応力降下量，全体領域に対する HRA 領域でのパラメータ値の比．上図の破線は，強震動予測レシピで扱われる関係式から計算したアスペリティの実効応力と地震モーメントの関係，下図の破線は，その実効応力と断層全体領域での平均応力降下量の比 (S/S_a に対応) である．

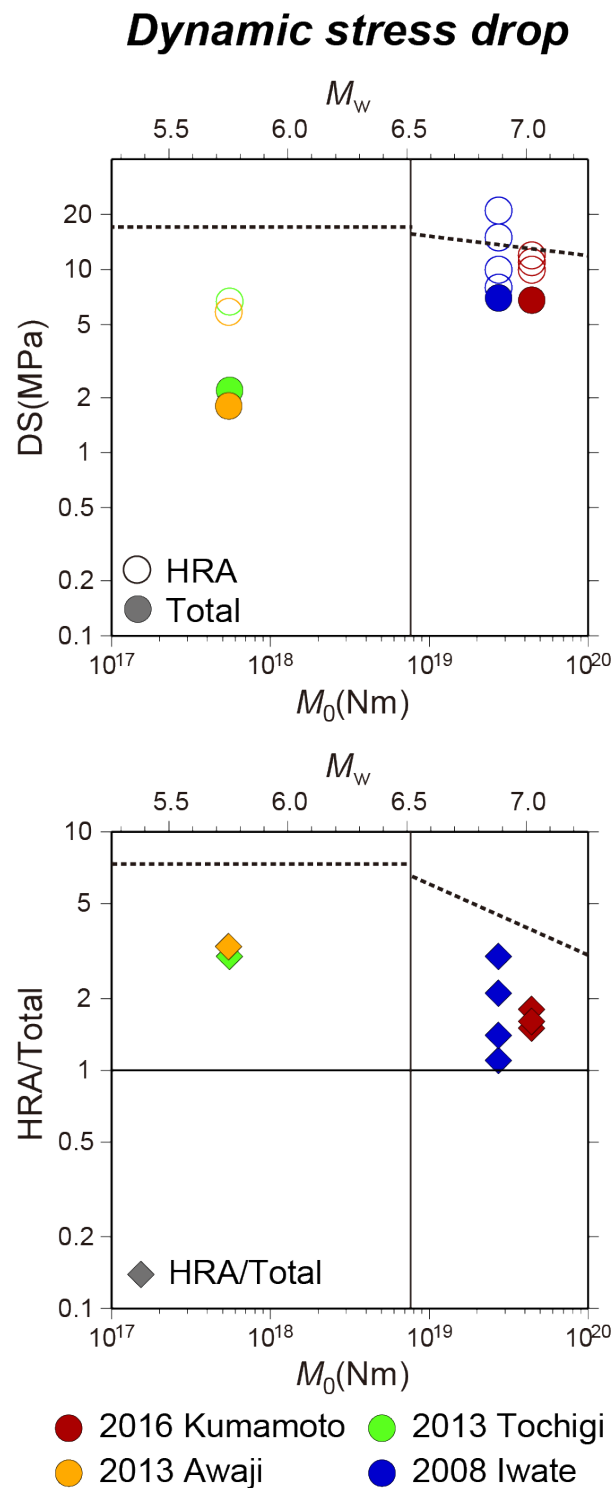


図 5.1.3-3② 検討対象地震の HRA 領域, 全体領域での平均動的応力降下量. 全体領域に対する HRA 領域でのパラメータ値の比. 上図の破線は, 強震動予測レシピで扱われる関係式から計算したアスペリティの実効応力と地震モーメントの関係, 下図の破線は, その実効応力と断層全体領域での平均応力降下量の比 (S/S_a に対応) である.

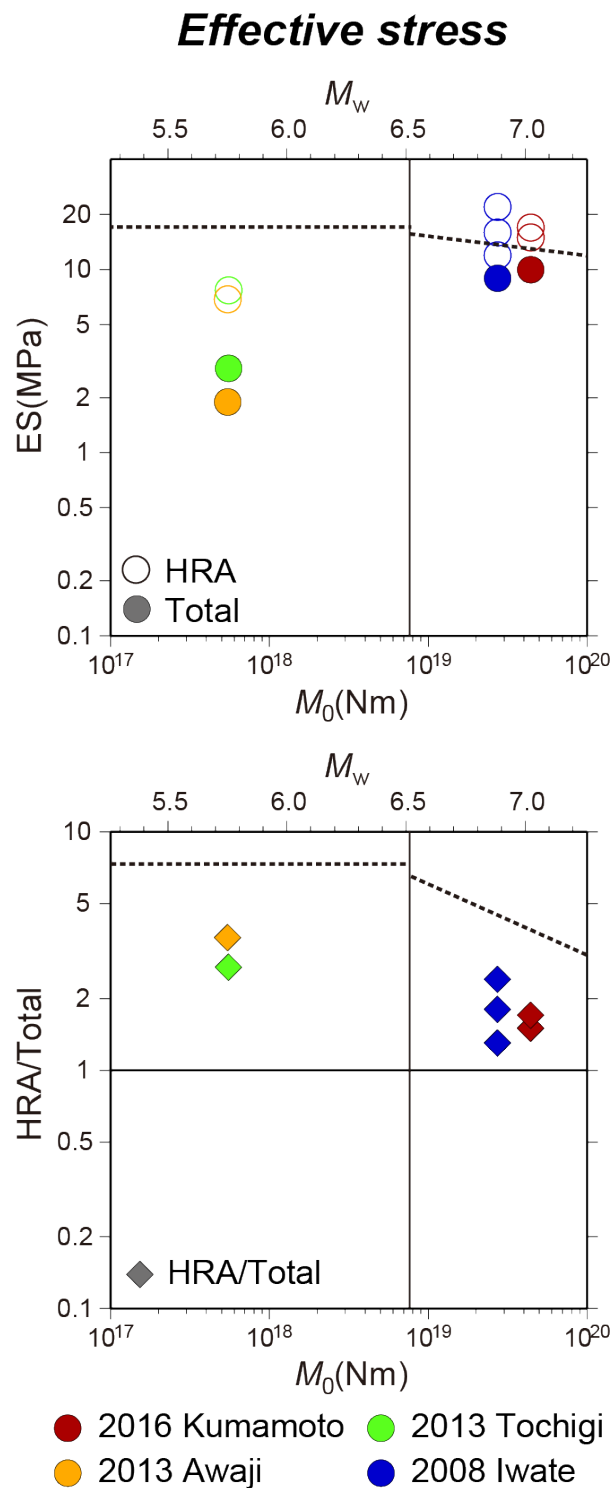


図 5.1.3-3③ 検討対象地震の HRA 領域，全体領域での平均実効応力．全体領域に対する HRA 領域でのパラメータ値の比．上図の破線は，強震動予測レシピで扱われる関係式から計算したアスペリティの実効応力と地震モーメントの関係，下図の破線は，その実効応力と断層全体領域での平均応力降下量の比 (S/S_a に対応) である．

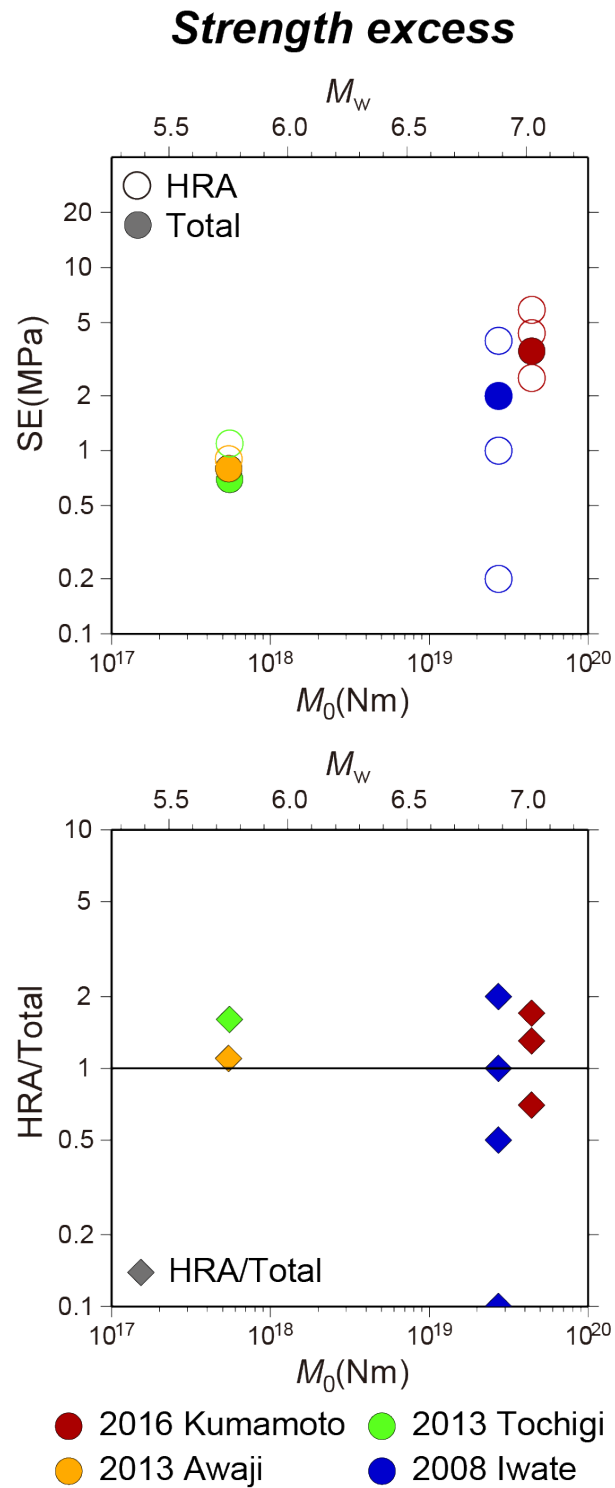


図 5.1.3-3④ 検討対象地震の HRA 領域，全体領域での平均破壊強度．全体領域に対する HRA 領域でのパラメータ値の比．

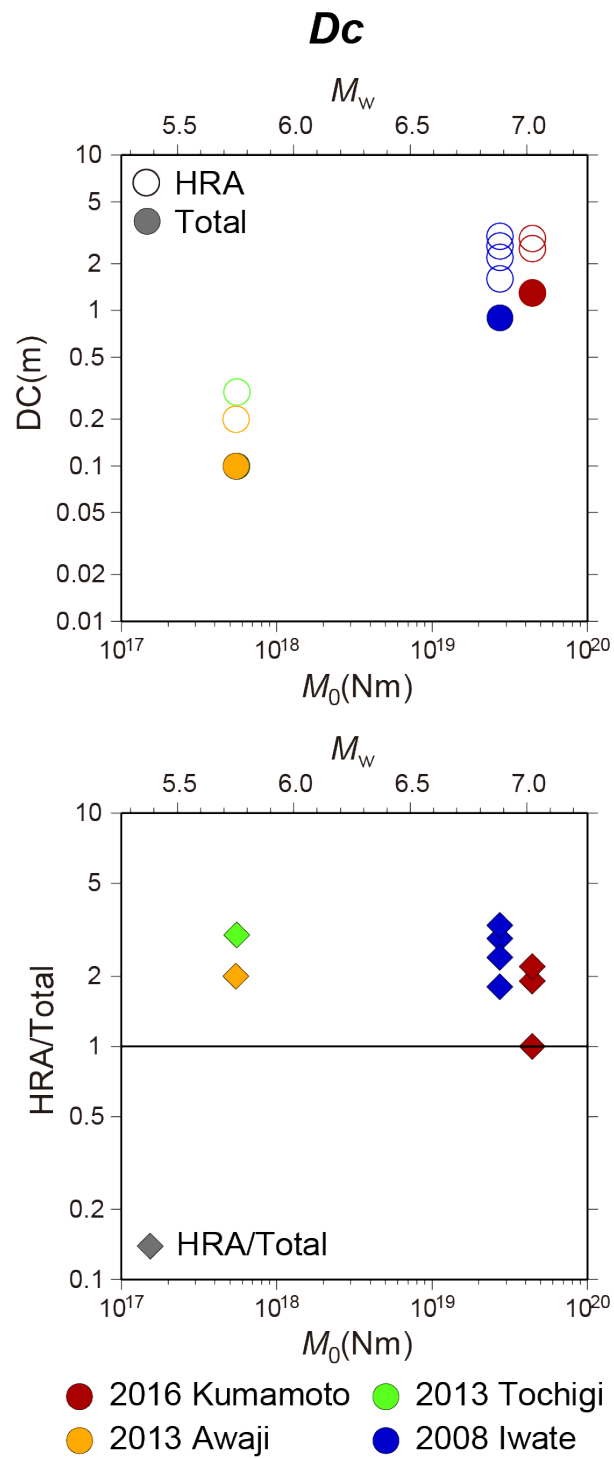


図 5.1.3-3⑤ 検討対象地震の HRA 領域, 全体領域での平均 D_c . 全体領域に対する HRA 領域でのパラメータ値の比.

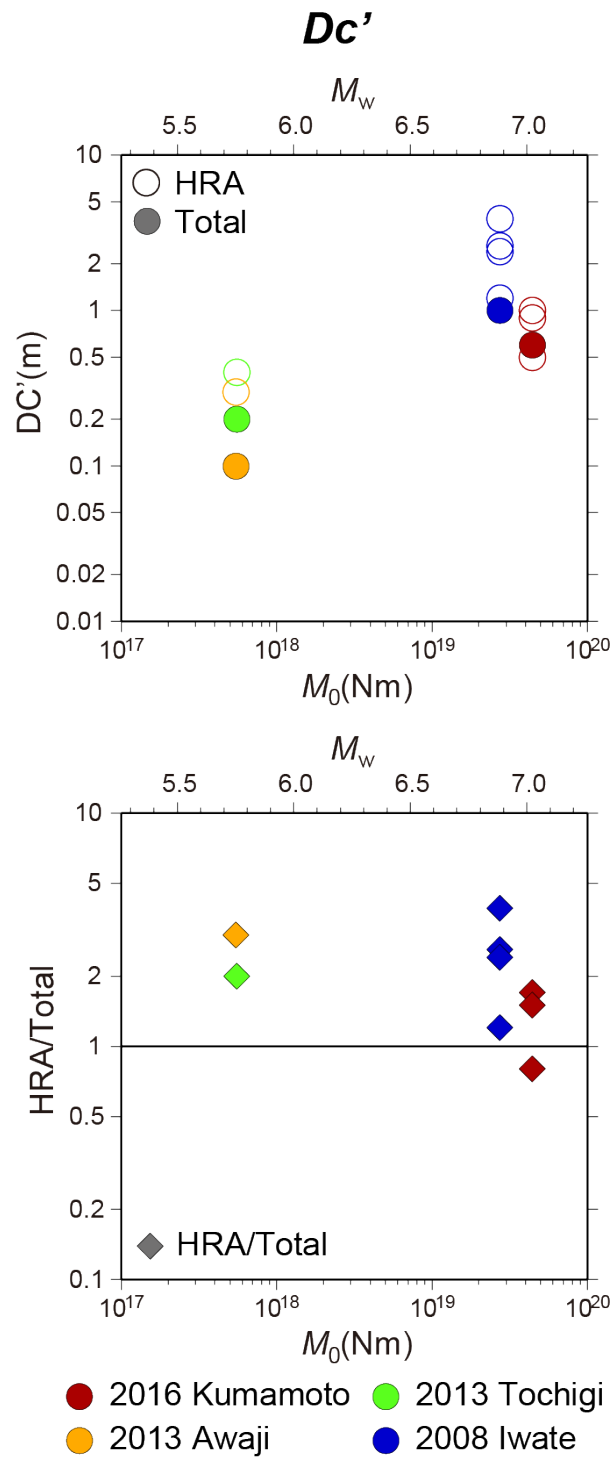


図 5.1.3-3⑥ 検討対象地震の HRA 領域, 全体領域での平均 D_c' . 全体領域に対する HRA 領域でのパラメータ値の比.

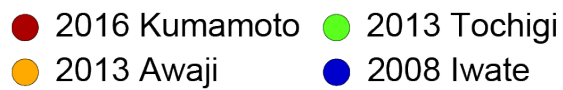


図 5.1.3-3⑦ 検討対象地震の HRA 領域，全体領域での平均破壊エネルギー，全体領域に対する HRA 領域でのパラメータ値の比.

⑧ 参考文献

- Irikura, K., and Miyake, H. (2011), Recipe for predicting strong ground motion from crustal earthquake scenarios, *Pure Appl. Geophys.*, 168(2011), 85-104.
- Mikumo, T., Olsen, K. B., Fukuyama, E., and Yagi, Y. (2003), Stress-breakdown time and slip-weakening distance inferred from slip-velocity functions on earthquake faults. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 93, 264-282.
- 染井一寛・宮腰 研・入倉孝次郎 (2014), 2013 年2 月25 日栃木県北部の地震の震源モデルと強震動シミュレーション, 日本地球惑星科学連合2014年大会講演予稿集, SSS23-P19.
- 染井一寛・宮腰 研・倉橋 奨 (2015), 強震記録に基づく 2013 年 4 月 13 日淡路島付近の地震 (Mw5.8) の震源モデルの推定, 日本地震学会 2015 年秋季大会講演予稿集, S15-P05.
- 吉田邦一・宮腰 研・染井一寛 (2016), 運動学的震源モデルから求めた 2008 年岩手・宮城内陸地震の動力学パラメータ, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, SSS25-P03
- Yoshida, K., Miyakoshi, K., Somei, K., and Irikura, K. (2017), Source process of the 2016 Kumamoto earthquake (Mj7.3) inferred from kinematic inversion of strong motion records, *Earth, Planets, and Space*, in revision.