

3. 動力学シミュレーションによる震源特性化の検討

2 章では強震動観測データを活用し、国内外の内陸型地震及び海溝型地震における震源断層パラメータのスケーリング則を検討した。ここで、これまでの検討対象地震の規模は Mw7.0 以下が多いこと、特に、震源断層が地表に現れた地震の数が少ないことを踏まえ、本項目では、動力的知見を活用し、特性化震源モデルの構築手法の高度化を目的とする。

3.1 地震発生サイクルの動力学シミュレーション

Mw7.0 程度を対象に、縦ずれタイプの内陸型地震を対象に、地震発生サイクルの動力学シミュレーションを行い、得られた動力的震源モデルから抽出した各パラメータの相関性を検討するとともに、固有地震の震源スケーリング則との比較を行った。

3.1.1 解析手法および解析モデル

地震発生サイクルは摩擦すべりと結合した弾性方程式を解く境界要素法によって数値的に解かれる。断層は均質媒質に埋め込み、断層運動は Dieterich (1979) および Ruina (1983) により提案されたすべり速度状態依存摩擦法則 (the Rate and State Dependent Friction Law; RSF) を用いた (図 3-1)。解析プログラムは Luo *et al.* (2017) による準動的地震シミュレータを用いた。

Mw7.0 程度の地震を想定するため、断層長さ $L=60$ km、断層幅 $W=28$ km の断層面を設定した。傾斜角は 45 度とした。RSF に関するモデル化、パラメータを図 3-2 および表 3-1 に示す。

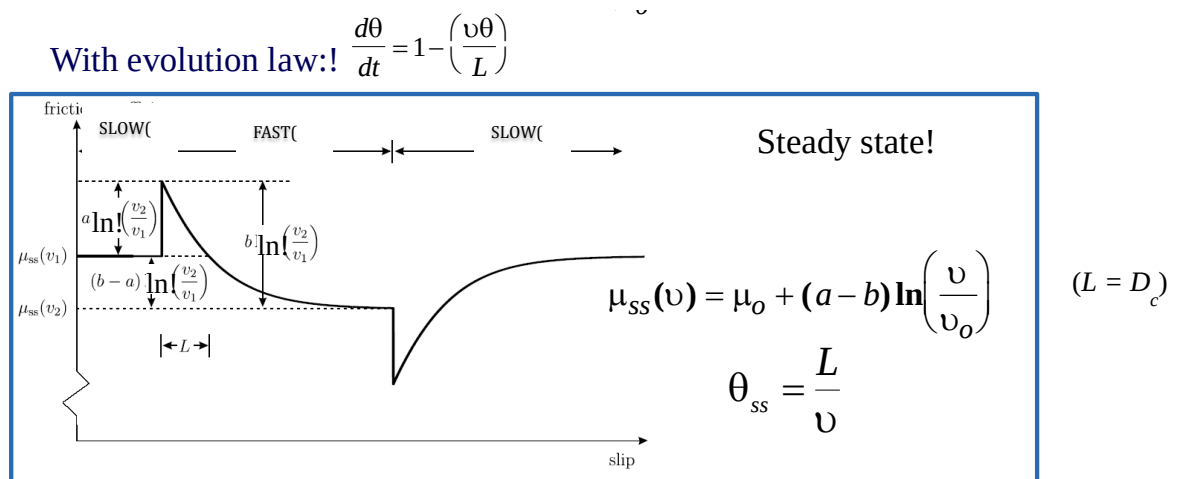
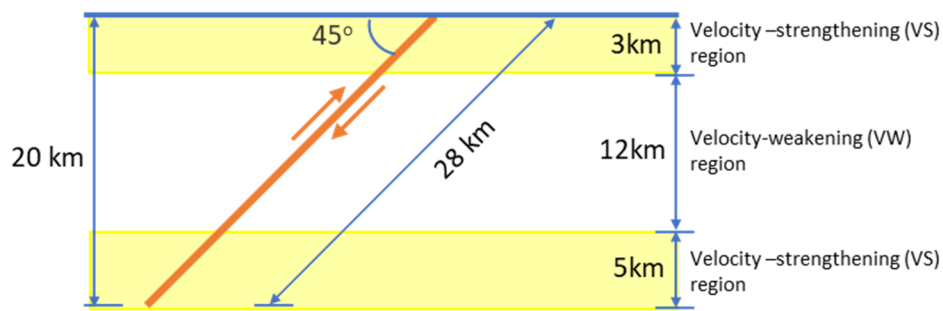
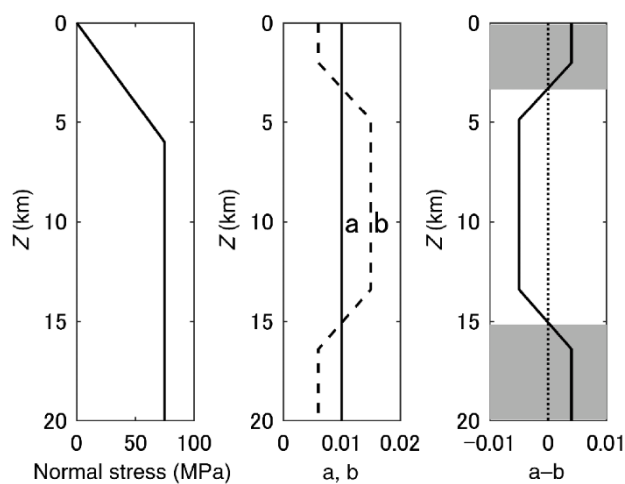


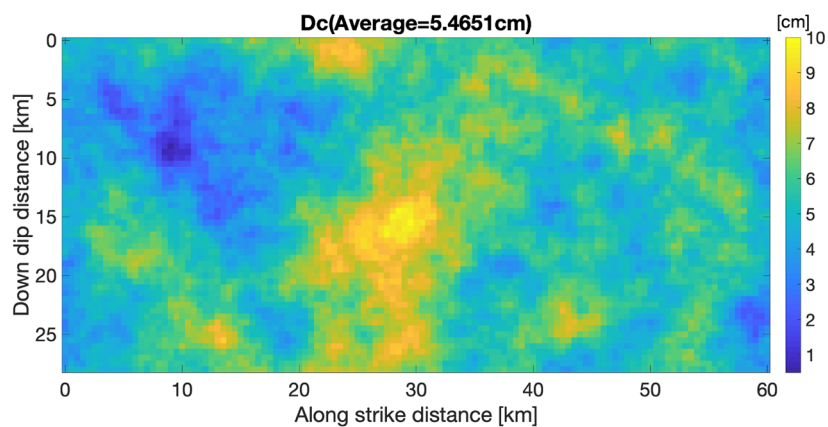
図 3-1 the Rate and State Dependent Friction Law (RSF) の概念図



(a) 断層形状



(b) 法線応力、パラメータ a および b の深さ分布 (Galvez *et al.*, 2021)



(c) D_c 分布 von Karman 型 相関距離 8.0 km

図 3-2 設定した解析モデル

表 3-1 解析に使用したパラメータ

Symbol	Parameter definition	Value (Units)
ρ	Density	2,700 kg/m ³
V_s	Shear (S) wave velocity	3,500 m/s
σ_n	Effective normal stress	Variable
a	Rate and state parameter	Variable
b	Rate and state parameter	Variable
D_c	Characteristic slip distance	Variable
V_{pl}	Plate rate (loading rate)	3.8×10^{-9} m/s (5 mm/yr)
v_o	Reference slip rate	10^{-6} m/s
μ_o	Reference friction coefficient	0.6
c	cohesive force	0
Δx	Grid size for fault discretization	250 m

3.1.2 解析結果

期間 1000 年に対する地震発生サイクルシミュレーションを実施し、 $M_w 5.8$ 以上の 6 つのイベントが抽出された（図 3-3）。

解析結果から抽出した各イベントのパラメータを表 3-2 に示す。なお、断層面積およびアスペリティ面積の抽出のクライテリアは *Somerville et al. (1999)* に準じた。各イベントのすべり量分布、応力降下量分布を図 3-4～図 3-9 にそれぞれ示す。図中黒点線がトリミングした領域、白線内がアスペリティとして抽出した領域を表す。

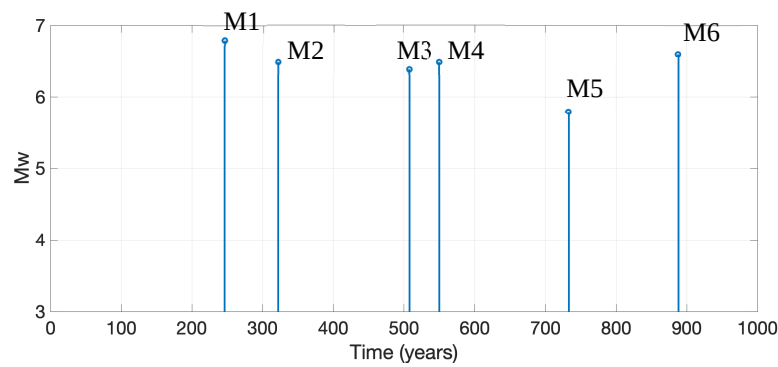


図 3-3 抽出した 6 イベントの発生年

表 3-2 抽出した 6 イベントのパラメータ

Parameters	M1	M2	M3	M4	M5	M6
M _w	6.8	6.5	6.4	6.5	5.8	6.6
M ₀ (Nm)	1.90E+19	6.10E+18	4.50E+18	7.10E+18	8.10E+17	9.50E+18
Hypo along strike (km)	30	35	49	22	36	15
Hypo along dip (km)	20	20	17	18	12	18
Effective Width (km)	23.5	17	22.5	22.5	15	18
Effective Length (km)	21	23.5	27	21	16.5	21.5
Effective Area (km ²)	493.5	399.5	607.5	472.5	247.5	387
Asperity Area (km ²)	144	103	119.25	108	54	117.25
D (m)	1.09	0.43	0.23	0.43	0.09	0.69
D _{asp} (m)	2.36	1.03	0.69	1.13	0.28	1.48
D _{max} (m)	3.06	1.79	1.39	1.77	0.61	1.91
Δσ (MPa)	1.68	1	0.38	0.75	0.24	1.63
Δσ _{asp} (MPa)	8.22	4.67	2.64	4.63	1.6	6.28
Δσ _{max} (MPa)	12	12	12	11.23	6.32	12

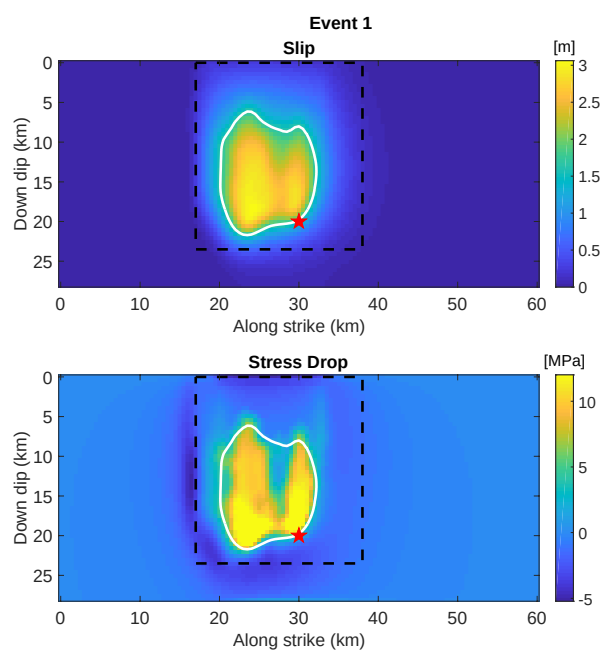


図 3-4 すべり量（上段）と応力降下量（下段） M1

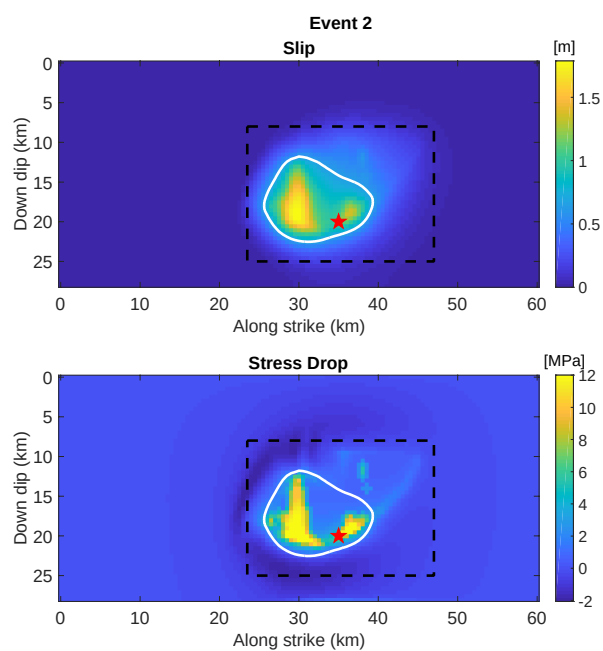


図 3-5 すべり量（上段）と応力降下量（下段） M2

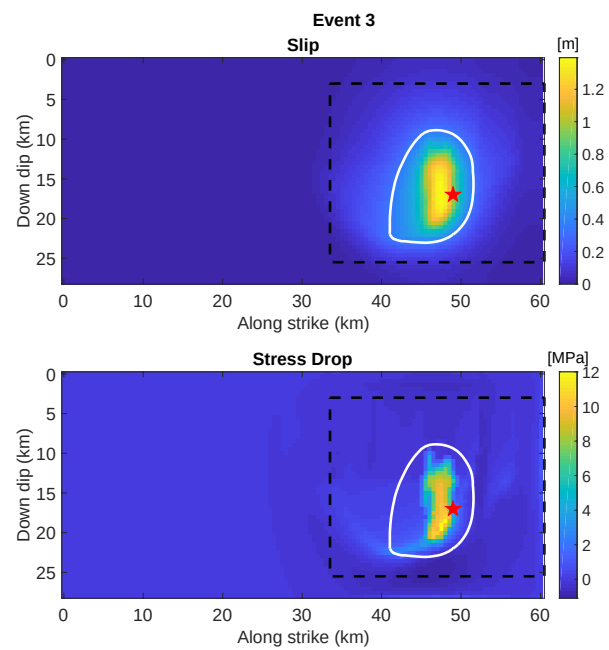


図 3-6 すべり量（上段）と応力降下量（下段） M3

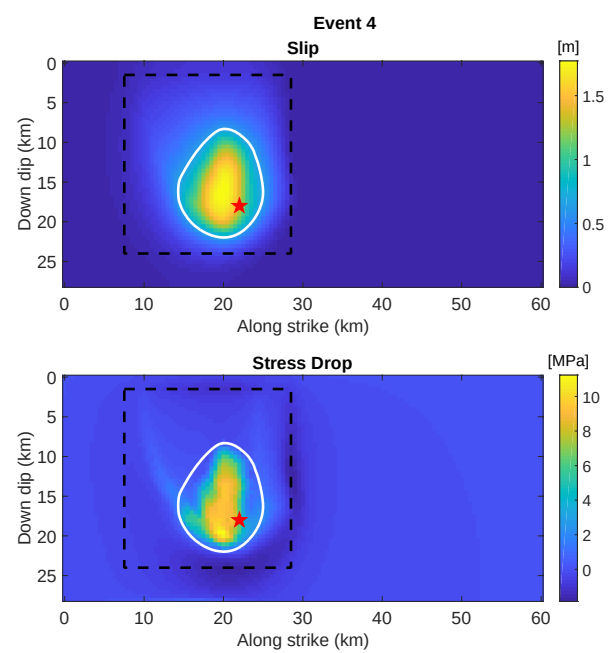


図 3-7 すべり量（上段）と応力降下量（下段） M4

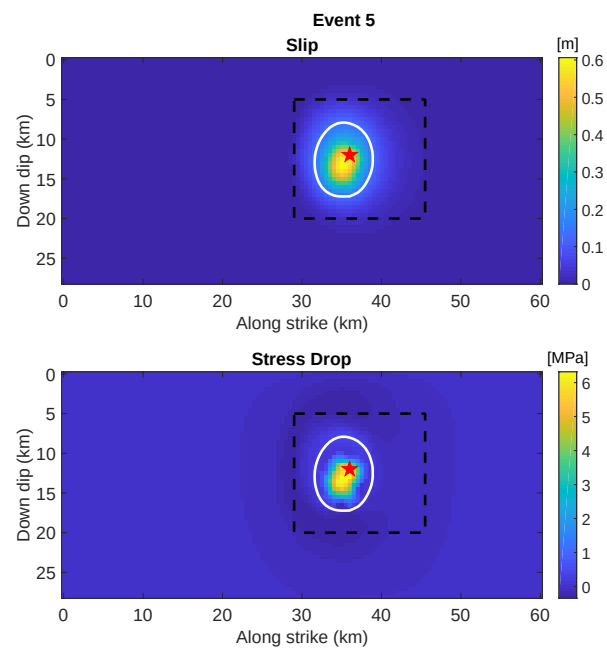


図 3-8 すべり量（上段）と応力降下量（下段） M5

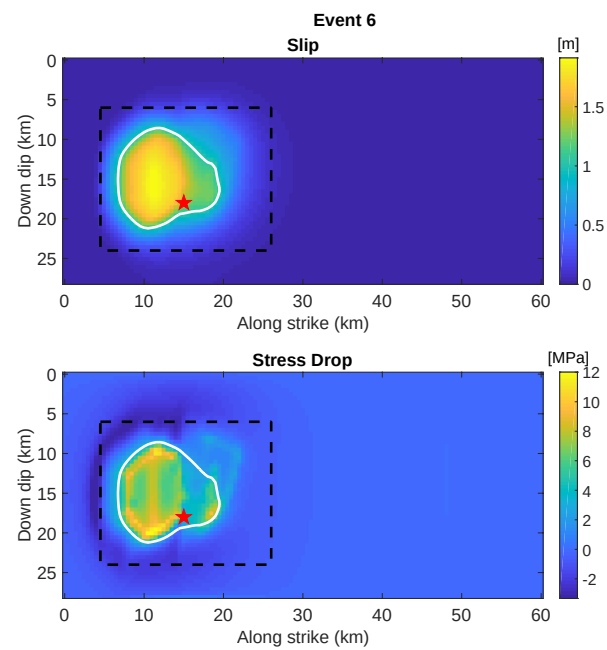


図 3-9 すべり量（上段）と応力降下量（下段） M6

3.1.3 各パラメータの相関性の検討

前項の解析結果を基に、各パラメータの相関性を検討した。

まず、図 3-10 に断層面積とアスペリティ面積を比較した。図中実線は Somerville *et al.* (1999)で示されたアスペリティ面積比 22%を表す。解析結果に基づくアスペリティ面積比は 24%であり、整合的である。

次に、図 3-11 にすべり量とアスペリティすべり量を比較した。図中実線は Somerville *et al.* (1999)で示された $D_{asp}=2.0D$ の関係を示す。解析結果についても整合的な結果が得られた。

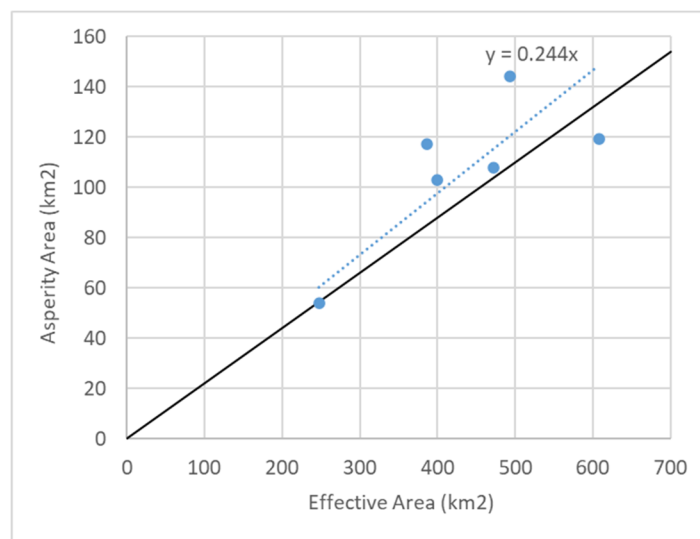


図 3-10 断層面積とアスペリティ面積の関係

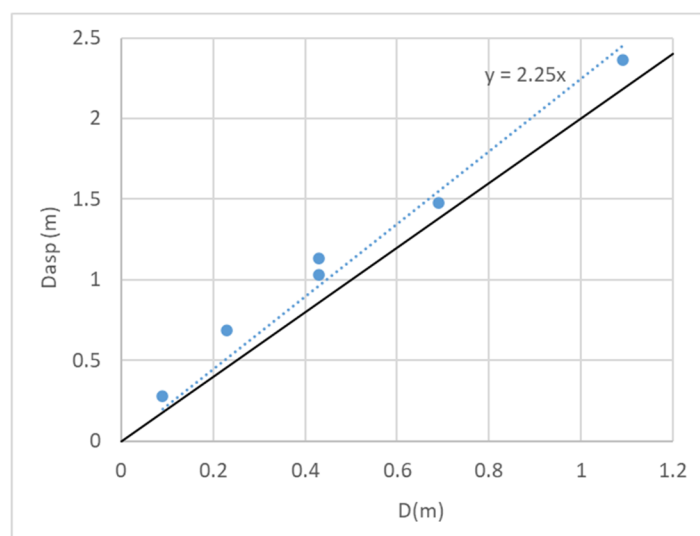


図 3-11 平均すべり量とアスペリティのすべり量の関係

3.1.4 固有地震の震源スケーリング則との比較

解析結果に基づく各イベントの地震モーメント - 断層面積の関係について、既往のスケーリング則との比較を行った（図 3-12）。本検討結果の $M_w6.5$ 以上のイベントは、既往のスケーリング則と概ね整合的である。ただし、地震規模の小さい地震は断層面積が既往研究に比べ過大となる傾向が認められる。各イベントの応力降下量は図 3-13 の通りであるが、地震規模の小さい地震について小さい値であることが確認できる。

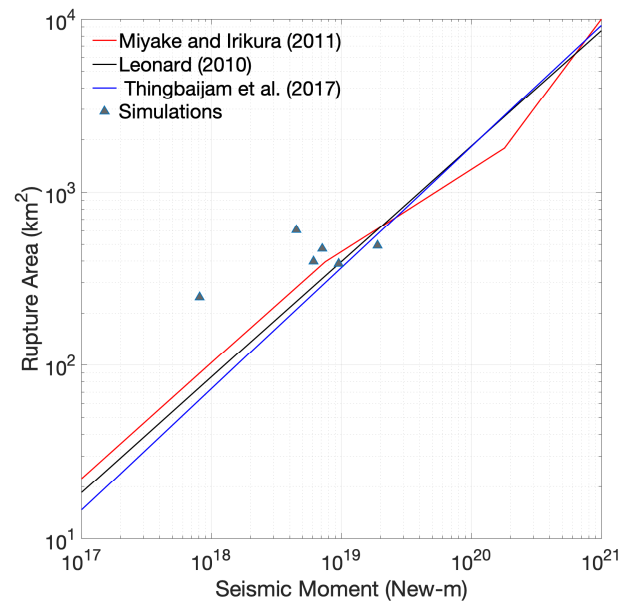


図 3-12 震源スケーリング則との比較

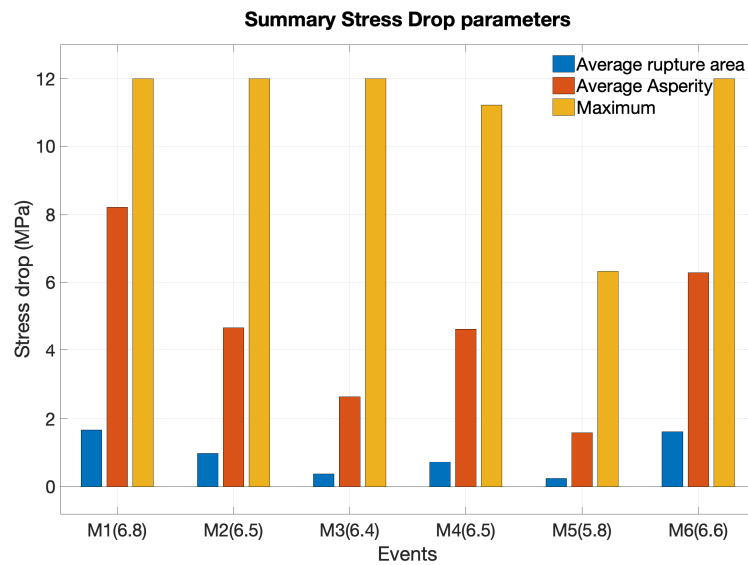


図 3-13 各イベントの応力降下量

3.2 深さ方向の不均質性を考慮した動力学シミュレーション

過去の内陸型地震または海溝型地震を 1 個選定し、応力降下量等の動力学パラメータの深さ方向での不均質性を考慮した動力学シミュレーション（5 ケース程度）を実施し、得られた動力学震源モデルから震源パラメータを抽出するとともに、深部断層と浅部断層、それぞれにおけるすべり時間関数の特徴を分析し、モデル化を行うこととした。

本検討での対象地震は、2016 年熊本地震（Mw7.0）をモデル地震として動力学シミュレーションモデルを構築し、破壊の進展に対してどのような影響が表れるかを調べるために、SMGA の配置および破壊開始点を変えた場合を設定し、計 6 ケースの計算を実施し、その結果について比較・検討を行った。

3.2.1 熊本地震の動力学シミュレーションモデル

深さ方向の不均質性の比較検討ケースの基本となるケースとして、2016 年熊本地震をモデルに動力学シミュレーションモデルを構築した（シナリオ 1）。解析に用いる 1 次元速度構造モデルは KiK-net 益城(KMMH16)の PS 検層データおよび J-SHIS 深部構造モデル V3.2 を参考に、表 3-3 のとおり設定した。断層の傾斜角は 90 度、断層長さ 45 km、断層幅 18 km とした。図 3-15 に設定した解析モデルの概念図を示す。本検討による解析モデルでは 0-3 km に弱層を設定した。また、図 3-16 に応力降下量の深さ方向の変化を示す。動力学シミュレーションの解析手法は Pitarka and Dalguer (2003)を用いた。

図 3-17 では司・翠川 (1999)と解析結果による最大速度の比較を示す。解析結果は司・翠川 (1999)と概ね整合しており、本検討の解析モデルの妥当性を確認した。

図 3-18 に示す位置によるすべり速度時間関数の違いを比較から、S4～S6 の SMGA 付近では浅いところ、深いところと比べ、急な立ち上がりとなっていることが確認できる。一方で、S7～S9 の深いところでは緩やかな立ち上がりとなっている。

表 3-3 1 次元速度構造

Layer	Depth (m)	V _P (m/s)	V _S (m/s)	Density (g/cm ³)	Q _p	Q _s
1	150	2,000	600	1.9	100	50
2	550	2,600	1,200	2.15	150	75
3	1,900	5,000	2,700	2.5	200	100
4	7,000	5,500	3,100	2.65	300	150
5	20,000	6,000	3,400	2.75	400	200

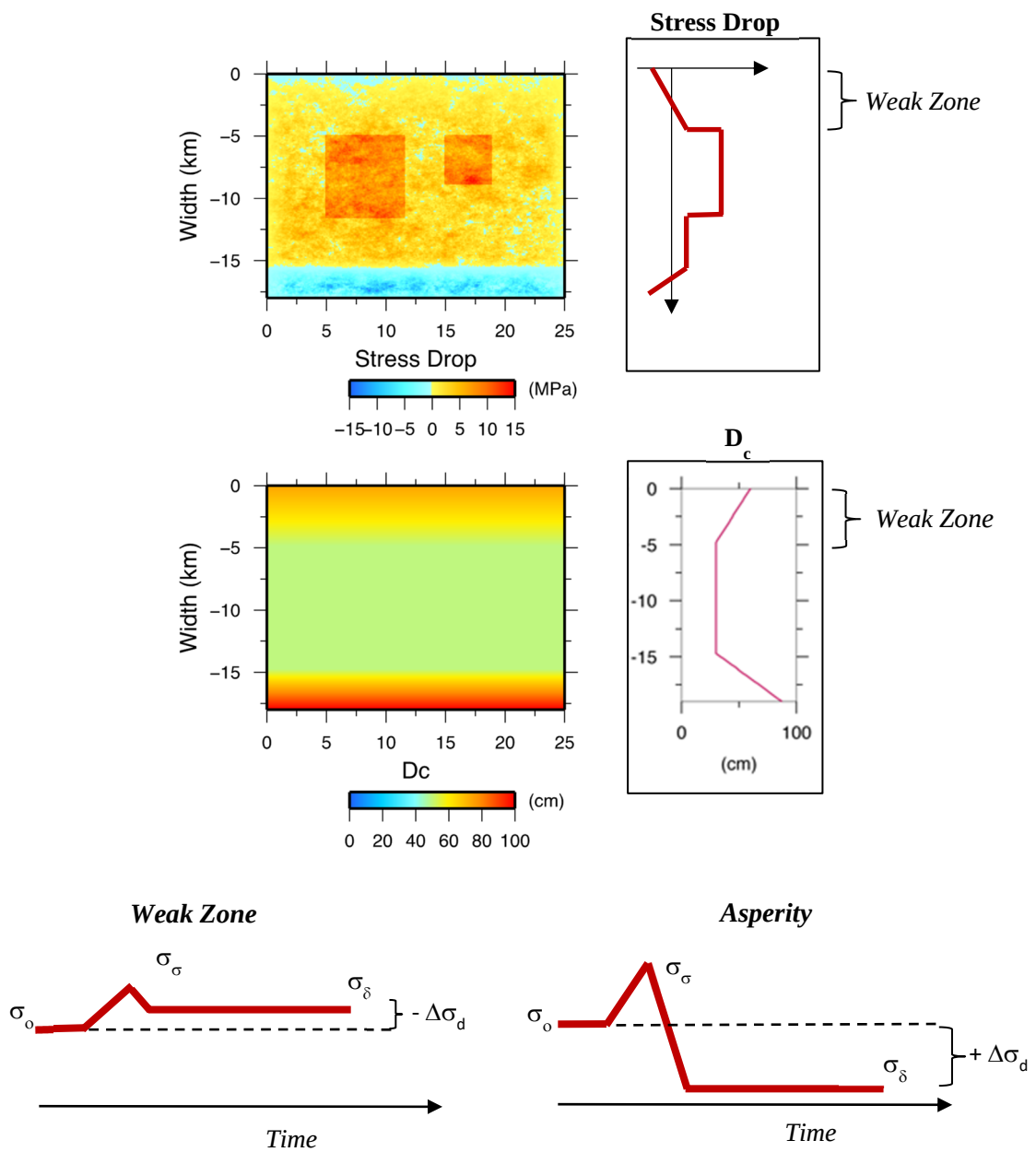


図 3-14 弱層およびアスペリティの応力降下、 D_c の概念図

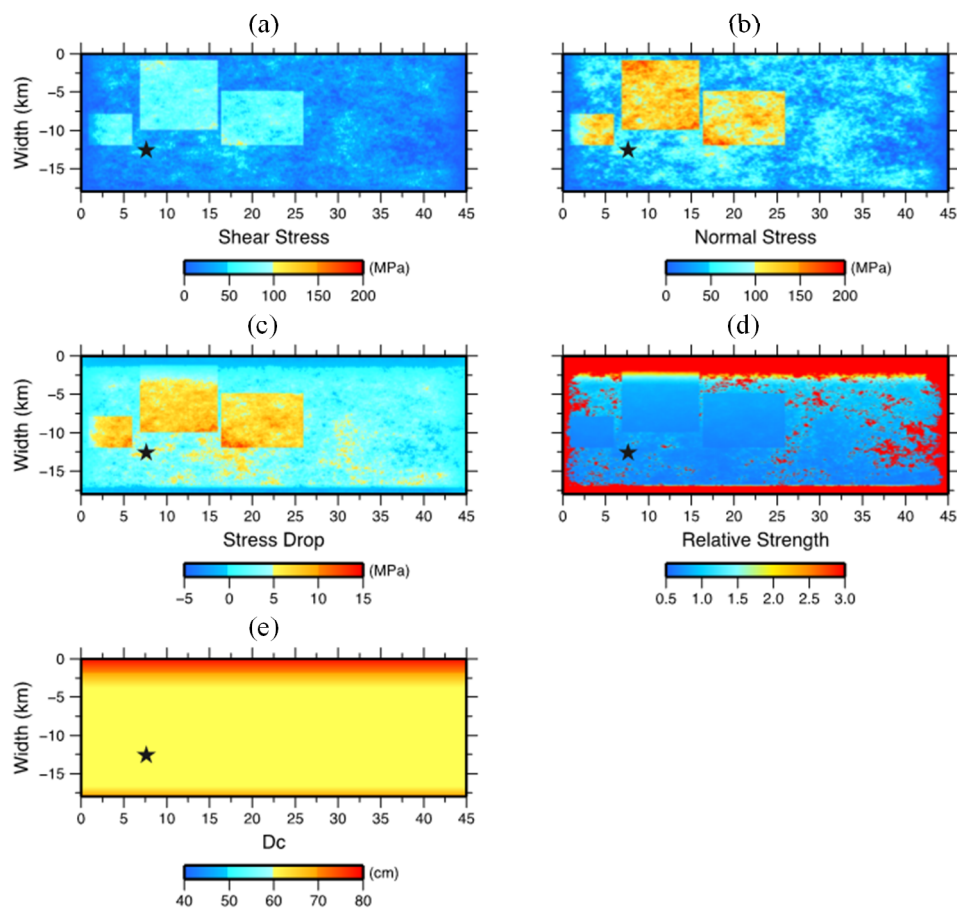


図 3-15 解析モデル (シナリオ 1)

a. せん断応力, b. 垂直応力, c. 応力降下量, d. 相対強度, e. Dc

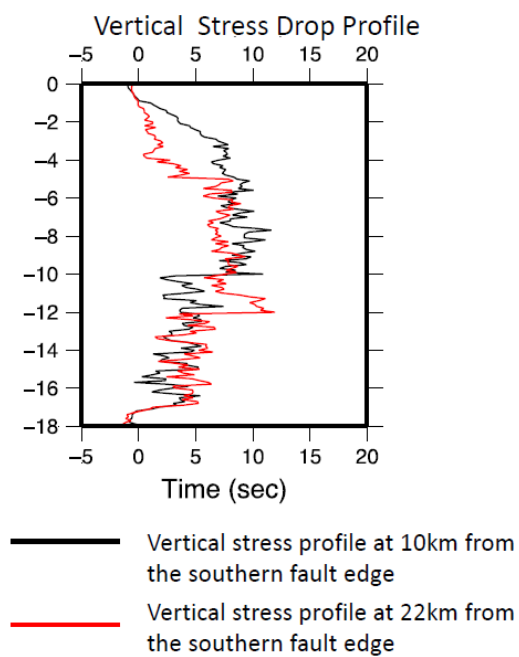


図 3-16 設定した応力降下量の深さ方向の不均質

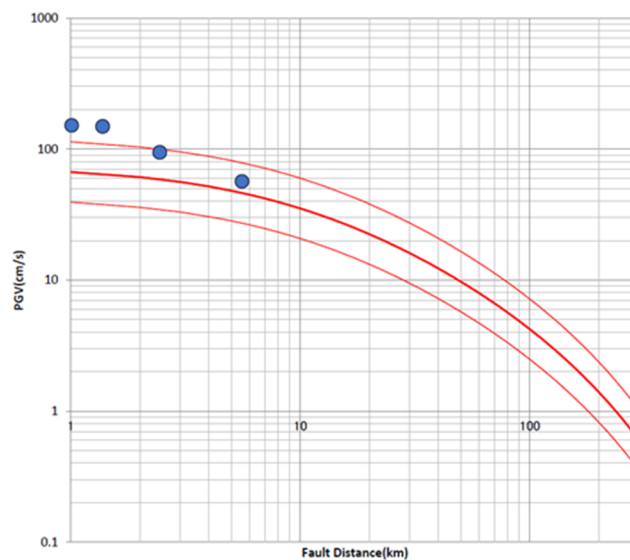
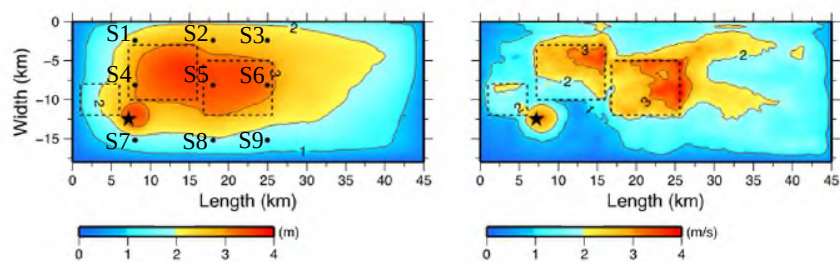


図 3-17 司・翠川 (1999) と解析結果の最大速度



Slip Rate Time Histories at Selected Locations S_i

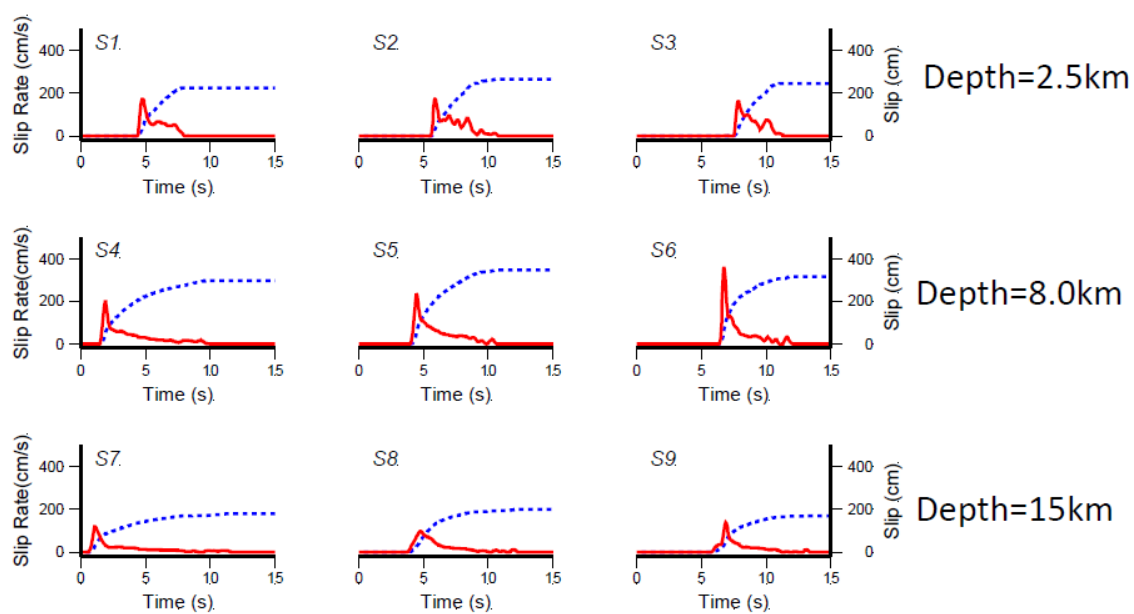


図 3-18 すべり速度時間関数の比較

3.2.2 複数シナリオの震源パラメータ抽出およびすべり速度時間関数の分析

前述のシナリオ 1 を基本に、SMGA 配置および破壊開始点を変更した 5 ケースを設定した。設定した各シナリオの SMGA 配置および破壊開始点を図 3-19 に示す。

各シナリオの計算結果による最終すべり量、最大すべり速度、破壊開始時刻、応力降下量の比較を図 3-20 に示す。最大すべり速度は、破壊開始点から離れた側の SMGA 端部付近で大きくなっている傾向がみられる。同様の傾向として、破壊時刻についても SMGA 端部付近で早くなる傾向が若干みられる。

Somerville *et al.* (1999) の規範に従って、領域のトリミングおよび SMGA (アスペリティ) の抽出を行った結果を図 3-21～図 3-26 に示す。これらの図から、各シナリオに共通して、事前に応力降下量を大きく与えた領域付近 (SMGA) ですべり量が大きくなっていることが確認できる。ただし、3 つの SMGA のうち、範囲が小さい左の SMGA についてはすべり量が他の 2 つと比べて小さい。

すべり速度時間関数のシナリオごとの比較を図 3-27 に示す。シナリオによって多少の違いがあるが、基本的な傾向は図 3-18 と同様である。図 3-28 に応力降下量が 0 MPa 程度となる深さ 1 km のすべり速度時間関数を確認したが、その傾向は深さ 8.5 km と深さ 2.5 km の傾向と整合的である。また、図 3-29 には弱層と SMGA のすべり速度時間関数のフーリエスペクトルを示す。低周波数側では弱層と SMGA は同程度であるが、高周波数側では弱層の振幅が小さくなることが確認できる。

深部断層と浅部断層のモデル化について、図 3-27 のすべり速度時間関数を対象に、規格化 Yoffe 関数の τ_R および τ_S をグリッドサーチすることによりフィッティングを検討した (図 3-30)。グリッドサーチを試算した結果、すべり速度時間関数のライズタイムを適切に説明するためには、前処理として平滑化をした方が良いことが分かった。そこで、3 点移動平均を 100 サイクル適用した波形をグリッドサーチの対象とした。100 サイクルという数値は平滑化の度合いを確認しながら試行錯誤的に決定した。浅部断層は 1.0 km と 2.5 km、深部断層は SMGA 付近の 8.0 km と SMGA より深い 15.0 km の計 4 深度で整理した。各シナリオで推定された τ_R 、 τ_S 及び最大速度を表 3-4 から表 3-9 に示す。また、併せて平均的な τ_R 、 τ_S 及び最大速度を表 3-10 から表 3-12 に示す。

図 3-31 から図 3-36 には各シナリオのすべり速度時間関数のフィッティング結果を示す。 τ_R については浅部断層の方が小さく、深部断層の深さ 8.0 km が最も大きい結果となった。 τ_S については深部断層の 8.0 km が最も小さく、浅部断層の深さ 1.0 km が最も大きい結果が得られた。表 3-10 から表 3-12 の平均値を用いた場合の規格化 Yoffe 関数を図 3-37 に示す。浅部断層の深さ 1.0 km ではピーク時間が他の深さより後に来ておりすべり終わりも早い。逆に、深さ 8.0 km ではすべり速度時間関数の立ち上がりが最も急であることが表現されている。

すべり速度時間関数等に関して、最終すべり量、最大すべり速度、破壊伝播速度について、破壊の進展に対する影響を調べるため、解析位置と各パラメータについての関係について

調べた。図 3-38～図 3-40 に各 SMGA の破壊開始点からの距離に対する各パラメータの値をプロットした。図中のプロットについて、赤は左の SMGA、青は中央の SMGA、緑は右の SMGA を表している。このうち、左の SMGA については、残りの SMGA と比べ断層端に近く、領域も小さいことにより、残りの 2 つの SMGA との特徴が異なっている場合があり、主に中央および右の SMGA に着目した。最終すべり量については、破壊開始点からの距離に対して負の相関が見られるが、断層端ではすべり量が 0 に収束していくための影響と考えられる。最大すべり速度については、中央および右の SMGA について、概ね正の相関が見られる。この特徴は破壊の進展に伴って、すべり速度が大きくなるという傾向を表しているものと考えられる。破壊伝播則については、中央の SMGA は正の相関がある程度認められるが、右の SMGA ではその傾向が弱い。

すべり速度時間関数のモデル化の検討として、前述の破壊の進展に対する各パラメータとの関係の分析結果から、SMGA の破壊開始点からの距離と最大すべり速度の関係に着目し、その傾きについて各シナリオの結果と平均値を整理した（図 3-41）。中央および右の SMGA の傾きにバラつきは見られるものの、平均値は同程度との結果が得られた。

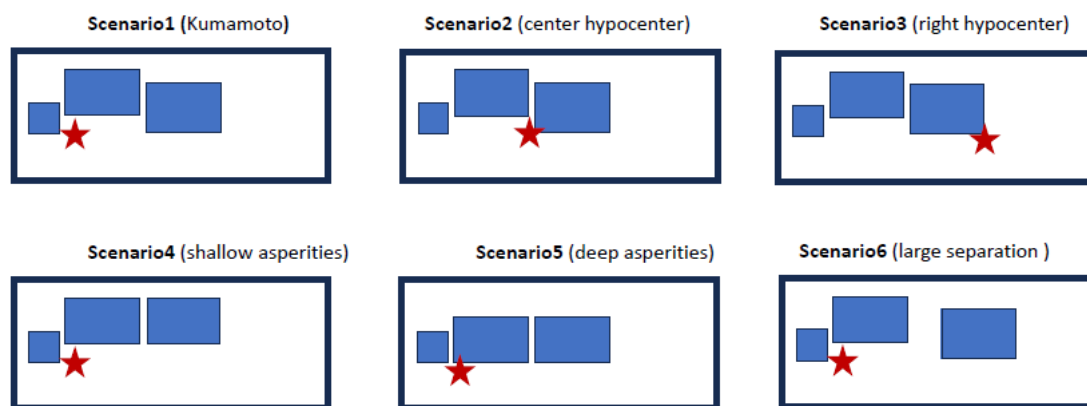


図 3-19 SMGA 配置、破壊開始点を変更した解析ケース

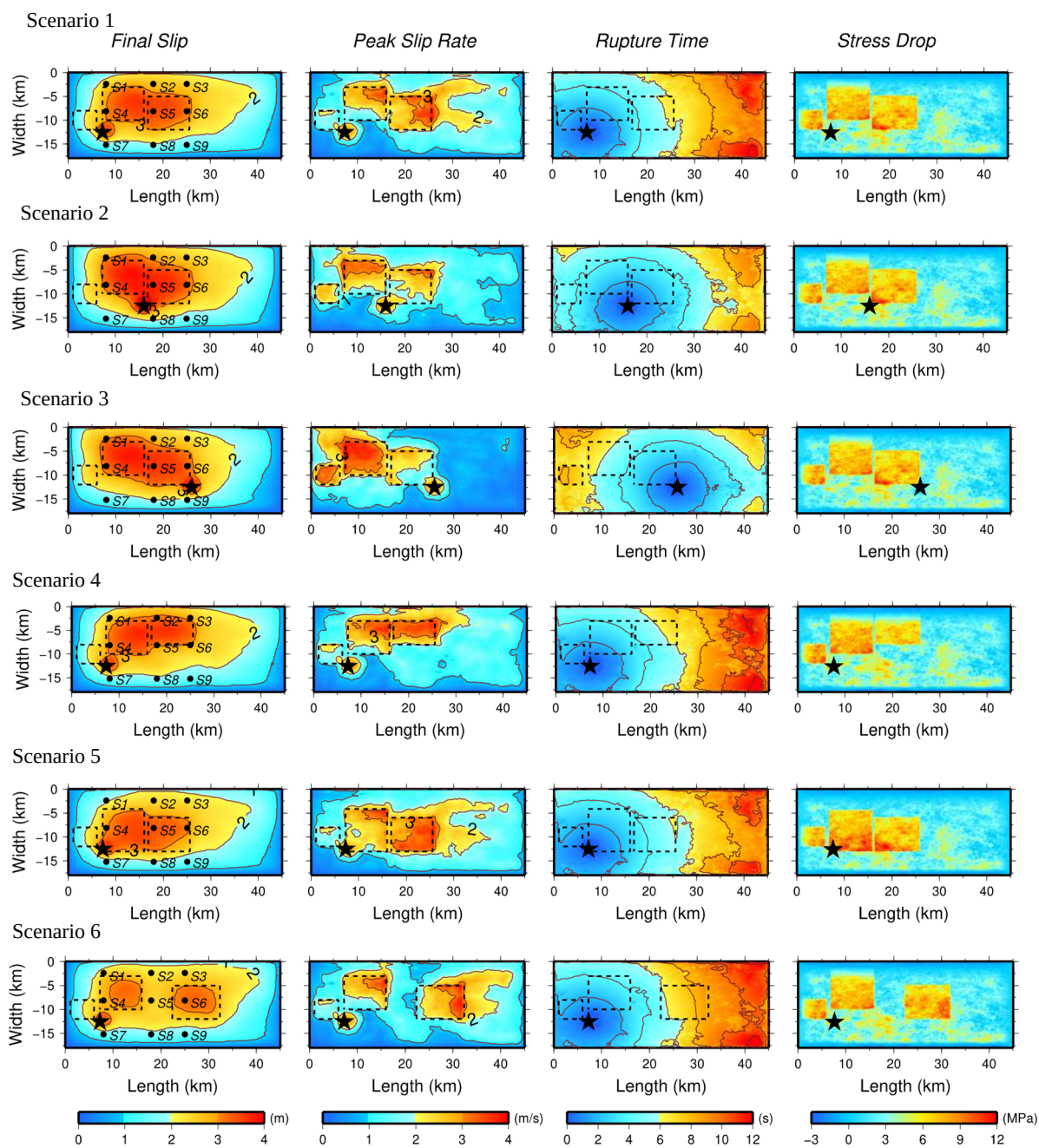


図 3-20 各シナリオの計算結果の比較
最終すべり量、最大すべり速度、破壊開始時刻、応力降下量

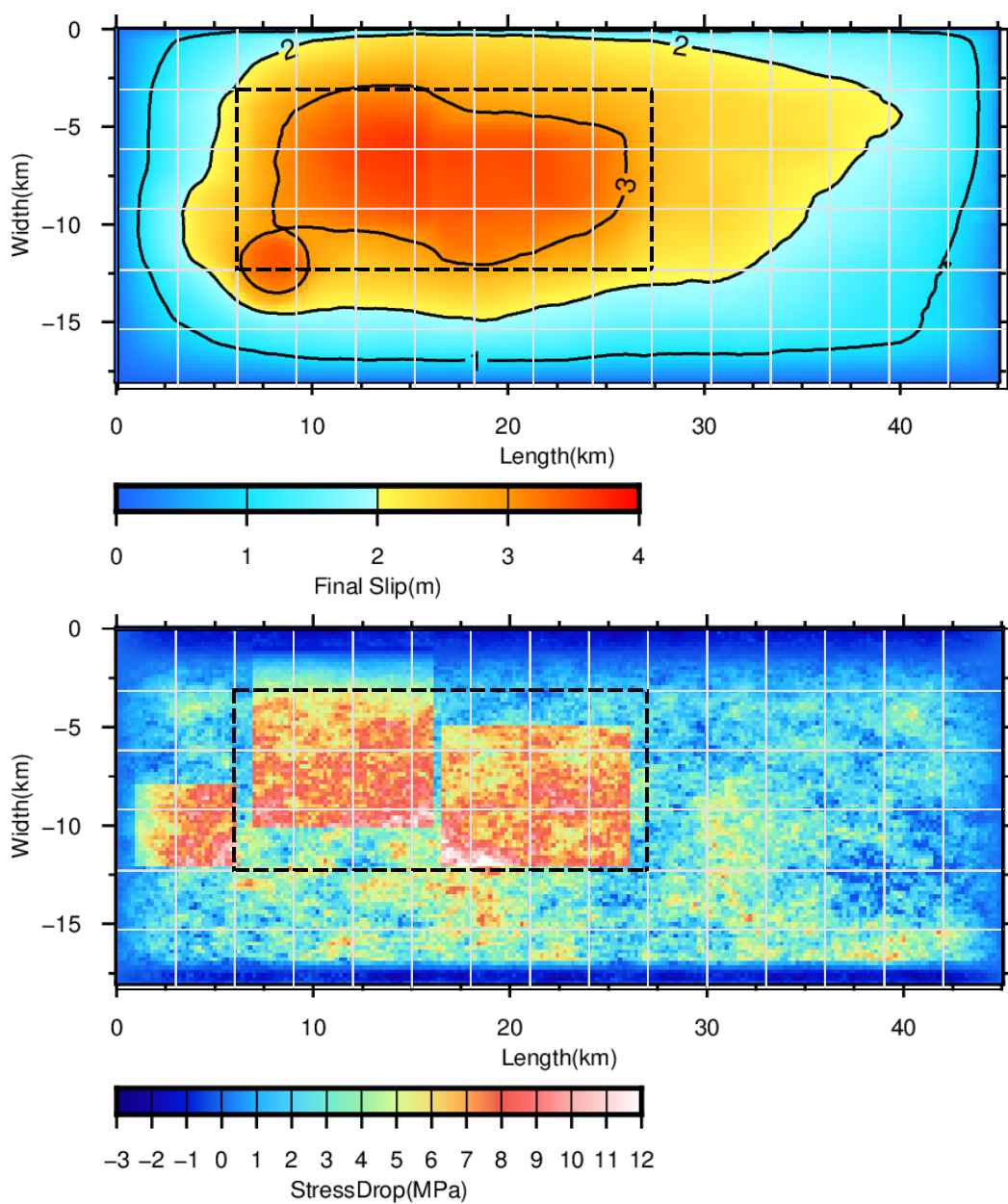


図 3-21 トリミングした領域（灰色塗りつぶし）と抽出したアスペリティ（黒点線）
シナリオ 1
※トリミング無し

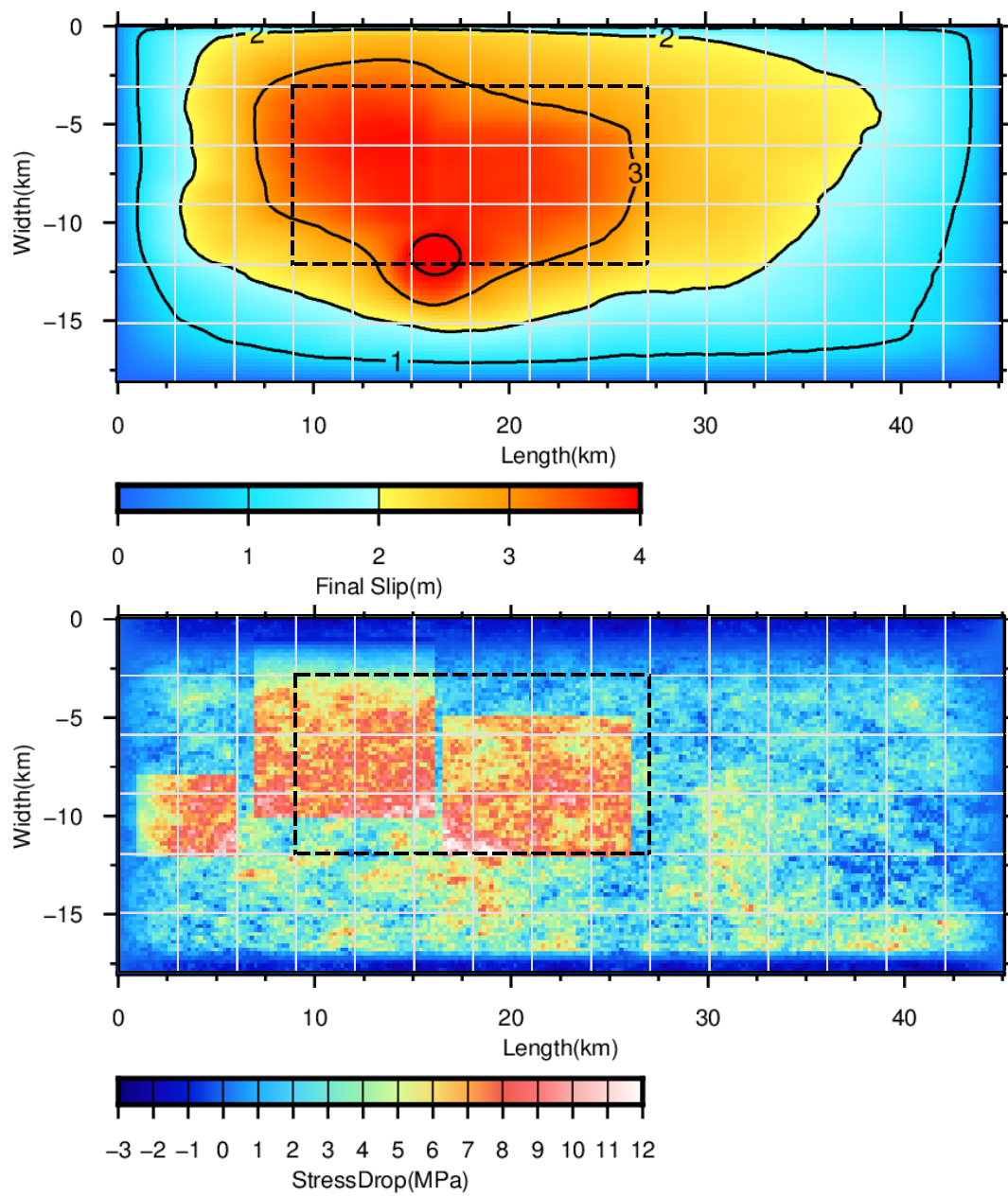


図 3-22 トリミングした領域（灰色塗りつぶし）と抽出したアスペリティ（黒点線）
シナリオ 2
※トリミング無し

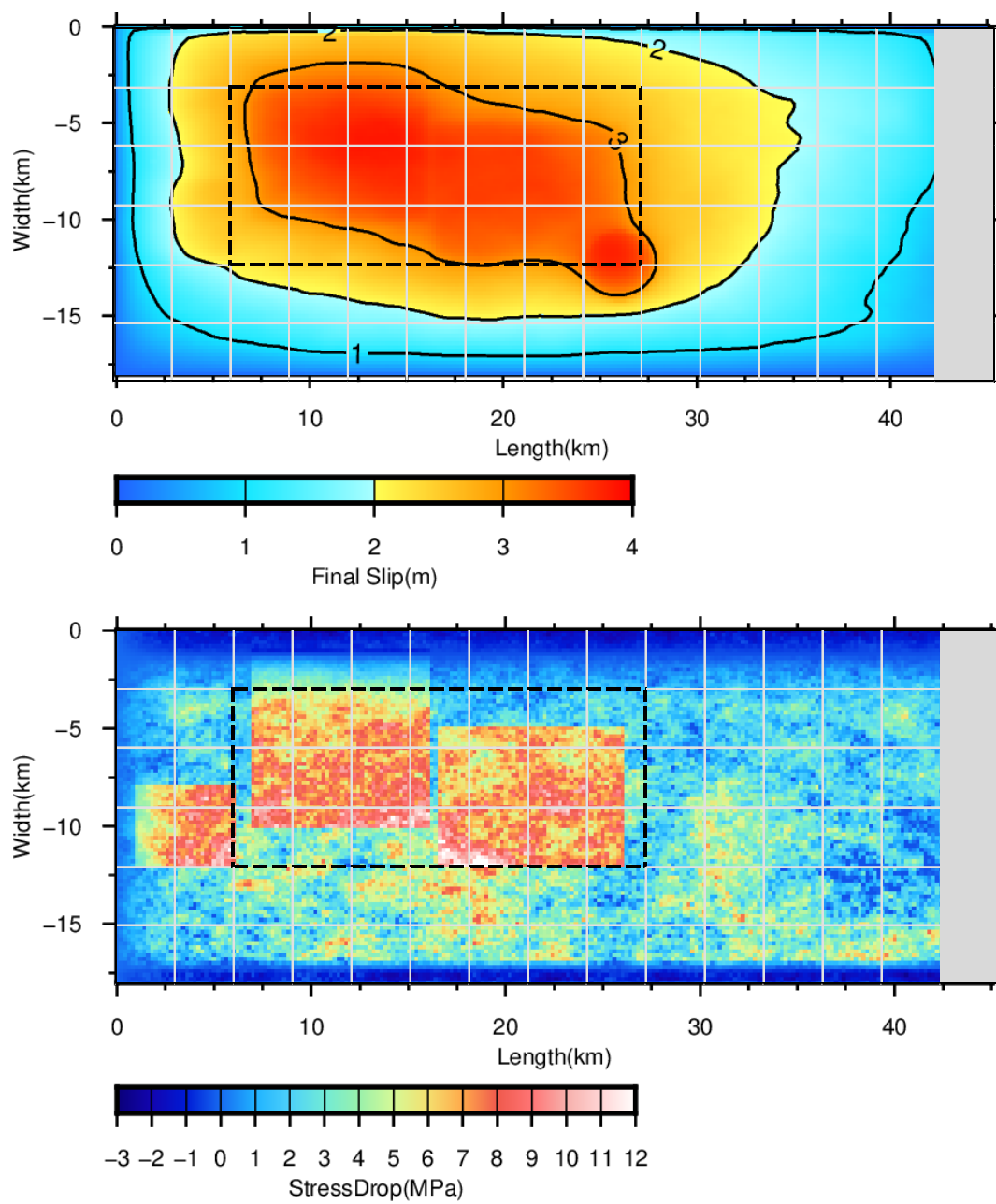


図 3-23 トリミングした領域（灰色塗りつぶし）と抽出したアスペリティ（黒点線）
シナリオ 3

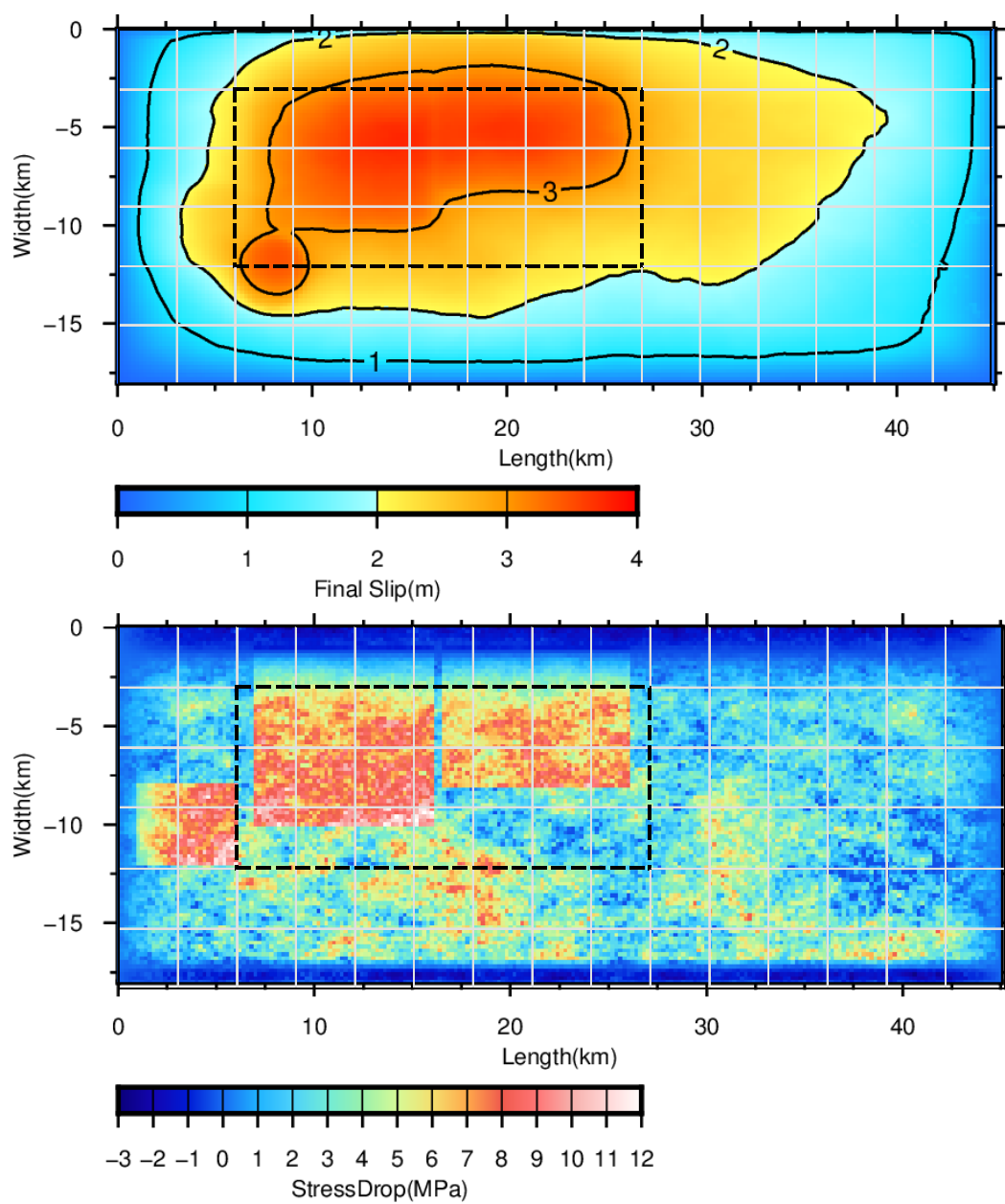


図 3-24 トリミングした領域（灰色塗りつぶし）と抽出したアスペリティ（黒点線）

シナリオ 4

※トリミング無し

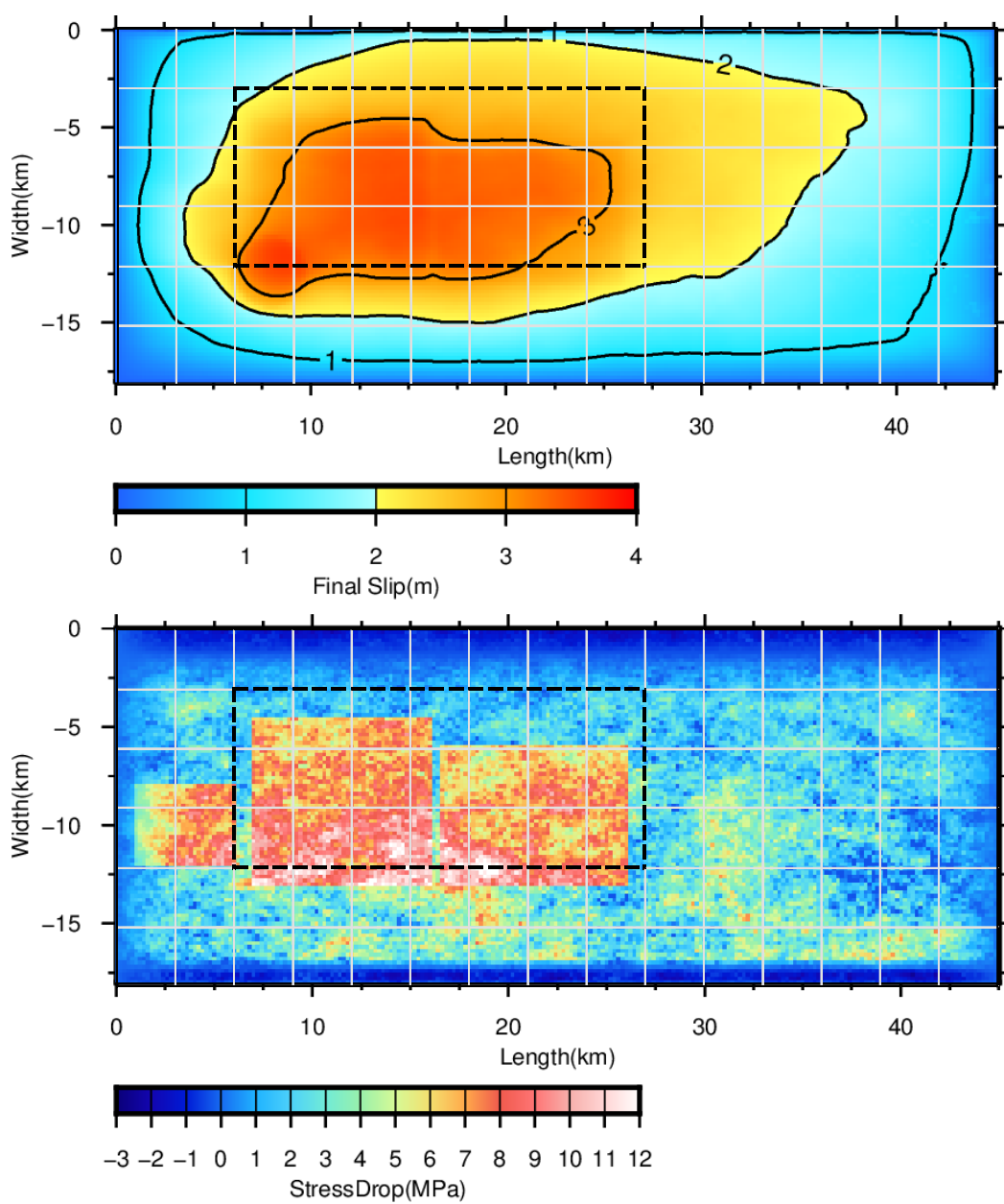


図 3-25 トリミングした領域（灰色塗りつぶし）と抽出したアスペリティ（黒点線）
シナリオ 5
※トリミング無し

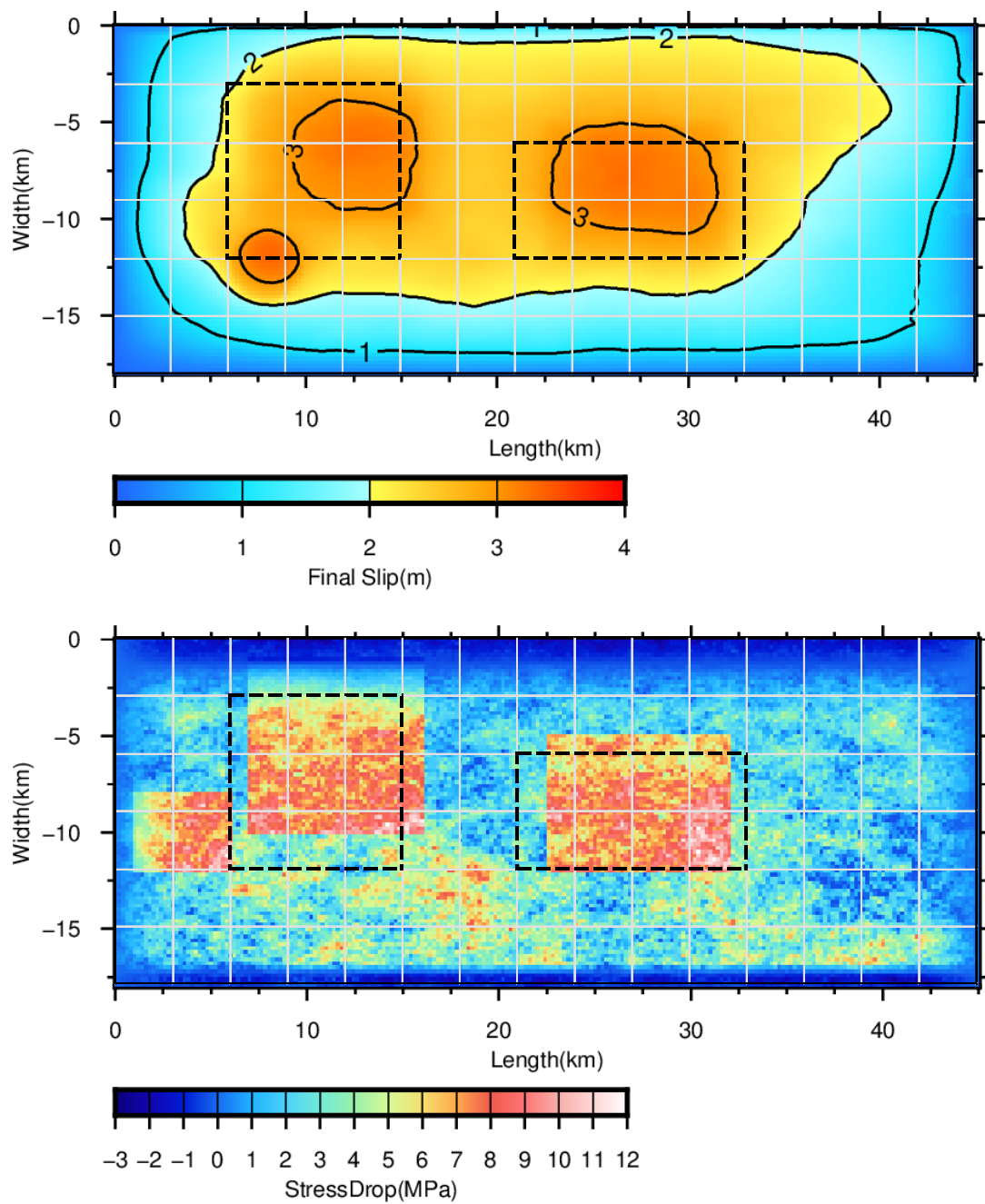


図 3-26 トリミングした領域（灰色塗りつぶし）と抽出したアスペリティ（黒点線）
シナリオ 6

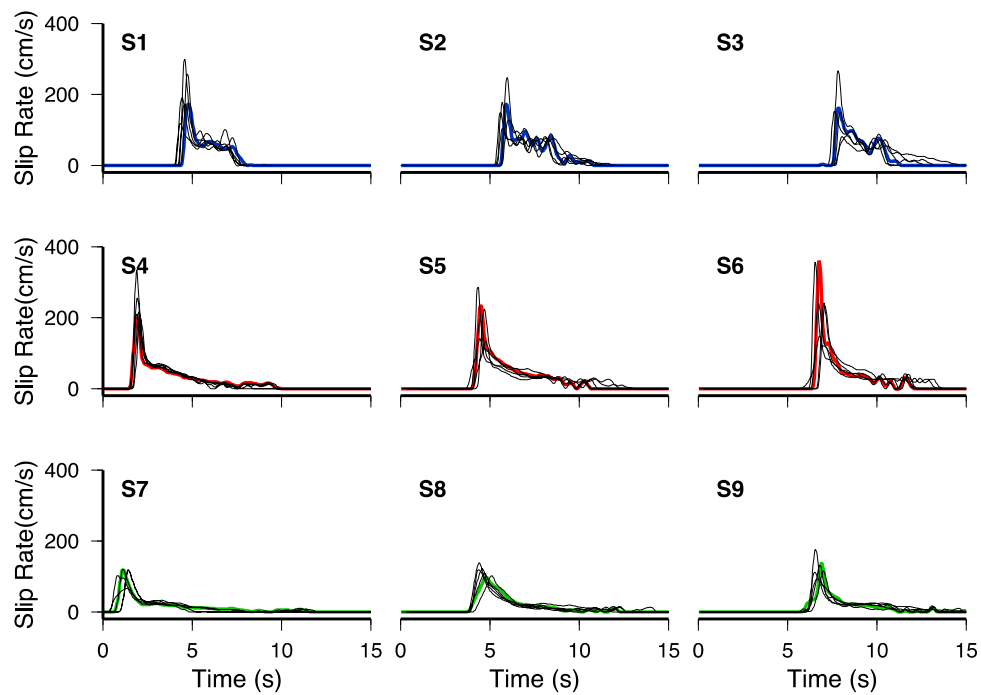


図 3-27 すべり速度時間関数の比較

— : シナリオ 1、— : シナリオ 2～シナリオ 6

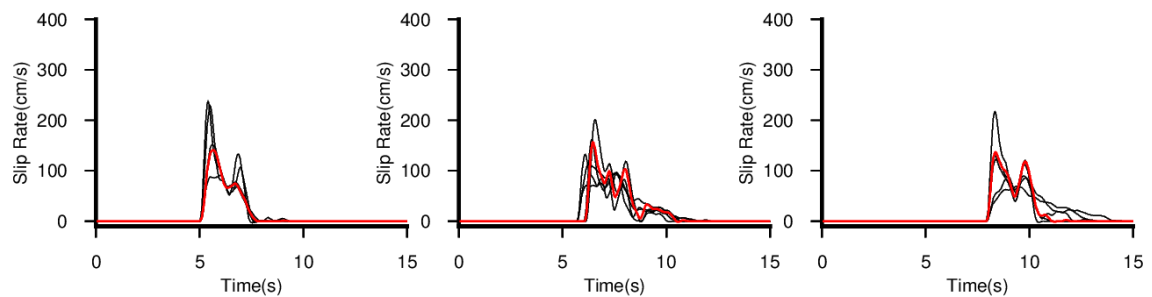


図 3-28 極浅層（深さ 1 km）のすべり速度時間関数の比較

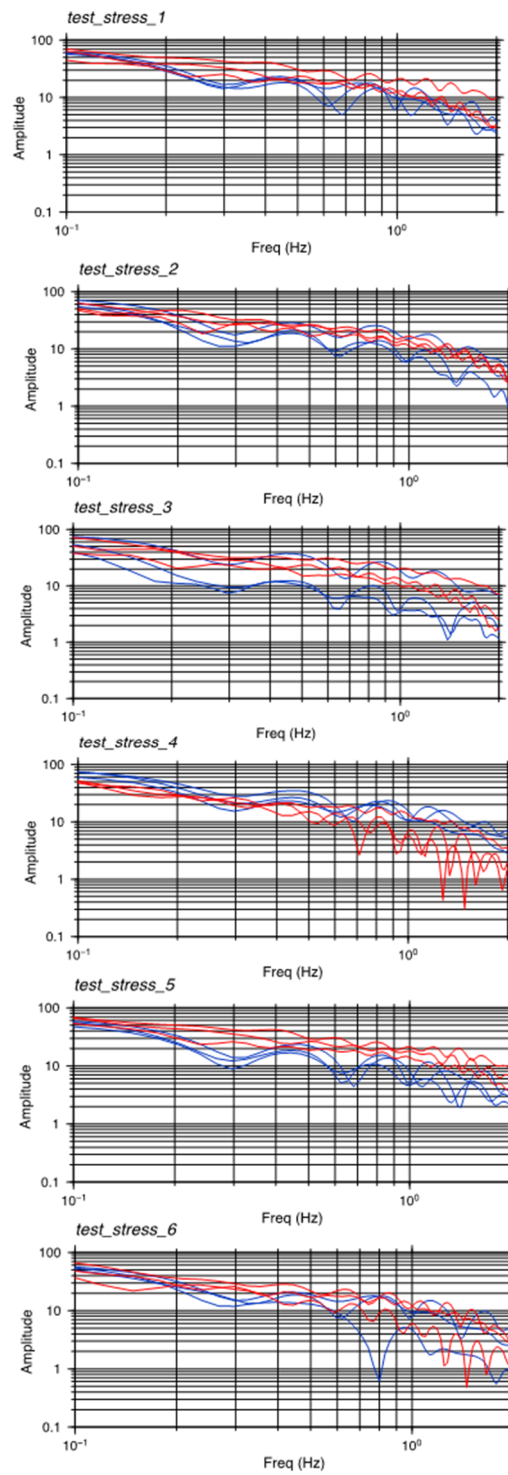


図 3-29 弱層（青）、SMGA（赤）のすべり速度時間関数のフーリエスペクトル

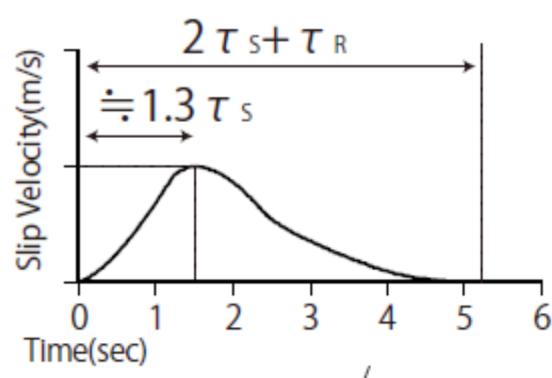


図 3-30 規格化 Yoffe 関数形状（田中・他，2018）

表 3-4 フィッティング結果（シナリオ 1）

深さ [km]	strike[km]	tr [s]	ts [s]	最大速度[cm/s]
1	8	2.500	0.625	138.825
1	18	4.400	0.880	114.043
1	25	3.800	0.570	139.025
2.5	8	4.400	0.440	162.530
2.5	18	6.500	0.650	126.292
2.5	25	3.900	0.975	119.368
8	8	8.800	0.440	145.199
8	18	6.000	0.600	176.542
8	25	4.300	0.430	225.102
15	8	9.600	0.480	82.184
15	18	4.600	0.920	91.844
15	25	4.500	0.900	79.026

表 3-5 フィッティング結果（シナリオ 2）

深さ [km]	strike[km]	tr [s]	ts [s]	最大速度[cm/s]
1	8	3.100	0.465	189.803
1	18	4.300	0.860	126.351
1	25	5.500	0.550	123.403
2.5	8	4.400	0.440	199.756
2.5	18	6.400	0.640	137.649
2.5	25	7.900	0.395	140.863
8	8	8.000	0.400	170.594
8	18	10.000	0.500	162.286
8	25	8.000	0.400	179.963
15	8	5.400	0.810	69.621
15	18	10.200	0.510	100.254
15	25	9.700	0.485	79.252

表 3-6 フィッティング結果（シナリオ 3）

深さ [km]	strike[km]	tr [s]	ts [s]	最大速度[cm/s]
1	8	3.000	0.450	202.933
1	18	4.600	1.150	100.035
1	25	5.500	1.100	79.505
2.5	8	4.000	0.400	227.324
2.5	18	8.000	0.800	106.328
2.5	25	11.300	0.565	92.434
8	8	6.400	0.320	219.058
8	18	9.500	0.475	165.166
8	25	10.600	0.530	134.166
15	8	4.500	0.675	85.529
15	18	6.400	0.640	100.800
15	25	10.400	0.520	88.157

表 3-7 フィッティング結果（シナリオ 4）

深さ [km]	strike[km]	tr [s]	ts [s]	最大速度[cm/s]
1	8	2.500	0.625	145.512
1	18	3.600	0.900	138.953
1	25	3.100	0.465	186.330
2.5	8	6.500	0.325	164.173
2.5	18	6.900	0.345	197.376
2.5	25	3.900	0.390	221.735
8	8	8.600	0.430	151.774
8	18	6.700	0.670	147.037
8	25	5.600	0.560	162.075
15	8	9.600	0.480	82.526
15	18	5.100	0.765	92.985
15	25	6.000	0.600	81.787

表 3-8 フィッティング結果（シナリオ 5）

深さ [km]	strike[km]	tr [s]	ts [s]	最大速度[cm/s]
1	8	2.800	0.700	106.281
1	18	5.200	0.520	124.157
1	25	3.700	0.555	132.540
2.5	8	5.000	0.500	117.044
2.5	18	5.500	0.550	133.397
2.5	25	4.700	0.470	148.951
8	8	8.300	0.415	150.754
8	18	7.700	0.385	189.226
8	25	6.100	0.305	216.919
15	8	5.900	0.590	95.805
15	18	4.200	0.630	121.080
15	25	3.400	0.680	105.629

表 3-9 フィッティング結果（シナリオ 6）

深さ [km]	strike[km]	tr [s]	ts [s]	最大速度[cm/s]
1	8	2.500	0.625	135.372
1	18	4.800	0.720	101.982
1	25	3.400	1.190	91.944
2.5	8	4.400	0.440	157.794
2.5	18	5.800	0.580	118.460
2.5	25	5.200	0.780	111.559
8	8	8.400	0.420	143.457
8	18	7.800	0.780	98.757
8	25	5.400	0.540	180.167
15	8	8.800	0.440	85.449
15	18	5.400	0.810	85.291
15	25	6.700	0.670	77.779

表 3-10 τ_R （秒）についてのフィッティング結果の平均（シナリオ 1 から 6）

深さ [km]	シナリオ 1	シナリオ 2	シナリオ 3	シナリオ 4	シナリオ 5	シナリオ 6	平均
1	3.567	4.300	4.367	3.067	3.900	3.567	3.795
2.5	4.933	6.233	7.767	5.767	5.067	5.133	5.817
8	6.367	8.667	8.833	6.967	7.367	7.200	7.567
15	6.233	8.433	7.100	6.900	4.500	6.967	6.689

表 3-11 τ_S （秒）についてのフィッティング結果の平均（シナリオ 1 から 6）

深さ [km]	シナリオ 1	シナリオ 2	シナリオ 3	シナリオ 4	シナリオ 5	シナリオ 6	平均
1	0.692	0.625	0.900	0.663	0.592	0.845	0.720
2.5	0.688	0.492	0.588	0.353	0.507	0.600	0.538
8	0.490	0.433	0.442	0.553	0.368	0.580	0.478
15	0.767	0.602	0.612	0.615	0.633	0.640	0.645

表 3-12 最大速度（cm/s）についてのフィッティング結果の平均（シナリオ 1 から 6）

深さ [km]	シナリオ 1	シナリオ 2	シナリオ 3	シナリオ 4	シナリオ 5	シナリオ 6	平均
1	130.631	146.519	127.491	156.932	120.993	109.766	132.055
2.5	136.063	159.423	142.029	194.428	133.131	129.271	149.058
8	182.281	170.948	172.797	153.629	185.633	140.794	167.680
15	84.351	83.042	91.495	85.766	107.505	82.84	89.167

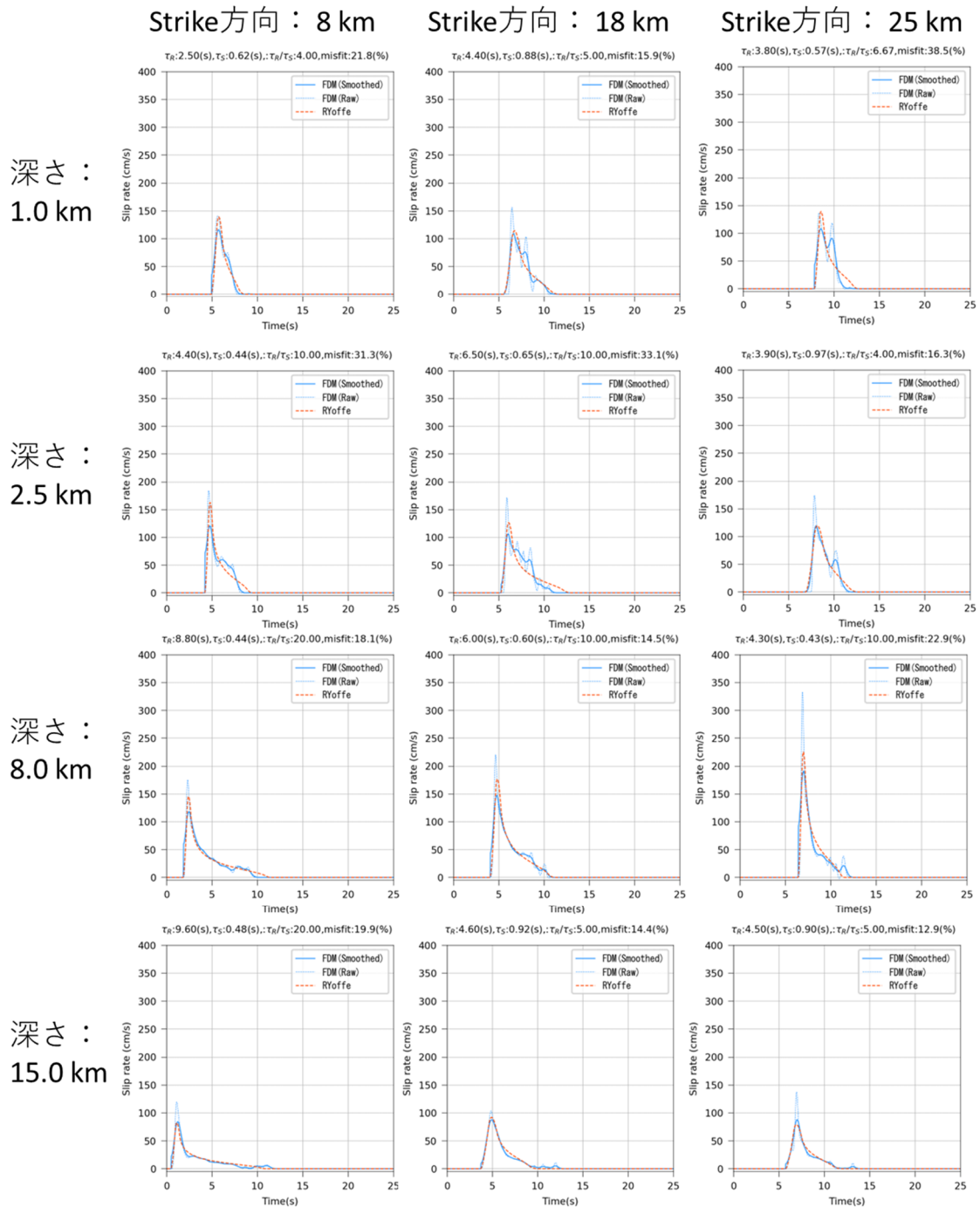


図 3-31 規格化 Yoffe 関数フィッティング結果 シナリオ 1
 FDM (Smoothed) : 動力学シミュレーションの結果 (平滑化後)
 FDM (Raw) : 動力学シミュレーションの結果 (平滑化後)
 RYoffe : フィッティングした規格化 Yoffe 関数

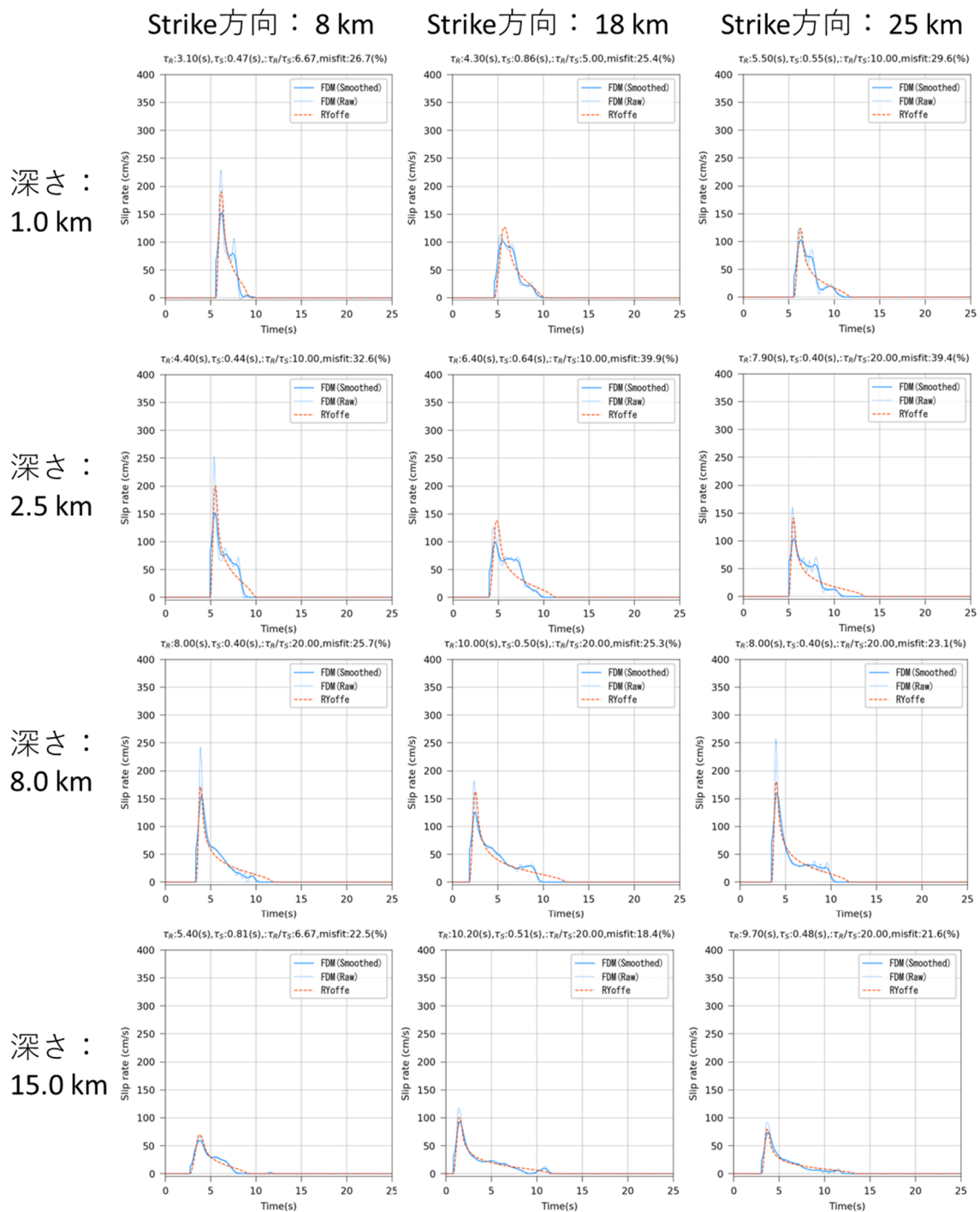


図 3-32 規格化 Yoffe 関数フィッティング結果 シナリオ 2

FDM (Smoothed) : 動力学シミュレーションの結果 (平滑化後)

FDM (Raw) : 動力学シミュレーションの結果 (平滑化後)

RYoffe : フィッティングした規格化 Yoffe 関数

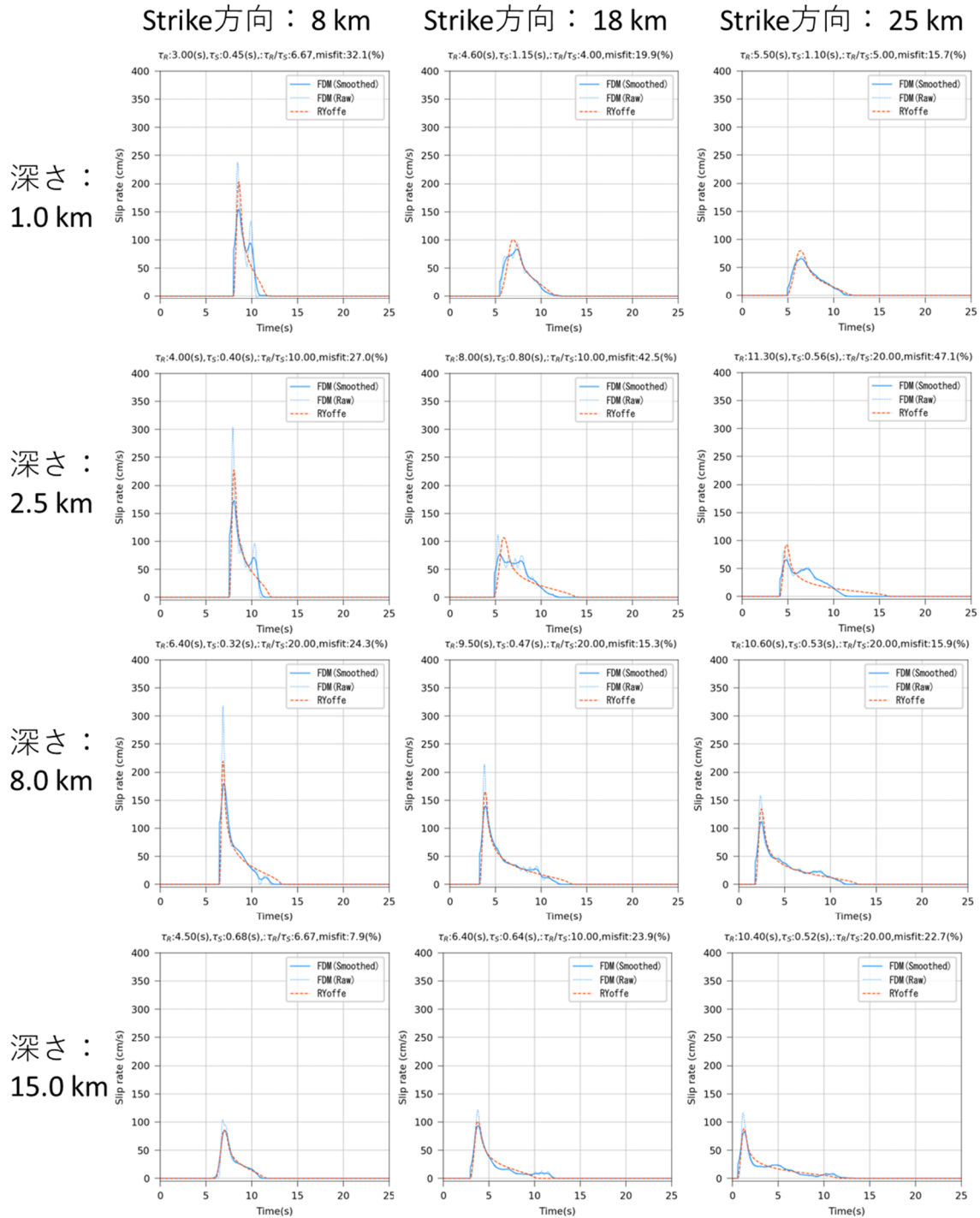


図 3-33 規格化 Yoffe 関数フィッティング結果 シナリオ 3

FDM (Smoothed) : 動力学シミュレーションの結果 (平滑化後)

FDM (Raw) : 動力学シミュレーションの結果 (平滑化後)

RYoffe : フィッティングした規格化 Yoffe 関数

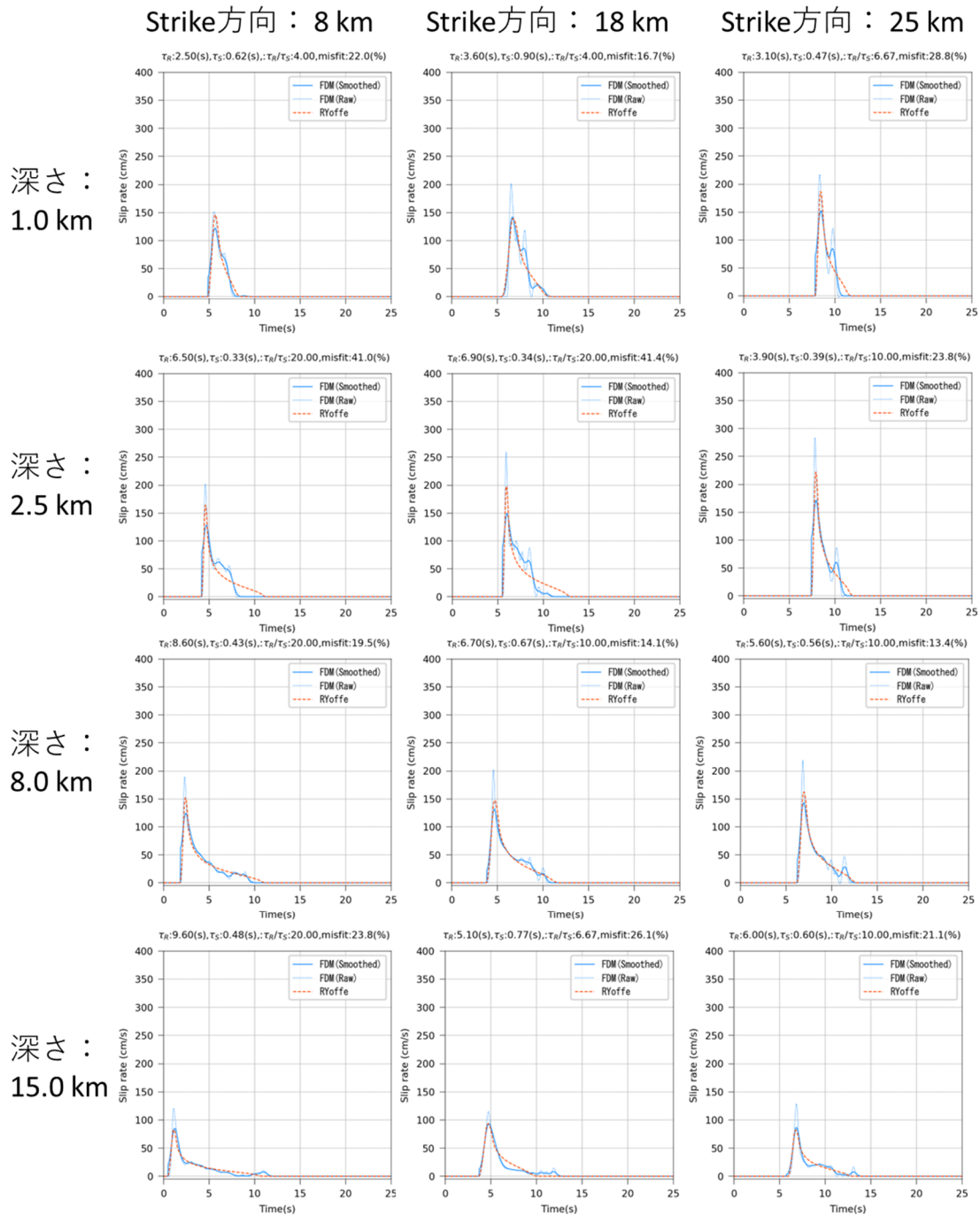


図 3-34 規格化 Yoffe 関数フィッティング結果 シナリオ 4

FDM (Smoothed) : 動力学シミュレーションの結果 (平滑化後)

FDM (Raw) : 動力学シミュレーションの結果 (平滑化後)

RYoffe : フィッティングした規格化 Yoffe 関数

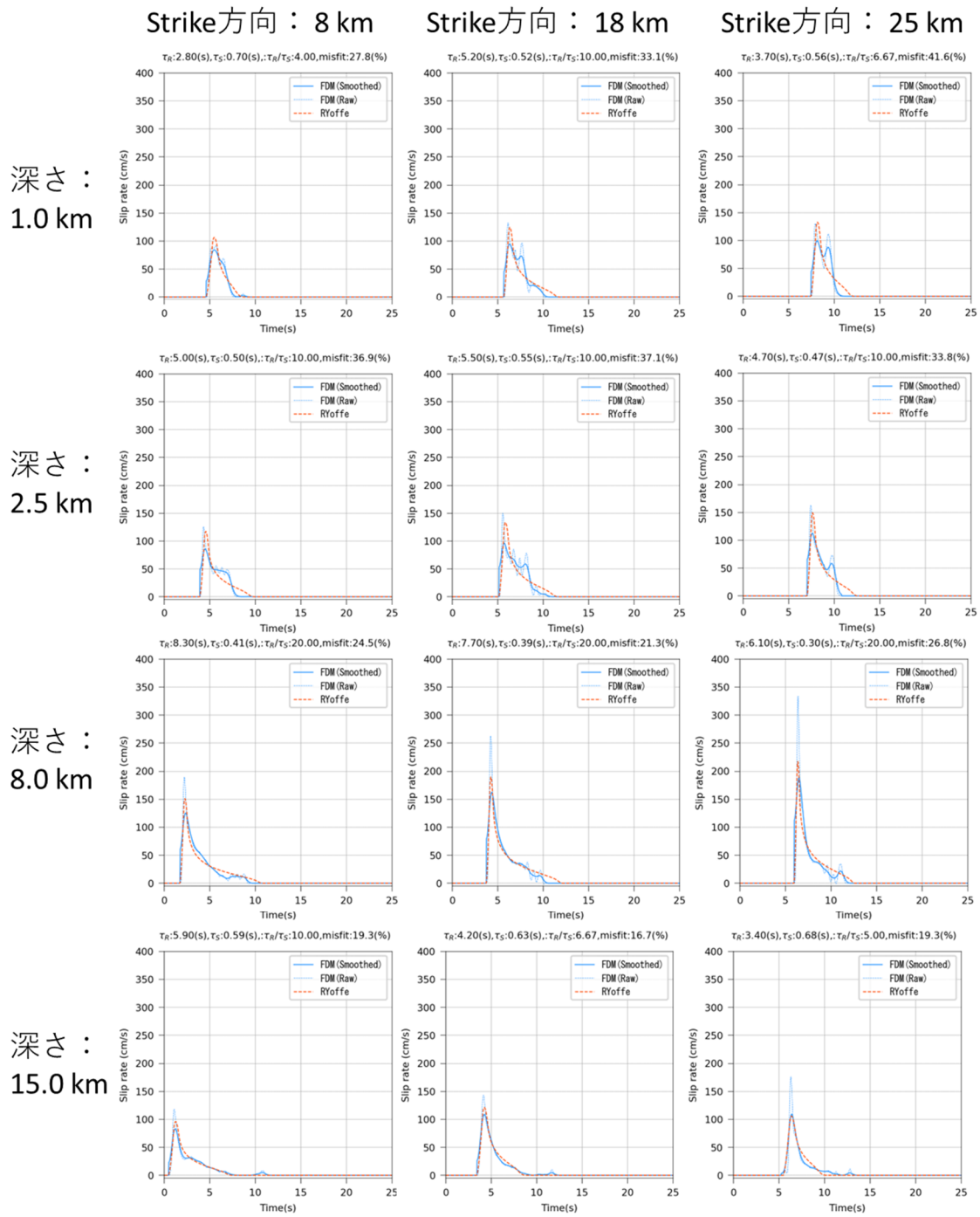


図 3-35 規格化 Yoffe 関数フィッティング結果 シナリオ 5
 FDM (Smoothed) : 動力学シミュレーションの結果 (平滑化後)
 FDM (Raw) : 動力学シミュレーションの結果 (平滑化後)
 RYoffe : フィッティングした規格化 Yoffe 関数

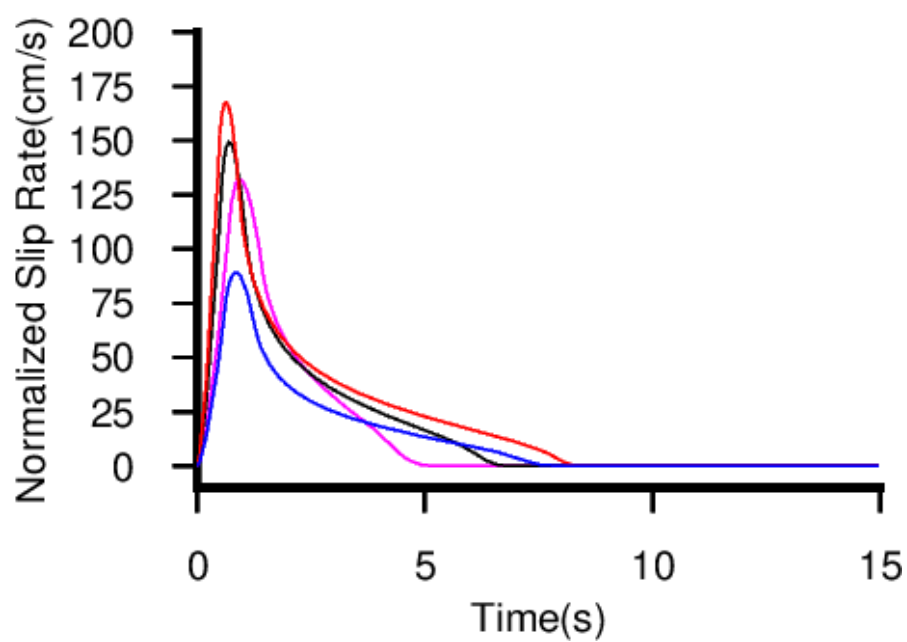


図 3-37 平均値で設定した規格化 Yoffe 関数

・ マゼンタ : 深さ 1.0 km ・ 黒 : 深さ 2.5 km ・ 赤 : 深さ 8.0 km ・ 青 : 深さ 15.0 km

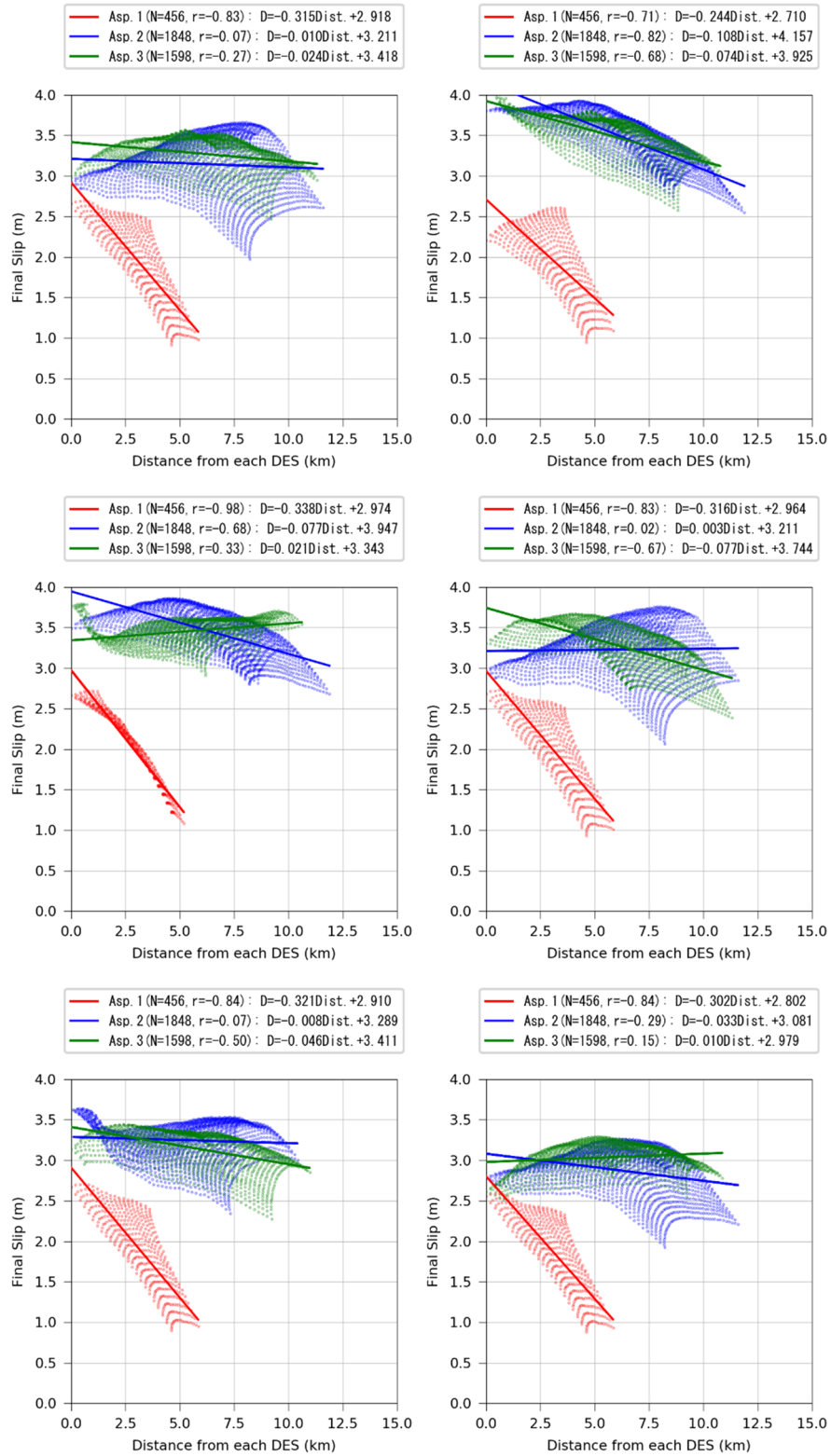


図 3-38 SMGA の破壊開始点からの距離と最終すべり量

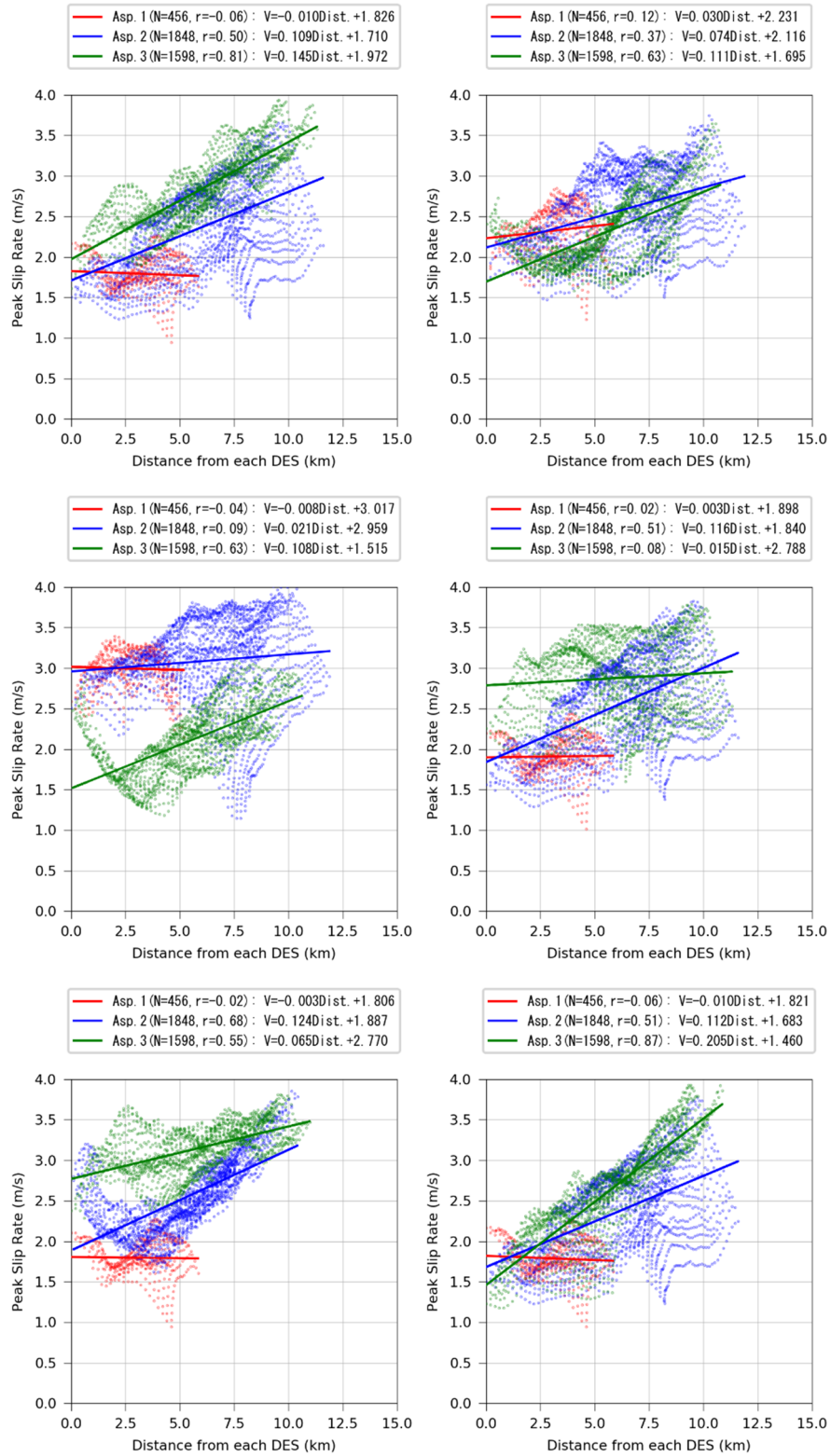


図 3-39 SMGA の破壊開始点からの距離と最大すべり速度

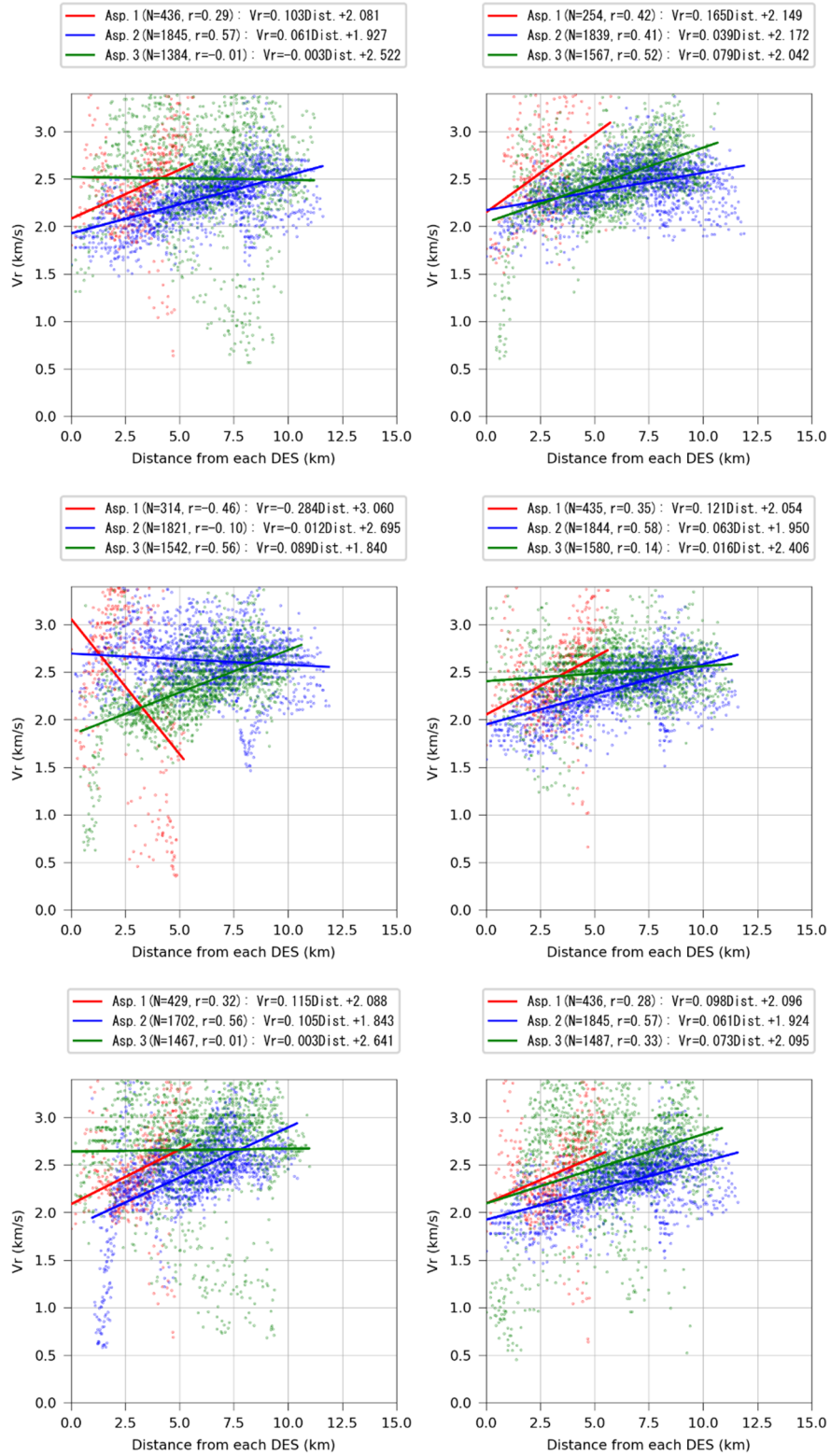


図 3-40 SMGA の破壊開始点からの距離と破壊伝播速度

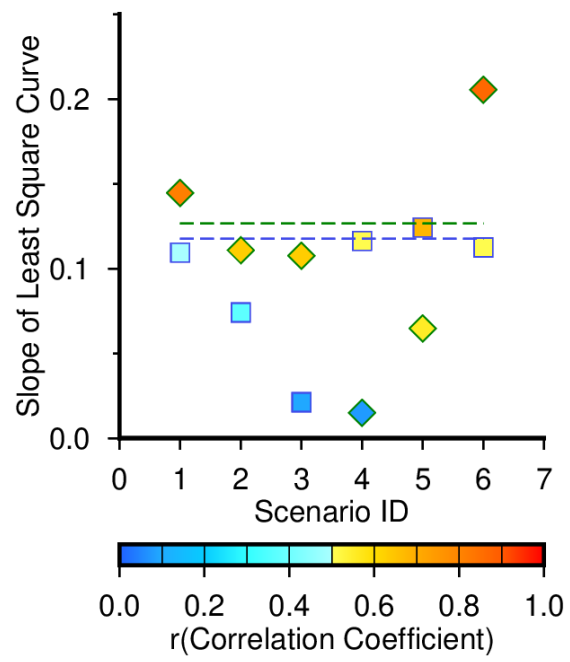


図 3-41 SMGA の破壊開始点からの距離と最大すべり速度の各シナリオの傾きと平均値

3.3 まとめ

特性化震源モデルの構築手法の高度化を目的とし、地震発生サイクルシミュレーションおよび深さ方向の不均質性を考慮した動力学シミュレーションを実施した。

地震発生サイクルの動力学シミュレーションでは、**Mw7.0** 程度の縦ずれ地震を対象に、すべり速度状態依存摩擦法則(**RSF**)に従って解析を実施した。その結果、期間 **1000** 年で、**Mw5.8** 以上のイベントが **6** つ抽出された。各イベントから得られた断層パラメータは既往のスケールリング則やパラメータ間の関係と概ね整合的であることが確認できた。ただし、地震規模の小さい地震については断層面積が過大となる傾向や応力降下量が過小になる傾向がみられるため、地震規模の小さい地震に対する再現性向上の検討が今後の課題として挙げられる。

深さ方向の不均質性を考慮した動力学シミュレーションでは **2016** 年熊本地震をモデルにシミュレーションモデルを構築し、**SMGA** 配置および破壊開始点を変えた計 **6** つのシナリオに対して解析を実施した。各シナリオの解析結果から震源パラメータを抽出し整理した。すべり速度時間関数は深さによって特徴が変わる傾向が確認できた。すべり速度時間関数等に関して、最終すべり量、最大すべり速度、破壊伝播速度について、破壊の進展に対する影響を調べるため、解析位置と各パラメータについての関係について調べた。特に、最大すべり速度について、破壊の進展に伴って大きくなる傾向が認められた。そのモデル化の検討として、その傾きについて各シナリオの結果と平均値を整理した。着目した中央および右の **SMGA** について、バラツキはあるものの、平均値は同程度との結果が得られた。シミュレーションの蓄積によって、このような傾向が一般的なものであるか等の確認が今後の課題として挙げられる。

【参考文献】

- Dalguer, L. A., and S. M. Day (2007), Staggered-grid split nodes method for spontaneous rupture simulation, *Journal of Geophysical Research* 112, B02302, doi 10.1029/2006JB004467.
- Dieterich, J. (1979), “Modeling of rock friction 1. Experimental results and constitutive equations” and “Modeling of rock friction 2. Simulation of preseismic slip”, *Journal of Geophysical Research* 80, 2161 and 2169.
- Galvez, P., Petukhin, A., Somerville, P., Ampuero, P., Miyakoshi, K., Peter, D., and Irikura, K. (2021), Multicycle Simulation of Strike Slip Earthquake Rupture for Use in Near Source Ground Motion Simulations, *Bulletin of the Seismological Society of America*. 111, 2463-2485.
- Luo, Y., Ampuero, J. P., Galvez, P., van den Ende, M., & Idini, B. (2017), QDYN: a Quasi-DYNAMIC earthquake simulator (v1.1) [Data set]. Zenodo. doi:10.5281/zenodo.322459
- Pitarka, A. (1999), 3D Elastic Finite-Difference Modeling of Seismic Motion Using Staggered Grids with Nonuniform Spacing, *Bulletin of the Seismological Society of America*., 89, 54–68.
- Ruina, A. (1983), Slip instability and state variable friction law, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 88, 10359.
- 司宏俊, 翠川三郎 (1999), 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.
- Somerville, P. G., 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 prediction of strong ground motion, *Seismol. Res. Lett.*, 70, 59-80.
- 田中信也, 金田惇平, 引間和人, 久田嘉章 (2018), 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*, 83, 752, 1525-1535.

4. 特性化震源モデルのパラメータの相関性の検討

原子力規制委員会「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」では、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」に基づき策定する基準地震動に対し、内陸地殻内地震、プレート間地震及び海洋プレート内地震について、「敷地における地震動評価に大きな影響を与えると考えられる支配的なパラメータについて分析した上で、必要に応じて不確かさを組み合わせるなどの適切な手法を用いて考慮すること」とされている。

ここで、上記パラメータの不確かさの組み合わせ等の取り扱いに関する知見を蓄積することを目的とし、既往研究で得られた内陸地殻内地震、海溝型地震、スラブ内地震の運動学的震源モデル、SMGA モデル及び動力学的震源モデルを対象に 15 地震程度を収集し、整理した特性化震源モデルの各震源パラメータの相関性について検討した。

既往研究で得られた国内外の内陸地殻内地震、海溝型地震、スラブ内地震について表 4-1 に示すように 19 地震を収集した。また、2 章の検討対象地震である 2022 年福島県沖の地震、2023 年台湾池上地震、2023 年トルコ・シリア地震も加えた計 21 地震を対象に震源パラメータを整理した。

表 4-1 本検討で収集整理した文献および震源パラメータ

NO.	地震 タイプ*	地震名	参考文献	SMGA 番号	Tr (s)	Vr (km/s)	β (km/s)	Vr/ β	応力降下量 (MPa)	SMGA面積 (km ²)	α	Da (m)
1	1	2011年東北地方太平洋沖地震	Kurahashi et al.(2011)	1/5					41.30	2595.8		
2	1	2011年東北地方太平洋沖地震	Kurahashi et al.(2011)	2/5					23.60	1730.6		
3	1	2011年東北地方太平洋沖地震	Kurahashi et al.(2011)	3/5					29.50	4867.2		
4	1	2011年東北地方太平洋沖地震	Kurahashi et al.(2011)	4/5					16.40	1482.3		
5	1	2011年東北地方太平洋沖地震	Kurahashi et al.(2011)	1					26.00	1129.0		
6	1	2011年東北地方太平洋沖地震	川辺・釜江(2013)	1/5	3.60	2.8	3.90	0.72	20.40	1600.0	0.25	
7	1	2011年東北地方太平洋沖地震	川辺・釜江(2013)	2/5	4.50	2.8	3.90	0.72	21.60	2500.0	0.25	
8	1	2011年東北地方太平洋沖地震	川辺・釜江(2013)	3/5	1.90	2.8	3.90	0.72	15.70	441.0	0.25	
9	1	2011年東北地方太平洋沖地震	川辺・釜江(2013)	4/5	2.50	2.8	3.90	0.72	10.50	784.0	0.25	
10	1	2011年東北地方太平洋沖地震	川辺・釜江(2013)	1	2.70	2.8	3.90	0.72	23.10	900.0	0.25	
11	1	2003年十勝沖地震	Kamae et al.(2004)	1/3		2.8	3.80	0.74	50.00	480.0		
12	1	2003年十勝沖地震	Kamae et al.(2004)	2/3		2.8	3.80	0.74	25.00	400.0		
13	1	2003年十勝沖地震	Kamae et al.(2004)	1		2.8	3.80	0.74	25.00	192.0		
14	1	2003年十勝沖地震	地震調査研究推進本部	1/3		2.8	3.90	0.72	37.40	180.6		4.14
15	1	2003年十勝沖地震	地震調査研究推進本部	2/3		2.8	3.90	0.72	37.40	361.2		5.85
16	1	2003年十勝沖地震	地震調査研究推進本部	1		2.8	3.90	0.72	37.40	180.6		4.14
17	3	1996年秋田県内陸南部地震	Miyake et al.(2003)	1	0.40		3.50			25.5		
18	3	1996年宮城県北部地震	Miyake et al.(2003)	1	0.28		3.50			8.6		
19	3	1997年鳥取県西部地震	Miyake et al.(2003)	1	0.20		3.10			5.8		
20	3	1998年新潟県中部地震	Miyake et al.(2003)	1	0.10		3.50			4.0		
21	3	1998年滋賀岐阜県境地震	Miyake et al.(2003)	1	0.15		3.50			4.5		
22	3	1998年宮城県南部地震	Miyake et al.(2003)	1	0.15		3.50			4.4		
23	3	1999年秋田県沿岸南部地震	Miyake et al.(2003)	1	0.18		3.50			4.9		
24	3	1999年滋賀県北部地震	Miyake et al.(2003)	1	0.12		3.40			1.4		
25	3	1999年トルコ・コジャエリ地震	釜江・入倉(2002)	1/3		2.8			12.00	384.0		
26	3	1999年トルコ・コジャエリ地震	釜江・入倉(2002)	2/3		2.8			5.00	60.0		
27	3	1999年トルコ・コジャエリ地震	釜江・入倉(2002)	1		2.0			10.00	140.0		
28	3	1999年台湾・集集地震	釜江・入倉(2002)	1/3					10.00	100.0		
29	3	1999年台湾・集集地震	釜江・入倉(2002)	2/3					10.00	200.0		
30	3	1999年台湾・集集地震	釜江・入倉(2002)	1					10.00	720.0		
31	2	2001年芸予地震	岩田・浅野(2010)	1	3.04		4.00					
32	2	2003年宮城県沖地震	岩田・浅野(2010)	1	3.04		4.00		58.00	111.0		
33	2	2003年宮城県沖地震	壇・他(2006)	1			4.00		123.00	61.0		
34	2	2003年宮城県沖地震	壇・他(2006)	1			4.00		76.20	85.0		
35	2	2022年福島県沖の地震	佐藤(2023)	1/5		2.3	4.00	0.58	132.40	64.0		
36	2	2022年福島県沖の地震	佐藤(2023)	2/5		2.3	4.00	0.58	253.30	32.0		
37	2	2022年福島県沖の地震	佐藤(2023)	3/5		2.3	4.00	0.58	196.10	24.0		
38	2	2022年福島県沖の地震	佐藤(2023)	4/5		2.3	4.00	0.58	49.00	60.0		
39	2	2022年福島県沖の地震	佐藤(2023)	1		2.3	4.00	0.58	117.70	24.0		
40	2	2022年福島県沖の地震	新井・他(2022)	1/3	0.27	3.2	4.46	0.72	92.22	49.0		3.92
41	2	2022年福島県沖の地震	新井・他(2022)	2/3	0.27	3.2	4.46	0.72	92.22	49.0		3.92
42	2	2022年福島県沖の地震	新井・他(2022)	1	0.16	3.2	4.46	0.72	92.22	17.6		2.35
43	2	2022年福島県沖の地震	吉田・他(2022)	1	0.30	3.0	4.46	0.67	125.30	96.0	0.09	
44	3	1995年兵庫県南部地震	松島・川瀬(2009)	1/5		2.8				20.3		
45	3	1995年兵庫県南部地震	松島・川瀬(2009)	2/5		2.8				25.0		
46	3	1995年兵庫県南部地震	松島・川瀬(2009)	3/5		2.8				48.0		
47	3	1995年兵庫県南部地震	松島・川瀬(2009)	4/5		2.8				64.0		
48	3	1995年兵庫県南部地震	松島・川瀬(2009)	1		2.8				25.0		
49	3	2007年新潟県中越地震	芝 良昭(2008)	1/3	0.40	3.1	3.40	0.91	25.47	31.4	0.22	
50	3	2007年新潟県中越地震	芝 良昭(2009)	2/3	0.40	2.8	3.40	0.82	20.84	39.2	0.16	
51	3	2007年新潟県中越地震	芝 良昭(2010)	1	0.50	2.5	3.40	0.74	19.91	31.4	0.22	
52	3	2004年新潟県中越地震	佐藤・他(2007)	1/2	0.72	2.4	3.47	0.70	26.70	9.0	0.58	4.09
53	3	2004年新潟県中越地震	佐藤・他(2007)	1	1.44	2.4	3.47	0.70	13.40	81.0	0.39	4.09
54	3	2016年鳥取県中部の地震	吉田・他(2018)	1/2	0.50	2.5	3.50	0.71	9.90	36.0	0.21	
55	3	2016年鳥取県中部の地震	吉田・他(2018)	1	0.50	2.5	3.50	0.71	4.60	10.3	0.26	
56	2	2022年福島県沖の地震	R5調査	1/3		2.5	4.46	0.56	132.00	60.0		
57	2	2022年福島県沖の地震	R5調査	2/3		2.5	4.46	0.56	132.00	36.0		
58	2	2022年福島県沖の地震	R5調査	1		2.5	4.46	0.56	132.00	36.0		
59	3	2022年台湾池上地震	R5調査	1/3		2.8	3.70	0.76	14.90	50.0		
60	3	2022年台湾池上地震	R5調査	2/3		2.8	3.70	0.76	14.90	225.0		
61	3	2022年台湾池上地震	R5調査	1		2.8	3.70	0.76	14.90	100.0		
62	3	2023年トルコ地震	R5調査	1/9		3.2	3.70	0.86	13.71	96.0		
63	3	2023年トルコ地震	R5調査	2/9		3.2	3.70	0.86	13.71	64.0		
64	3	2023年トルコ地震	R5調査	0.33333		3.2	3.70	0.86	19.00	144.0		
65	3	2023年トルコ地震	R5調査	4/9		3.2	3.70	0.86	19.00	144.0		
66	3	2023年トルコ地震	R5調査	5/9		3.2	3.70	0.86	19.00	64.0		
67	3	2023年トルコ地震	R5調査	0.66667		3.2	3.70	0.86	13.66	480.0		
68	3	2023年トルコ地震	R5調査	7/9		3.2	3.70	0.86	13.66	320.0		
69	3	2023年トルコ地震	R5調査	8/9		3.2	3.70	0.86	13.67	480.0		
70	3	2023年トルコ地震	R5調査	1		3.2	3.70	0.86	13.67	144.0		

* 1:海溝型 2:スラブ内 3:内陸地殻内

4.1 パラメータの相関性の検討

4.1.1 検討方針

収集・整理した特性化震源パラメータより、表 4-2 に示す震源パラメータについて検討を行った。対象データは表 4-1 に加え、過年度の成果として内陸地殻内地震について検討した地域地盤環境研究所(2023)のデータも対象とした。また、地震タイプ（内陸地殻内地震、海溝型地震、スラブ内地震）ごとの傾向が分かるように検討した。各パラメータの相関性を定量的に評価するために、相関係数を計算した。ここで、文献によっては複数の SMGA に同一のパラメータが設定されている場合があるが、それぞれ独立として扱った。

表 4-2 特性化震源パラメータの相関性の検討リスト

	V_r/β	T_r	S_{SMGA}	σ_{SMGA}	α	D_a or D_{SMGA}
V_r/β		●	●	●	●	●
T_r			●	●	●	●
S_{SMGA}				●	●	●
σ_{SMGA}					●	●
α						●
D_a or D_{SMGA}						

V_r : SMGA 内の破壊伝播速度

β : 震源域 S 波速度[km/s]

T_r : SMGA のライズタイム[s]

S_{SMGA} : SMGA の面積[km²]

σ_{SMGA} : SMGA の応力降下量[MPa]

α : ライズタイム係数

D_a : アスぺリティ内の平均すべり量[m]

D_{SMGA} : SMGA 内の平均すべり量[m]

4.1.2 検討結果

図 4-1 から図 4-15 に、検討結果を示す。図中白丸には過年度のデータを示す。また、内陸地殻内地震を青色、海溝型地震を緑色、スラブ内地震を赤色で示す。なお、相関性に関する定量的指標として、データが比較的多く得られている内陸地殻内地震のみを対象データとして相関係数を算出した。相関係数の算出にあたっては、各図面の軸に対数軸をとった場合は、対数値をパラメータとして適用した。表 4-3 に、各パラメータ間の相関係数を示す。

図 4-1 は、アスペリティ内の平均すべり量と SMGA 面積の関係を示す。海溝型地震については、過年度の結果と同様、両者には相関が認められるが、内陸地殻内地震、スラブ内地震は過年度の傾向から乖離する結果となった。内陸地殻内地震における相関係数は、0.63 であり、正の相関が見られた。

図 4-2 は、アスペリティ内の平均すべり量と SMGA のライズタイムの関係を示す。内陸地殻内地震については、過年度の結果に整合的である。一方で、スラブ内地震については、過年度の傾向から乖離する結果となった。内陸地殻内地震における相関係数は、0.86 であり、正の相関が見られた。

図 4-3 は、アスペリティ内の平均すべり量と震源域 S 波速度に対する破壊伝播速度の比の関係を示す。過年度の結果と同様に、両者には相関は見られなかった。また、地震タイプごとで比較しても相関は認められなかった。内陸地殻内地震における相関係数は、0.27 であった。

図 4-4 は、アスペリティ内の平均すべり量と SMGA の応力降下量の関係を示す。過年度の結果では、応力降下量が 10~20 MPa 程度で一定になり、相関は認められなかった。本検討の結果についても、両者の明瞭な相関は認められないが、内陸地殻内地震については、30 MPa 弱のデータが追加されたため、若干の正の相関が見られる。内陸地殻内地震における相関係数は、0.34 であった。

図 4-5 は、アスペリティ内の平均すべり量とライズタイム係数の関係を示す。本検討で得られたデータは、内陸地殻内地震のみであるが、過年度の結果と同様、両者には相関が認められた。内陸地殻内地震における相関係数は、0.62 であった。

図 4-6 は、SMGA のライズタイムと SMGA の応力降下量の関係を示す。過年度の結果と同様、両者には明瞭な相関性は認められなかった。また、地震タイプごとで比較しても明瞭な傾向の変化は認められなかった。内陸地殻内地震における相関係数は、0.20 であった。

図 4-7 は、SMGA のライズタイムと SMGA 面積の関係を示す。過年度の結果では、両者には明瞭な相関が認められた。本検討の結果は、いずれの地震タイプでも過年度の結果と同様に両者には明瞭な相関が認められた。内陸地殻内地震における相関係数は、0.69 であった。

図 4-8 は、震源域 S 波速度に対する破壊伝播速度の比と SMGA 面積の関係を示す。過年度の結果と同様、両者には明瞭な相関性は認められなかった。また、地震タイプごとで比較しても明瞭な傾向の変化は認められなかった。内陸地殻内地震における相関係数は、0.17 で

あった。

図 4-9 は、震源域 S 波速度に対する破壊伝播速度の比と SMGA の応力降下量の関係を示す。過年度の結果と同様、両者には明瞭な相関性は認められなかった。また、地震タイプごとで比較しても明瞭な傾向の変化は認められなかった。内陸地殻内地震における相関係数は、0.22 であった。

図 4-10 は、震源域 S 波速度に対する破壊伝播速度の比と SMGA のライズタイムの関係を示す。過年度の結果と同様、両者には明瞭な相関性は認められなかった。また、地震タイプごとで比較しても明瞭な傾向の変化は認められなかった。内陸地殻内地震における相関係数は、0.12 であった。

図 4-11 は、ライズタイム係数と震源域 S 波速度に対する破壊伝播速度の比の関係を示す。過年度の結果では、両者には相関は認められなかった。本検討も同様に、いずれの地震タイプで比較しても両者には相関は認められなかった。内陸地殻内地震における相関係数は、0.38 であった。

図 4-12 は、ライズタイム係数と SMGA のライズタイムの関係を示す。過年度の結果では、両者には相関性が認められた。本検討では、内陸地殻内地震とスラブ内地震では、過年度の結果に整合的であったが、海溝型地震は過年度の傾向からは乖離する結果となった。内陸地殻内地震における相関係数は、0.61 であった。

図 4-13 は、ライズタイム係数と SMGA の応力降下量の関係を示す。過年度の結果では、両者には相関は認められなかった。本検討でも同様に、いずれの地震タイプで比較しても両者には相関は認められなかった。内陸地殻内地震における相関係数は、0.38 であった。

図 4-14 は、ライズタイム係数と SMGA 面積の関係を示す。過年度の結果では、両者には相関は認められなかった。本検討は、内陸地殻内地震については、過年度の傾向と概ね整合する結果となったが、その他の地震タイプでは乖離する結果となった。内陸地殻内地震における相関係数は、-0.16 であった。

図 4-15 は、SMGA の面積と SMGA の応力降下量の関係を示す。過年度の結果では、両者には明瞭な相関は認められなかった。本検討でも同様に、いずれの地震タイプで比較しても両者には相関は認められなかった。内陸地殻内地震における相関係数は、-0.17 であった。

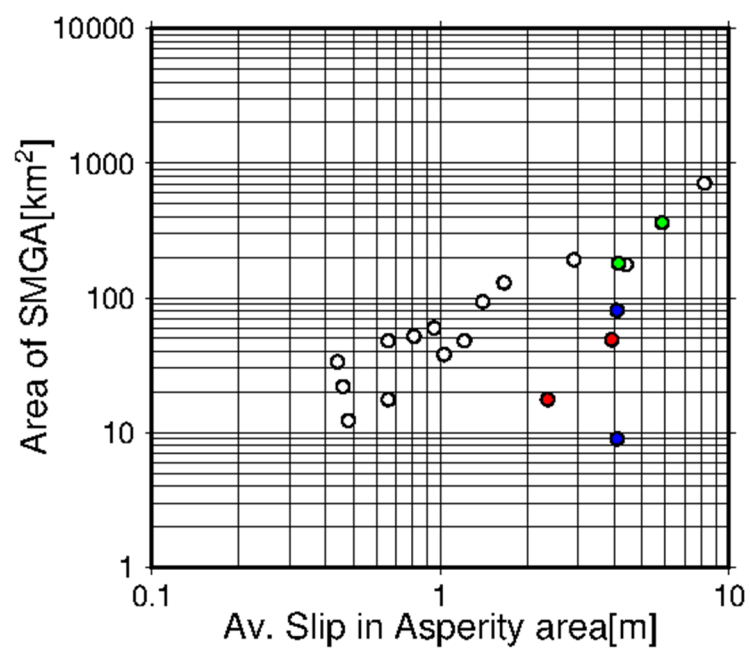


図 4-1 アスペリティ内の平均すべり量と SMGA の面積の相関

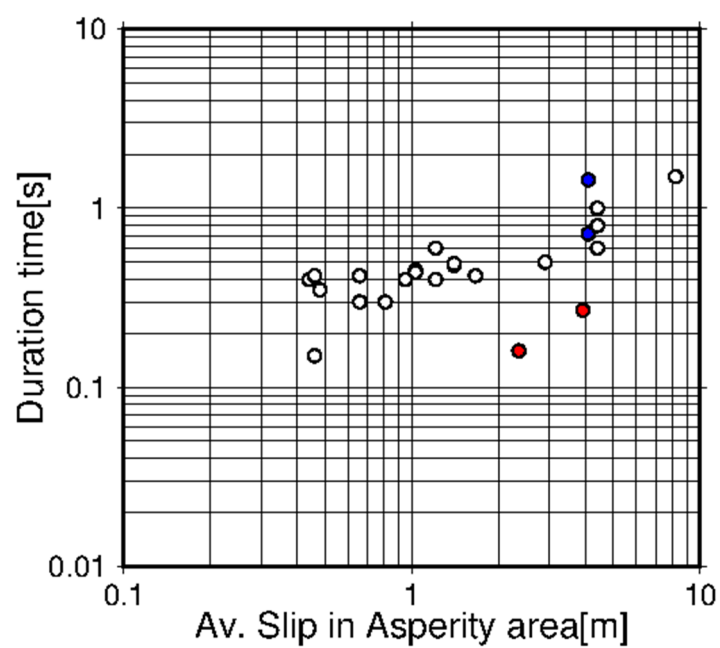


図 4-2 アスペリティ内の平均すべり量と SMGA のライズタイムの相関

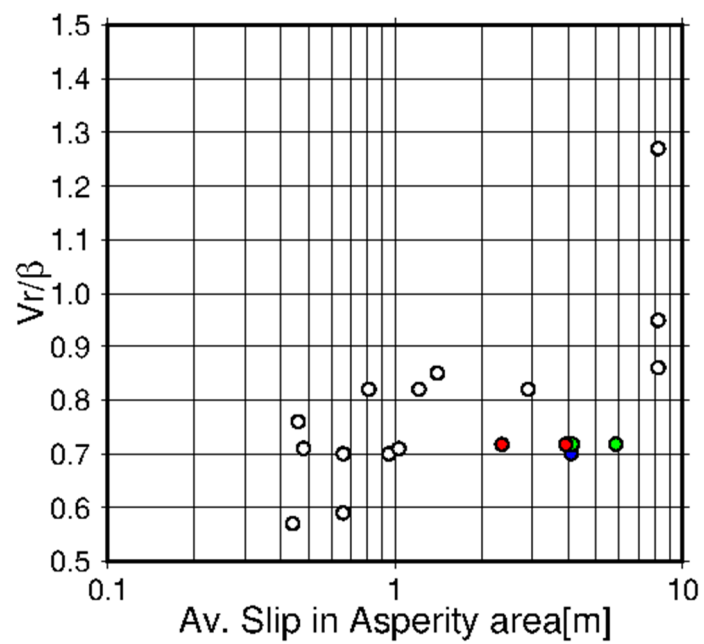


図 4-3 アスペリティ内の平均すべり量と震源域 S 波速度に対する破壊伝播速度の比の
相関

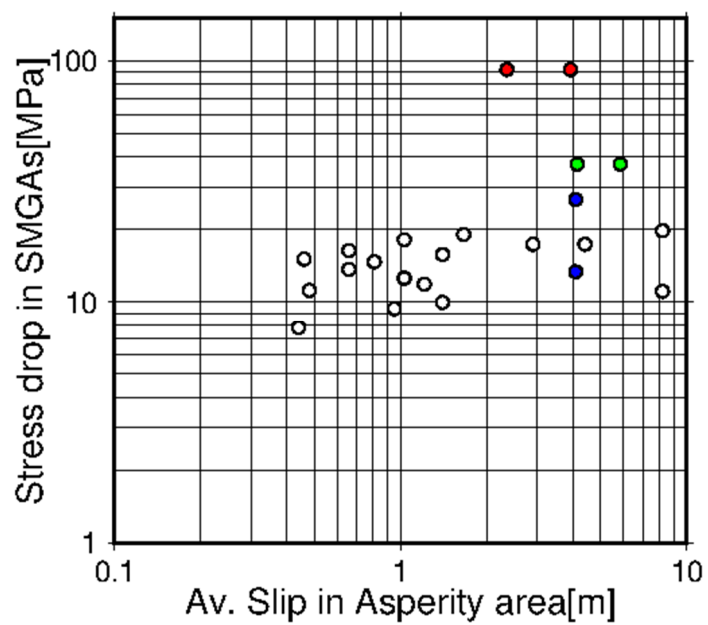


図 4-4 アスペリティ内の平均すべり量と SMGA の応力降下量の相関

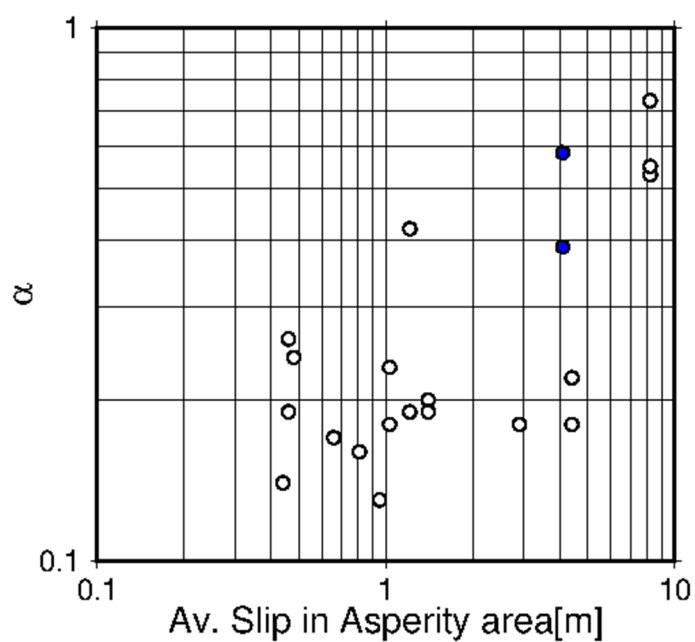


図 4-5 アスペリティ内の平均すべり量とライズタイム係数の相関

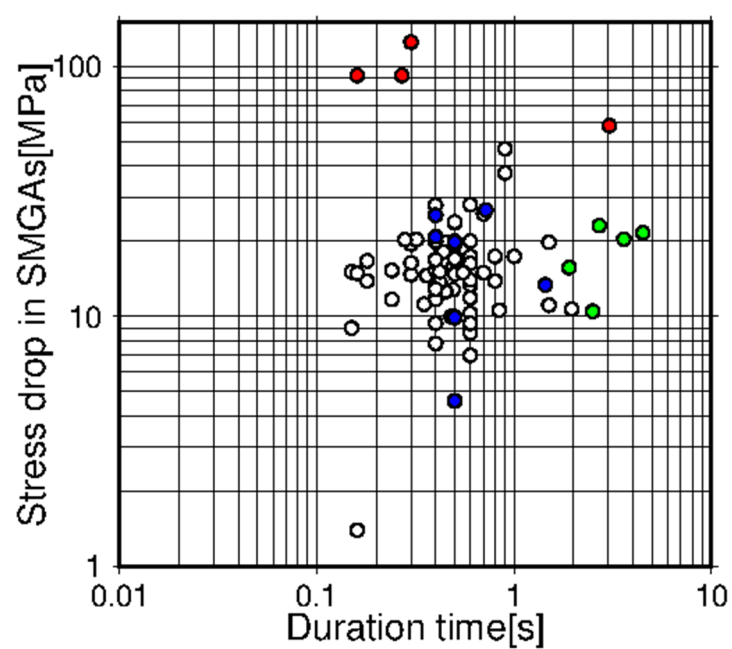


図 4-6 SMGA のライズタイムと SMGA の応力降下量の相関

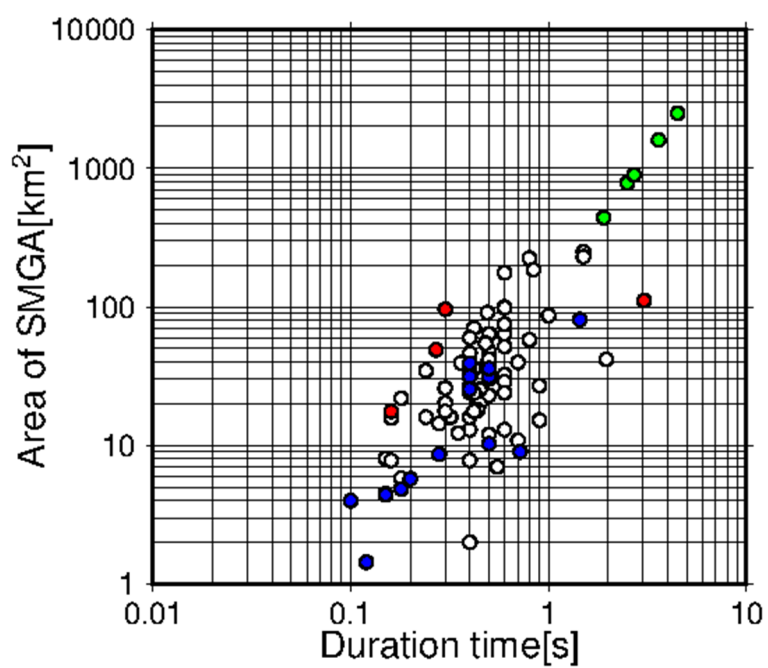


図 4-7 SMGA のライズタイムと SMGA の面積の相関

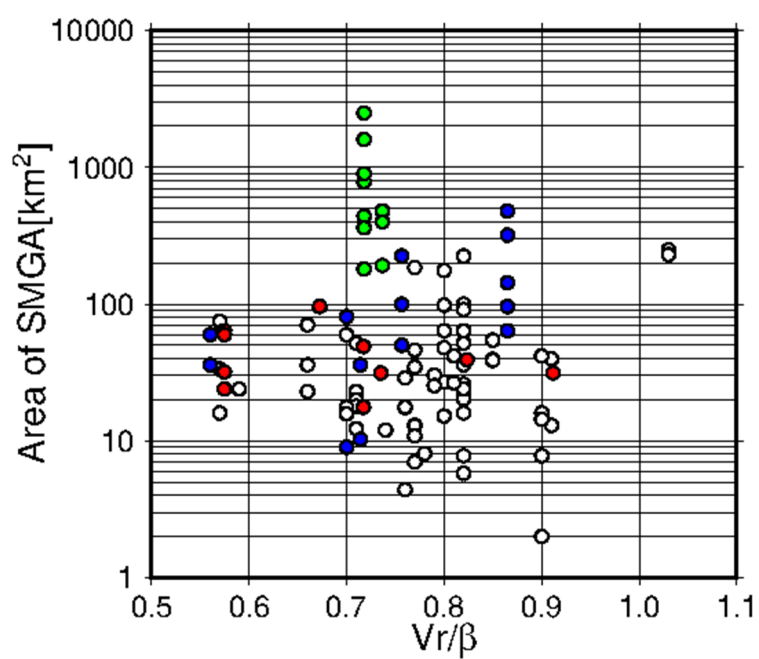


図 4-8 震源域 S 波速度に対する破壊伝播速度の比と SMGA の面積の相関

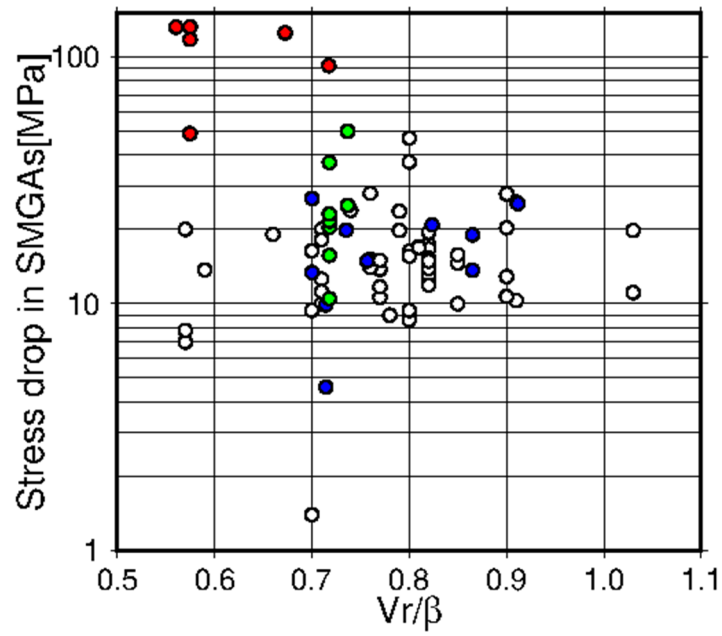


図 4-9 震源域 S 波速度に対する破壊伝播速度の比と SMGA の応力降下量の相関

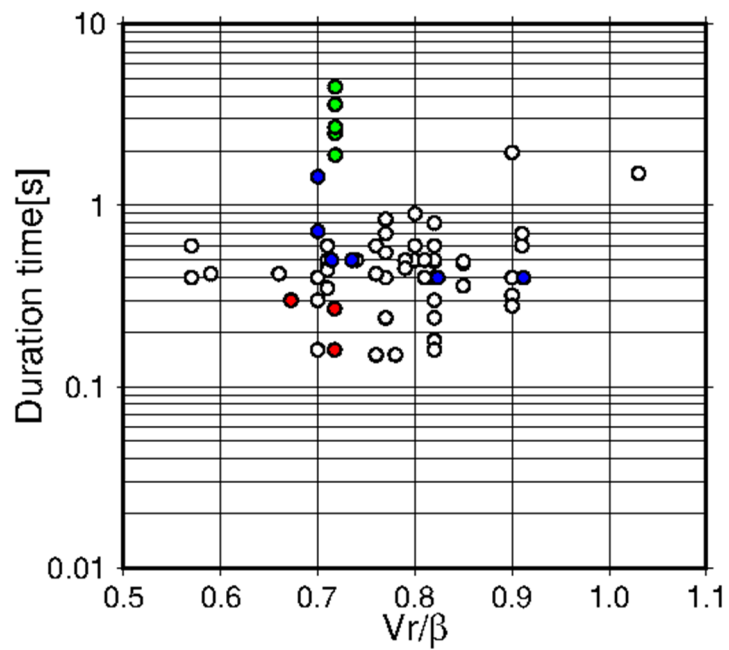


図 4-10 震源域 S 波速度に対する破壊伝播速度の比と SMGA のライズタイムの相関

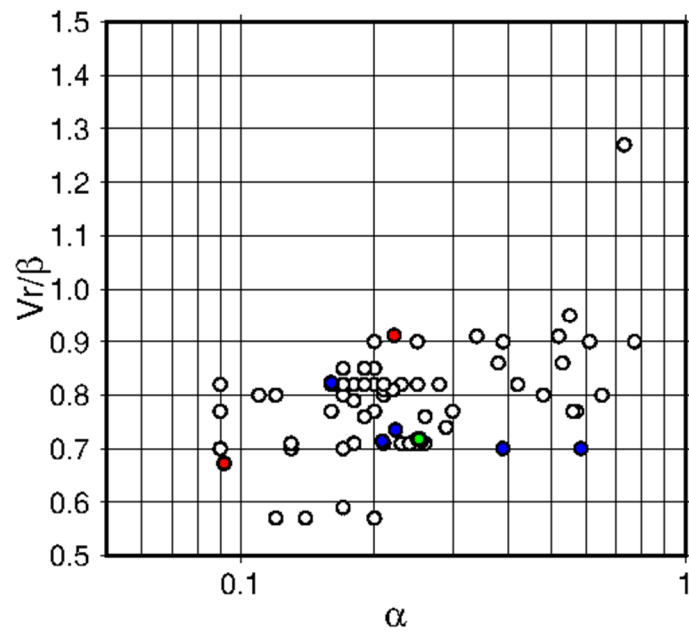


図 4-11 ライズタイム係数と震源域 S 波速度に対する破壊伝播速度の比の相関

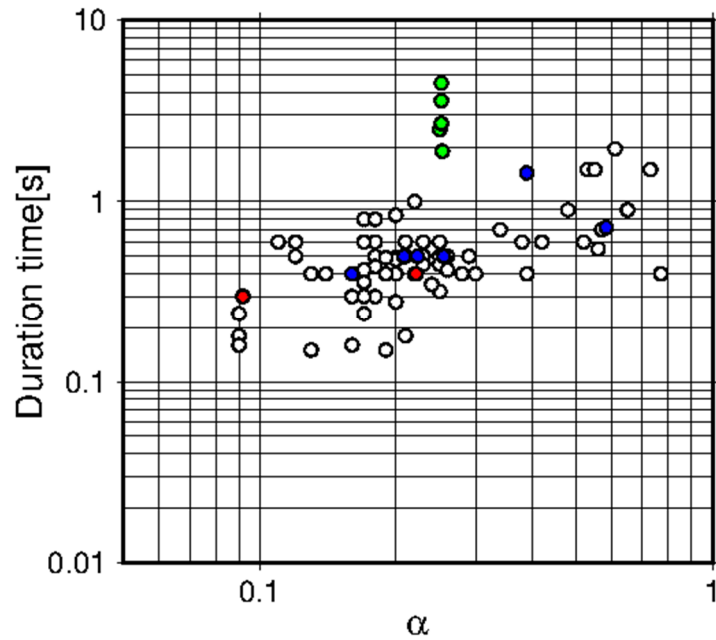


図 4-12 ライズタイム係数と SMGA のライズタイムの相関

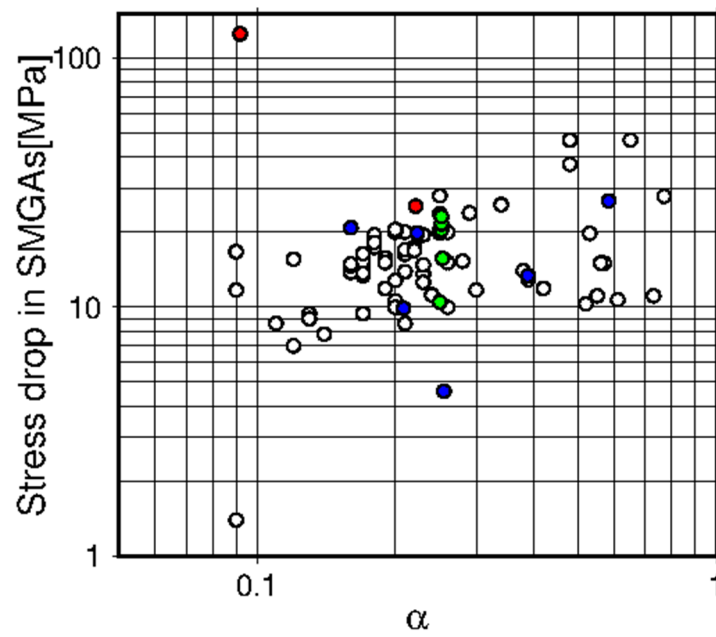


図 4-13 ライズタイム係数と SMGA の応力降下量の相関

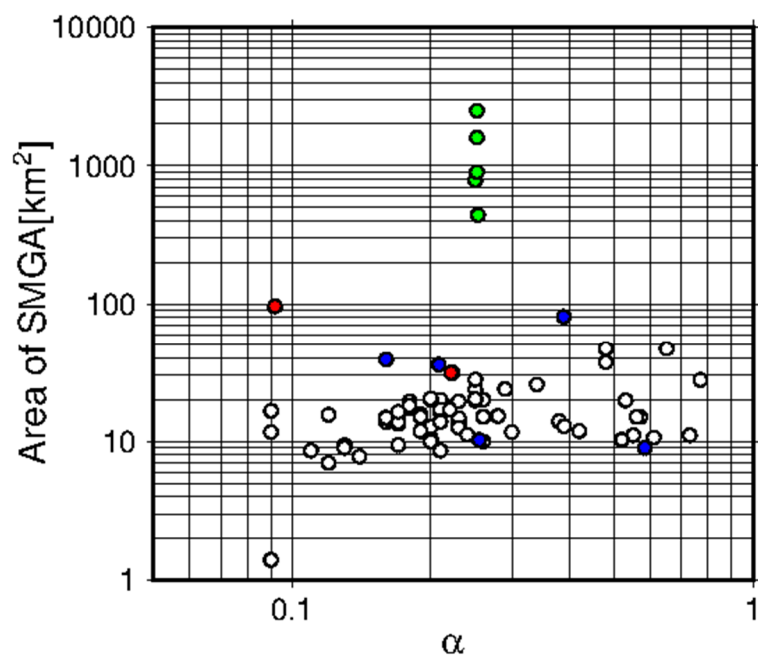


図 4-14 ライズタイム係数と SMGA の面積の相関

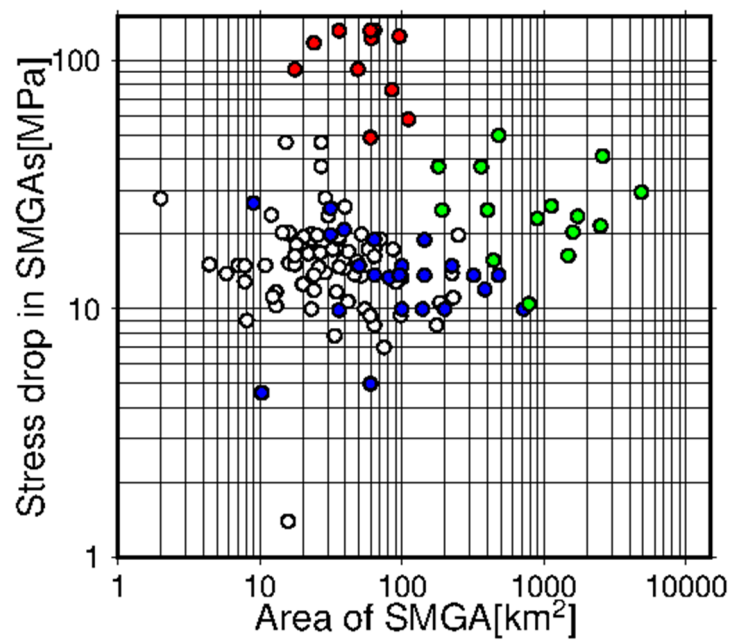


図 4-15 SMGA の面積と SMGA の応力降下量の相関

表 4-3 各パラメータの相関係数

	V_r/β	T_r	S_{SMGA}	σ_{SMGA}	α	D_a or D_{SMGA}
V_r/β						
T_r	0.12					
S_{SMGA}	0.17	0.69				
σ_{SMGA}	0.22	0.20	-0.17			
α	0.38	0.61	-0.16	0.38		
D_a or D_{SMGA}	0.27	0.86	0.63	0.34	0.62	

4.2 相関性を考慮したパラメータの確率分布のモデル化の検討

4.2.1 検討方針

4.1 節で収集・整理した既往文献より、相関性を考慮したパラメータの確率分布のモデル化を検討した。検討したパラメータは、若干の正の相関が見られ、特性化震源モデルの地震動の計算パラメータとして比較的導入しやすいパラメータとして、アスペリティ内の平均すべり量と SMGA の応力降下量を対象とした。ここで、地震タイプによる違いがあることを考慮し、内陸地殻内地震のデータのみを用いた。モデル化は地域地盤環境研究所(2023)を参考に正規分布を仮定して、不確かさのモデル化を試みた。詳細は地域地盤環境研究所(2023)を参照されたい。

4.2.2 検討結果

図 4-16 に、アスペリティ内のすべり量と応力降下量に関する等確率楕円を示す。ここで、1 次元正規分布の $c=1.0$ に加え、 1σ 範囲の 0.68 に相当する $c=1.5$ を採用した場合の 2 つの等確率楕円を検討した。図中の楕円の長軸、短軸の最大・最小となる座標値 (p1~8) を下記に示す。短軸はバラつきが小さく、長軸はバラつきが大きくなる。対数軸での標準偏差は、すべり量で 0.397 、応力降下量で 0.115 となり、共分散は 0.015 であった。標準偏差に対する共分散は小さく、楕円の回転角が約 6 度となる弱い正の相関となって表されている。短軸は応力降下量、長軸はアスペリティ内のすべり量に概ね対応する結果となった。応力降下量の中央値は約 14.5 MPa、すべり量の中央値は約 1.5 m である。 $c=1.5$ では 10 MPa~ 20 MPa であり、概ねデータを包含する範囲となる。ただし、応力降下量 27 MPa 程度の 2004 年新潟県中越地震は楕円から外れている。また、すべり量については 2002 年 Denali 地震の 8 m 強の 2 つのデータが楕円から大きく外れている。

楕円の座標 ($c=1.0$ の場合) :

- (p1) 長軸 横軸プラス側 = $4.05, 16.19$
- (p3) 長軸 横軸マイナス側 = $0.65, 13.37$
- (p2) 短軸 縦軸プラス側 = $1.58, 18.79$
- (p4) 短軸 縦軸マイナス側 = $1.67, 11.52$

楕円の座標 ($c=1.5$ の場合) :

- (p5) 長軸 横軸プラス側 = $6.41, 16.98$
- (p7) 長軸 横軸マイナス側 = $0.41, 12.75$
- (p6) 短軸 縦軸プラス側 = $1.56, 21.23$
- (p8) 短軸 縦軸マイナス側 = $1.69, 10.2$

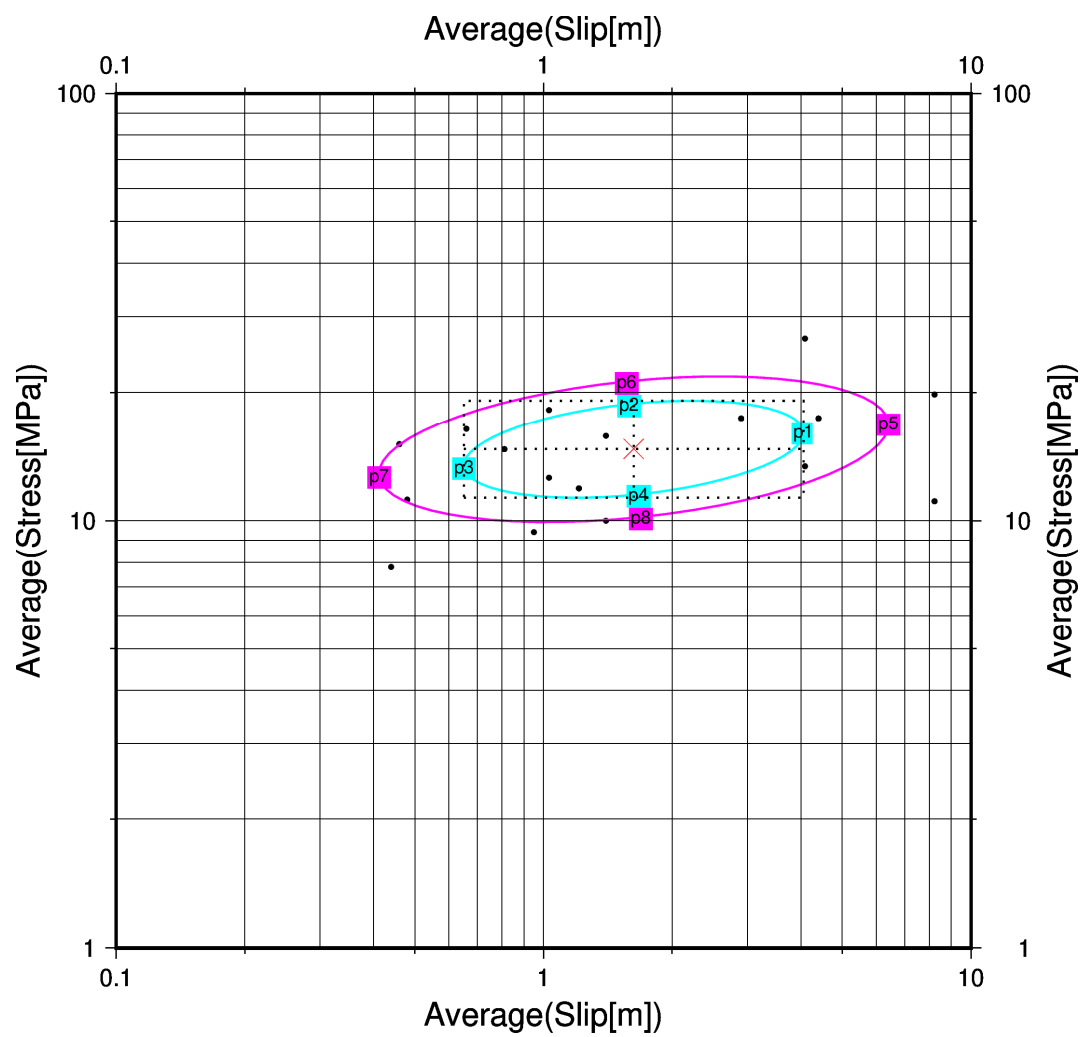


図 4-16 アスぺリティ内のすべり量と応力降下量に関する等確率楕円

— $C=1.0$ — $C=1.5$

(黒点線は応力降下量およびすべり量の 1σ 範囲を示す)

4.3 まとめ

パラメータの不確かさの組み合わせ等の取り扱いに関する知見を蓄積することを目的とし既往研究で得られた内陸地殻内地震、海溝型地震、スラブ内地震の運動学的震源モデル、SMGA モデル及び動力学的震源モデルを対象に 19 地震を収集し、2 章で検討対象とした 2022 年福島県沖の地震、2023 年台湾池上地震、2023 年トルコ・シリア地震も加えた計 22 地震を対象に震源パラメータを整理した。

特性化震源モデルの各震源パラメータの相関性については、地域地盤環境研究所(2023)の検討結果と比較することに加え、地震タイプ(内陸地殻内地震、海溝型地震、スラブ内地震)ごとの傾向が分かるように検討した。

本検討の結果は、いずれのパラメータにおいても過年度の内陸地殻内地震に関する検討結果と概ね同様な傾向を示した。地震タイプごとで比較した場合においても、大きな傾向の差は認められなかった。しかし、主に海溝型地震のパラメータについては、過年度の結果及び、他の地震タイプの結果と乖離する結果がいくつか見られた。本検討で収集した海溝型地震は、2011 年東北地方太平洋沖地震と 2003 年の十勝沖地震の 2 地震であり(文献数は 3 つ)、他の地震タイプの収集数と比べると少ないことから、相関性について検討するためには、より多くのデータ収集・整理が必要となることが考えられる。

相関性を考慮したパラメータの確率分布のモデル化ではアスペリティ内のすべり量と応力降下量に関する等確率楕円を検討し、弱い正の相関を表す等確率楕円を算出した。楕円の回転角が約 6 度であり、短軸は応力降下量、長軸はアスペリティ内のすべり量に概ね対応する結果となった。

【参考文献】

- 地域地盤環境研究所 (2023), 令和 4 年度原子力施設等防災対策等委託費(内陸型地震の特性化震源モデルに係る検討) 報告書.
- 壇一男, 武藤尊彦, 宮腰淳一, 渡邊基史 (2006), スラブ内地震による強震動を予測するための特性化震源モデルの設定方法, 日本建築学会構造系論文集 第600号, 35-42.
- 池田隆明, 釜江克宏, 三輪滋, 入倉孝次郎 (2002), 経験的グリーン関数法を用いた 2000 年鳥取県西部地震の震源のモデル化と強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 第 561 号, 37-45.
- 岩田知孝, 浅野公之 (2010), 強震動予測のためのスラブ内地震の特性化震源モデルの構築と検証, 第13回日本地震工学シンポジウム, 1893-1898.
- 地震調査研究推進本部 地震調査委員会 強震動評価部会(2004), 2003年十勝沖地震の観測記録を利用した強震動予測手法の検証について, 平成16年12月20日.
- 釜江克宏, 入倉入倉孝次郎 (2002): トルコ・コジャエリ、台湾・集集地震の震源の特性化と強震動シミュレーション, 第11回日本地震工学シンポジウム, 545-550.
- Kamae, K. and Kawabe, H. (2004), Source model composed of asperities for the 2003 Tokachi-oki, Japan, earthquake (M J M A = 8.0) estimated by the empirical Green's function method, Earth Planets Space, 56, 323–327.
- 川辺秀憲, 釜江克宏(2013), 2011年東北地方太平洋沖地震の震源のモデル化, 日本地震工学会論文集 第 13 卷, 第 2 号 (特集号), 75-87.
- Kurahashi, S. and Irikura, K. (2011), Source model for generating strong ground motions during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Earth Planets Space, 63, 571–576.
- Maeda, T. and Sasatani, T. (2009), Strong ground motions from an Mj 6.1 inland crustal earthquake in Hokkaido, Japan: the 2004 Rumoi earthquake, Earth Planets Space, 61, 689–701.
- 松島信一, 川瀬博 (2009), 1995年兵庫県南部地震での神戸市域における強震動と木造建造物被害の再評価, 日本建築学会, 構造工学論文集, Vol. 55B, 537-543.
- Miyake, H., Iwata, T. and Irikura, K. (2003), Source Characterization for Broadband Ground-Motion Simulation: Kinematic Heterogeneous, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 93, No. 6, pp. 2531-2545.
- 小穴温子, 壇一男, 宮腰淳一, 藤原広行, 森川信之(2019), 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, 第 19 卷, 第 6 号 (特集号), 76-90.
- 佐藤智美, 土方勝一郎, 植竹富一, 徳光亮一, 壇一男 (2007), 広帯域震源インバージョンによる 2004 年新潟県中越地震の最大加速度に関する研究 (その 2) 中・短周期震源インバージョン, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 365-366.
- 芝 (2008): 電力中央研究所報告 2007年新潟県中越沖地震の震源過程の解明と広帯域強震動評価, 電力中央研究所報告, 研究報告:N08007, 平成20年11月.

徳光亮一，佐藤智美，土方勝一郎，植竹富一，壇一男 (2007), 広帯域震源インバージョンによる 2004 年新潟県中越地震の最大加速度に関する研究（その 1）長周期震源インバージョン，日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 363-364.

吉田昌平，香川敬生，野口竜也 (2018), 2016年鳥取県中部の地震における臨時余震観測に基づいた広域の強震動評価，土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol. 74, No.4(地震工学論文集第37巻), I_417-I_428.

5. 特性化震源モデルのパラメータの不確かさによる影響度の検討

規制基準では、「基準地震動の策定過程に伴う各種の不確かさ（震源断層の長さ、地震発生層の上端深さ・下端深さ、断層傾斜角、アスペリティの位置・大きさ、応力降下量、破壊開始点等の不確かさ、並びにそれらに係る考え方及び解釈の違いによる不確かさ）については、敷地における地震動評価に大きな影響を与えると考えられる支配的なパラメータについて分析した上で、必要に応じて不確かさを組み合わせるなど適切な手法を用いて考慮すること」を求めている。また、2016 年熊本地震では、断層近傍の観測点において正断層成分を含む右横ずれの断層運動に伴う大きな永久変位が観測された。このような断層近傍の観測点の永久変位を含む 2 秒以上の長周期地震動は、断層浅部に長周期地震動の生成域（Long-period Motion Generation Area、以下、「LMGA」という。）を設定した特性化震源モデルで観測記録を概ね再現可能であることが明らかになった。本章では、2 章の検討結果又は特性化震源モデルのパラメータの不確かさに関する既往研究成果に加え、3 章及び 4 章でのパラメータの相関性の検討結果に基づき、各種の不確かさ及びそれぞれの相関性の考慮により地震動評価への影響を定量的分析し、不確かさの評価手法を検討することを目的とする。

地表に断層が現れた縦ずれタイプの内陸型地震または断層破壊が海溝軸付近に伝播した海溝型地震を対象に、下記（１）～（４）の検討を実施し、特性化震源モデルパラメータの地震動評価への影響度合を検討した。検討の対象とする地震には 2008 年四川地震を選定した。

- （１） 検討対象パラメータの不確かさのモデル化
- （２） 基本震源モデルの構築及び地震動評価
- （３） 各パラメータの不確かさを考慮した地震動評価
- （４） パラメータの影響度分析

5.1 検討対象パラメータの不確かさのモデル化

震源特性の不確かさに関する既往研究成果および本検討結果を基に、アスペリティ (SMGA) の応力降下量等のパラメータの不確かさのモデル化を行った。さらに、これまでのパラメータの相関性の検討結果に基づき、相関性のあるパラメータ同士の不確かさのモデル化を検討した。検討した不確かさを以降に示す。なお、本検討において、アスペリティと SMGA の位置、大きさ等のパラメータを分けて設定していないため、以降は SMGA として記載する。

a) SMGA の位置（深さ）に関する不確かさ

SMGA の位置は、深部断層の平均深さに SMGA 中心がくるように設定した深さ「中」に対して、深部断層上端に接する深さ「浅」、深部断層下端に接する深さ「深」の 3 ケースを設定した。

b) LMGA の有無、LMGA のすべり量に関する不確かさ

a) の SMGA の位置（深さ）の「浅」に対して、浅部断層に LMGA を設定した。すべり速度時間関数は田中・他 (2018) を参考にすべり量 D_{LMGA} に基づく規格化 Yoffe 関数により設定した。また、すべり量 D_{LMGA} は SMGA のすべり量 D_a に対して $1.0 D_a$, $1.4 D_a$ の 2 ケースを設定した。なお、検討は波数積分法による長周期地震動の計算のみを対象とした。

c) 破壊伝播速度 V_r 、ライズタイムに係る α に関する不確かさ

破壊伝播速度 V_r は、「レシピ」に基づき震源の媒質の S 波速度 β との比 (V_r/β) が 0.72 となる 2.6 km/s の基本ケースに対して、Kurahashi and Irikura (2010) に基づき、0.8 となる 2.9 km/s を設定した。ライズタイムに係る α に関しては、0.5 とする基本ケースに対して、本検討において既往データを整理した結果得られた 0.23 を不確かさケースとして設定した。

d) 応力降下量の深さ依存性に関する不確かさ

相関性のあるパラメータ同士の不確かさのモデル化として、Asano and Iwata (2011) を参考に SMGA の位置（深さ）の「浅」「深」の 2 ケースに対して、SMGA の応力降下量 σ_a の深さ依存性の不確かさを設定した。

e) 高周波数遮断周波数 f_{max} に関するモデル化の不確かさ

f_{max} に関するモデル化として、基本ケースでは佐藤・他 (1994) の $m=4.2$ および鶴来・他 (1997) より $f_{max}=6$ Hz を用い、不確かさとして比較対象とするケースでは香川・他 (2003) の平均および平均 $\pm \sigma$ を設定した。検討は、統計的グリーン関数法による短

周期地震動のみを対象とした。

5.2 基本震源モデルの構築及び地震動評価

前節でモデル化した各パラメータの平均値もしくは中央値を用いた特性化震源モデルを「基本震源モデル」として構築した。前節以外の断層パラメータについては、「レシピ」に基づく長大断層の設定方法から設定した（モデル A）。比較用のモデルとして、図 5-1 に示す壇・他（2015）に基づいて検討された Dan *et al.* (2019)についても断層パラメータを設定した（モデル B）。

1) 地震モーメント、断層面積、断層長さ、断層幅

Dan *et al.* (2019)を参考に地震発生層の上端深さを 3 km と設定し、地震発生層内の震源断層面積 S_{seis} は $L_{\text{seis}} 280 \text{ km} \times W_{\text{seis}} 40 \text{ km} = 11,200 \text{ km}^2$ と設定した。

また、走向は 229 度、傾斜角は 35 度、すべり角は 90 度と設定した。

表 5-1 に断層基準点を示す。以降に震源モデルの主な物性値の設定方法について示す。

表 5-1 断層基準点等

断層基準点 緯度, 経度(deg)	走向 (deg)	傾斜角 (deg)	長さ (km)	幅 (km)	すべり角 (deg)
105.5367, 32.4723	229	35	280	40	90

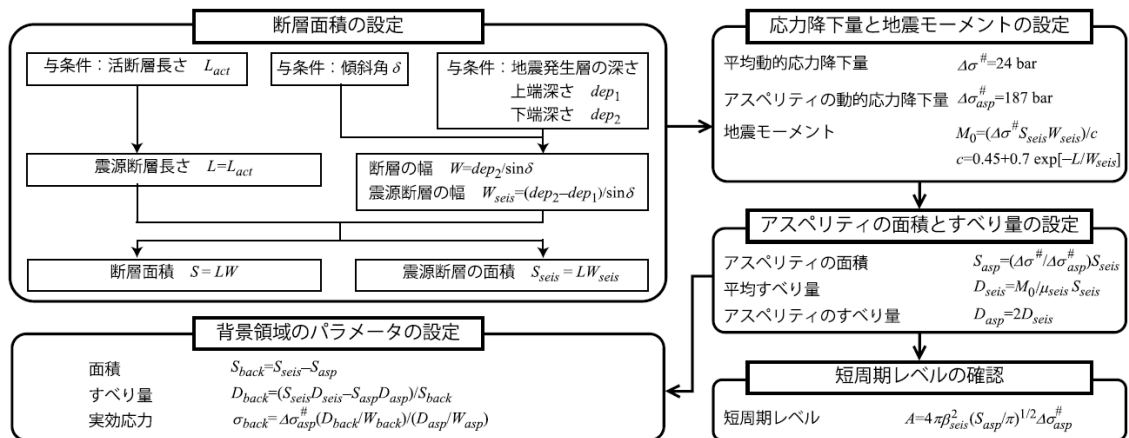


図 5 長大な逆断層による内陸地震の強震動予測用の断層パラメータ算定手順

図 5-1 壇・他（2015）による長大な逆断層による内陸地震の断層パラメータ算定手順

2) 深部断層と浅部断層の設定

本検討では断層面全体に対し、地震発生層上端深さより浅い領域を浅部断層、深い領域を深部断層と考える。上述の通り、地震発生層の上端深さを 3 km として設定しており、これを境に深部断層と浅部断層を設定した。

構築する基本震源モデルは深部断層内に SMGA と背景領域 (off SMGA) を設定した。なお、LMGA を設定する不確かさケースでは浅部断層内に LMGA を設定した。

3) 速度構造および物性値

物性値については、図 5-2 に示した Kurahashi and Irikura (2010) で用いられた速度構造や Dan *et al.* (2019) を参考に表 5-2 に示す 2 層の速度構造を設定した。密度 ρ および Q 値については、Ludwig *et al.* (1970) および地震調査研究推進本部の JIVSM を参考に設定した。また、統計的グリーン関数法の計算においては、伝播経路について Hadi Ghasemi *et al.* (2009) を参考に $Q(f)=415f^{0.5}$ を適用し、地盤構造の Q 値については設定した Q_0 に対して $Q(f)=Q_0f^{0.5}$ とした。このとき、1 Hz 以下では 1 Hz の値を適用した。

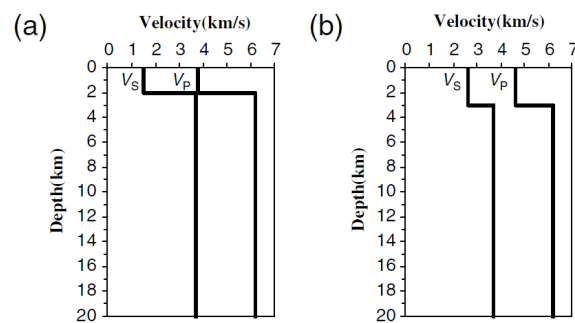


Figure 13. *P*- and *S*-wave velocity structure models (a) at WCW and (b) at the other stations. The velocity models are estimated, based on (a) Liu *et al.* (2009) and (b) Lou *et al.* (2008).

図 5-2 Kurahashi and Irikura (2009) で整理された近傍観測点の速度構造

表 5-2 設定した速度構造

Layer	Thickness (km)	ρ (g/cm ³)	V_p (km/s)	Q_p	V_s (km/s)	Q_s
1	3.0	2.5	4.6	680	2.6	400
2	-	2.8	6.3	680	3.7	400

4) セグメント分割、SMGA の個数、配置および破壊開始点

セグメントは同じ断層長さの 5 区間($L=56\text{ km}$)を想定した。SMGA の数は各区間に 2 個とし、SMGA の面積は等しいものとして設定した。SMGA の配置は、長さ方向にはバランス良く、幅方向には深部断層の中央に配置した。また、破壊開始点は北側から 4 つ目のセグメント (区間 4) の北側の SMGA 下端中央とした。

モデル A の特性化震源パラメータを表 5-3、モデル B の特性化震源パラメータを表 5-4 に、SMGA 配置をそれぞれ図 5-3 および図 5-4 に示す。

表 5-3 「レシピ」に準じて設定した特性化震源パラメータ

パラメータ	設定値	単位
地震発生層上端深さ	3	km
震源媒質 S 波速度 β_{seis}	3.6	km/s
震源媒質密度 ρ_{seis}	2,800	kg/m ³
震源媒質剛性率 μ_{seis}	3.6E+10	N/m ²
平均応力降下量 $\Delta\sigma$	3.1	MPa
SMGA 応力降下量 $\Delta\sigma_{\text{SMGA}}$	14.1	MPa
震源断層面積 S_{seis}	11,200	km ²
震源断層長さ L_{seis}	280	km
震源断層幅 W_{seis}	40	km
地震モーメント M_0	1.12+21	Nm
モーメントマグニチュード M_w	8.0	
平均すべり量 D_{seis}	2.8	m
短周期レベル A	2.2E+20	Nm/s ²
SMGA 面積 S_{SMGA}	2,464	km ²
SMGA すべり量 D_{SMGA}	5.5	m
背景領域面積 S_{back}	8,736	km ²
背景領域すべり量 D_{back}	2.0	m

表 5-4 Dan *et al.* (2019) に準じて設定した特性化震源パラメータ

パラメータ	設定値	
地震発生層上端深さ	3	km
震源媒質 S 波速度 β_{seis}	3.6	km/s
震源媒質密度 ρ_{seis}	2,800	kg/m ³
震源媒質剛性率 μ_{seis}	3.6E+10	N/m ²
平均動的応力降下量 $\Delta\sigma^{\#}$	2.4	MPa
SMGA 動的応力降下量 $\Delta\sigma_{\text{SMGA}}^{\#}$	18.7	MPa
震源断層面積 S_{seis}	11,200	km ²
震源断層長さ L_{seis}	280	km
震源断層幅 W_{seis}	40	km
地震モーメント M_0	2.39E+21	Nm
モーメントマグニチュード M_w	8.2	
平均すべり量 D_{seis}	5.9	m
短周期レベル A	6.6E+19	Nm/s ²
SMGA 面積 S_{SMGA}	1,437	km ²
SMGA すべり量 D_{SMGA}	11.7	m
背景領域面積 S_{back}	9,763	km ²
背景領域すべり量 D_{back}	5.0	m

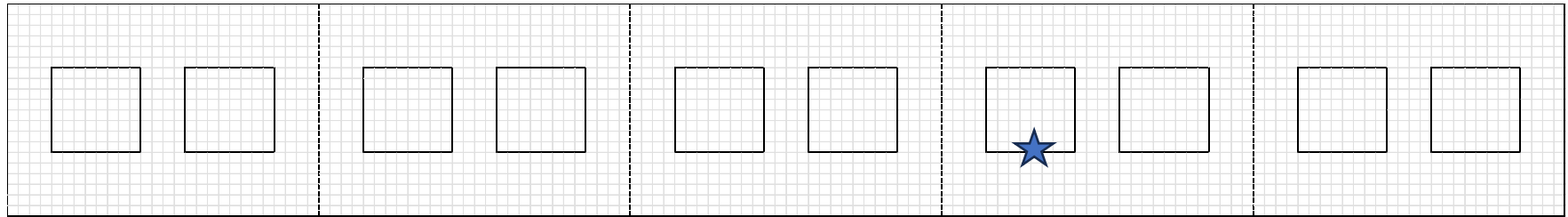


図 5-3 モデル A の基本震源モデル (Case0_A) の SMGA 配置と破壊開始点

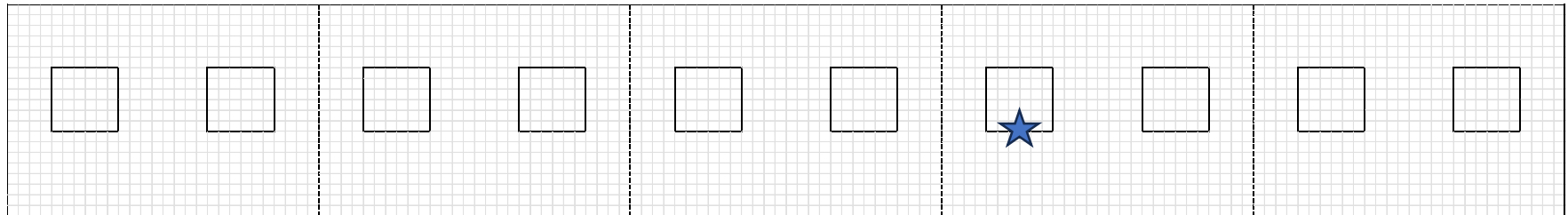


図 5-4 モデル B の基本震源モデル (Case0_B) の SMGA 配置と破壊開始点

断層極近傍、近距離及び中距離、3段階複数の評価地点を設けたうえで、ハイブリッド合成手法を用いて各評価地点の地震動評価を実施する。計算地点は以下の3段階として設定した。

- ・ 極近傍：地表断層から 1 km, 2 km (17 地点ずつ)
- ・ 近距離：地表断層から 5 km, 10 km (17 地点、19 地点)
- ・ 中距離：地表断層から 20 km, 40 km, 60 km (19 地点ずつ)
- ・ 強震観測点 7 点

設定した計算地点を図 5-5 に示す。

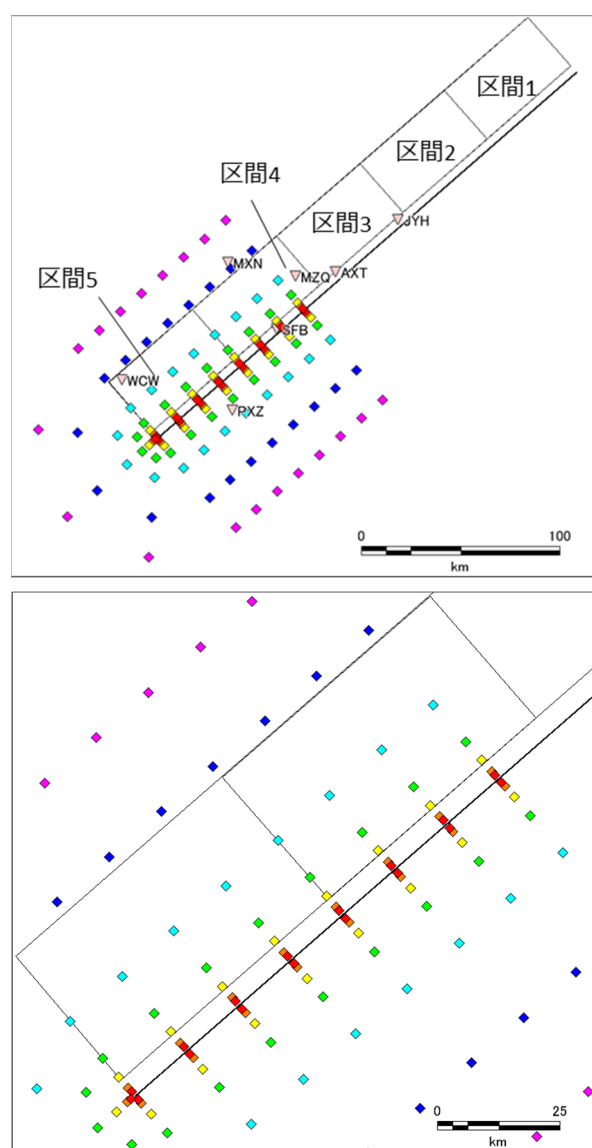


図 5-5 計算地点 上：全体図 下：区間 4～5 付近の拡大図

◆:1km, ◆:2km, ◆:5km, ◆:10km, ◆:20km, ◆:40km, ◆:60km, △:観測点

地震動評価のための計算手法について、主に周期 1 秒以下は統計的グリーン関数法 (Stochastic Green Function; SGF)、周期 1 秒以上は理論的手法として波数積分法(Wavenumber Integration; WNI)を用いた。両手法で計算した結果に対して、マッチング周期 1.25 秒(0.8 Hz)のフィルタを用い、ハイブリッド合成(HYB)を行い、地震動評価を行った。

統計的グリーン関数法は、内閣府 (2012)に準じた計算方法を採用し、水平 2 成分上下 1 成分の 3 成分を計算した。ここで、香川 (2004)を参考に、ラディエーション係数について、周期 4 秒以上は理論解、周期 0.5 秒以下は平均化されたラディエーション係数を採用し、その間の周期は遷移するように設定した。平均化されたラディエーション係数は大西・堀家 (2004)の方法により算出した。また、変位波形がベル型になるように乱数を選択した。地震基盤における統計的グリーン関数について、波形の包絡形状は Boore (1983)を用い、振幅は全国地震動予測地図 技術報告書 (地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2009) に準じて設定した。

波数積分法は、工学院大学久田教授が公開している Hisada and Bielak (2003)に基づくフリングステップを高精度に評価することのできる計算プログラムを使用した。有効周期は 0.64 秒以上となるように設定した。すべり速度時間関数については、「レシピ」を参考に、中村・宮武 (2000)を用いた。ただし、LMGA については田中・他 (2018)による規格化 Yoffe 関数を用いた。

基本震源モデルの地震動計算結果について、モデル A、モデル B の地震動指標分布を図 5-6 および図 5-7 にそれぞれ示す。

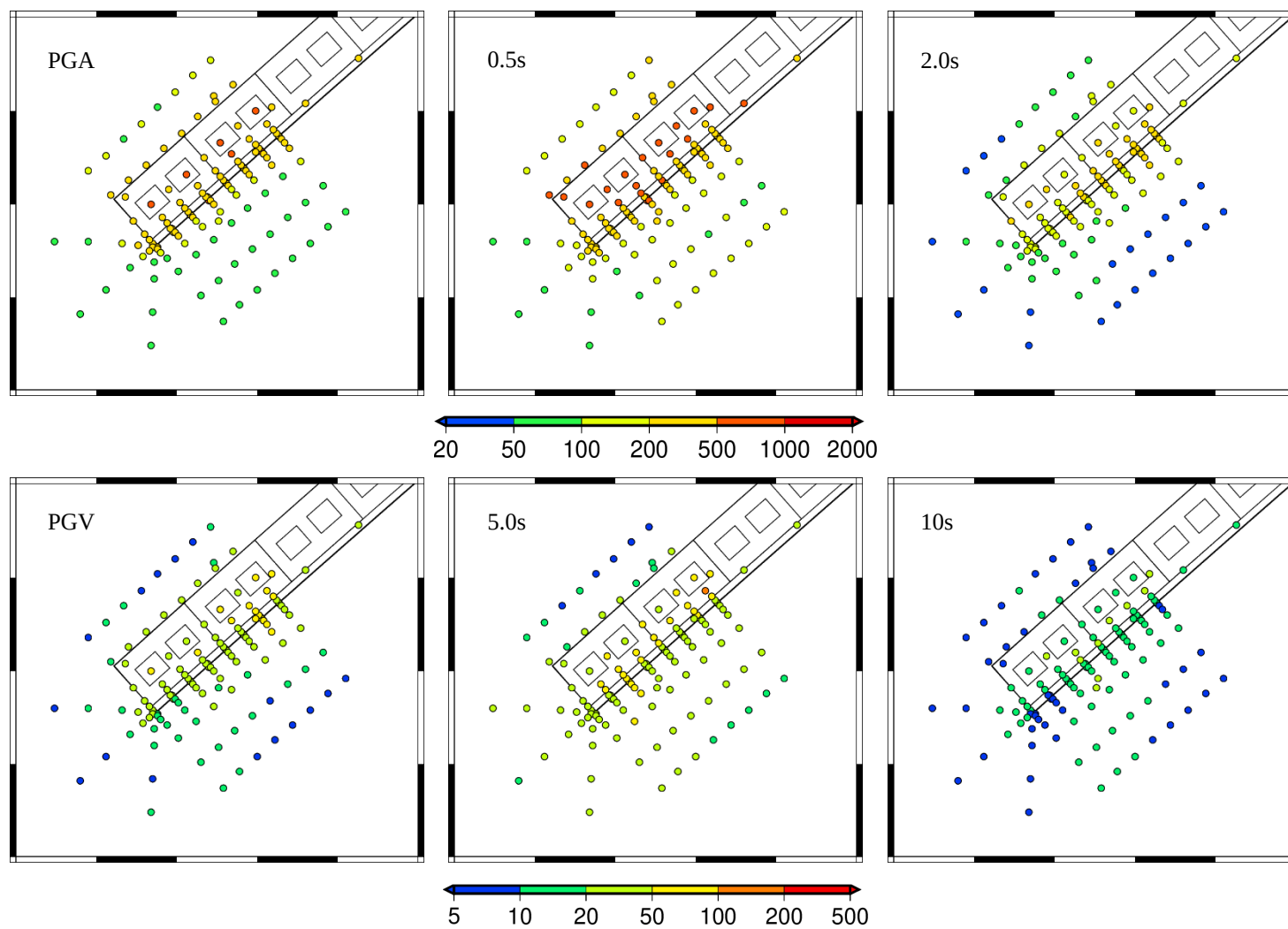


図 5-6 基本震源モデル（モデルA）による地震動指標分布

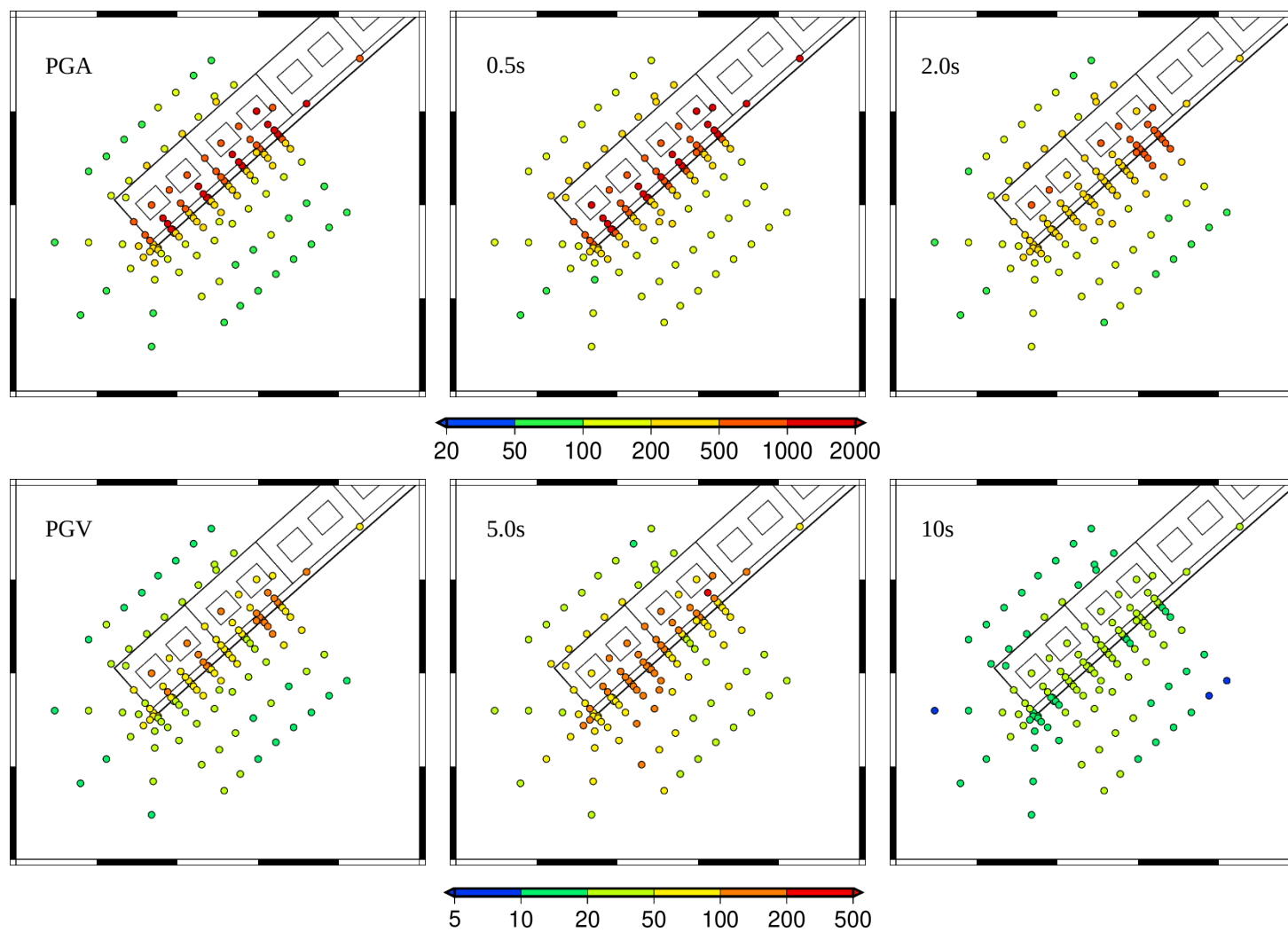


図 5-7 基本震源モデル（モデルB）による地震動指標分布

「レシピ」に準じて断層パラメータを設定した場合に対して観測記録を説明するための「調整モデル」を構築し、調整モデルを用いた地震動計算結果と観測記録を比較し、前節で設定したモデル A のパラメータ設定の妥当性について確認した。なお、調整モデルは SMGA のみを対象に検討した。

調整モデルの検討に当たっては、既往研究である Kurahashi and Irikura (2010)を参考にした。以降に調整モデルの設定概要を示す。

調整モデルでは Kurahashi and Irikura (2010)を参考に断層を 2 区間に等分割し、南側のみ検討対象とした。SMGA 面積は 1,232 km² であり、SMGA の大きさ、配置等は Kurahashi and Irikura (2010)を参考に調整した。表 5-5 および図 5-8 に Kurahashi and Irikura (2010)および設定した調整モデルの SMGA のパラメータおよび配置をそれぞれ示す。

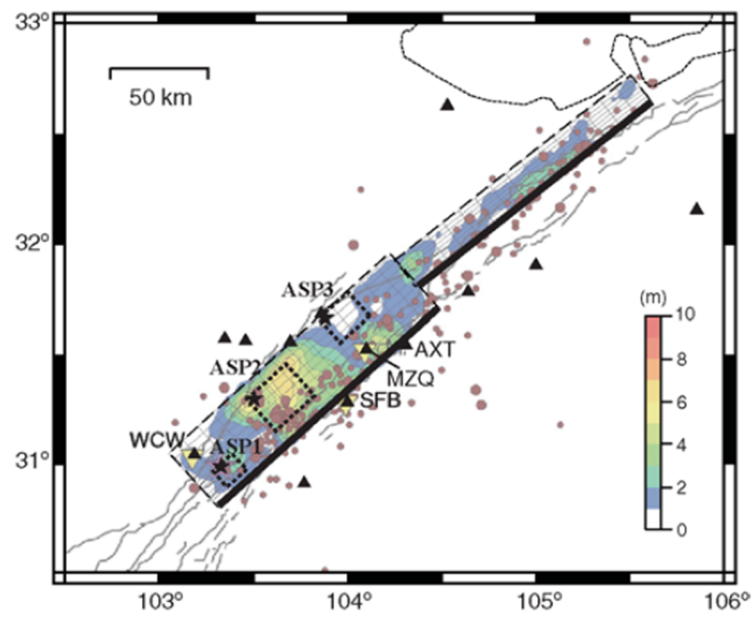
表 5-5 (a) Kurahashi and Irikura (2010)による震源モデルと
(b) 設定した調整モデル

(a)

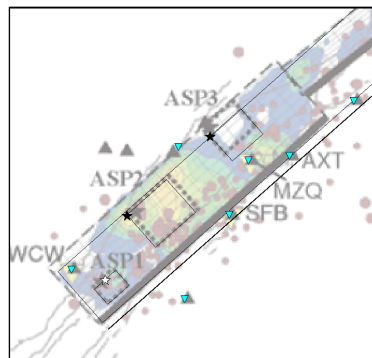
Table 4 Source Parameters of the Three Asperities			
	Area (km ²)	M_0 (N m)	Stress Drop (MPa)
Asp1	174.2	1.38E+19	13.6
Asp2	696.7	1.11E+20	13.6
Asp3	392.0	4.67E+19	13.6

(b)

	面積 (km ²)	地震モーメント (Nm)	応力降下量 (MPa)
SMGA1	156	1.74×10^{19}	14.1
SMGA2	676	1.57×10^{20}	14.1
SMGA3	400	7.16×10^{20}	14.1



(a)



(b)

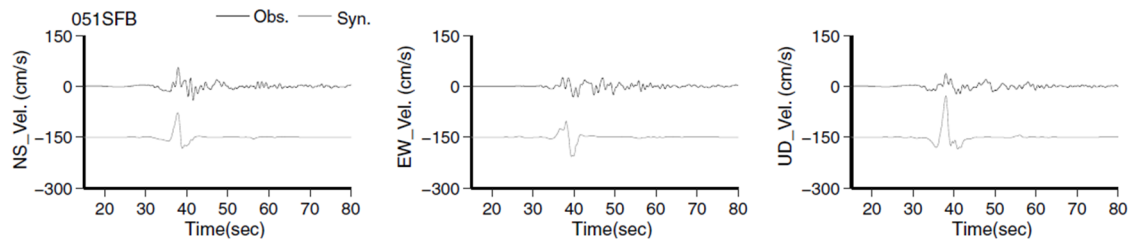
図 5-8 (a) Kurahashi and Irikura (2010)による震源モデルと
(b) 設定した調整モデル ((a)の図面に加筆して作成)

まず、長周期地震動について、波数積分法により速度波形を計算した。Kurahashi and Irikura (2010)ではすべり速度時間関数に Smoothed Ramp を用いており、次節以降では中村・宮武 (2000)を用いるため、ここでは Smoothed Ramp および中村・宮武 (2000)をそれぞれ計算し比較した。

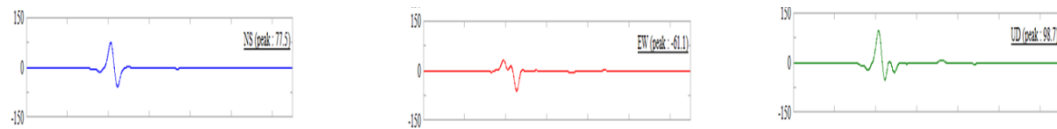
図 5-9 に SFB および MZQ 観測点における (a) Kurahashi and Irikura (2010)による観測波形と計算波形、(b) Smoothed Ramp を用いた場合の計算波形および(c)中村・宮武 (2000)を用いた場合の計算波形の比較を示す。(a)の計算波形と(b)の計算波形は、概ね整合的である。図 5-8 に示した通り、SMGA の位置が異なっていることにより、Kurahashi and Irikura (2010)との差が多少見られるが、全体的な波形の特徴や最大値は概ね整合していることが確認できる。なお、SMGA3 と ASP3 の違いが大きく、SMGA3 により近い MZQ では波形の違いが大きくなっている。また、(b)と(c)の比較では、全体的な波形の特徴は概ね整合的であるが、(c)のほうが短周期成分を多く含み、最大値が大きいことが分かる。

次に、短周期地震動について、統計的グリーン関数法により加速度波形を計算した。一方、Kurahashi and Irikura (2010)では、短周期地震動の評価に経験的グリーン関数法を用いており、直接的な比較はできないことに注意が必要である。

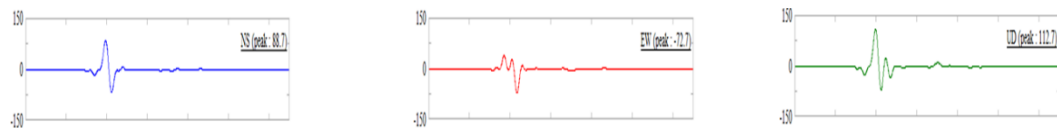
図 5-10 に SFB および MZQ 観測点における (a) Kurahashi and Irikura (2010)による観測波形と計算波形、(b) 本検討の計算波形の比較を示す。(b) 本検討については、Vs2.7 km/s 層の波形であり、振幅値が(a)と比べ過小評価となっている。また、継続時間についても表層地盤の影響および表面波を考慮していない計算であることから(a)と比べ短くなっている。ここで、藤本・翠川 (2006)の最大加速度増幅率の関係式から、地表 AVS が 600 m/s と仮定すると約 3.2 倍となるため、表層の地盤の影響を考慮すると、最大振幅に関しては計算結果はバラツキの範囲内と考えられる。



(a)

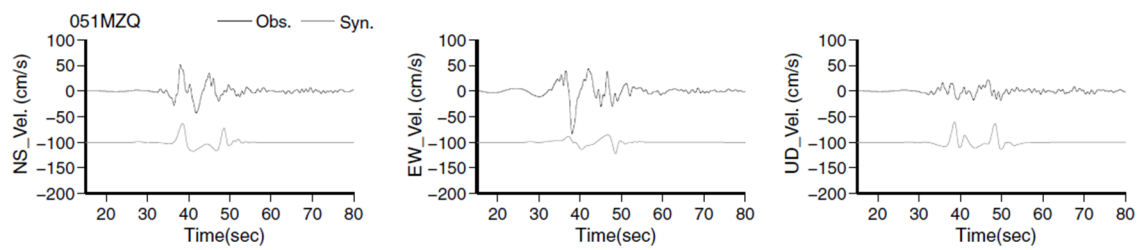


(b)

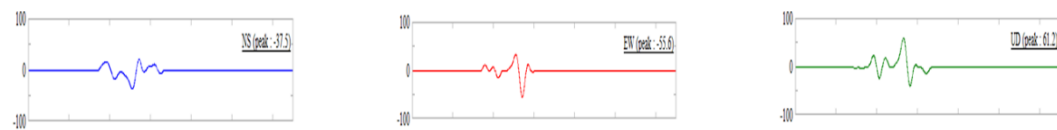


(c)

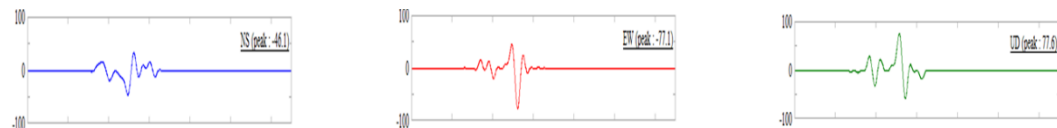
SFB



(a)



(b)

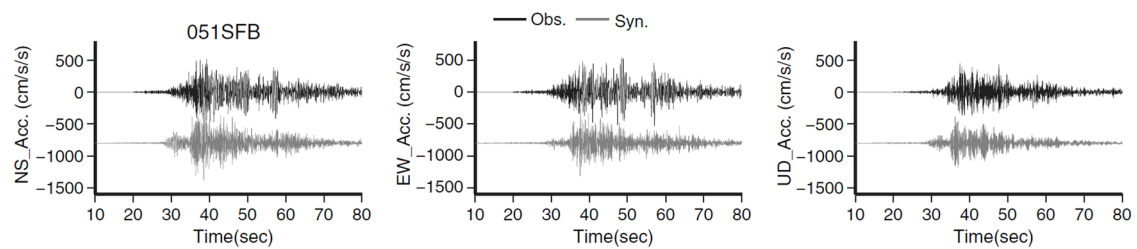


(c)

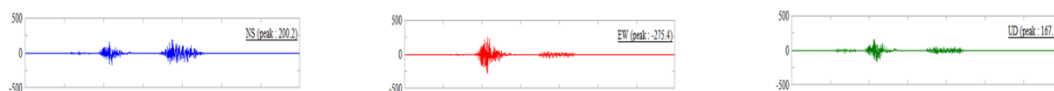
MZQ

图 5-9 速度波形比較

(a) Kurahashi and Irikura (2010), (b) Smoothed Ramp, (c) 中村・宮武 (2000)

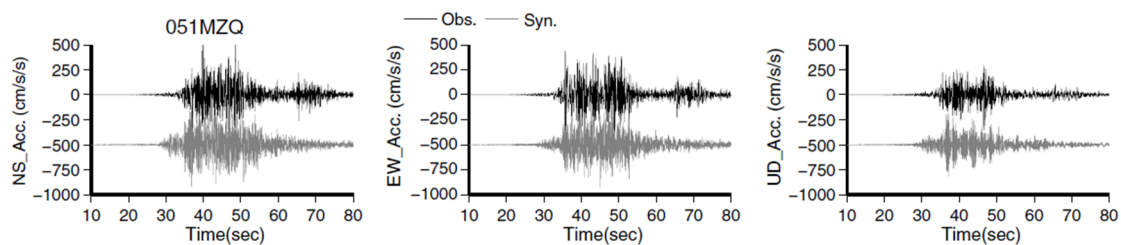


(a)

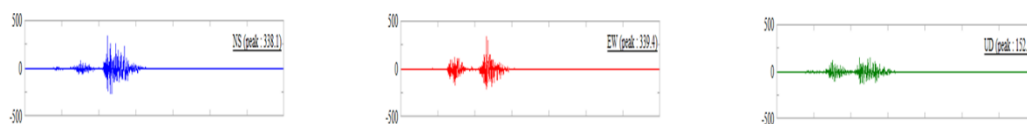


(b)

SFB



(a)



(b)

MZQ

図 5-10 加速度波形比較

(a) Kurahashi and Irikura (2010), (b) 本検討

5.3 各パラメータの不確かさを考慮した地震動評価

5.1 節で検討した不確かさのモデル化結果に基づき、パラメータごとに不確かさを考慮した震源断層モデルを「不確かさケース」として構築し、それらパラメータの相関性を考慮した地震動評価を行った。検討ケースを表 5-6 に示す。

SGF のみを対象とした Case9_A 以外の各ケースの計算結果による地震動分布を図 5-11～図 5-21 に示す。

また、Case9_A については Case0_A との比較として PGA 分布を図 5-22 に示す。

表 5-6 不確かさの検討ケース

計算ケース	SMGA 深さ	LMGA すべり量	Vr (Vr/β)	α	その他	備考
Case0_A	中	(LMGA なし)	2.6km/s (0.72)	0.5		基本ケース
Case1_A	浅					LMGA 有無の影響
Case2_A	浅	1.0Da				
Case3_A	浅	1.4Da				田中・他 (2019)
Case4_A	中		2.9km/s (0.8)	(0.56)		ライズタイムは基本 ケースと同じ値
Case5_A	中			0.23		WNI 中村・宮武関数 は変更なし
Case6_A	深					
Case7_A	浅				$\Delta \sigma_a = 7.9\text{MPa}$	相関性ケースとして Asano and Iwata (2011)を参考に応力 降下量を変更
Case8_A	深				$\Delta \sigma_a = 20.3\text{MPa}$	
Case9-1_A Case9-2_A Case9-3_A	中				fmax 関数 香川・他 (2003)	SGF のみ検討
Case0_B	中	(LMGA なし)	2.6km/s (0.72)	0.5		
Case1_B	浅					
Case2_B	浅	1.0Da				
Case3_B	深					

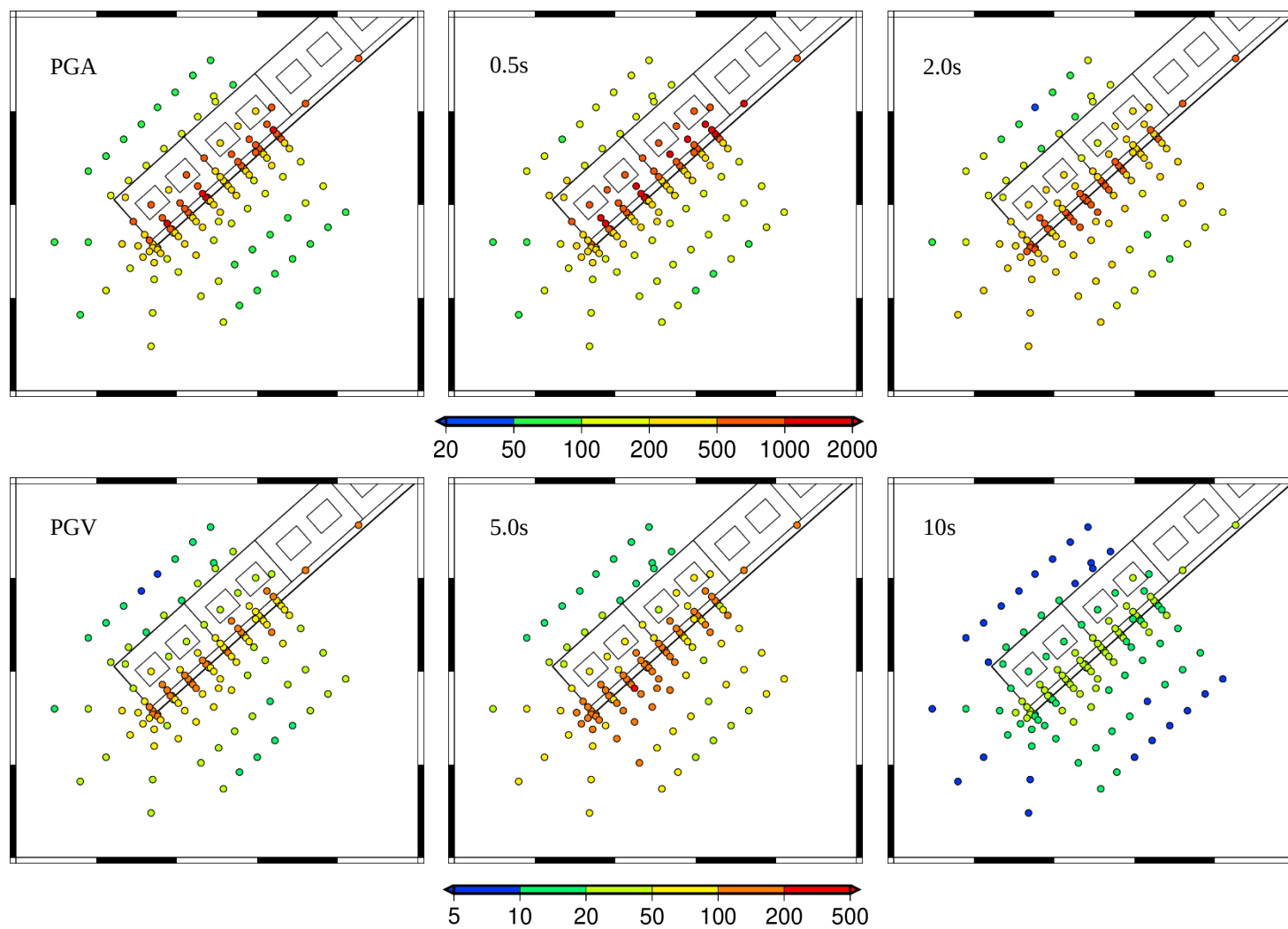


圖 5-11 Case1_A 地震動分布

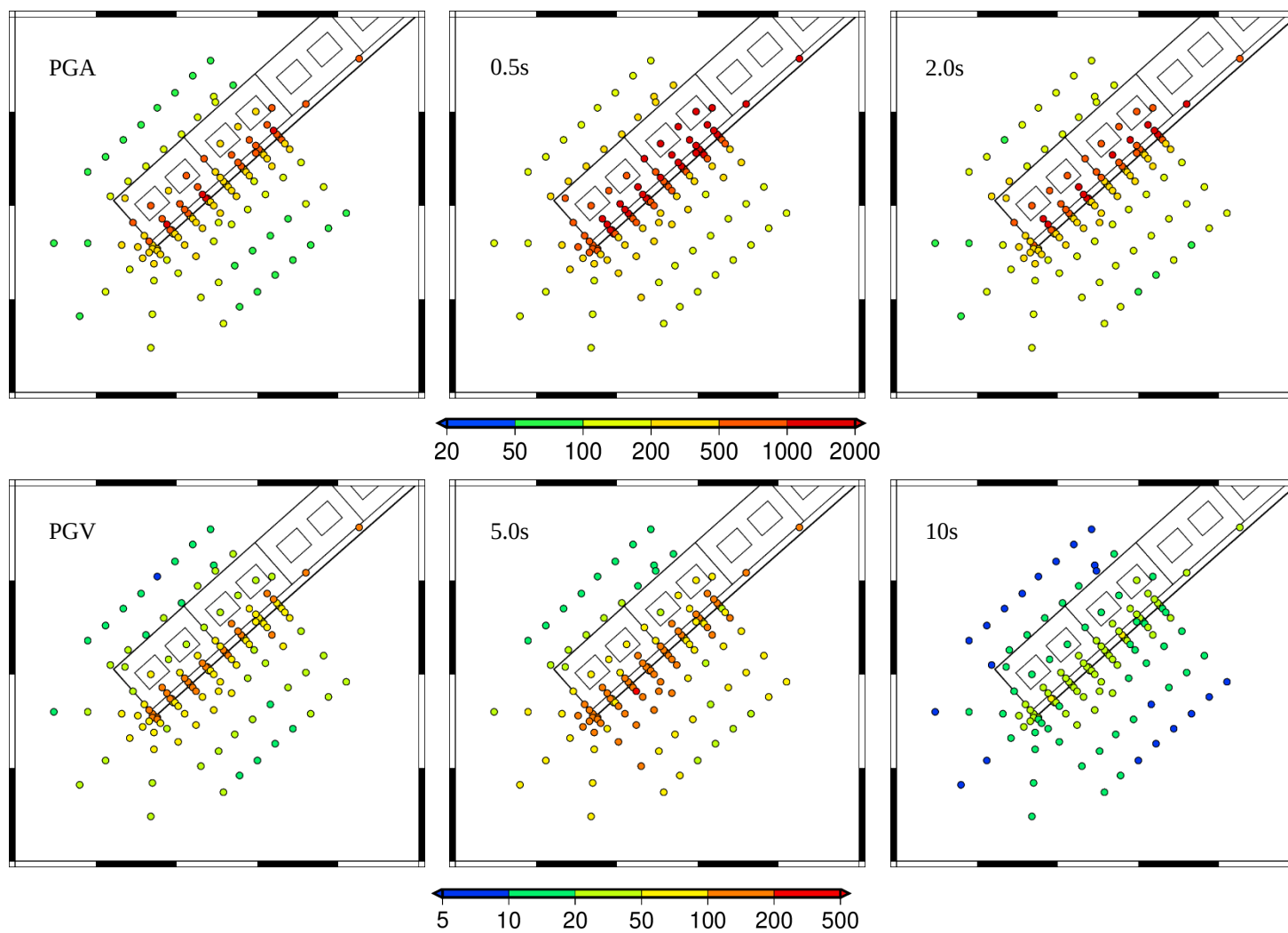


図 5-12 Case2_A 地震動分布

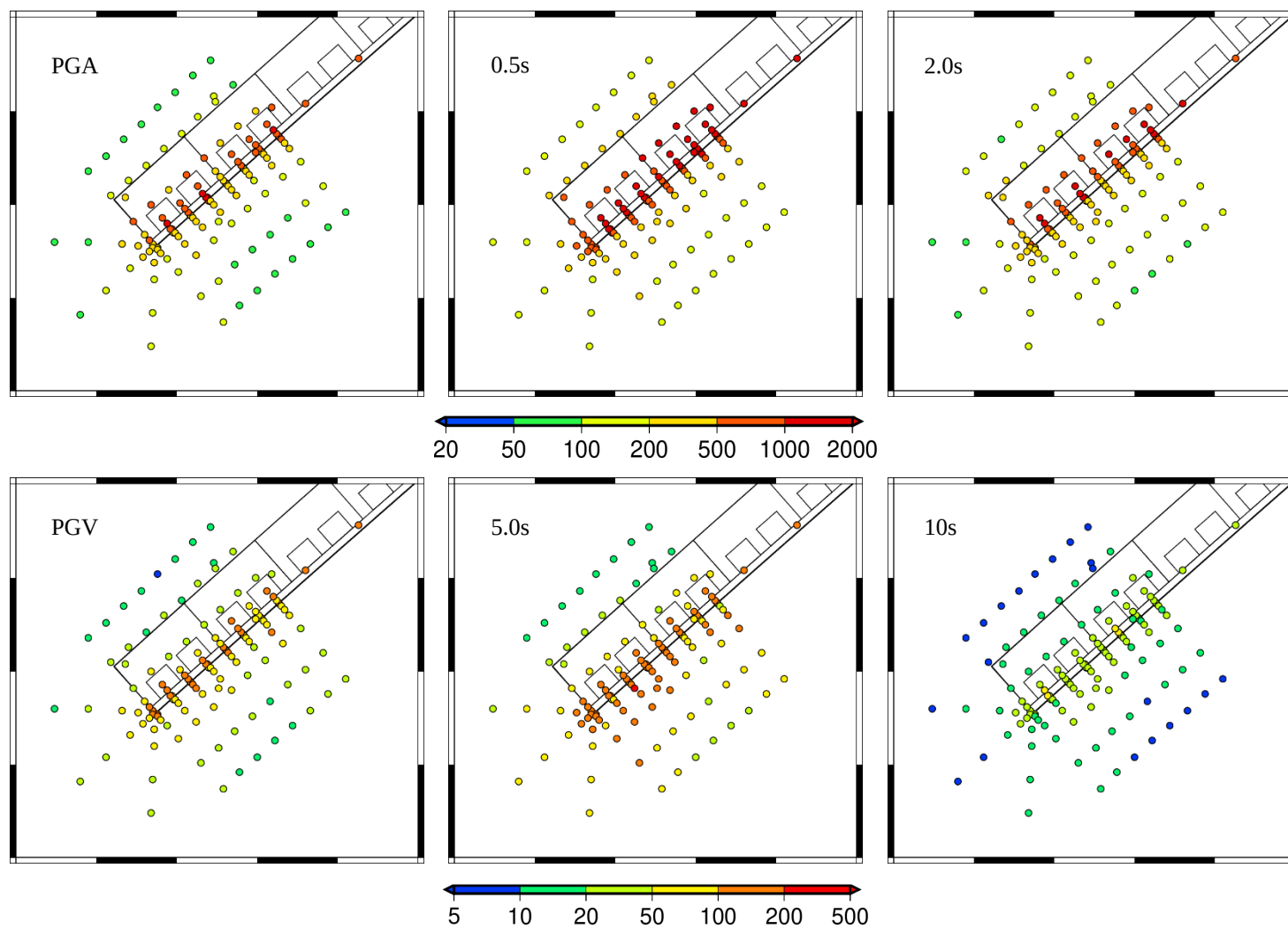


図 5-13 Case3_A 地震動分布

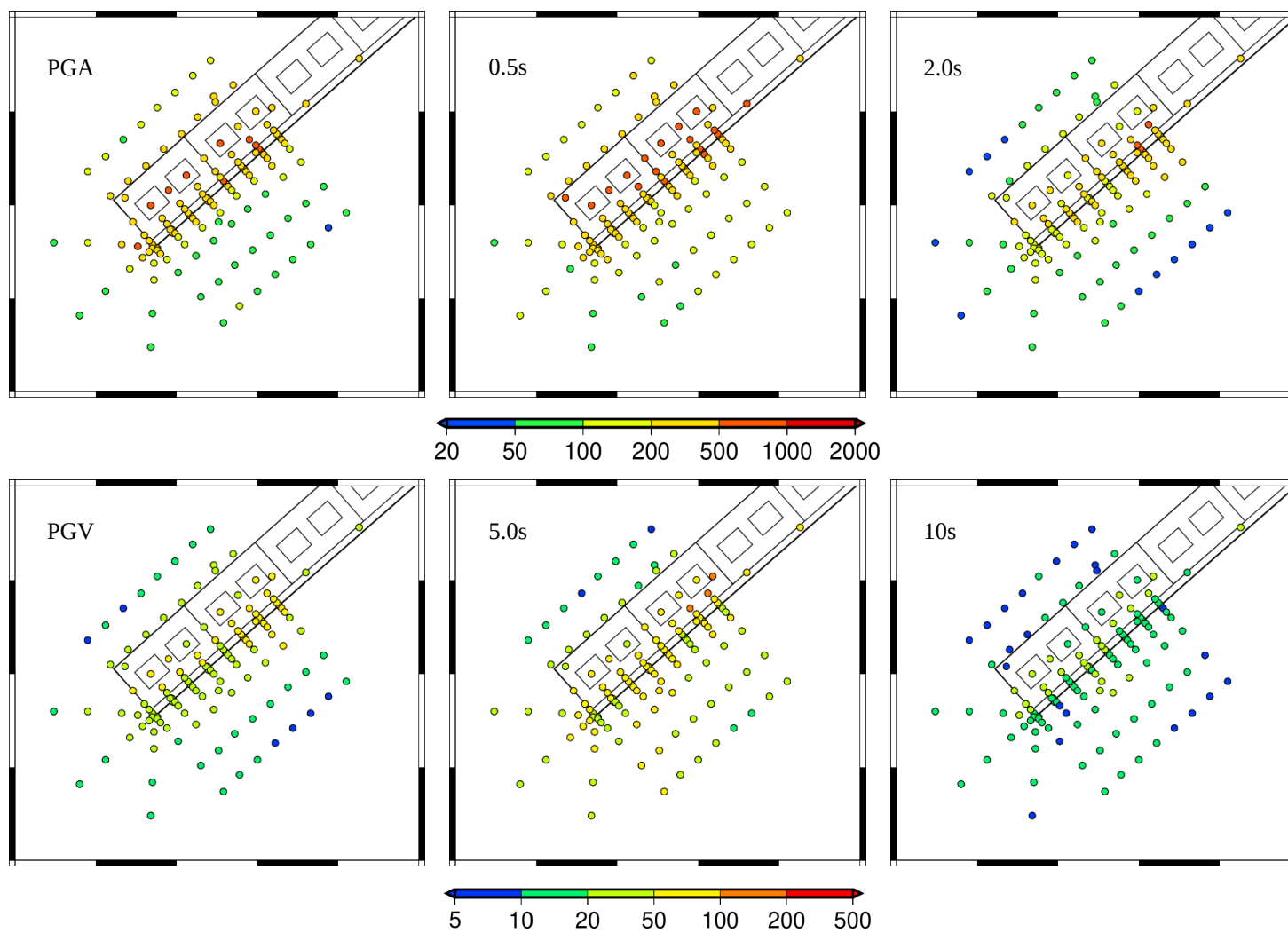


図 5-14 Case4_A 地震動分布

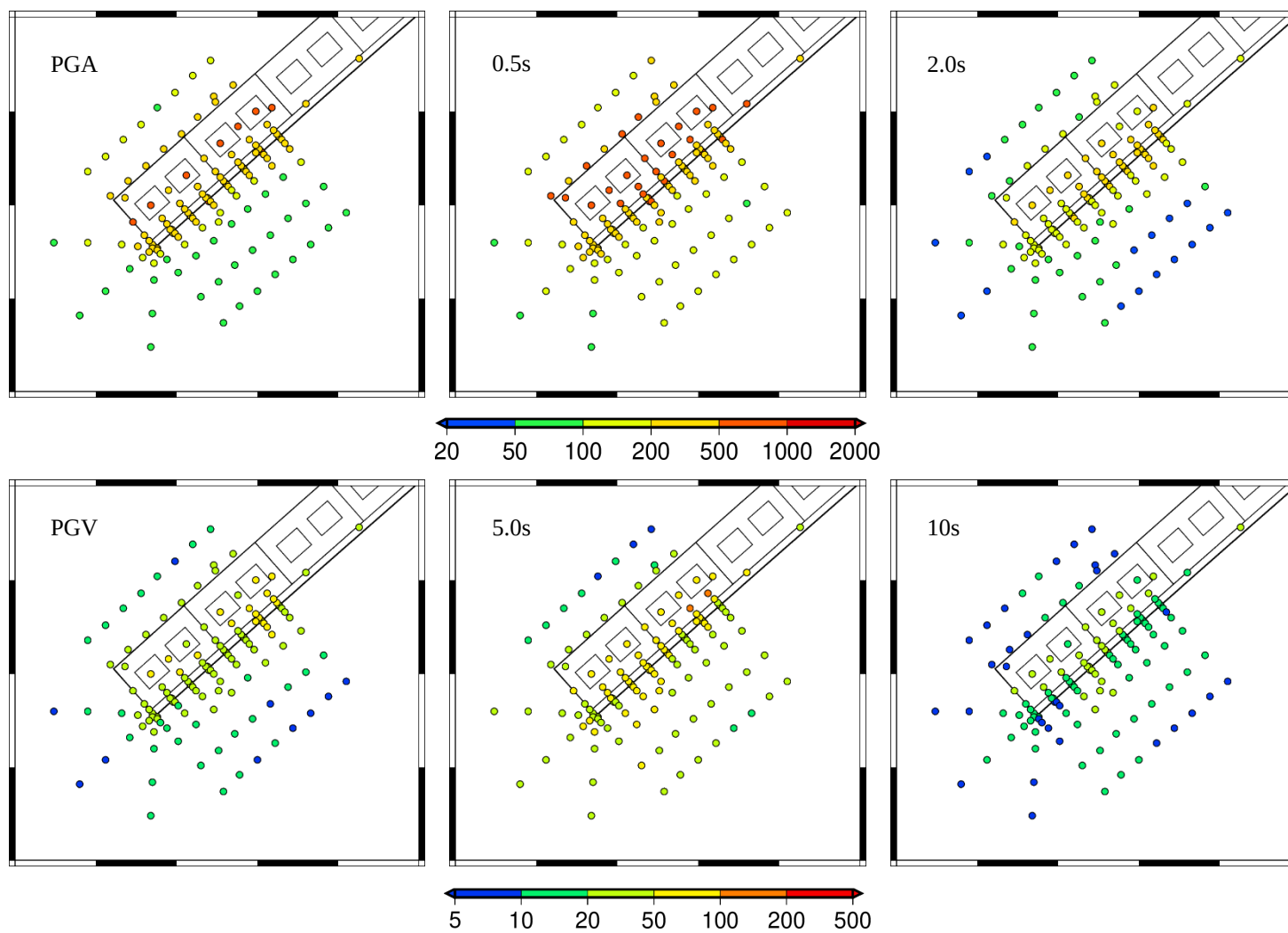
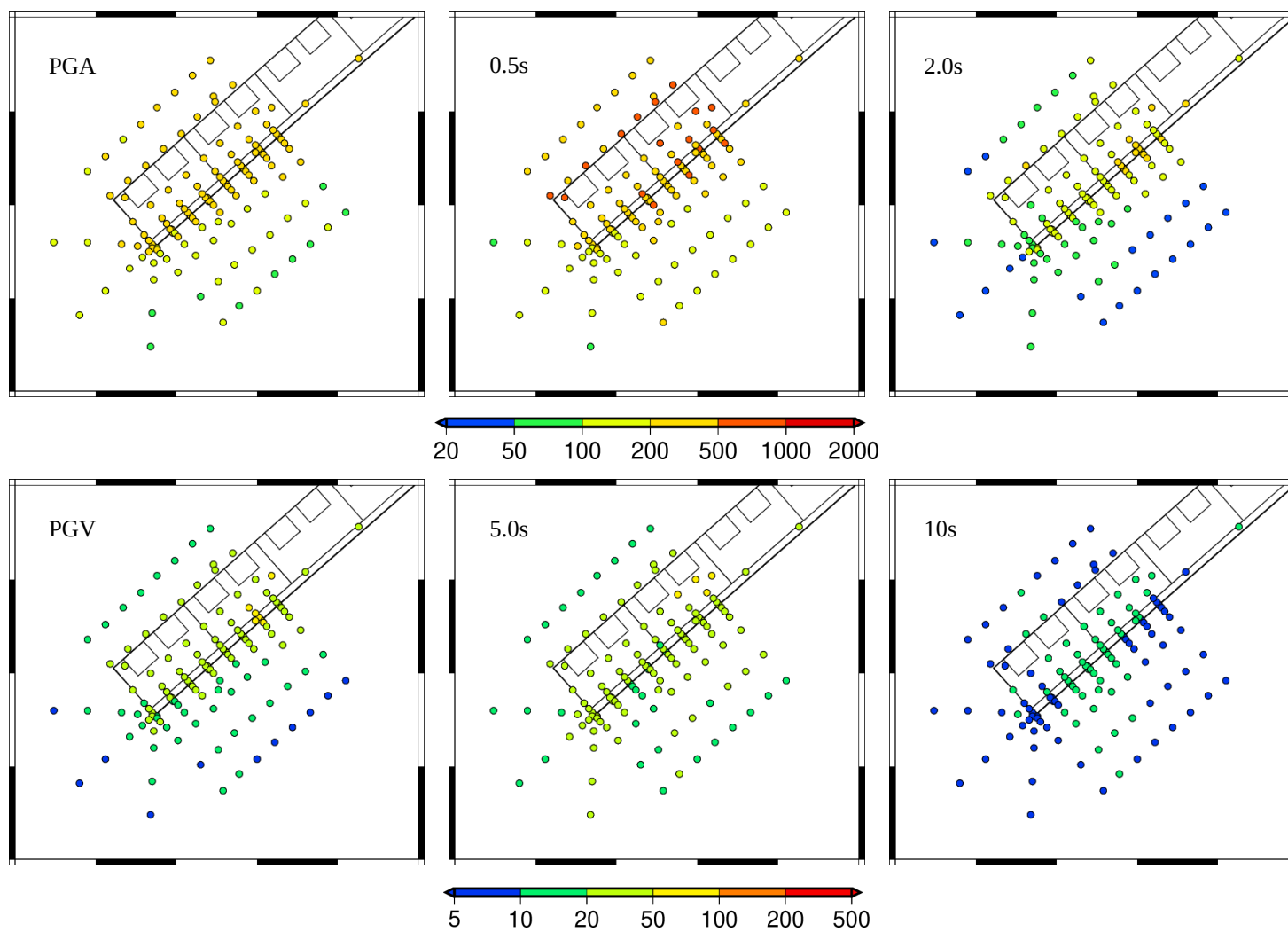


図 5-15 Case5_A 地震動分布



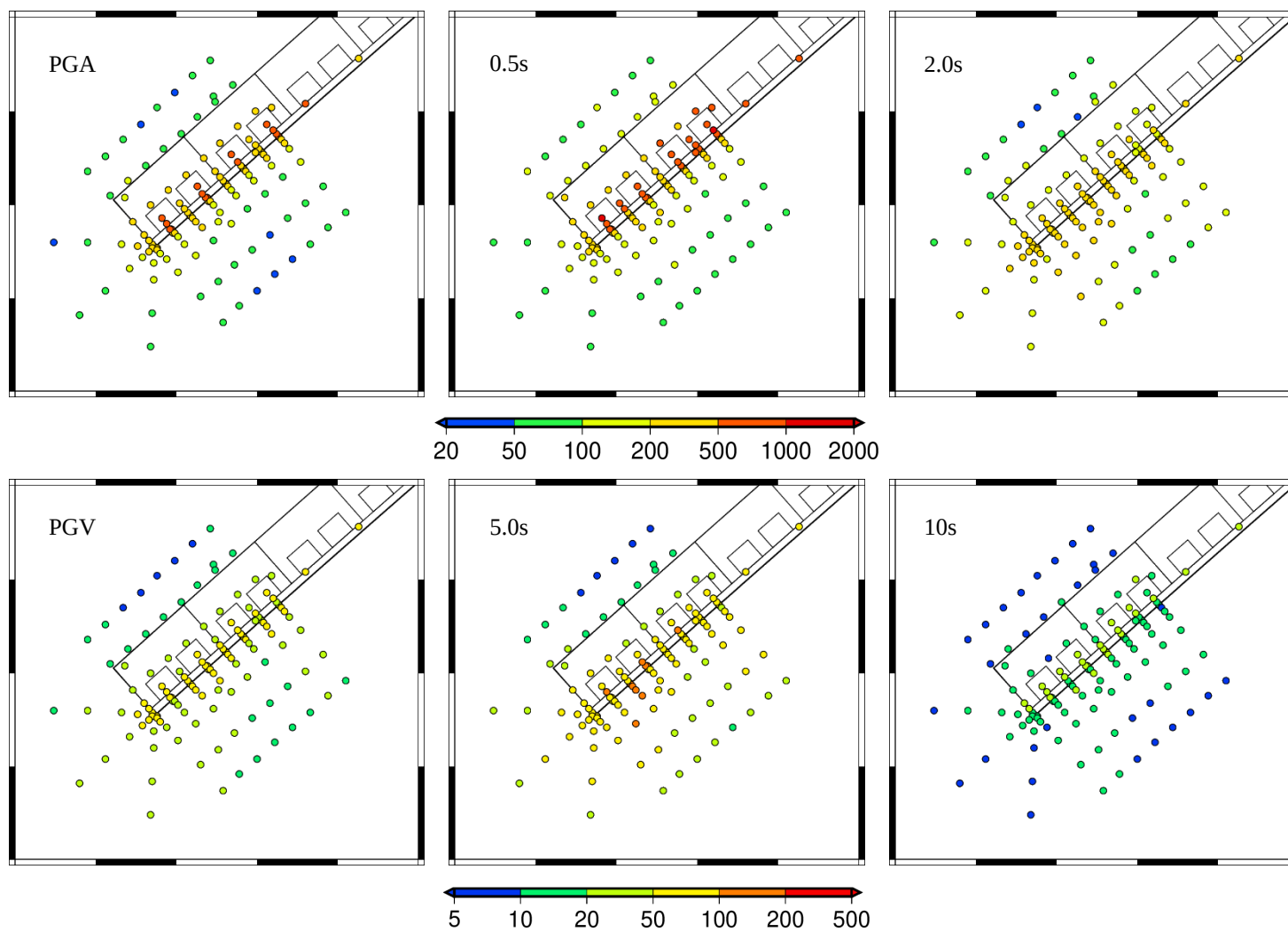


図 5-17 Case7_A 地震動分布

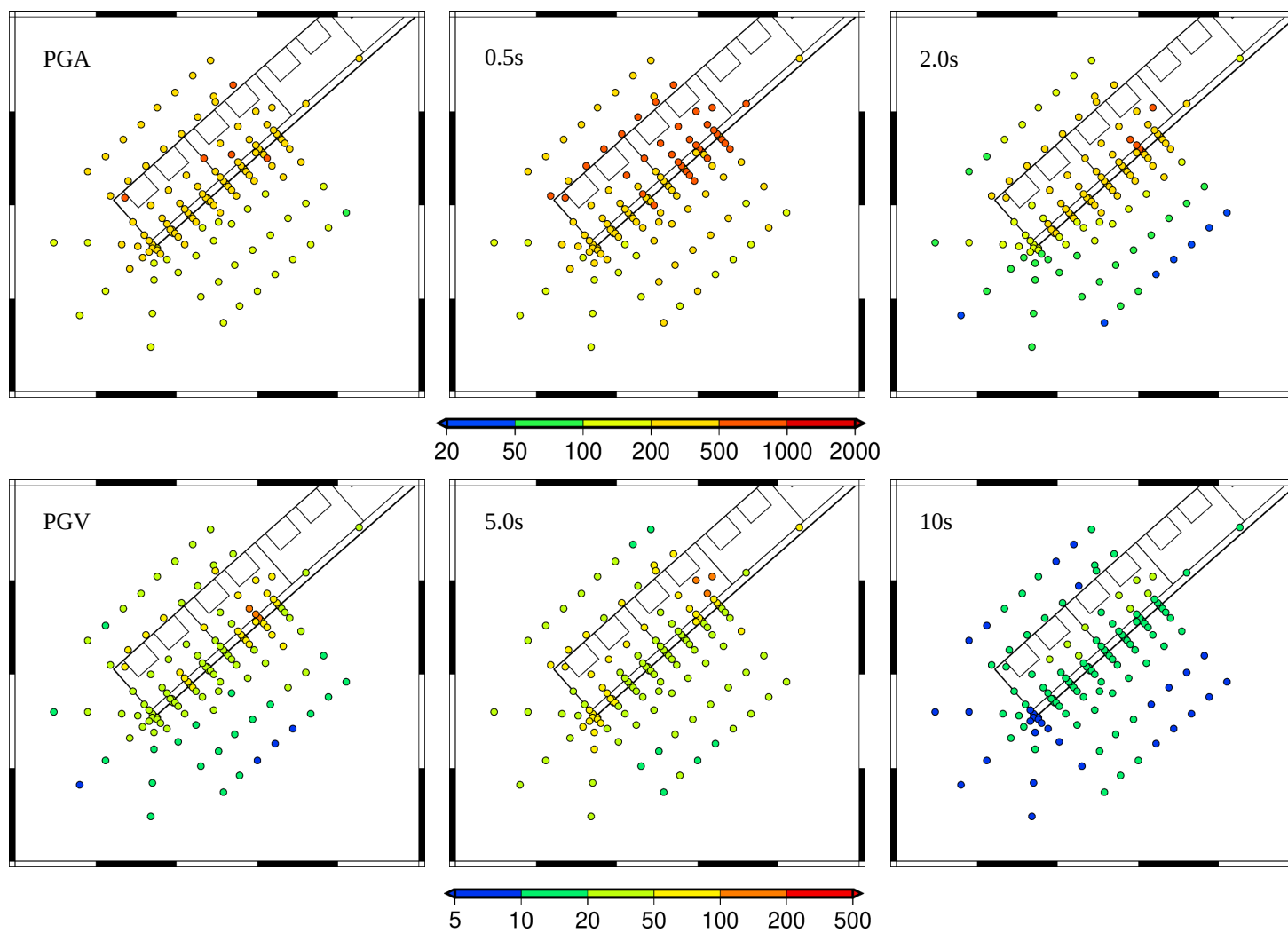


図 5-18 Case8_A 地震動分布

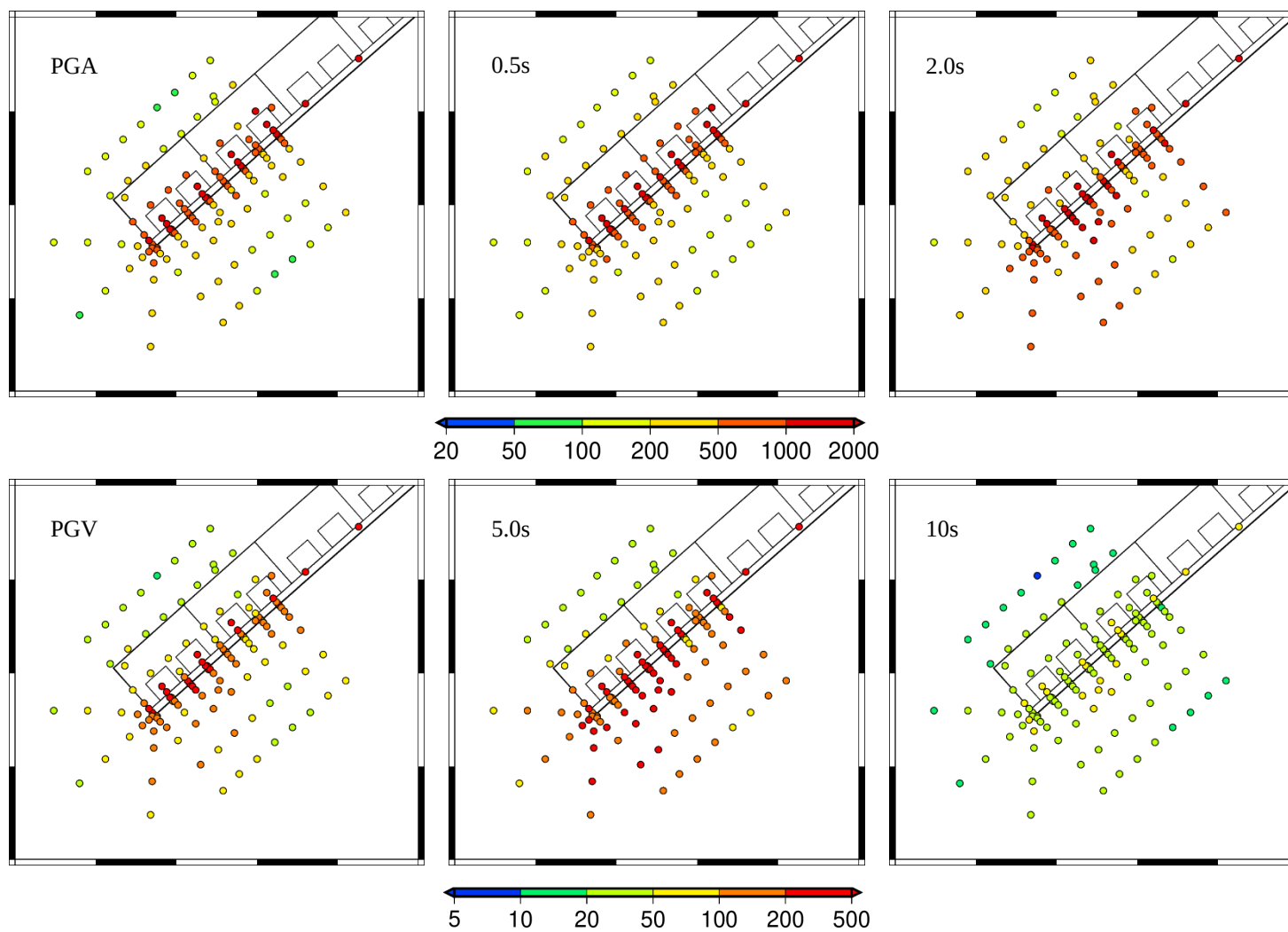


図 5-19 Case1_B 地震動分布

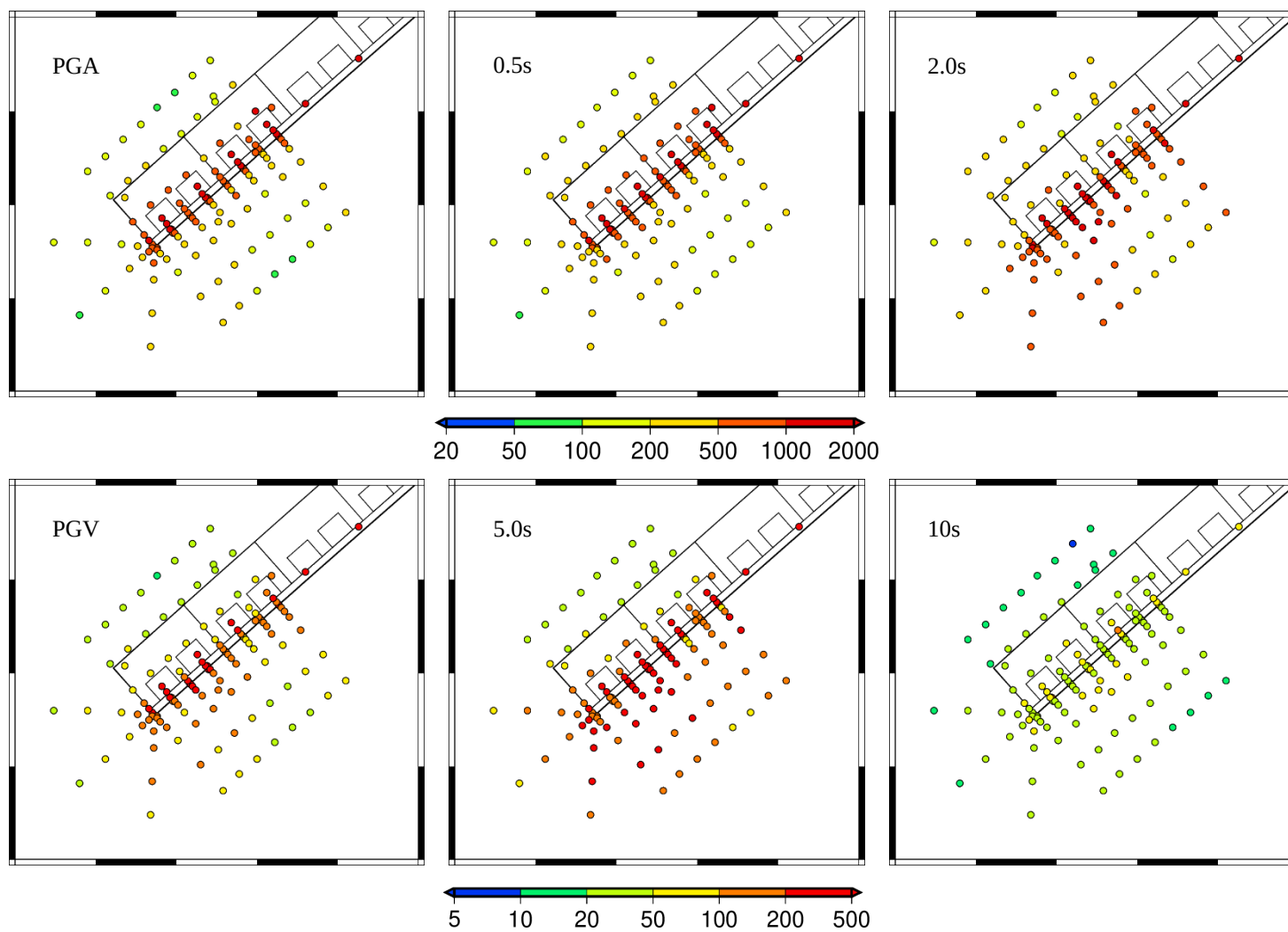


図 5-20 Case2_B 地震動分布

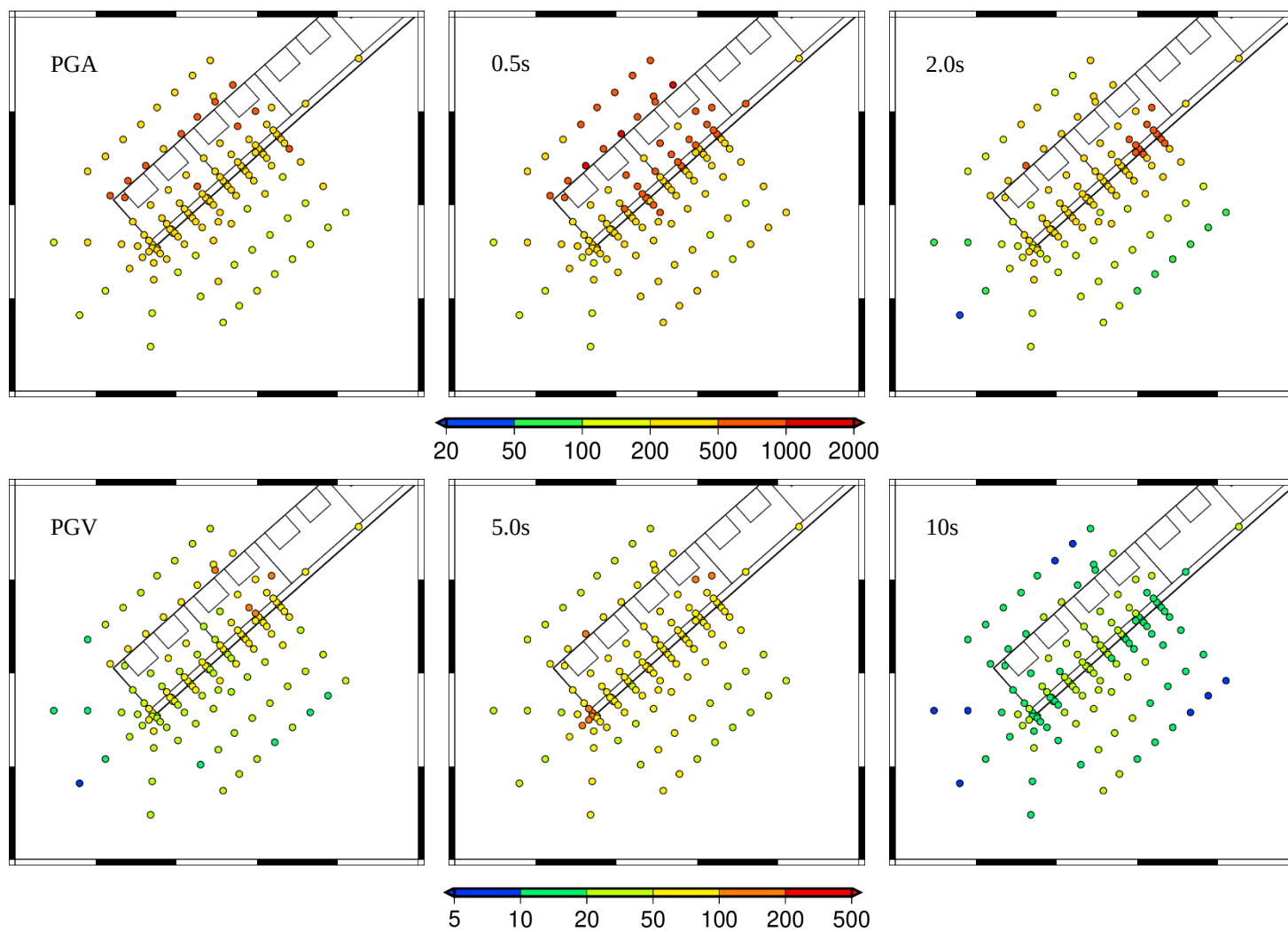


図 5-21 Case3_B 地震動分布

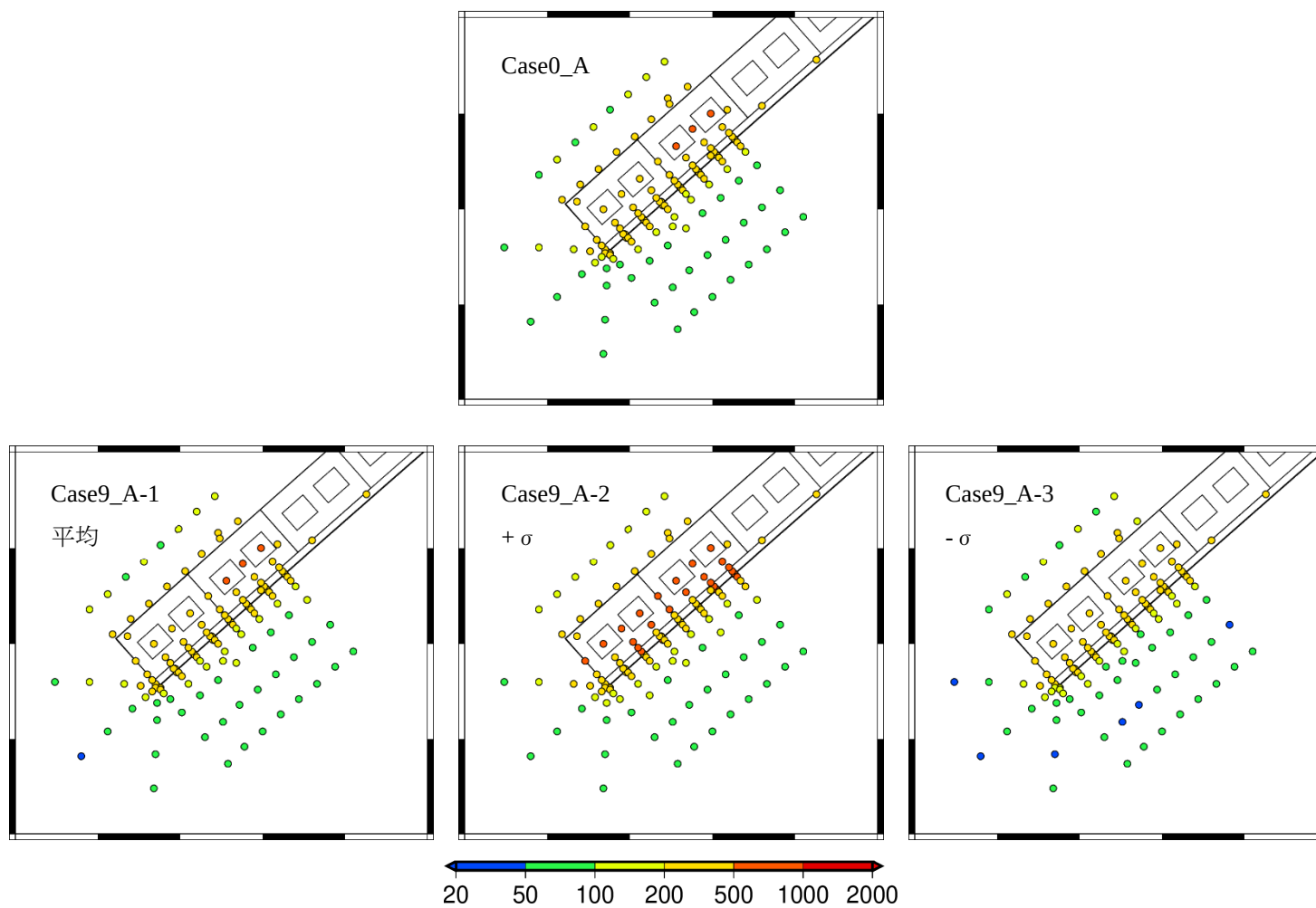


図 5-22 Case0（上段）と Case9（下段）の PGA 分布

5.4 パラメータの影響度分析

前節までの地震動評価結果に対して、PGA、PGV 及び擬似速度応答スペクトル（周期 0.1 秒及び 1 秒前後）のレベルを（2）の基本震源モデルの結果と比較し、各種の不確かさの考慮により地震動評価への影響度合を検討する。また、相関性考慮の有無による地震動ばらつきを分析し、距離減衰式等による経験的値と比較を行う。

比較する距離減衰式について、 V_s2000 m/s 以上の地盤を対象とした JNES (2013) との比較を行った。その際、応答スペクトルの計算結果については、GMRotI50 の値を用いた。

主な計算ケースの結果として、モデル A とモデル B について、基本震源モデルおよび SMGA 位置を変更したケースの計算結果と JNES (2013) の距離減衰式との比較を図 5-23～図 5-28 に示す。図 5-23 に示す通り「レシピ」に基づく基本震源モデル Case0_A の計算結果と JNES (2013) と概ね整合していることが確認できる。図 5-26 に示す通り Dan *et al.* (2019) に基づく基本震源モデル Case0_B の計算結果と JNES (2013) も概ね整合していることが、周期によっては平均より大きめになる傾向が確認できる。

また、相関性考慮の有無による地震動のばらつきについての検討として、応力降下量の深さ依存性に関する Case7_A、Case8_A の JNES (2013) の距離減衰式との比較をそれぞれ図 5-29、図 5-30 に示す。Case7_A について、Case1_A が JNES (2013) に対して若干過大傾向であるのに対して、応力降下量を下げたことにより整合的な結果となった。Case8_A についても、Case6_A が JNES (2013) と比べ過小傾向であったが、応力降下量を上げたことにより、地震動が大きくなった。

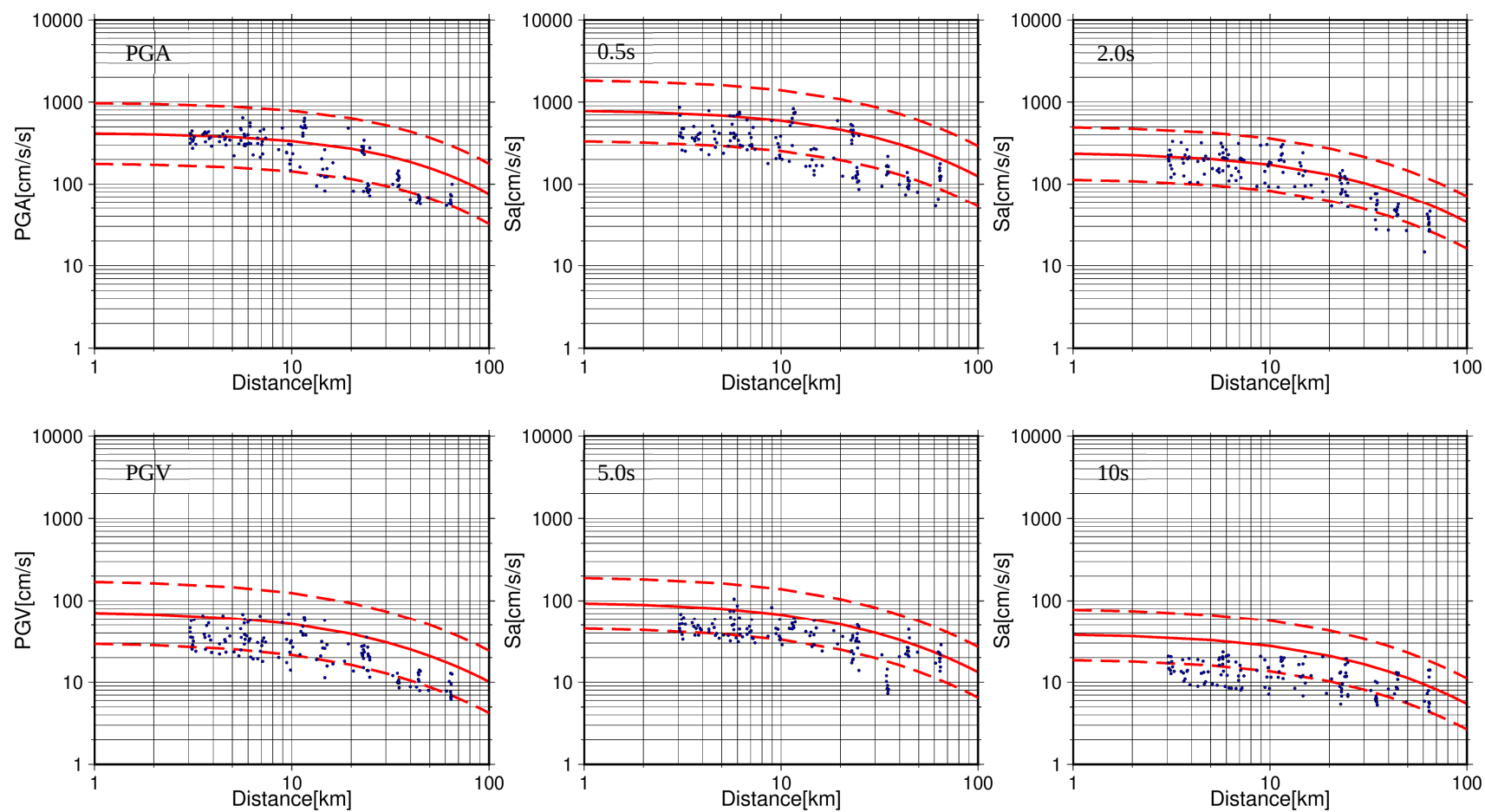


図 5-23 Case0_A JNES (2013) との比較

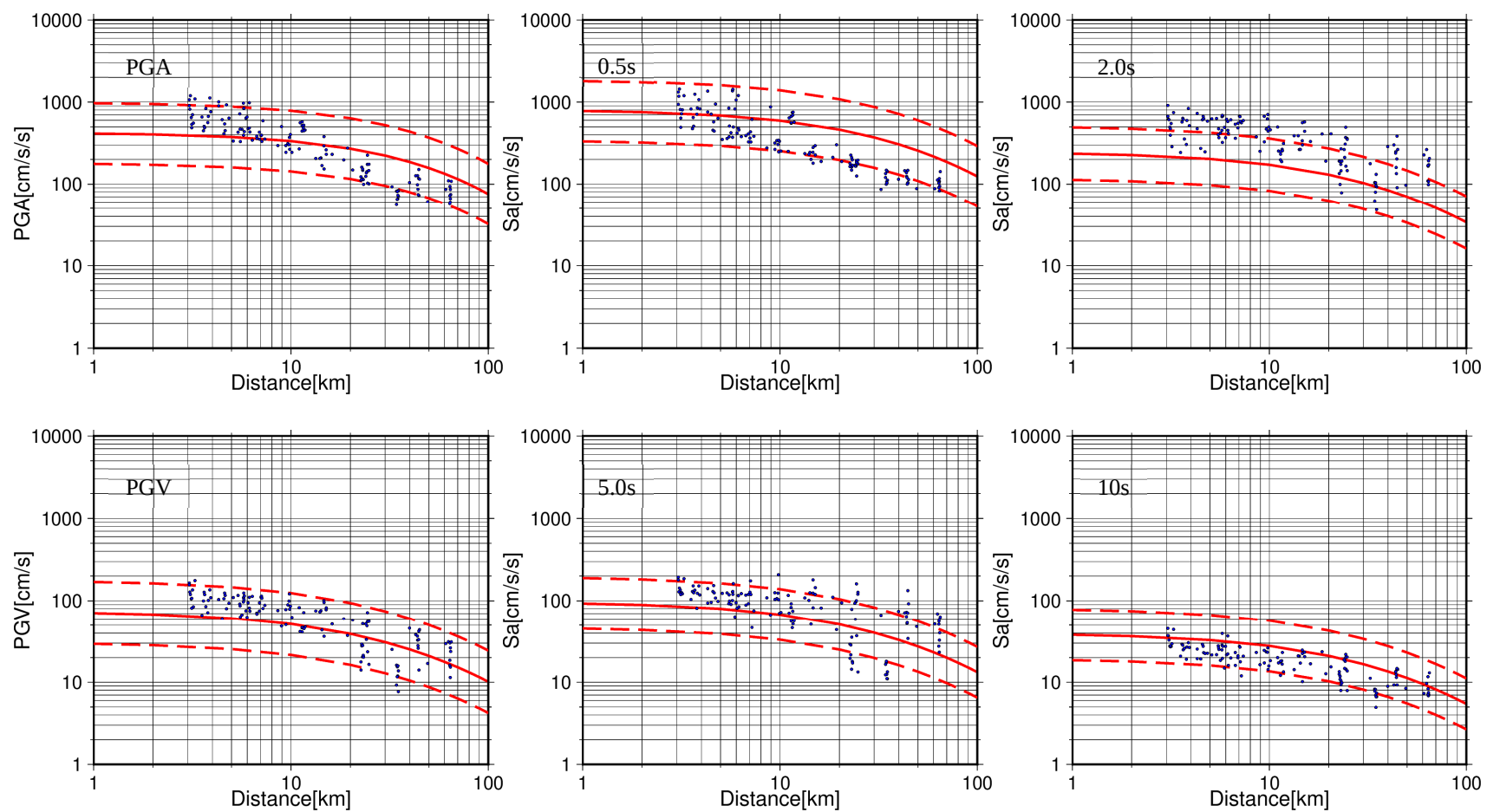


図 5-24 Case1_A JNES (2013) との比較

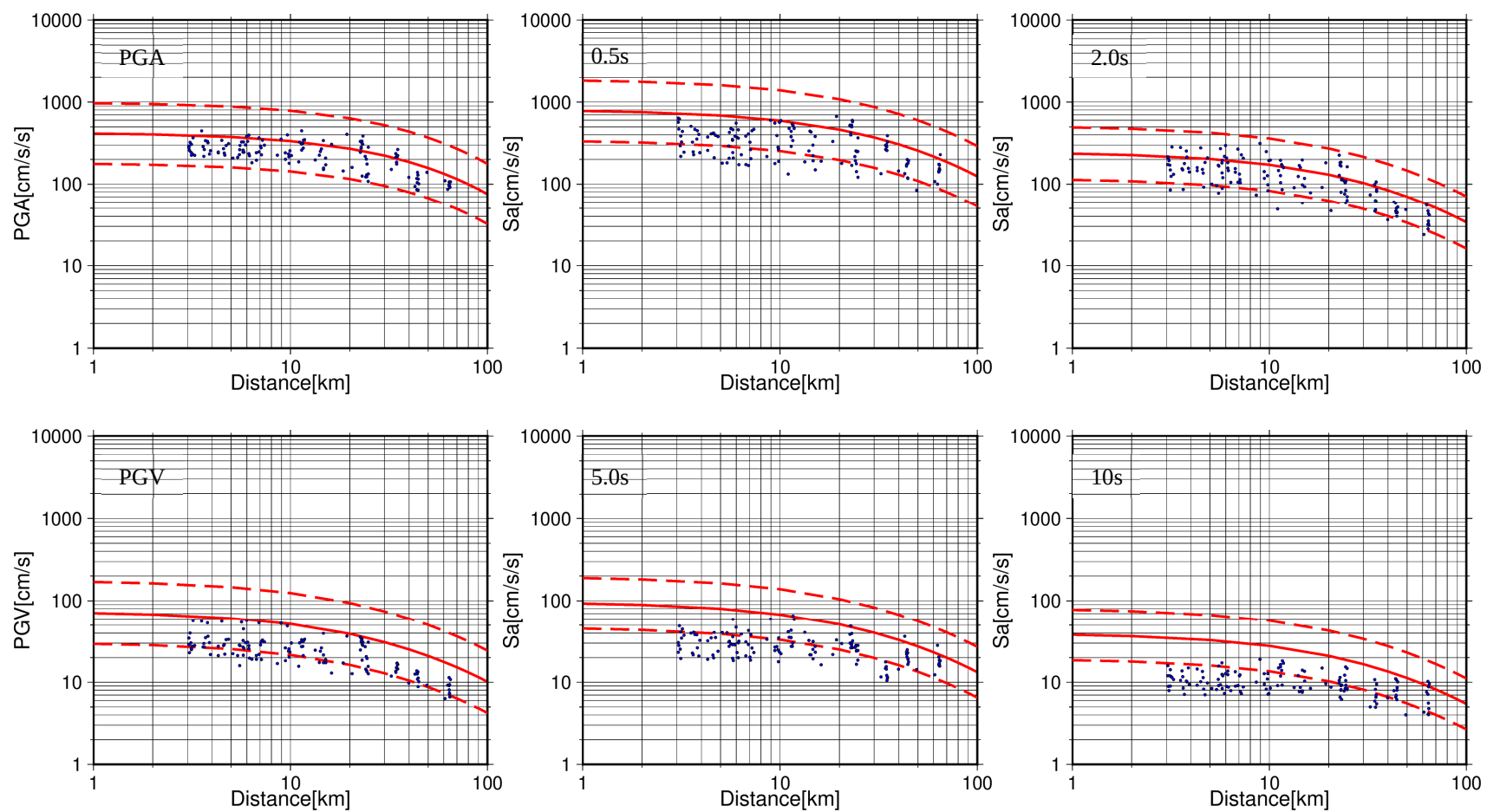


図 5-25 Case6_A JNES (2013) との比較

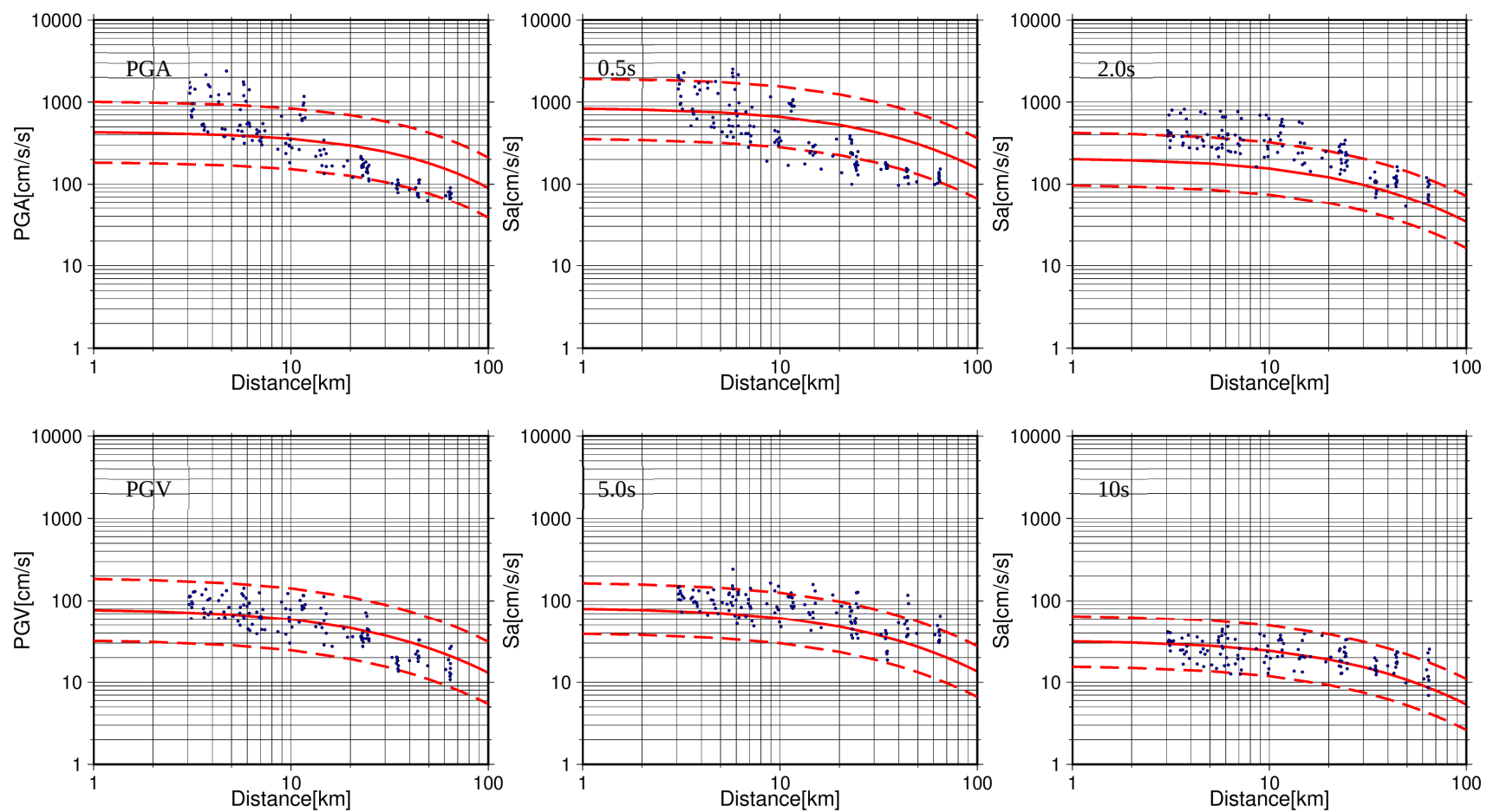


図 5-26 Case0_B JNES (2013) との比較

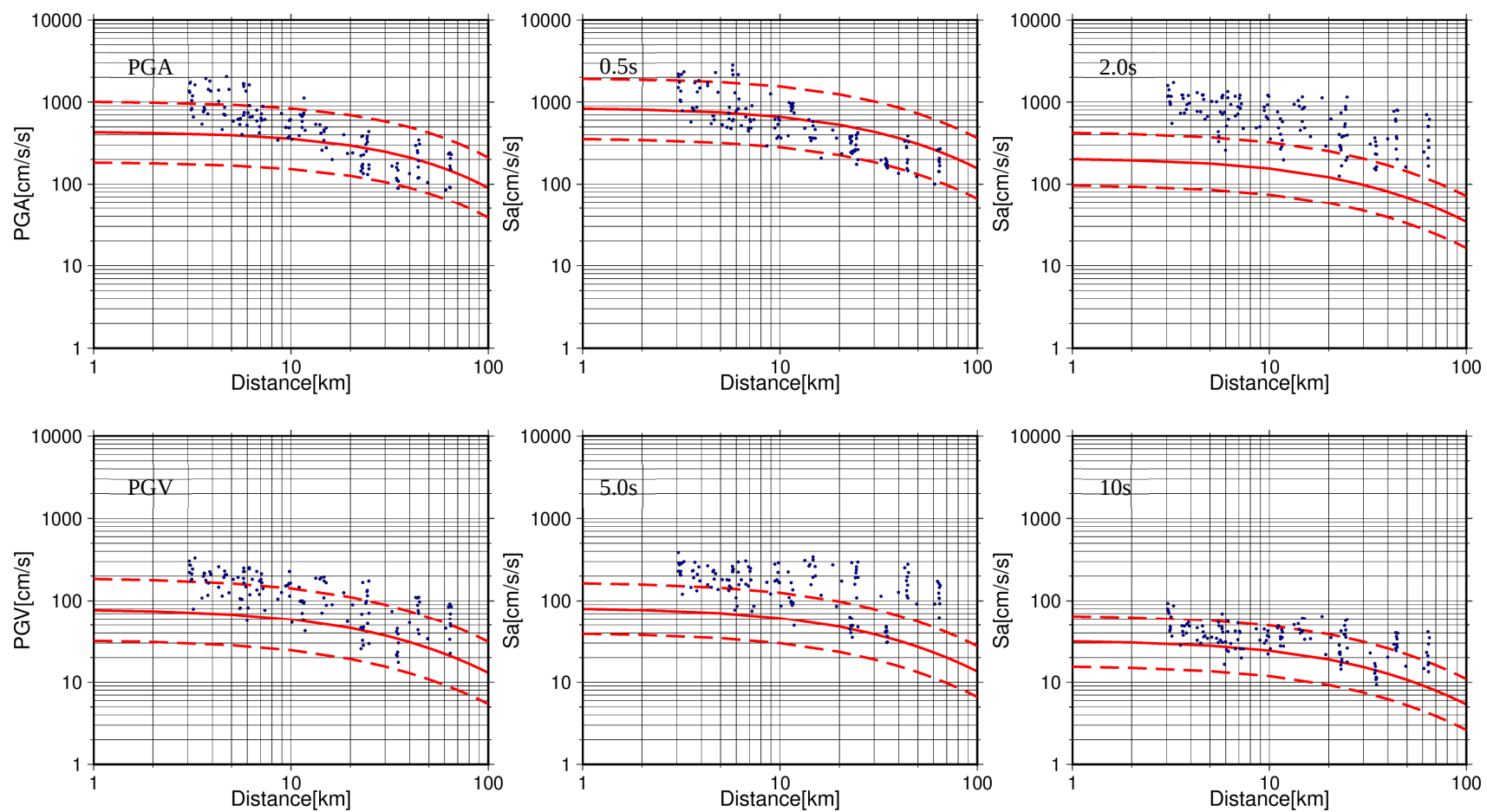


図 5-27 Case1_B JNES (2013)との比較

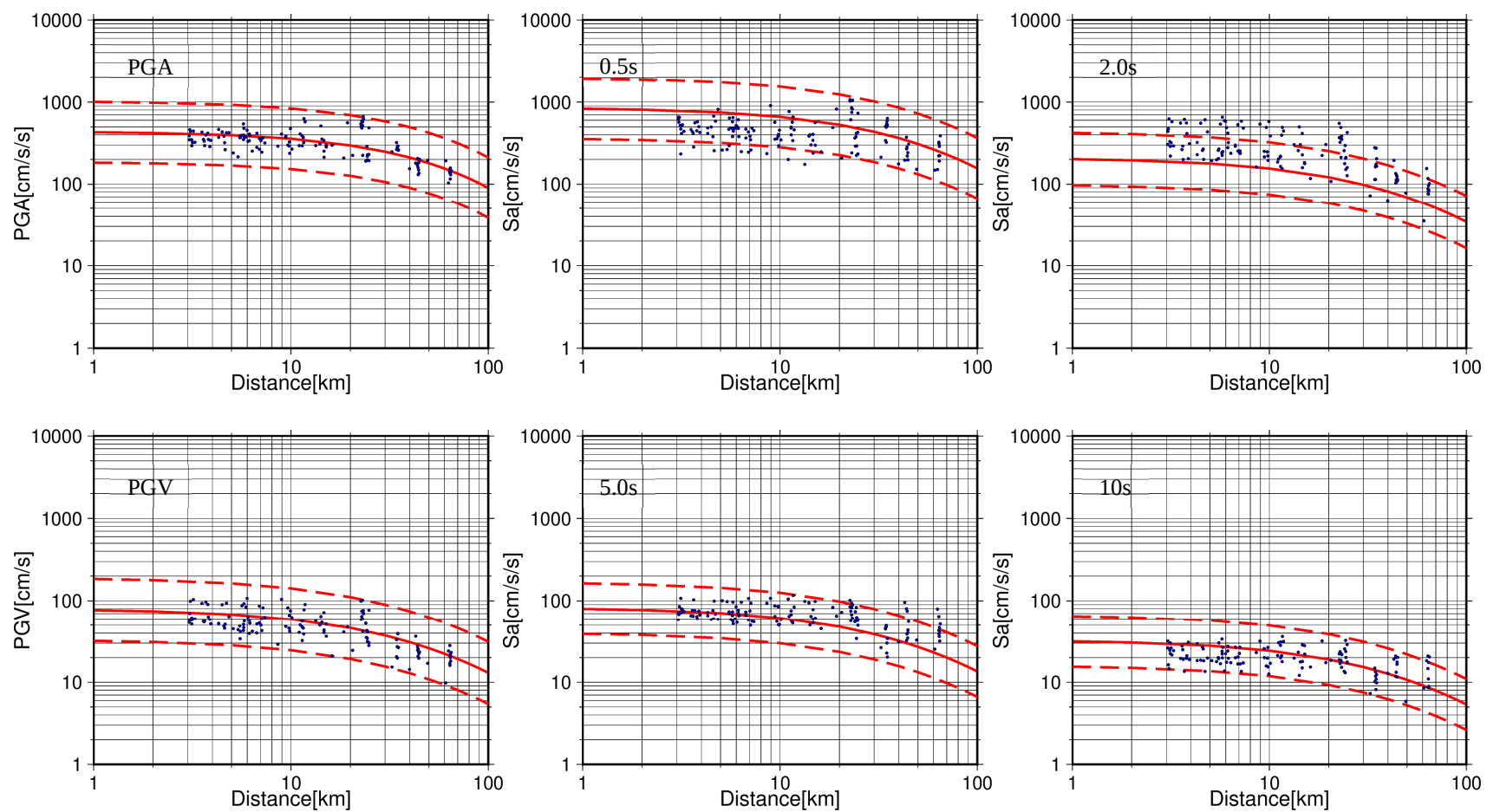


図 5-28 Case3_B JNES (2013) との比較

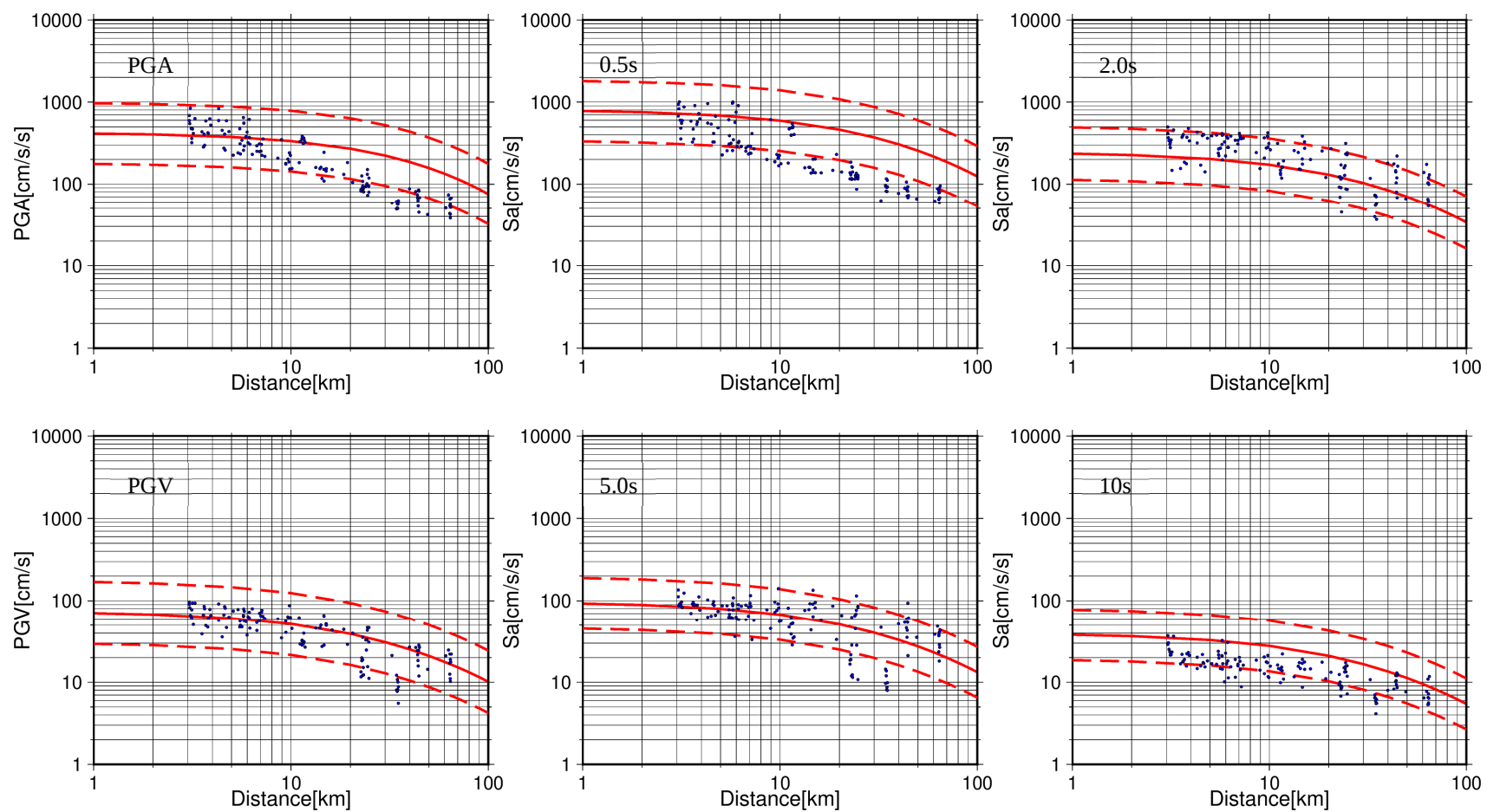


図 5-29 Case7_A JNES (2013) との比較

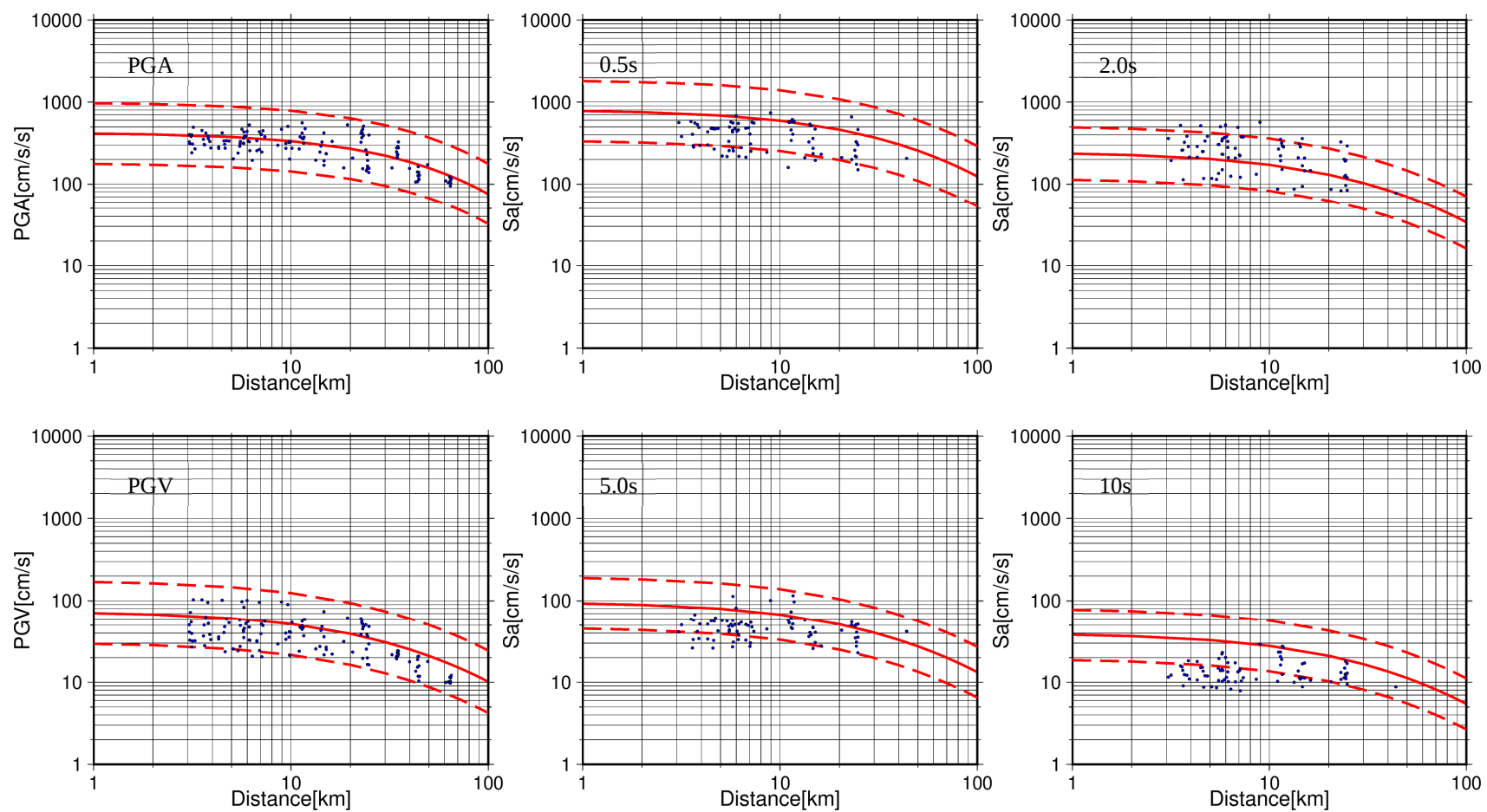


図 5-30 Case8_A JNES (2013) との比較

不確かさを設定したケースの計算について、その影響度合いを基準とするケースに対する地震動指標の比として、断層最短距離との関係および地震動分布として整理した。

図 5-31～図 5-34 にモデル A の SMGA 位置による影響の比較結果を示す。Case1_A/Case0_A では SMGA が浅くなった場合の影響を示しており、地震動が大きくなる傾向が確認できる。ただし、バックワード側となる地点については、特に短周期においては地震動が小さくなっている地点があり、SMGA との距離が大きくなったことによる影響が表れているものと考えられる。Case6_A/Case0_A は SMGA が深くなった場合の影響を示しており、長周期では全体的に小さくなる傾向が見られるが、短周期においてはバックワード側および下盤側で大きくなる傾向が見られる。バックワード側については SMGA との距離が小さくなった傾向と考えられ、下盤側については地盤への入射角が小さくなったことにより水平動が大きくなったためと考えられる。

図 5-35～図 5-38 に示すモデル B の SMGA 位置による影響の比較結果についても、モデル A と同様の傾向であることが確認できる。

図 5-39～図 5-42 に LMGA の有無等の影響について、モデル A の検討結果として、Case1_A に対する Case2_A、Case3_A の地震動指標比の結果を示す。これらの図から、短周期では、LMGA の影響がほとんどないことが確認できる。周期 10 秒の LMGA 近傍の地点において、その影響が大きく、Case2_A よりも Case3_A の地震動が大きい。

図 5-43～図 5-46 に破壊伝播速度、ライズタイムの係数 α に関する影響について、Case1_A に対する Case4_A、Case5_A の地震動指標比の結果を示す。破壊伝播速度の影響は比較的大きく、全体としては地震動が大きくなる傾向にある。ただし、短周期については重ね合わせの影響により小さくなる地点もある。一方、ライズタイムが短くなることにより、地震動が大きくなることが分かる。

図 5-47～図 5-50 に、相関性考慮の有無による地震動のばらつきについての検討として、応力降下量の深さ依存性に関する影響について、Case1_A に対する Case7_A、Case6_A に対する Case8_A の地震動指標比の結果を示す。地震動のばらつきそのものの変化は小さいが、平均値（中央値）への影響は大きく、特に周期 5 秒以下で前者では 0.5 倍程度、後者では 2 倍程度までの地震動の差が生じた。応力降下量の不確かさが地震動に与える影響は大きいと言える。

図 5-51 および図 5-52 に f_{max} に関する不確かさの比較結果を示す。短周期については、地震動に差が生じ、地震動の影響は比較的大きいと言える。Case0_A との地震動指標比では 70～150%程度までとなっていることが確認できる。

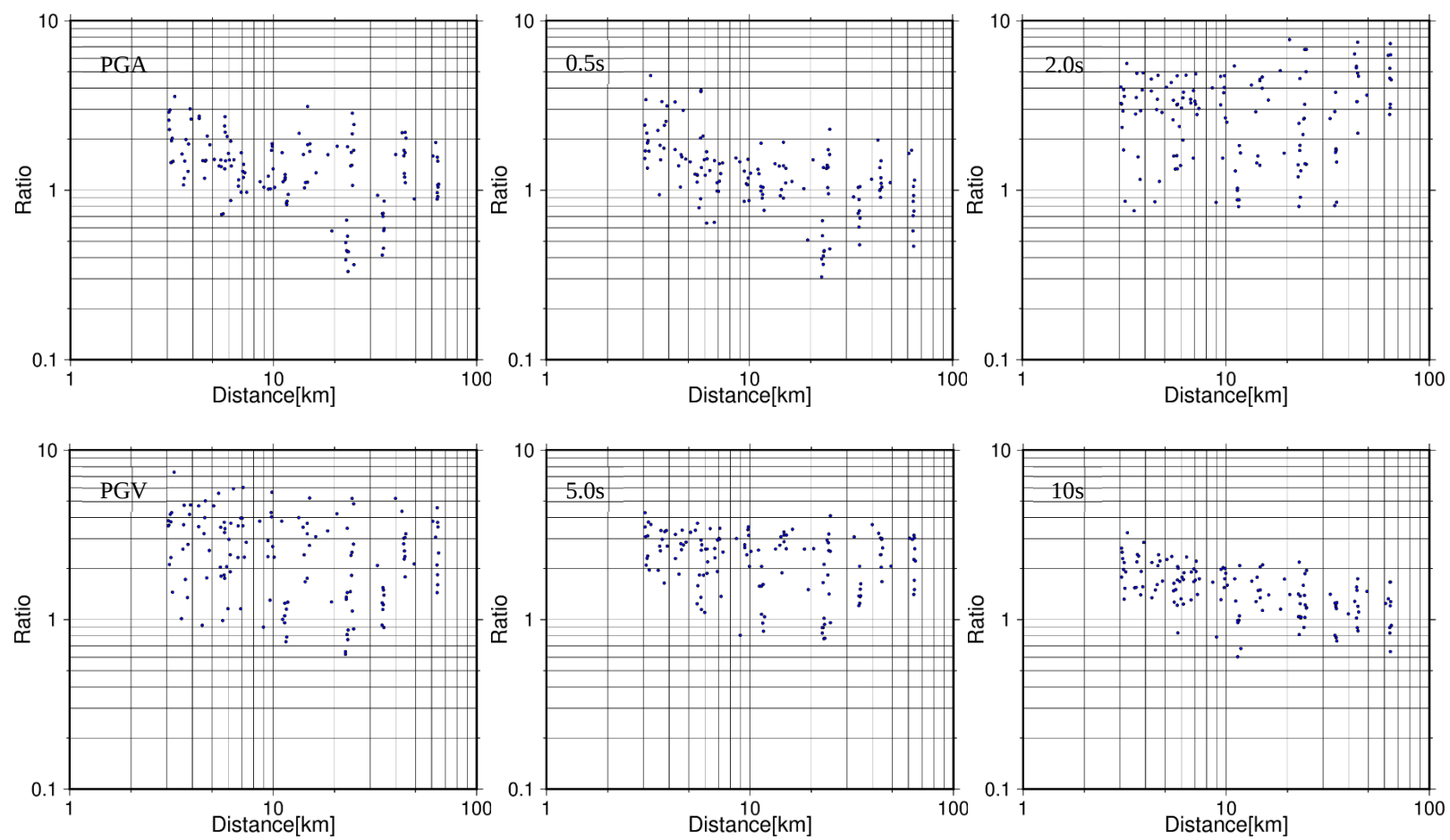


図 5-31 地震動指標比の距離との関係 Case1_A/Case0_A

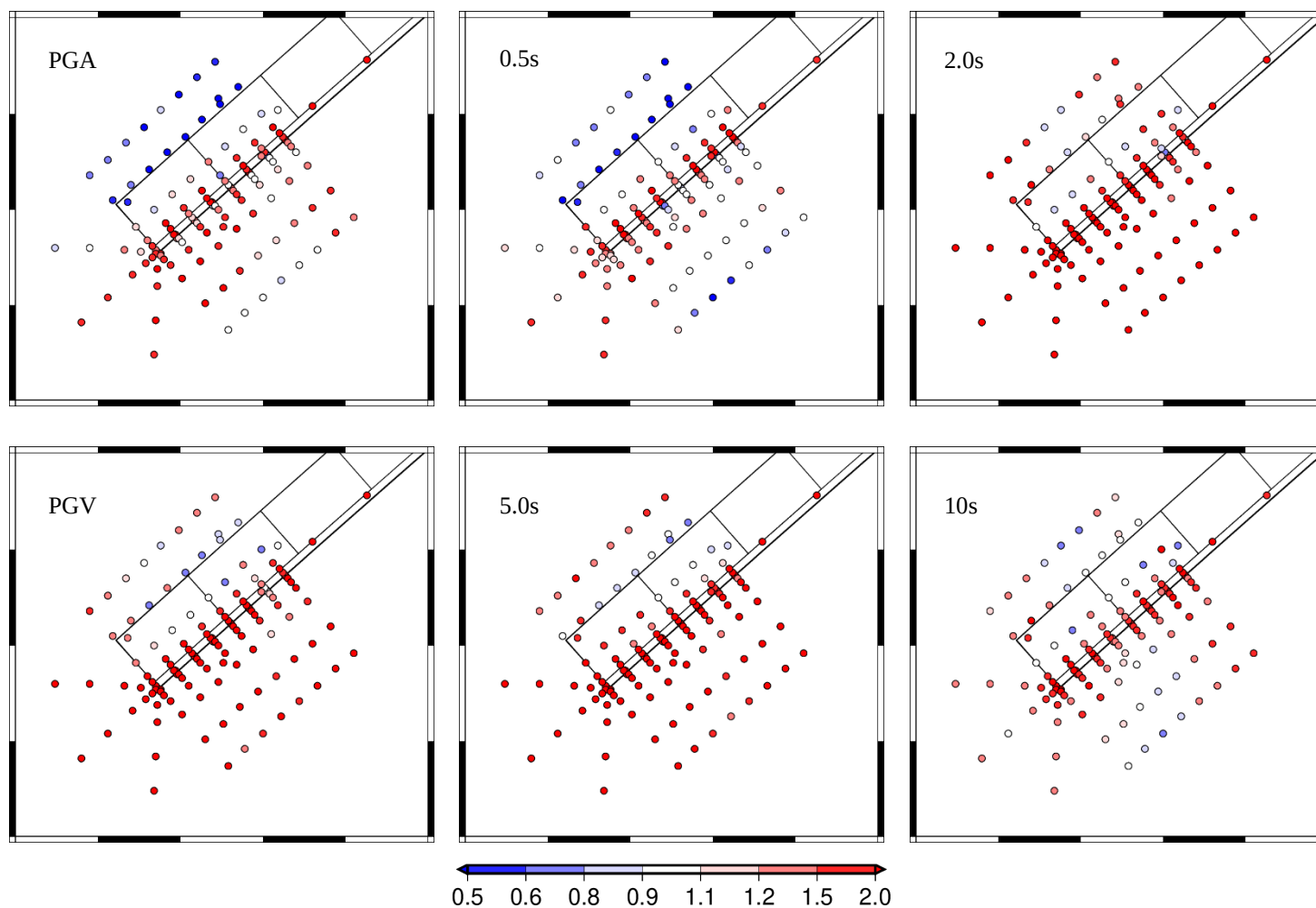


図 5-32 地震動指標比の分布 Case1_A/Case0_A

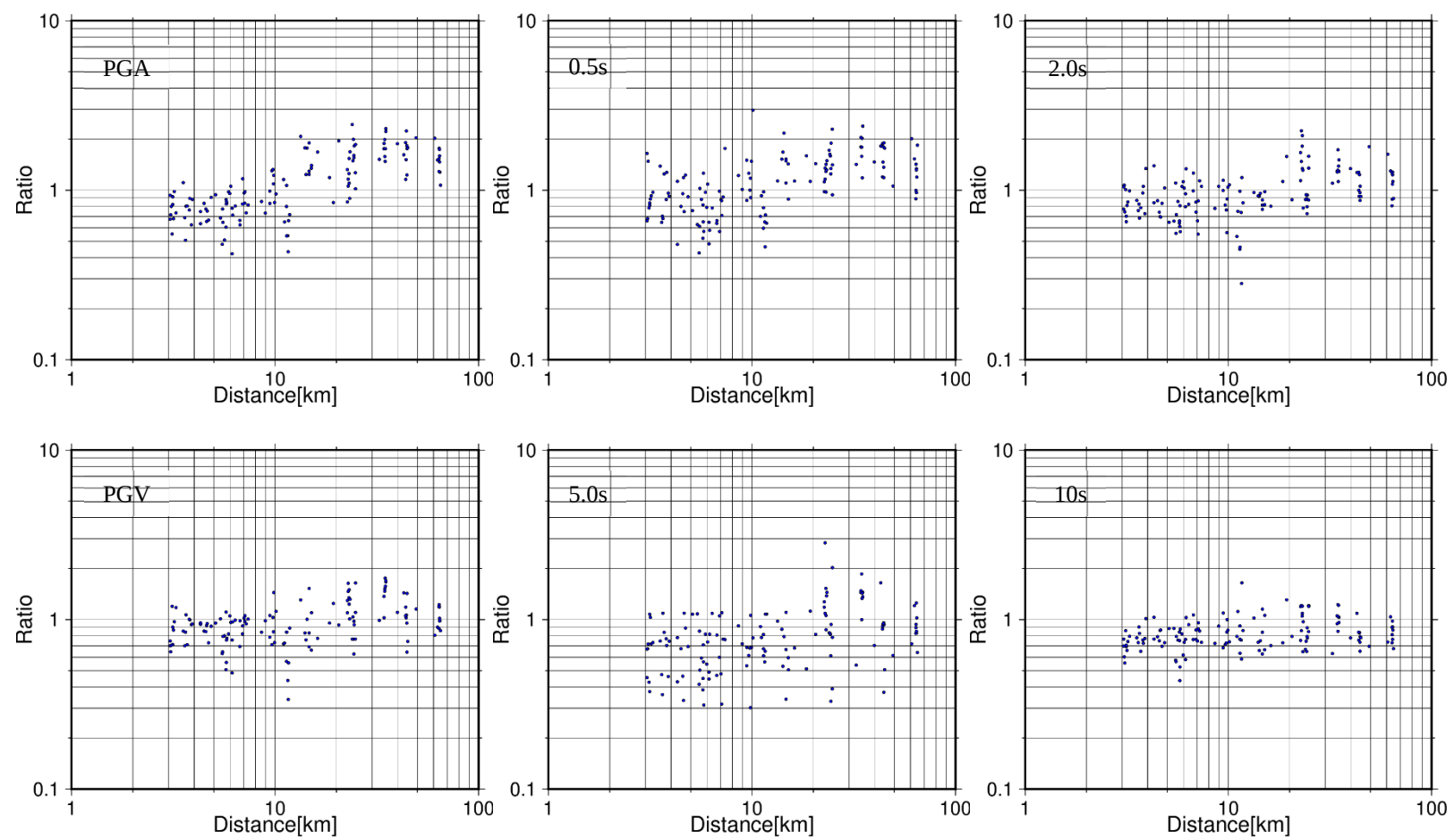


図 5-33 地震動指標比の距離との関係 Case6_A/Case0_A

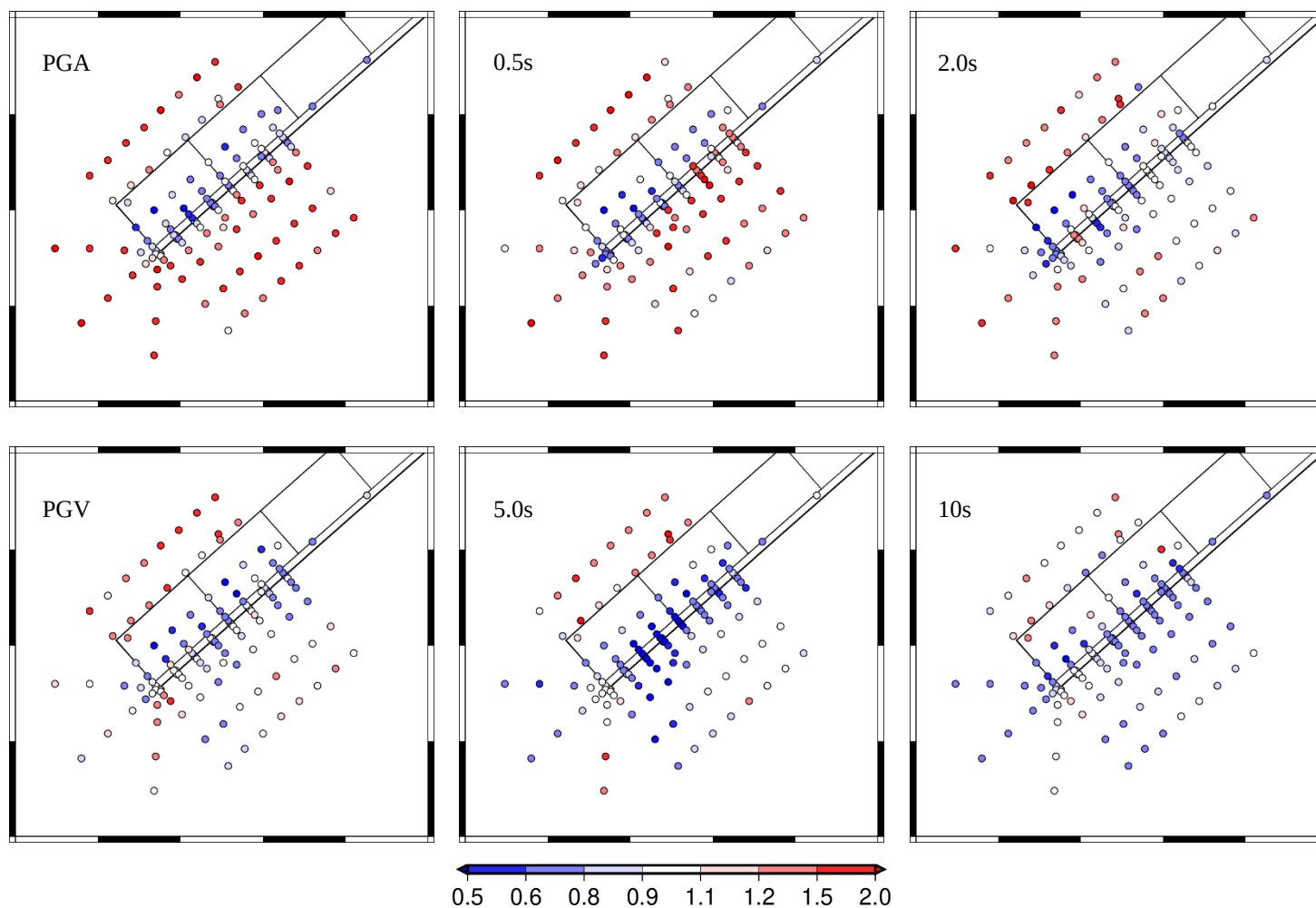


図 5-34 地震動指標比の分布 Case6_A/Case0_A

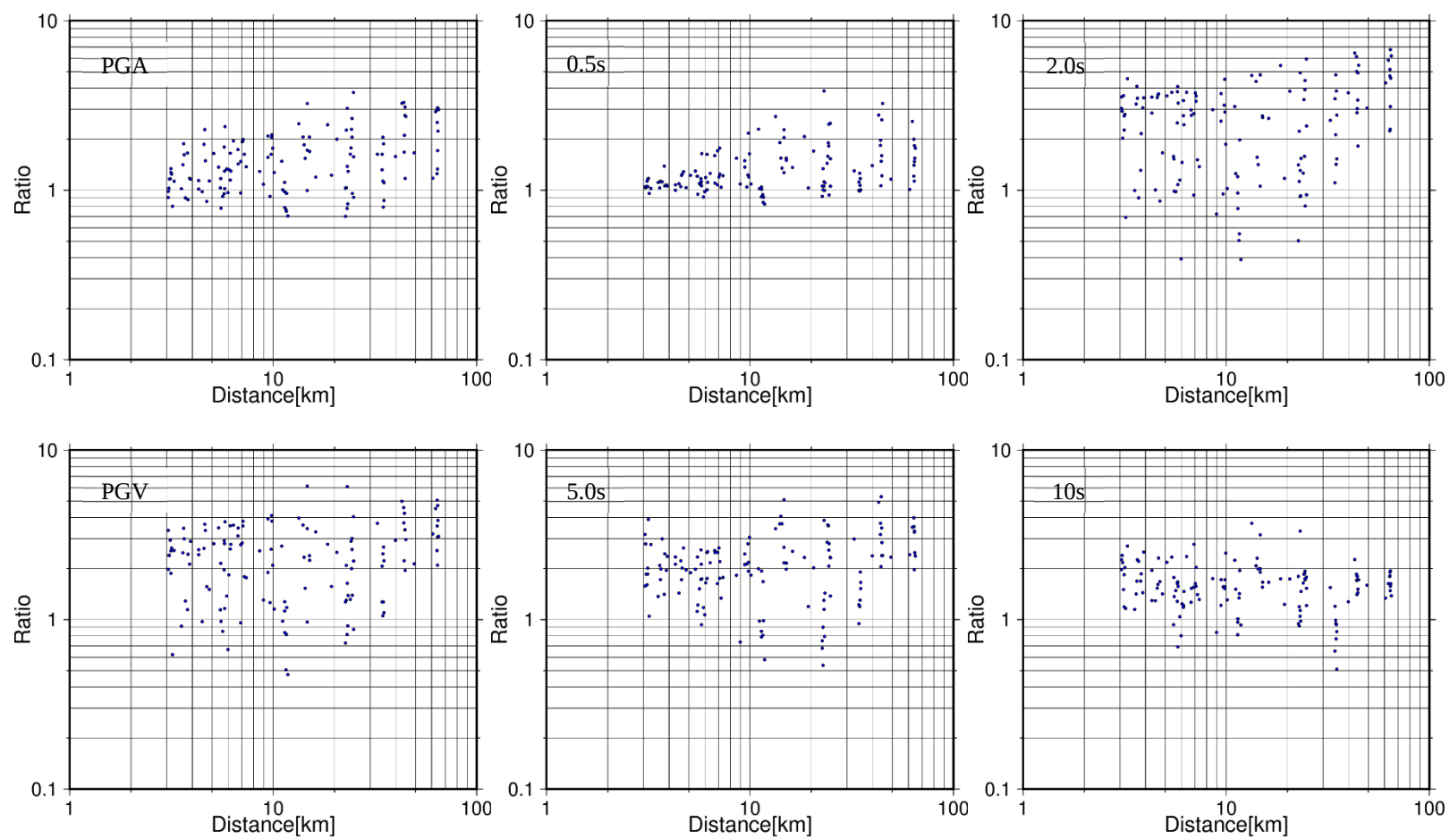


図 5-35 地震動指標比の距離との関係 Case1_B/Case0_B

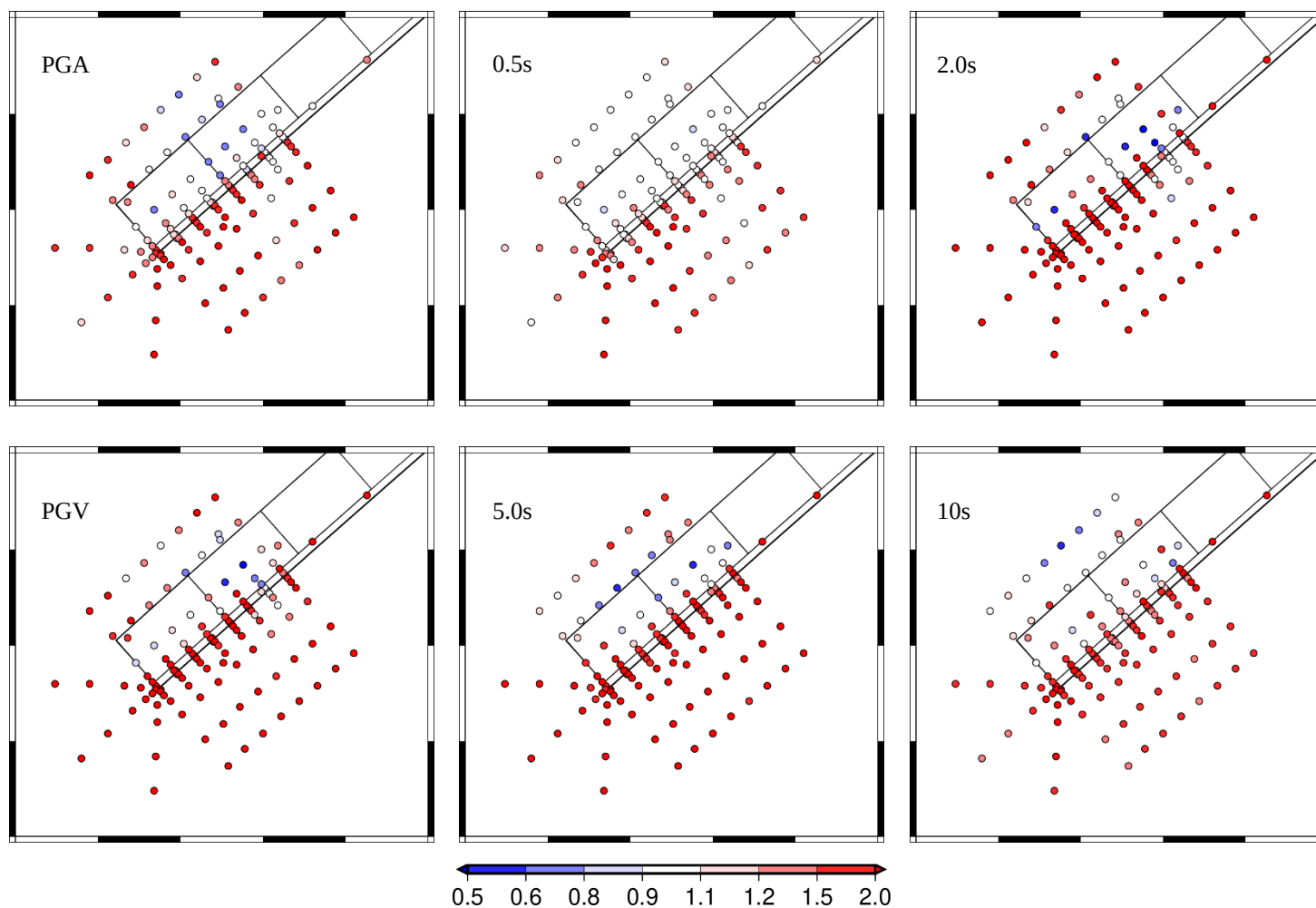


図 5-36 地震動指標比の分布 Case1_B/Case0_B

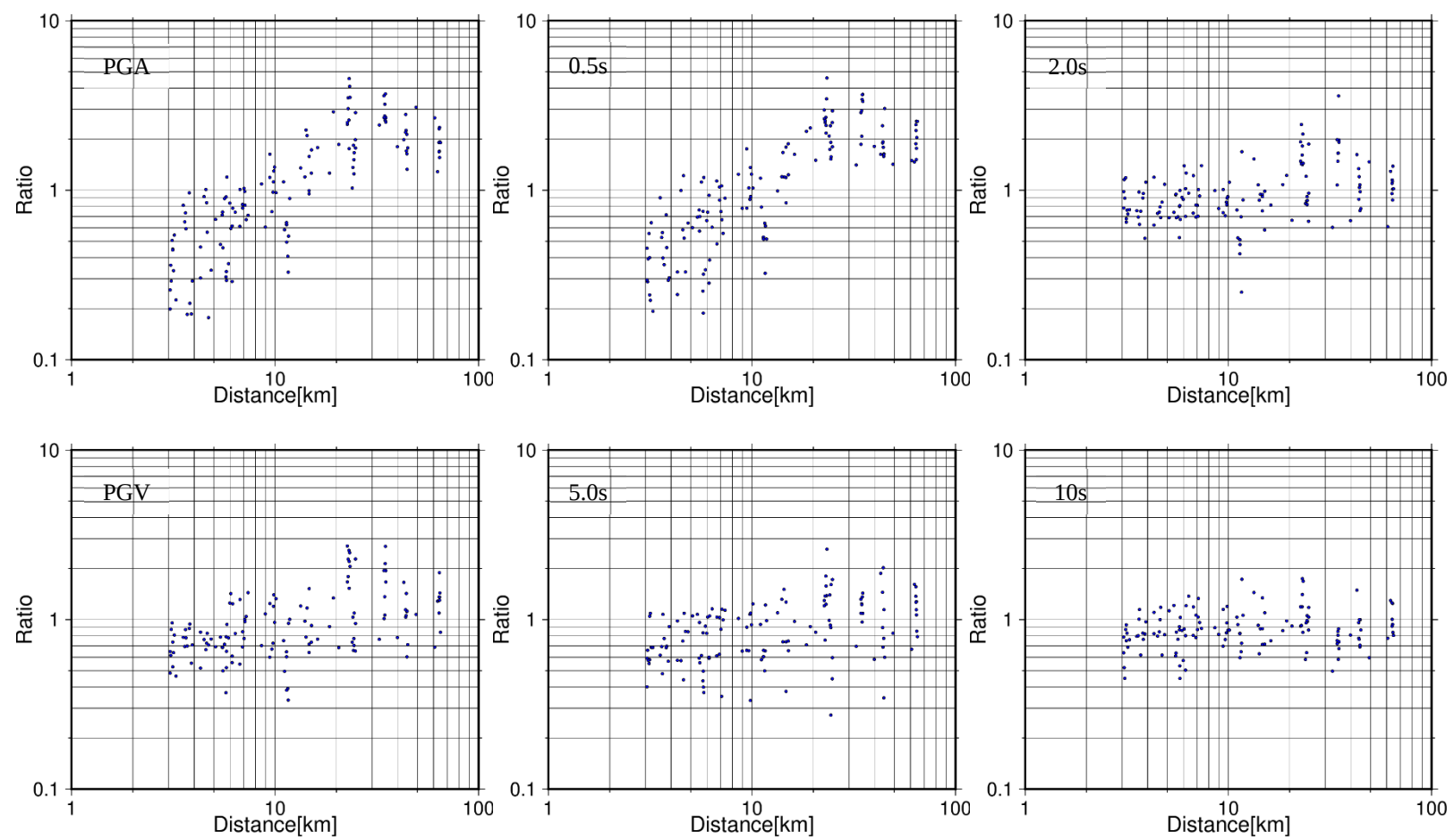


図 5-37 地震動指標比の距離との関係 Case3_B/Case0_B

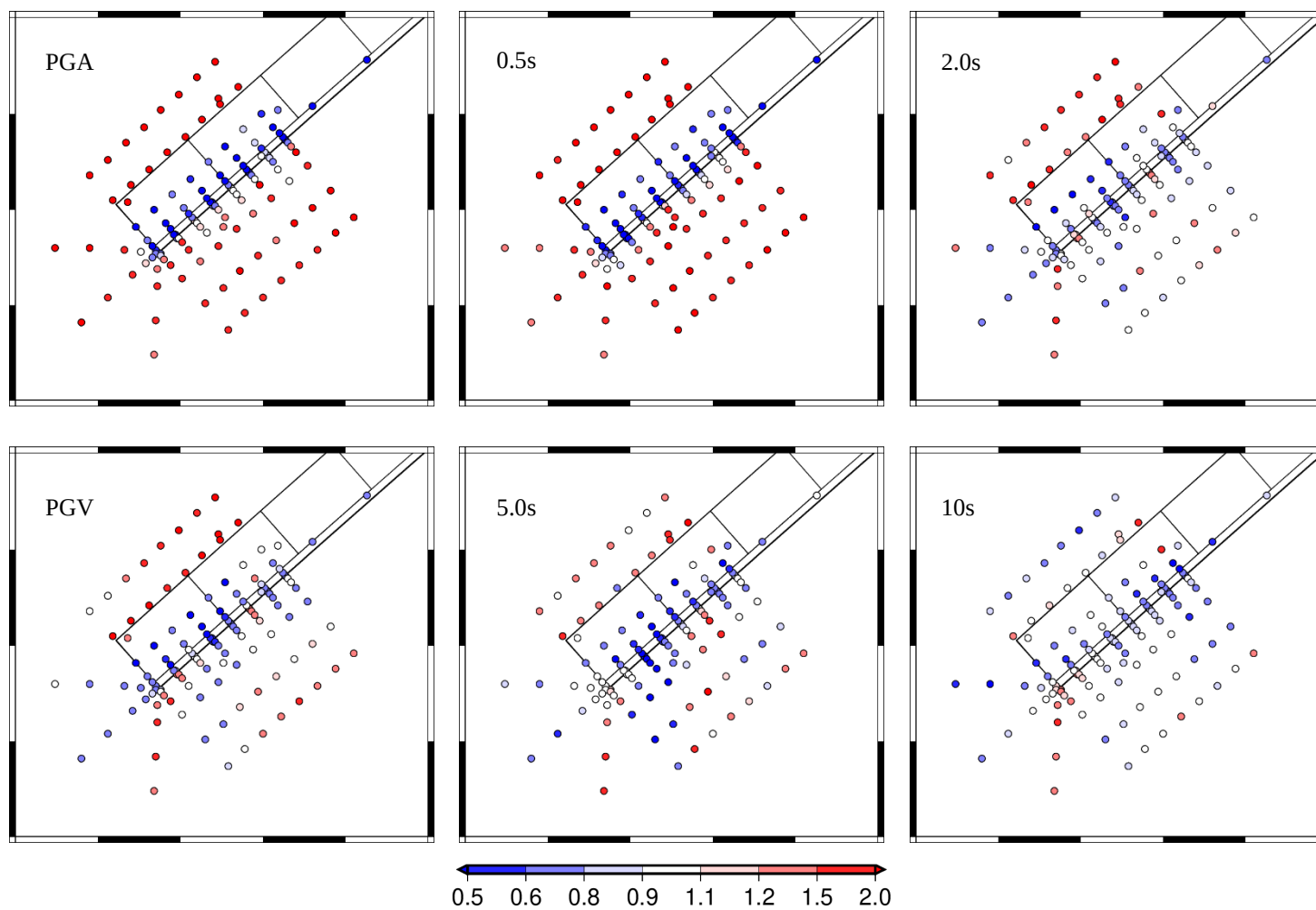


図 5-38 地震動指標比の分布 Case3_B/Case0_B

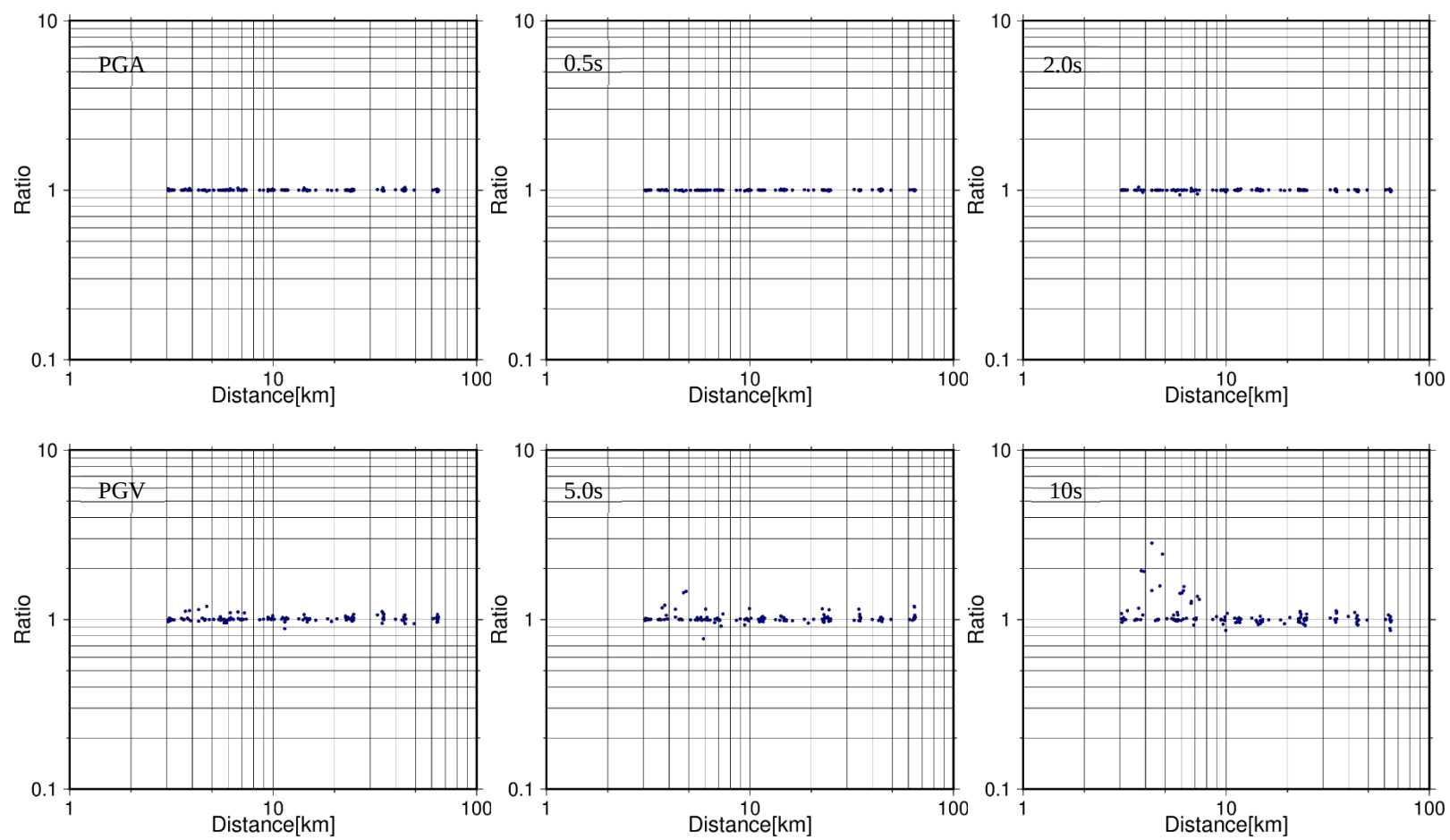


図 5-39 地震動指標比の距離との関係 Case2_A/Case1_A

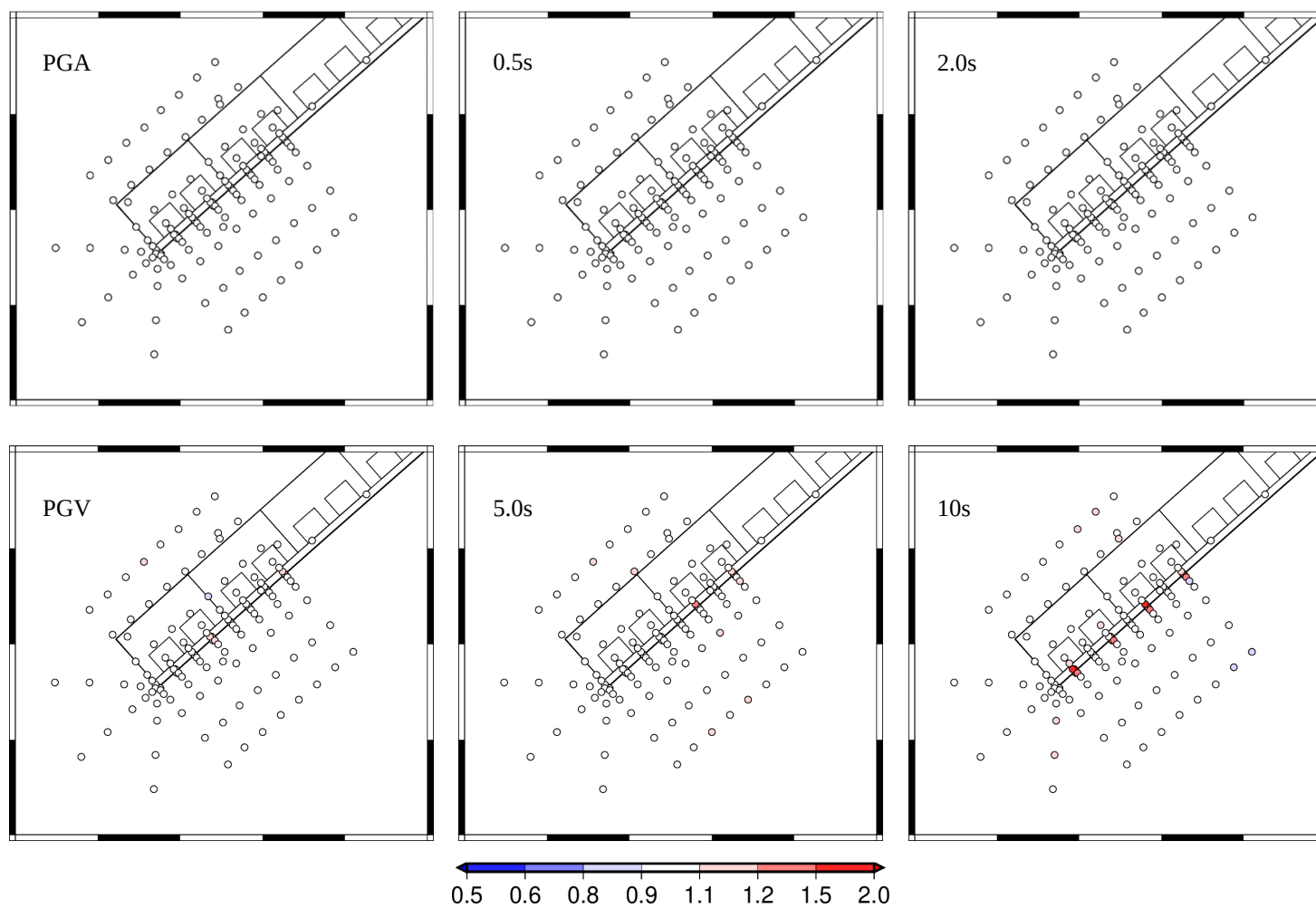


図 5-40 地震動指標比の分布 Case2_A/Case1_A

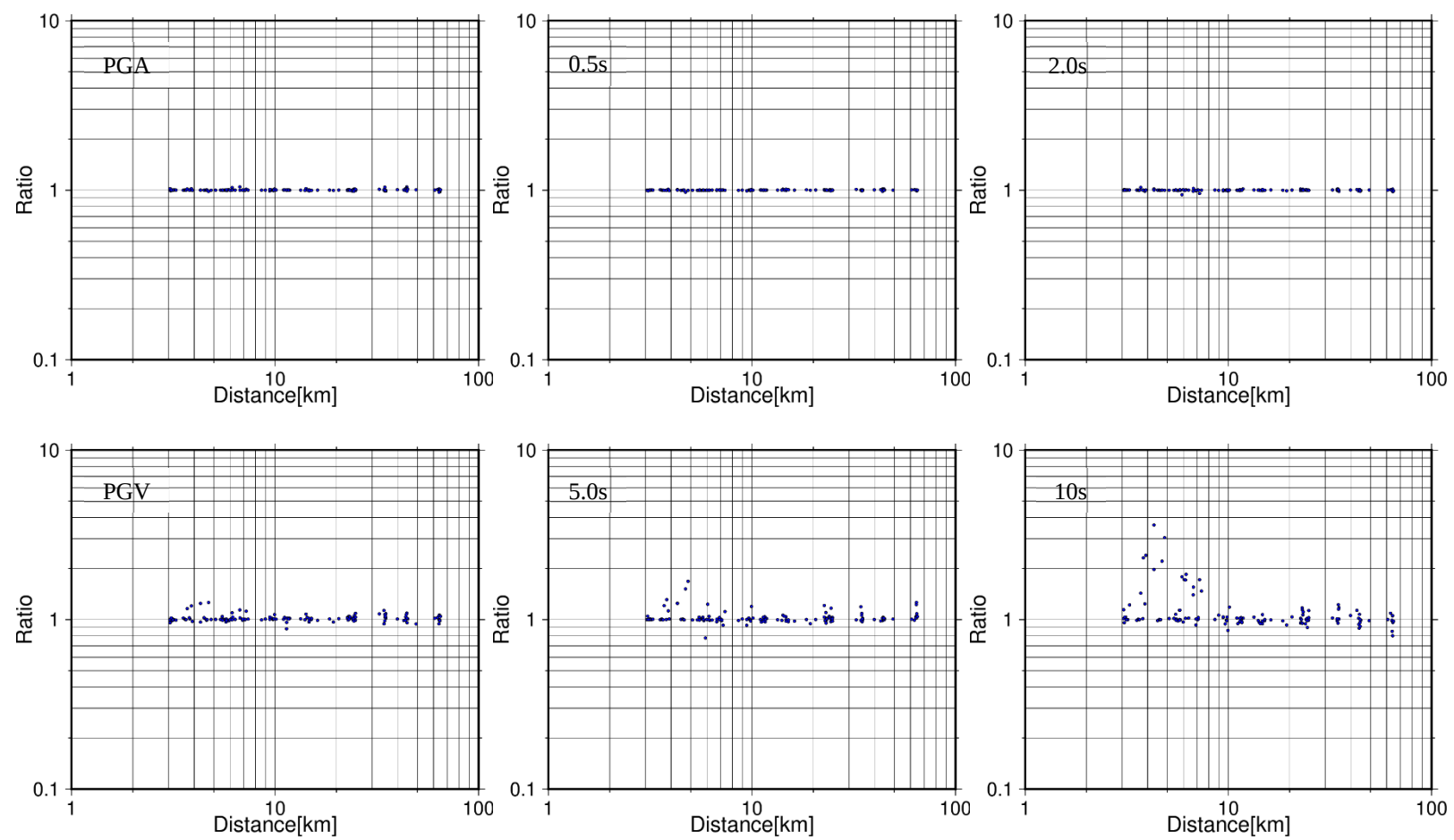


図 5-41 地震動指標比の距離との関係 Case3_A/Case1_A

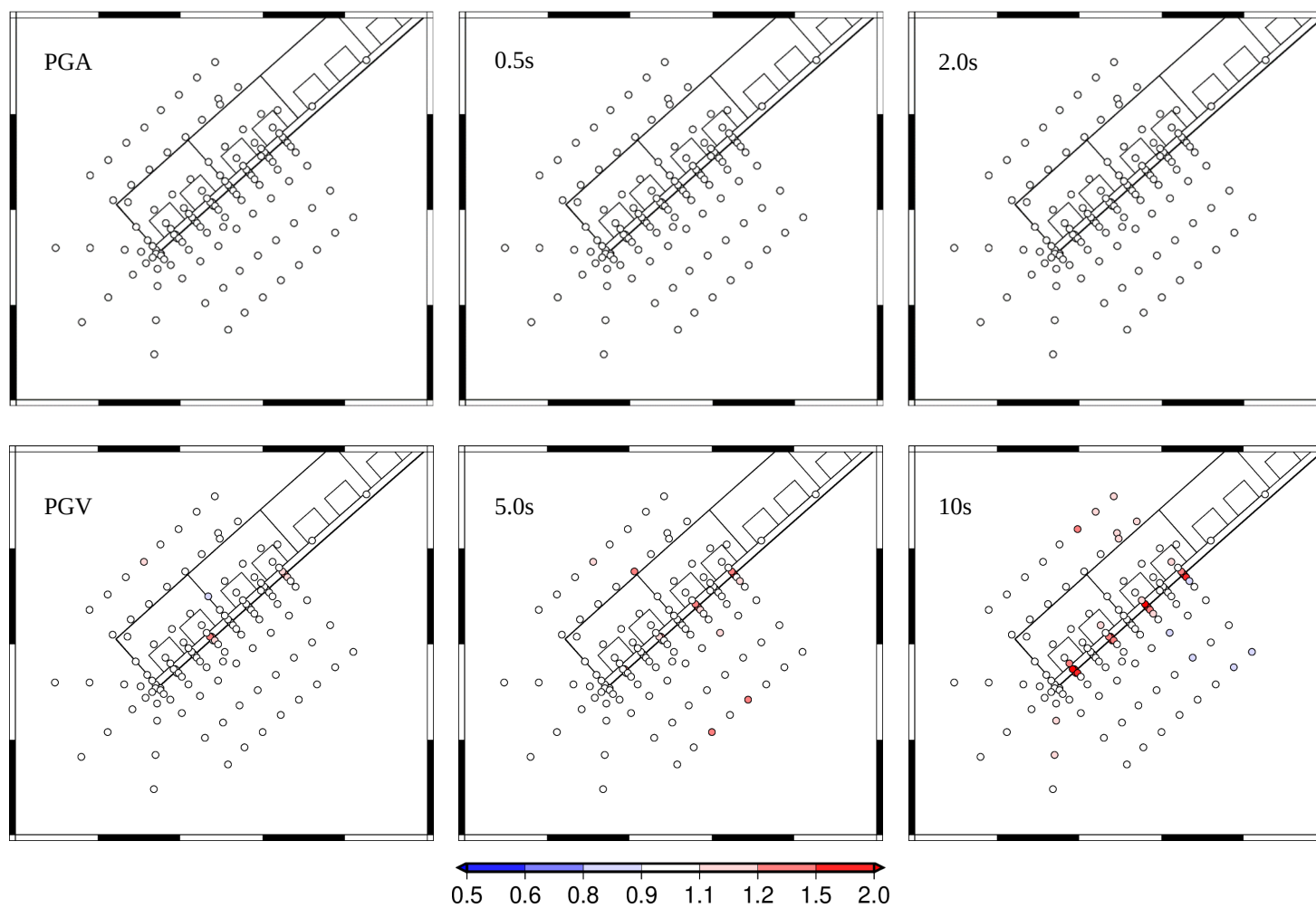


図 5-42 地震動指標比の分布 Case3_A/Case1_A

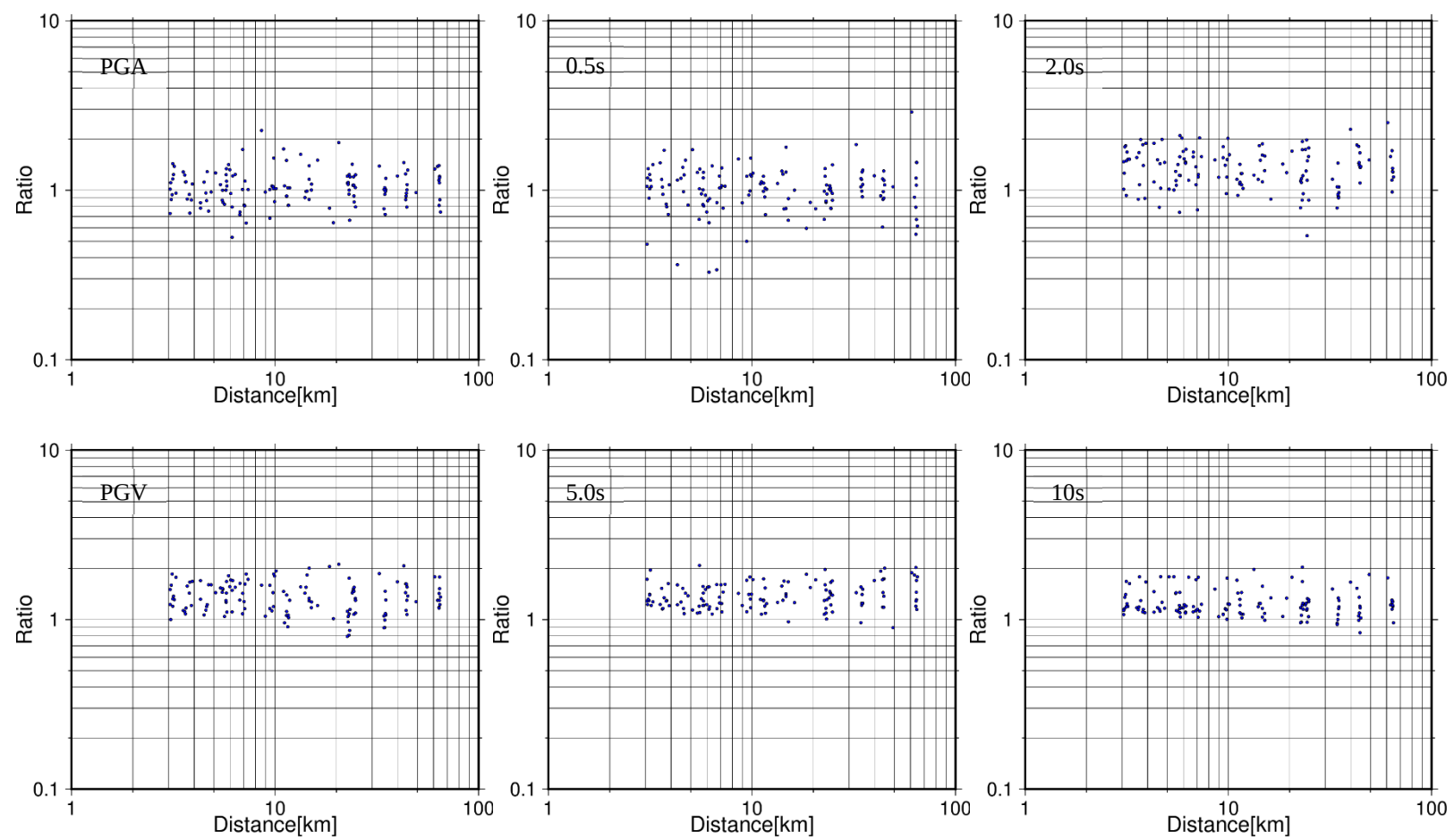


図 5-43 地震動指標比の距離との関係 Case4_A/Case1_A

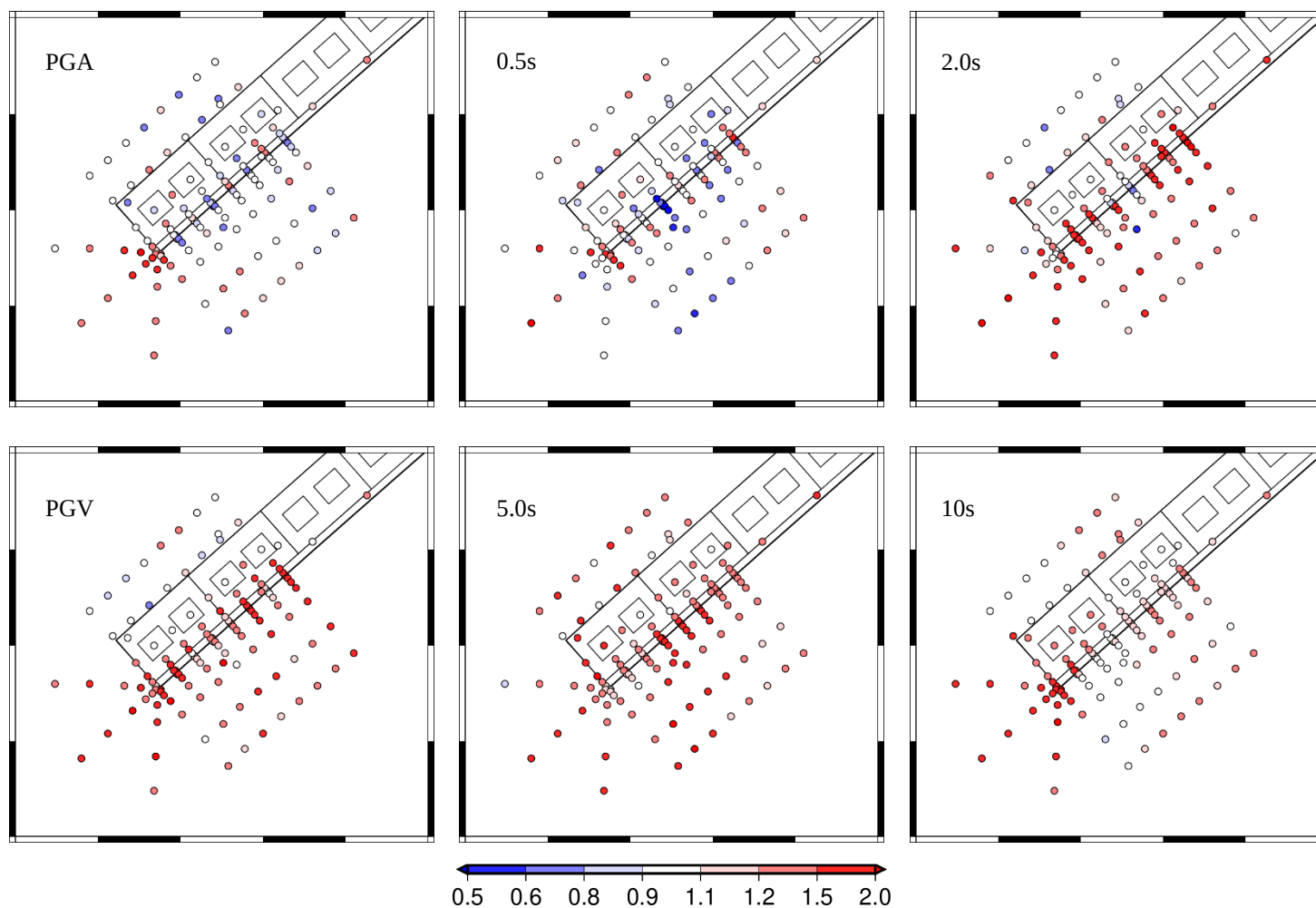


図 5-44 地震動指標比の分布 Case4_A/Case1_A

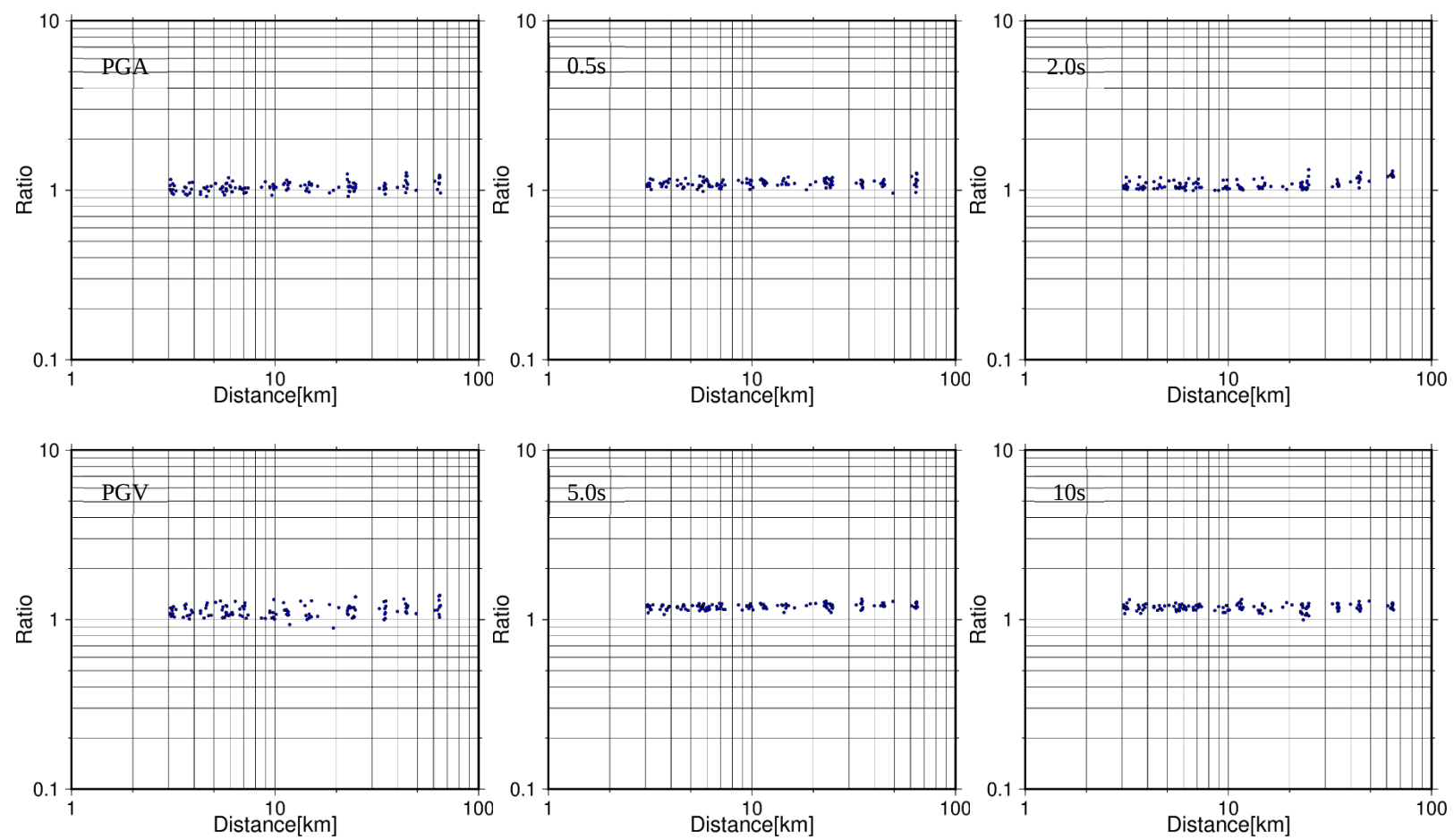


図 5-45 地震動指標比の距離との関係 Case5_A/Case1_A

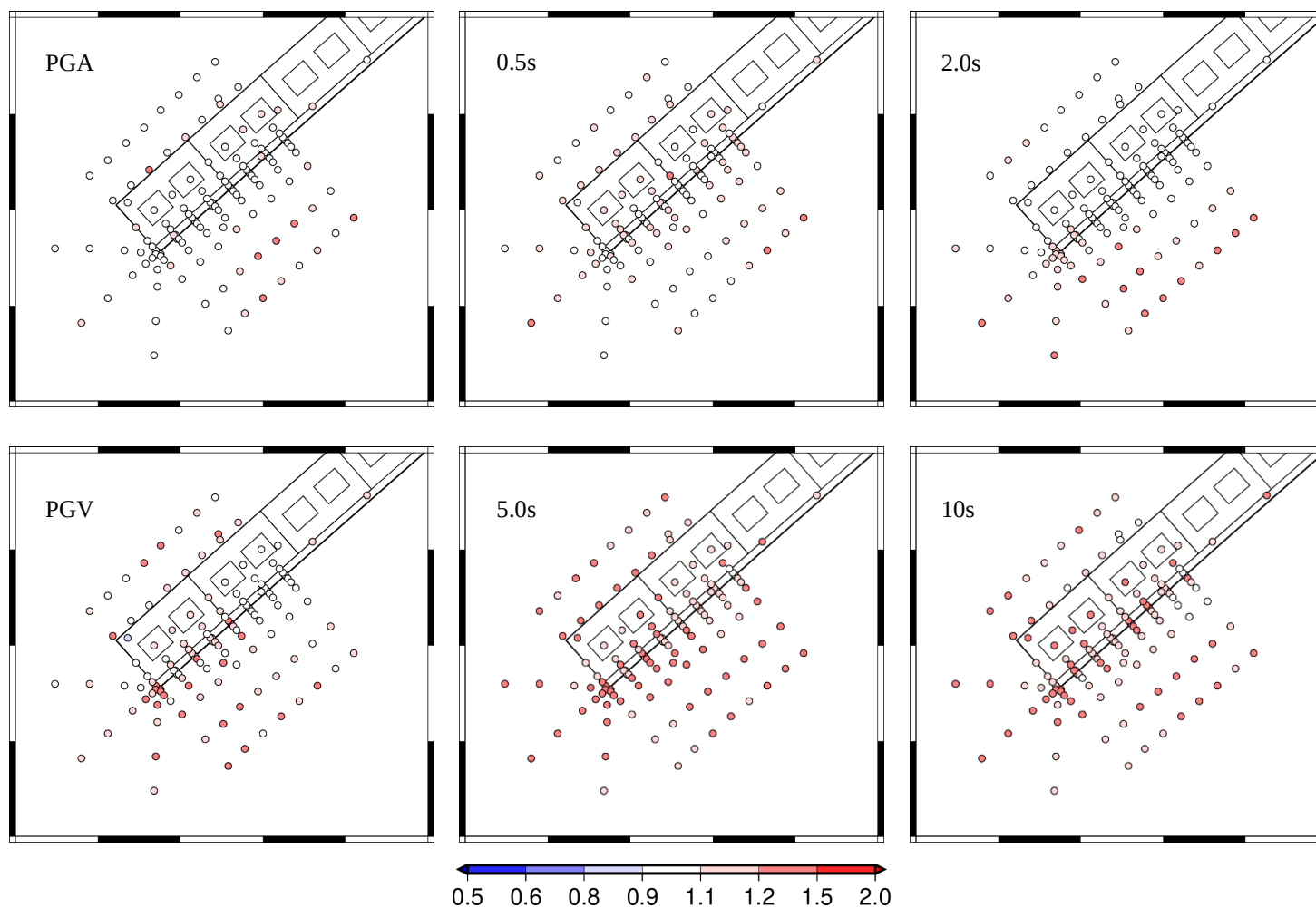


図 5-46 地震動指標比の分布 Case5_A/Case1_A

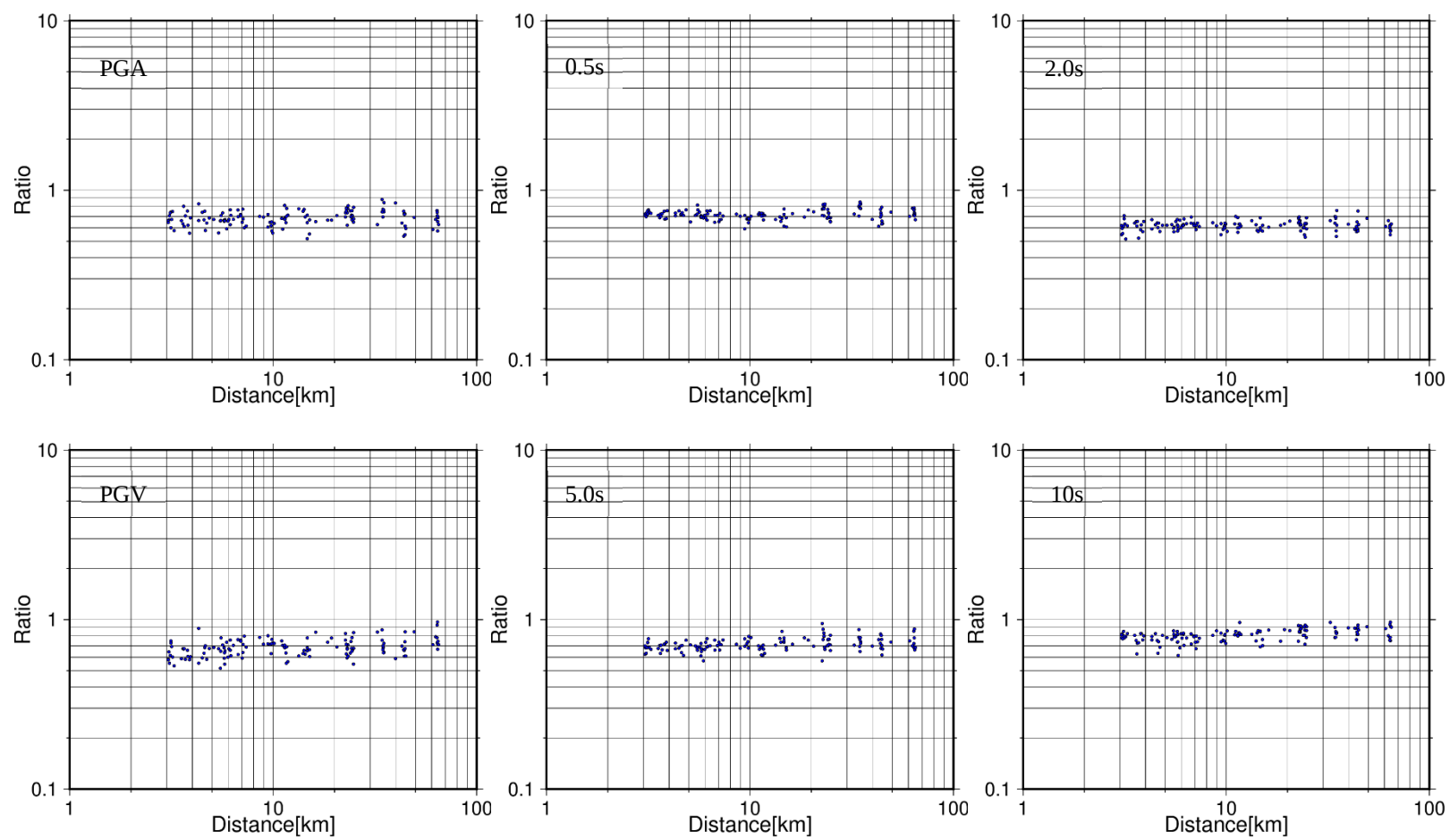


図 5-47 地震動指標比の距離との関係 Case7_A/Case1_A

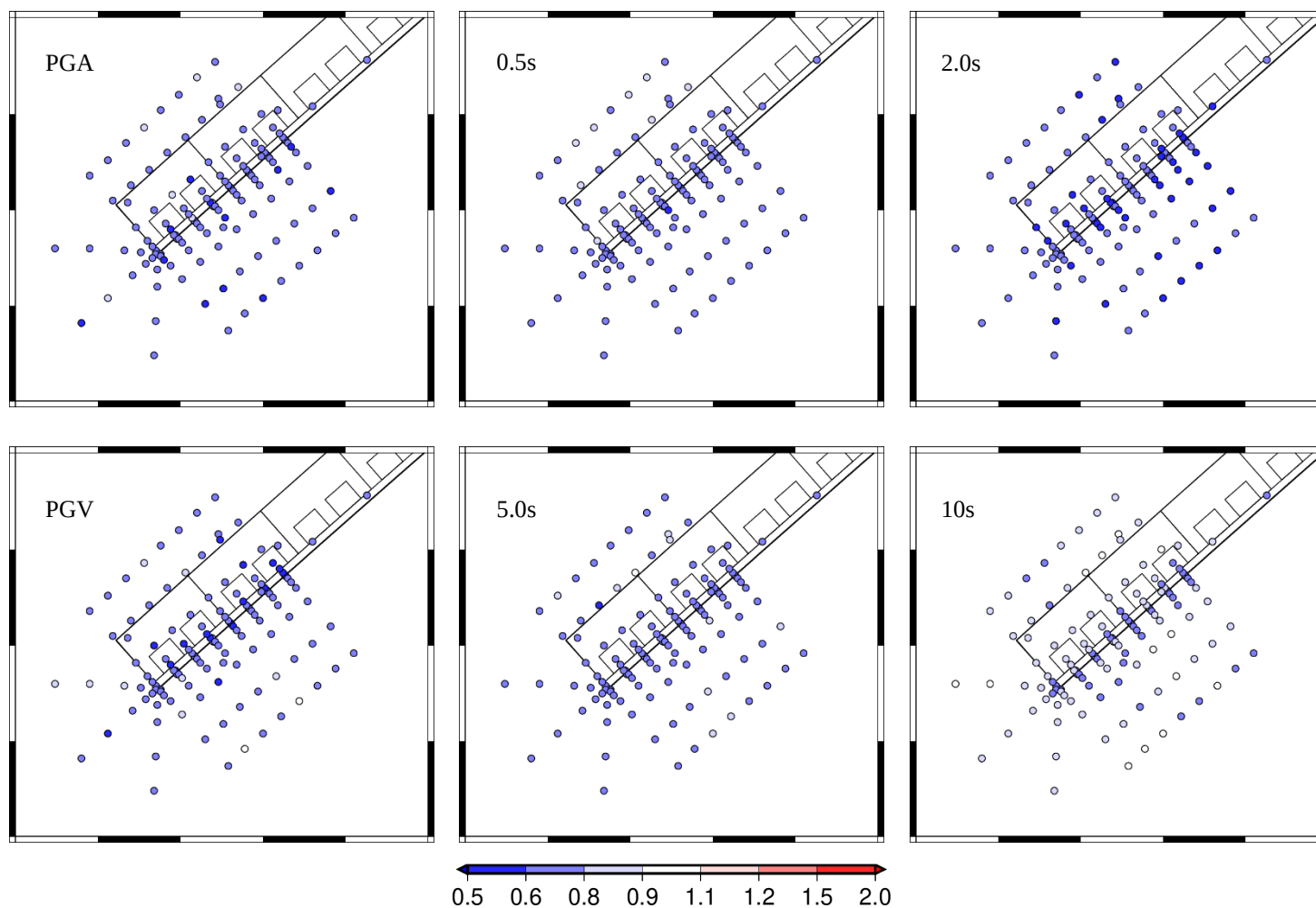


図 5-48 地震動指標比の分布 Case7_A/Case1_A

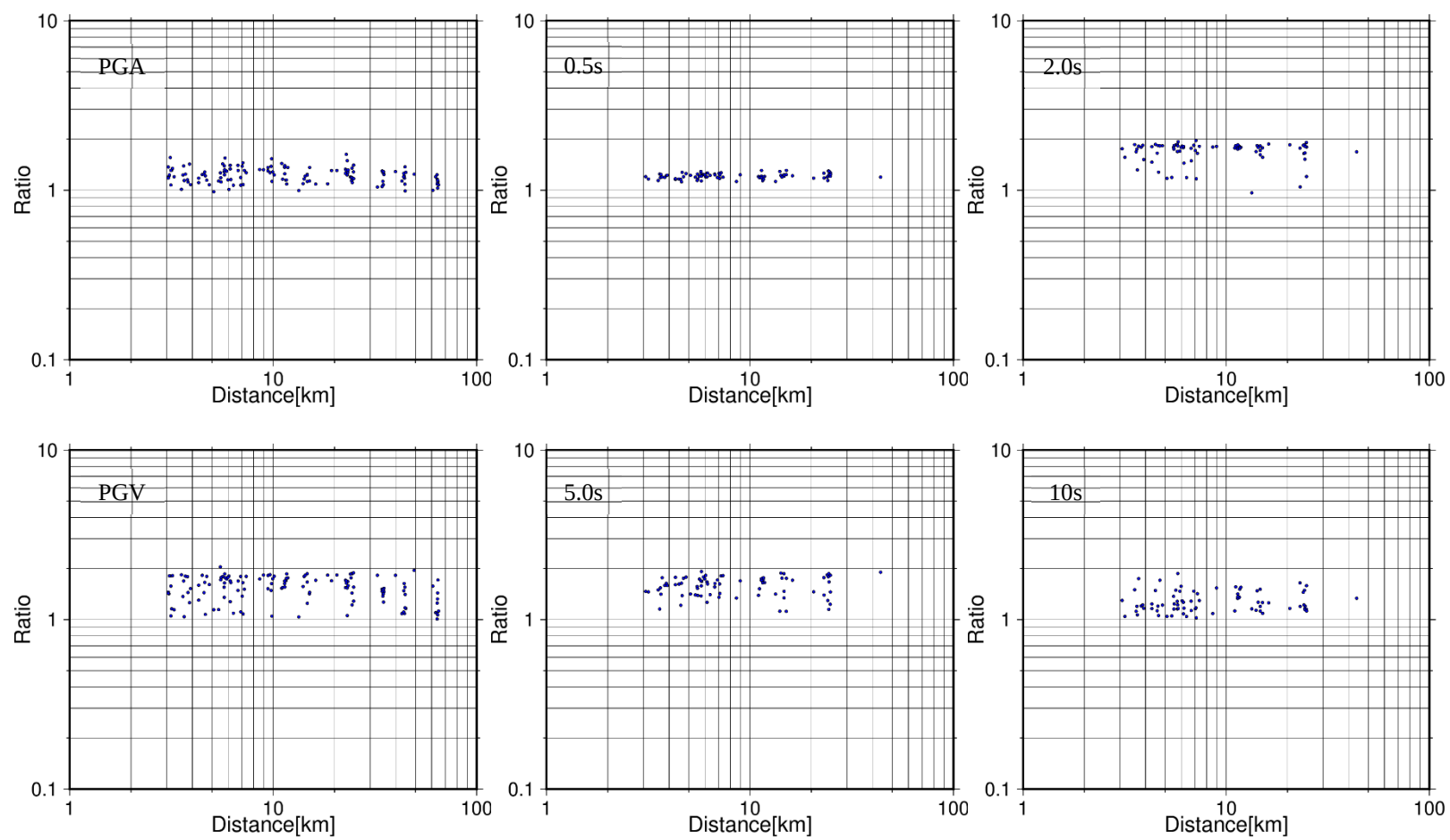


図 5-49 地震動指標比の距離との関係 Case8_A/Case6_A

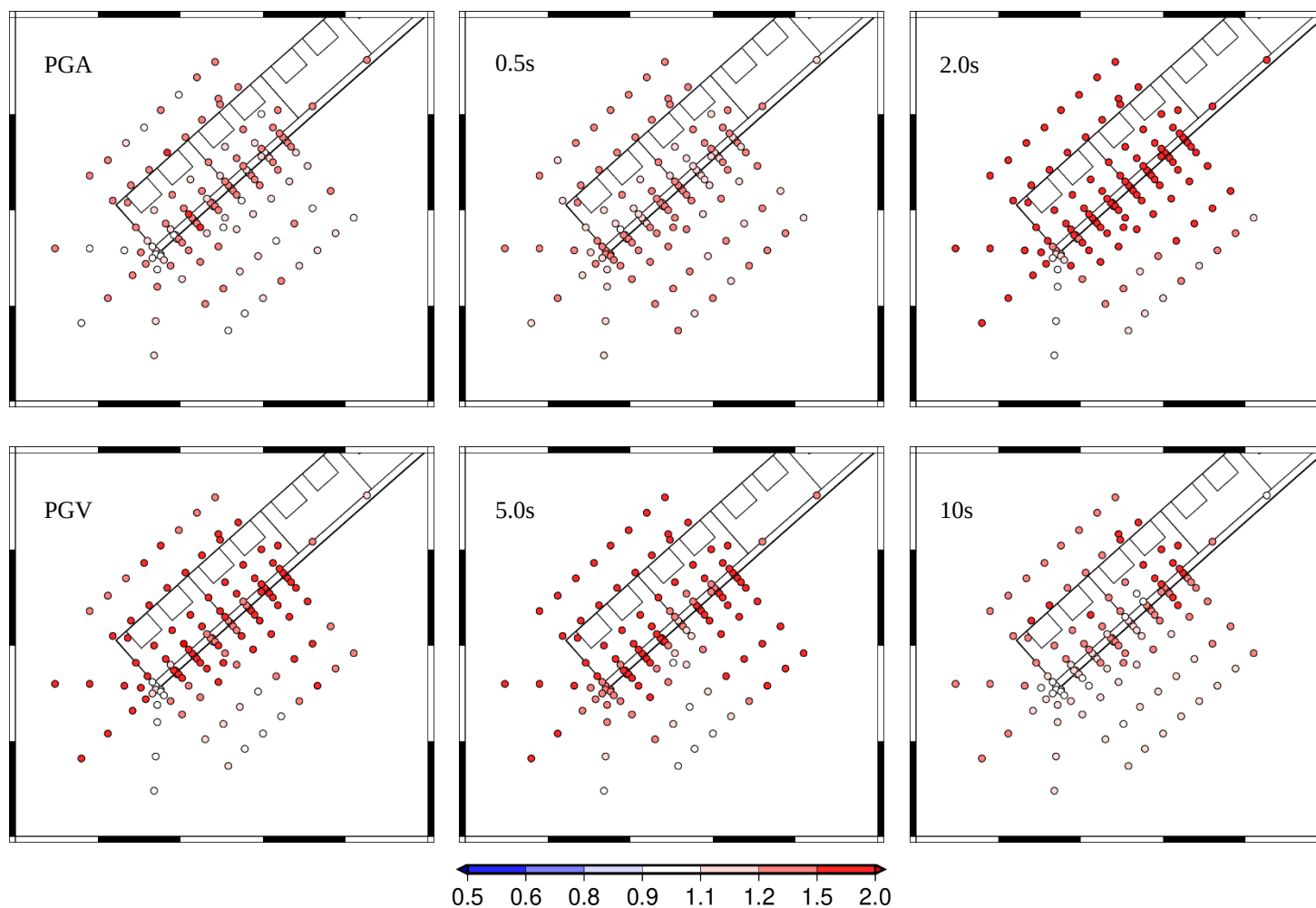


図 5-50 地震動指標比の分布 Case8_A/Case6_A

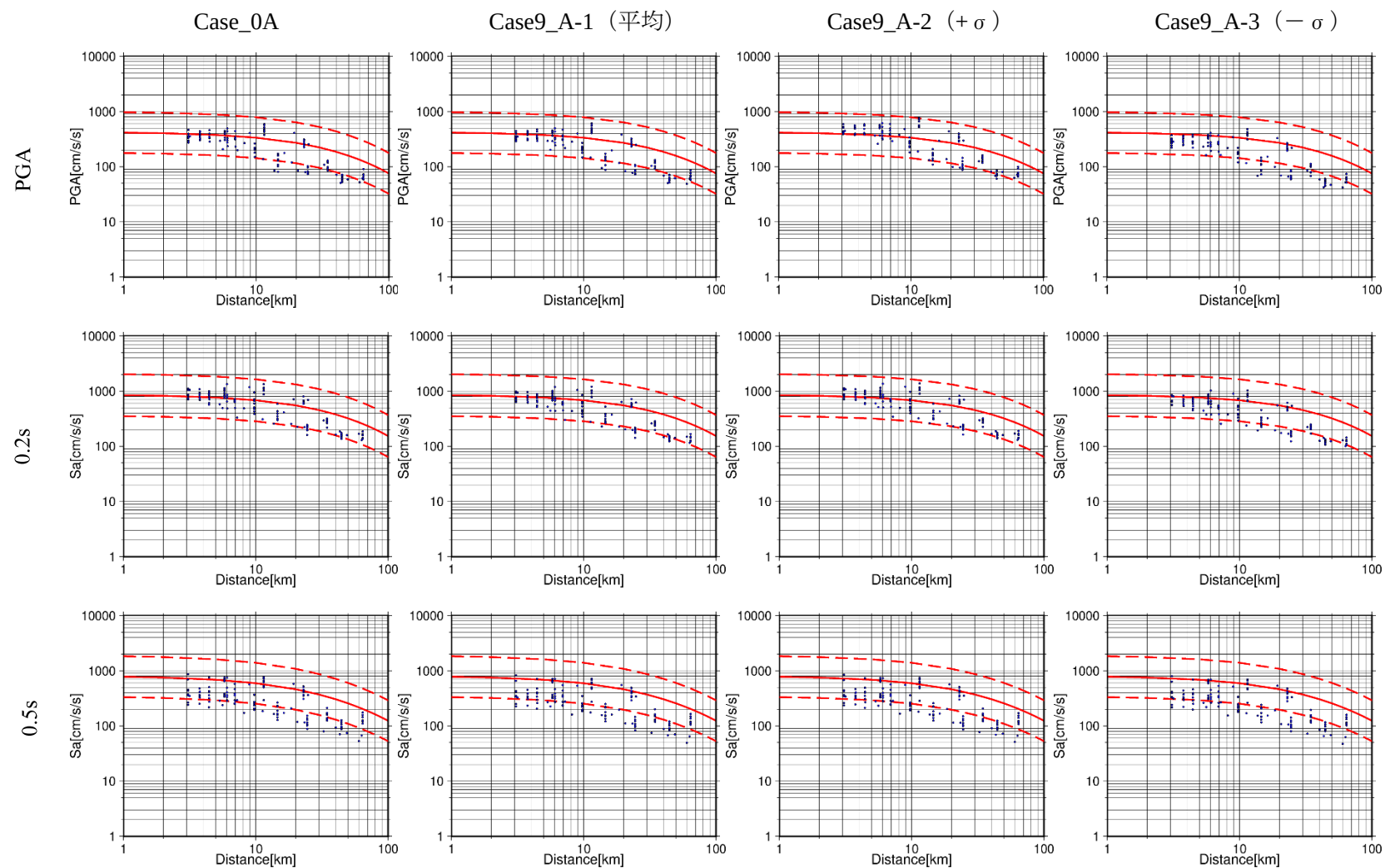


図 5-51 fmax に関する検討 各ケースの地震動指標と JNES (2013)

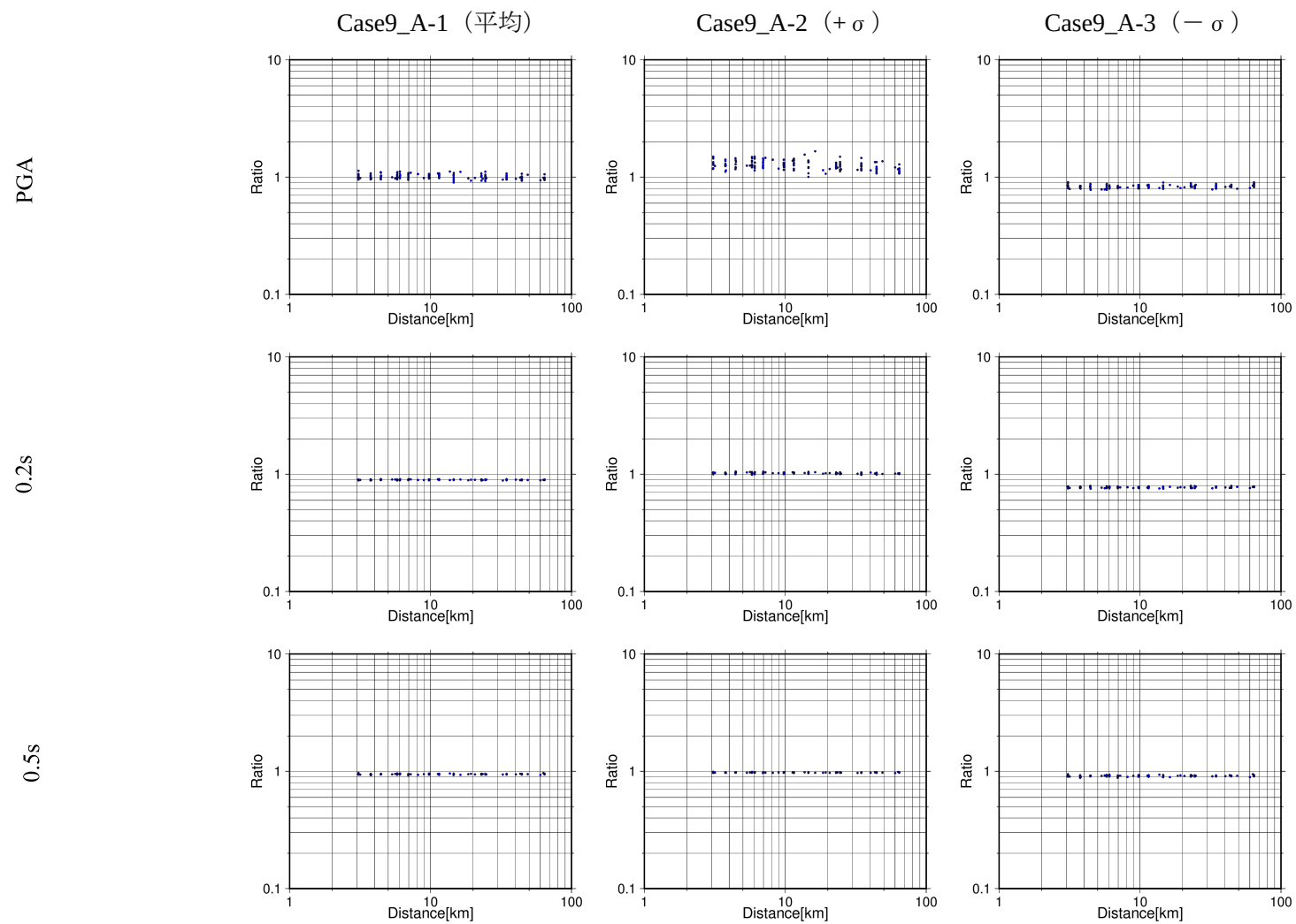


図 5-52 fmax に関する検討 Case0_A との地震動指標比

図 5-53～図 5-60 にモデル A に関する不確かさの影響度を比較するため、基本震源モデル (Case0_A) に対する地震動指標比の分布および平均値を整理した。地震動指標は PGA、PGV、擬似速度応答 (周期 0.1 秒)、擬似速度応答 (周期 1.0 秒) とし、全地点、極近傍、近距離、中距離の距離グループに分けて比較した。なお、Case9_A は SGF のみの検討であるため、対象から外した。

PGA の比較結果について、Case1_A～Case3_A は SMGA 位置が浅くなることの地震動への影響であり、概ね同程度であり、極近傍～近距離への影響が大きい。破壊伝播速度を上げた Case4_A は 1.0 周りにばらついていることが分かる。 α を変更した Case5_A は影響が小さいことが分かる。Case6_A は SMGA を深くしたことにより、中距離で地震動が大きくなる影響が確認できる。Case7_A は SMGA を浅くし、応力降下量を小さくしたことにより、地点によって大小変化するものの、全体的には基本震源モデルと同等レベルである。Case8_A は SMGA を深くし、応力降下量を大きくしているため、Case6_A よりも全体的に地震動が大きくなっていることが分かる。

PGV の比較結果について、Case1_A～Case3_A は PGA よりもばらつきが大きく、その比も大きくなっている。概ね同程度であり、極近傍～近距離への影響が大きい。破壊伝播速度を上げた Case4_A は 1.4 程度を中心にばらついていることが分かり、PGA の特徴と異なり全体的に地震動が大きくなることが確認できる。 α を変更した Case5_A は地震動が若干大きくなるものの PGA の特徴と同様に影響が小さいことが分かる。Case6_A は PGA の特徴と異なり、1.0 周りにばらついている。Case7_A も PGA の特徴と異なり、地震動が大きくなる傾向が見られ、SMGA を浅くしたことの影響が、応力降下量を小さくした影響より大きいと考えられる。Case8_A は距離が大きいほど、地震動が大きくなる傾向が見られる。

擬似速度応答 (周期 0.1 秒) の比較結果については、概ね PGA と同様の結果である。ただし、そのばらつきは PGA に比べると小さくなる傾向が見られる。

擬似速度応答 (周期 1.0 秒) の比較結果については、概ね PGV と同様の結果である。ばらつきもケースや距離によって変動はあるが、概ね同等レベルである。

表 5-7～表 5-10 には、距離グループごとに、どの不確かさケースの影響が大きいかにについて、地震動指標比の平均値を降順にした結果を整理した。全体的な傾向として、SMGA 位置が浅い Case1_A～Case3_A の影響が大きいことが分かる。ただし、中距離については、SMGA 位置が深く、応力降下量が大きい Case8_A の影響も大きい。

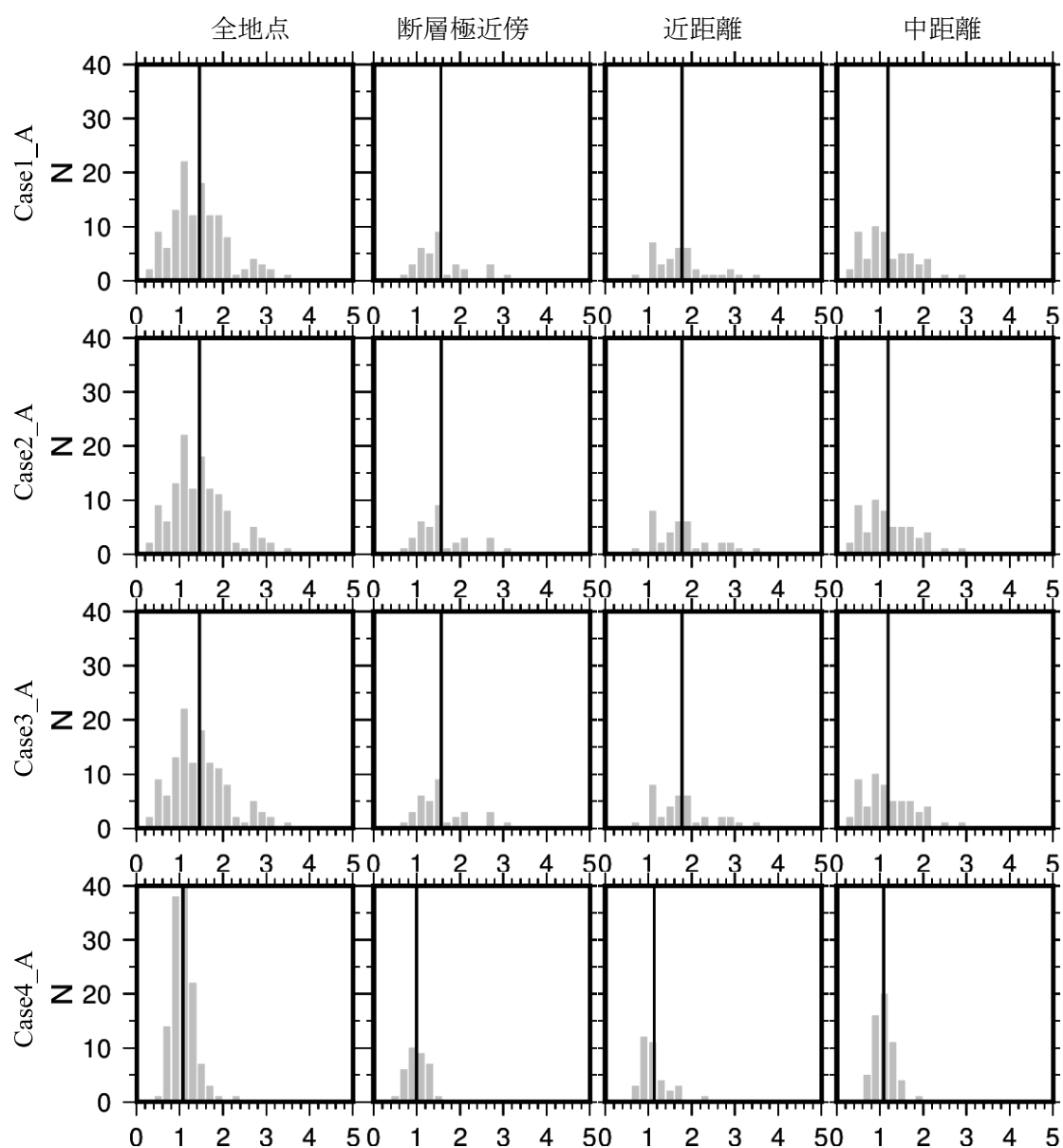


図 5-53 基本震源モデル Case0_A に対する地震動指標比の分布と平均値 PGA

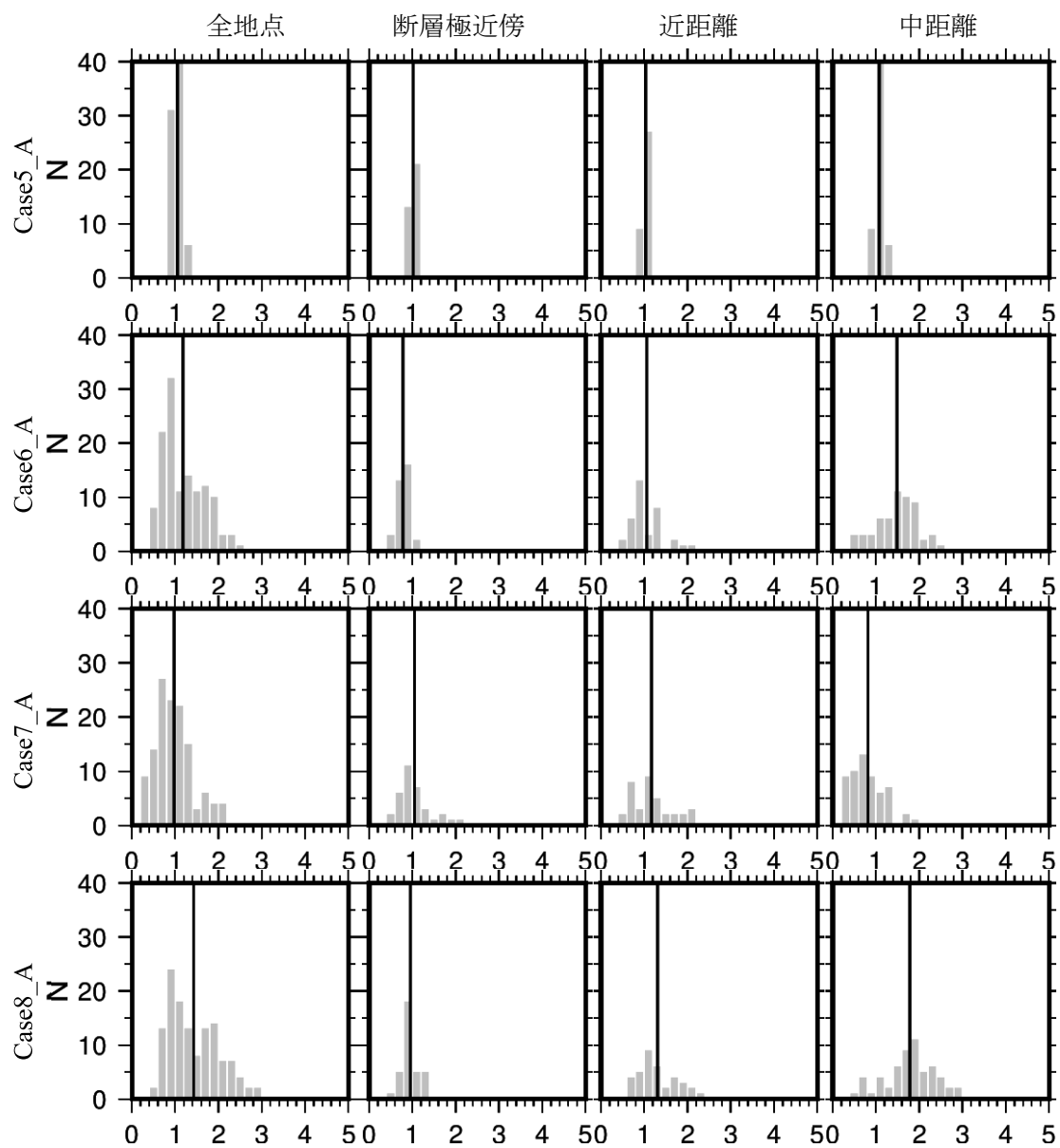


図 5-54 基本震源モデル Case0_A に対する地震動指標比の分布と平均値 PGA

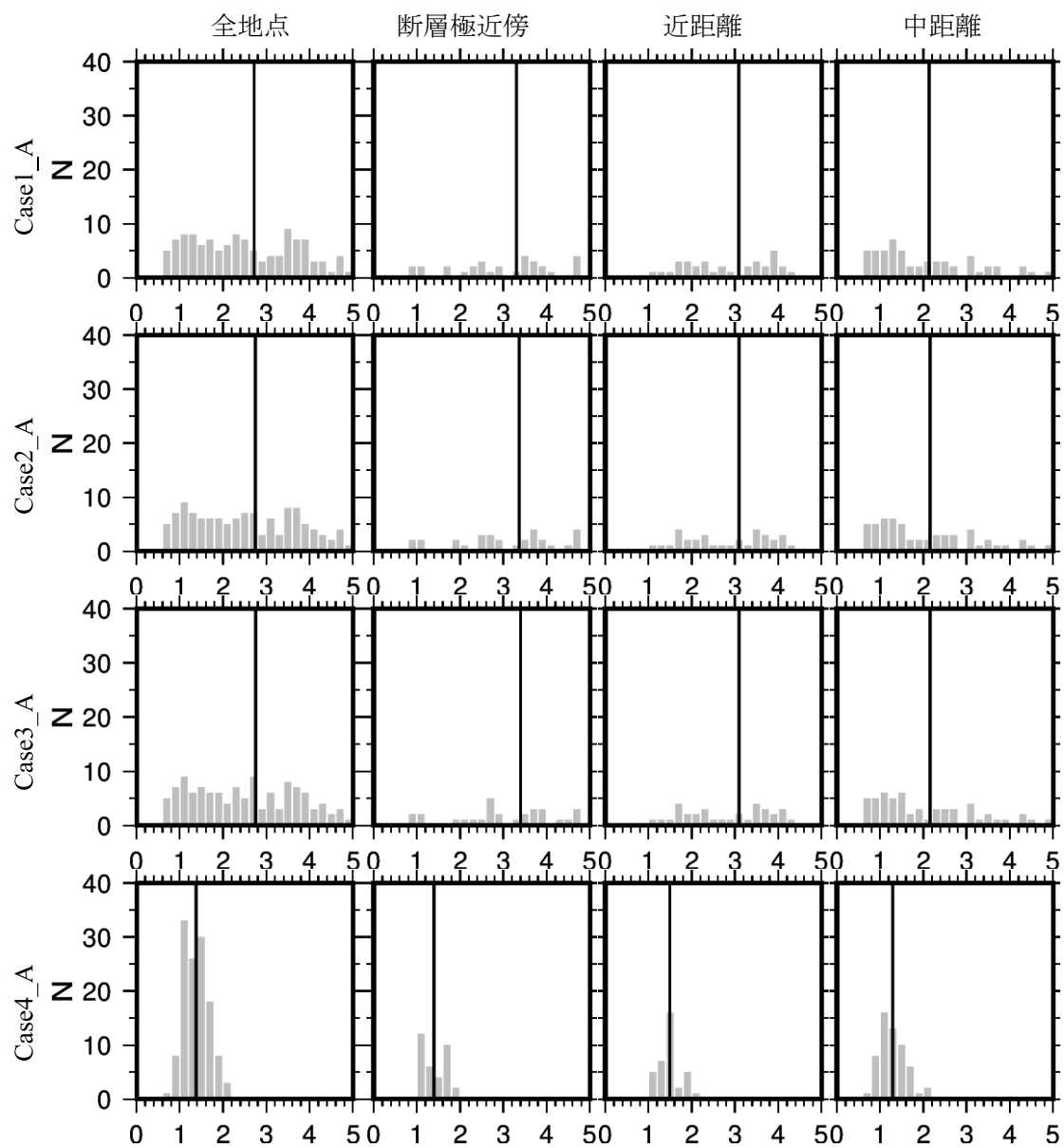


図 5-55 基本震源モデル Case0_A に対する地震動指標比の分布と平均値 PGV

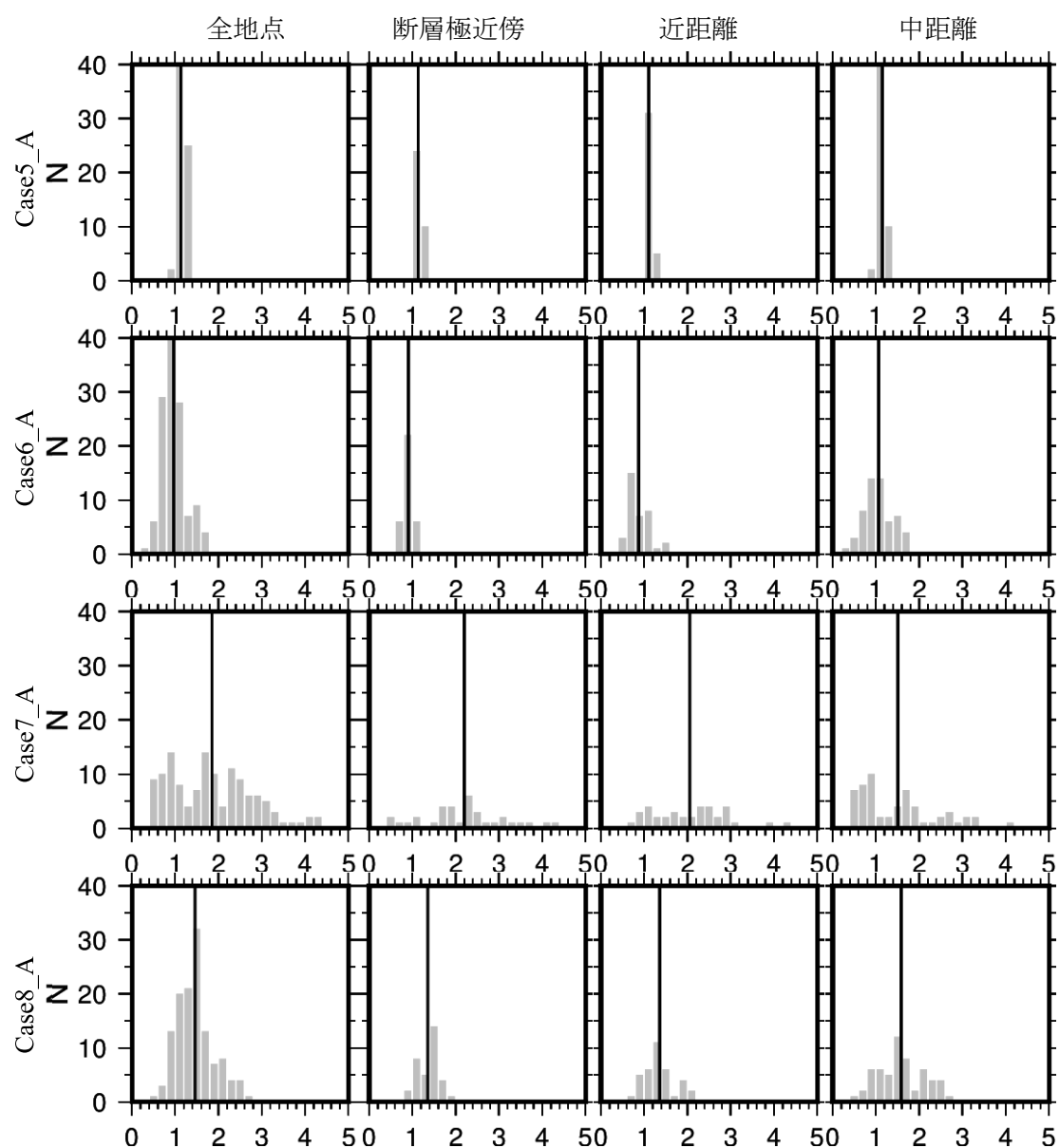


図 5-56 基本震源モデル Case0_A に対する地震動指標比の分布と平均値 PGV

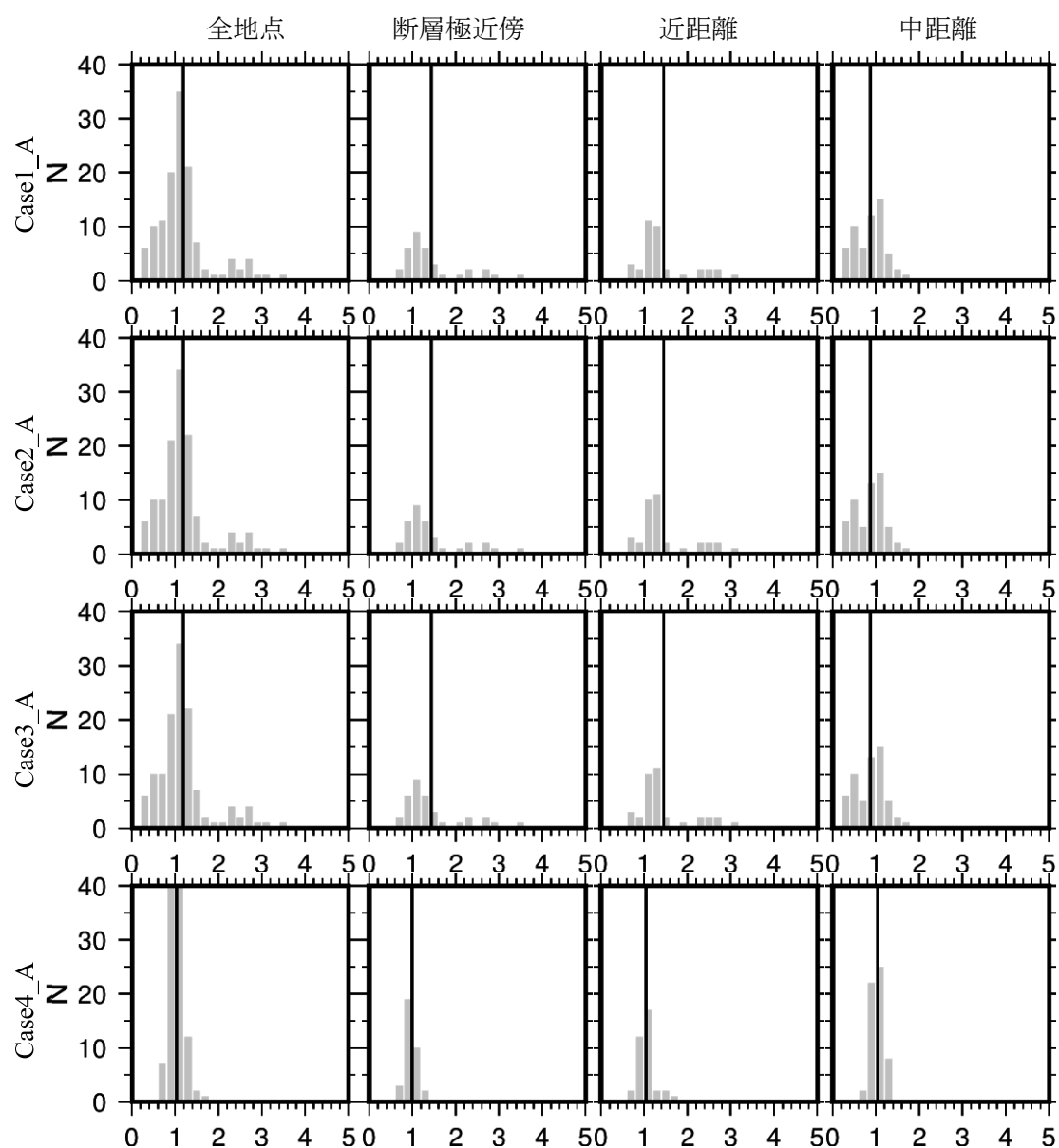


図 5-57 基本震源モデル Case0_A に対する地震動指標比の分布と平均値 周期 0.1s

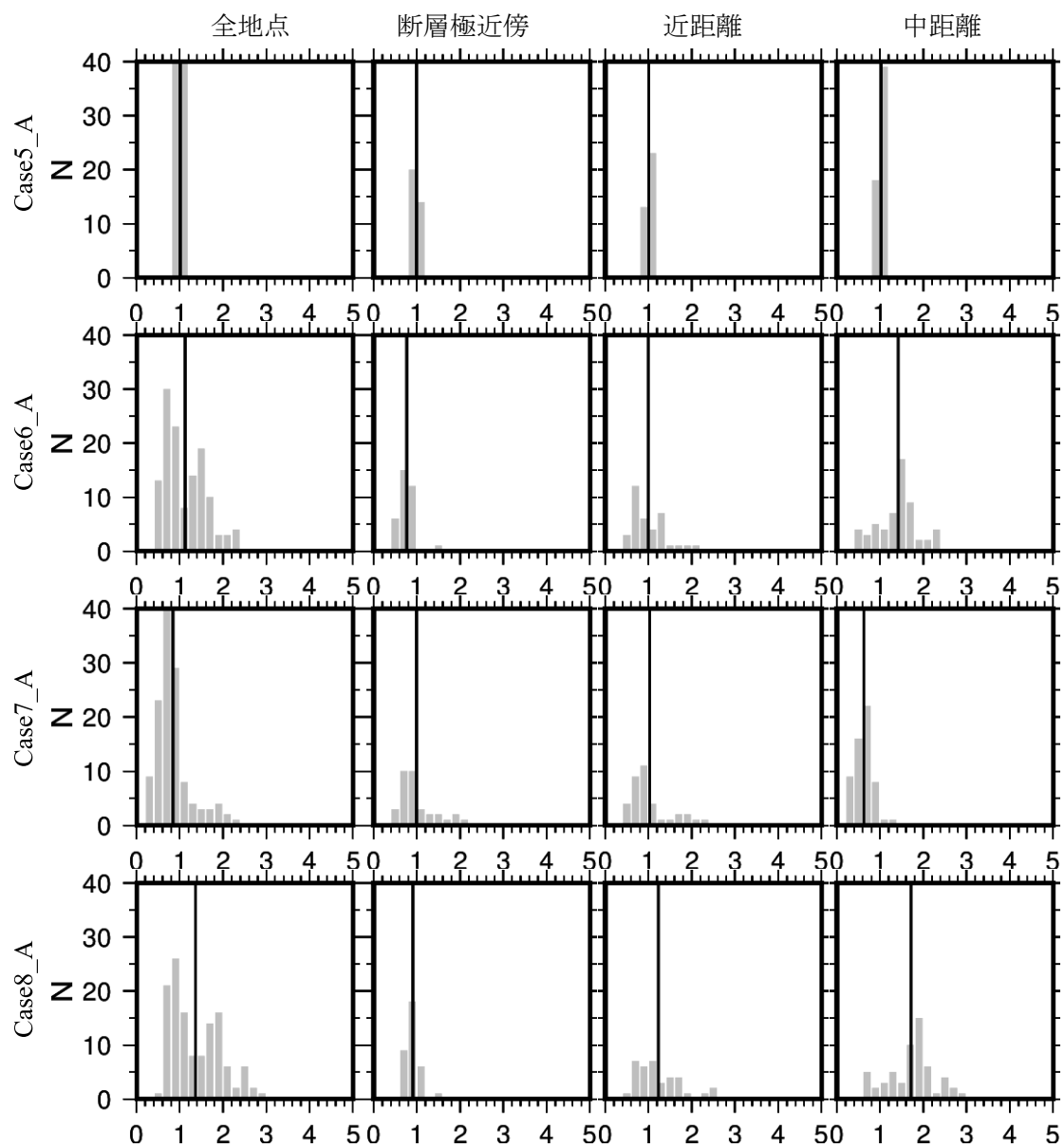


図 5-58 基本震源モデル Case0_A に対する地震動指標比の分布と平均値 周期 0.1s

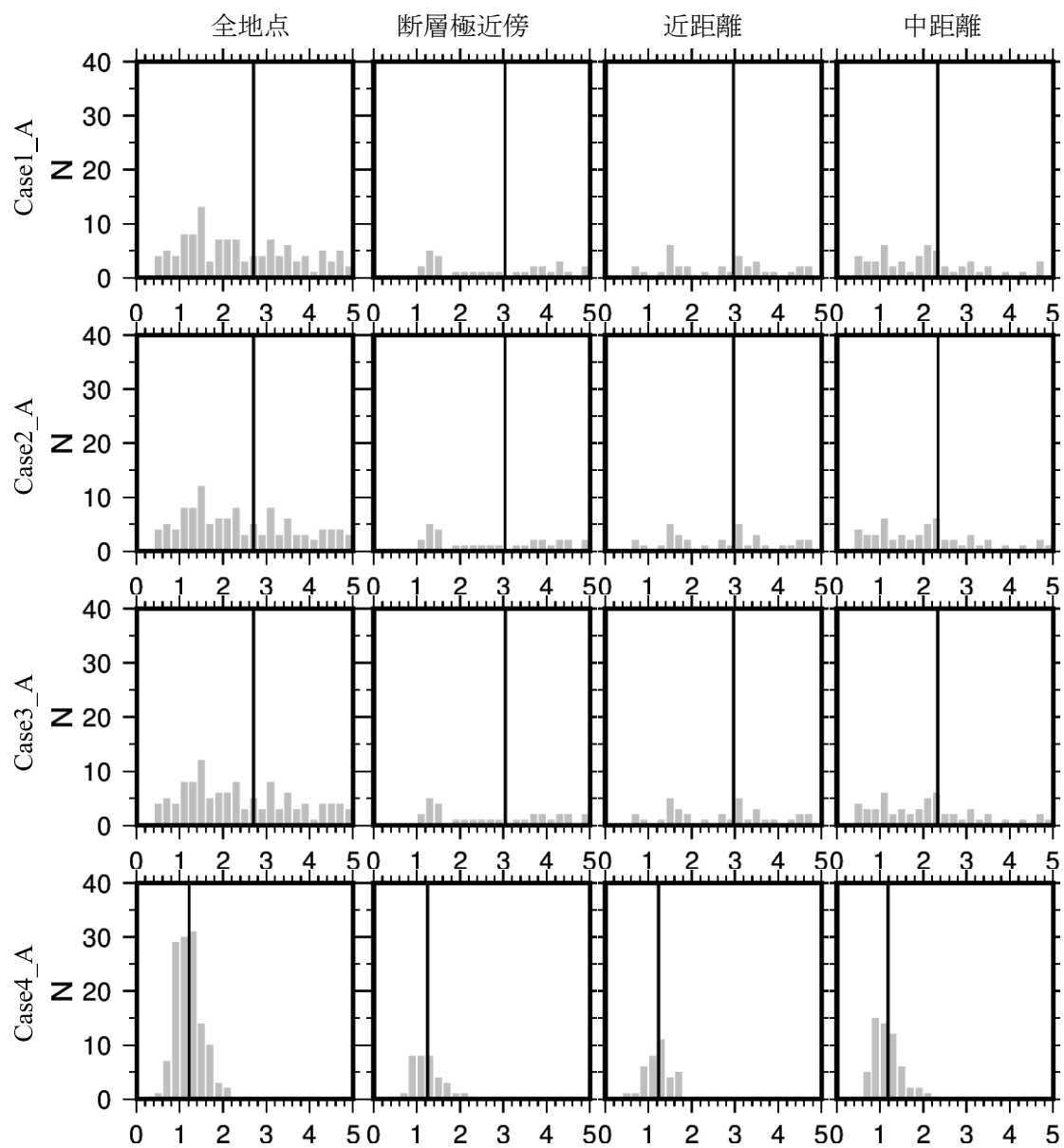


図 5-59 基本震源モデル Case0_A に対する地震動指標比の分布と平均値 周期 1.0s

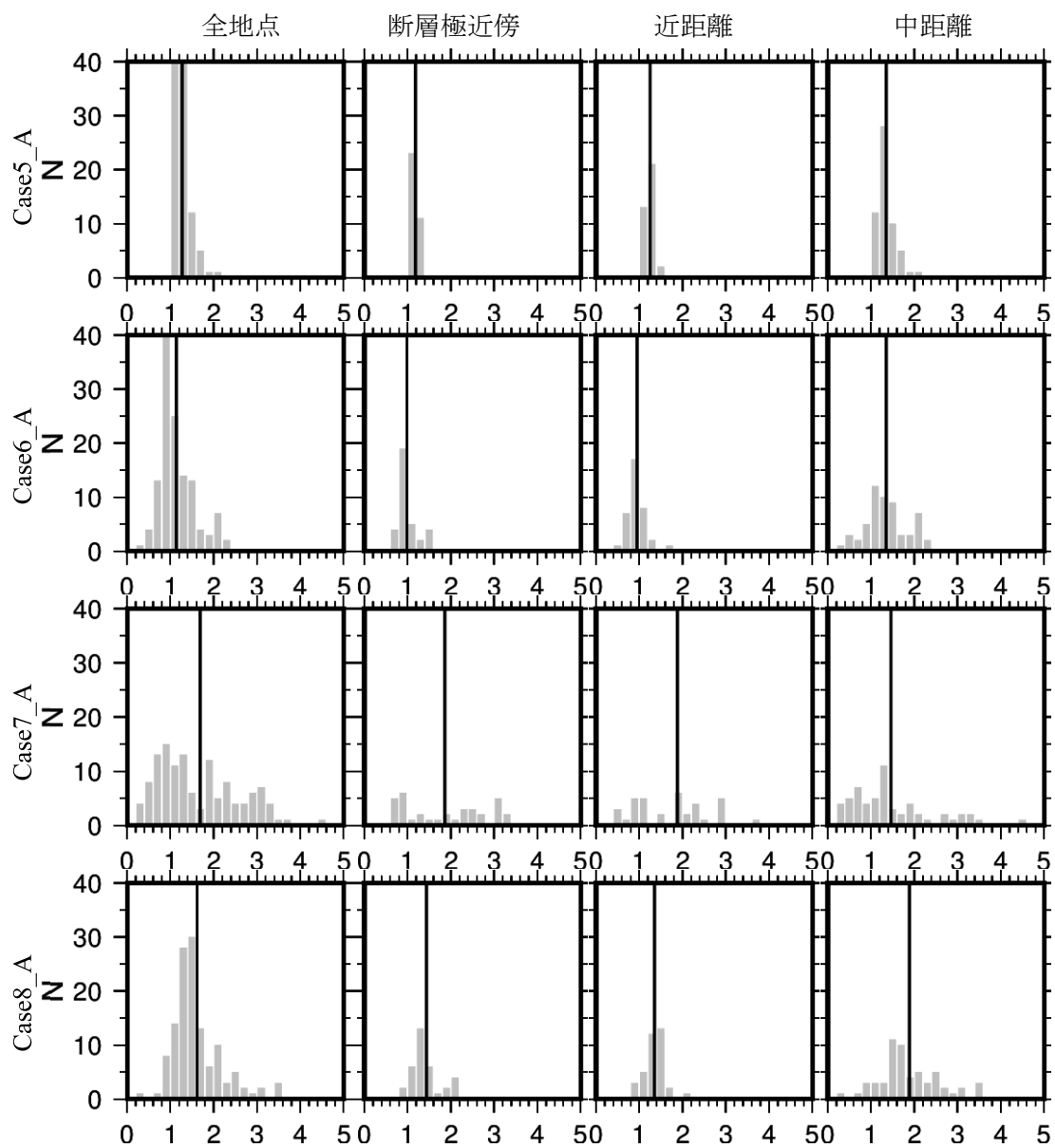


図 5-60 基本震源モデル Case0_A に対する地震動指標比の分布と平均値 周期 1.0s

表 5-7 基本震源モデル Case0_A に対する地震動指標比の平均値 PGA

全地点		断層極近傍		近距離		中距離	
不確かさ ケース	比の 平均値	不確かさ ケース	比の 平均値	不確かさ ケース	比の 平均値	不確かさ ケース	比の 平均値
Case3_A	1.454	Case3_A	1.562	Case2_A	1.776	Case8_A	1.780
Case2_A	1.453	Case2_A	1.561	Case3_A	1.776	Case6_A	1.484
Case1_A	1.450	Case1_A	1.557	Case1_A	1.774	Case3_A	1.186
Case8_A	1.424	Case7_A	1.047	Case8_A	1.307	Case2_A	1.185
Case6_A	1.175	Case5_A	1.017	Case7_A	1.171	Case1_A	1.182
Case4_A	1.073	Case4_A	0.988	Case4_A	1.133	Case4_A	1.085
Case5_A	1.046	Case8_A	0.951	Case6_A	1.058	Case5_A	1.072
Case7_A	0.978	Case6_A	0.780	Case5_A	1.033	Case7_A	0.815

表 5-8 基本震源モデル Case0_A に対する地震動指標比の平均値 PGV

全地点		断層極近傍		近距離		中距離	
不確かさ ケース	比の 平均値	不確かさ ケース	比の 平均値	不確かさ ケース	比の 平均値	不確かさ ケース	比の 平均値
Case3_A	2.755	Case3_A	3.397	Case3_A	3.095	Case3_A	2.156
Case2_A	2.744	Case2_A	3.366	Case2_A	3.093	Case2_A	2.153
Case1_A	2.716	Case1_A	3.301	Case1_A	3.086	Case1_A	2.133
Case7_A	1.847	Case7_A	2.194	Case7_A	2.053	Case8_A	1.58
Case8_A	1.457	Case4_A	1.393	Case4_A	1.493	Case7_A	1.509
Case4_A	1.376	Case8_A	1.356	Case8_A	1.359	Case4_A	1.292
Case5_A	1.13	Case5_A	1.132	Case5_A	1.105	Case5_A	1.146
Case6_A	0.967	Case6_A	0.906	Case6_A	0.873	Case6_A	1.064

表 5-9 基本震源モデル Case0_A に対する地震動指標比の平均値 周期 0.1s

全地点		断層極近傍		近距離		中距離	
不確かさ ケース	比の 平均値	不確かさ ケース	比の 平均値	不確かさ ケース	比の 平均値	不確かさ ケース	比の 平均値
Case8_A	1.36	Case2_A	1.437	Case1_A	1.451	Case8_A	1.716
Case3_A	1.188	Case3_A	1.437	Case2_A	1.451	Case6_A	1.418
Case2_A	1.188	Case1_A	1.435	Case3_A	1.451	Case4_A	1.038
Case1_A	1.187	Case5_A	0.992	Case8_A	1.227	Case5_A	1.021
Case6_A	1.123	Case7_A	0.99	Case4_A	1.042	Case3_A	0.875
Case4_A	1.026	Case4_A	0.987	Case7_A	1.027	Case2_A	0.874
Case5_A	1.009	Case8_A	0.903	Case5_A	1.007	Case1_A	0.873
Case7_A	0.837	Case6_A	0.766	Case6_A	0.994	Case7_A	0.626

表 5-10 基本震源モデル Case0_A に対する地震動指標比の平均値 周期 1.0s

全地点		断層極近傍		近距離		中距離	
不確かさ ケース	比の 平均値	不確かさ ケース	比の 平均値	不確かさ ケース	比の 平均値	不確かさ ケース	比の 平均値
Case2_A	2.704	Case3_A	3.041	Case2_A	2.967	Case2_A	2.338
Case3_A	2.704	Case2_A	3.038	Case3_A	2.967	Case3_A	2.336
Case1_A	2.701	Case1_A	3.036	Case1_A	2.965	Case1_A	2.335
Case7_A	1.685	Case7_A	1.860	Case7_A	1.879	Case8_A	1.891
Case8_A	1.616	Case8_A	1.437	Case8_A	1.351	Case7_A	1.459
Case5_A	1.275	Case4_A	1.245	Case5_A	1.248	Case5_A	1.349
Case4_A	1.213	Case5_A	1.178	Case4_A	1.236	Case6_A	1.349
Case6_A	1.137	Case6_A	0.984	Case6_A	0.945	Case4_A	1.180

5.5 まとめ

特性化震源モデルのパラメータの不確かさによる影響度の検討として、地表に断層が現れた縦ずれタイプの内陸型地震として、2008 年四川地震を対象に、(1) 検討対象パラメータの不確かさのモデル化、(2) 基本震源モデルの構築及び地震動評価、(3) 各パラメータの不確かさを考慮した地震動評価、(4) パラメータの影響度分析を実施した。

検討対象パラメータの不確かさのモデル化では、SMGA 配置に関する不確かさ、LMGA に関する不確かさ、破壊伝播速度およびライズタイムに関する不確かさ、応力降下量の深さ依存性に関する不確かさ、 f_{max} に関する不確かさについて、既往研究等を参考にモデル化を検討した。

基本震源モデルの構築及び地震動評価では、各パラメータの平均値もしくは中央値を用いた特性化震源モデルを「基本震源モデル」として構築した。断層パラメータについては、「レシピ」に基づく長大断層の設定方法から設定した (モデル A)。比較用のモデルとして、Dan *et al.* (2019) についても断層パラメータを設定した (モデル B)。地震動評価は主に短周期側を統計的グリーン関数法、長周期側を波数積分法で評価し、周期 1.2 秒のマッチングフィルタによりハイブリッド合成波形を作成した。観測記録をより説明するための「調整モデル」を Kurahashi and Irikura (2010) を参考に設定し、既往研究と同程度の結果が得られることを確認した。

各パラメータの不確かさを考慮した地震動評価では、「基本震源モデル」を含め、計 14 ケース設定し、ハイブリッド合成法による地震動評価を行った。

パラメータの影響度分析では、その結果を基に、「基本震源モデル」または関連する計算ケースの地震動評価結果を比較し、その影響度を分析した。SMGA の配置では、SMGA からの距離に応じた変化に加え、入射角の影響と考えられる変化が見られた。LMGA に関して、周期 5 秒以下の地震動への影響は小さく、周期 10 秒の断層最短距離 5 km 程度以内ではその影響が大きいことが確認できた。また、LMGA 近傍での永久変位は顕著な差が見られた。破壊伝播速度およびライズタイムに関してはライズタイムに比べ、破壊伝播速度の影響の方が大きいことが確認できた。相関性考慮の有無による地震動のばらつきについての検討として、応力降下量の深さ依存性に関して検討を行い、応答値で倍半分程度までの影響が見られ、地震動への影響が大きいと考えられる。ただし、周期 10 秒では差が小さくなっており、長周期ではその影響は小さくなる。なお、SMGA 位置の不確定性とも関わるため、その影響はかなり大きく、検討課題として重要である。 f_{max} に関しては短周期地震動のみで検討したが、PGA など短周期ほどその影響が大きい傾向が確認できた。また、モデル A、モデル B では地震規模が異なり直接比較することはできないが、SMGA の配置に関する地震動分布の変化の特徴が同様の傾向となることが確認できた。

今後の課題として、特に影響が大きいパラメータに関して、不確定性に関するより合理的なパラメータ設定の考え方、データ蓄積が重要であると考えられる。

【参考文献】

- 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, DOI 10.1007/s00024-010-0116-y
- Boore, D.M. (1983), Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of Seismological Society of America*, 73, 6, 1865-1894.
- 壇一男, 入江紀嘉, 具典淑, 島津奈緒未, 鳥田晴彦 (2015), 長大な逆断層による内陸地震の断層モデルのパラメータの設定方法の提案, *日本建築学会構造系論文集*, 80, 707, 47-57.
- Dan, K., Ju D., Fujiwara, H. and Morikawa, N. (2019), Extension of the procedure for evaluating parameters of strike-slip fault with surface breakings for strong motion prediction, *Proceedings of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, 1952-1960.
- 藤本一雄, 翠川三郎 (2006), 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.
- 地震調査研究推進本部 地震調査委員会 (2009), 全国地震動予測地図 技術報告書.
- 地震調査研究推進本部 地震調査委員会 (2020), 震源断層を特定した地震の強震動予測手法 (「レシピ」) 令和 2 年 (2020 年) 3 月.
- 原子力安全基盤機構 (2013), 平成 24 年度地震基盤における応答スペクトルの距離減衰式に適用する地盤増幅特性評価手法の検討 付録 E「平成 20～23 年までに作成された硬質岩盤上距離減衰式のアップデート」.
- Ghasemi, H., Fukushima, Y., Koketsu, K., Miyake, H., Wang, Z., and Anderson, J.G. (2010), Ground-Motion Simulation for the 2008 Wenchuan, China, Earthquake Using the Stochastic Finite-Fault Method, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 100, No. 5B, 2476–2490, doi: 10.1785/0120090258
- Hisada, Y. and Bielak, J. (2003), A Theoretical Method for Computing Near Fault Ground Motions in Layered Half Spaces Considering Static Offset Due to Surface Faulting, with a Physical Interpretation of Fling Step and Rupture Directivity, *BSSA.*, 93, 3, 1154-1168.
- 香川敬生, 鶴来雅人, 佐藤信光 (2003), 硬質サイトの強震観測記録に見られる高周波低減特性の検討, *土木学会地震工学論文集*, 27, 0315 (1-4).
- 香川敬生 (2004), ハイブリッド合成法に用いる統計的グリーン関数法の長周期帯域への拡張, *日本地震工学会論文集*, 4, 2, 21-32.
- Kurahashi, S. and Irikura K. (2010), Characterized Source Model for Simulating Strong Ground Motions during the 2008 Wenchuan Earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100, 5B, 2450–2475, doi: 10.1785/0120090308
- Ludwig, W. J., Nafe, J. E. and Drake, C. L. (1970), *Seismic refraction, in the Sea*, Vol. 4, edited by Maxwell, A. E., Wiley Interscience, New York, 53-84.
- 内閣府 (2012), 南海トラフの巨大地震モデル検討会「第二次報告 (平成 24 年 (2012) 年)」.

中村洋光, 宮武 隆 (2000), 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.

大西良広, 堀家正則 (2004), 震源近傍での地震動予測のための拡張統計的グリーン関数法とそのハイブリッド法への適用に関するコメント, 日本建築学会構造系論文集, 586, 37-44.

佐藤智美, 川瀬博, 佐藤俊明 (1994), 表層地盤の影響を取り除いた工学的基盤波の統計的スペクトル特性, 仙台地域のボアホールで観測された多数の中小地震記録を用いた解析, 日本建築学会構造系論文集, 462, 79-89.

田中信也, 金田惇平, 引間和人, 久田嘉章 (2018), 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, 83, 752, 1525-1535.

鶴来雅人, 香川敬生, 入倉孝次郎, 古和田明 (1997), 近畿地方で発生する地震の f_{max} に関する基礎的検討, 地球惑星科学関連学会 1997 年合同大会予稿集, 103.

6. おわりに

以下に本事業の成果と課題をまとめる。

特性化震源モデルのパラメータの不確かさの検討では、特性化震源モデル設定手法の高度化を目的として、2023 年トルコ・シリア地震、2022 年台湾池上地震、2022 年福島県沖の地震の 3 地震を対象に、地下構造モデルの高度化、強震動記録を用いた震源モデルの構築、短周期側に着目した SMGA モデルの構築、海溝型地震の震源特性の調査、震源パラメータのスケーリング則の検証を行った。地下構造モデルの高度化では、地震基盤以浅部を対象として、観測記録を十分に説明する地盤モデルを構築した。運動学的震源モデルの構築では、ジョイントインバージョンにより、遠地記録、強震記録、GNSS 記録の 3 つの観測記録を再現する不均質すべりモデルを構築した。SMGA モデルの構築では、震源インバージョンの結果より得られたすべり量の大きい領域を参考に加速度波形、速度波形、フーリエスペクトルの再現を行った。得られた 3 地震の SMGA モデルは、既往のスケーリング則と概ね整合的な結果が得られた。海溝型地震のスケーリング則の検証では、収集した国内外の震源インバージョンより、断層面積、アスペリティ面積を抽出し、過年度の結果及び既往のスケーリング則との比較を行った。概ね過年度の結果、スケーリング則と整合的な結果であった一方で、地域性によるばらつきが一部地域で見られる結果となった。また、震源深さやアスペリティ領域の深さ方向の分布を整理し、震源断層領域との関係について検討を行った。その結果、アスペリティの平均深さ、震源深さは、抽出した震源断層領域内の深い位置に集中する傾向が得られた。『強震動予測のための「レシピ」の流れ』として、本事業の位置づけを明確にするために、1998 年に入倉・他により提示された強震動予測のための「レシピ」のうち断層モデルの設定法について、その後の流れも含めて解説するとともに、最新の研究を紹介した。現在「レシピ」は第 3 世代（研究開発中）に入っており、浅部断層への「拡張レシピ」に関する研究を整理した。そのうえで、1) 浅部断層の詳細なモデル化、2) 観測波形と震源における力学との対応に関する研究が今後の重要課題と考えられる。

動力学シミュレーションによる震源特性化の検討では、動力学的知見を活用し、特性化震源モデルの構築手法の高度化を目的とし、①Mw7.0 程度、縦ずれタイプの内陸型地震を対象に、地震発生サイクルの動力学シミュレーションを行い、得られた動力学的震源モデルから抽出した各パラメータの相関性を検討するとともに、固有地震の震源スケーリング則との比較を行った。その結果、期間 1000 年で、Mw5.8 以上のイベントが 6 つ抽出された。各イベントから得られた断層パラメータは既往のスケーリング則やパラメータ間の関係と概ね整合的であることが確認できた。ただし、地震規模の小さい地震については断層面積が過大となる傾向や応力降下量が過小になる傾向がみられるため、地震規模の小さい地震に対する再現性向上の検討が今後の課題として挙げられる。②2016 年熊本地震をモデル地震として、応力降下量等の動力学的パラメータの深さ方向での不均質性を考慮した動力学シミュレーション（計 6 シナリオ）を実施し、得られた動力学的震源モデルから震源パラメータを抽出するとともに、深部断層と浅部断層、それぞれにおけるすべり時間関数の特徴を分析

し、モデル化を行った。すべり速度時間関数は深さによって特徴が変わる傾向が確認できた。最大すべり速度について、破壊の進展に伴って大きくなる傾向が認められた。そのモデル化の検討として、その傾きについて各シナリオの結果と平均値を整理した。シミュレーションの蓄積によって、このような傾向が一般的なものであるか等の確認が今後の課題として挙げられる。

特性化震源モデルのパラメータの相関性の検討では、パラメータの不確かさの組み合わせ等の取り扱いに関する知見を蓄積することを目的とし既往研究で得られた内陸地殻内地震、海溝型地震、スラブ内地震の運動学的震源モデル、に第2章の結果を加えた計22地震を対象に震源パラメータを整理した。特性化震源モデルの各震源パラメータの相関性については、R4年度の検討結果と比較することに加え、地震タイプ（内陸地殻内地震、海溝型地震、スラブ内地震）ごとの傾向が分かるように検討した。その結果、いずれのパラメータにおいても過年度の内陸地殻内地震に関する検討結果と概ね同様な傾向を示した。地震タイプごとで比較した場合においても、大きな傾向の差は認められなかった。しかし、主に海溝型地震のパラメータについては、過年度の結果及び、他の地震タイプの結果と乖離する結果がいくつか見られた。本検討で収集した海溝型地震は、2011年東北地方太平洋沖地震と2003年の十勝沖地震の2地震であり（文献数は3つ）、他の地震タイプの収集数と比べると少ないことから、相関性について検討するためには、より多くのデータ収集・整理が必要となることが考えられる。

特性化震源モデルのパラメータの不確かさによる影響度の検討では、2008年四川地震を対象に、（1）検討対象パラメータの不確かさのモデル化、（2）基本震源モデルの構築及び地震動評価、（3）各パラメータの不確かさを考慮した地震動評価、（4）パラメータの影響度分析を実施した。主な成果として、本検討においては、LMGAの有無およびそのすべり量について、周期5秒以下の地震動への影響は小さく、周期10秒の断層最短距離5km程度以内ではその影響が大きいことが確認できた。LMGA近傍での永久変位は顕著な差が見られた。応力降下量の深さ依存性に関しては、応答値で倍半分程度までの影響が見られた。ただし、周期10秒では差が小さくなっており、長周期ほどその影響は小さくなる。実際にはSMGA位置による影響も加わるため、SMGA位置とともにその影響はかなり大きく、検討課題として重要である。今後の課題として、特に影響が大きいパラメータに関して、不確定性に関するより合理的なパラメータ設定の考え方、データ蓄積が重要であると考えられる。