

3.2. 相模トラフの地震を対象とした長周期地震動ハザード評価の検討等

(1) 事業の内容

(a) 事業の題目

相模トラフの地震を対象とした長周期地震動ハザード評価の検討等

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立研究開発法人 防災科学技術研究所	研究領域長	藤原 広行
国立研究開発法人 防災科学技術研究所	主任研究員	森川 信之
国立研究開発法人 防災科学技術研究所	主任研究員	前田 宜浩
国立研究開発法人 防災科学技術研究所	契約研究員	岩城 麻子

(c) 事業の目的

相模トラフの地震を対象とした長周期地震動ハザードマップを作成する。

(2) 事業の成果

(a) 事業の要約

相模トラフで発生するマグニチュード8程度の地震について、3.1の検討結果を踏まえて、震源域、アスペリティの位置や大きさ、応力降下量、破壊開始点位置、破壊伝播の不均質性等の不確実さを考慮した、多数の震源モデルを作成した。また、別途作成中である首都圏を対象とした浅部・深部統合地盤モデルに基づく計算用地下構造モデルを用いて長周期地震動シミュレーションを実施した。このとき、対象とする周期帯については3.1の検討結果を踏まえて設定し、首都直下地震防災・減災特別プロジェクトの対象領域を含む個々のケースについて計算された地震動（例えば、最大速度、減衰定数5%の応答スペクトル等）について、距離減衰式との比較による検証を行い、それらの分布を示す地図を作成するとともに、全ケースの結果による「平均値」、「大きめ」の地震動分布を示す地図も作成した。

(b) 事業の成果

1) 震源モデルの設定

長期評価では相模トラフ沿いのマグニチュード8クラスの地震についての多様性が示されているが、本検討では1923年大正関東地震タイプの震源域（全国地震動予測地図2014年版のモデルにおける領域No.1および2）と1703年元禄関東地震タイプの震源域（同No.6および7）に対応する地震を計算の対象とする。長周期地震動の計算には、これらの震源域に対して設定した特性化震源モデルに、震源破壊過程の不均質性を付与した震源モデルを用いる（3.1参照）。

特性化震源モデルのアスペリティ配置および破壊開始点位置については、平成26年度ま

での検討に基づいて設定する（図 3-2-1：破壊開始点、図 3-2-2～図 3-2-5：アスペリティ配置）。このうち、No.7 の震源域については「浅部」の領域にもアスペリティを配置する。ただし「浅部」でのすべり速度関数は中村・宮武（2000）ではなく smoothed ramp 関数とする。また、これまでの検討ではアスペリティ面積を「中部」領域の 20%と設定していたが（アスペリティ配置 P、R）、2003 年十勝沖地震を対象とした検証（地震調査委員会強震動評価部会、2004）および平成 26 年度までの検討を踏まえて「中部」領域の 10%とする場合を追加している（アスペリティ配置 Q、T）。ケース数を表 3-2-1 に、震源パラメータを表 3-2-2 に示す。

震源破壊過程のランダム不均質性については、今年度実施した 2003 年十勝沖地震を対象とした検討を踏まえて、破壊伝播速度、すべり量およびすべり角の 3 つのパラメータに対して、関口・吉見（2006）によるマルチスケール不均質を付与することとした。不均質性は表 3-2-3 に示す範囲で、ケースごとに異なる乱数を用いて設定した。また、表 3-2-1 に示したうちの 1 つのケースについては、多数の乱数を用いて震源破壊過程の不均質性をモデル化し、計算される地震動のばらつきに関する統計的な性質の分析を行っている。

表 3-2-1 計算ケース数。

領域番号	1	2	6	7
アスペリティ配置	6	6	6	12
アスペリティ面積	2	2	2	2
破壊開始点位置	5	5	8	8
小計	60	60	96	192
合計	408			

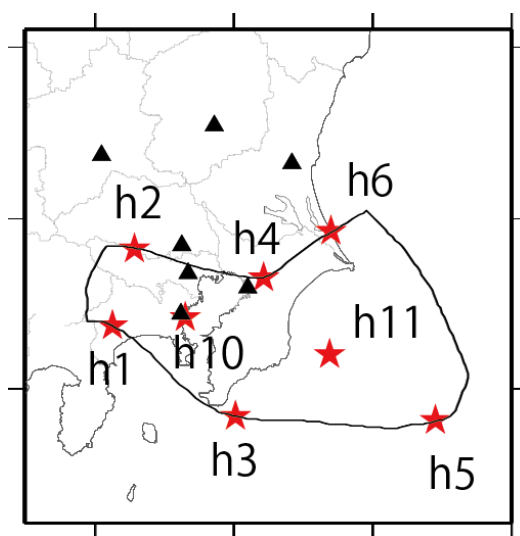


図 3-2-1 破壊開始点の位置（赤星印）。▲は都県庁の位置を示す。

Area-01

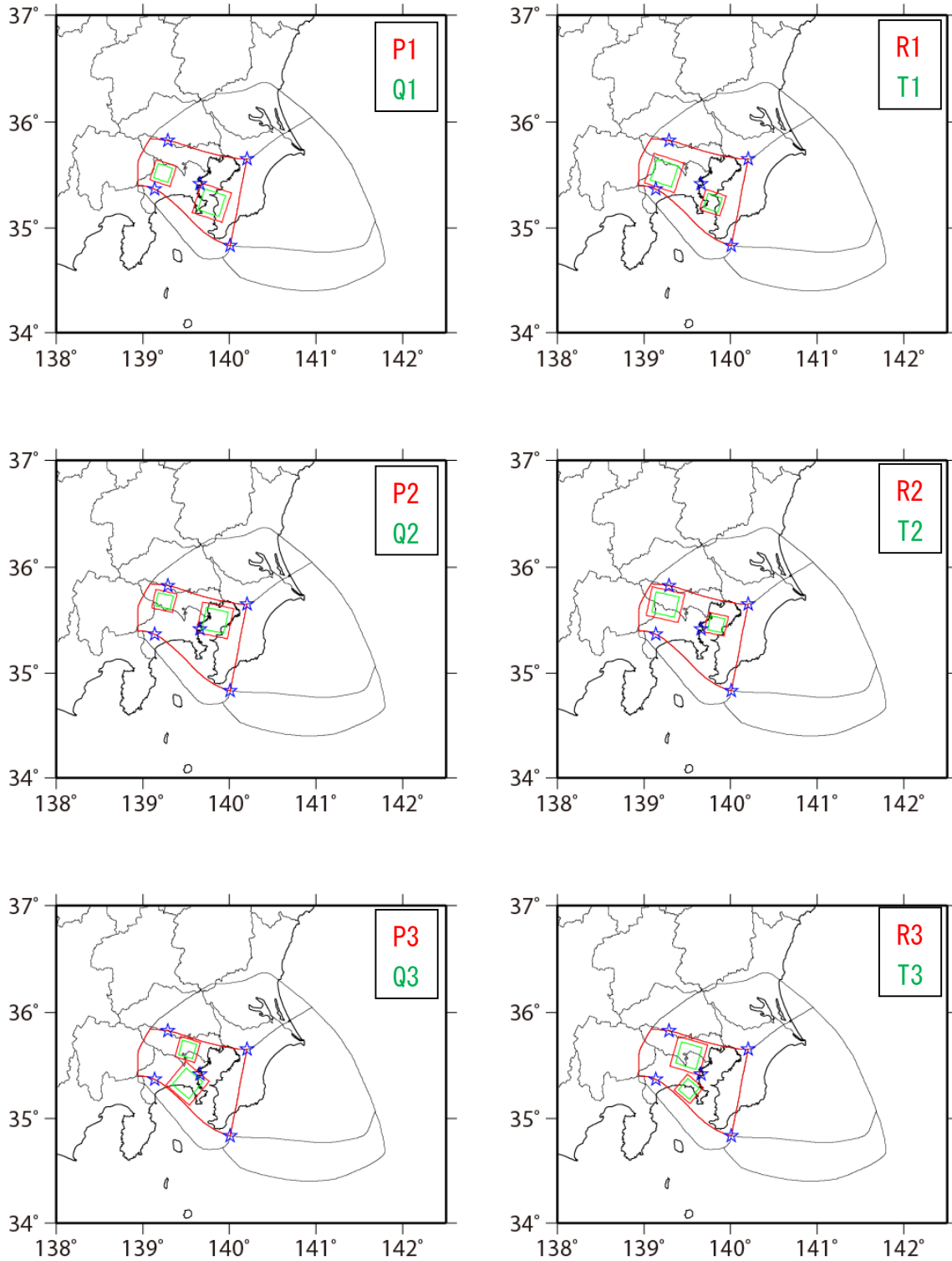


図 3-2-2 領域番号 1 における基本ケースのアスペリティ (赤および緑の矩形) と破壊開始点 (青星印)。アスペリティ配置の名称を図中に示している。

Area-02

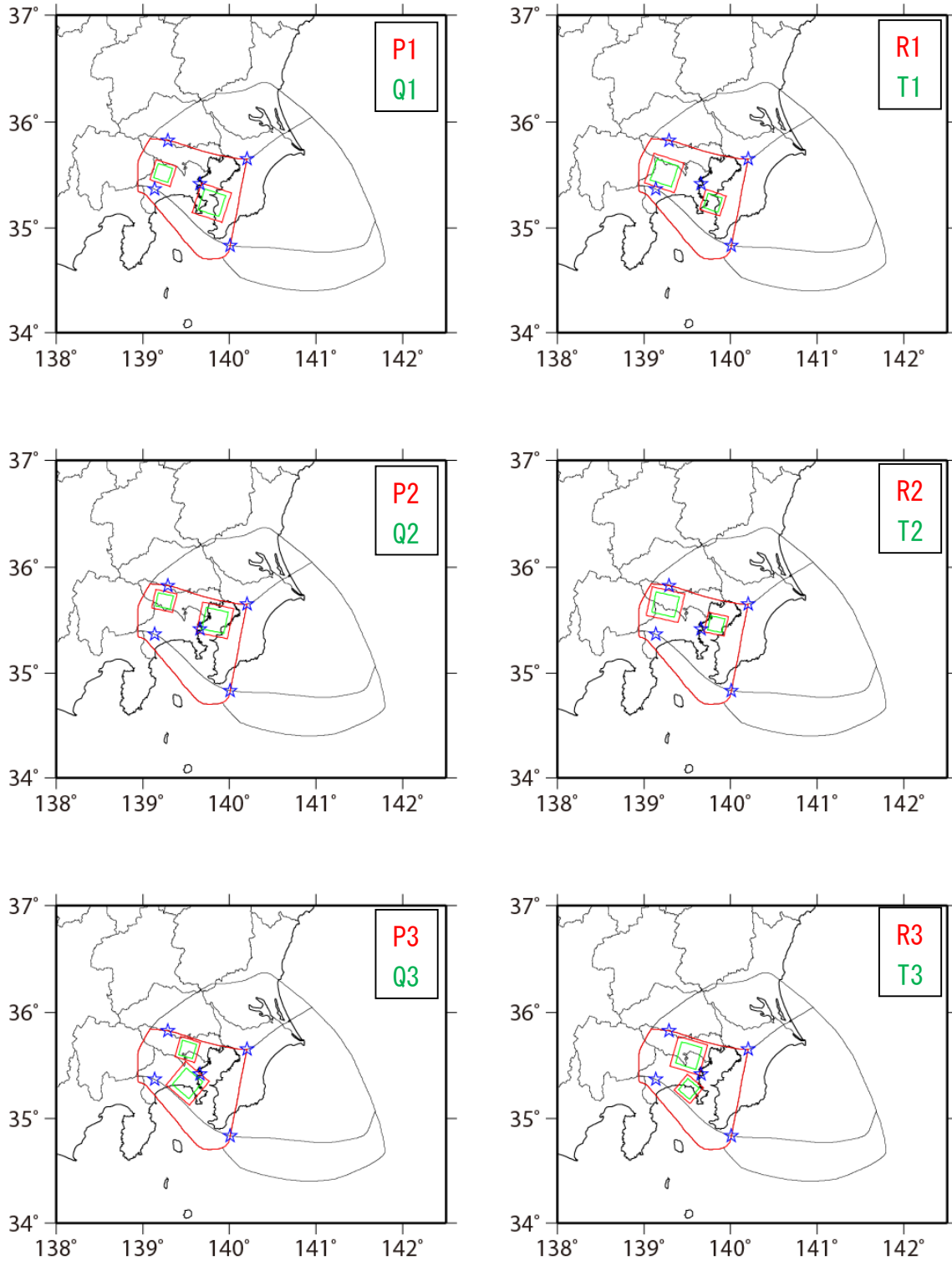


図 3-2-3 領域番号 2 における基本ケースのアスペリティ (赤および緑の矩形) と破壊開始点 (青の星印)。

Area-06

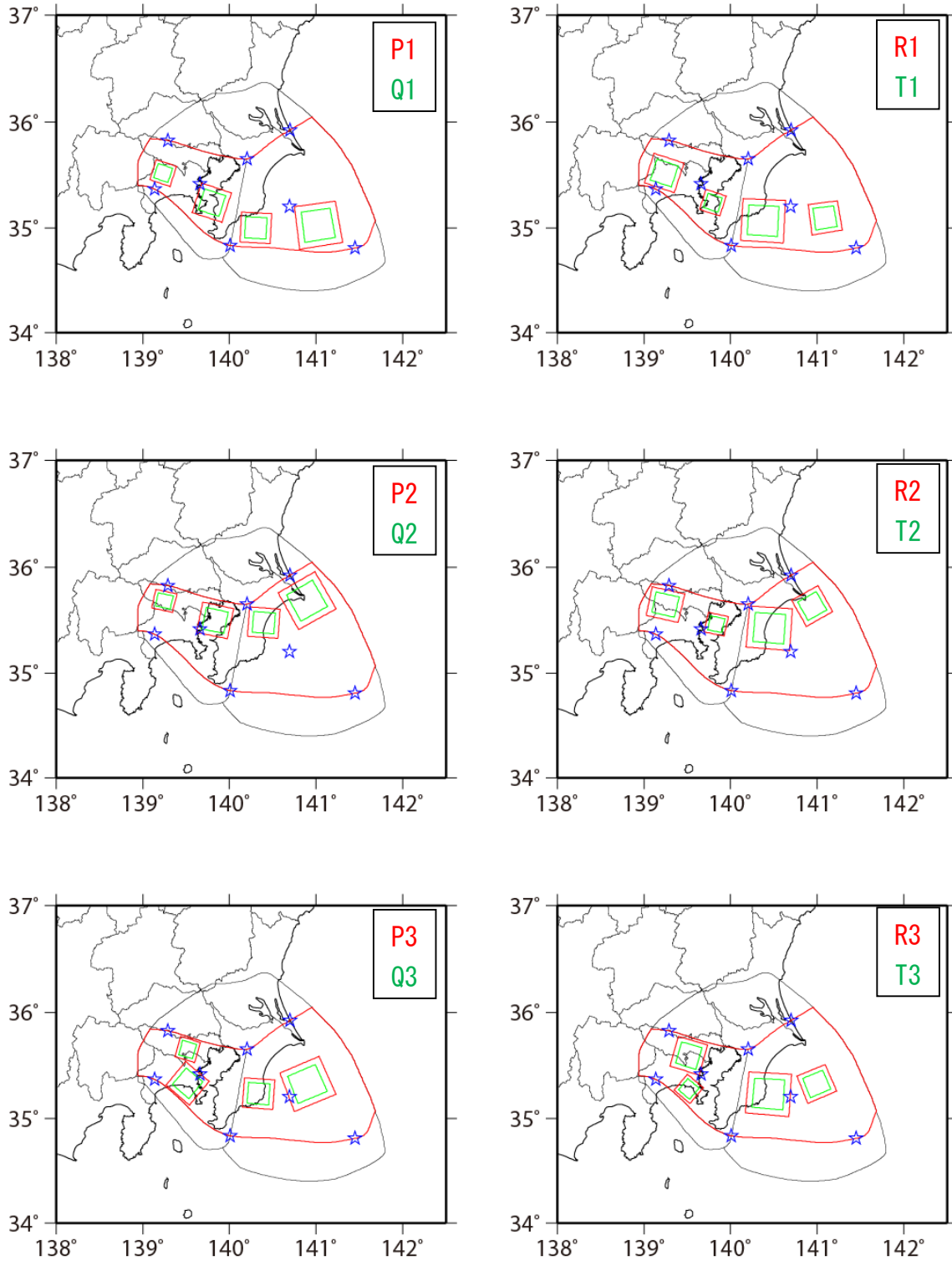


図 3-2-4 領域番号 6 における基本ケースのアスペリティ (赤および緑の矩形) と破壊開始点 (青の星印)。

Area-07

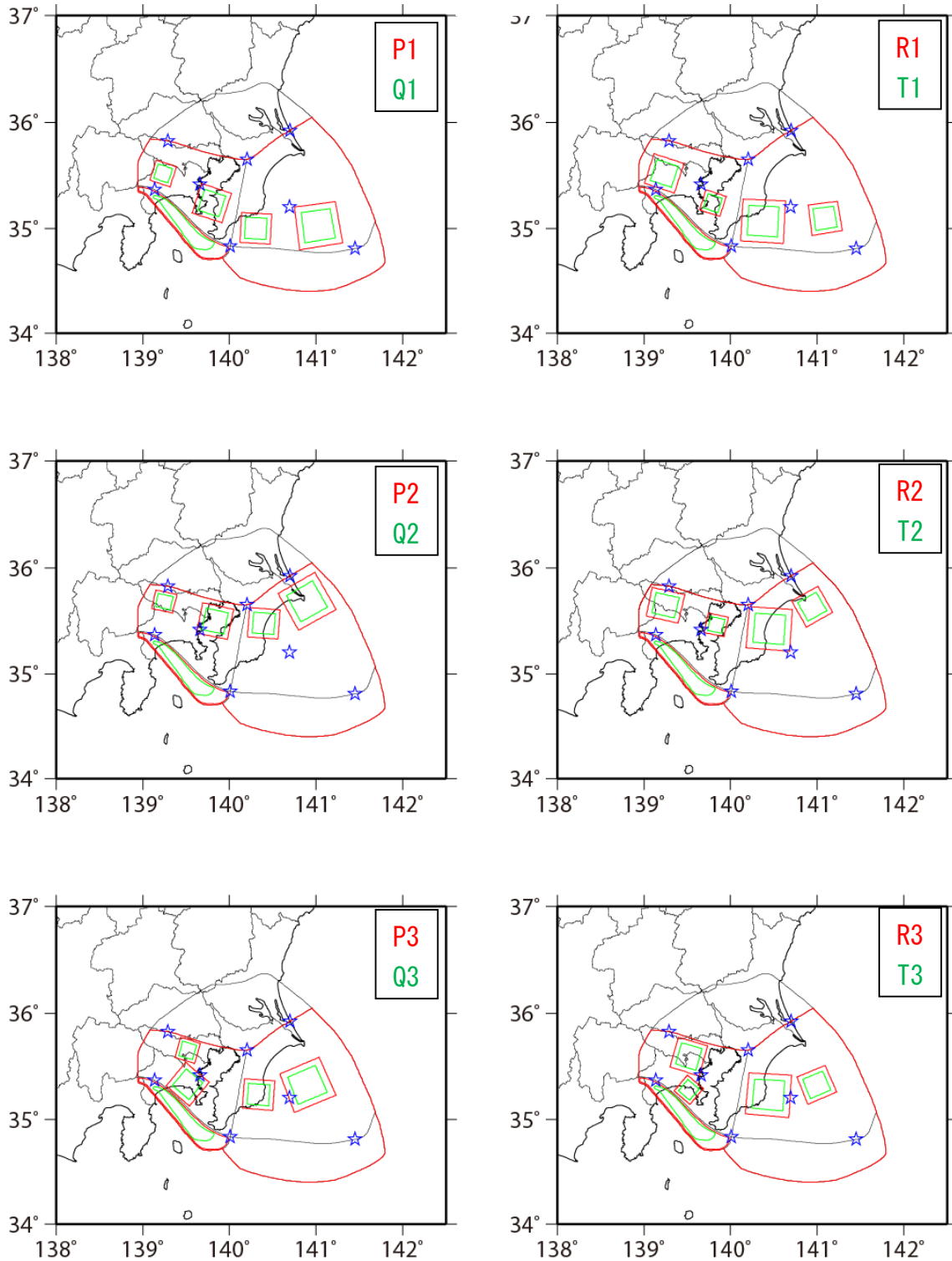


図 3-2-5a 領域番号 7 における基本ケースのアスペリティ（赤および緑の矩形等）と破壊開始点（青の星印）。大すべり域が西側のケース。

Area-07

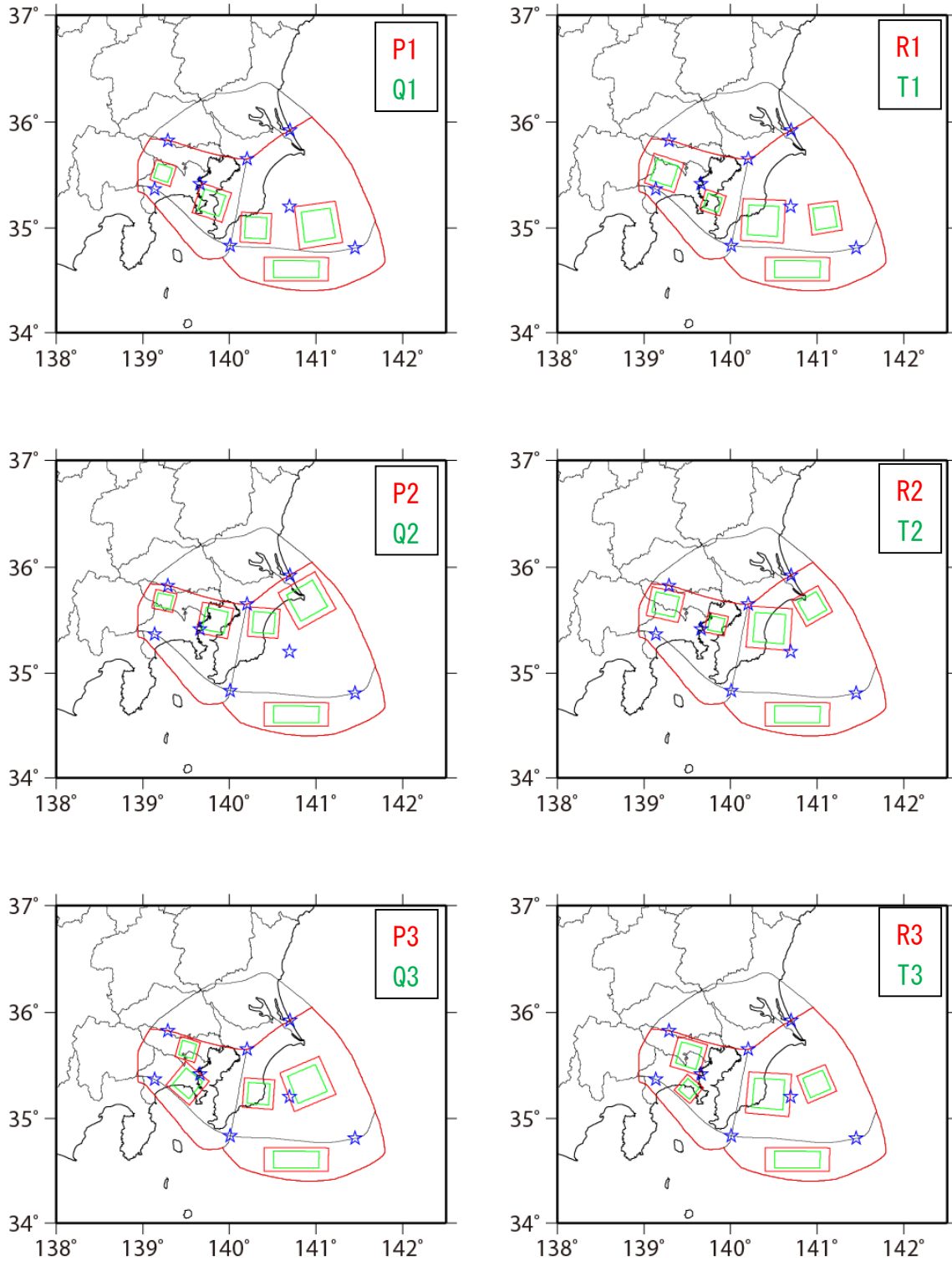


図 3-2-5b 領域番号 7 における基本ケースのアスペリティ（赤および緑の矩形）と破壊開始点（青の星印）。大すべり域が東側のケース。

表 3-2-2 震源パラメーター一覧。

領域番号		1		2		6		7	
アスペリティ配置		P, R	Q, T	P, R	Q, T	P, R	Q, T	P, R	Q, T
断層面積 [km ²]		7950		9990		23200		31500	
地震モーメント [Nm]		8.7E+20		1.2E+21		4.4E+21		6.9E+21	
Mw		7.9		8.0		8.4		8.5	
平均すべり量 [m]		2.7		3.8		4.6		5.4	
静的応力降下量 [MPa]		3.0		3.0		3.0		3.0	
破壊伝播速度 [km/s]		2.7		2.7		2.7		2.7	
ア ス ペ リ テ イ	面積 [km ²]	1100	550	1100	550	1100	550	1100	550
	すべり量 [m]	6.7	6.7	7.5	7.5	9.2	9.2	10.4	10.4
	実効応力 [MPa]	14.8	29.7	18.6	37.2	14.8	29.7	14.8	29.8
	面積 [km ²]	510	250	510	250	510	250	510	250
	すべり量 [m]	4.5	4.5	5.1	5.1	6.2	6.2	7.0	7.0
	実効応力 [MPa]	14.8	29.7	18.6	37.2	14.8	29.7	14.8	29.8
	面積 [km ²]	—	—	—	—	2020	1010	2020	1010
	すべり量 [m]	—	—	—	—	12.4	12.4	14.0	14.0
	実効応力 [MPa]	—	—	—	—	14.9	29.8	14.8	29.8
	面積 [km ²]	—	—	—	—	1030	510	1030	520
	すべり量 [m]	—	—	—	—	8.9	8.9	10.1	10.1
	実効応力 [MPa]	—	—	—	—	14.9	29.8	14.8	29.8
	面積 [km ²]	—	—	—	—	—	—	1700	850
	すべり量 [m]	—	—	—	—	—	—	12.9	12.9
	実効応力 [MPa]	—	—	—	—	—	—	14.8	29.8
背 景	面積 [km ²]	6340	7150	8370	9180	18540	20870	25140	28320
	すべり量 [m]	1.9	2.4	4.2	2.7	3.2	4.0	3.8	4.7
	実効応力 [MPa]	2.2	3.9	1.2	4.5	1.6	2.9	1.4	2.5

※破壊伝播速度、すべり量については、不均質性（ゆらぎ）を考慮する基準の値

表 3-2-3 震源破壊過程の不均質性の考慮。

パラメータ	考慮するゆらぎの範囲
すべり量の不均質性	$\pm 0.5D_{ave}$
破壊伝播速度の不均質性	$\pm 0.4 \text{ km/s}$
すべり角の不均質性	$\pm 45^\circ$

2) 長周期地震動の計算概要

長周期地震動の計算には3次元差分法（GMS：青井・他、2004）を用いる。計算に用いる浅部・深部統合地盤モデルでは工学的基盤以浅の浅部地盤がモデル化されているが、計算では浅部地盤の強震時の挙動（非線形性）を適切に評価することが難しいことや、浅部・深部統合地盤モデルでは既往のモデルに比べ工学的基盤面が適切に設定されていると考えられることから、浅部地盤をはぎ取った解放工学的基盤（ $V_s=350\text{m/s}$ 層）上での地震動評価を行うこととした。表3-2-4の格子間隔で速度構造をモデル化し、400秒間の地震動計算を行っている。解析周期帯は周期2秒以上である。

計算は、防災科学技術研究所の（スーパーコンピューター）および東京工業大学のTSUBAMEにて実施した。

表 3-2-4 差分法による計算の概要。

速度構造モデル（浅部・深部統合地盤モデル）		
格子数	第1領域	3,525×3,177×151
	第2領域	1,175×1,059×617
格子間隔	第1領域	100m（水平）、50m（鉛直）
	第2領域	300m（水平）、150m（鉛直）
計算条件		
時間間隔（秒）		0.0041667（=240Hz）
タイムステップ数		96,000（=400秒）

3) 計算結果

図3-2-6に、関東地方1都6県（千葉県、群馬県、茨城県、神奈川県、埼玉県、栃木県、東京都）の都県庁位置での速度応答スペクトルを示す。本資料では、4つの震源域（No1, 2, 6, 7）ごとに結果をまとめて示している。大正型（No1, 2）については、神奈川県庁では100cm/s超のケースが多くみられるが、他の地点では概ね100cm/s以下となっている。元禄型（No6, 7）については、震源域からやや離れた茨城県庁、栃木県庁では100cm/s以下となっているが、その他の地点では100cm/sを超えるケースが多くみられ、200cm/sを超えるものも数ケースある。

これら7地点における最大速度と速度応答の分布（ヒストグラム）を図3-2-7に示す。同図では、震源域毎のヒストグラムと、全ケースについてのヒストグラムを、それぞれ別の色付けで示している。全ケースについては震源域毎の色分けとなっており、震源域の大きなものほど振幅レベルが大きいことがわかる。一方、震源域毎のヒストグラムは破壊開始点により色分けしている（大正型は5色、元禄型は8色）。破壊開始点による影響は、観測

点との位置関係によって異なると考えられる。例えば、群馬県庁、茨城県庁、埼玉県庁、栃木県庁では h2（黄色）のケースでは振幅が小さい傾向にあるが、千葉県庁や神奈川県庁では逆に振幅が大きくなっている。ただし、元禄型の場合に h5（青色）のケースで系統的に振幅が大きくなる傾向がみられる。h5 はもっとも陸から離れた地点に位置しており、いずれの地点に対しても forward directivity の効果が表れるためと考えられる。また、現在設定しているシナリオ群による最大振幅値は対数正規分布に近い分布を示しており、分布から大きく外れるケースも見られず連続した分布となっていることがわかる。

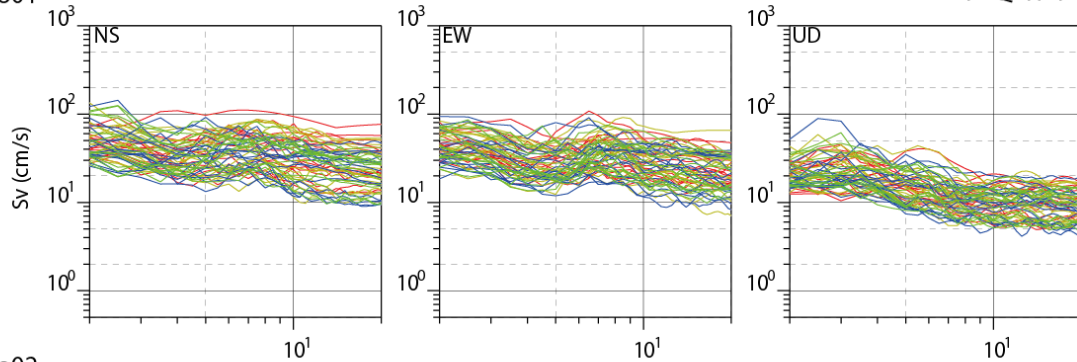
図 3-2-8 に、4 つの震源域毎に求めた速度応答スペクトル（周期 2、3、5、7、10 秒；減衰 5%）の平均値と平均値+1 σ の空間分布を示す。地点毎の速度応答値については、これまでの試作版と同様に、水平 2 成分のうち値の大きなものを用いている。No1 では、平均でほぼ 100cm/s 以下、平均+ σ で 150 以上の地点がみられるが、No2 では平均でも 150cm/s を超える地点がみられる。また、No1、2 では短周期帯ほど平均+ σ が大きい傾向にある。一方、元禄型（No6, 7）では、周期 7 秒、10 秒で平均+ σ が 200cm/s を超える領域が広く分布している。No6, 7 は No1, 2 と比べ震源域が東側に広がっており、その領域内には大きなアスペリティが配置されていることもあり、長周期帯域でばらつき（ σ ）が大きくなっていると考えられる。

本検討では、シナリオ毎に異なる乱数を用いて不均質性を付与しているため、各シナリオが不均質性の影響をどのように受けているかを直接示すことができない。そこで、大正関東地震に相当する（No1、P1、h1）の特性化震源モデルに対して 20 通りの不均質を付加した震源モデルを用いた計算結果のばらつきについて検討した。先の 7 地点の速度応答スペクトルを図 3-2-9 に示す。赤線が 20 ケースの不均質モデルの結果、黒線は不均質性を付加する前の特性化震源モデルによる結果である。不均質性は主に短周期帯域に影響を及ぼしていると考えているが、図 3-2-9 では地点毎のばらつきはあるものの、おおむね想定した通りの効果が表れている。図 3-2-10 には 20 ケースの平均値と平均+ σ を示しているが、短周期帯域ほどばらつき（ σ ）は大きくなっている。また、同図には不均質モデルと均質モデルの最大振幅値の比の平均も示しており、短周期帯ほど不均質性により振幅が大きくなっていることがわかる。本検討による多くのケースの結果をまとめて評価を行うことで、図 3-2-9 および図 3-2-10 に示した不均質性の影響が含まれた評価となると考えられる。

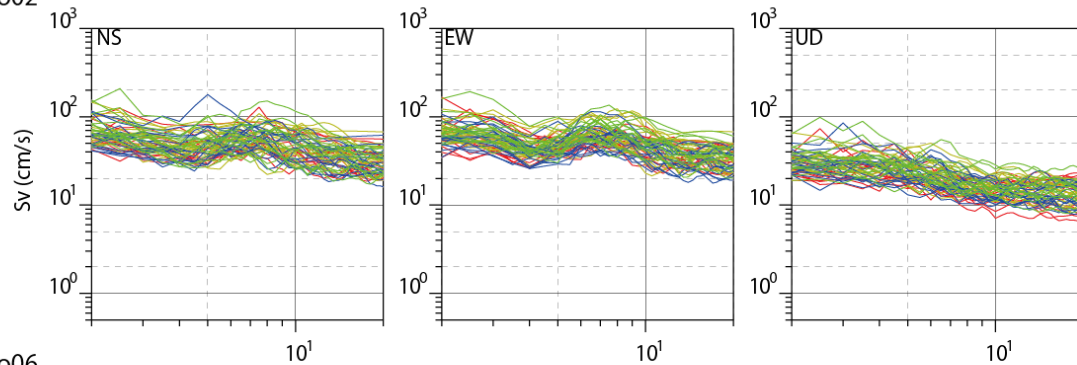
以上は、基本的にはレシピによる平均的なパラメータ設定の範囲内でのばらつき評価である。ここでは、さらにアスペリティの実効応力のみを 2 倍に変えたモデルを設定し、その影響について検討した。対象とした震源モデルは、（No1、P1）で破壊開始点を h1, 2, 3, 4, 10 とした 5 ケースである。これら 5 ケースについて、実効応力を変えないモデルとの振幅比の平均値の空間分布を図 3-2-11 に示す。空間的な変化は小さいものの、短周期帯域ほど影響が強く表れている。本検討では、すべてのアスペリティの実効応力を一律 2 倍しているが、実際の地震ではアスペリティごとの実効応力がばらつくことも考えられ、その場合の影響についての検討も重要である。

千葉県庁

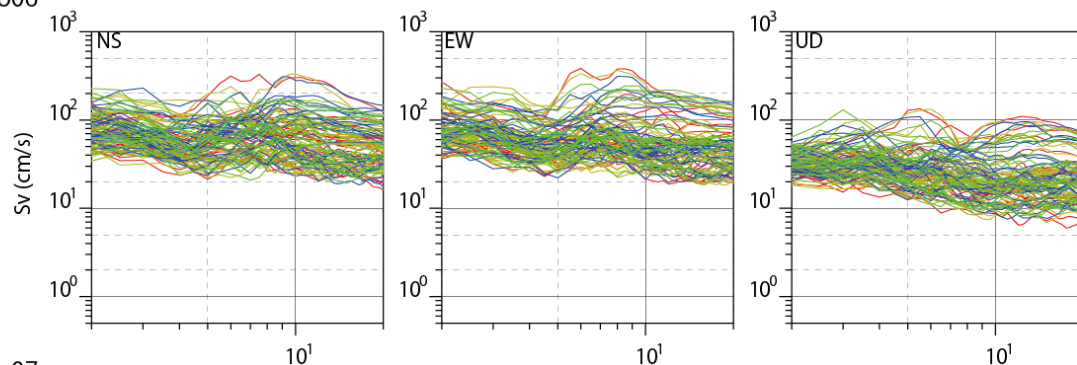
No01



No02



No06



No07

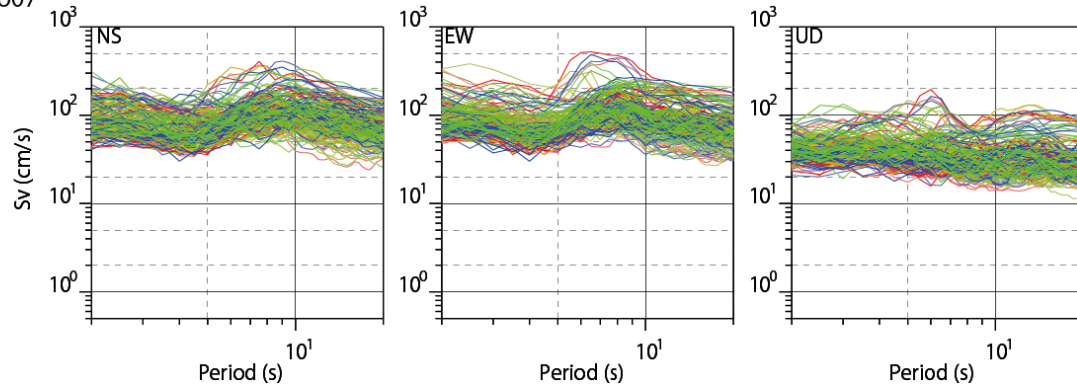
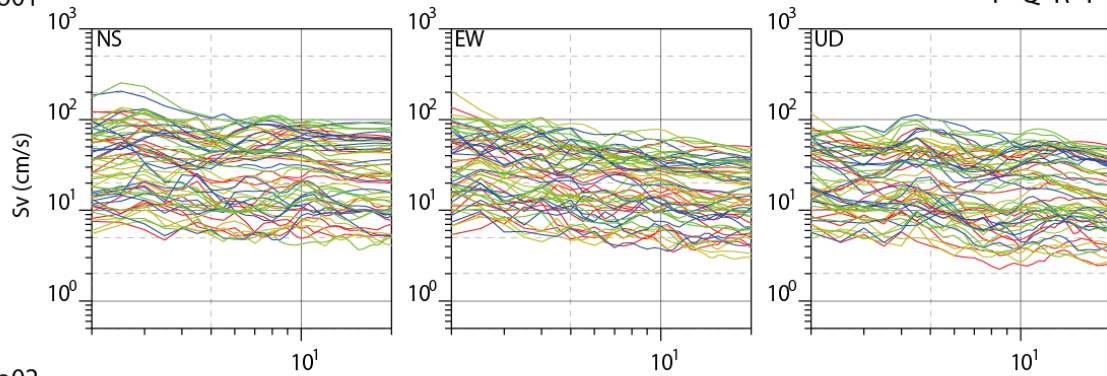


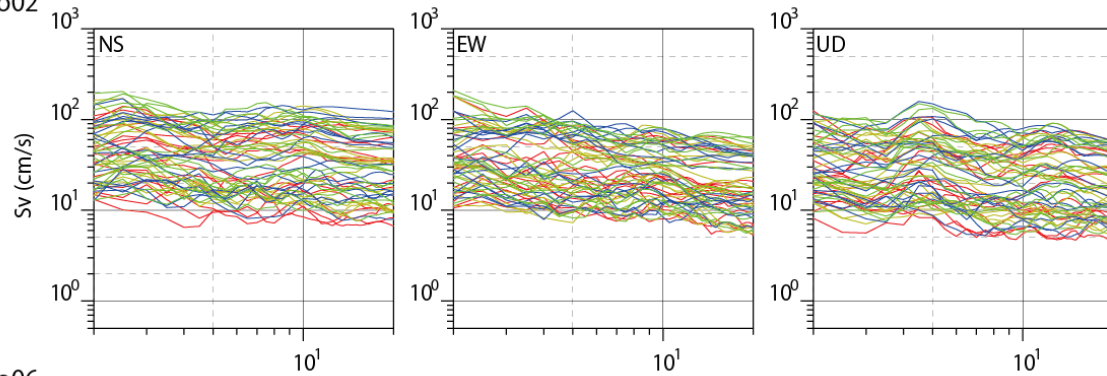
図 3-2-6 4つの震源域に対する速度応答スペクトル（減衰5%）。千葉県庁位置での結果。スペクトルの色はアスペリティ配置に対応している（右上に凡例）。

群馬県庁

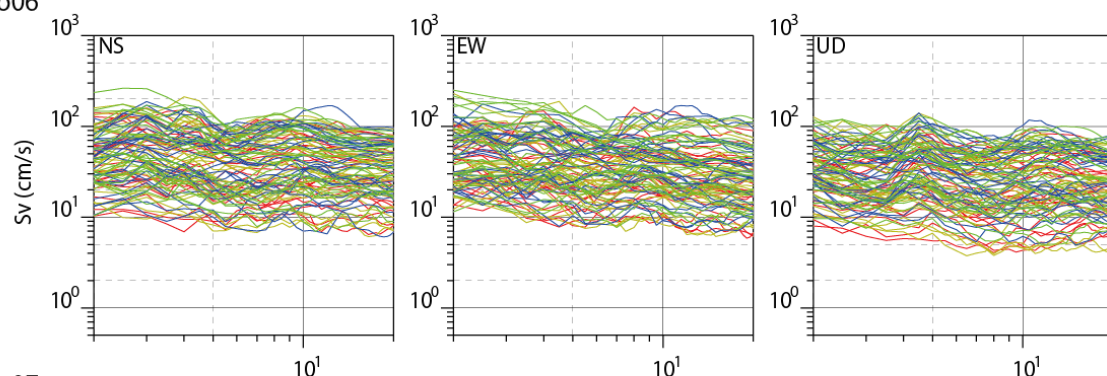
No01



No02



No06



No07

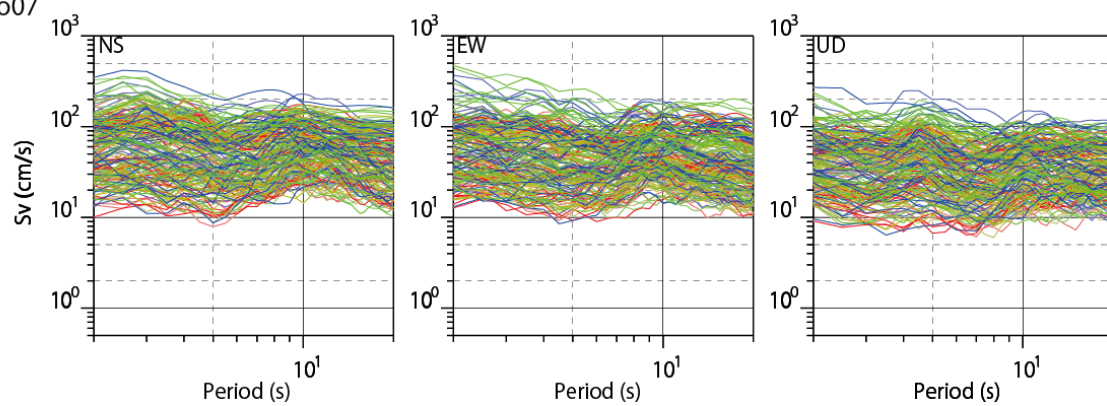
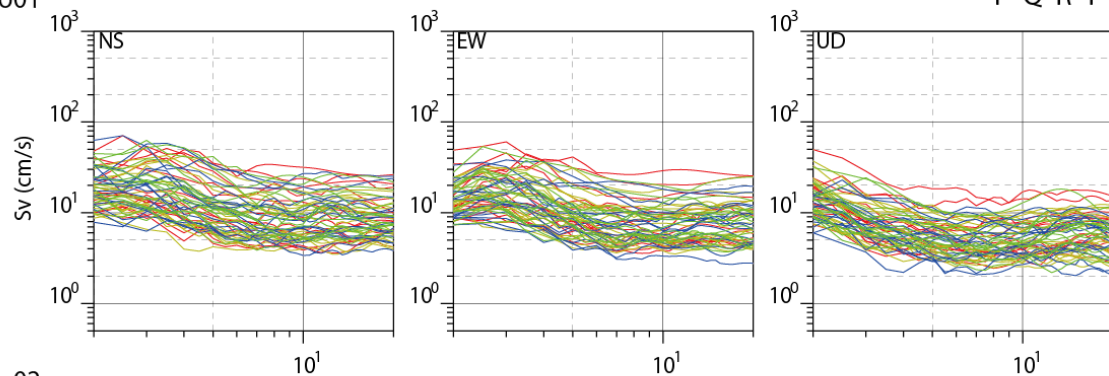


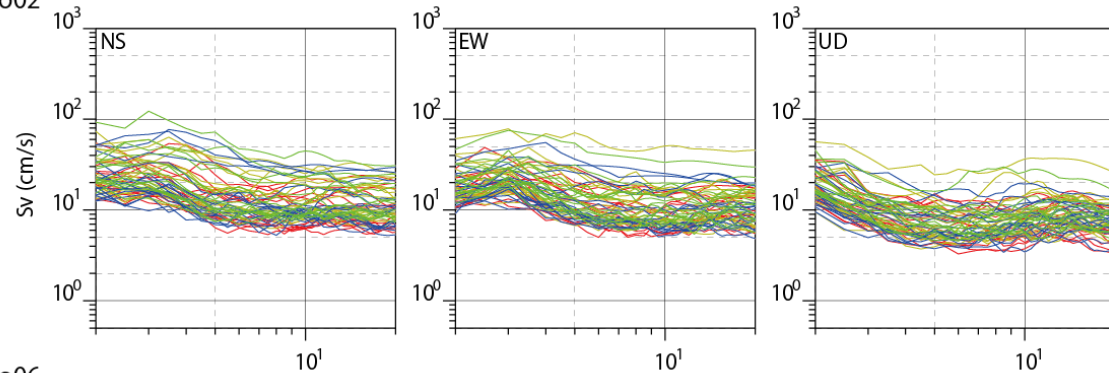
図 3-2-6 つづき。群馬県庁位置での結果。

茨城県庁

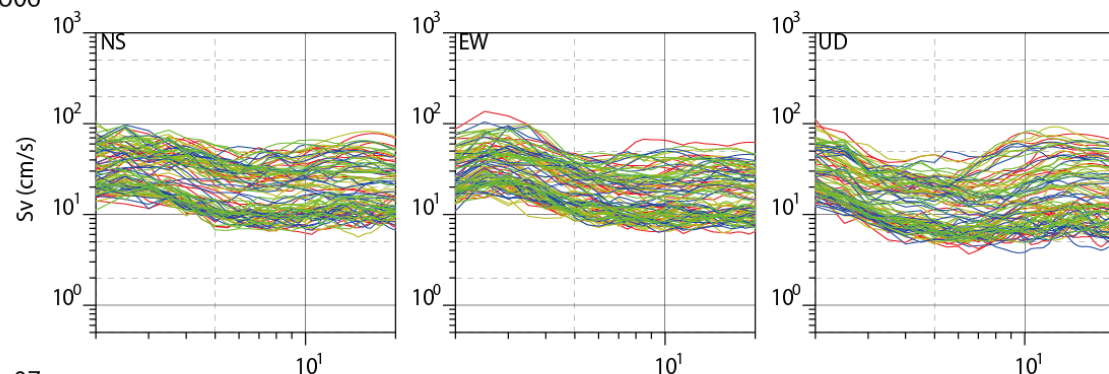
No01



No02



No06



No07

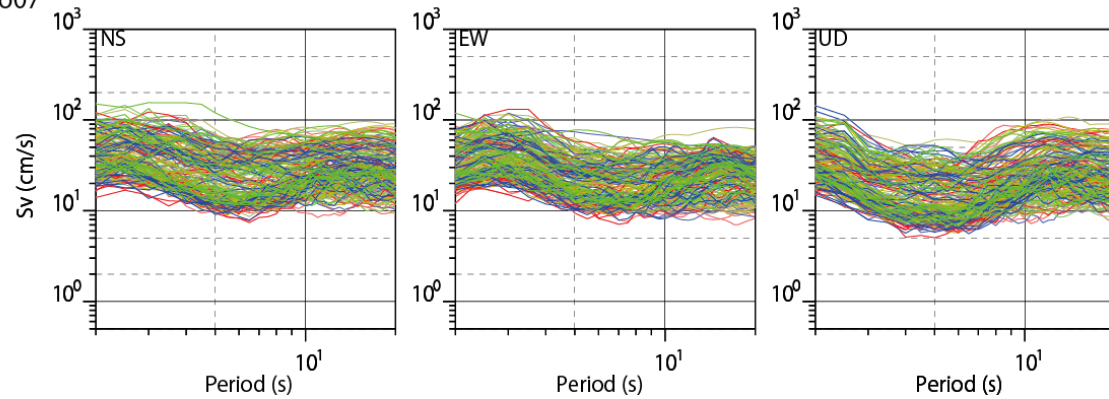
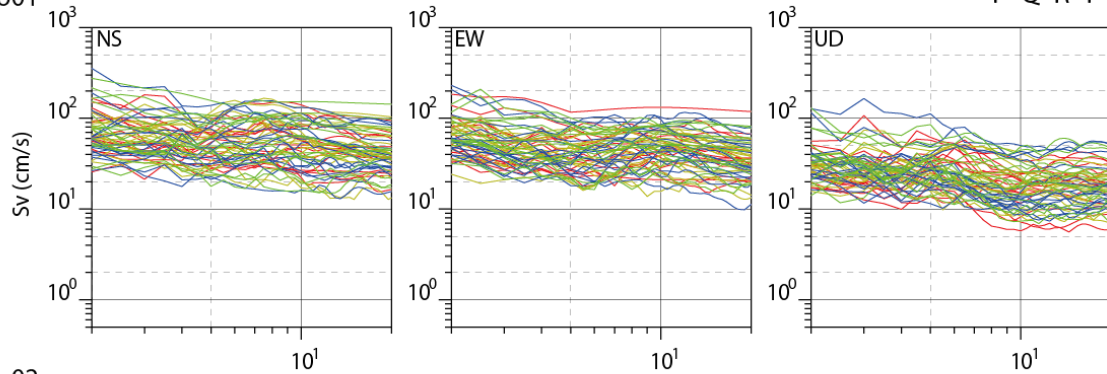


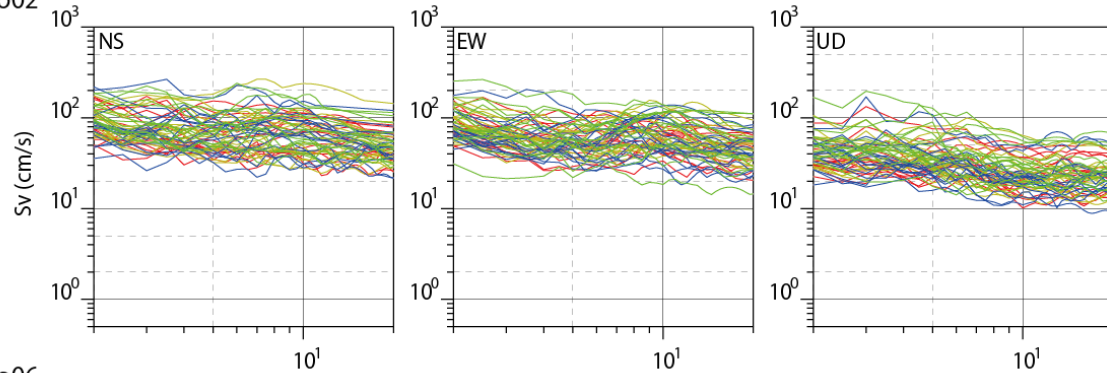
図 3-2-6 つづき。茨城県庁位置での結果。

神奈川県庁

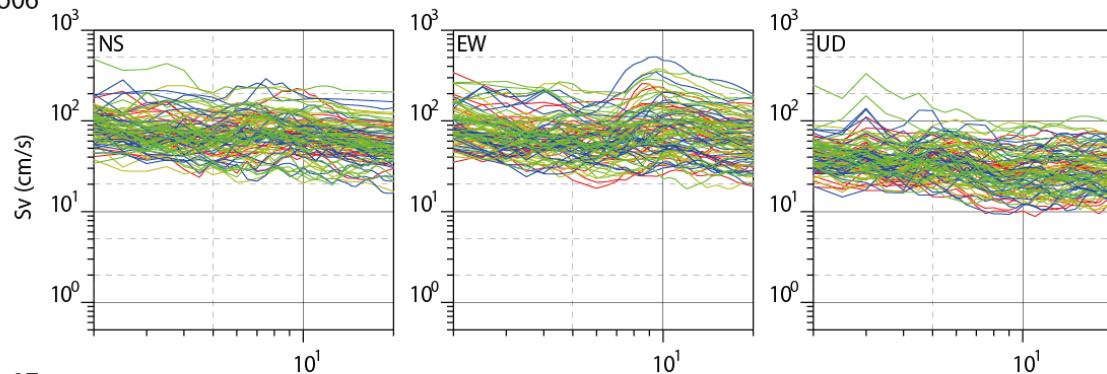
No01



No02



No06



No07

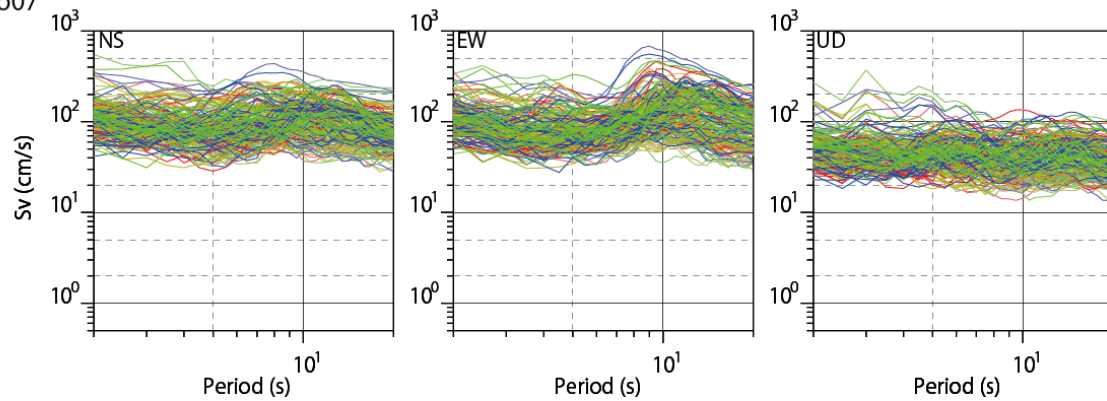
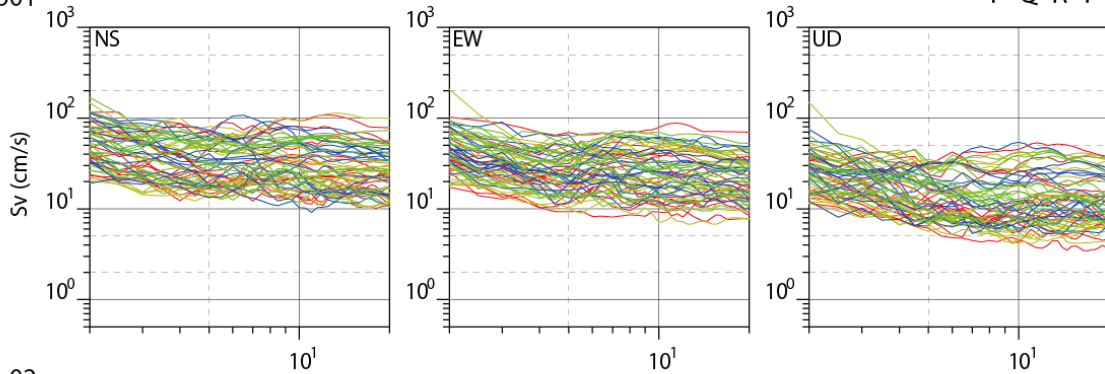


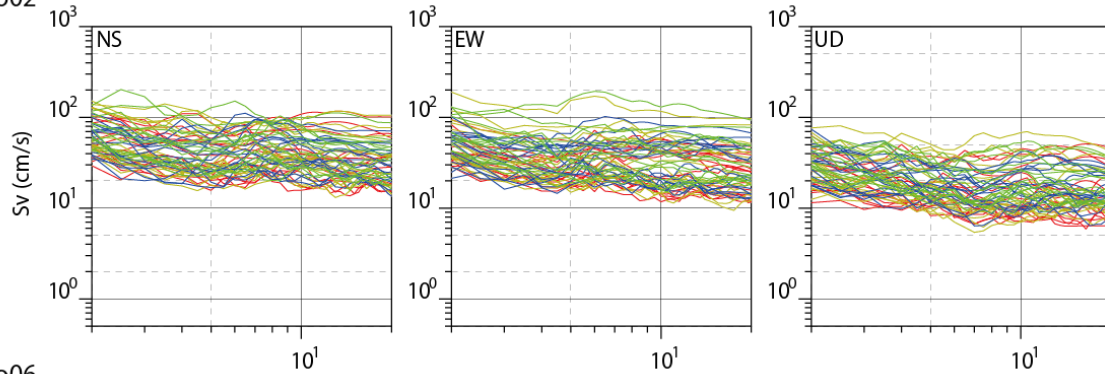
図 3-2-6 つづき。神奈川県庁位置での結果。

埼玉県庁

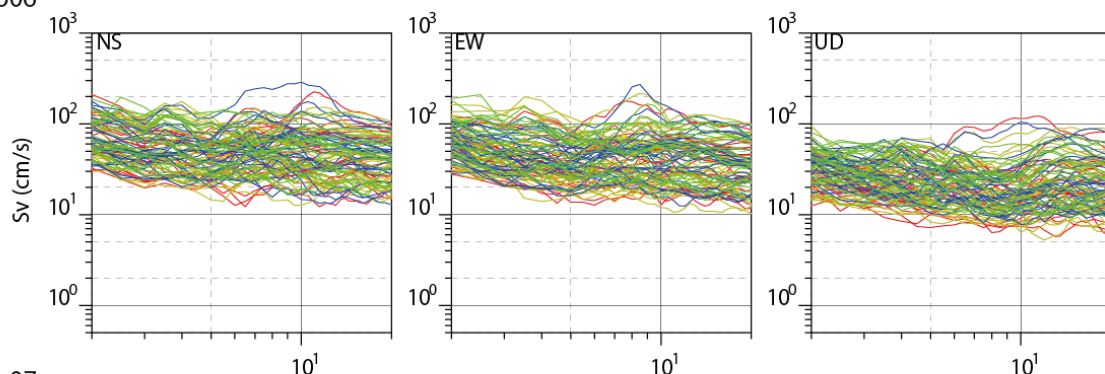
No01



No02



No06



No07

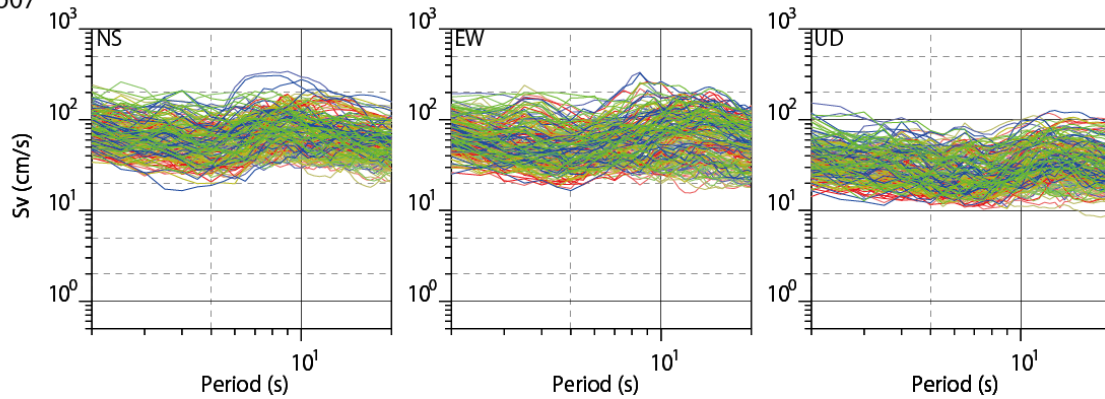
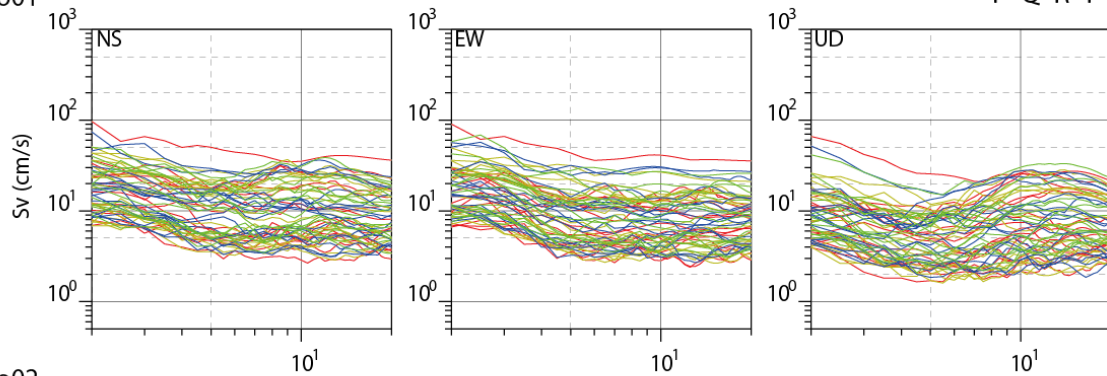


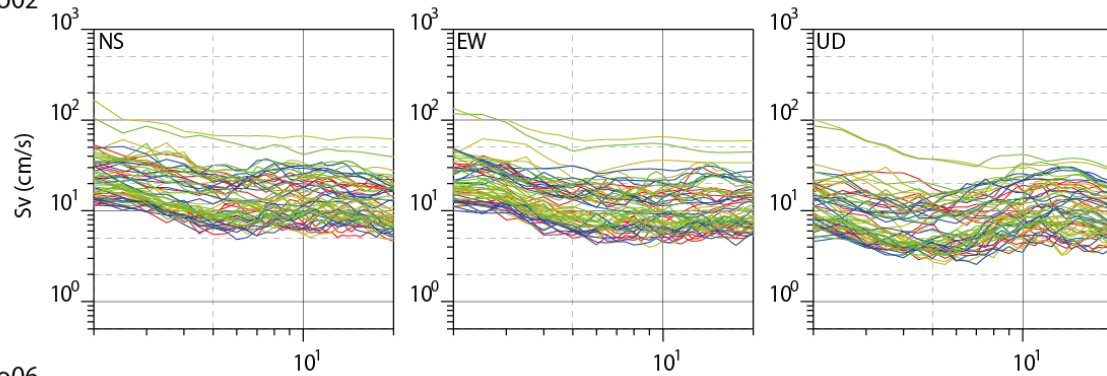
図 3-2-6 つづき。埼玉県庁位置での結果。

栃木県庁

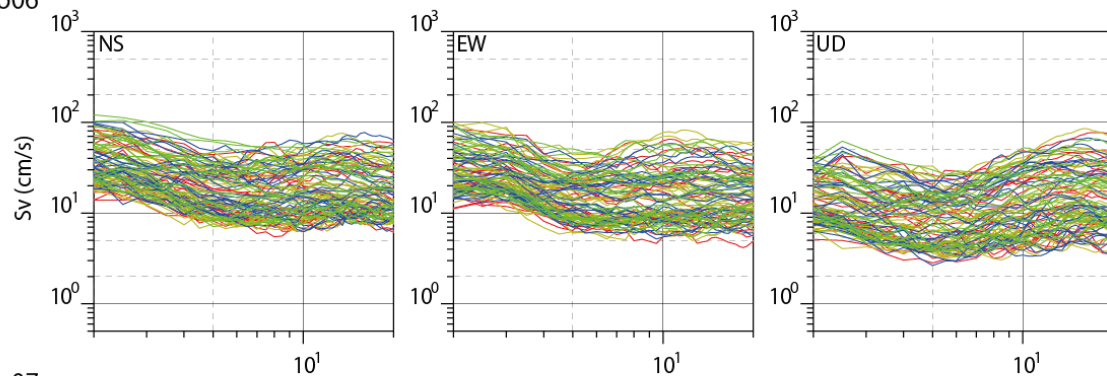
No01



No02



No06



No07

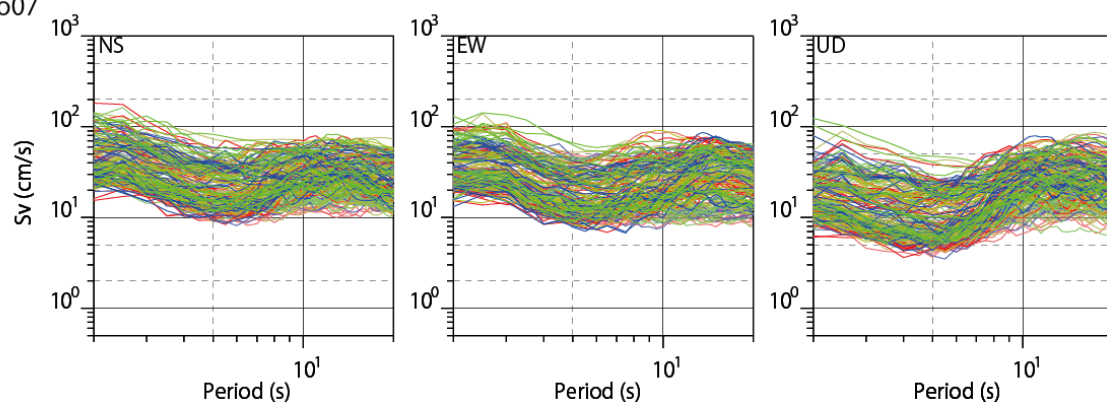
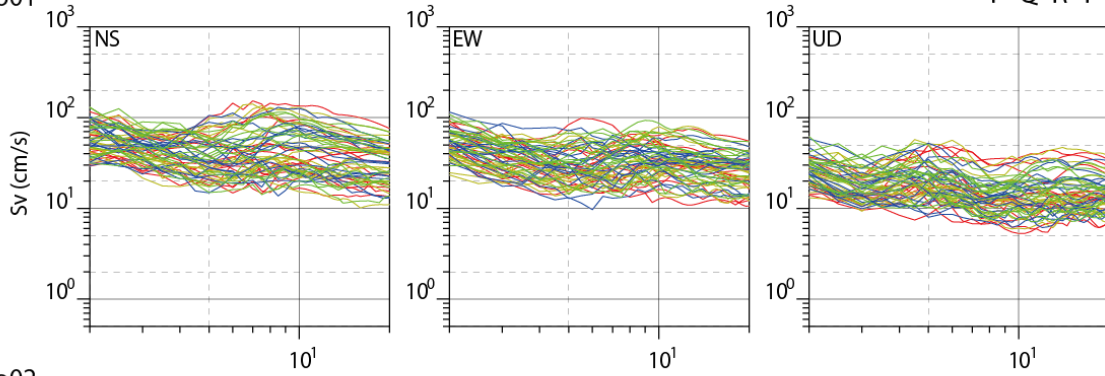


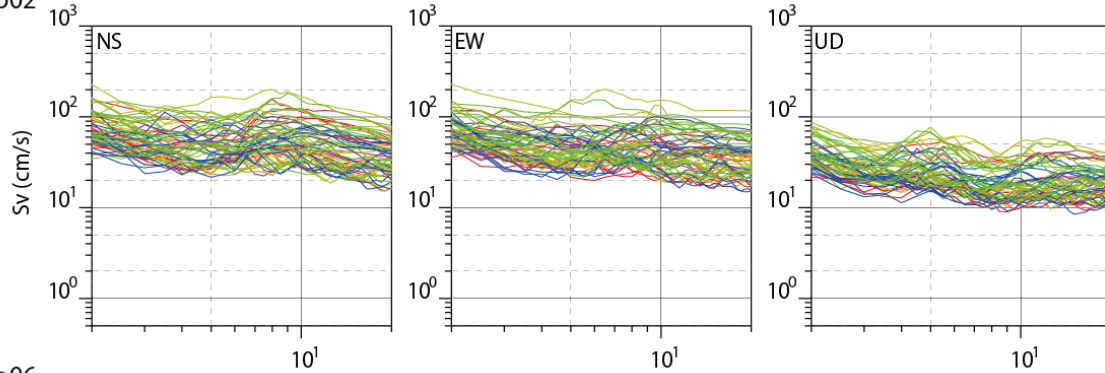
図 3-2-6 つづき。栃木県庁位置での結果。

東京都庁

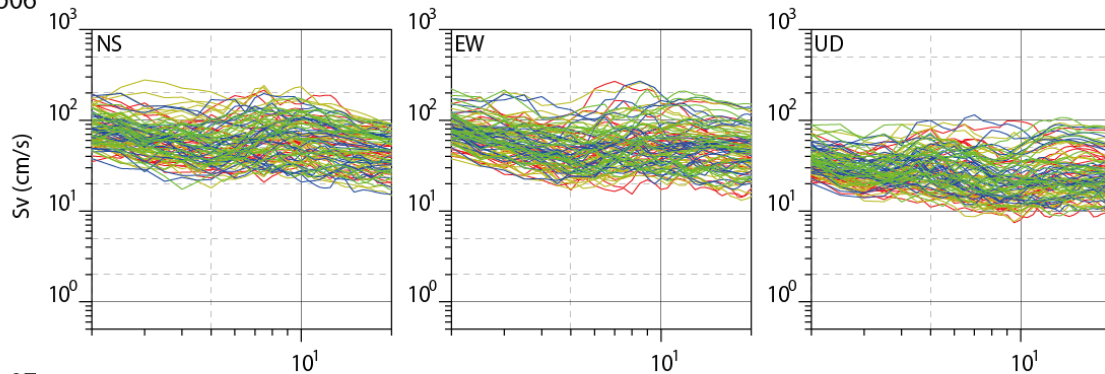
No01



No02



No06



No07

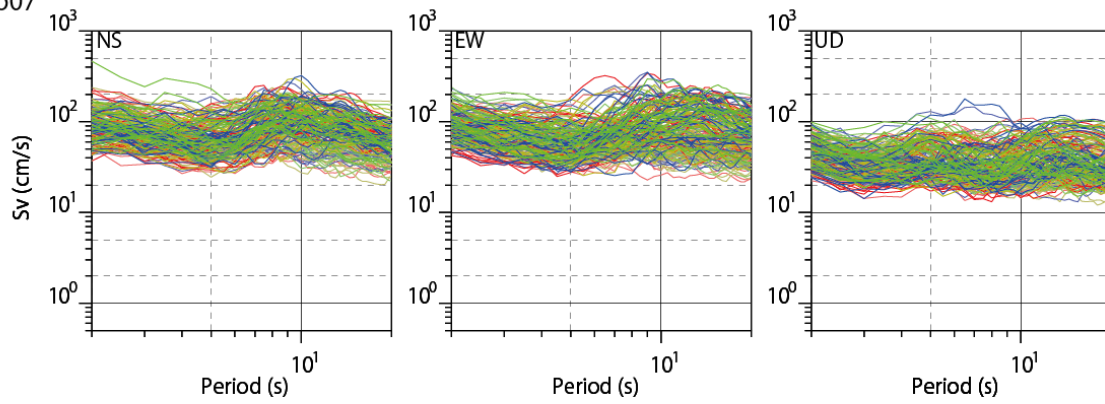


図 3-2-6 つづき。東京都庁位置での結果。

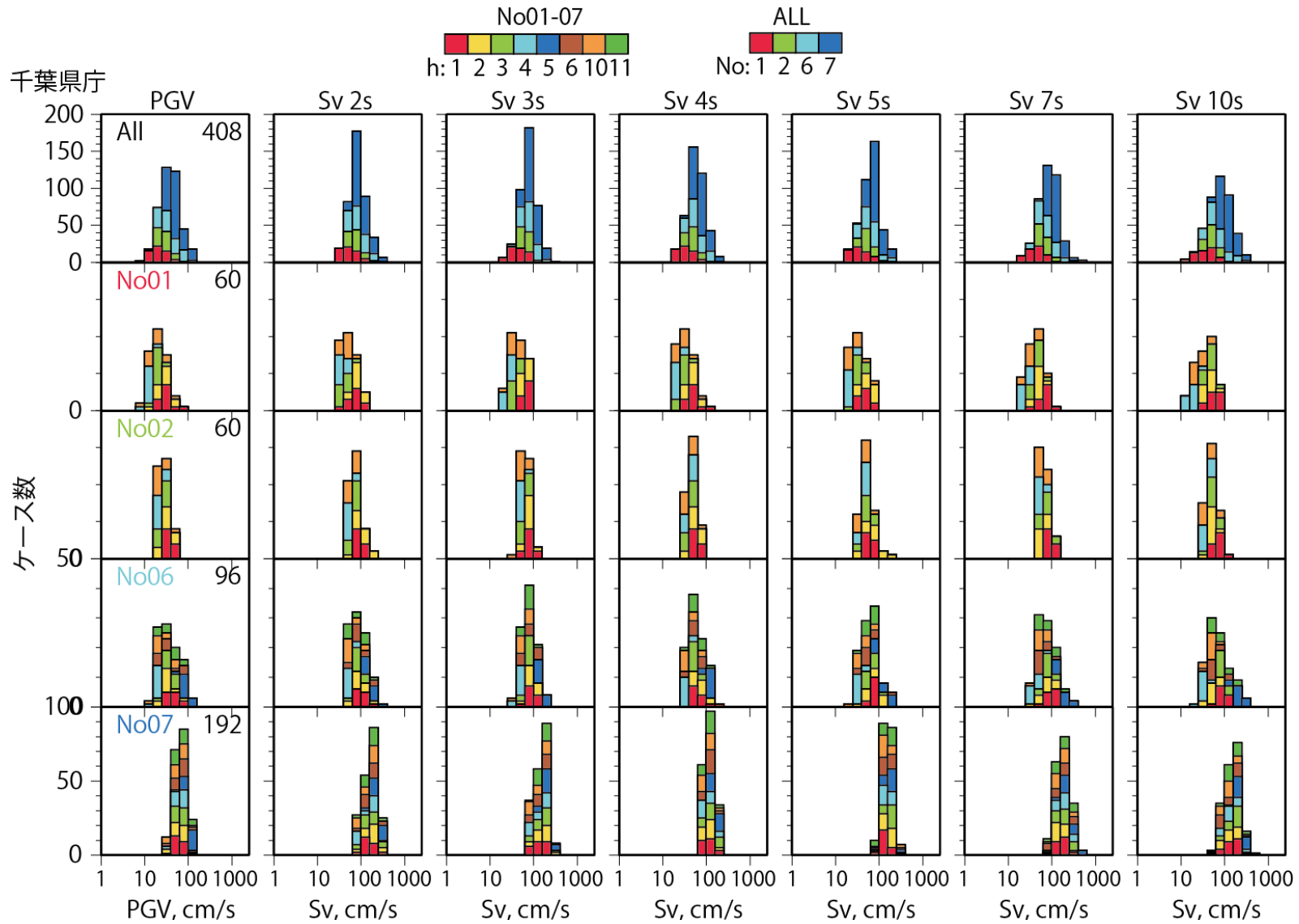


図 3-2-7 千葉県庁位置での PGV と速度応答（水平 2 成分の最大値）のヒストグラム。上段の全ケースのヒストグラムは震源域により色分けしている。その他の各震源域に対するヒストグラムは破壊開始点により色分けしている。

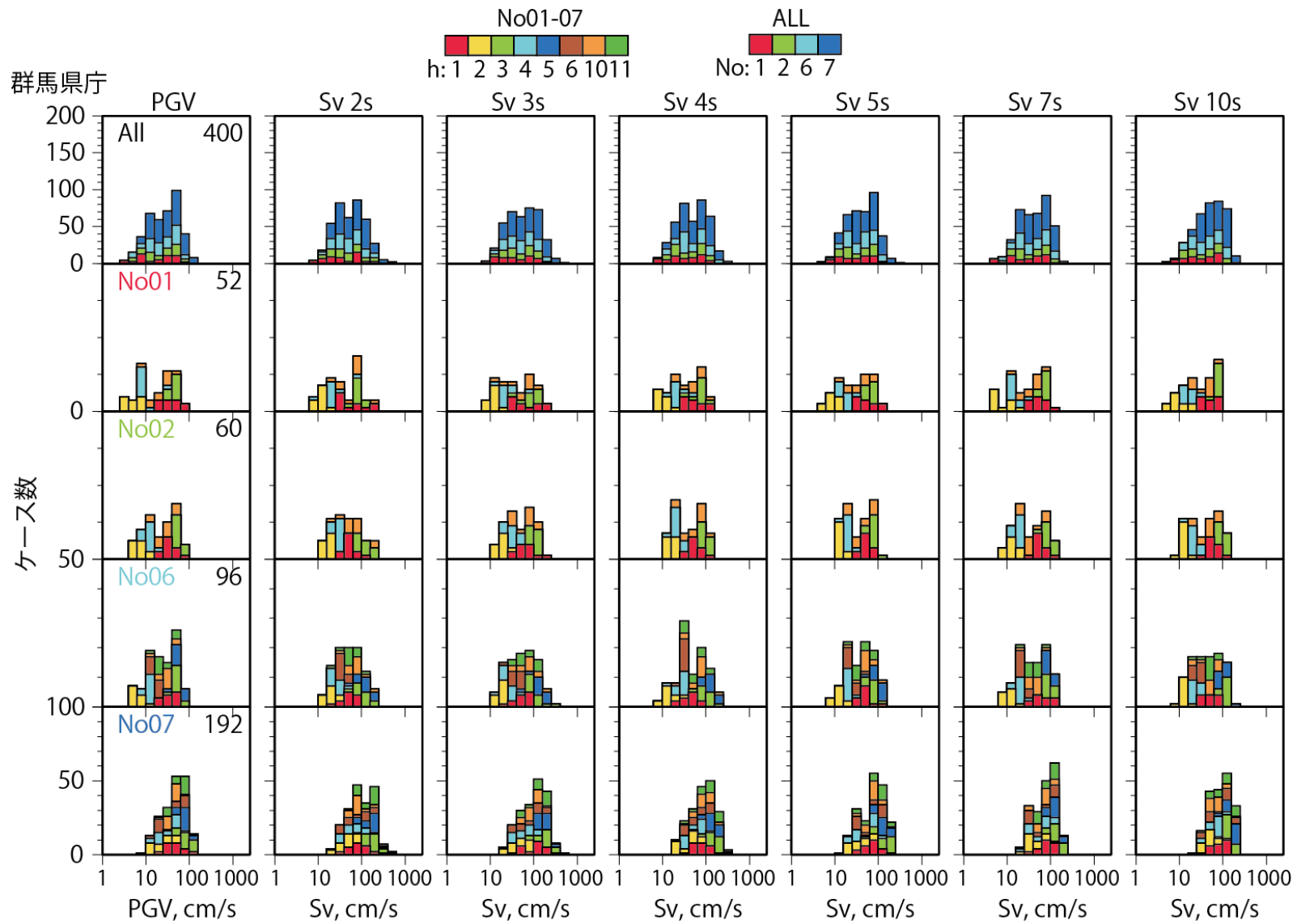


図 3-2-7 つづき。群馬県庁位置での結果。

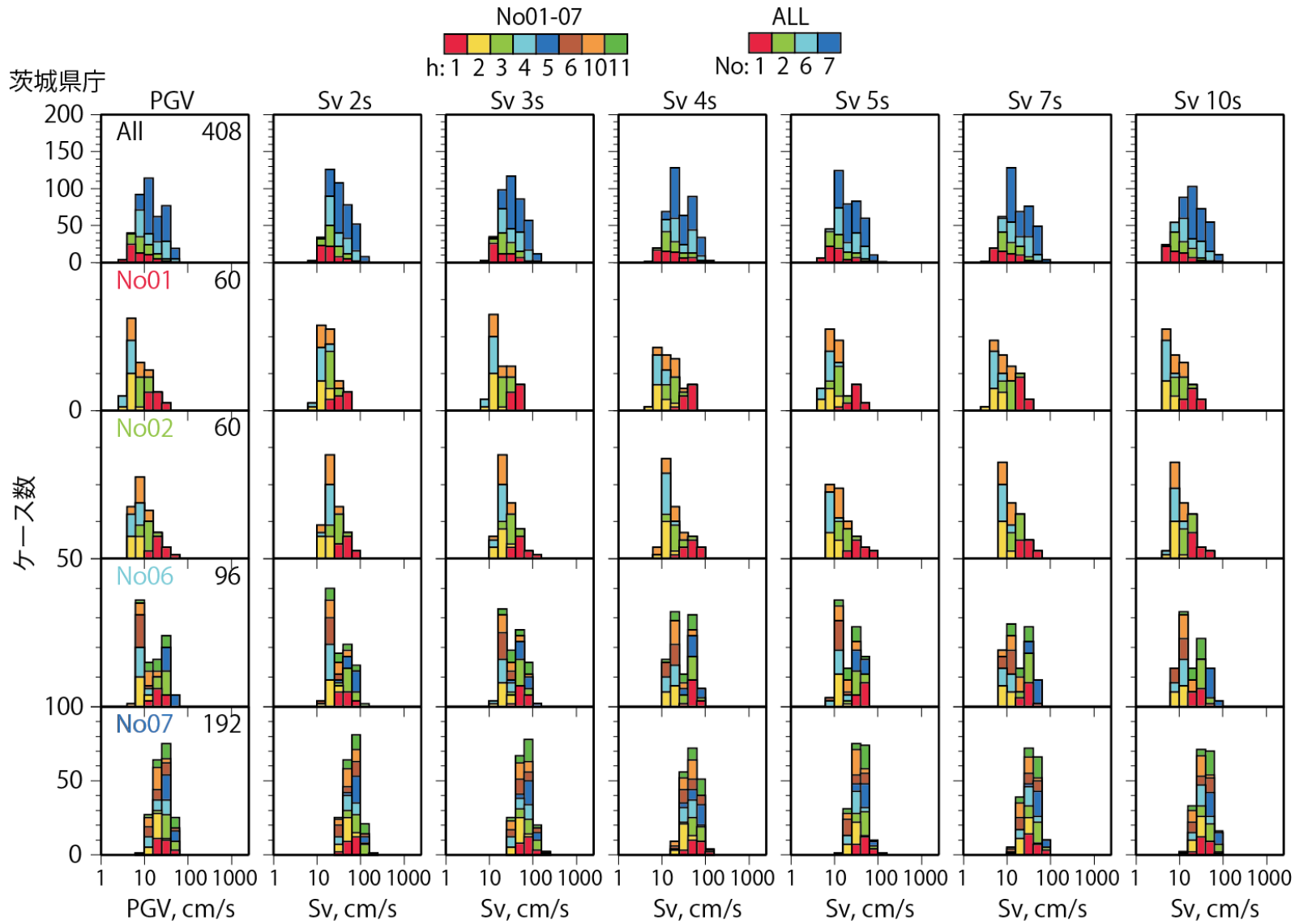


図 3-2-7 つづき。茨城県庁位置での結果。

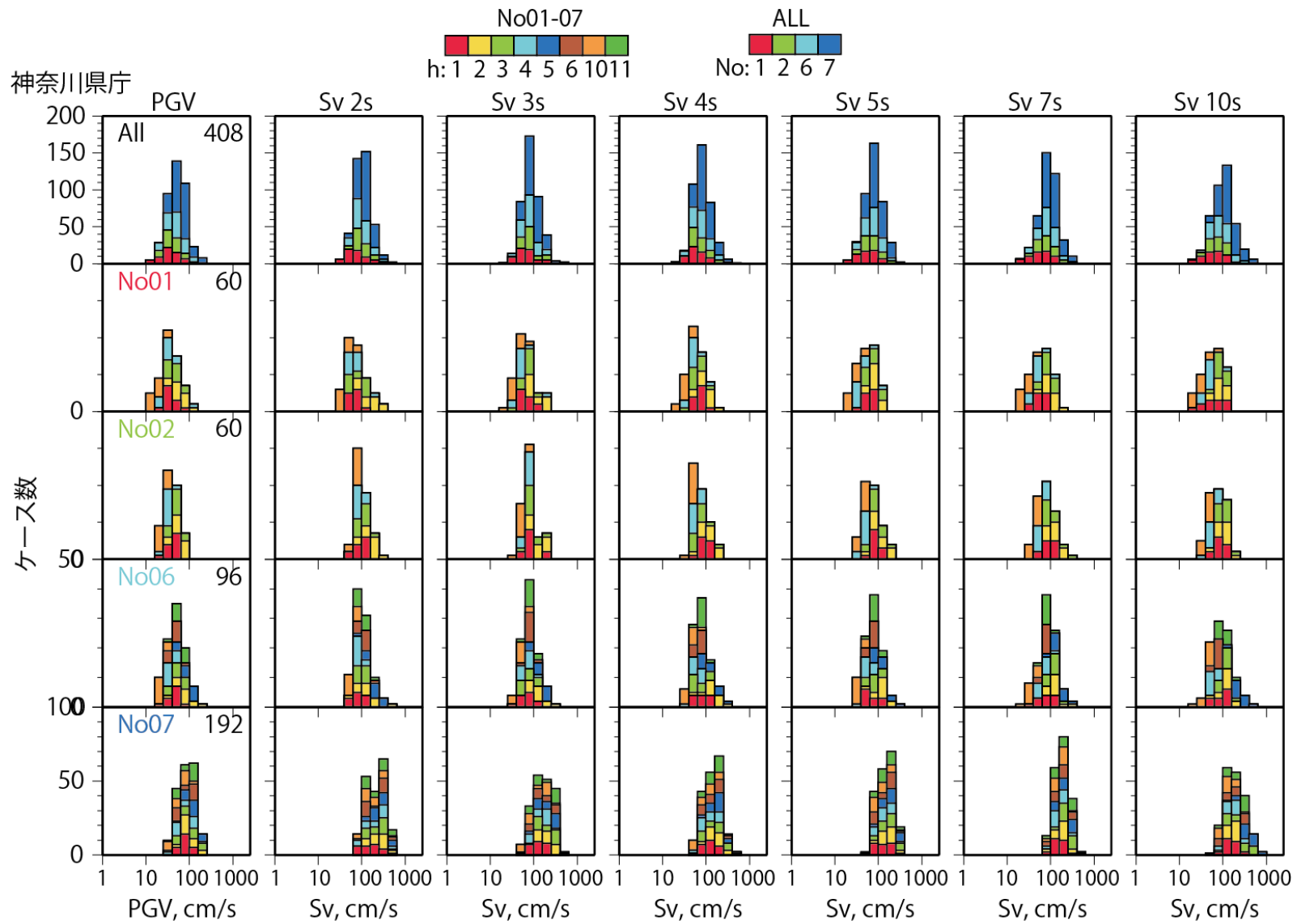


図 3-2-7 つづき。神奈川県庁位置での結果。

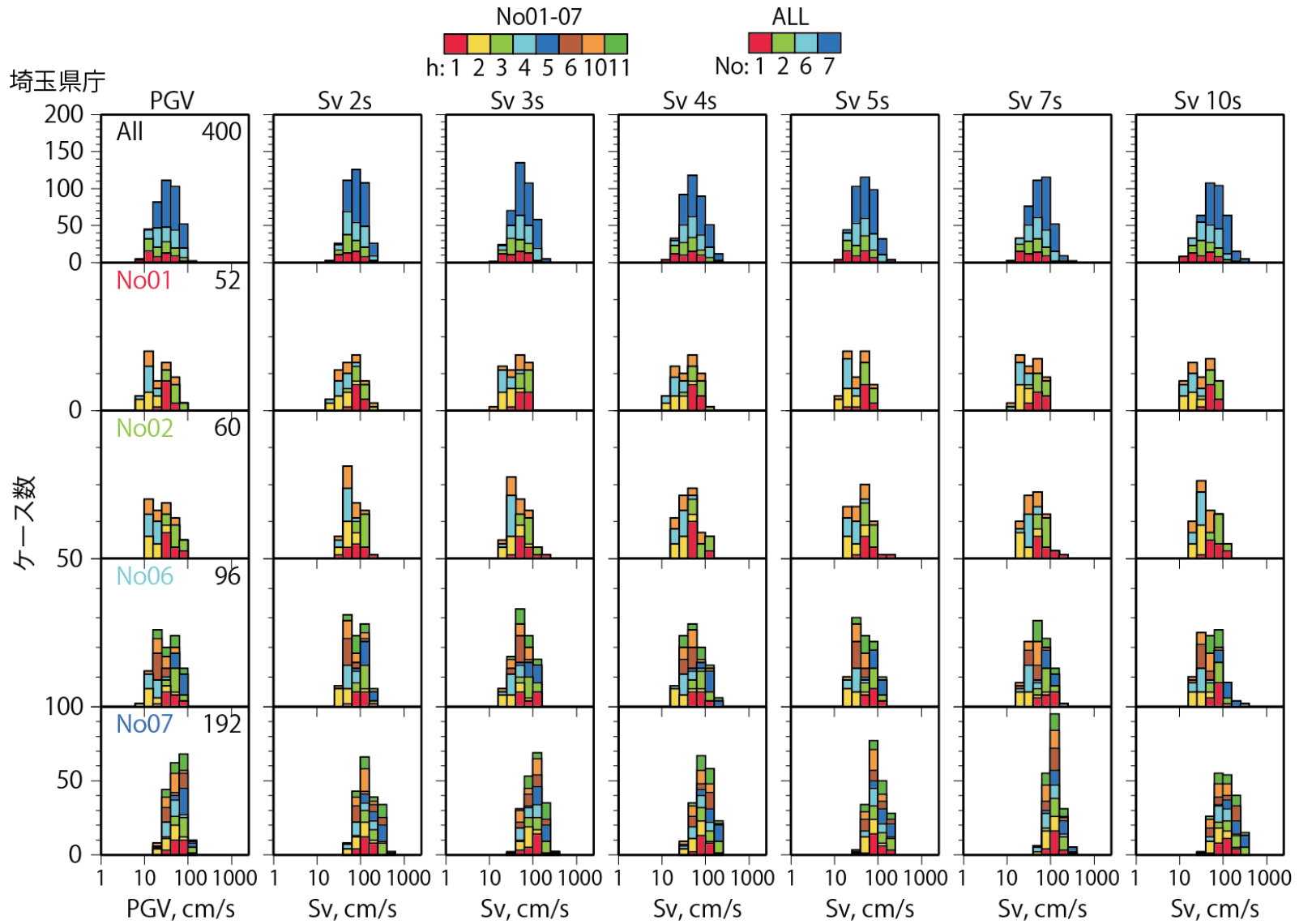


図 3-2-7 つづき。埼玉県庁位置での結果。

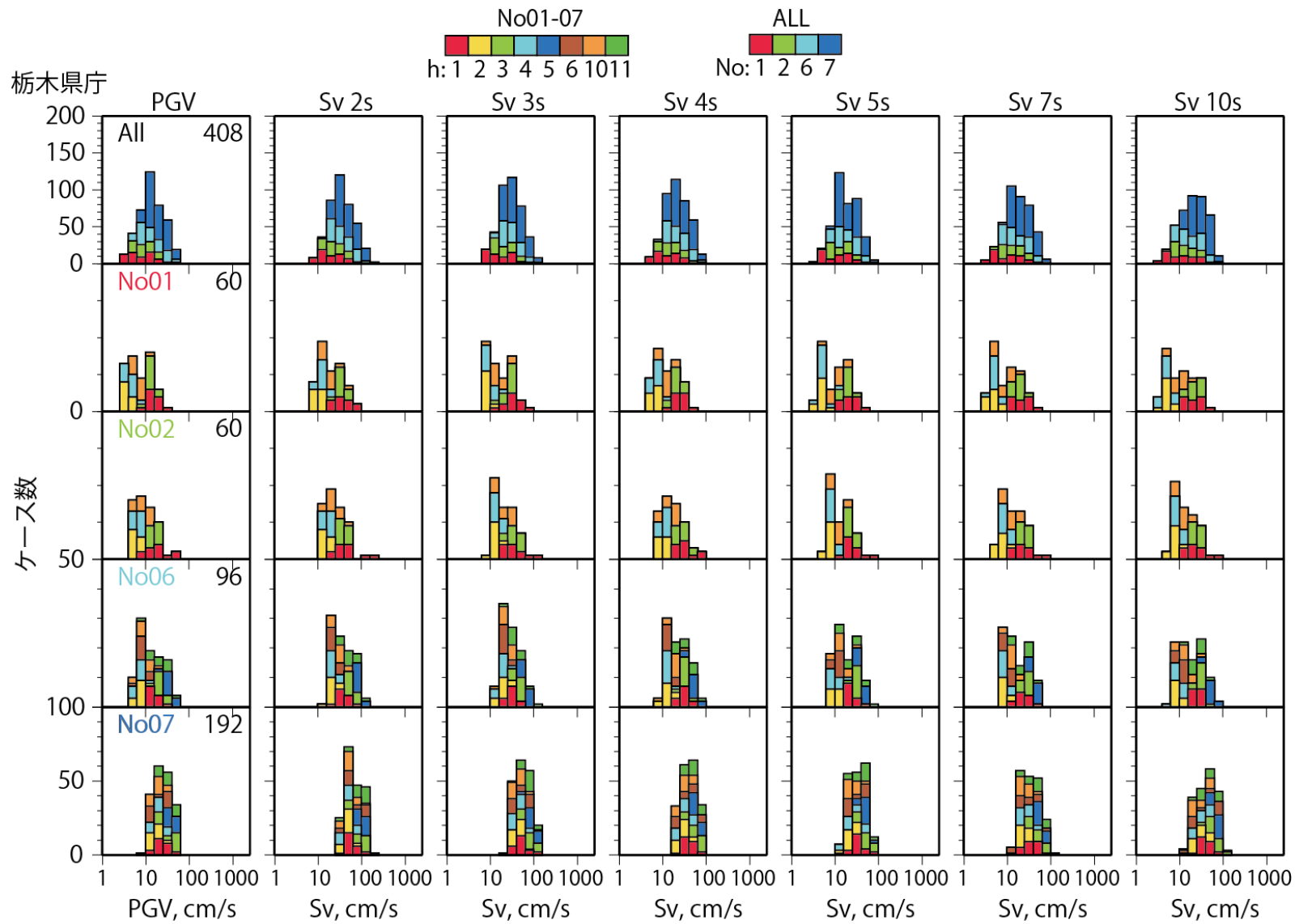


図 3-2-7 つづき。栃木県庁位置での結果。

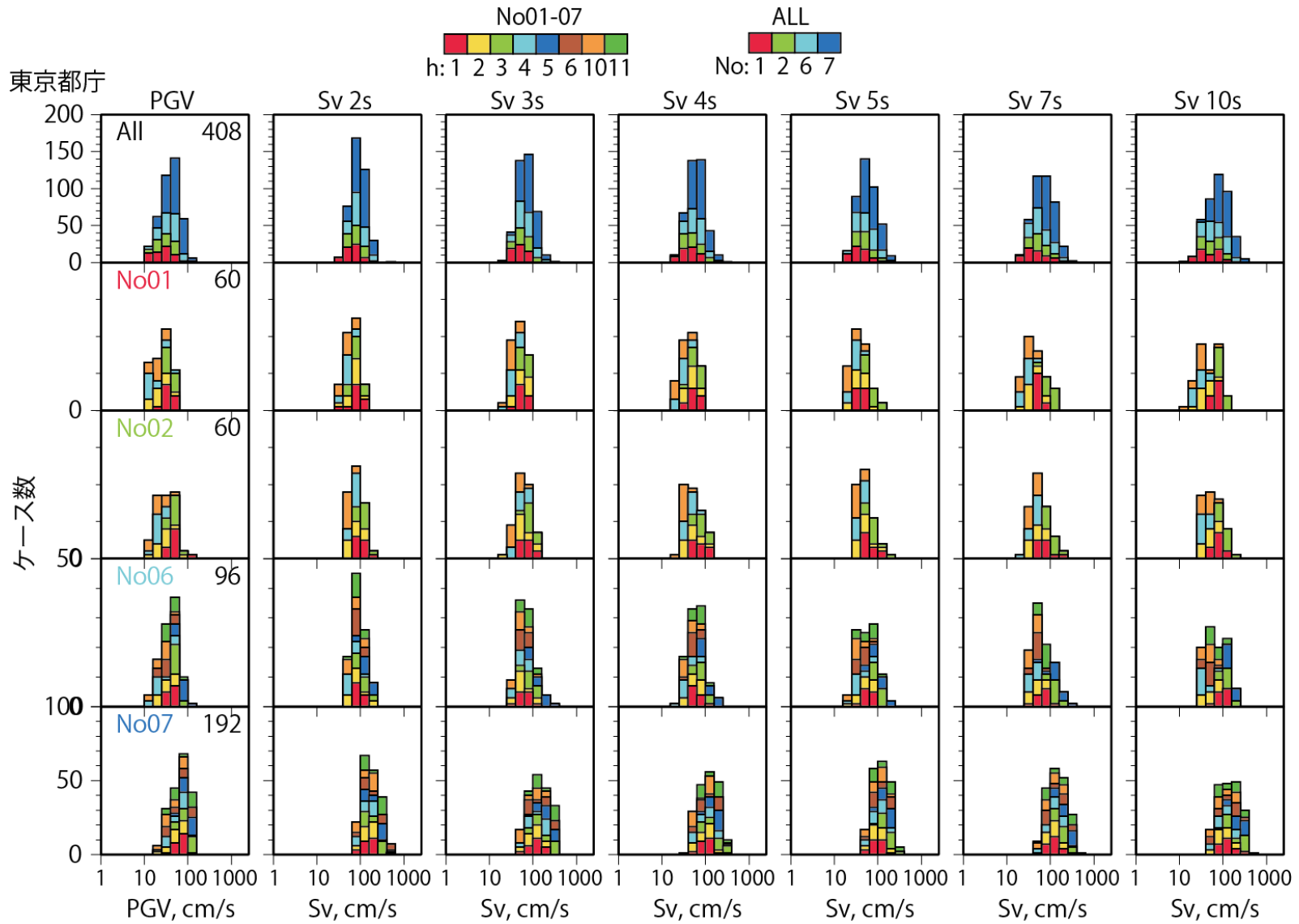


図 3-2-7 つづき。東京都庁位置での結果。

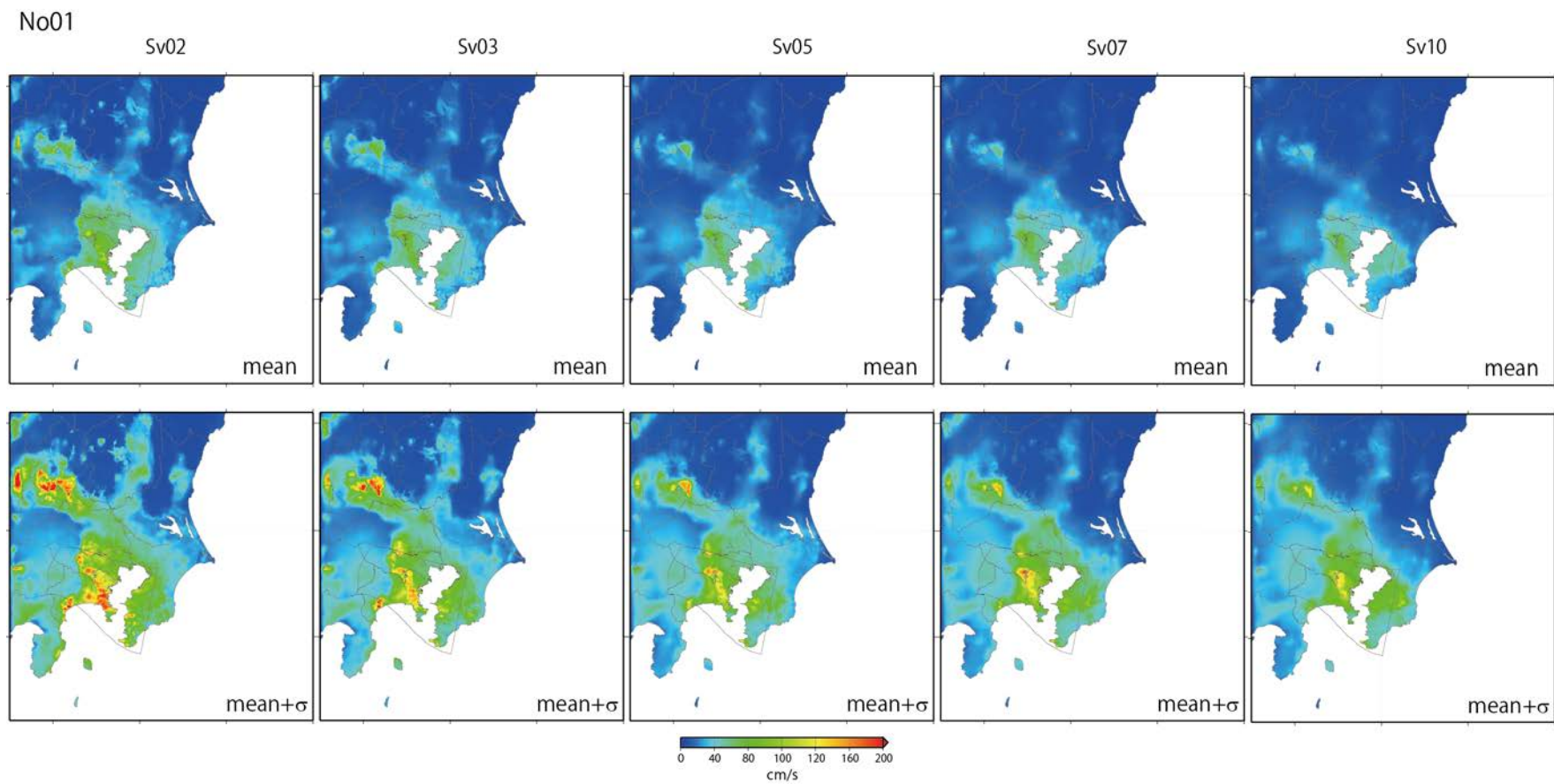


図 3-2-8 No1 の震源域 (60 ケース) についての速度応答スペクトル (周期 2 秒、3 秒、5 秒、7 秒、10 秒 ; 減衰 5%) の平均値と平均+1 σ の分布。

No02

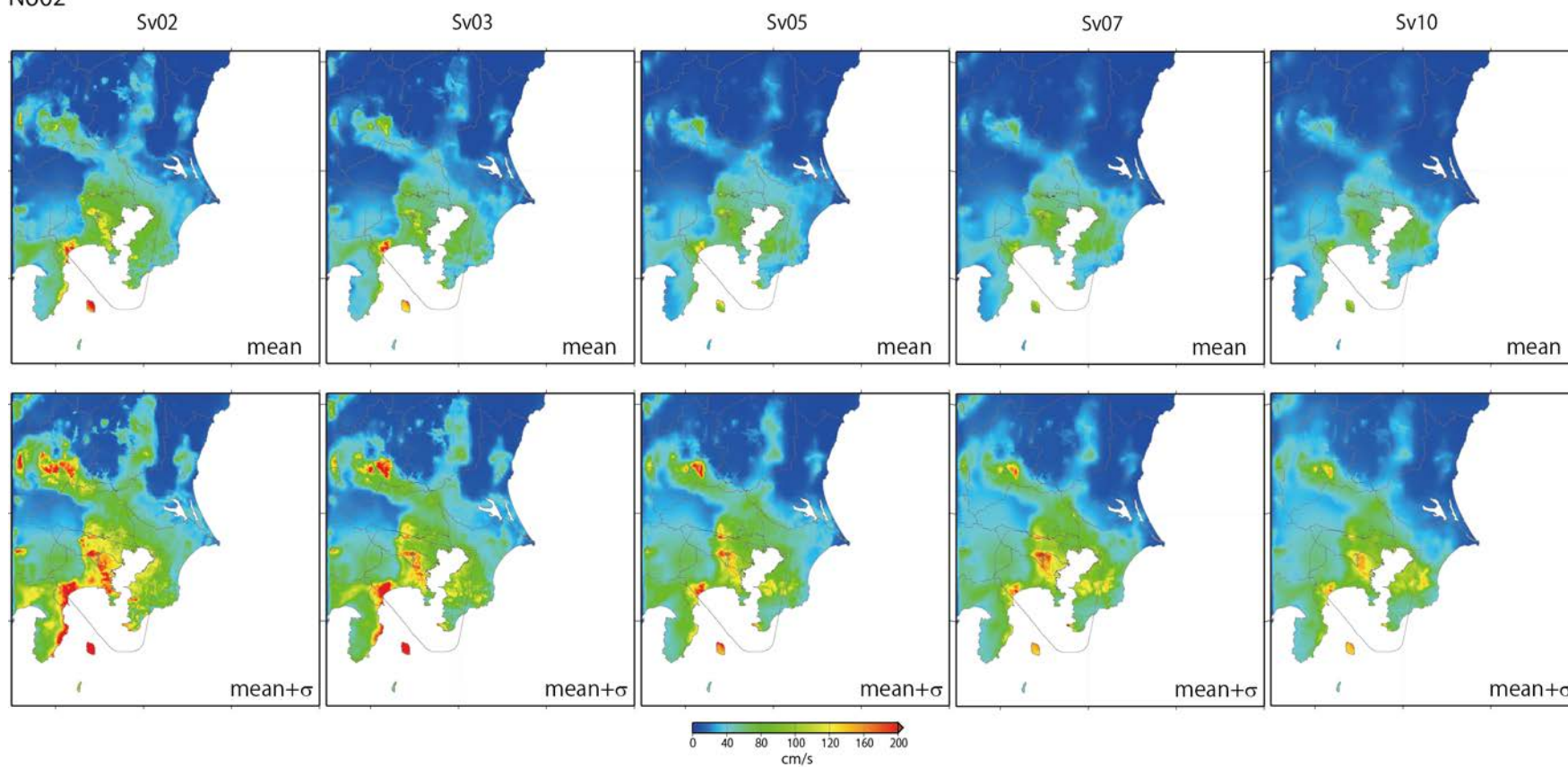


図 3-2-8 つづき。No2 の震源域 (60 ケース) について。

No06

Sv02

Sv03

Sv05

Sv07

Sv10

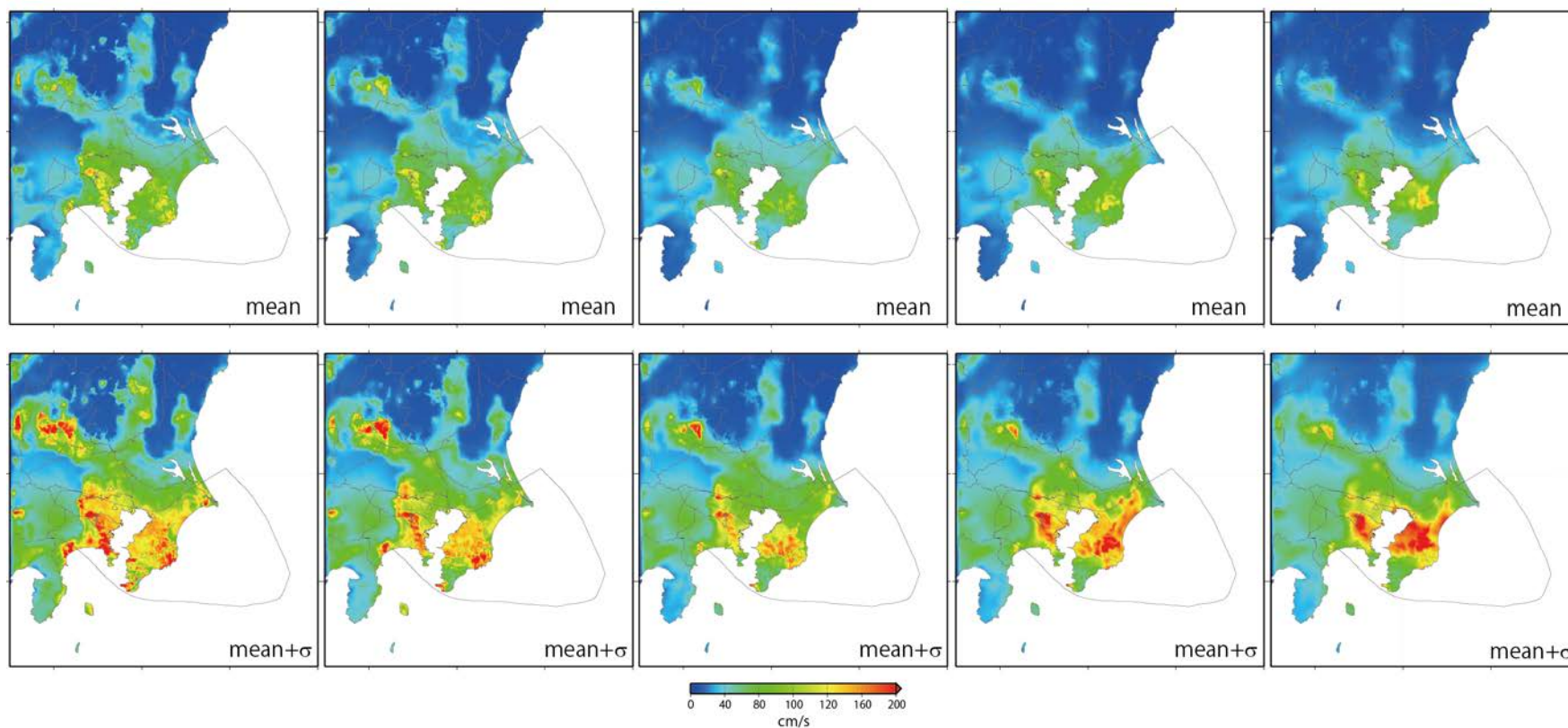


図 3-2-8 つづき。No6 の震源域 (96 ケース) について。

No07

Sv02

Sv03

Sv05

Sv07

Sv10

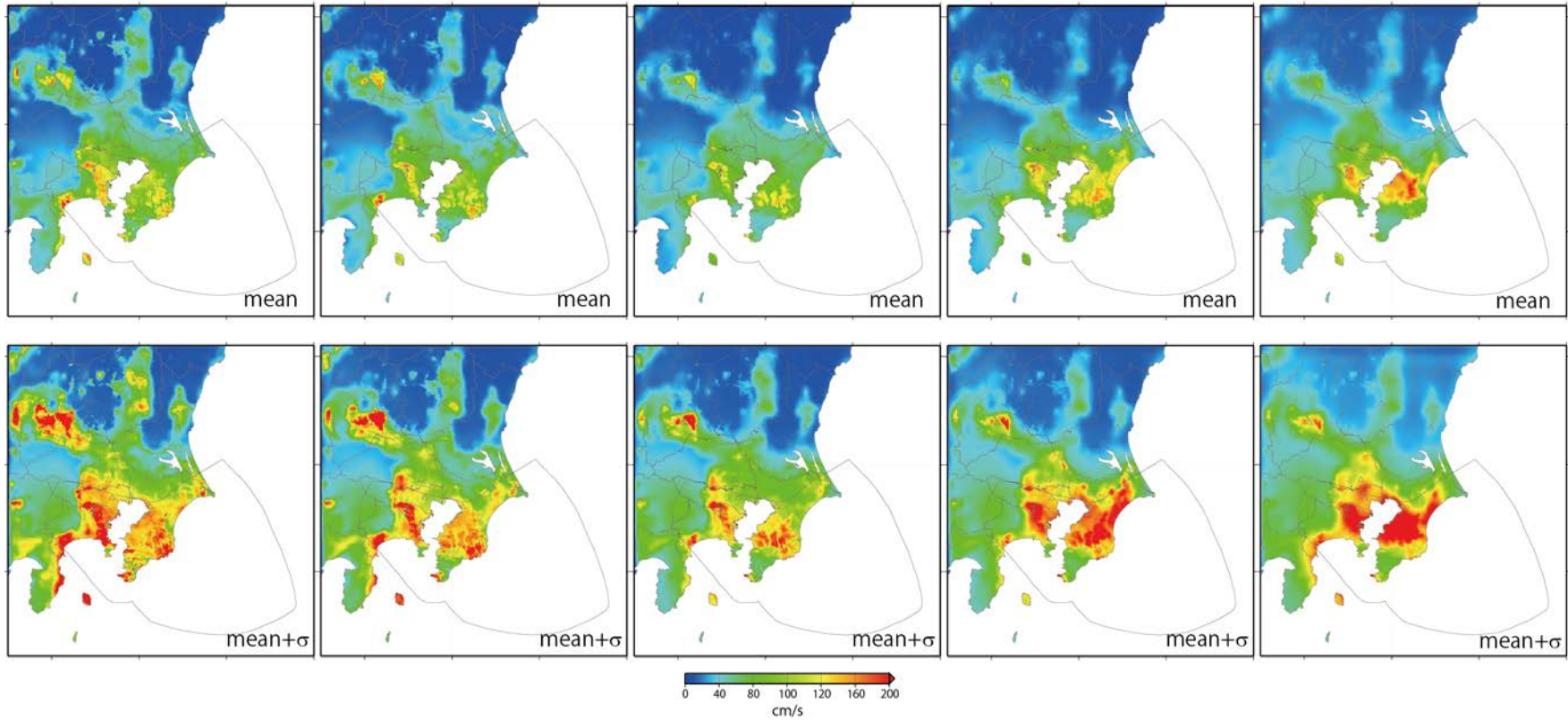


図 3-2-8 つづき。No7 の震源域 (192 ケース) について。

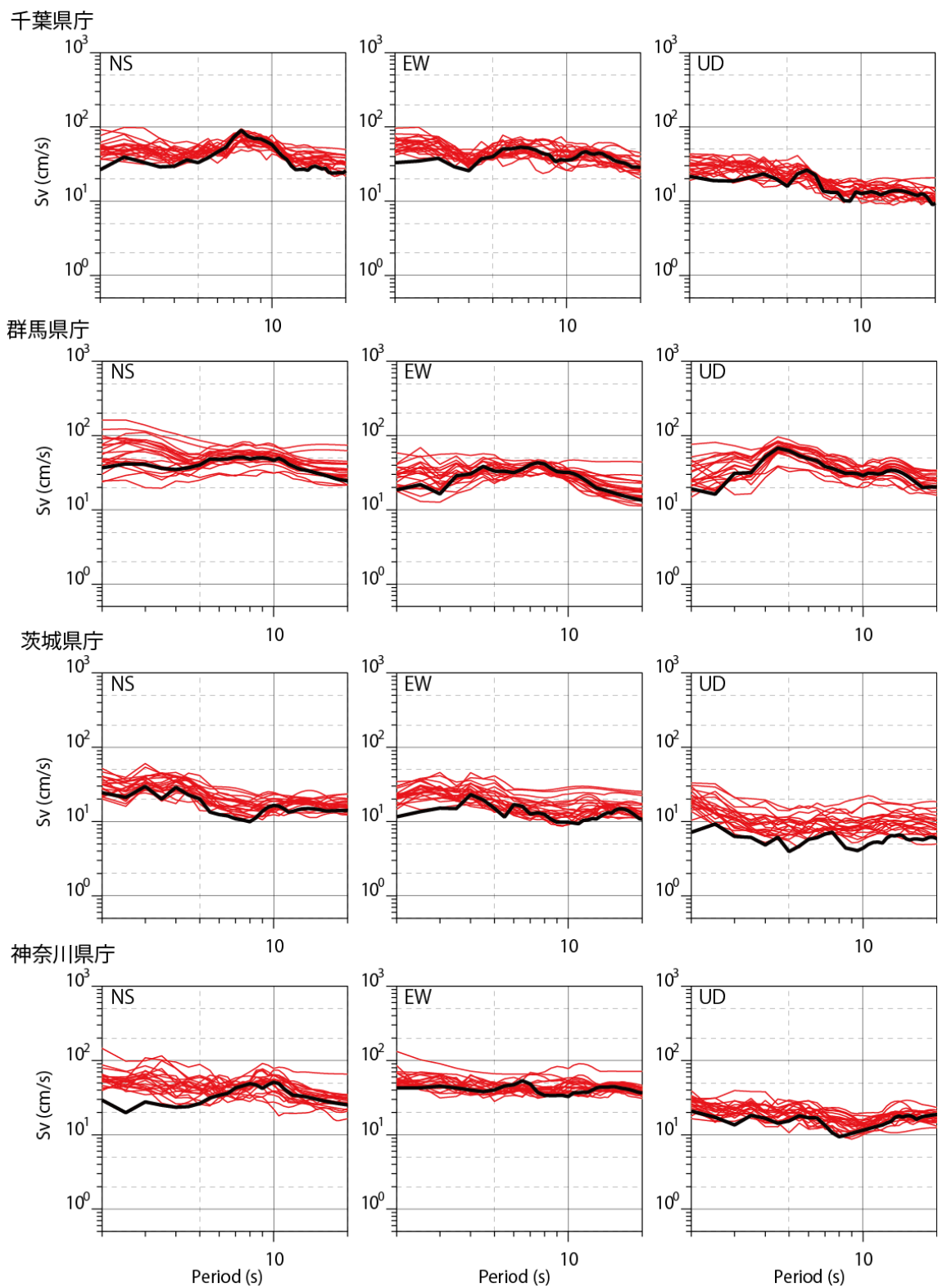


図 3-2-9 不均質モデル（赤線、20 ケース）と均質モデル（黒線）の速度応答スペクトル（減衰 5%）の比較。

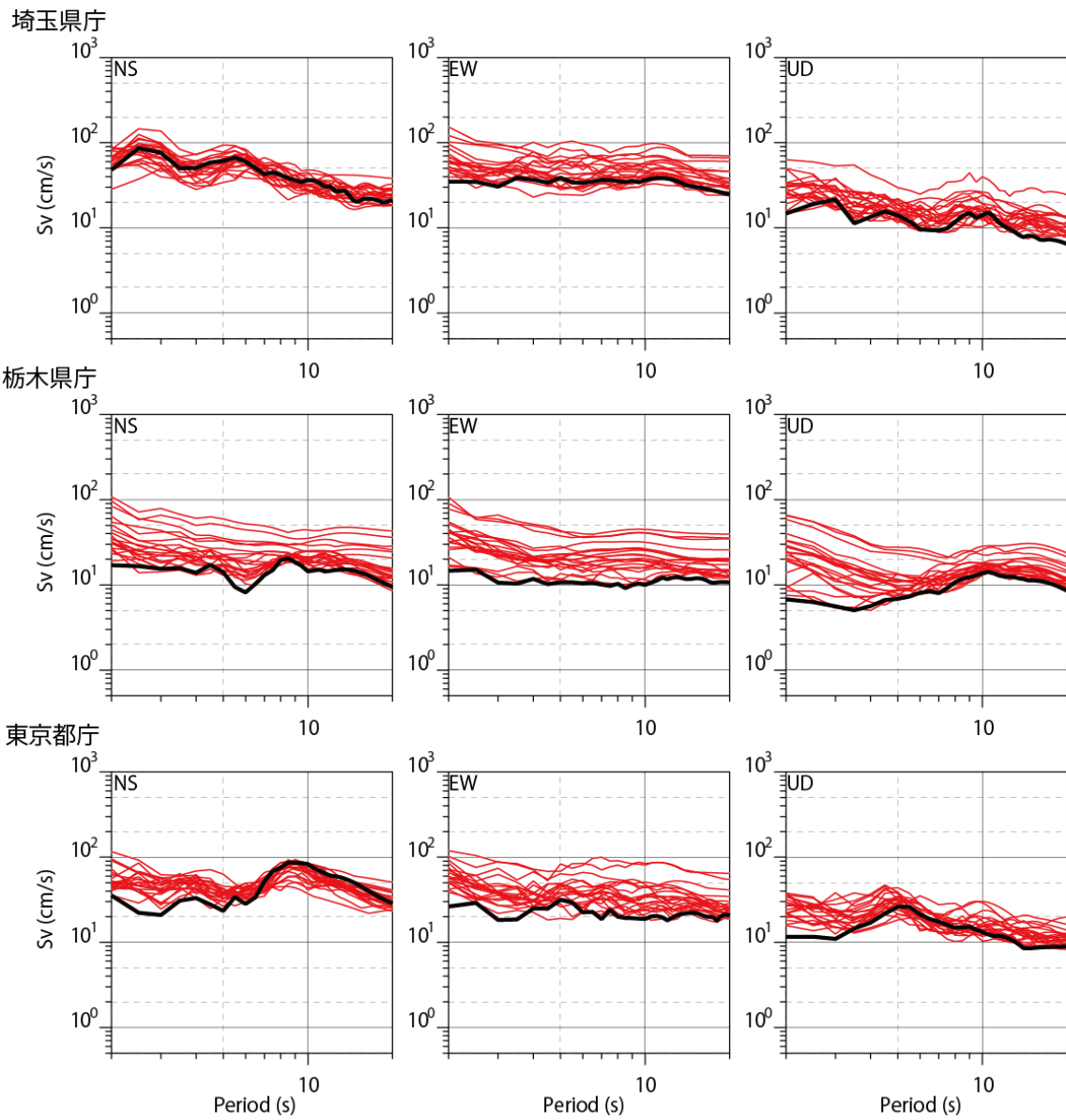


図 3-2-9 つづき。

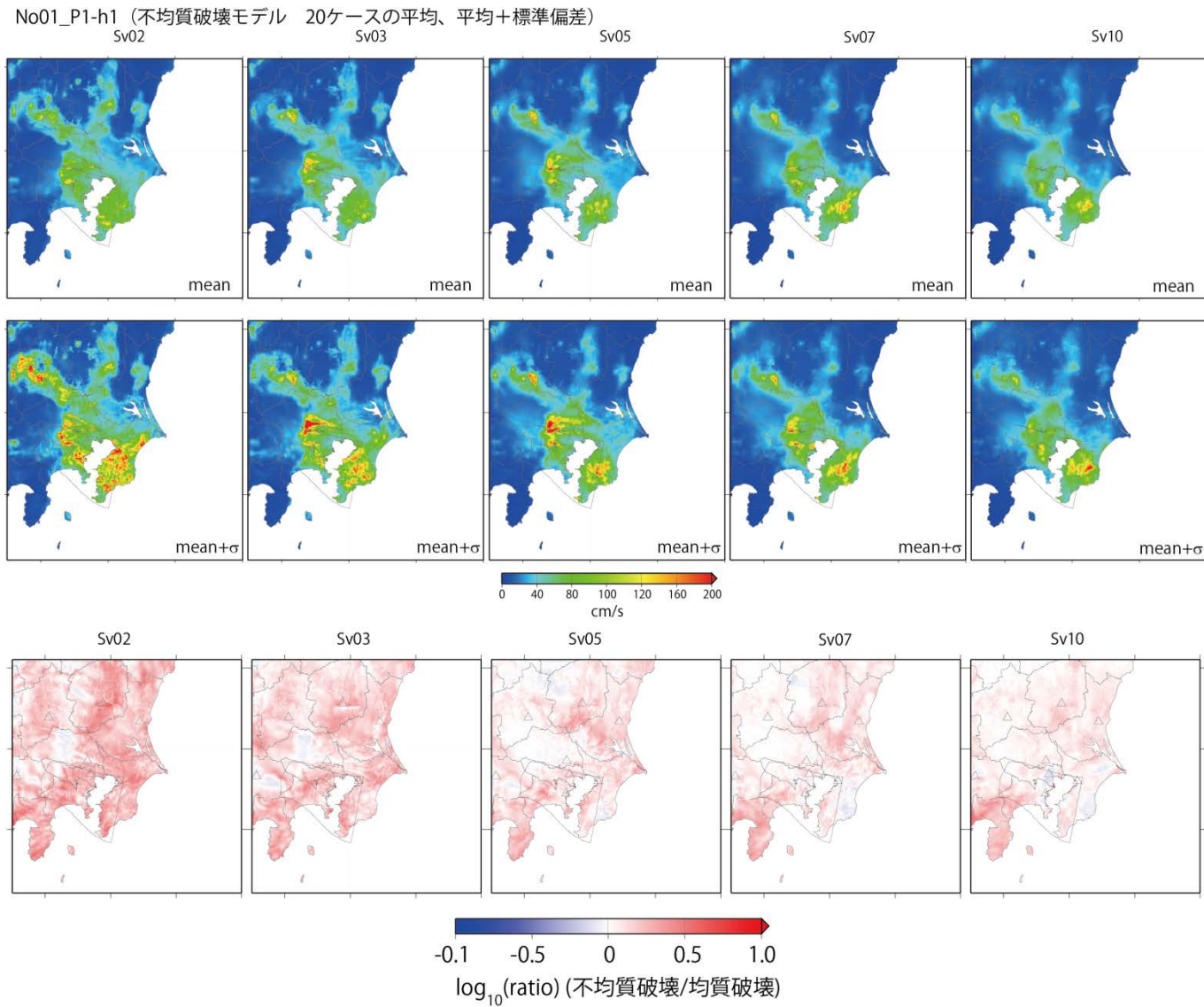


図 3-2-10 上段、中段：不均質モデル（20 ケース）の速度応答スペクトル（周期 2、3、5、7、10 秒）の平均値と平均+1 σ の空間分布。下段：不均質モデルと均質モデルの速度応答スペクトル比の平均値の分布。

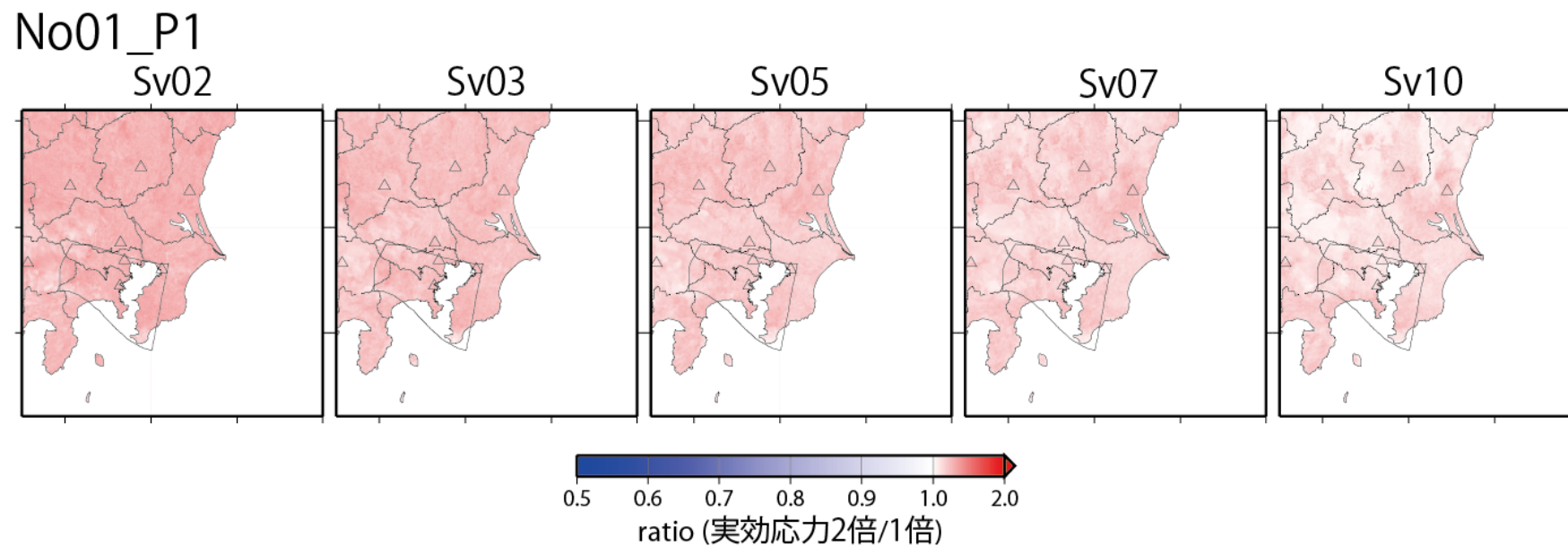


図 3-2-11 レシピで設定した特性化震源モデルに対してアスペリティの実効応力を 2 倍とする影響。No1 の震源域、P1 のアスペリティ配置で、破壊開始点の異なる 5 つの震源モデルによる計算結果と、実効応力を変えないモデルによる結果との比の平均値の空間分布。

(c) 結論および今後の課題

本検討では、長期評価に基づいて相模トラフ沿いの M8 クラスの地震を対象として、3.1 の検討結果を踏まえて周期 2 秒以上を有効周期とする長周期地震動シミュレーションを実施した。震源過程の不均質性を考慮した 408 ケースについて、各ケースの地震動分布に加え、4 つの震源域ごとに「平均」および大きめ (+1 σ) となる地震動分布を示す地図も作成した。

今後は、速度応答スペクトルの検討に加え、揺れの継続時間、気象庁長周期地震動階級についての検討も必要である。また、大正型、元禄型それぞれについての平均、平均 + σ の算出も行う場合には、それぞれに含まれる 2 つの領域の結果をどのように統合するか (重みを付けるか否か) について検討の余地がある。また、本検討ではアスペリティの実効応力のみを変えたモデルについて検討したが、さらにレシピからのばらつきを考慮したケースについての検討も必要である。

(d) 引用文献

- 青井真・早川俊彦・藤原広行, 2004, 地震動シミュレータ : GMS, 物理探査, 57, 651-666.
地震調査委員会, 2009, 「長周期地震動予測地図」2009 年試作版, 66pp.
地震調査委員会, 2012, 「長周期地震動予測地図」2012 年試作版— 南海地震 (昭和型) の検討 一, 59pp.
渡辺基史・藤原広行・佐藤俊明・石井透・早川崇, 2008, 断層破壊の複雑さが強震動予測結果に及ぼす影響とその支配的パラメータの抽出, 地震 2, 60, 253-265.
関口春子・吉見雅行, 2006, 広帯域地震動予測のための海溝型巨大地震アスペリティモデルのマルチスケール不均質化, 月刊地球 / 号外 No. 55, 103-109.