

平成 27 年度

長周期地震動ハザードマップ作成等支援事業

成果報告書

平成 28 年 3 月

文部科学省研究開発局

国立研究開発法人防災科学技術研究所

本報告書は、文部科学省の科学技術基礎調査等委託事業による委託業務として、国立研究開発法人防災科学技術研究所が実施した平成 27 年度「長周期地震動ハザードマップ作成等支援事業」の成果を取りまとめたものです。

目 次

1. 長周期地震動ハザードマップ作成等支援事業の概要	1
1.1. 長周期地震動ハザードマップについて	1
1.2. 事業の目的	2
1.3. 事業の内容	3
2. 事業の実施体制	4
3. 事業の成果	5
3.1. 対象周期を拡張した長周期地震動ハザード評価手法の検討等	5
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	37
3.3. 南海トラフの地震を対象とした長周期地震動の基礎調査等	70
3.4. 長周期地震動ハザード評価結果の活用の検討等	77
3.5. 長周期地震動ハザードマップ公表に向けた支援等	123
4. むすび	159

1. 長周期地震動ハザードマップ作成等支援事業の概要

1.1. 長周期地震動ハザードマップについて

長周期地震動については、平成 15 年（2003 年）十勝沖地震の際に震央から遠く離れた苫小牧で発生した石油タンク火災の原因の一つとして注目されるなど、近年その危険性が認知され始めた。長周期地震動は、首都圏、中京圏、近畿圏など超高層ビルや長大構造物が集中する平野部で特に顕著に現れる。地震調査研究推進本部では、想定東海地震、昭和型東南海地震、及び 1978 年タイプの宮城県沖地震を対象とした「長周期地震動予測地図」2009 年試作版を 2009 年 9 月に、昭和型南海地震を対象とした「長周期地震動予測地図」2012 年試作版を 2012 年 1 月にそれぞれ作成し、公表している。これらの地域はいずれも近い将来に発生が懸念される南海トラフ沿いの海溝型巨大地震によって長周期地震動に見舞われる可能性が示されている。

一方、2011 年東北地方太平洋沖地震の発生を受けて、これまで知られていたよりも大きな規模の地震まで考慮する必要が生じた。特に、巨大地震発生の切迫性が指摘されている南海トラフの地震や人口が集中する首都圏に大きな影響を及ぼす相模トラフの地震については、過去の地震に基づく少数かつ特定の「シナリオ」を対象とした従来の長周期地震動予測地図にとどまらず、過去に例のない巨大地震により生じる長周期地震動をも考慮した長周期地震動ハザード評価が必要である。今後、これまでの試作版作成等や東北地方太平洋沖地震から得られた知見等を踏まえたさらなる予測手法の高度化だけでなく、広く社会の防災・減災に資する長周期地震動ハザードマップをはじめとした長周期地震動ハザード評価結果の提示が必要であり、そのための研究・検討が早急に必要である。

一方、平成 25 年度までに実施されてきた、「長周期地震動予測地図作成等支援事業」および「長周期地震動ハザードマップ作成等支援事業」では、主として周期 3 秒程度以上の長周期地震動を対象として検討を進めてきた。しかしながら、このような周期帯の地震動により大きな影響を受ける建築等の構造物は高さ 100m（30 階建て）程度以上の超高層建物に限定され、ビル等で多数を占める中高層建物に対する防災・減災に資するためには周期 1 秒程度まで拡張した長周期地震動ハザード評価を行う必要がある。平成 26 年度の「長周期地震動ハザードマップ作成等支援事業」において、震源モデルとして破壊伝播の不均質性を考慮することにより、シミュレーションによる周期 1～3 秒程度の地震動が従来の「特性化震源モデル」による結果と比べて大きくなることが確認されたが、実地震に対する検証ができず、有効性および妥当性までは確認されていなかった。

1.2. 業務の目的

地震調査研究推進本部が公表するため準備している、発生が逼迫しているマグニチュード8～9級の南海トラフ地震および相模トラフ地震の「長周期地震動ハザードマップ」の作成等を支援することを目的とする。

1.3. 研究の内容

これまでの「長周期地震動予測地図作成等支援事業」および「長周期地震動ハザードマップ作成等支援事業」等で蓄積されてきた知見等を踏まえつつ、長周期地震動ハザード評価に関する以下の検討を実施する。

(1) 対象周期を拡張した長周期地震動ハザード評価手法の検討等

現在利用可能な震源モデル、地下構造モデルの両方の観点から、S波速度が400m/s程度の工学的基盤上で長周期地震動ハザード評価が可能な周期帯を明らかにする。

そのため、2003年十勝沖地震を対象として、地震調査研究推進本部による現状の計算手法（「レシピ」）における海溝型地震の震源モデル化手法、および関口・吉見（2006）による破壊伝播の不均質性等を付加した震源モデルによる地震動シミュレーションを実施し、観測記録との比較によりマグニチュード8程度の地震を対象とした場合の評価可能な周期帯を明らかにする。また、「首都直下地震防災・減災特別プロジェクトの最終成果報告について」、および防災科学技術研究所（2013）の成果や手法により首都圏を対象として作成されている浅部・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、相模トラフで発生する地震の長周期地震動ハザード評価を実施できる周期帯を定める。

(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

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。

そのため、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、(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かさを考慮した、多数の震源モデルを作成する。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する。このとき、対象とする周期帯については(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する。

(3) 南海トラフの地震を対象とした長周期地震動の基礎調査等

南海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対象地域における地下構造モデルの現状を把握する。

そのため、大阪平野とその周辺地域および濃尾平野とその周辺地域について、地震動シミュレーションのための既存の地下構造モデルおよびモデル作成に用いられている基礎データ等の情報を調査し、長周期地震動ハザード評価のための当該地域における浅部地盤モデル等の将来的な見通しを示す。

(4) 長周期地震動ハザード評価結果の活用の検討

長周期地震動ハザード評価結果の利活用ならびに長周期地震動に対する防災・減災に資するための方策を提示する。

そのため、(2) や過去の長周期地震動シミュレーション結果から想定される超高層ビル等の被害等を示す。また、平成26年度までの長周期地震動ハザードマップ作成等支援事業等による成果等に基づいて、長周期地震動ハザード評価結果と長大構造物における耐震基準や規格（例えば、建築基準法及び建築基準法施行令など）との対応について調査・整理する。これらの長周期地震動に関する知見等について一般国民等に広く周知できるウェブページを試作する。

(5) 長周期地震動ハザードマップ公表に向けた支援等

地震調査研究推進本部による長周期地震動ハザードマップの公表に向けて、資料等を作成することにより支援する。

そのため、(2) の地図作成だけでなく、地震調査研究推進本部からの要求に応じて波形や応答スペクトルの例示の図、計算に用いた震源モデル、地下構造モデルの図面やパラメータ表等を作成し提出する。

2. 事業の実施体制

所属機関	役職	氏名	担当課題
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	3.1～3.5
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	3.1～3.5
国立研究開発法人 防災科学技術研究所	主任研究員	河合 伸一	3.3
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	3.1, 3.2, 3.4, 3.5
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	3.1, 3.2, 3.4, 3.5

3. 事業の成果

3.1. 対象周期を拡張した長周期地震動ハザード評価手法の検討等

(1) 事業の内容

(a) 事業の題目

対象周期を拡張した長周期地震動ハザード評価手法の検討等

(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

現在利用可能な震源モデル、地下構造モデルの両方の観点から、S波速度が400m/s程度の工学的基盤上で長周期地震動ハザード評価が可能な周期帯を明らかにする。

(2) 事業の成果

(a) 事業の要約

2003年十勝沖地震を対象として、地震調査研究推進本部による現状の計算手法(「レシピ」)における海溝型地震の震源モデル化手法、および Hisada (2001) および関口・吉見 (2006) による破壊伝播の不均質性等を付加した震源モデルによる地震動シミュレーションを実施し、観測記録との比較によりマグニチュード8程度の地震を対象とした場合の評価可能な周期帯を明らかにした。また、「首都直下地震防災・減災特別プロジェクトの最終成果報告について」および防災科学技術研究所 (2013) の成果や手法により首都圏を対象として作成されている浅部・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、相模トラフで発生する地震の長周期地震動ハザード評価を実施できる周期帯を定めた。

(b) 事業の成果

1) 破壊不均質性導入に関する検討

マグニチュード 8 クラス以上の海溝型巨大地震に対して、現行の震源断層を特定した地震の地震動予測手法(「レシピ」)(地震調査委員会、2009)に基づく特性化震源モデルを用いて、差分法などの理論的手法によるシミュレーションで計算される地震動は、周期 5~10 秒以下の短周期成分の振幅を過小評価する傾向があることが指摘されている(例えば、渡辺・他、2008)。一方、特性化震源モデルに対して破壊過程の不均質性を導入する方法が提案されており、シミュレーションによる地震動振幅が短周期側で大きくなることが示されている(例えば、関口・吉見、2006)。

ここでは、長周期地震動ハザード評価を行う上で適切な不均質性を導入するパラメータや不均質さの度合いを具体的に見積もるため、2003年十勝沖地震を対象として、特性化震源モデルへの破壊不均質性導入の効果についての検討結果を示す。

検討には図 3-1-1 の右側に示すように、波形インバージョンによるモデル (Model 0) を基に設定した特性化震源モデル (Model C) に対して関口・吉見 (2006) の手法で不均質を付与した不均質モデル (Model H1~H3) を用いる。なお、破壊伝播の不均質性を付与する方法としては、Hisada (2001) もあるが、ほぼ同等の結果が得られる一方で、現時点でどちらの手法が優れているかを判断することはきわめて困難である。そのため本検討では、関口・吉見 (2006) の手法のみについて検討する。

(1) 震源モデル

【インバージョンモデル (Model 0)】

インバージョンモデルは、Aoi et al. (2008) によるすべり分布モデルを用いる (図 3-1-2)。ただし、このモデルの解析対象周期は 2.5 秒以上 (0.4Hz 以下) であり、3.3 秒以上 (0.3Hz 以下) の地震動 (速度波形、フーリエスペクトル) を再現できているとしている。

【特性化震源モデル (Model C)】

特性化震源モデルは、レシピを基本とし (表 3-1-1)、以下に関して幅を持たせて設定した。なお、アスペリティの平均すべり量は断層全体の平均の 2.2 倍 (Murotani et al., 2008)、すべり角はインバージョンモデルにおける平均的な値 (127°) とし、震源時間関数は中村・宮武 (2000) を用いる。

- ・断層全体面積に対するアスペリティの総面積比：20%を基本として試行錯誤的に設定
- ・アスペリティの位置・個数：図 3-1-3 の 3 パターンを試行。
- ・各アスペリティの実効応力：レシピを基本として、試行錯誤的に設定。
- ・破壊伝播速度：0.72Vs を基本として、試行錯誤的に設定。マルチハイポセンター。

特に卓越している 5-10 秒の周期帯域 (0.1-0.2Hz) でより観測に近いモデルを試行錯誤的に選択した (表 3-1-2)。また、以下の検討では、Model C8 を特性化震源モデルとして用いることとした。

【不均質モデル (model H1~H3)】

特性化震源モデル Model C のすべり量、破壊伝播速度、すべり角に対して、関口・吉見 (2006) の手法に従いマルチスケール不均質を与える。スケールの数は 7 個とし ($n = 1, 2, \dots, 7$)、半径 r_n のパッチを断層面上でランダムな位置に m_n 個配置する。最も大きいスケール ($n = 1$) でパッチ半径 r_1 は約 10 km に設定する。この $n = 1$ におけるパッチ面積は、アスペリティサイズとおおよそ同じ面積となる。 n 番目のスケールの半径は $k - 1$ 番目のパッチの半径の 1.5^{-1} 倍とする。また、パッチの個数 m_k は、パッチ面積の合計がアスペリティ総面積にほぼ等しくなるように決める。

(1) すべり量：Model H1

各パッチの内部のすべり量に $\pm 0.5D_{ave}/(1.5^{n-1})$ の揺らぎを与える (D_{ave} は平均すべ

り量)。ここで、すべり量の揺らぎの大きさはそのスケールでのパッチの半径に比例する。さらに、不均質を付与する前後で断層面全体の平均すべり量が不変となるように全体のすべり量を調節する。なお、関口・吉見（2006）では、Mai and Beroza（2002）で示された過去の地震の震源モデルの統計から抽出されたすべり量分布の波数スペクトルの特徴に合うよう、高波数で $k^{-1.75}$ で減少するようにすべり量を調整しているが、本検討ではすべり量分布の波数スペクトルが $k^{-1.75} \sim k^{-2}$ に近いことを確認し、すべり量の調整までは行っていない。

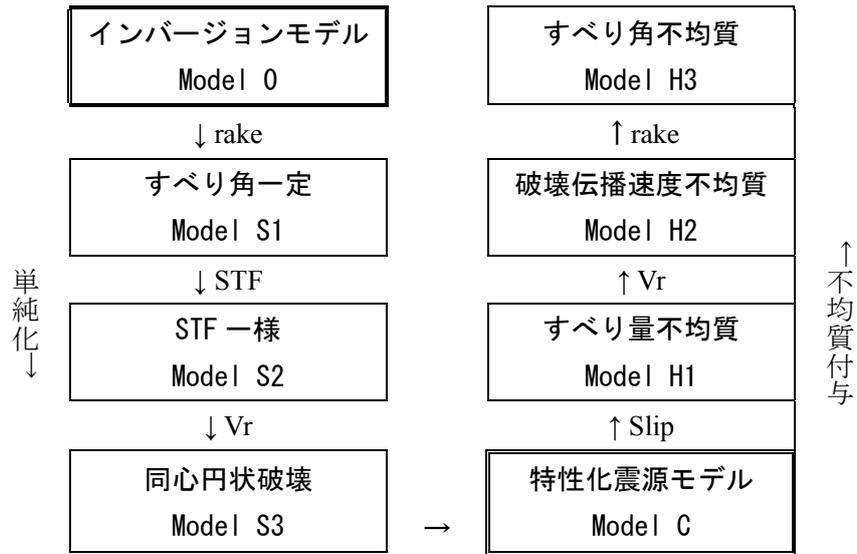
(2) 破壊伝播速度 : Model H2

すべり量と同じパッチを用いて、各パッチ内で破壊伝播速度に揺らぎを与える。揺らぎの大きさを $\pm dVr$ 以下とする。不均質な破壊伝播速度の分布を決めたのち、破壊開始点から順にその場の破壊伝播速度を用いて隣接する点の破壊時刻を計算していき、破壊時刻分布を決める。求められた最終すべり量や破壊伝播速度に基づき、中村・宮武（2000）のすべり速度時間関数を再設定する。

(3) すべり角 : Model H3

すべり量や破壊伝播速度と同じサイズ・個数のパッチを配置し、パッチ内のすべり角を $127 \pm 45^\circ$ の範囲で乱数を用いてランダムに決める。

各震源パラメータに対する不均質性の強さは、震源スペクトルの ω^2 モデルとすべり量波数スペクトルの k^2 モデル、および観測フーリエスペクトルとの整合性から決めた（表 3-1-3）。



Slip 特性化, 中村宮武 STF,
マルチハイポセンター

図 3-1-1 検討の流れ。

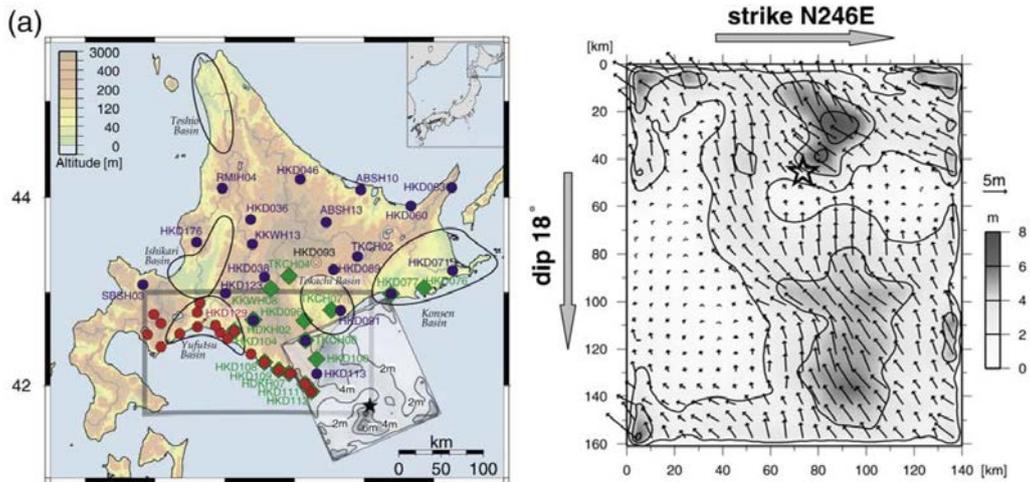


図 3-1-2 震源断層面上のすべり量分布 (Aoi et al., 2008 の Figure2 および Figure 6 より抜粋)。

表 3-1-1 特性化震源モデル Model C の震源パラメータ (基本)。

巨視的断層 パラメータ		微視的断層 パラメータ	アスペリティ面積比 20%			
			A1	A2	A3	背景領域
面積 [km ²]	21038	面積 [km ²]	1098	2561	549	16831
M ₀ [Nm]	3.98E+21	M ₀ [Nm]	3.56E+20	1.27E+21	1.26E+20	2.23E+21
D [m]	2.92	D _a , D _b [m]	5.01	7.65	3.54	2.04
Δσ [MPa]	3.18	σ _a , σ _b [MPa]	16.0	16.0	16.0	1.48

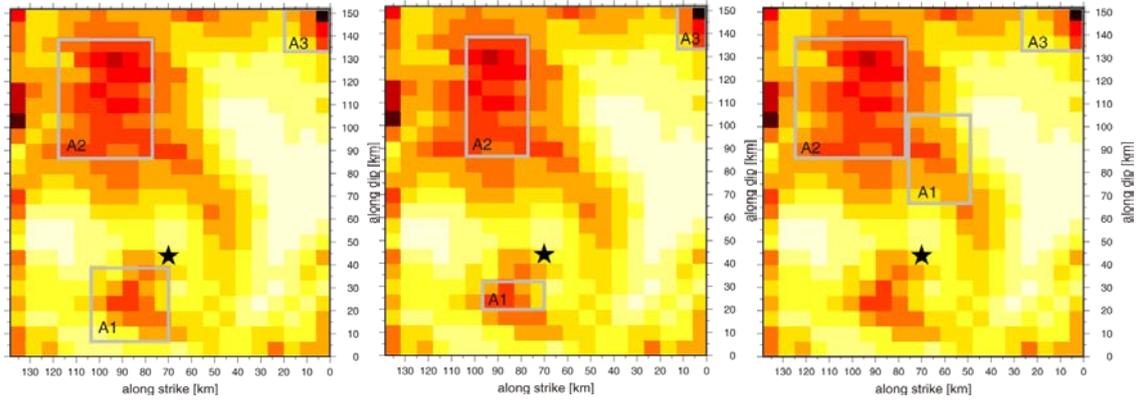


図 3-1-3 アスペリティ配置パターン（左から順に P1, P2, P3）。

表 3-1-2 検討した特性化震源モデルのケース。

アスペリティパターン (図 1.3)	アスペリティ面積比	破壊伝播速度 V_r	σ_a レンピとの比 A1, A2, A3	番号
P1	20 %	3240 m/s (0.72Vs)	1 倍	C1
		3600 m/s (0.8Vs)	1 倍	C2
P2	10 %	3240 m/s (0.72Vs)	1 倍	C3
		3600 m/s (0.8Vs)	1 倍	C4
P3	20 %	3240 m/s (0.72Vs)	1 倍	C5
			1, 2, 2.5 倍	C6
		3600 m/s (0.8Vs)	1 倍	C7
			1, 2, 2.5 倍	C8

表 3-1-3 検討したマルチスケール不均質モデルのケース。

特性化モデル#	不均質モデル	すべり量ゆらぎ	V_r ゆらぎ	rake ゆらぎ	乱数
C8	Model H1	$\pm 0.5D_{ave}$	なし	なし	すべり量と V_r 合わせて 5 通り
	Model H2		なし		
	Model H3		± 400 m/s	$127^\circ \pm 45^\circ$	5 通り \times rake 5 通り = 25 通り

(2) 地震動の計算

上記震源モデルと Aoi et al. (2008) による三次元地下構造モデルを用いて、三次元差分

法 (GMS; 青井・他、2004) により工学的基盤 ($V_s=500\text{m/s}$) 上の地震動を計算する。計算範囲と比較を行う観測点を図 3-1-4 に示す。対象周期は周期 2 秒以上としている。

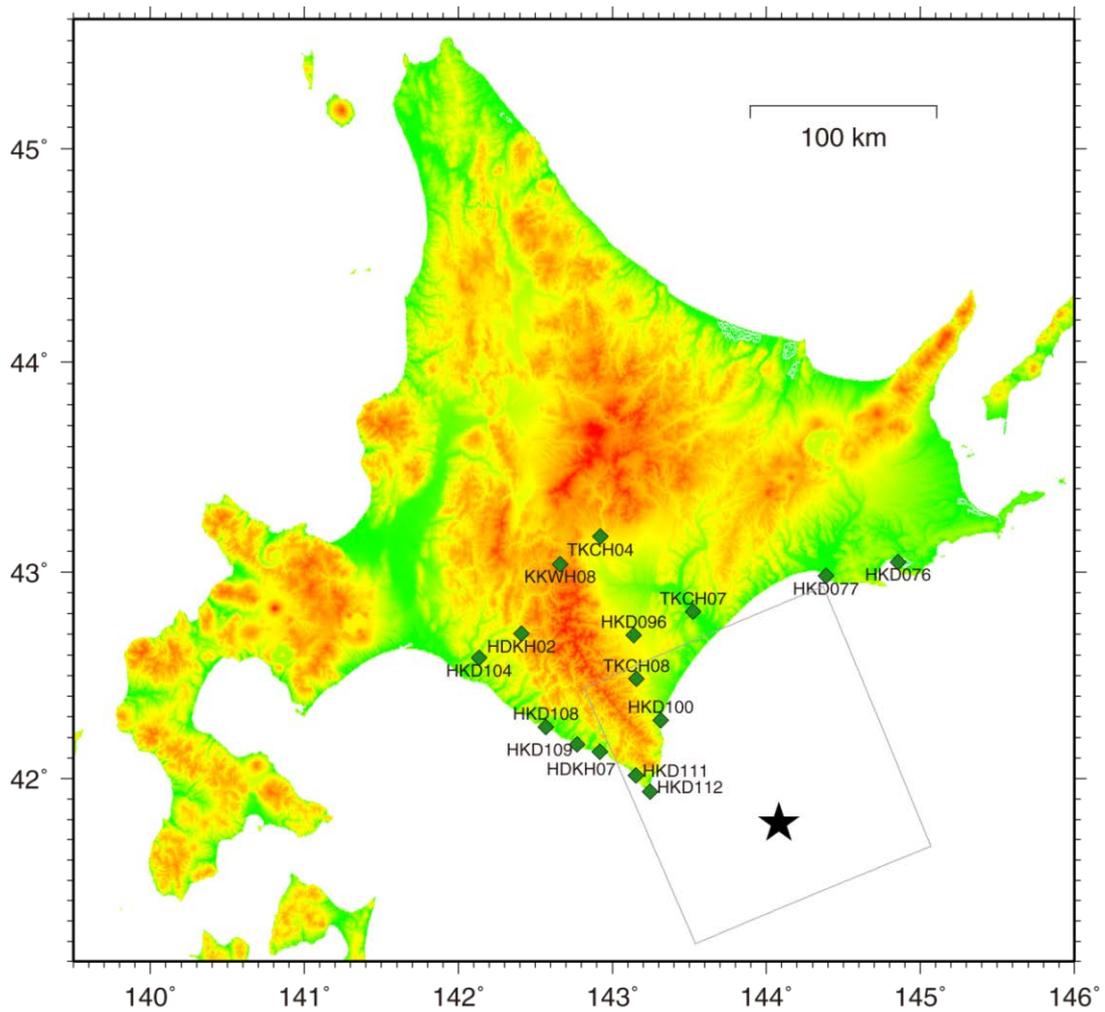


図 3-1-4 計算範囲と比較を行う観測点 (◇)。

(3) 計算結果

図 3-1-5 に不均質モデル (Model H3)、インバージョンモデル (Model O)、特性化震源モデル (Model C) のそれぞれについて、図 3-1-4 に示した観測点における観測記録に対する速度フーリエスペクトルの比 (水平 2 成分合成) の平均と標準偏差を示す。ここで、Model H3 については 25 通りの乱数を用いたモデルの平均と標準偏差をとったものを示している。

Model C では、周期 10 秒以下 (0.1Hz 以上) で過小評価の傾向が見られ、周期 5 秒以下 (0.2Hz 以上) でかなり過小評価となっている。これは、渡辺・他 (2008) でも指摘されている通り、特性化によってインバージョンモデルの持つすべり量、すべり角、破壊伝播様式等の複雑さが単純化された影響によるものと言える。一方、Model H3 では周期 2-20 秒 (0.05-0.5 Hz) の帯域で、観測記録の倍半分の範囲にほぼ収まっており、過小評価の大部分が解消されている。Model H3 は、特性化震源モデルに不均質性を導入したことにより全体としてインバージョンモデルに近い地震動レベルが得られており、さらにインバージョンの対象範囲外である周期 2-3 秒 (0.3-0.5 Hz) の帯域でも観測記録の 1 倍に近い値をとっている。

特性化震源モデルに対する不均質性の導入の効果を直接比較するため、Model H2 および Model H3 の Model C に対するフーリエスペクトル比を観測点ごとに図 3-1-6 に示す。周期 10 秒以上 (0.1Hz 以下) はほぼ 1 となっているのに対して、それよりも短周期側では観測点ごとに程度の違いはあるものの、不均質モデルの振幅が大きくなっていることが分かる。

参考として、観測点ごとのフーリエスペクトル比 (シミュレーション/観測) を図 3-1-7 に示す。Model C では周期 3-5 秒 (0.2-0.3Hz) の帯域においてシミュレーション結果の振幅が大幅に過小評価となっている観測点 (例えば、HKD100、HDKH02、TKCH08) も見られるが、それらの点において Model H3 では改善されていることが分かる。

以上より、今回付与した不均質性の強さ等はおおむね妥当なものであると言える。

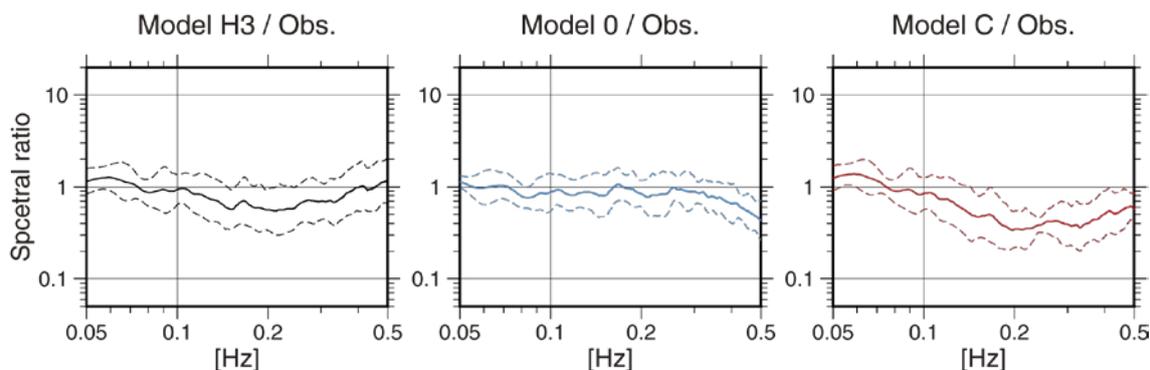


図 3-1-5 観測記録に対する速度フーリエスペクトルの比 (水平 2 成分合成) の対象観測点の平均 (実線) と標準偏差 (破線)。

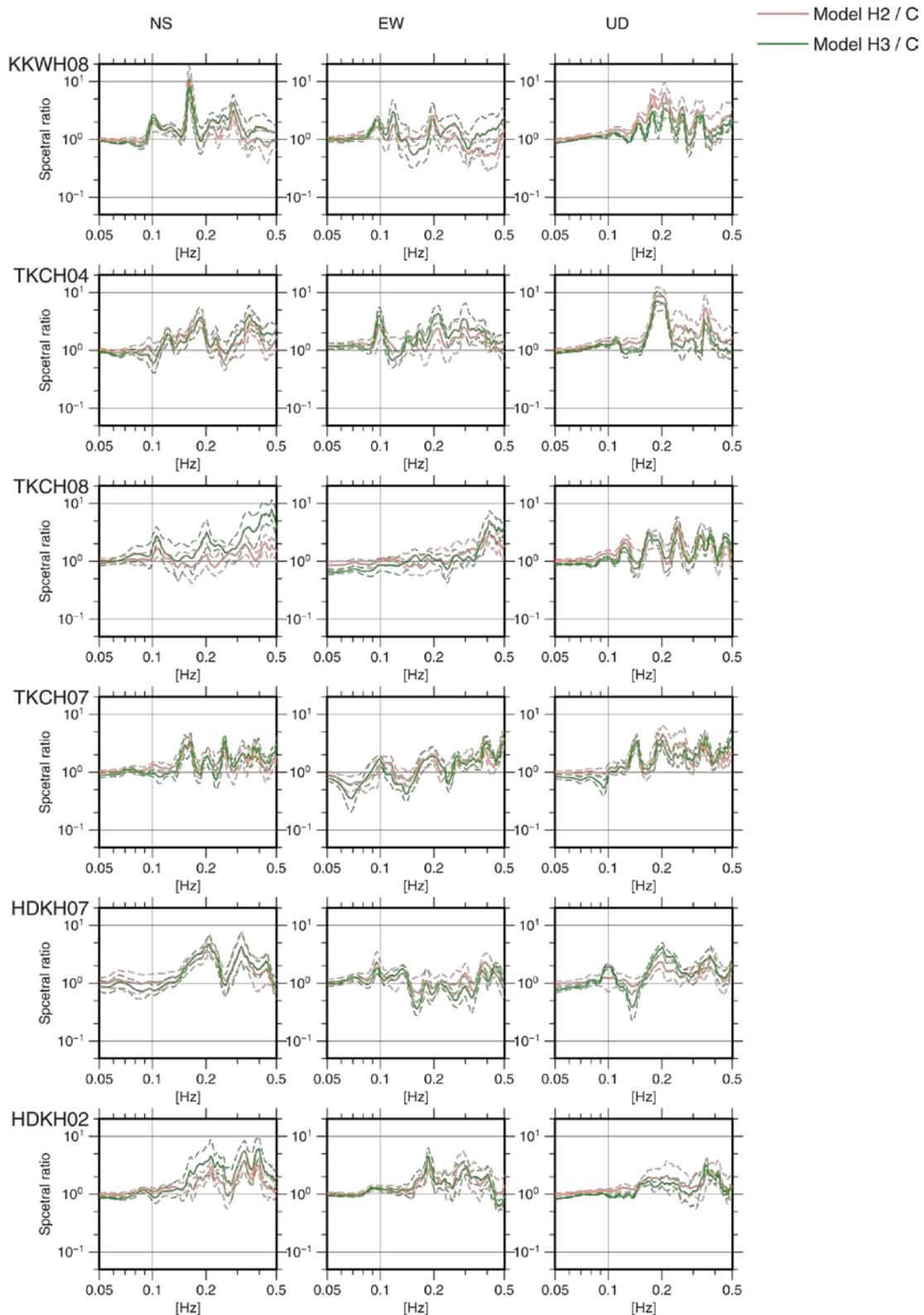


図 3-1-6 Model H2 (赤：5モデル) および Model H3 (緑：25モデル) の Model C に対する速度フーリエスペクトル比の平均 (実線) と標準偏差 (破線)。

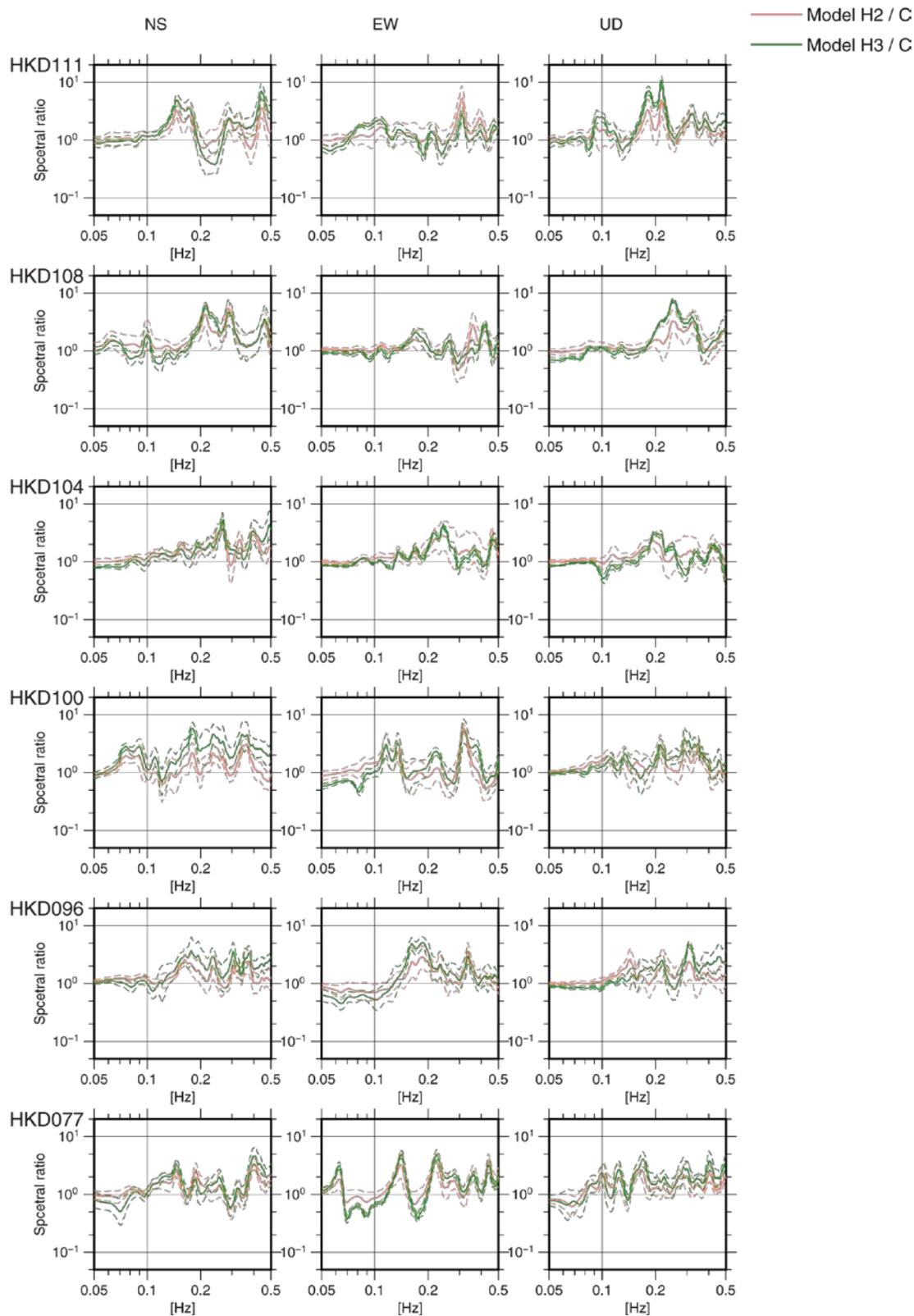


図 3-1-6 Model H2 (赤：5モデル) および Model H3 (緑：25モデル) の Model C に対する速度フーリエスペクトル比の平均 (実線) と標準偏差 (破線) (つづき)。

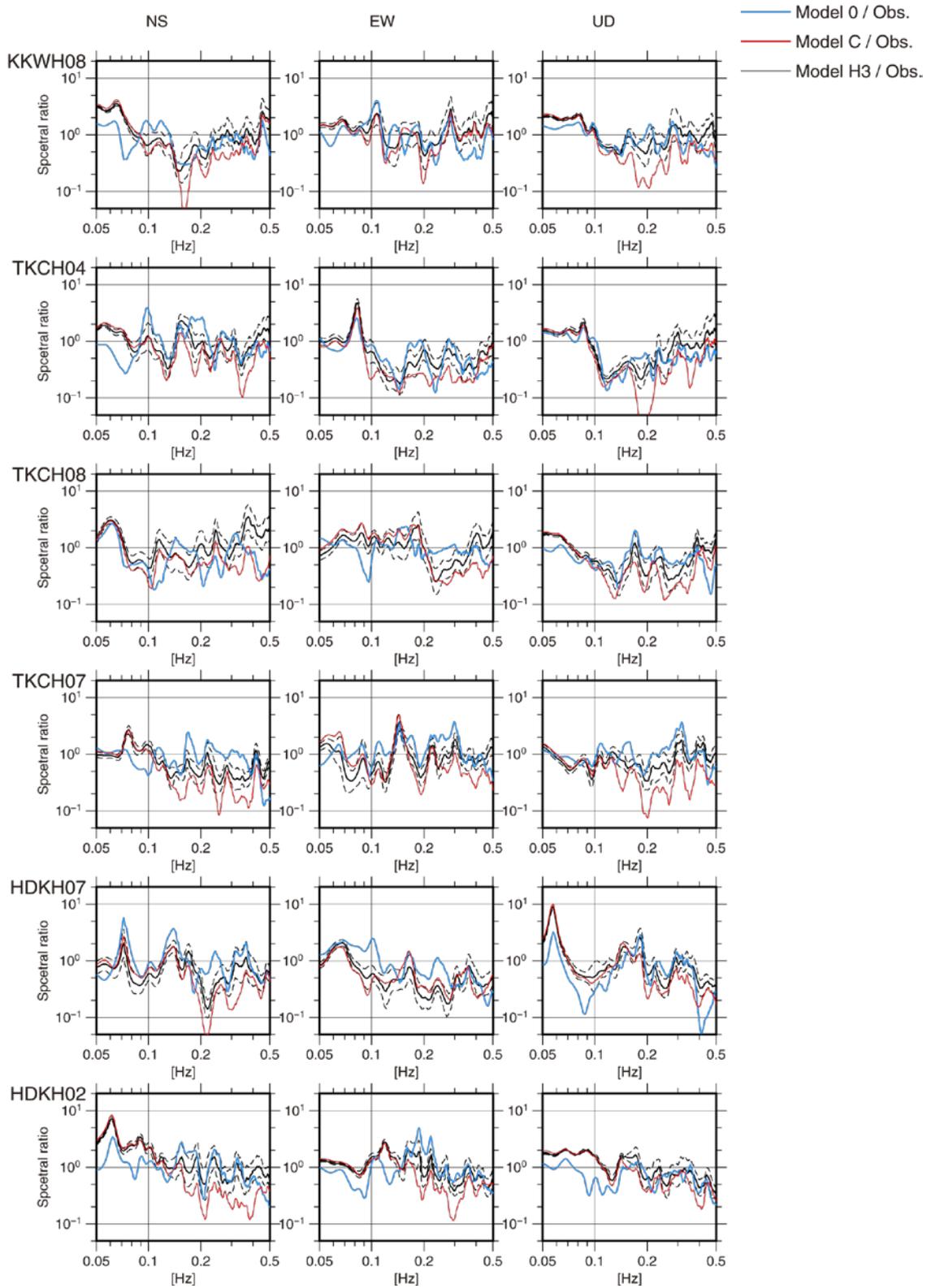


図 3-1-7 Model H3 (黒 : 25 モデル)、Model 0 (青)、Model C (赤) の観測記録に対する速度フーリエスペクトル比。

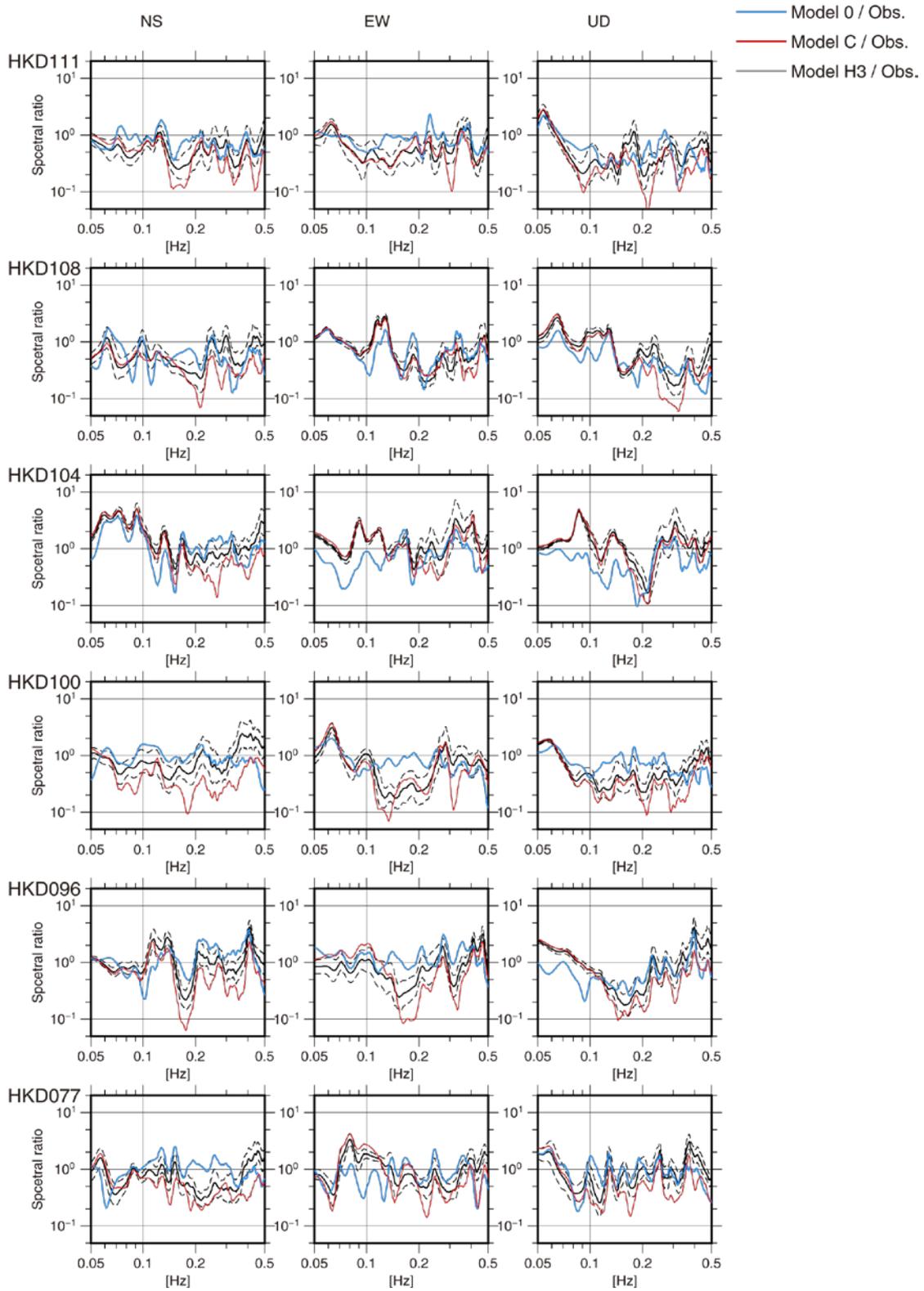


図 3-1-7 Model H3 (黒 : 25 モデル)、Model 0 (青)、Model C (赤) の観測記録に対する速度フーリエスペクトル比 (つづき)。

(4) 単純化モデル

不均質性パラメータのシミュレーション波形に対する影響を見るため、図 3-1-1 の左側の手順に従って単純化した、以下の震源モデルについても検討を行った。

(1) すべり角 : Model S1

インバージョンモデルの平均的なすべり角 127° に固定したモデル

(2) 震源時間関数 : Model S2

Model S1 の中ですべりの大きい要素断層に対するすべり時間関数の中から立ち上がりが急峻な Kostrov 関数に近いものを一つ選び、すべての要素断層のすべり速度関数をその形に統一したモデル。その際各要素断層のすべり量と最大すべり速度に達する時刻は保持する。

(3) 破壊伝播形状 : Model S3

Model S2 のすべり時間関数の形を保ったまま $V_r=3600$ m/s で同心円状に破壊させたモデル

(4) 特性化 : Model C

前節参照

速度波形の比較を図 3-1-8 に示す。Model S2 から Model S3 になるところで、観測波形に見られる比較的短周期 (10 秒以下) のパルス的な波の再現性が著しく低下していることが分かる。また、Model 0 から Model S1 において同様な波の再現性が著しく低下する場合も多く見られる (例えば、TKCH07 や HKD108 の NS 成分)。すなわち、すべり角および破壊伝播形状 (破壊伝播速度) の不均質性が地震動の特性に大きく影響している。従って、長周期地震動ハザード評価においてこれらの不均質性を考慮することが望ましいと考えられる。

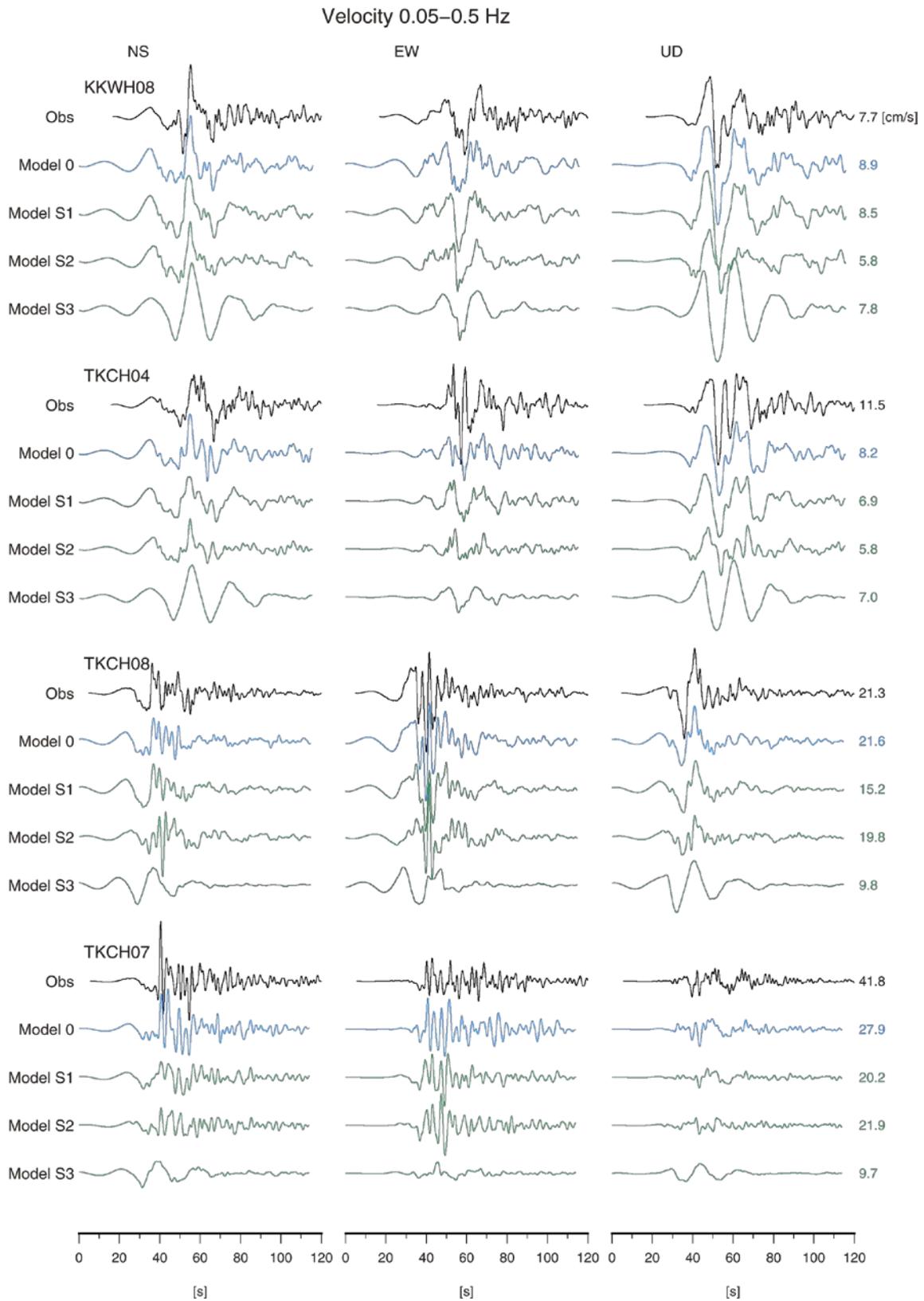


図 3-1-8 震源モデルの単純化による速度波形の比較。

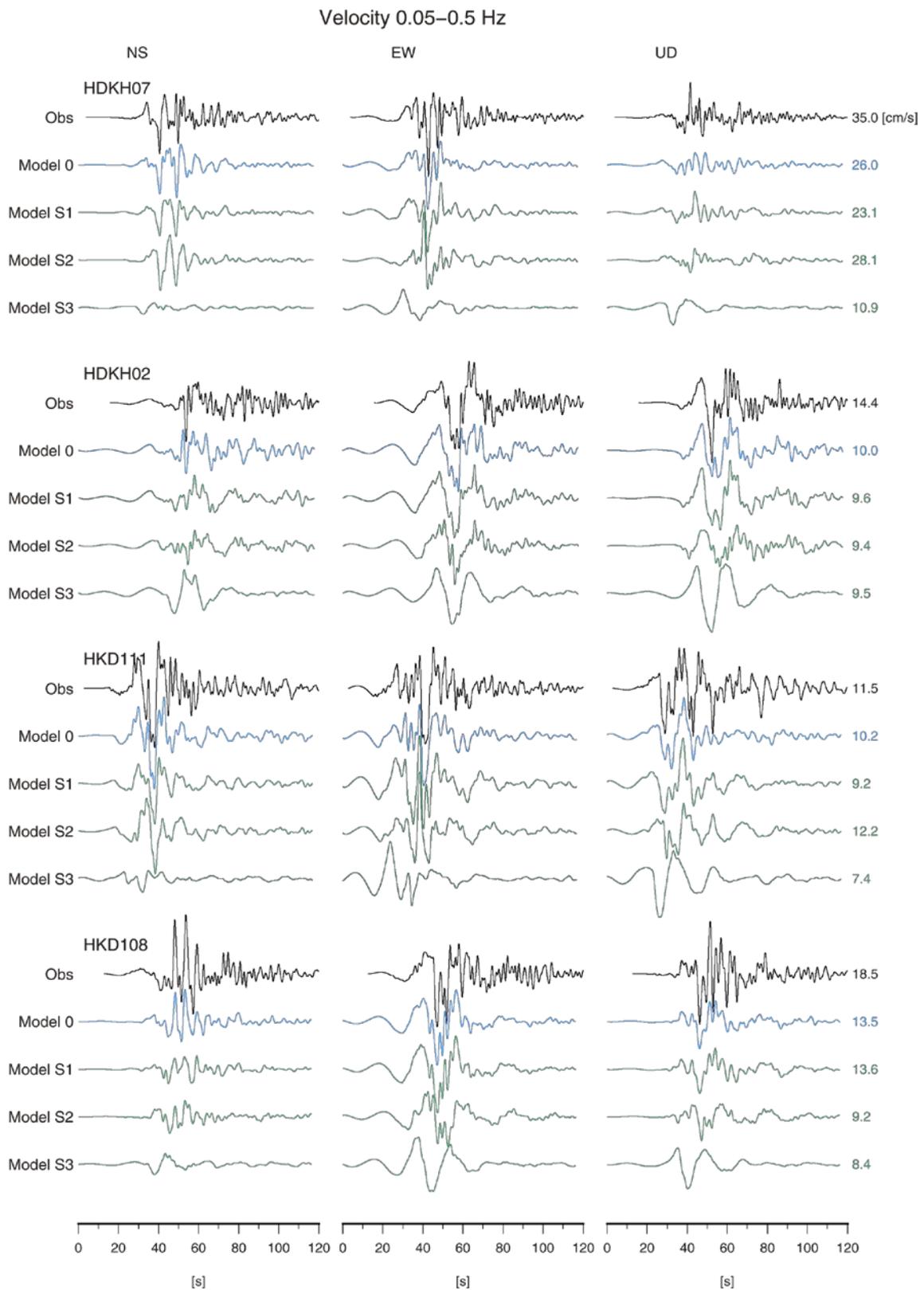


図 3-1-8 震源モデルの単純化による速度波形の比較 (つづき)。

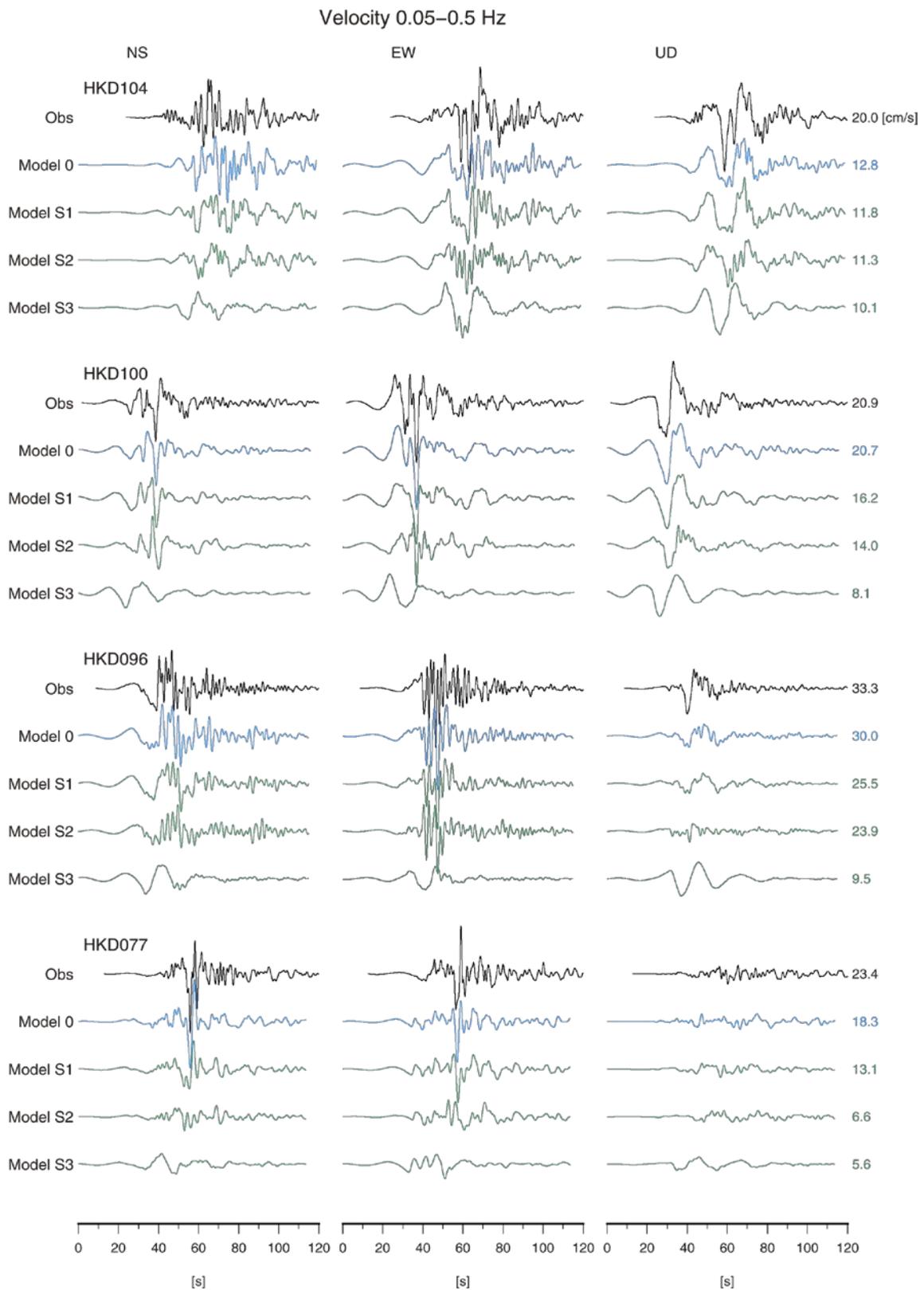


図 3-1-8 震源モデルの単純化による速度波形の比較 (つづき)。

(5) まとめ

2003年十勝沖地震を対象として特性化震源モデル (Model C) にすべり量・破壊伝播速度・すべり角についてマルチスケール不均質を導入して不均質モデル (Model H1-H3) を作成し、長周期地震動シミュレーション (周期 2-20 秒) を行い、観測記録と比較した結果として、

- ① Model C において、アスペリティ配置、アスペリティの実効応力、破壊伝播速度を試行錯誤的に変えた結果、破壊伝播速度を「レシピ」よりもやや速く ($V_r=0.8V_s$)、アスペリティの実効応力を大きく (「レシピ」の 2 倍程度) することで観測記録 (周期 5-10 秒) の説明性が向上した。
- ② しかしながら、Model C では、依然として周期 2-10 秒で過小評価となっていた。
- ③ Model H3 では、Model C での過小評価が大幅に改善した。

ことが確かめられた。また、インバージョンモデル (Model 0) から特性化モデルまで単純化したモデル (Model S1-S3) による検討結果より、

- ④ 破壊伝播様式 (速度) の不均質性が地震動の特性に最も大きく影響を及ぼしており、すべり角の不均質性も大きく影響を及ぼしている。

ことも確かめられた。④については、渡辺・他 (2008) と同様の結論となった。

このことから、周期 2 秒程度以上を対象とした長周期地震動ハザードマップ作成において震源破壊過程の不均質性を導入することが有効であることを再確認するとともに、今回設定した不均質性のパラメータとその強さ (揺らぎの範囲) がおおむね妥当であることが確かめられた。

一方で、観測記録をよく説明するアスペリティの実効応力として「レシピ」による設定値の 2 倍程度と大きな値が得られた (上記①)。このことは、2003年十勝沖地震の観測記録から推定されている加速度震源スペクトルの短周期レベルが、壇 (2001) によるプレート間地震の関係の 2 倍程度となっており、宮城県沖地震の短周期レベルと同等であること (森川・他、2007) と整合している。ただし、十勝沖地震や宮城県沖地震のアスペリティが比較的深い (40-50km) ことが原因である可能性もあり、震源域が比較的浅いフィリピン海プレート地震に対してもこの知見をそのまま取り込むことの妥当性までは踏み込めない。

2) 浅部・深部統合地盤モデルに基づく長周期地震動計算用地下構造モデル

浅部・深部統合地盤モデルは、これまで別々にモデル化が行われてきた工学的基盤よりも浅い地盤モデル（浅部地盤構造）と、それよりも深い地盤モデル（深部地盤構造）を統合した上でモデル化を行い、両方の地盤構造の影響を受ける周期帯域（周期 0.5 秒から 2 秒）における増幅特性などをより適切に評価することで、強震動の予測精度の向上を目指すものである。関東地域を対象としたモデルでは、 $V_s=350\text{m/s}$ 層上面が工学的基盤面に対応しており、それより上部（浅部）には、より低速度の複数の層がモデル化されている。3次元差分法による地震動シミュレーション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する。なお、関東地域の浅部・深部統合地盤モデルの作成は、「首都直下地震防災・減災特別プロジェクトの最終成果報告について」および防災科学技術研究所（2013）の成果や手法をもとに、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「レジリエントな防災・減災機能の強化」の課題「リアルタイム被害推定・災害情報収集・分析・利活用システム開発」の一環として行われているものであり、本検討ではその成果を活用している。

（1）本検討で用いる浅部・深部統合地盤モデルの概要

ここでは、関東地方全域を対象として作成されている浅部・深部統合地盤モデルを用いる。モデルの作成手順は先名・他（2011）に準じて対象地域を拡張したものとなっており、地質モデルをベースとした初期浅部・深部統合地盤モデルを作成し、微動アレイ観測により求められるレイリー波の位相速度と地震観測記録より求められる R/V （水平動のうち **Radial** 成分と上下動 **Vertical** 成分の比）、または微動の H/V （水平動／上下動比）を用いたジョイントインバージョン解析により初期モデルを修正する。ここでは、平成 27 年 11 月時点で用いることができる最新のモデルを用いることとした。用いるモデルの代表的な速度層の上面深さ分布を図 3-1-9 に示す。

（2）計算用地下構造モデルの作成

上述の浅部・深部統合地盤モデルには、沈み込むプレートの構造が含まれていない。本検討では、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を行うために、 $V_s350\text{m/s}$ 層より上部層をはぎ取り、全国 1 次地下構造モデル（暫定版）（地震調査委員会、2012）の上部地殻第 2 層（ $V_s3400\text{m/s}$ ）以深の層を下部に結合した構造モデル（SDh-v6_1 (Ver.6)）を作成した（表 3-1-4 および図 3-1-10）。作成した地下構造モデルの長周期地震動シミュレーションにおける有効な周期帯域を確認するため、3次元差分法による実地震を対象とした地震動計算を行い、観測記録と比較する。ここでは、比較対象のため、位相速度と R/V データのフォワード計算により調整した旧版の浅部・深部統合地盤モデル（SDh_v5_1 (Ver.5)）、および全国 1 次地下構造モデル（暫定版；以下 **JI** と記す）そのものを用いた計算も行う。

水平 70m×鉛直 35m のグリッド間隔で差分格子を作成した。Q 値は S 波速度の 1/5 とし、参照周期を 3 秒とした。地震動計算には GMS (青井・他、2004) を用いる。図 3-1-10 に示した領域を水平 50m×鉛直 25m のグリッド間隔 (深さ 7.5km~50km までは 3 倍の大きさのグリッド間隔) で差分格子を作成した。Q 値は S 波速度の 1/5 とし、参照周期は解析周期帯域を考慮し 3 秒とした。計算の対象とした地震は図 3-1-11 に示した 5 個であり、F-net による震源メカニズム解と地震モーメントを用いた。震源時間関数は smoothed ramp 関数とし、震央付近の観測記録と整合するようにパルス幅を調整して用いた。茨城県、千葉県、群馬県、埼玉県、東京都、神奈川県内の K-NET と KiK-net の 197 観測点での波形を出力した。比較の対象とする観測記録は、浅部・深部統合地盤モデルの浅部地盤モデルに基づいて補正した解放工学的基盤上のものとした。

差分法の計算結果評価については、SCEC (Southern California Earthquake Center) の広帯域地震動評価の検証で用いられている GOF (Goodness-Of-Fit; $GOF = \ln(\text{data}/\text{model})$) の手法を参考とする。SCEC の評価では、変位応答から求める擬似加速度応答スペクトル (PSA) の RotD50 (0° ~180° まで 1 度ずつ水平 2 成分を投影して得られる波形から PSA を求め、周期ごとの中央値をつないだもの) が用いられているが、ここでは水平 2 成分のフーリエスペクトルのベクトル合成値を用いている。全データを用いた検討から、平均値とばらつき (S.D.) を用いて評価する。

$$S.D = \sqrt{\frac{1}{n} \sum \{\log_{10}(\text{data}/\text{model})\}^2}$$

結果を図 3-1-12 に示す。同図では、地震動の H/V (水平動/上下動) スペクトル比の平均値の比較を下段に、中段には 3 つの周期帯域 (周期 1~2 秒、2~5 秒、5~10 秒) での平均値 (黒実線) と標準偏差 (黒点線) も示している。平均値がゼロに近い場合でも、標準偏差が大きいと計算は計の周期特性が観測波形との合致度が良いわけではないことを表す。

5 地震 197 地点の結果による観測波形 (data) と計算波形 (model) の合致度を図 3-1-13 ~図 3-1-18 にそれぞれ示す。これらの結果より、平均値および標準偏差とも周期 2~10 秒の帯域で SDh-v6_1 が JI や SDh_v5_1 よりも改善されていることが見て取れる。ただし、周期 1~2 秒については改善が顕著ではない。ただし、全国 1 次地下構造モデルは周期 1 秒までの精度は保障されていないことに注意する必要がある。

地下構造モデルについては、今後もデータの蓄積やチューニングにより改良が続けられるものである。以後の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においては、現時点における最適なモデルとしてここで示したものを用いることとする。

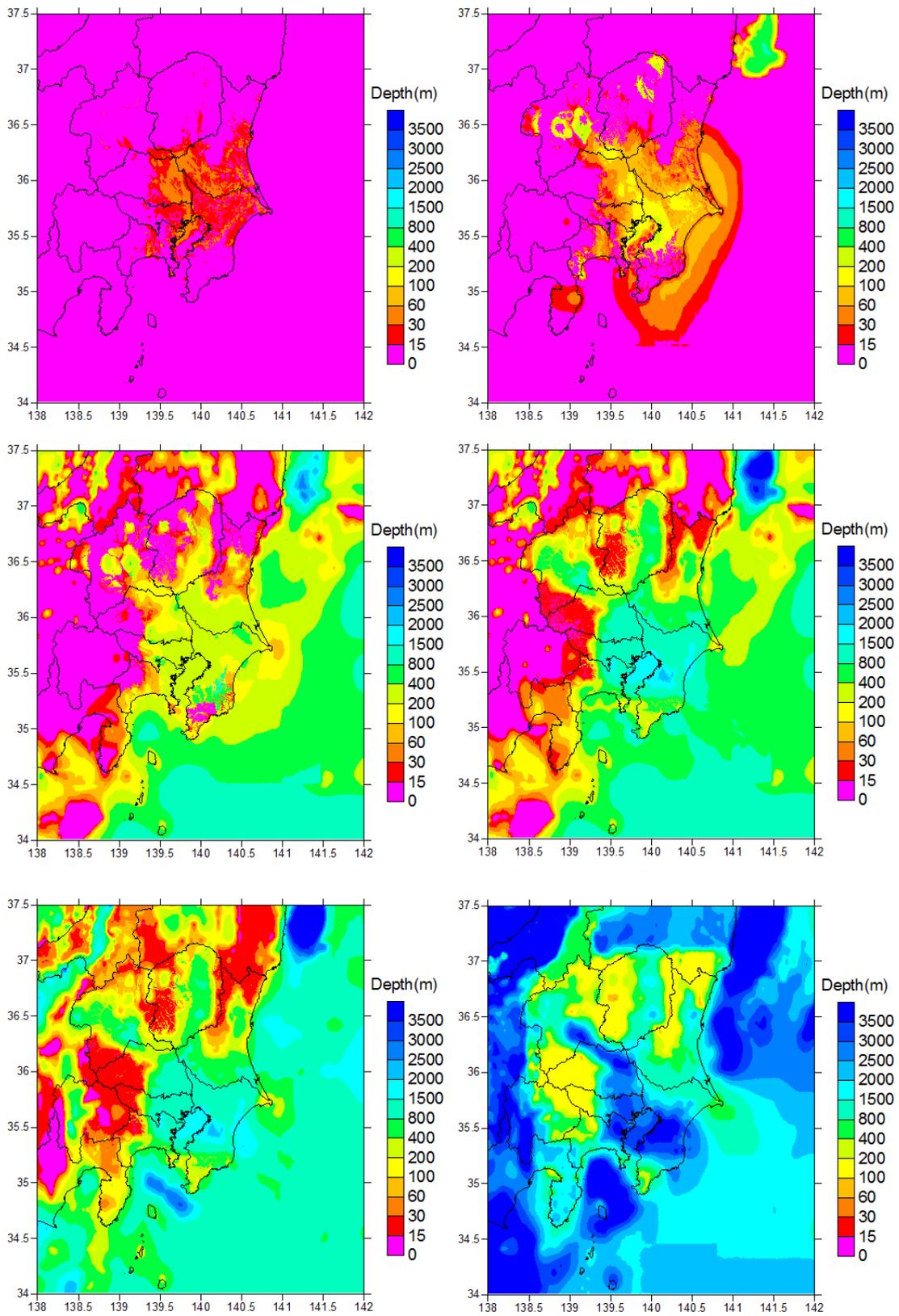


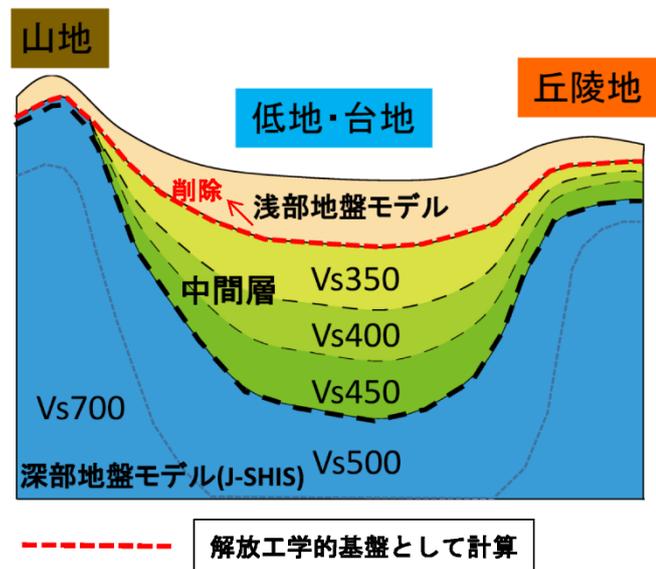
図 3-1-9 検討で用いる浅部・深部統合地盤モデルの代表的な速度層上面深さ分布。

表 3-1-4 地下構造モデルの物性値。

	P波速度 m/s	S波速度 m/s	密度 g/m ³	Qs	
1	1600	350	1850	70	浅部・深部統合地盤モデル
2	1600	400	1850	80	
3	1700	450	1900	90	
4	1800	500	1900	100	
5	1800	550	1900	110	
6	2000	600	1900	120	
7	2100	700	2000	140	
8	2100	750	2000	150	
9	2200	800	2000	160	
10	2300	850	2050	170	
11	2400	900	2050	180	
12	2500	1000	2100	200	
13	2500	1100	2150	220	
14	2700	1300	2200	260	
15	3000	1400	2250	280	
16	3200	1500	2250	300	
17	3400	1600	2300	320	
18	3500	1700	2300	340	
19	3700	1900	2350	380	
20	3800	2000	2400	400	
21	4000	2100	2400	400	
22	4000	2100	2400	400	
23	5000	2700	2500	400	
24	4600	2900	2550	400	
25	5500	3100	2600	400	
26	5500	3200	2650	400	
27	5800	3400	2700	400	
28	6400	3800	2800	400	
29	7500	4500	3200	500	
30	5000	2900	2400	200	
31	6800	4000	2900	300	
32	8000	4700	3200	500	
33	5400	2800	2600	200	
34	6500	3500	2800	300	
35	8100	4600	3400	500	
					全国1次地下構造モデル

※ Qs 値は、 $Q_s = V_s/5$ として設定した。

※ 〇は陸域でモデル化されている主要な層



※比較対象の観測地震波形は、浅部地盤モデルデータに基づき、一次元重複反射法にて工学的基盤上面 ($V_s=350(m/s)$) まで戻す処理を行っている (図 11)。

図 3-1-10 計算に使用するモデルの範囲。

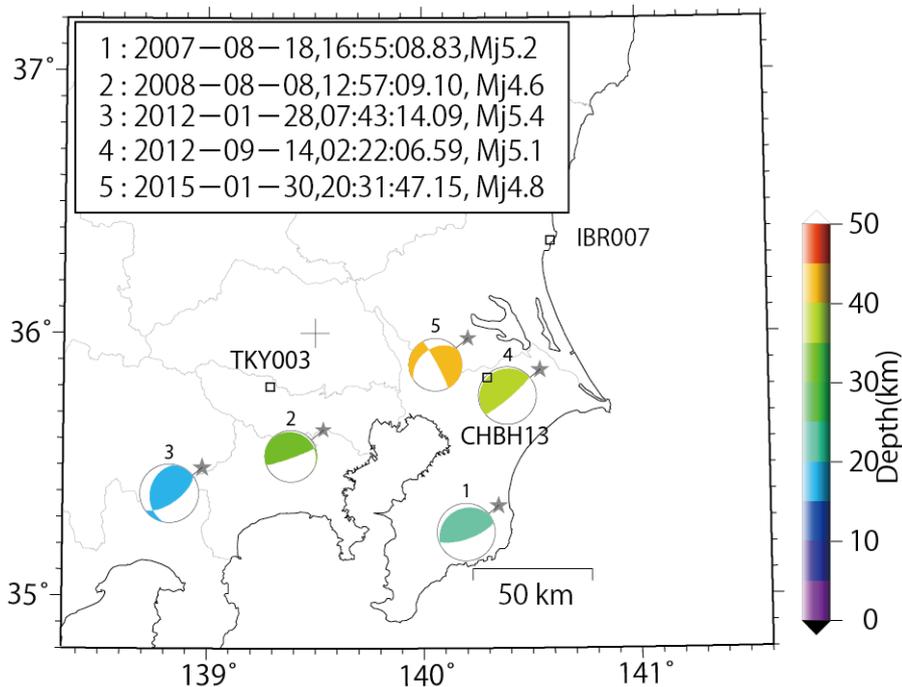


図 3-1-11 検討に用いた地震。メカニズム解は防災科研の F-net による。

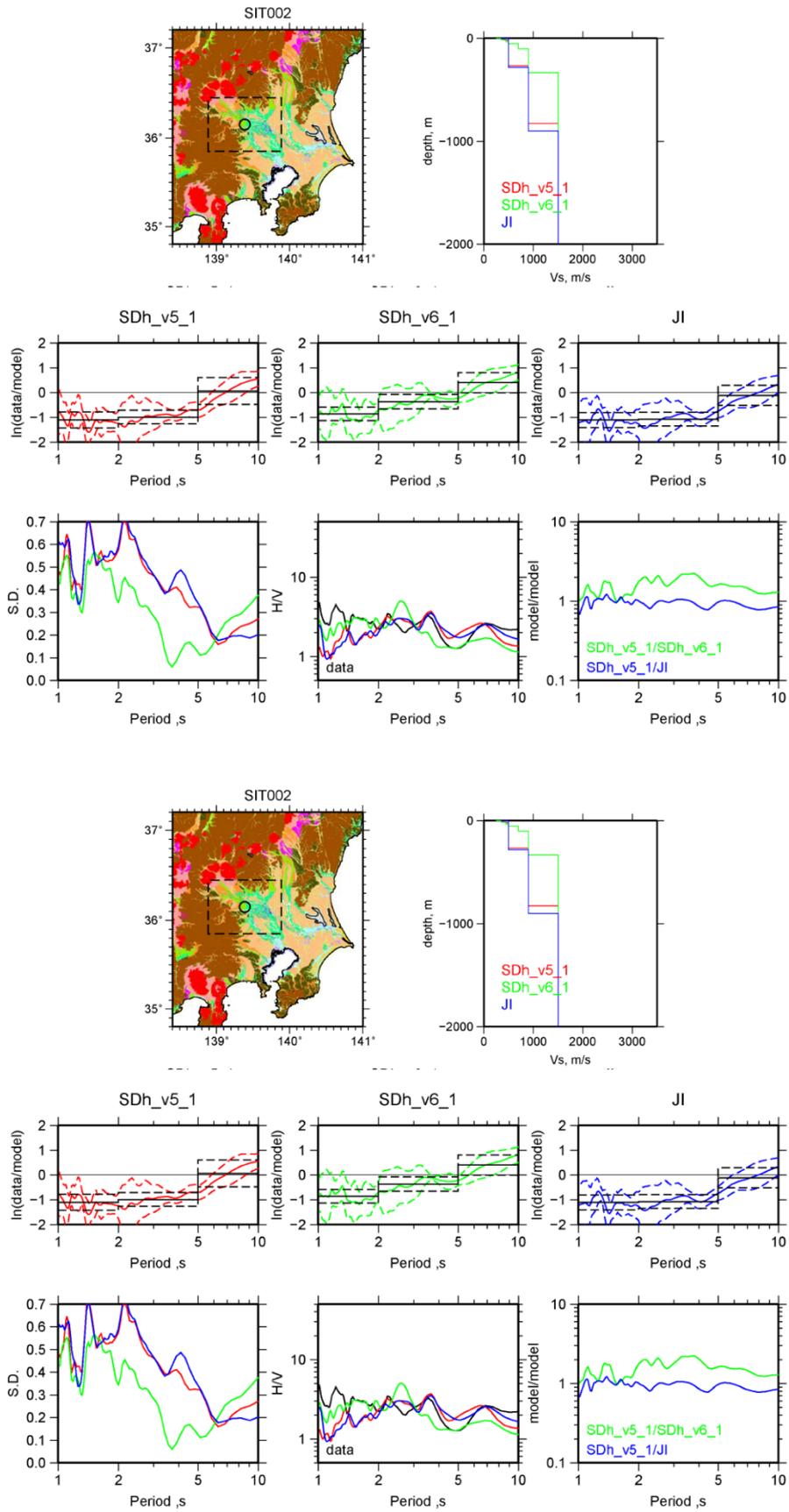


図 3-1-12 差分法による計算波形と観測波形の比較。

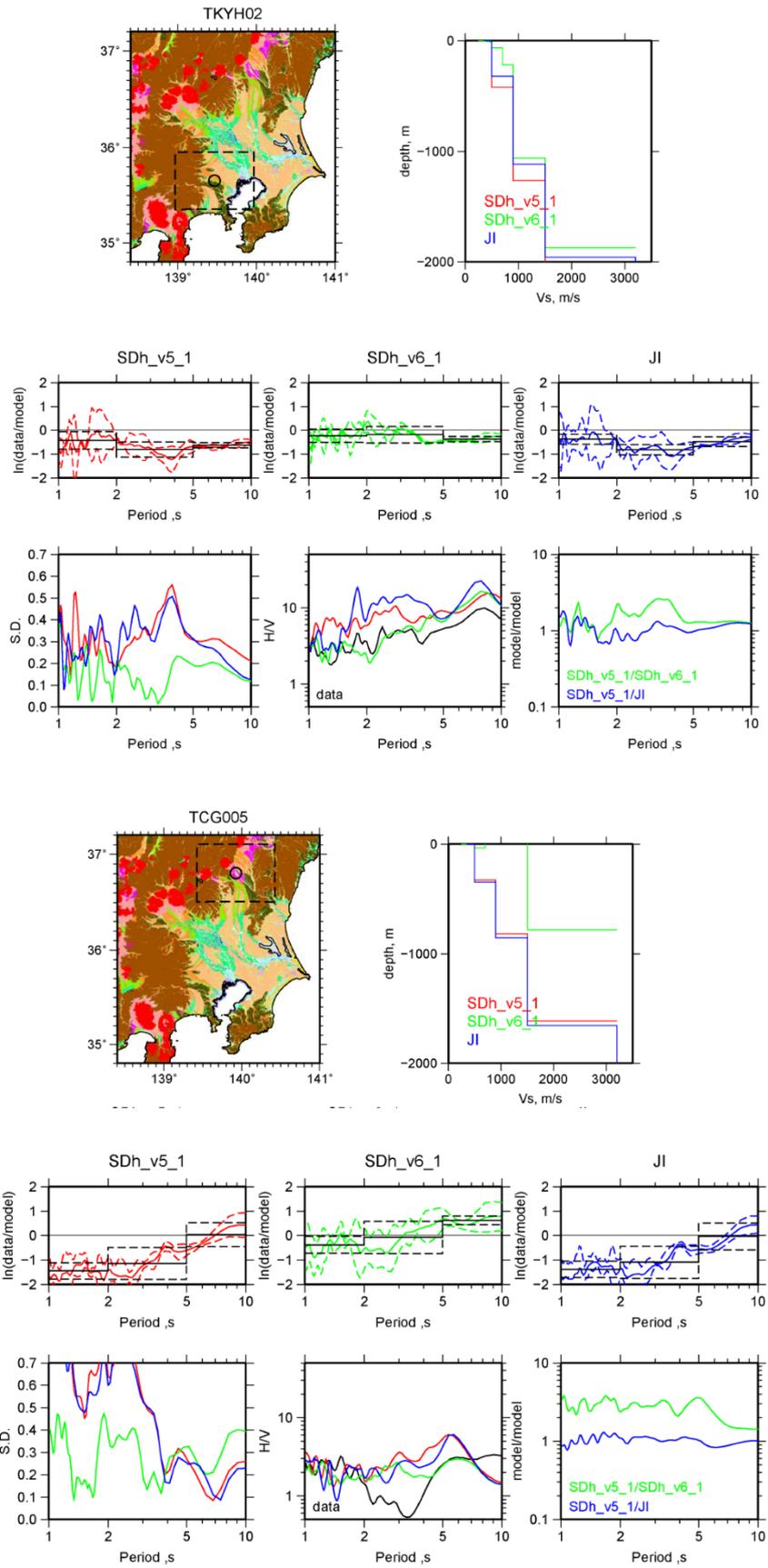
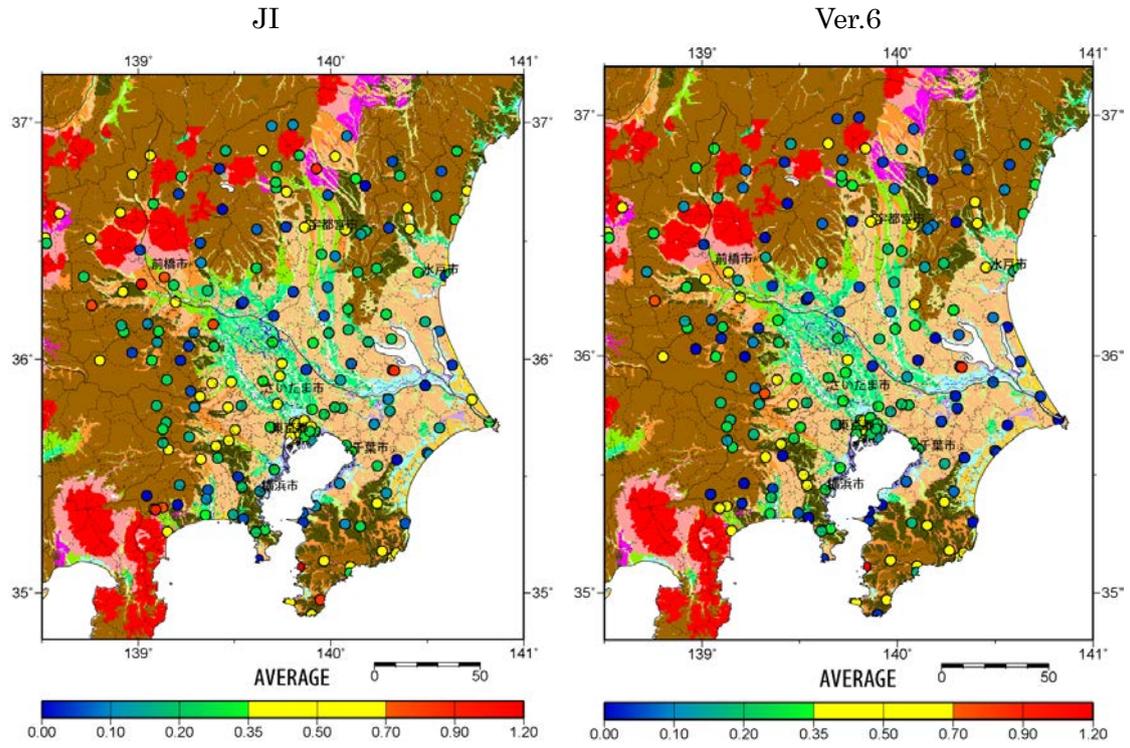


図 3-1-12 差分法による計算波形と観測波形の比較 (つづき)。

周期 1 ~ 10 秒



周期 1 ~ 2 秒

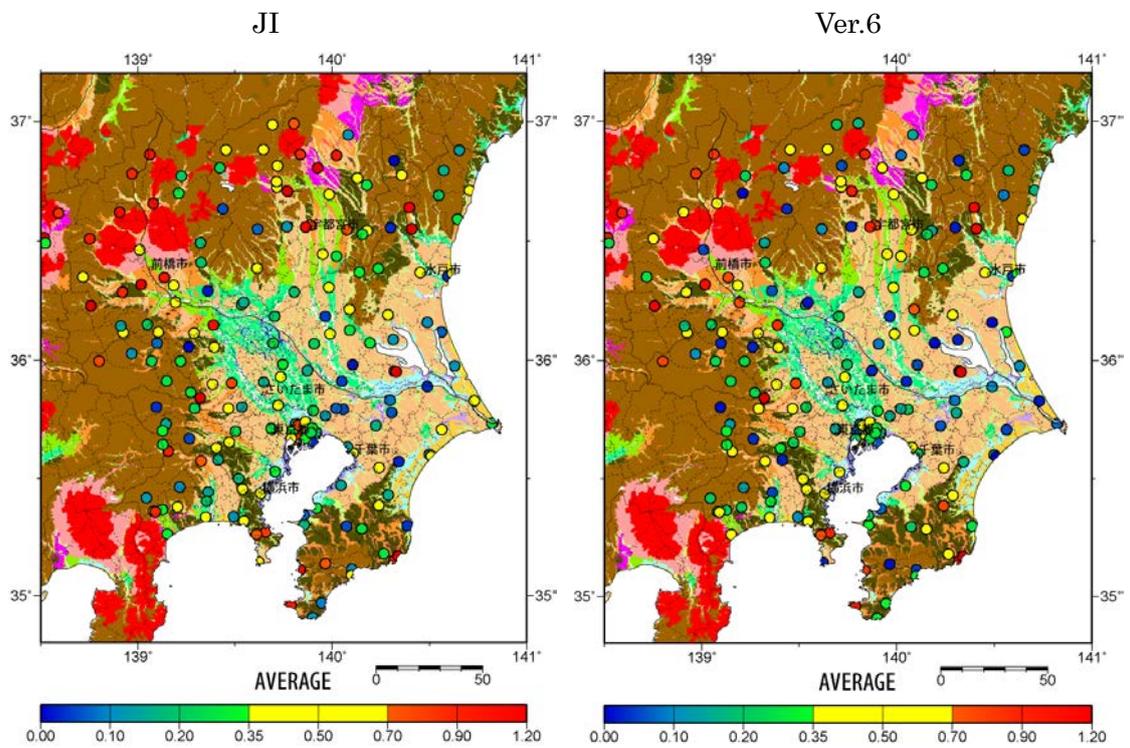
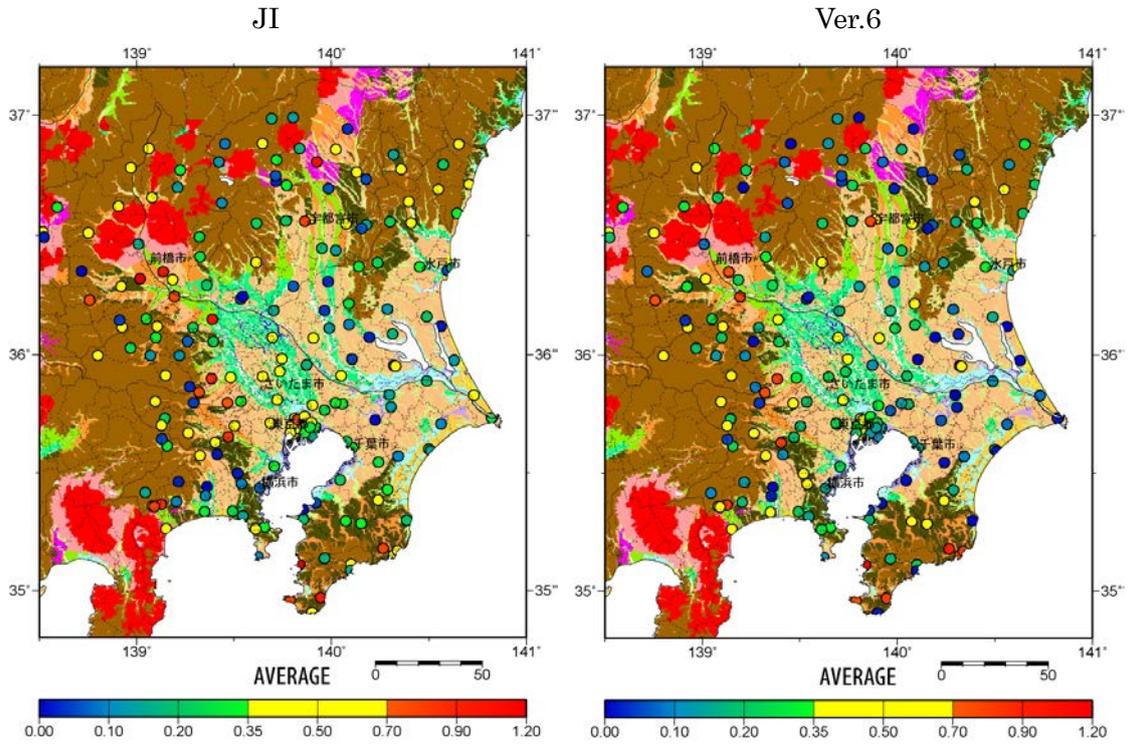


図 3-1-13 平均値 ($|\ln(\text{data}/\text{model})|$) の分布。

周期 2~5 秒



周期 5~10 秒

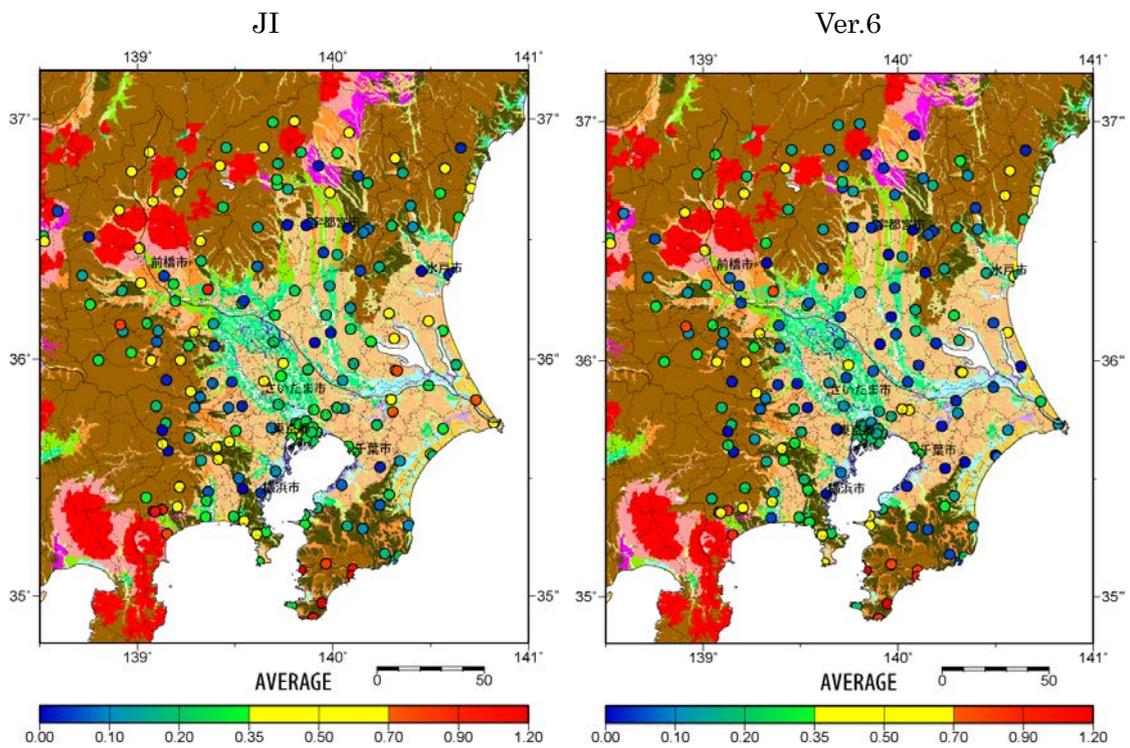
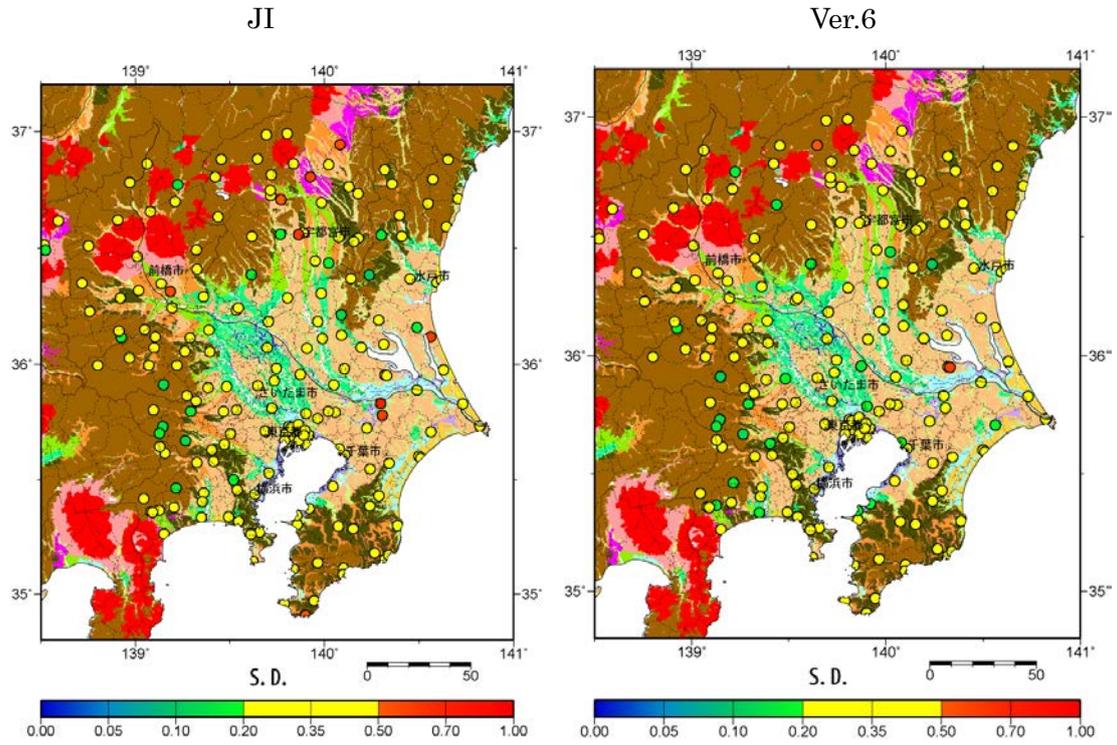


図 3-1-13 平均値 ($|\ln(\text{data}/\text{model})|$) の分布 (つつき)。

周期 1~10 秒



周期 1~2 秒

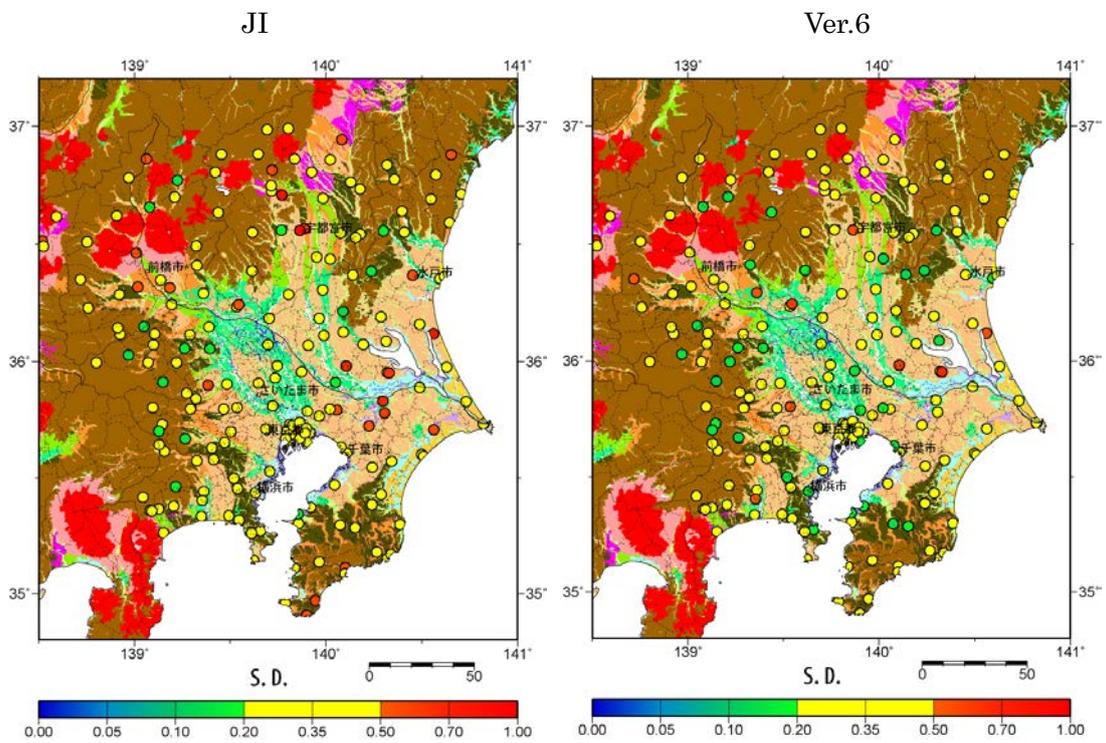
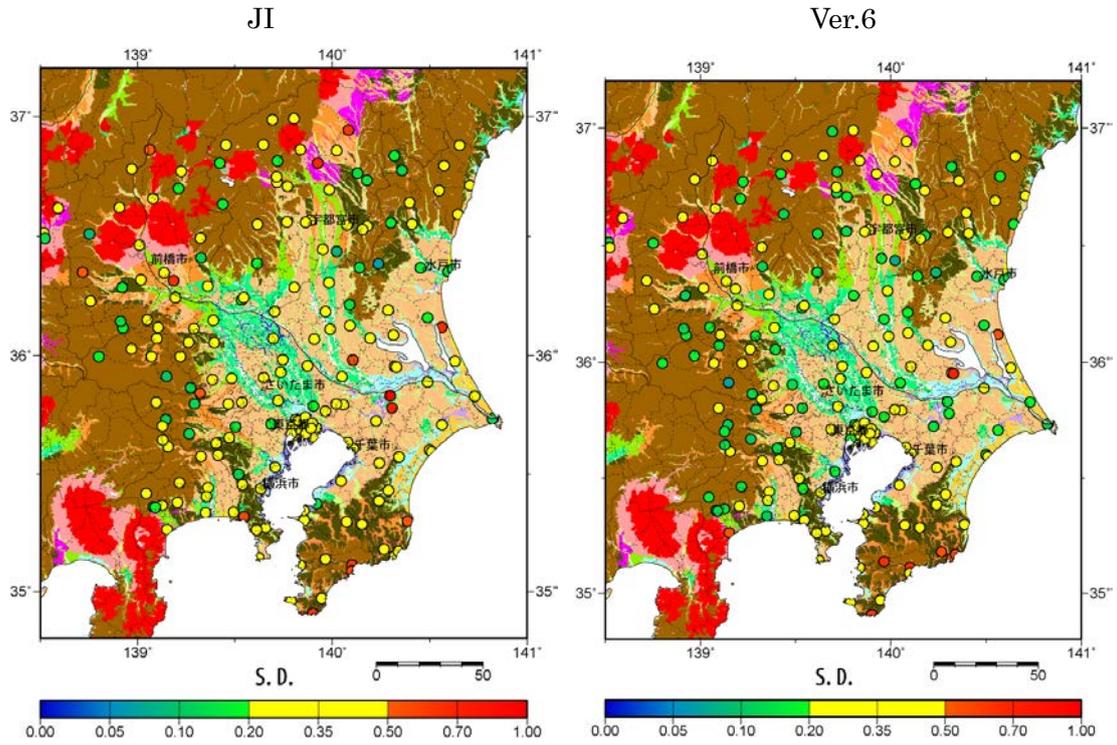


図 3-1-14 標準偏差 (S.D.) の分布。

周期 2~5 秒



周期 5~10 秒

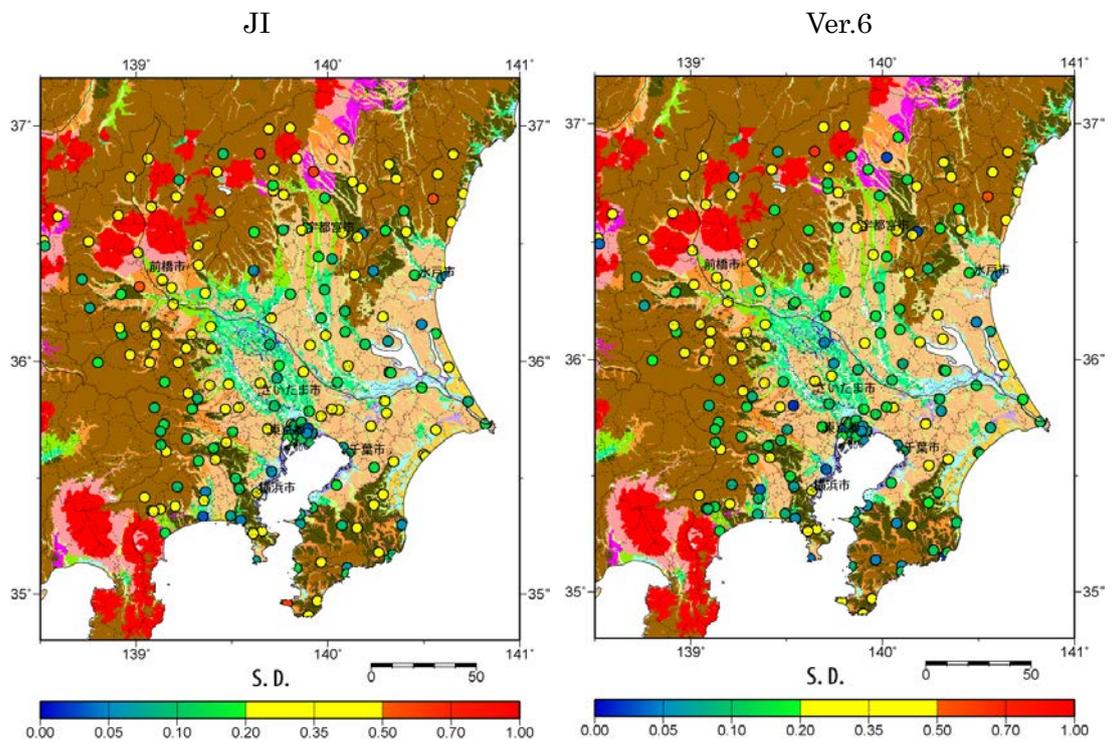


図 3-1-14 標準偏差 (S.D.) の分布 (つづき)。

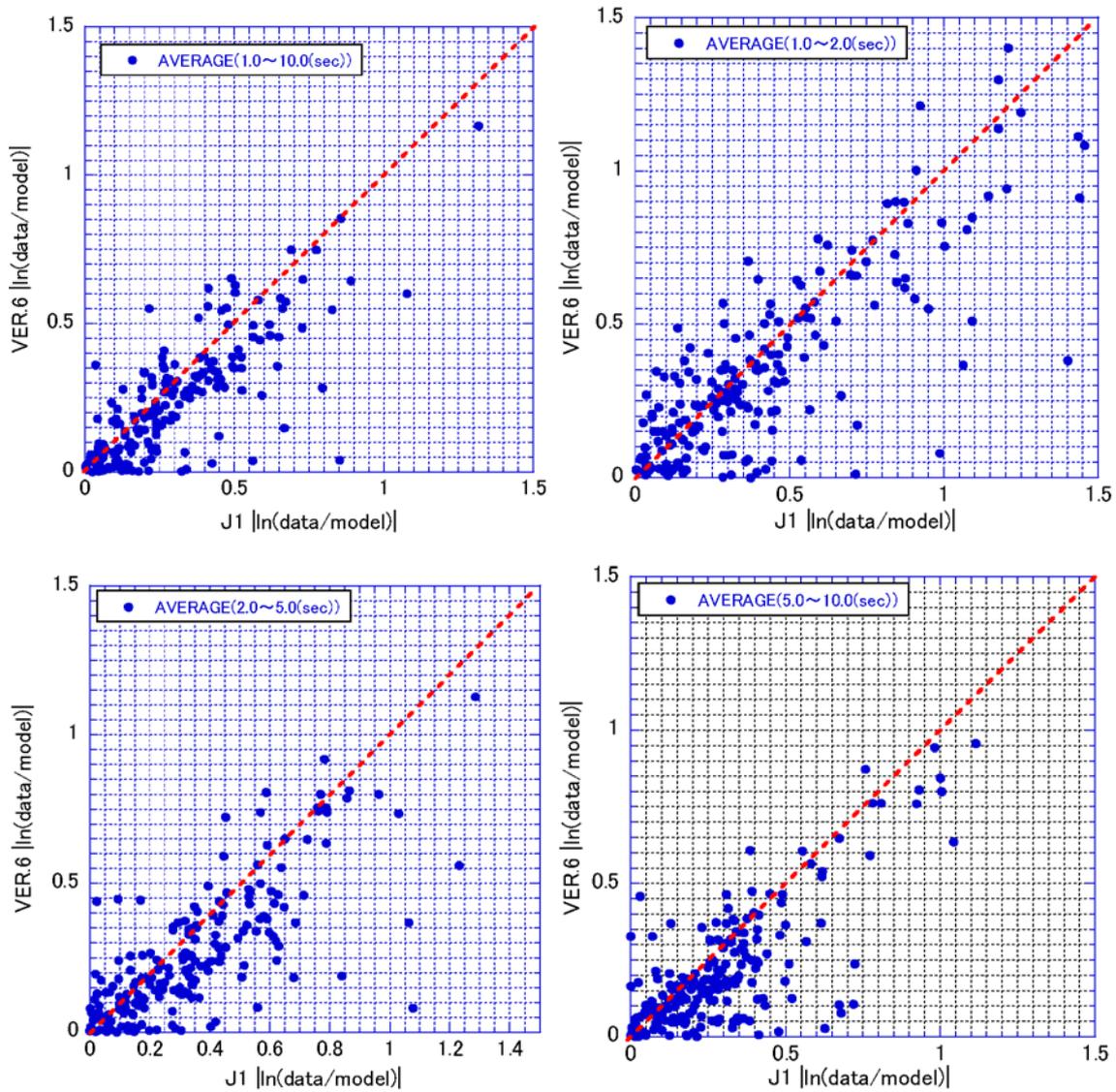


図 3-1-15 全国 1 次地下構造モデルと Ver.6 モデルにおける平均値の比較。

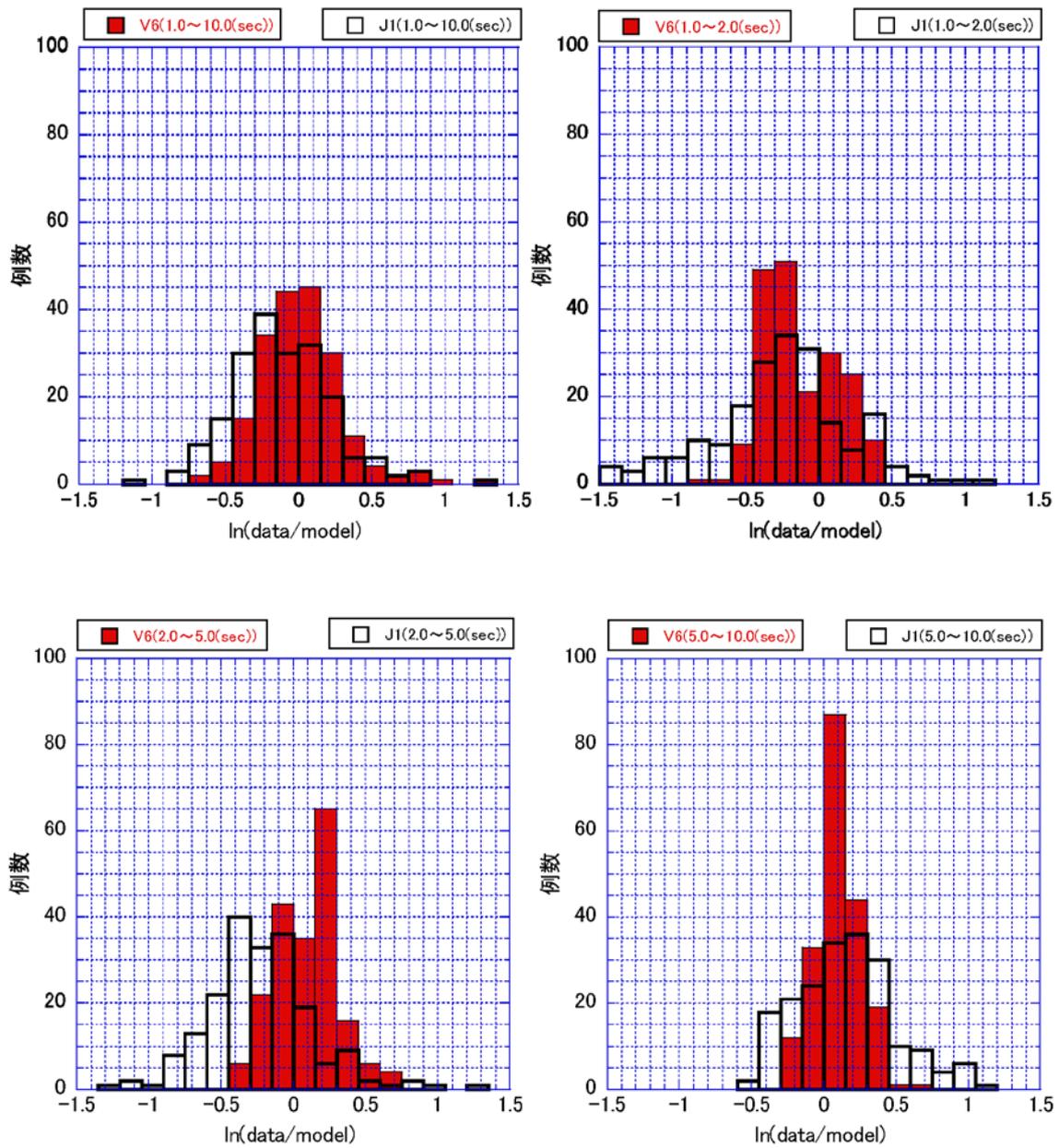


図 3-1-16 全国 1 次地下構造モデルと Ver.6 モデルにおける平均値のヒストグラム。

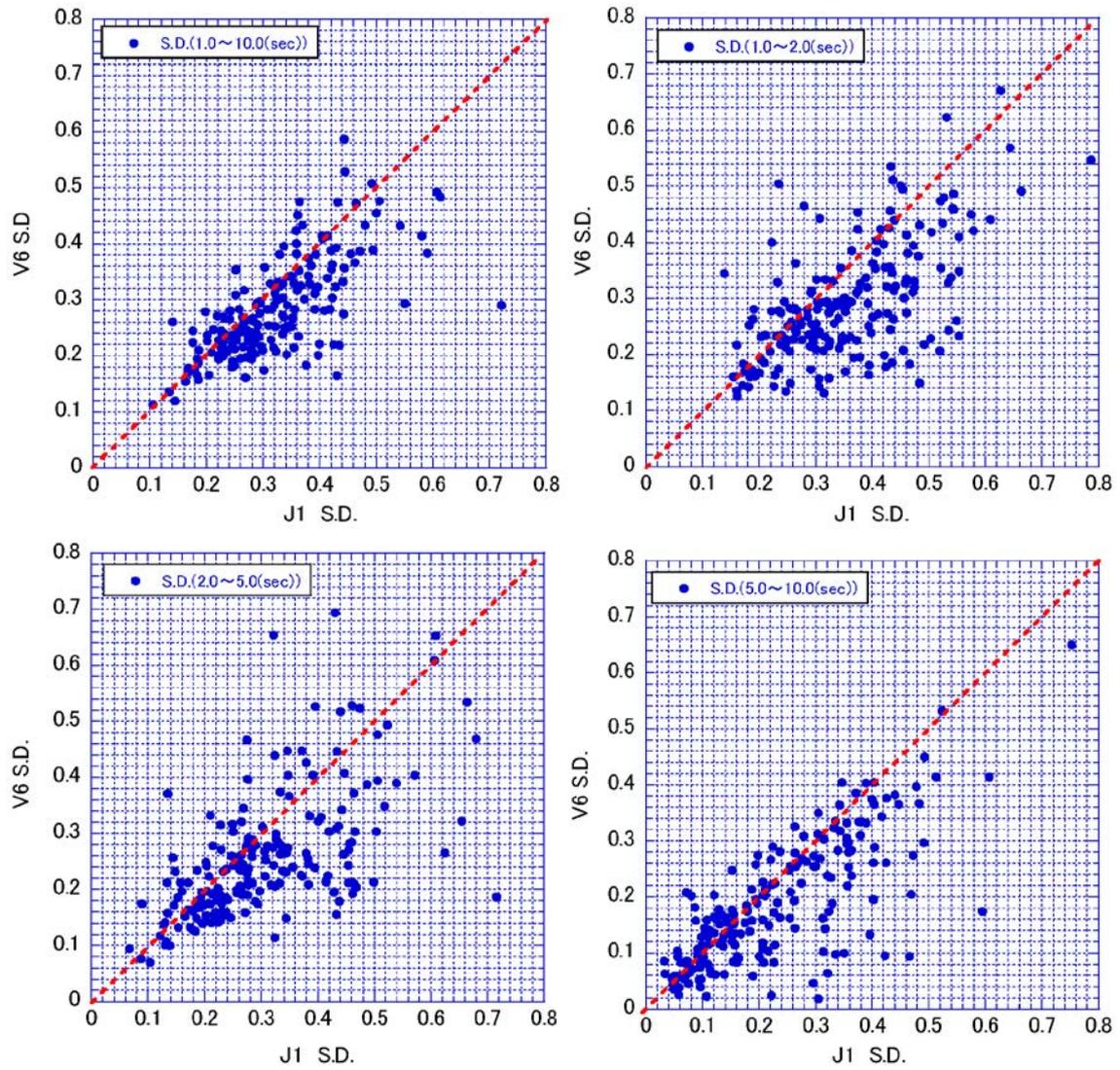


図 3-1-17 全国 1 次地下構造モデルと Ver.6 モデルにおける標準偏差 (S.D) の比較。

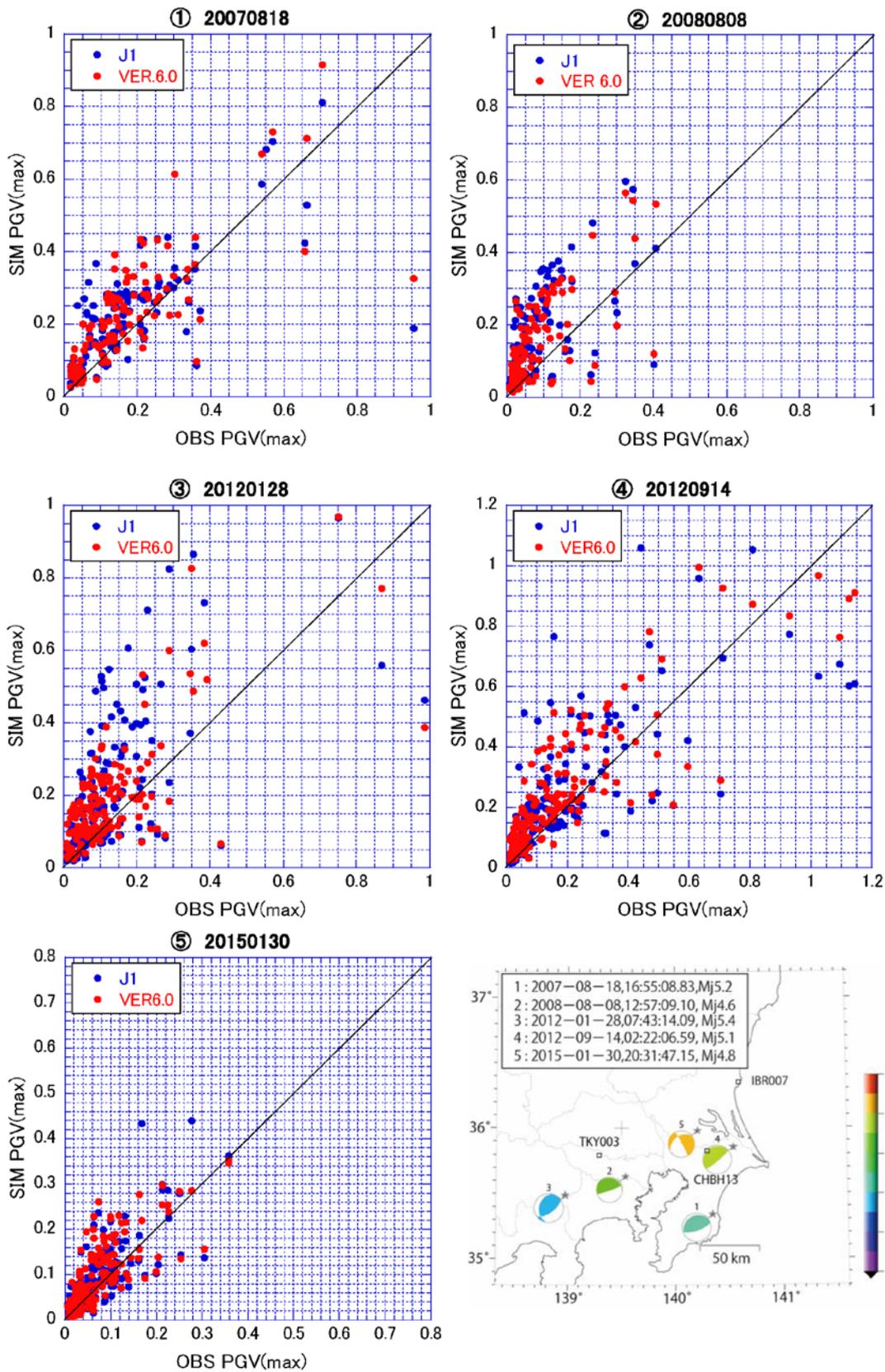


図 3-1-18 各震源における差分法計算波形における最大速度 (SIM PGV(max)) と観測波形の最大速度 (OBS PGV(max)) の比較。

(c) 結論ならびに今後の課題

長周期地震動ハザード評価の広帯域化に向けた検討を実施した。震源のモデル化については、関口・吉見（2006）によるマルチスケールの不均質性を導入することにより、周期 2 秒程度以上の長周期地震動の計算に有効となるすべり量、破壊伝播速度およびすべり角の範囲を、2003 年十勝沖地震を対象とした検証により明らかにした。また、地下構造モデルについては、関東地域において構築中の浅部・深部統合地盤モデルを用いて、中規模地震の観測記録の再現性について検討した。その結果、周期 1 秒以上については、全国 1 次地下構造モデル（暫定版）と同等かそれ以上の再現性が確認された。以上より、相模トラフの M8 クラスの地震を対象とした長周期地震動ハザード評価においては、震源モデルの妥当性という観点から、現状では 2 秒以上が限界であることを示した。

一方で、以下の課題が残されている。

- ・ 2003 年十勝沖地震の観測記録をもっともよく説明できる震源モデルでは、「レシピ」に従うモデルに対して実効応力が 3 倍程度となっていた。これが、震源の深さや地域性によるものかどうか、今後の記録の蓄積等による更なる検討が必要である。
- ・ 2003 年十勝沖地震はマグニチュード 8 程度の地震であったが、マグニチュード 9 クラスの地震に対しても今回の検討で得られた結果をそのまま適用できるかどうかについて、更なる検討が必要である。
- ・ 本検討において、周期 1 秒程度まで長周期地震動シミュレーション結果の妥当性を確認できなかった理由として、対象とした北海道地域（海域を含む）の地下構造モデルが周期 1 秒程度まで十分にはチューニング（調整）されていないこともある。
- ・ 海溝型巨大地震を対象とした長周期地震動ハザード評価において周期 1 秒程度まで広帯域化するためには、震源域（海域）を含めてチューニングされた 3 次元の地下構造モデルが必要である。
- ・ 差分法の計算で設定しているよりも Q 値による減衰の効果が小さい傾向がみられ、地震動シミュレーションのためには、速度構造のみならず、減衰構造（ Q 値）に関する調整も必要である。

(d) 引用文献

Aoi, S., R. Honda, N. Morikawa, H. Sekiguchi, H. Suzuki, Y. Hayakawa, T. Kunugi, and H. Fujiwara, 2008, Three-dimensional finite difference simulation of long-period ground motions for the 2003 Tokachi-oki, Japan, earthquake, *J. Geophys. Res.*, **113**, B07302, doi:10.1029/2007JB005452.

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.

壇一男・渡辺基史・佐藤俊明・石井透, 2001, 断層の非一様性すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化, 日本建築学会構造系論文集, **545**, 51-62.

Dreger, D. S., G. C. Beroza, S. M. Day, C. A. Goulet, T. H. Jordan, P. A. Spudich, and J. P. Stewart, Validation of the SCEC broadband platform V14.3 simulation

- methods using pseudospectral acceleration data, *Seism. Res. Lett.* **86**, 39-47.
- Goulet, C. A., N. A. Abrahamson, P. G. Somerville, and K. E. Woodbell (2015). The SCEC broadband platform validation exercise: Methodology for code validation in the context of seismic-hazard analyses, *Seism. Res. Lett.* **86**, 17-26.
- 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.
- Mai, M. P. and G. C. Beroza, 2002, A spatial random field model to characterize complexity in earthquake slip, *J. Geophys. Res.*, **107**, doi:10.1029/2001JB000588.
- Murotani, S., H. Miyake and K. Koketsu, 2008, Scaling of characterized slip models for plate-boundary earthquakes, *Earth Planets Space*, **60**, 987-991.
- 森川信之・藤原広行・河合伸一・青井真・功刀卓・石井透・早川譲・本多亮・小林京子・大井昌弘・先名重樹・奥村直子, 2007, 2003年十勝沖地震の観測記録を用いた強震動予測手法の検証, 防災科学技術研究所研究資料第303号, 149 pp.
- 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.
- 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.
- 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.

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			

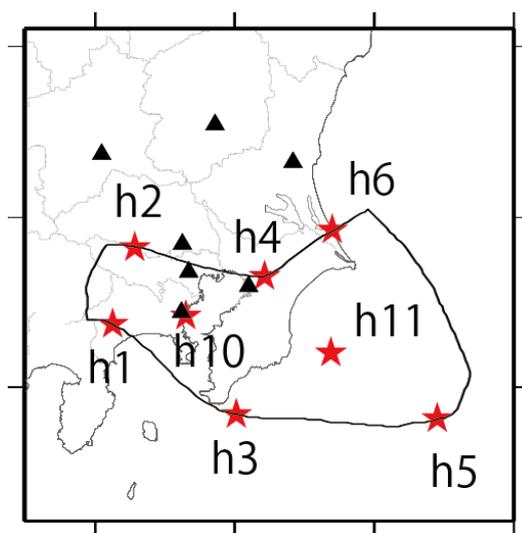


図 3-2-1 破壊開始点の位置（赤星印）。▲は都県庁の位置を示す。

Area-01

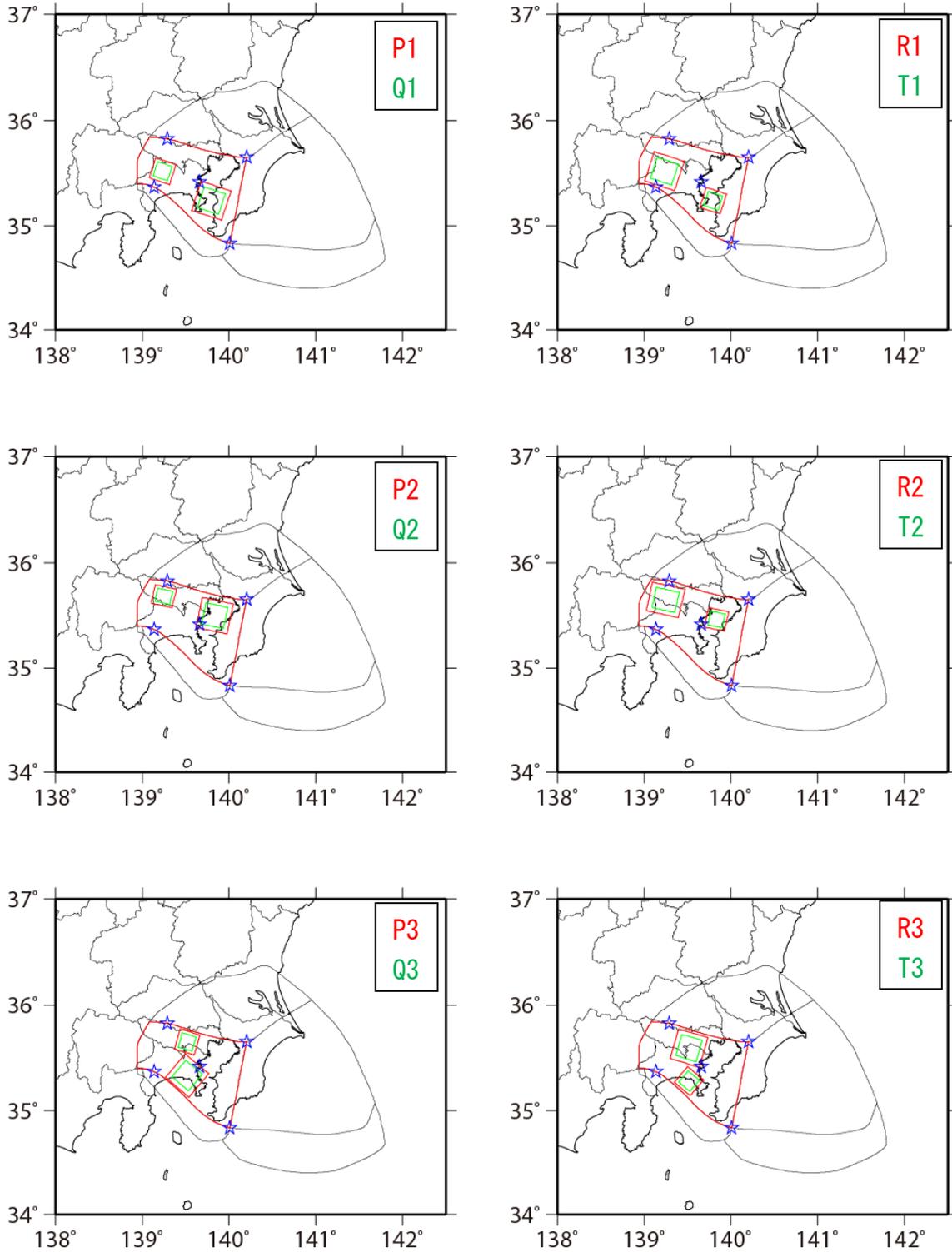


図 3-2-2 領域番号 1 における基本ケースのアスペリティ (赤および緑の矩形) と破壊開始点 (青星印)。アスペリティ配置の名称を図中に示している。

Area-02

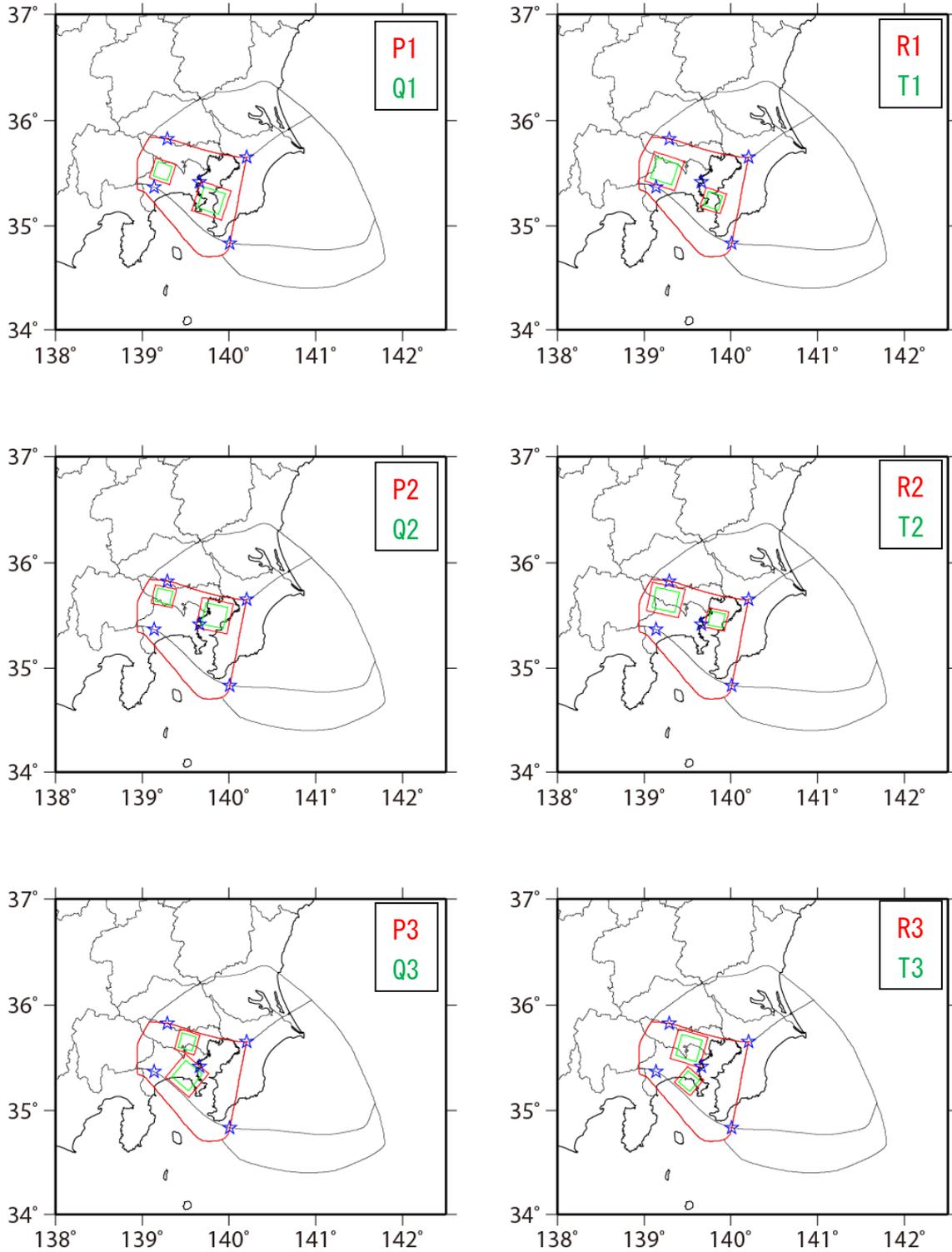


図 3-2-3 領域番号 2 における基本ケースのアスペリティ (赤および緑の矩形) と破壊開始点 (青の星印)。

Area-06

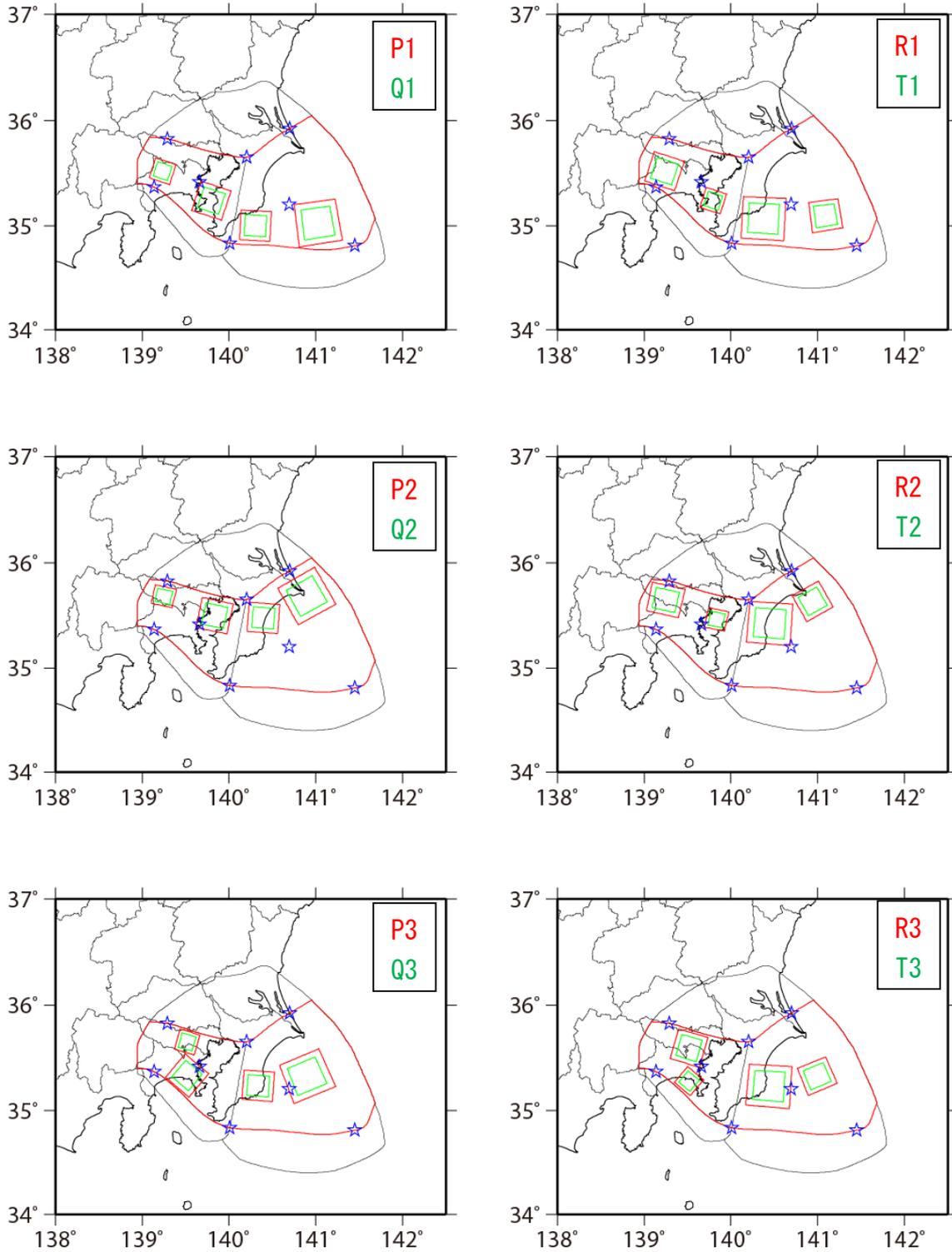


図 3-2-4 領域番号 6 における基本ケースのアスペリティ (赤および緑の矩形) と破壊開始点 (青の星印)。

Area-07

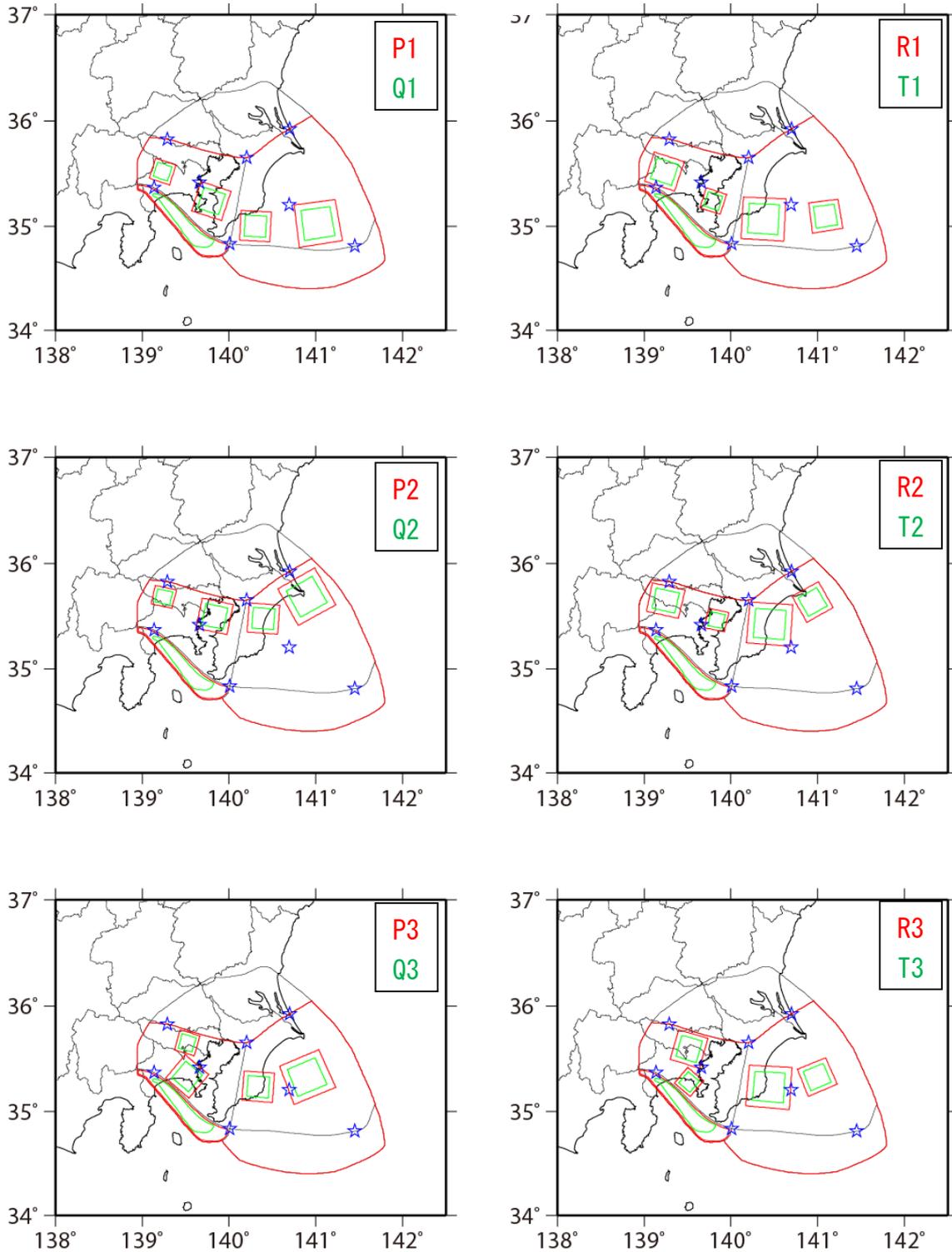


図 3-2-5a 領域番号 7 における基本ケースのアスペリティ（赤および緑の矩形等）と破壊開始点（青の星印）。大すべり域が西側のケース。

Area-07

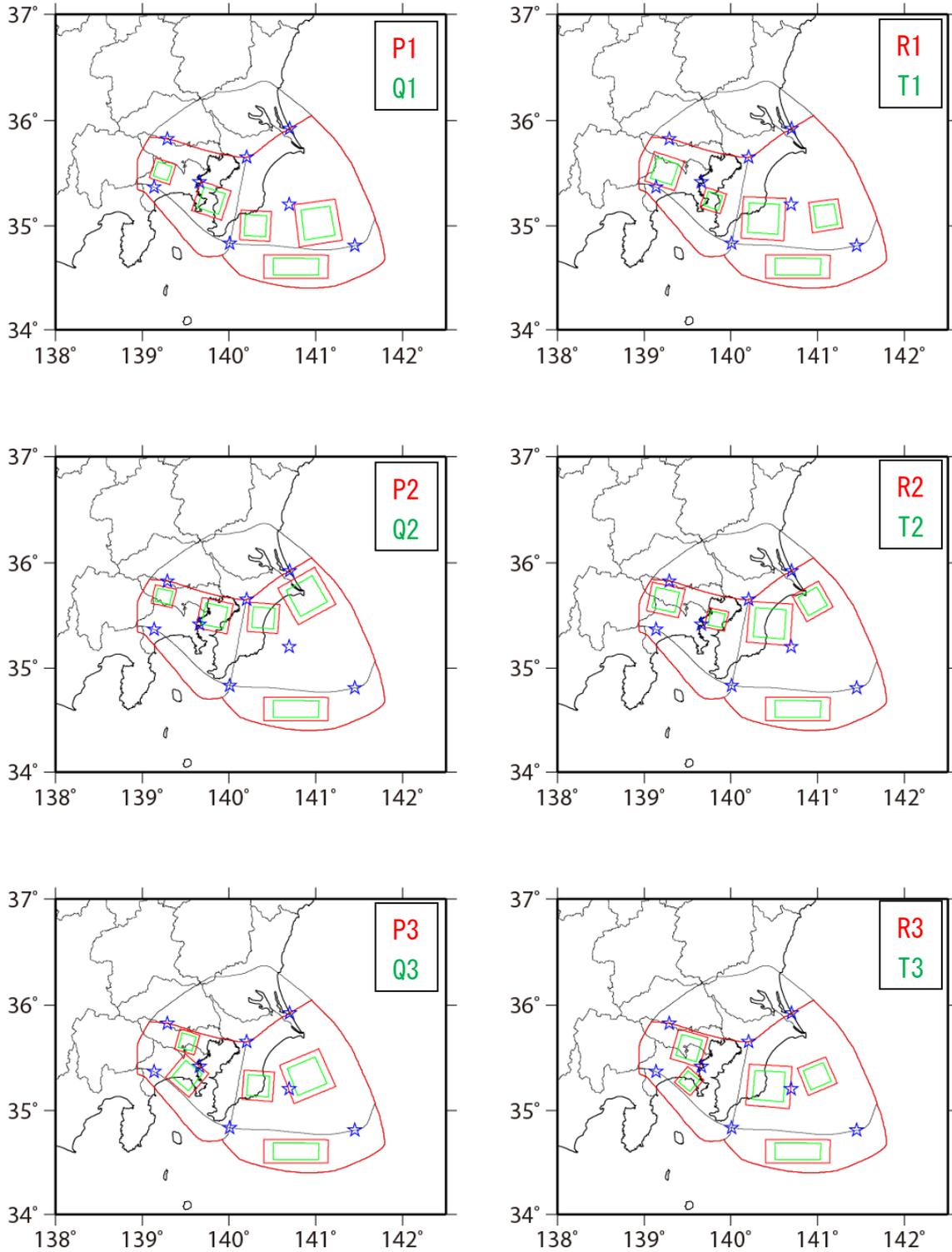


図 3-2-5b 領域番号 7 における基本ケースのアスペリティ（赤および緑の矩形）と破壊開始点（青の星印）。大すべり域が東側のケース。

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。

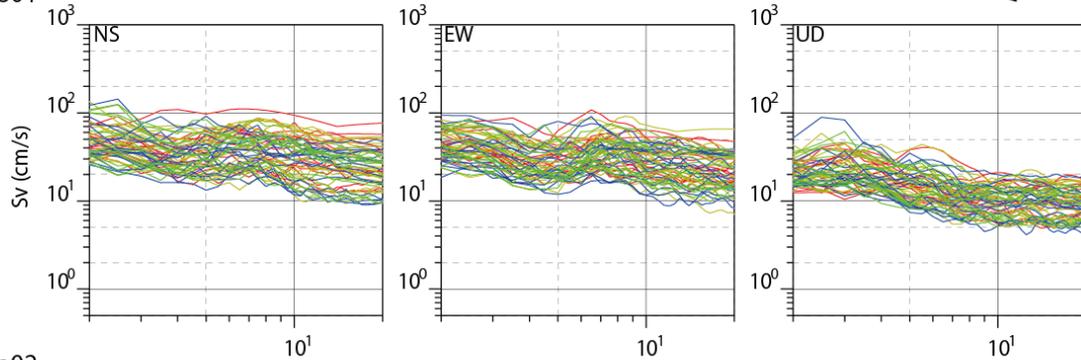
図 3-2-8 に、4 つの震源域毎に求めた速度応答スペクトル（周期 2、3、5、7、10 秒；減衰 5%）の平均値と平均値+1 σ の空間分布を示す。地点毎の速度応答値については、これまでの試作版と同様に、水平 2 成分のうち値の大きなものを用いている。No1 では、平均でほぼ 100cm/s 以下、平均+ σ で 150 以上の地点がみられるが、No2 では平均でも 150cm/s を超える地点がみられる。また、No1、2 では短周期帯ほど平均+ σ が大きい傾向にある。一方、元禄型（No6, 7）では、周期 7 秒、10 秒で平均+ σ が 200cm/s を超える領域が広く分布している。No6, 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。

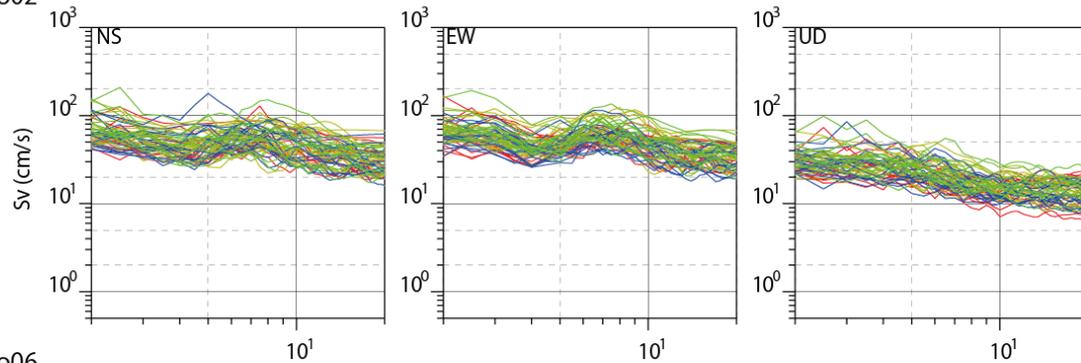
以上は、基本的にはレシピによる平均的なパラメータ設定の範囲内でのばらつき評価である。ここでは、さらにアスペリティの実効応力のみを 2 倍に変えたモデルを設定し、その影響について検討した。対象とした震源モデルは、（No1、P1）で破壊開始点を h1, 2, 3, 4, 10 とした 5 ケースである。これら 5 ケースについて、実効応力を変えないモデルとの振幅比の平均値の空間分布を図 3-2-11 に示す。空間的な変化は小さいものの、短周期帯域ほど影響が強く表れている。本検討では、すべてのアスペリティの実効応力を一律 2 倍しているが、実際の地震ではアスペリティごとの実効応力がばらつくことも考え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

千葉県庁

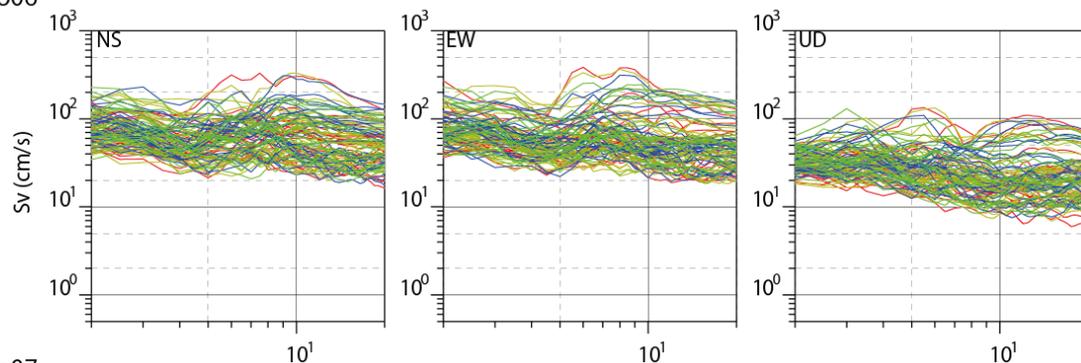
No01



No02



No06



No07

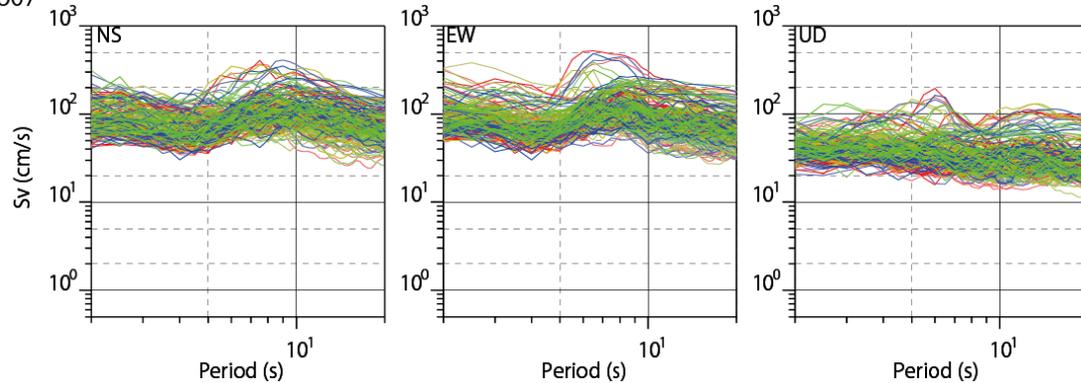
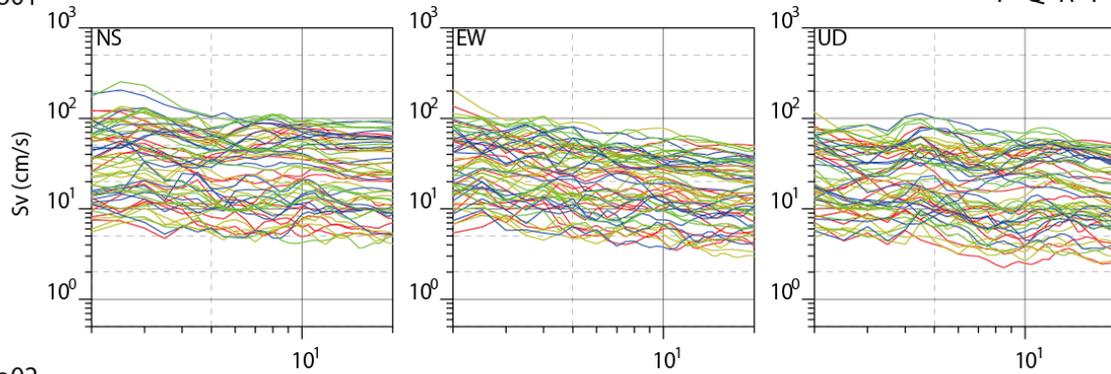


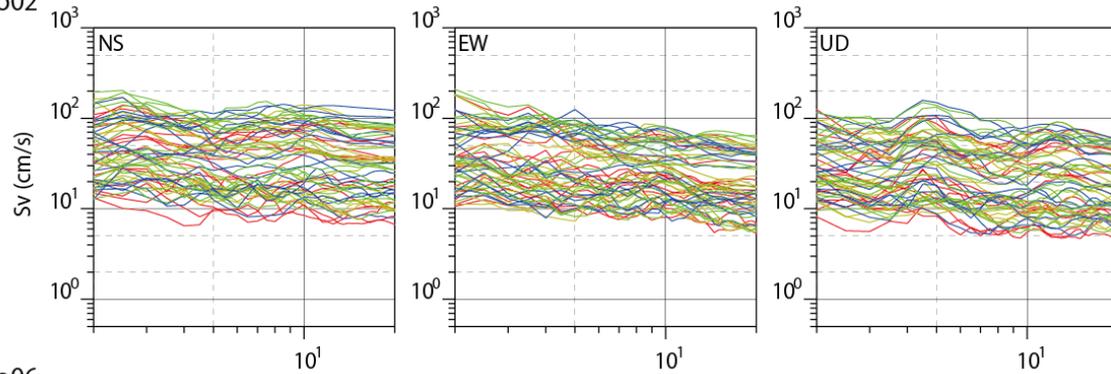
図 3-2-6 4つの震源域に対する速度応答スペクトル（減衰5%）。千葉県庁位置での結果。スペクトルの色はアスペリティ配置に対応している（右上に凡例）。

群馬県庁

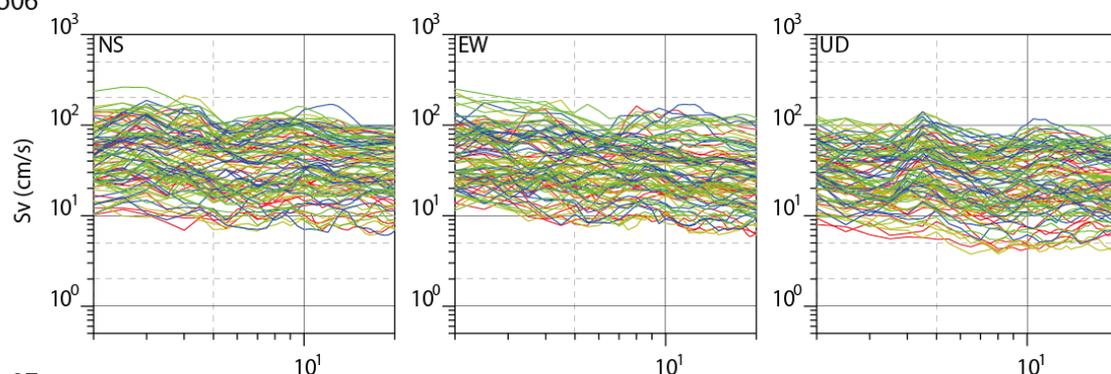
No01



No02



No06



No07

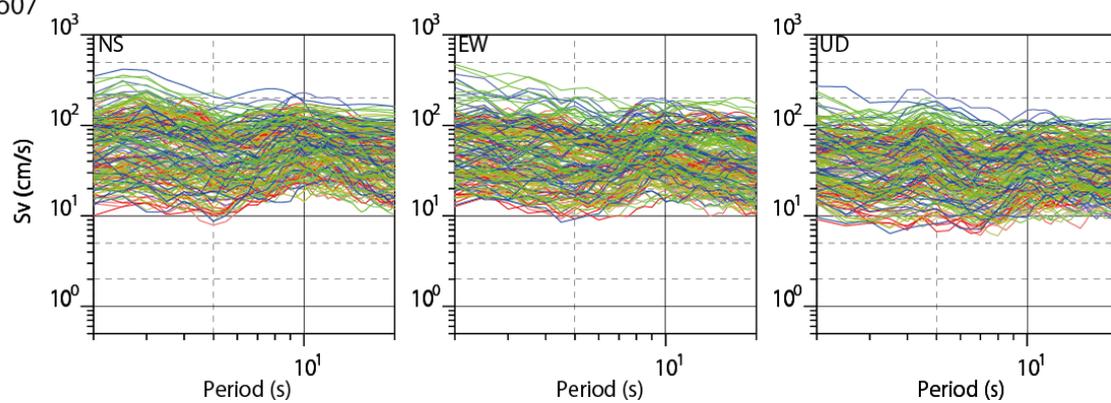
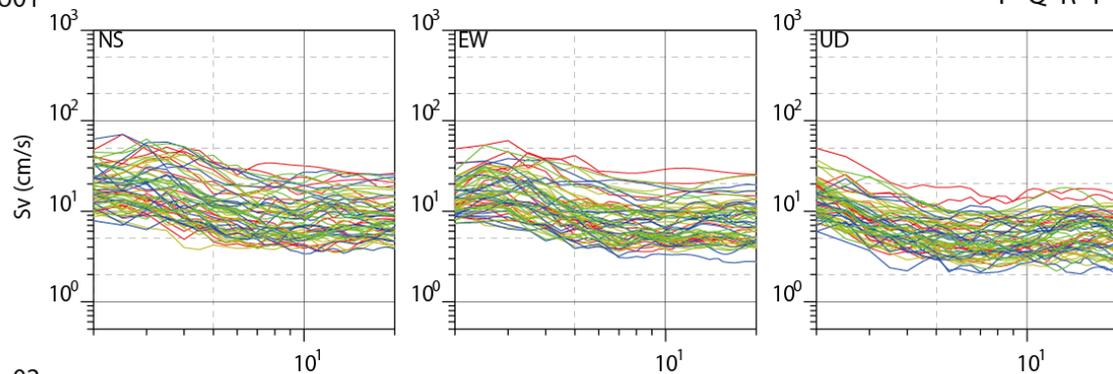


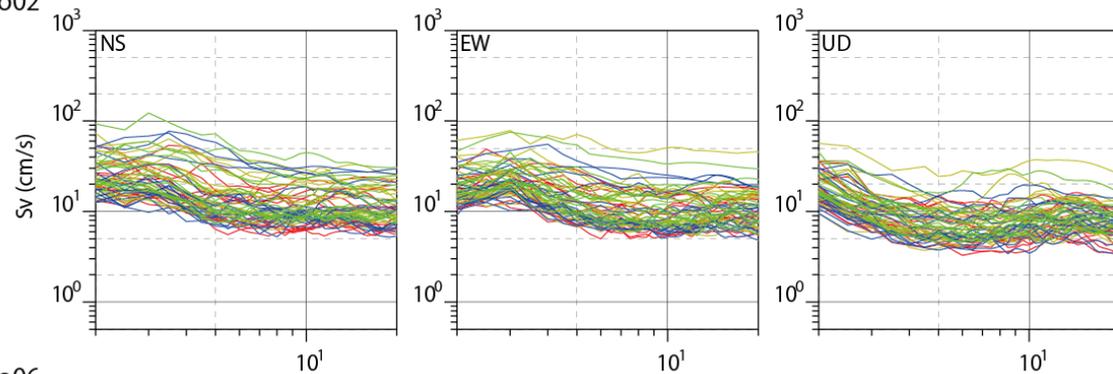
図 3-2-6 つづき。群馬県庁位置での結果。

茨城県庁

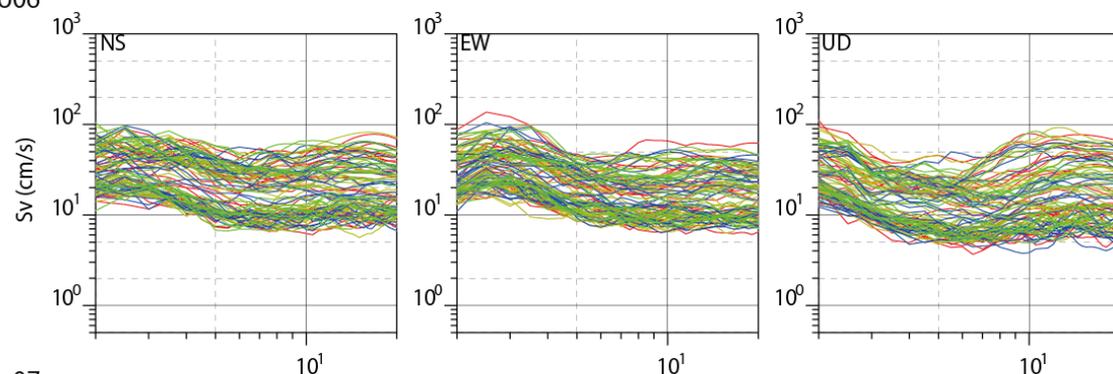
No01



No02



No06



No07

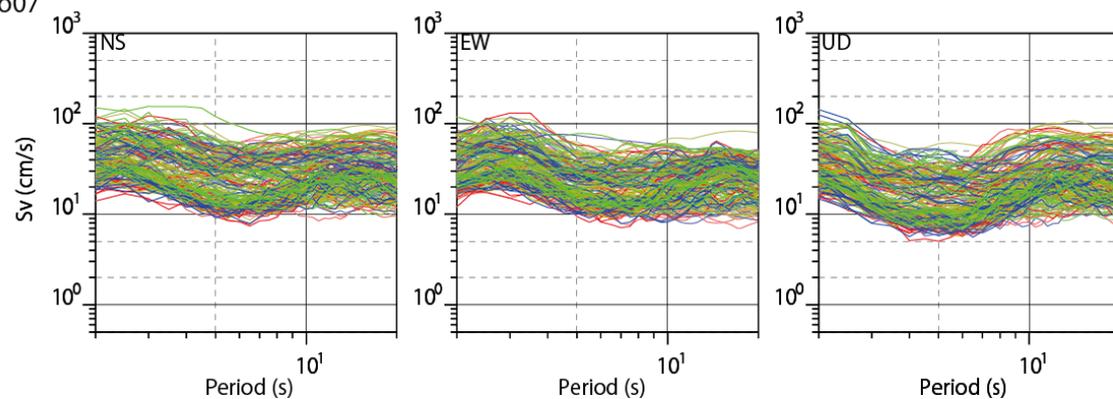
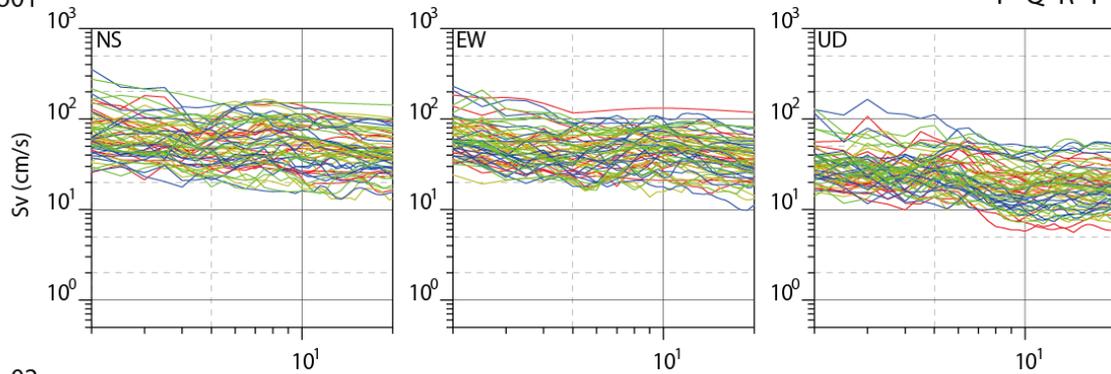


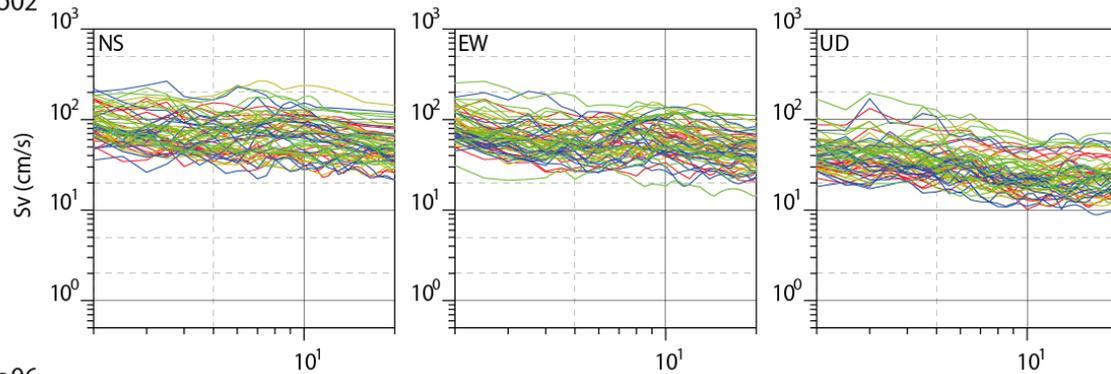
図 3-2-6 つづき。茨城県庁位置での結果。

神奈川県庁

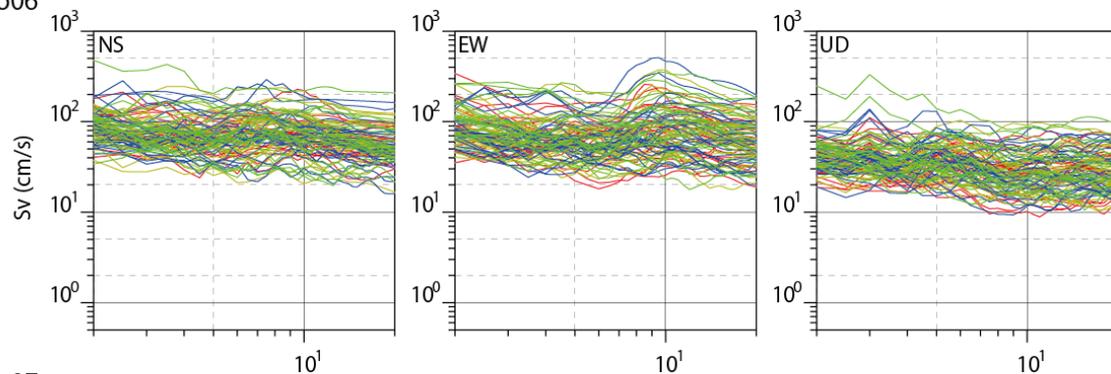
No01



No02



No06



No07

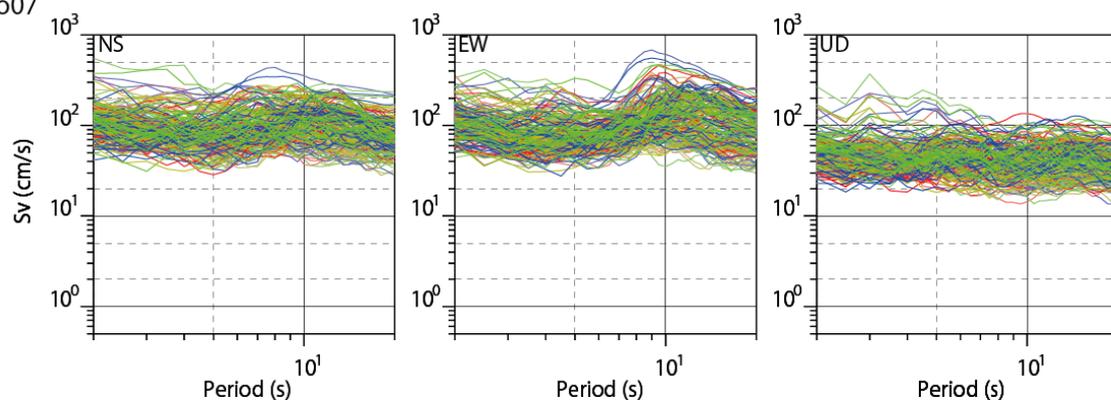
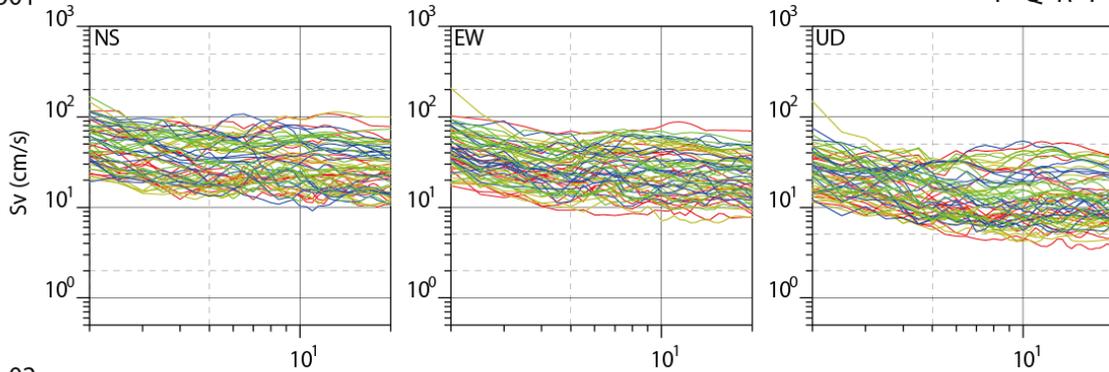


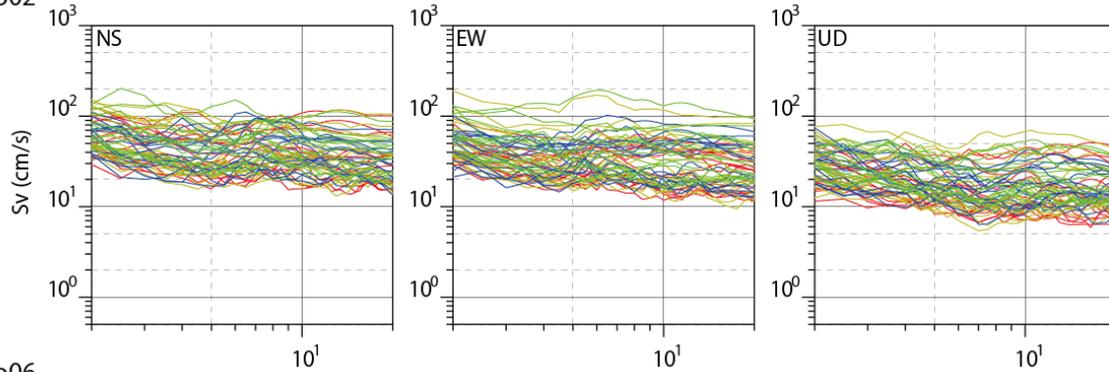
図 3-2-6 つづき。神奈川県庁位置での結果。

埼玉県庁

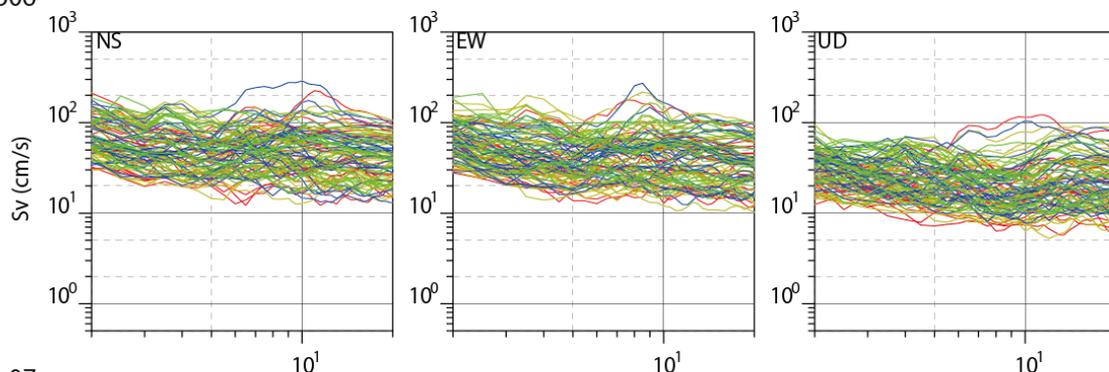
No01



No02



No06



No07

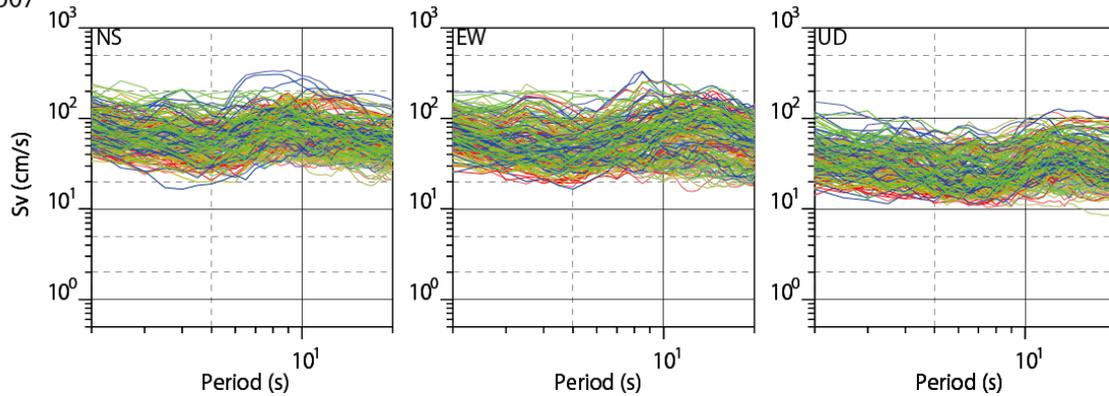
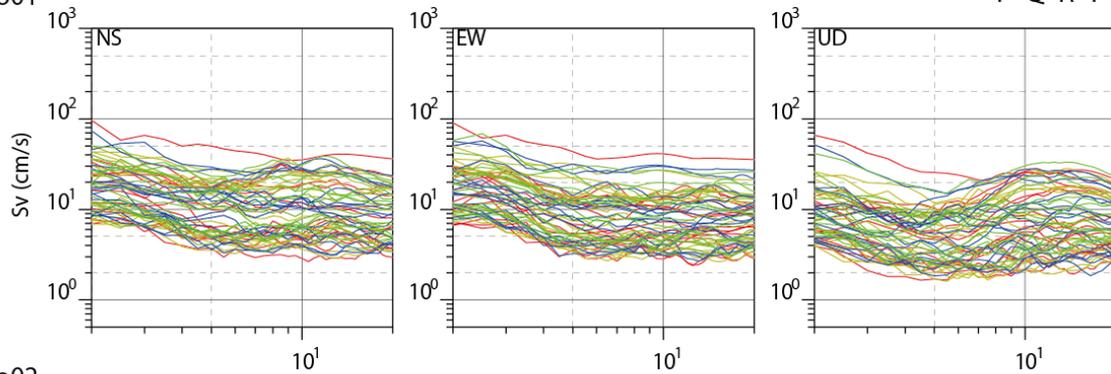


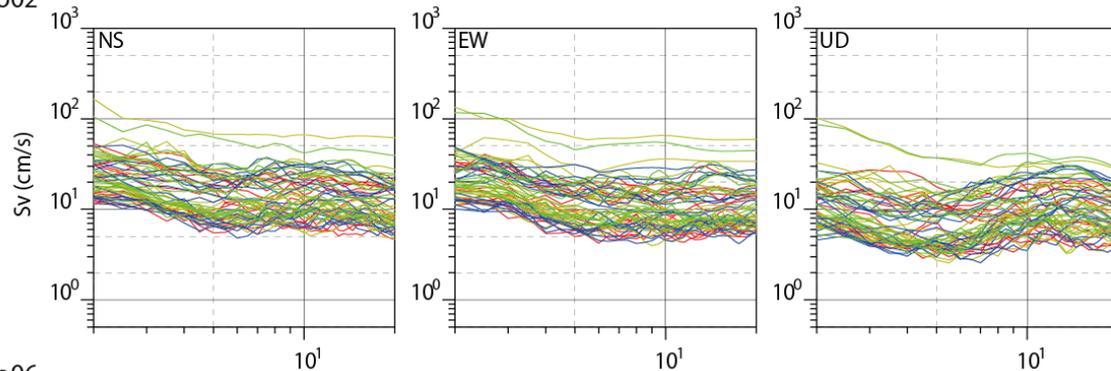
図 3-2-6 つづき。埼玉県庁位置での結果。

栃木県庁

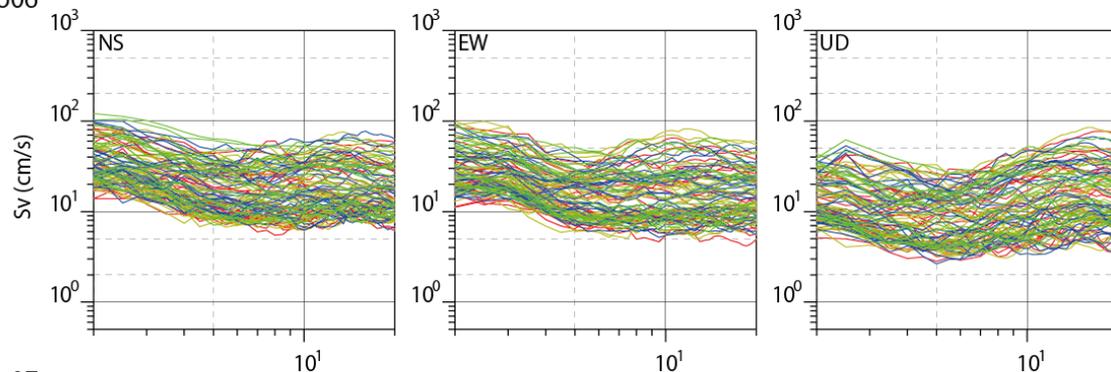
No01



No02



No06



No07

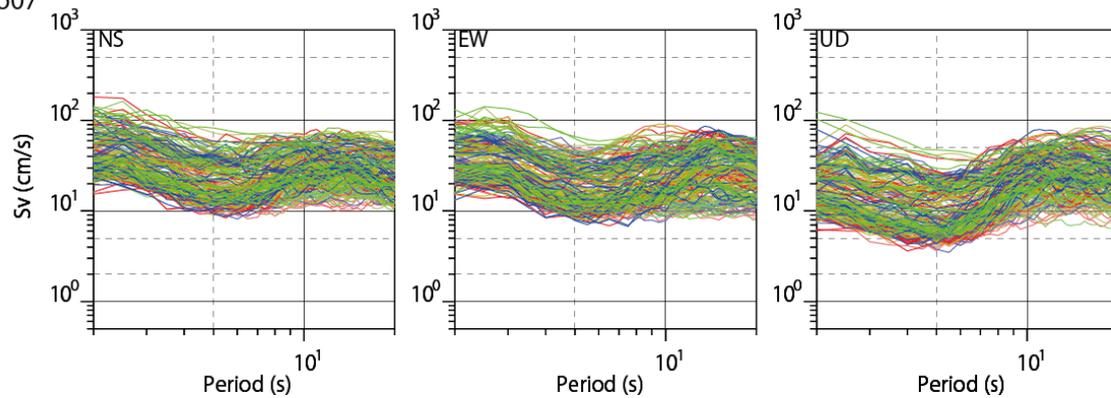
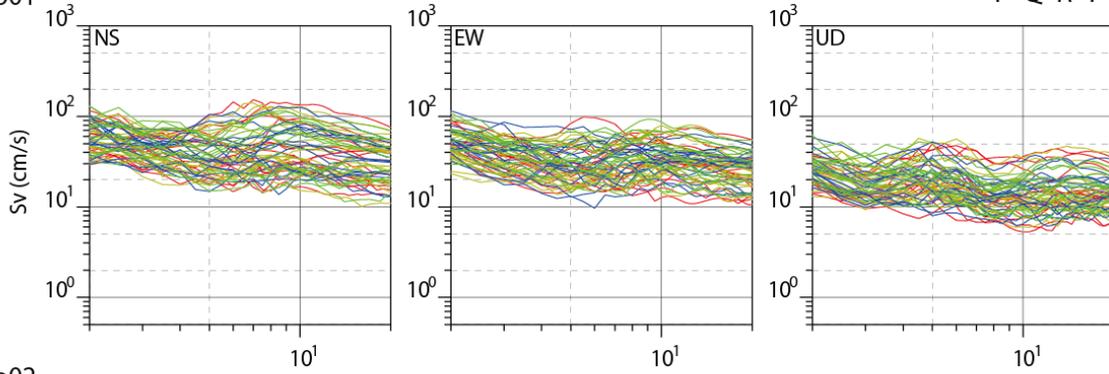


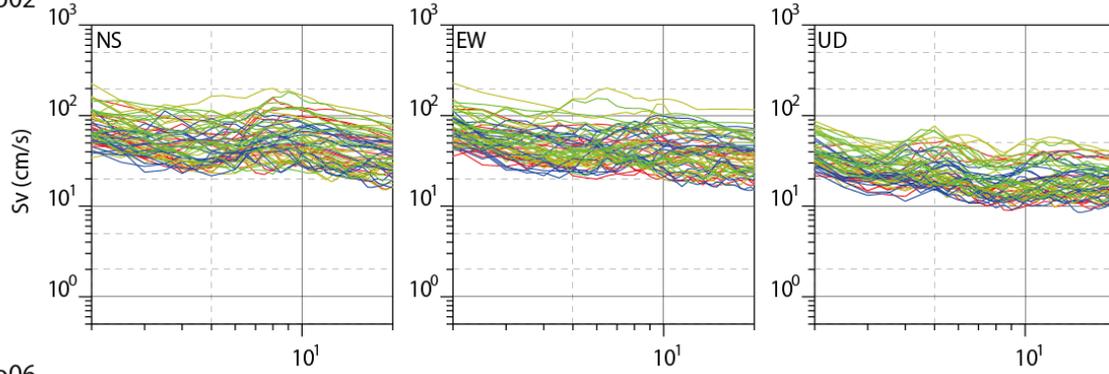
図 3-2-6 つづき。栃木県庁位置での結果。

東京都庁

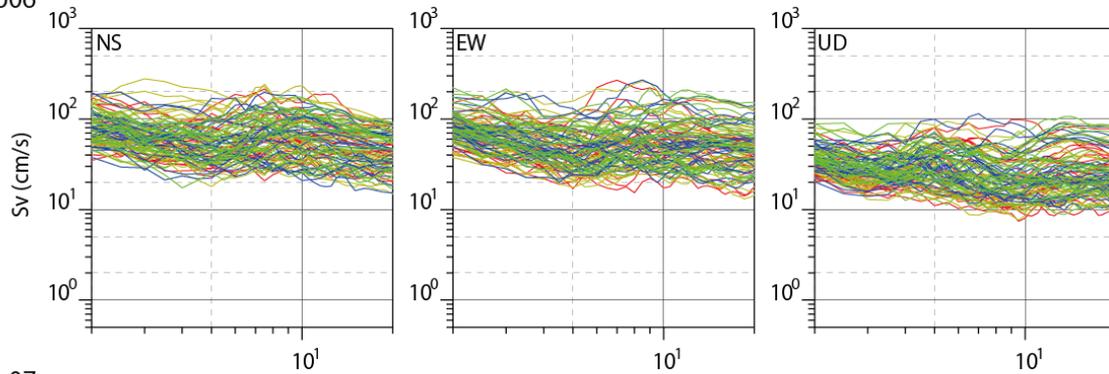
No01



No02



No06



No07

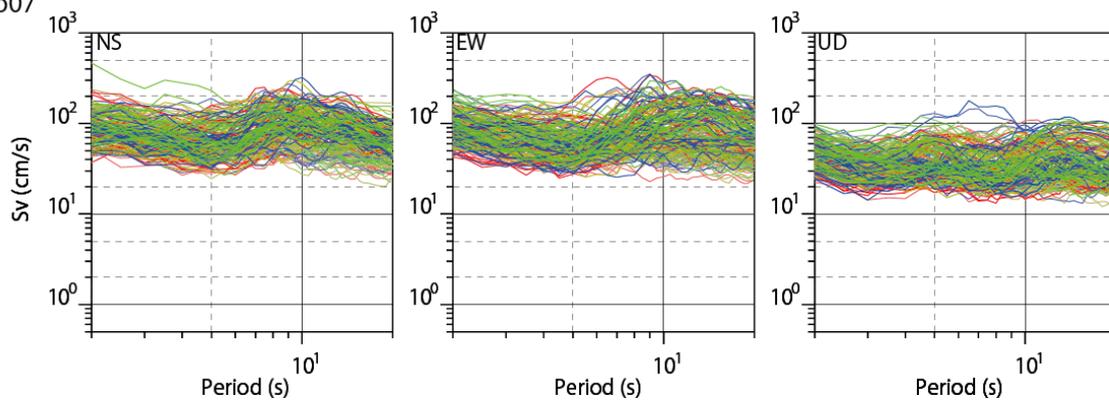


図 3-2-6 つづき。東京都庁位置での結果。

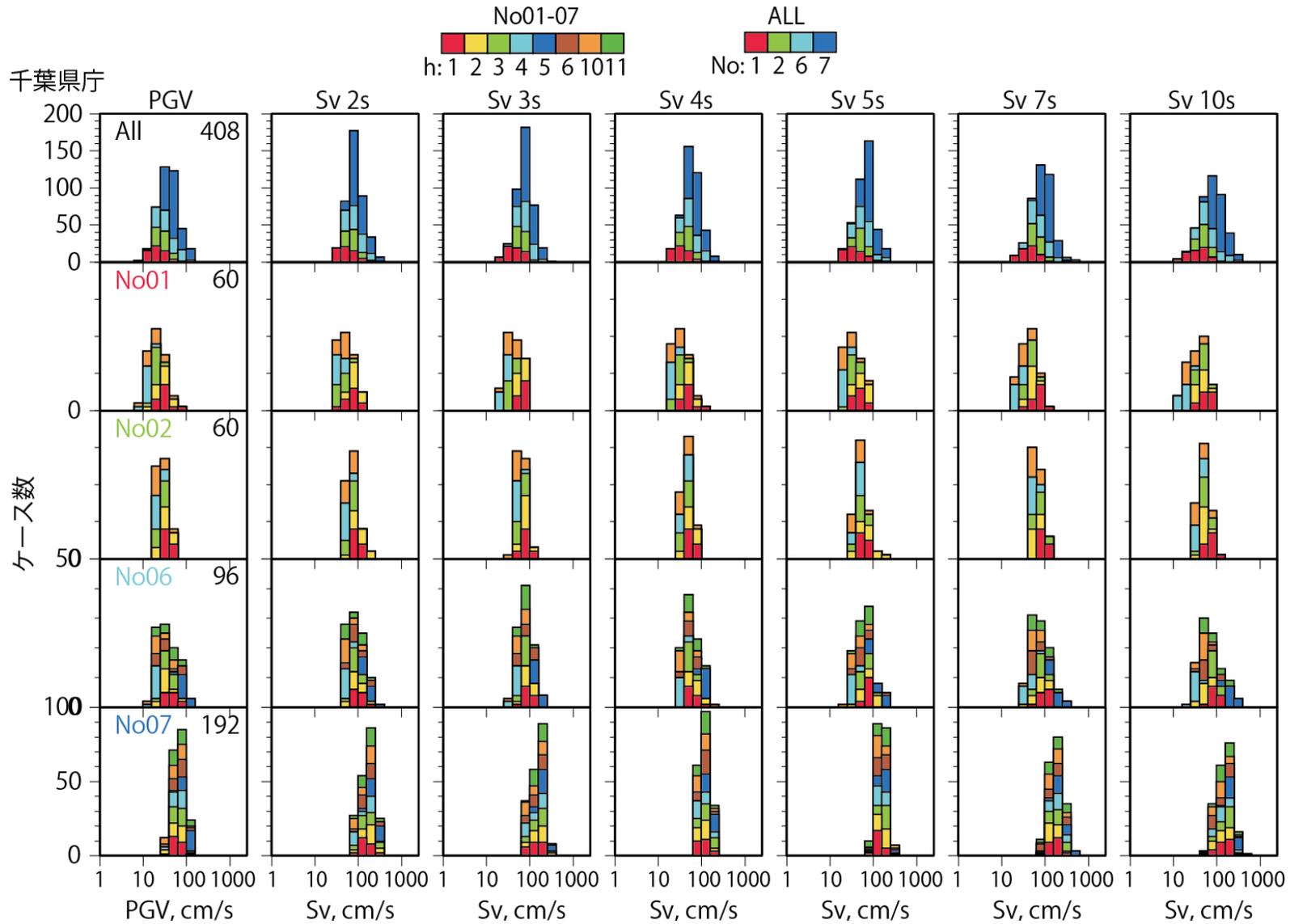


図 3-2-7 千葉県庁位置での PGV と速度応答（水平 2 成分の最大値）のヒストグラム。上段の全ケースのヒストグラムは震源域により色分けしている。その他の各震源域に対するヒストグラムは破壊開始点により色分けしている。

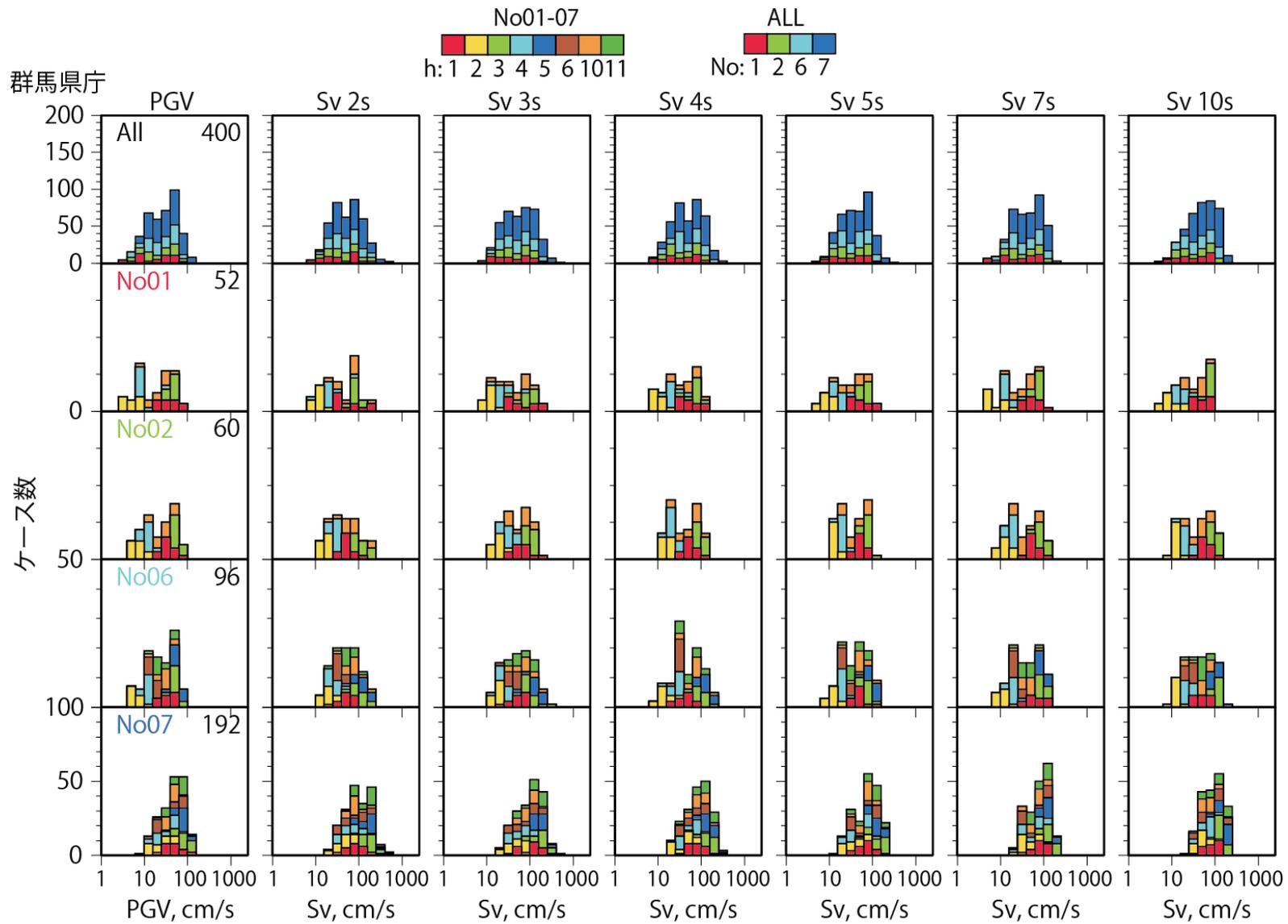


図 3-2-7 つづき。群馬県庁位置での結果。

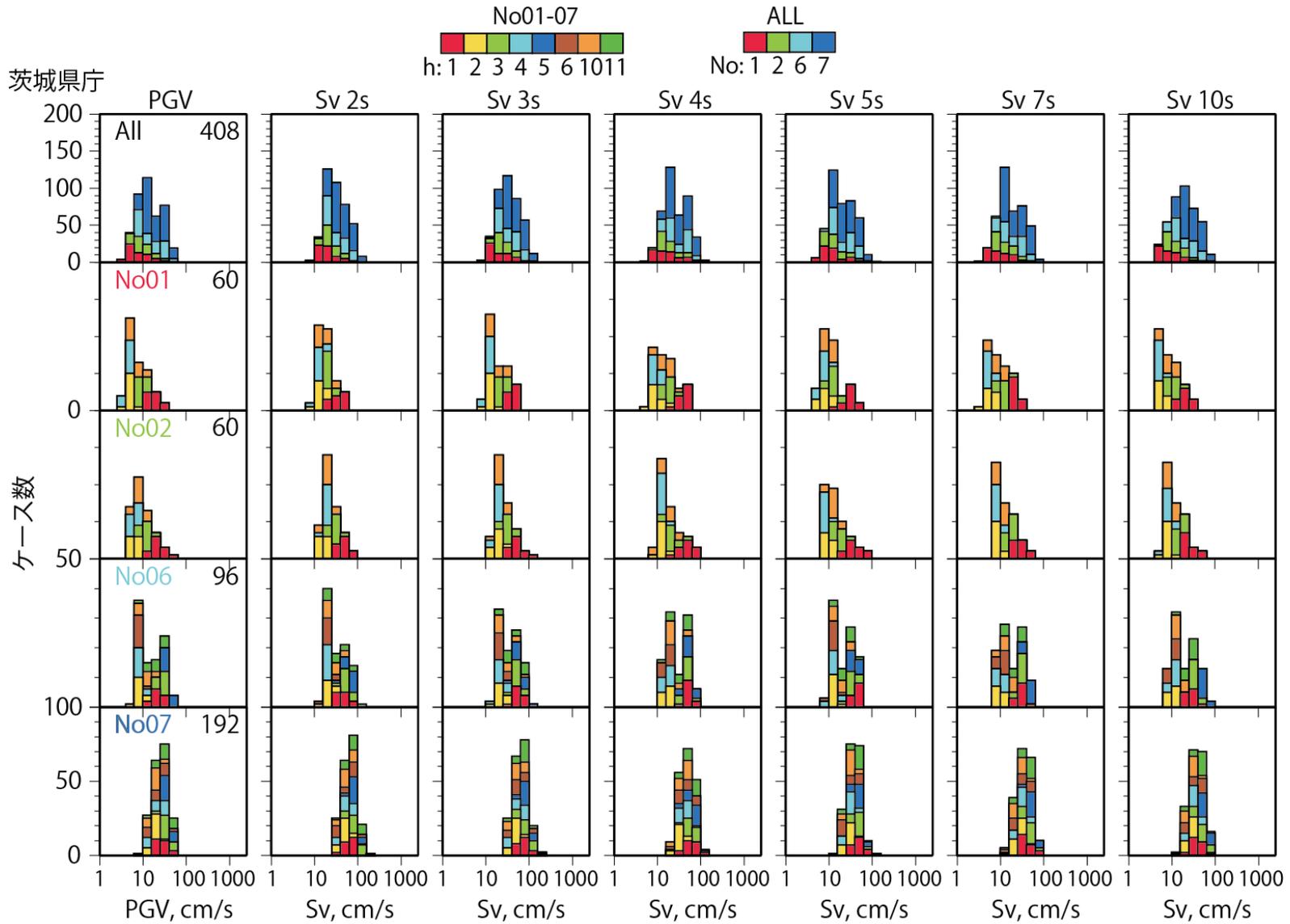


図 3-2-7 つづき。茨城県庁位置での結果。

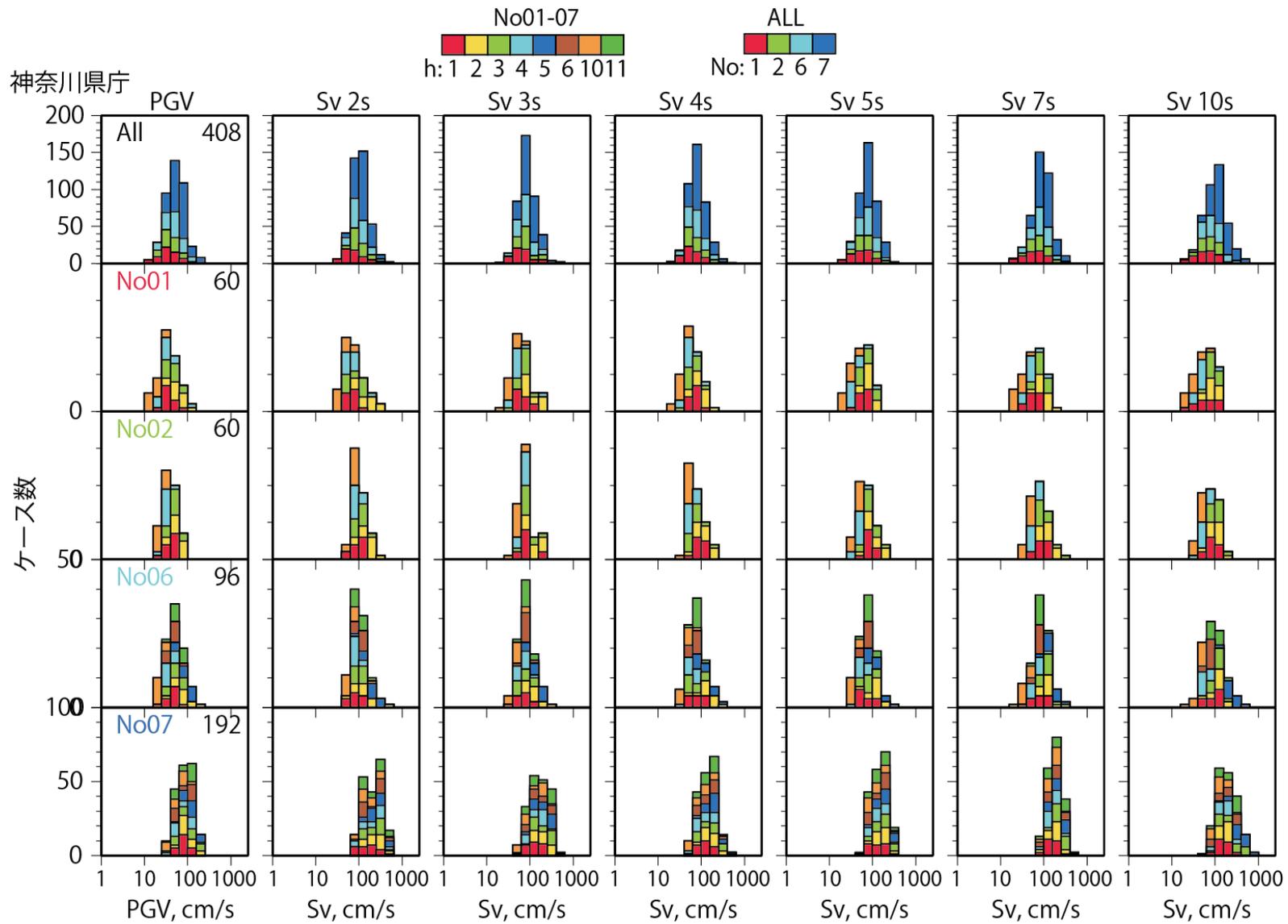


図 3-2-7 つづき。神奈川県庁位置での結果。

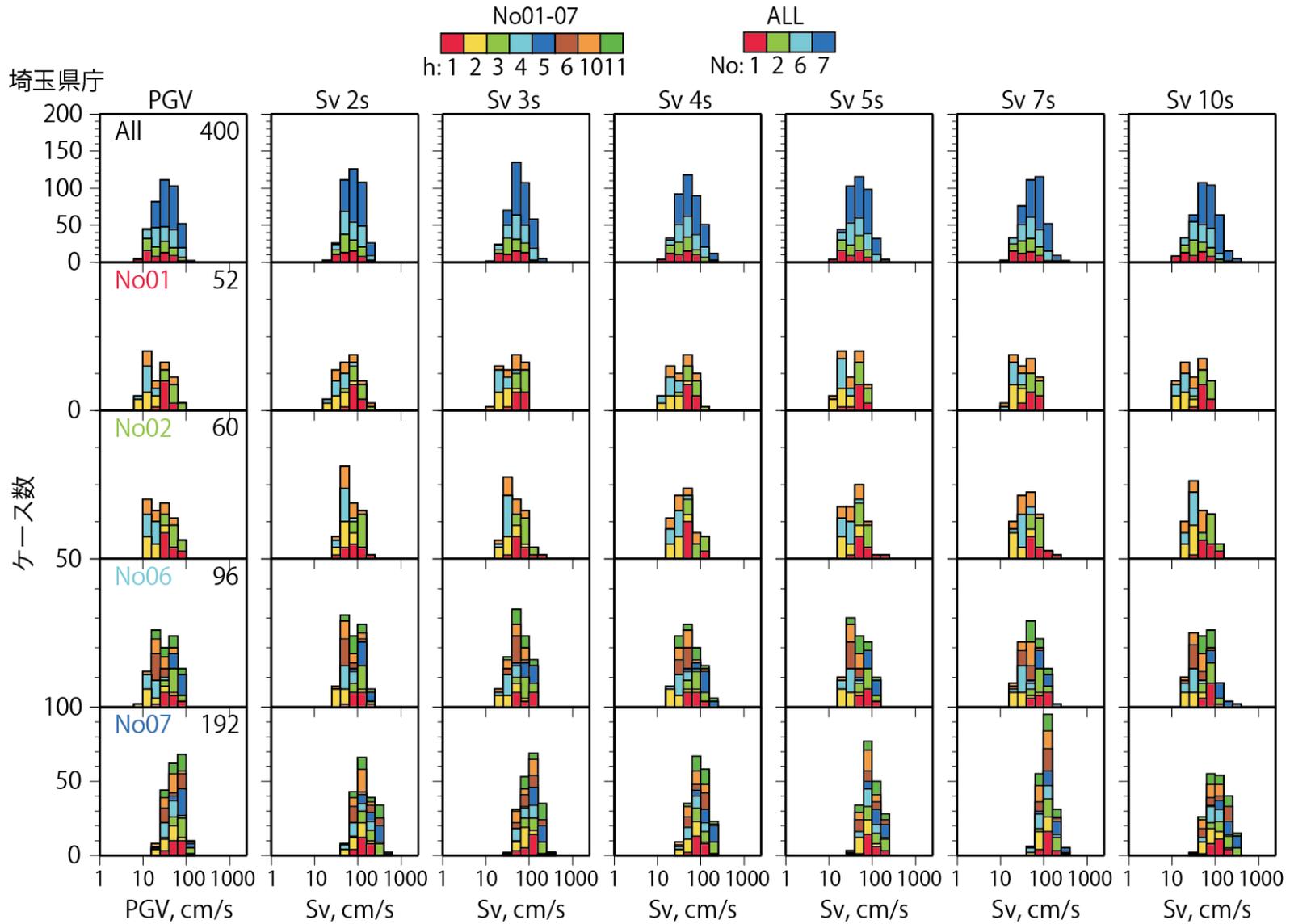


図 3-2-7 つづき。埼玉県庁位置での結果。

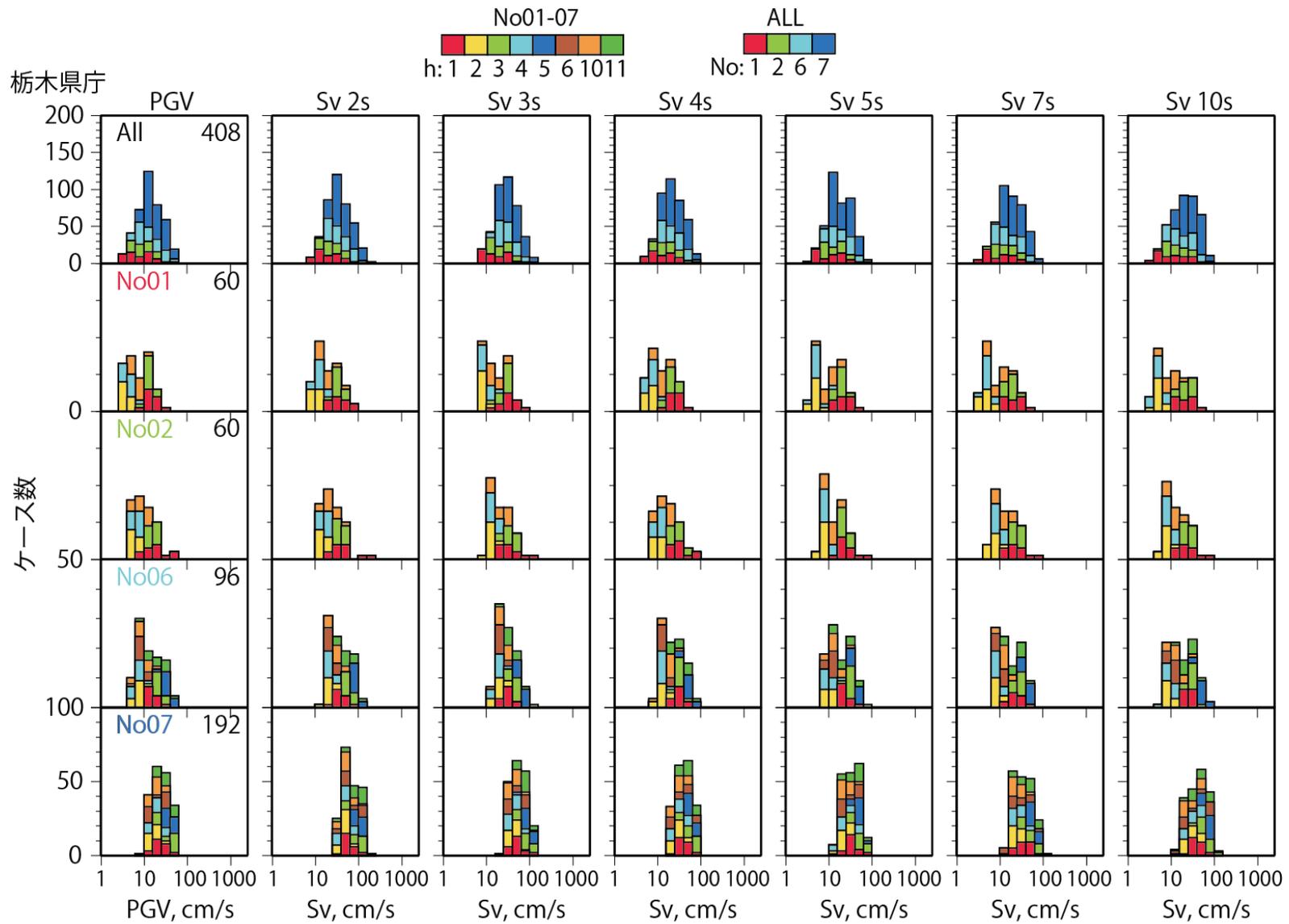


図 3-2-7 つづき。栃木県庁位置での結果。

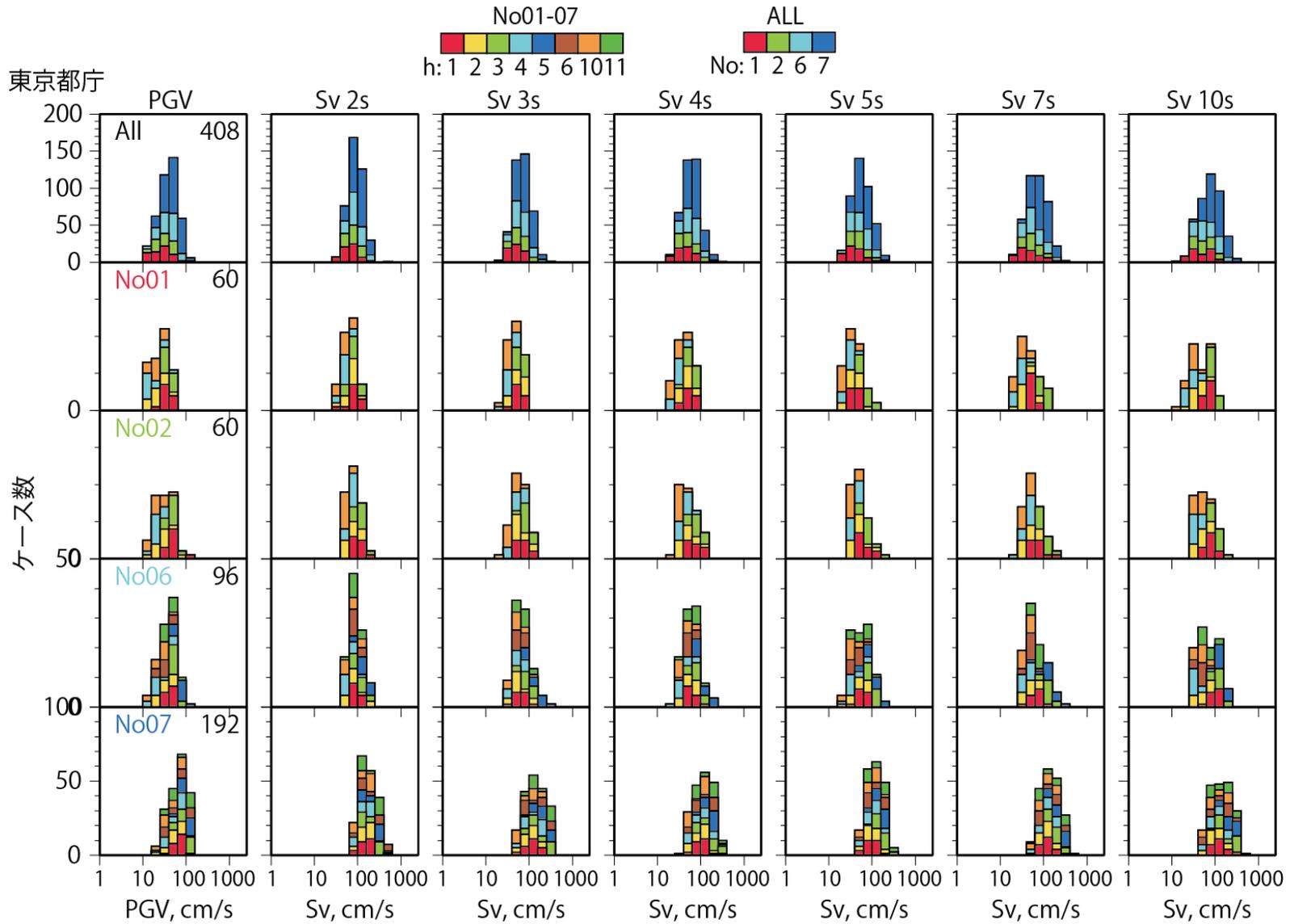


図 3-2-7 つづき。東京都庁位置での結果。

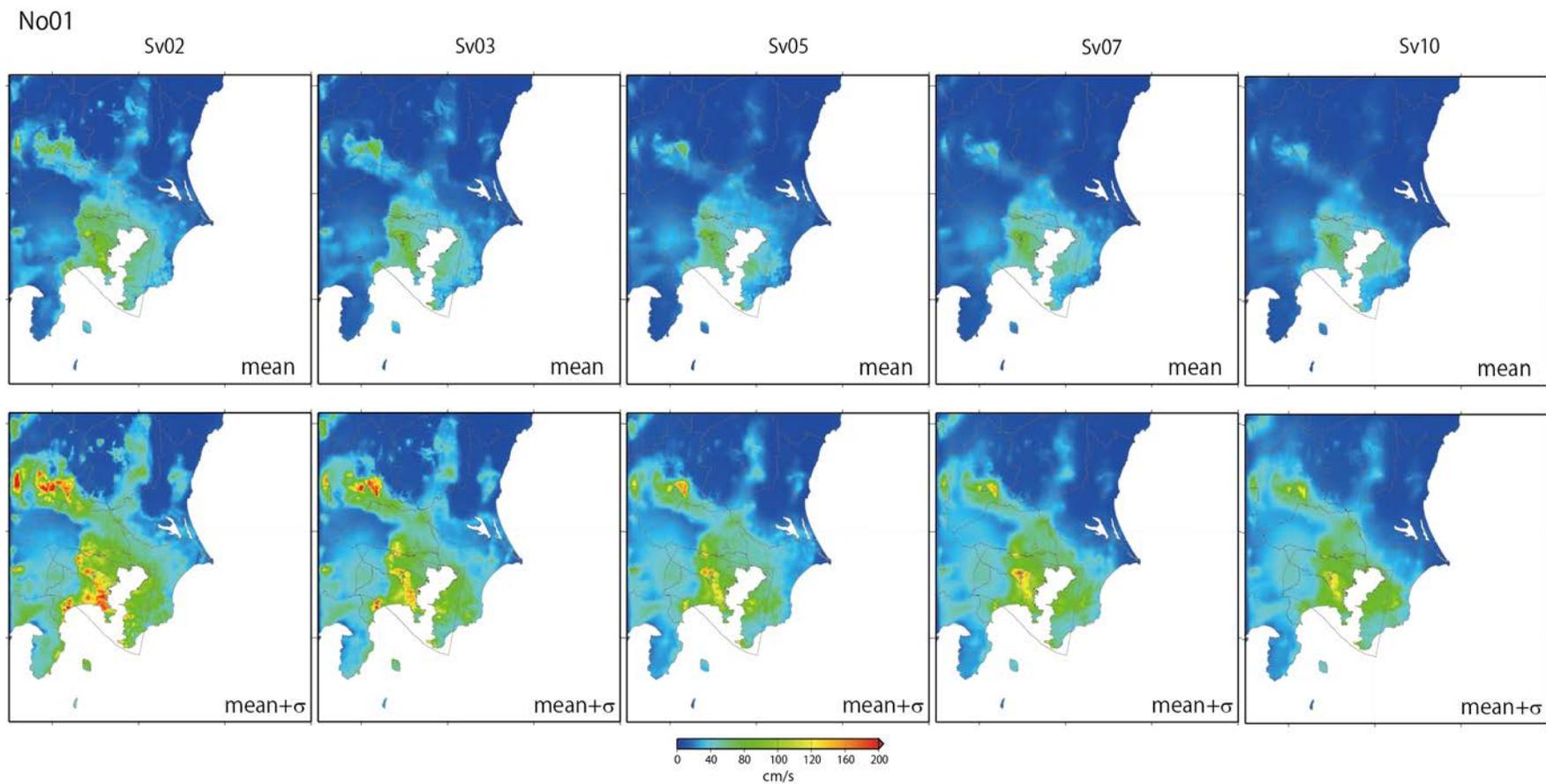


図 3-2-8 No1 の震源域 (60 ケース) についての速度応答スペクトル (周期 2 秒、3 秒、5 秒、7 秒、10 秒 ; 減衰 5%) の平均値と平均+1 σ の分布。

No02

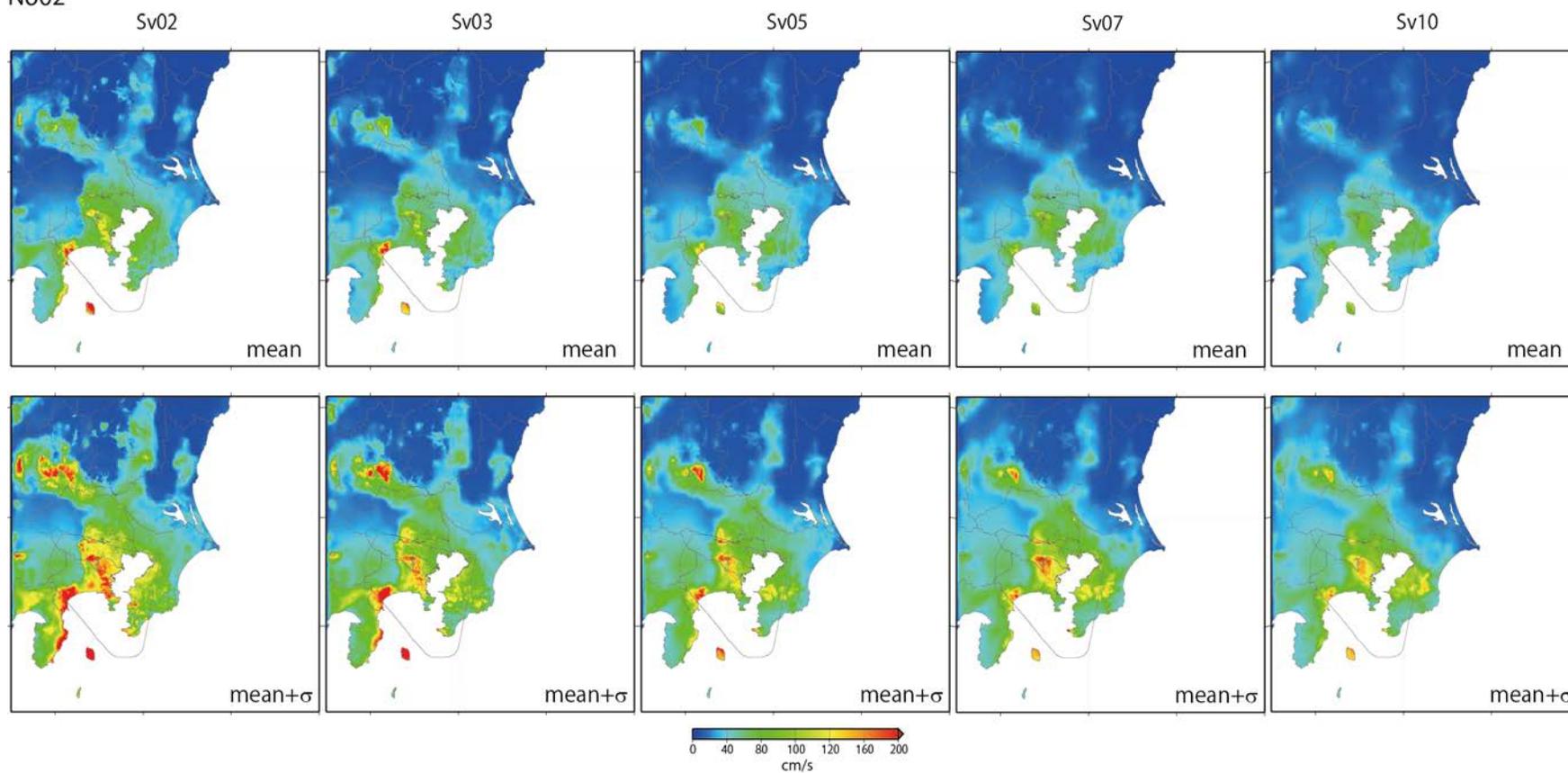


図 3-2-8 つづき。No2 の震源域 (60 ケース) について。

No06

Sv02

Sv03

Sv05

Sv07

Sv10

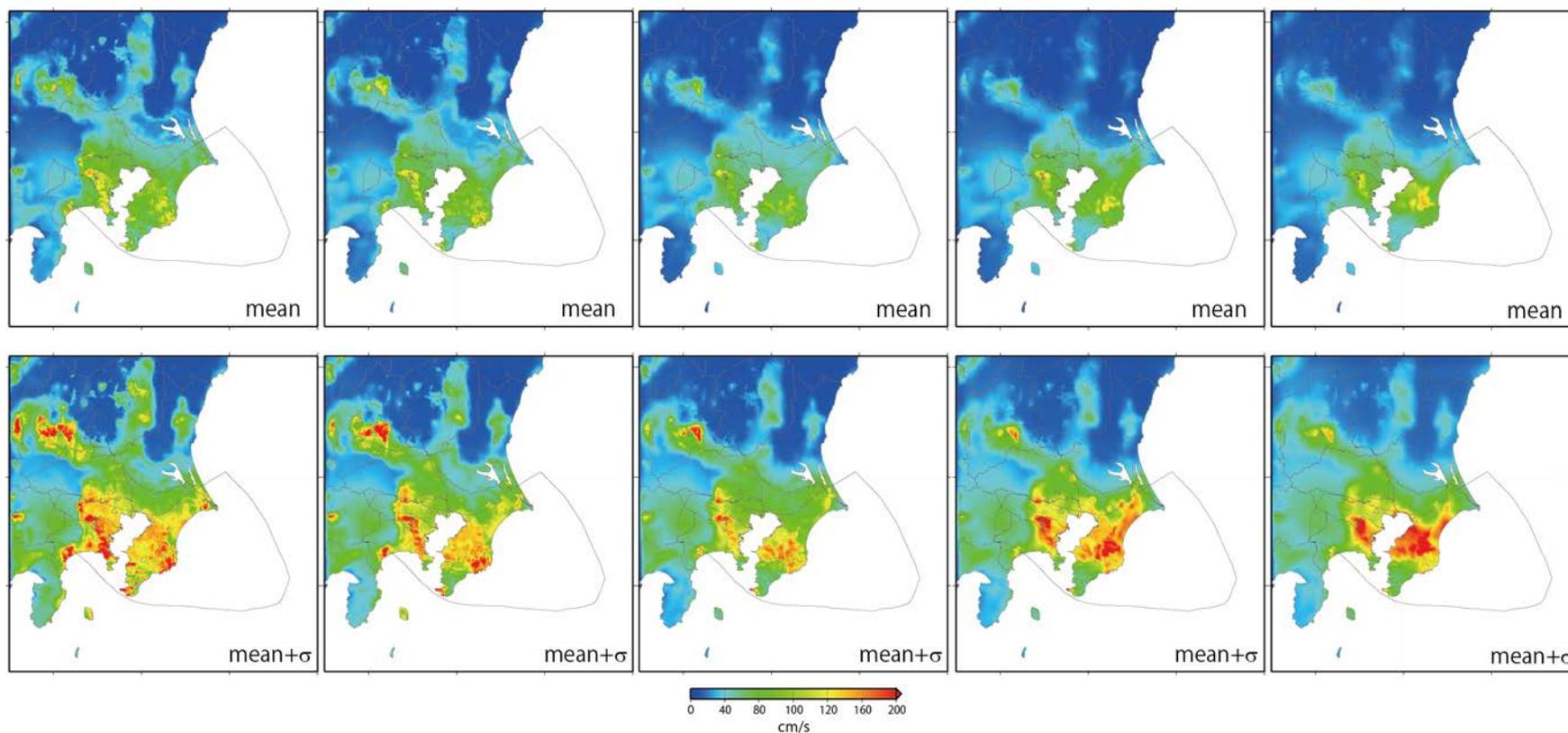


図 3-2-8 つづき。No6 の震源域 (96 ケース) について。

No07

Sv02

Sv03

Sv05

Sv07

Sv10

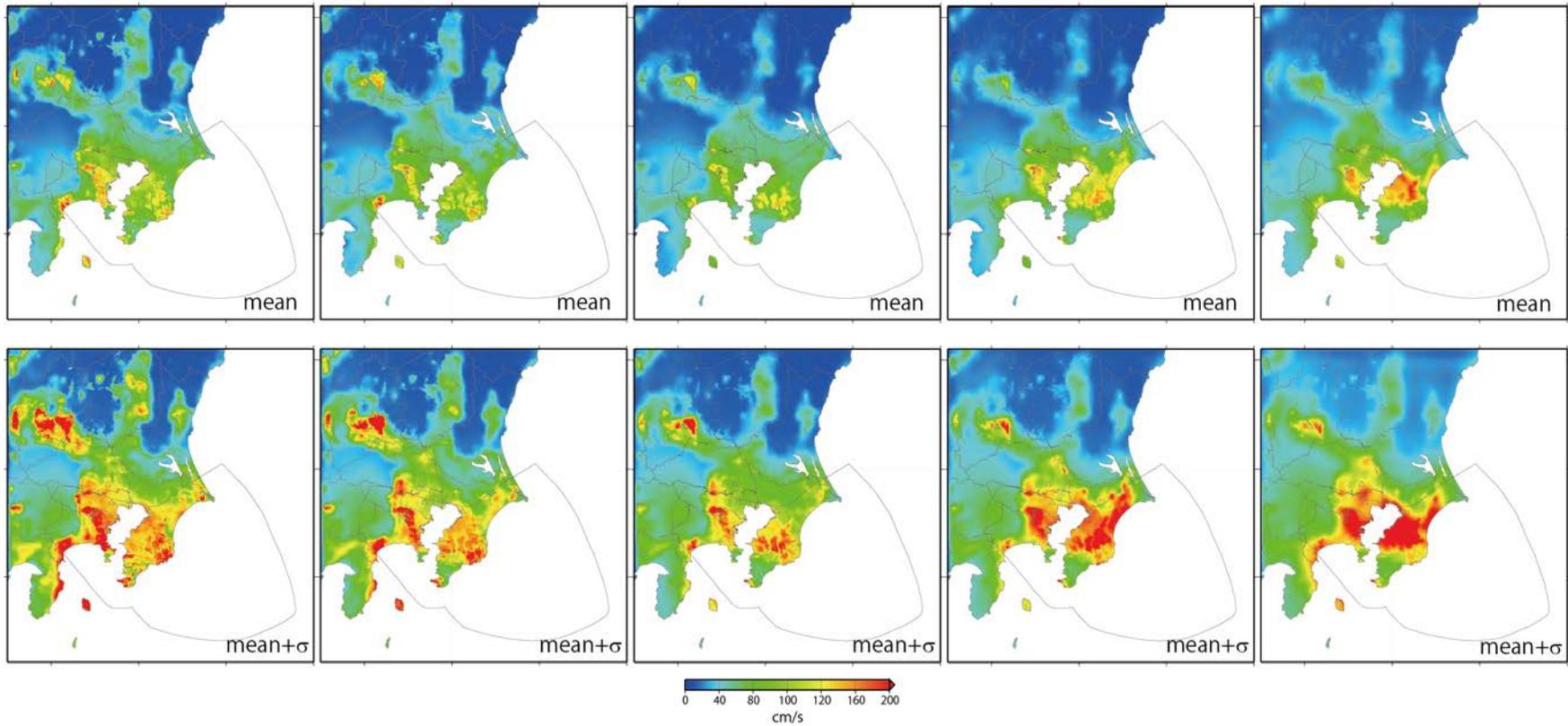


図 3-2-8 つづき。No7 の震源域 (192 ケース) について。

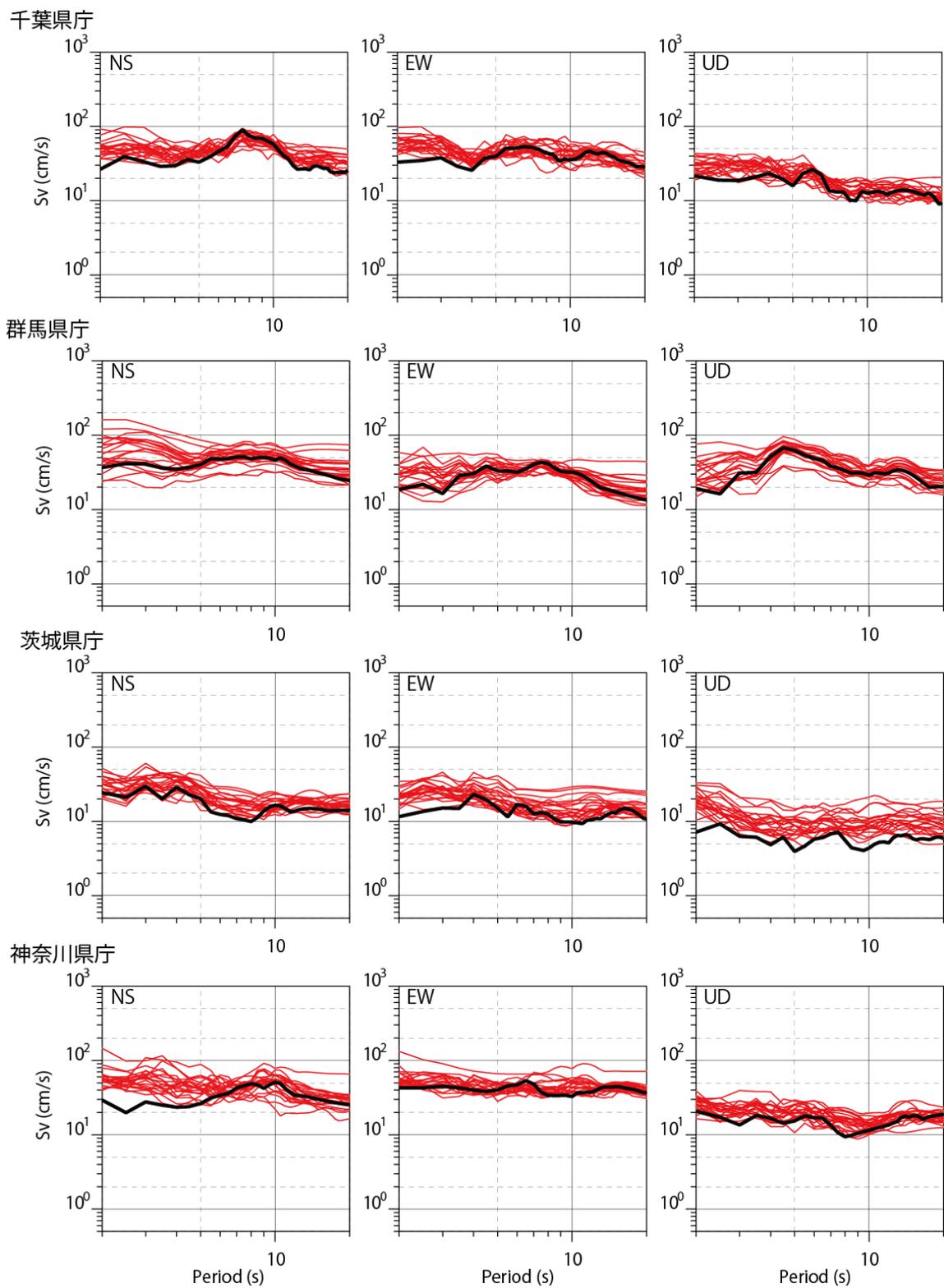


図 3-2-9 不均質モデル（赤線、20 ケース）と均質モデル（黒線）の速度応答スペクトル（減衰 5%）の比較。

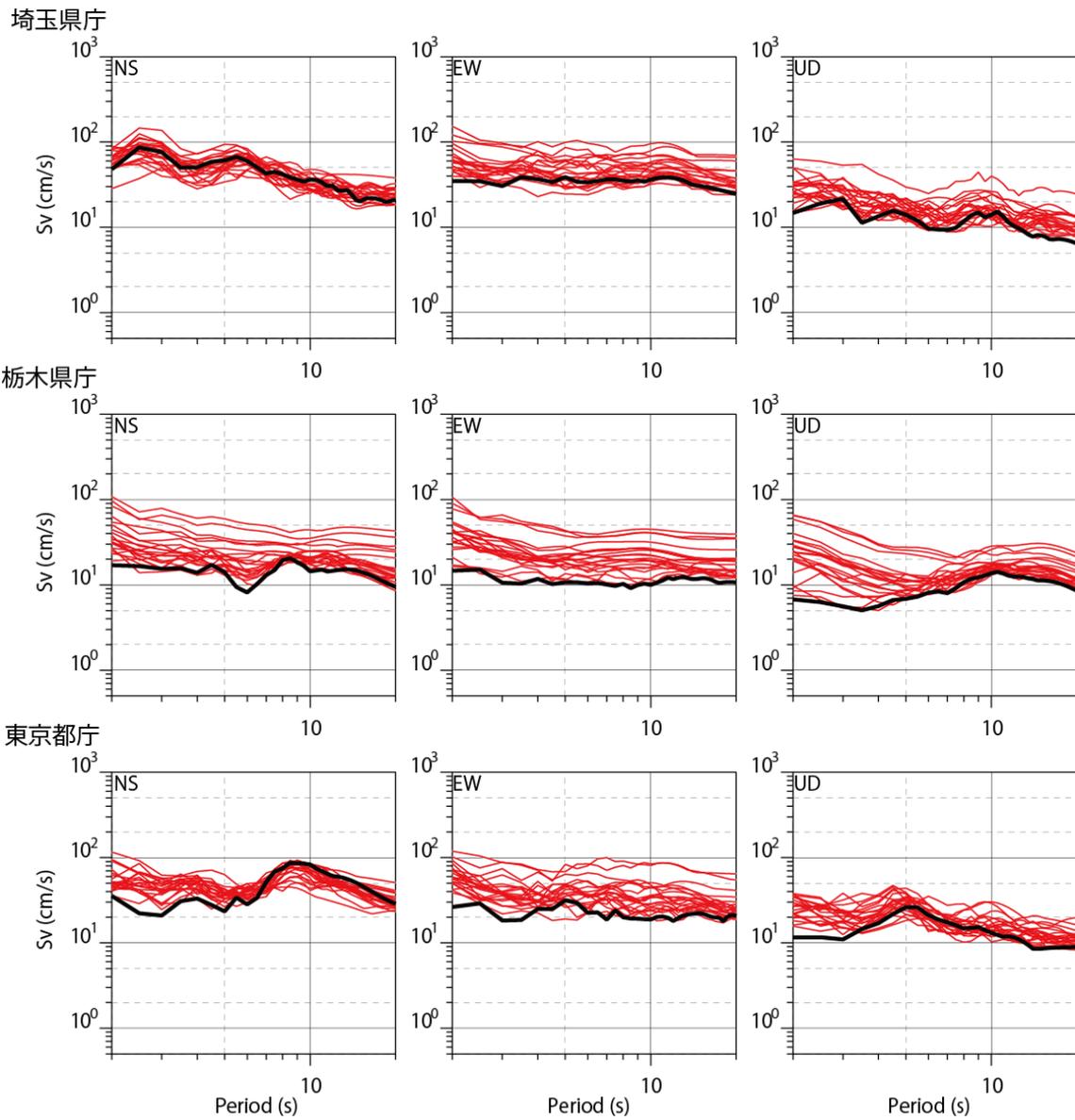


図 3-2-9 つづき。

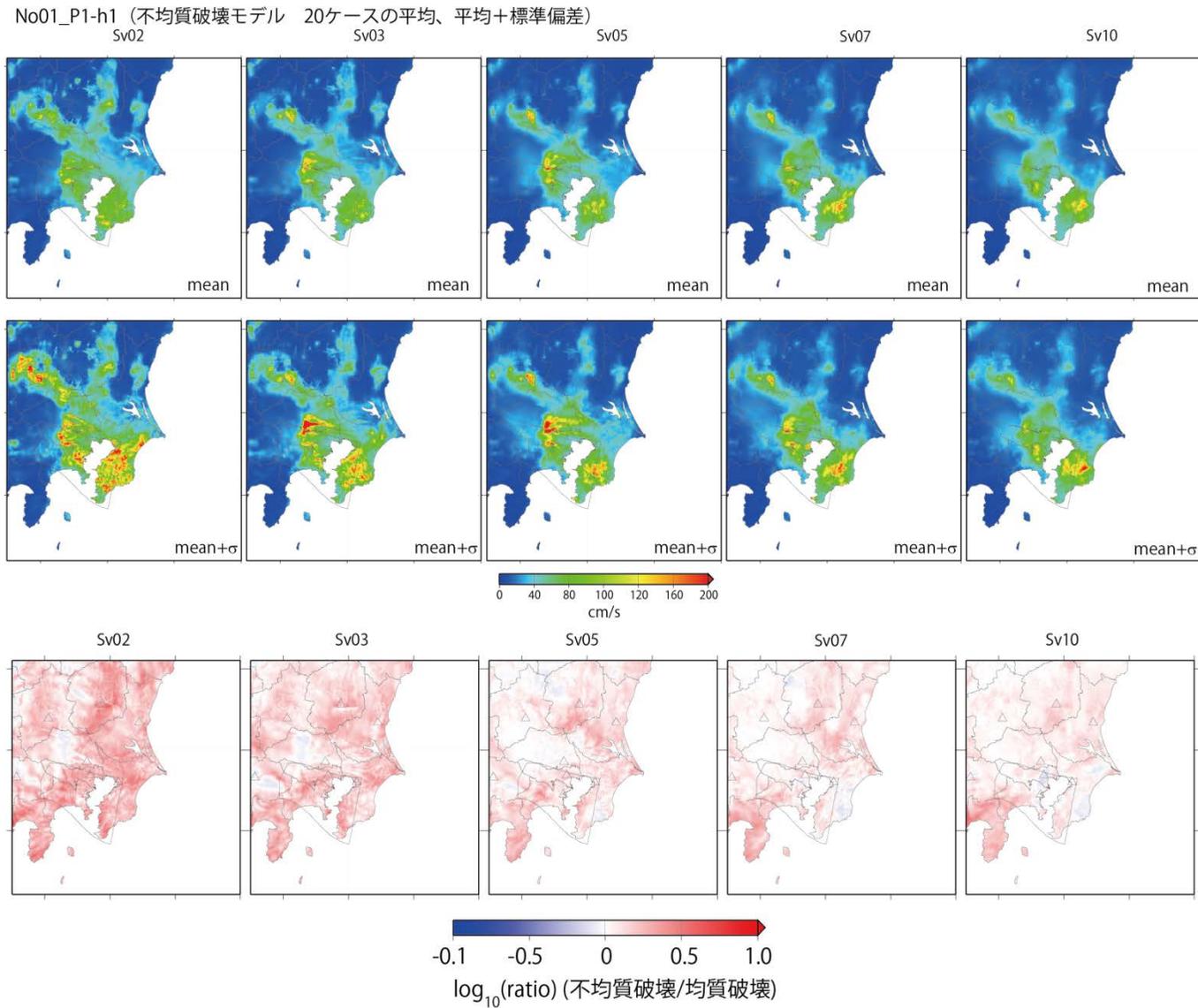


図 3-2-10 上段、中段：不均質モデル（20 ケース）の速度応答スペクトル（周期 2、3、5、7、10 秒）の平均値と平均+1 σ の空間分布。下段：不均質モデルと均質モデルの速度応答スペクトル比の平均値の分布。

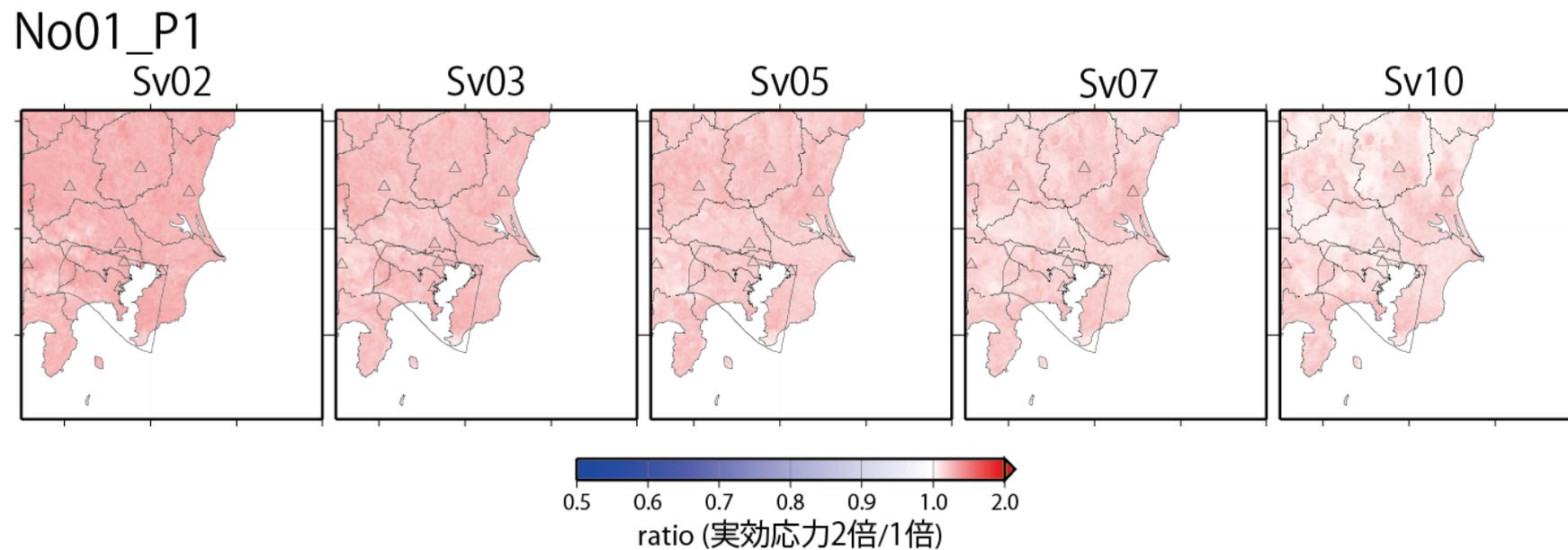


図 3-2-11 レシピで設定した特性化震源モデルに対してアスペリティの実効応力を 2 倍とする影響。No1 の震源域、P1 のアスペリティ配置で、破壊開始点の異なる 5 つの震源モデルによる計算結果と、実効応力を変えないモデルによる結果との比の平均値の空間分布。

(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.

3.3. 南海トラフの地震を対象とした長周期地震動の基礎調査等

(1) 事業の内容

(a) 事業の題目

南海トラフの地震を対象とした長周期地震動の基礎調査等

(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	河合 伸一

(c) 事業の目的

南海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対象地域における地下構造モデルの現状を把握する。

(2) 事業の成果

(a) 事業の要約

大阪平野とその周辺地域および濃尾平野とその周辺地域について、地震動シミュレーションのための既存の地下構造モデルおよびモデル作成に用いられている基礎データ等の情報を調査し、長周期地震動ハザード評価のための当該地域における浅部地盤モデル等の将来的な見通しを示した。

(b) 事業の成果

1) 大阪平野周辺地域

大阪平野周辺部として、京都盆地、奈良盆地を対象とした最近の地震動評価で用いられている浅部地盤モデルについて調査した。

(A) 京都盆地

京都市（2014）による地震被害想定調査では、京都市域を中心として約 9300 本のボーリングデータが収集されている（図 3-3-1）。26 地点における PS 検層結果より、土質ごとに N 値、深度と S 波速度の経験的な関係式を求め、N 値を基にして物性値を付与している。浅部地盤のモデルは、ボーリングデータおよび植村（2000）の地形区分をもとに 100m メッシュごとにその中心点に対して、水平成層構造を仮定して作成されている。

(B) 奈良盆地

奈良県（2005）による地震被害想定調査では、県内を 250m メッシュごとに 4 つの地盤

種、23の地盤タイプに区分したモデルが作成されている（表3-3-1、図3-3-2）。

（C）堺市

大阪平野内に位置する堺市では、2009年に地震被害想定調査が行われており（堺市、2009）、そこで浅部地盤モデルが作成されている。ボーリングデータは、堺市地盤情報データベースによる6127本に、大阪府（2007）による地震被害想定調査で用いられた関西圏地盤情報データベース（KG-NET）による2096本を加えた計8223本が収集されている（図3-3-3）。また、微地形区分図、表層地質図、盛土分布、都市利用現況調査、旧地形図、ため池埋立地等の情報が収集され、GIS化されている。

浅部地盤モデルは、250mメッシュごとに、沖積相当層とその下位10mの洪積層のモデルを作成している。ボーリングデータのあるメッシュについては、土質条件の深度変化を考慮した層構造モデルとなっている。S波速度等の物性はボーリングデータの空白域については、微地形区分ごとにボーリングデータの存在する周辺メッシュのモデルより補間している（図3-3-4）。

以上、京都盆地（京都市）および大阪平野内の堺市では、浅部地盤モデルとして比較的详细なメッシュごとの層構造モデルが作成されている。ただし、地盤種別ごとに代表したモデルとなっている奈良盆地（奈良県）を含めいずれにおいても、浅部地盤と深部地盤は別々にモデル化されており、両者を統合したモデルは検討されていない。

2) 濃尾平野周辺地域

静岡県（2016）の地震被害推定調査では、収集した28,698本ボーリングデータ（図3-3-5）のうち、24,072本を用いて250mメッシュごとの浅部地盤モデルを作成している。既往の地質図も利用して地層の水平方向の連続性を考慮した層構造モデルとなっている。ただし、浅部地盤と深部地盤は別々のモデルとなっている。

ところで、濃尾平野とその周辺地域については、平成26年度より開始した戦略的イノベーションプログラム（SIP）の「レジリエントな防災・減災機能の強化」の課題「リアルタイム被害推定・災害情報収集・分析・利活用システム開発」において、東海地域（愛知県、静岡県、三重県、岐阜県の一部）を対象とした、地震被害推定のための地盤モデル構築が進められている。ここで採用・構築されている比較的広域な地下構造モデルは浅部・深部統合地盤モデルであり、平成27年度までに当該地域のボーリングデータの収集・整理と静岡県、愛知県内における微動観測が実施されており、平成28年度には地質の連続性が考慮された初期モデルが構築される予定となっている。相模トラフ地震の長周期地震動ハザード評価において関東地域を対象とした浅部・深部統合地盤モデルを活用したのと同様に、東海地域についてもSIPにより構築された成果である浅部・深部統合地盤モデルを活用することが可能であると考えられる。

(c) 結論ならびに今後の課題

濃尾平野とその周辺地域では、戦略的イノベーションプログラム（SIP）において東海地域（静岡県、愛知県、三重県および岐阜県の一部）を対象とした浅部・深部統合地盤モデルの作成が開始されており、平成 28 年度には初期地質モデルの作成、平成 29 年度に微動データ等によるチューニングがなされる見込みとなっている。これらの成果を今後活用することができるようになることが見込まれる。ただし、南海トラフ地震の震源域付近である海域においては、現状では浅部・深部統合地盤モデル作成の対象となっておらず、海域の地下構造モデルの改良が今後の課題として残されていると考えられる。

一方、大阪平野およびその周辺地域については、大阪平野と同様、浅部地盤と深部地盤が別々にモデル化されていることに加え、大阪平野とその周辺部は南海トラフ地震の震源域からかなり遠く、伝播経路となる紀伊半島なども含めて、周期 1 秒程度まで精度を確保できるような地下構造モデルの構築が必要となる。従って、大阪平野およびその周辺地域を対象として、南海トラフ地震による周期 1 秒程度までの長周期地震動ハザード評価を行うための地下構造モデルの作成・改良については、中長期的な検討を要する可能性がある。

(d) 引用文献

京都市，2014，京都市第 3 次地震被害想定，2014 年 6 月 17 日，
<http://www.city.kyoto.lg.jp/gyozai/4higaisoutei/shiryou.html>.

奈良県，2005，第 2 次奈良県地震被害想定調査報告書，平成 17 年 3 月，
<http://www.pref.nara.jp/40777.htm>.

堺市，2009，堺市地震被害想定総合調査報告書，平成 21 年 3 月，
<http://city.sakai.lg.jp/kurashi/bosai/shishin/soteichosa/index.htm>.

静岡県，2016，静岡県第 4 次地震被害想定（第一次報告），平成 28 年 1 月，
<http://www.pref.shizuoka.jp/bousai/4higaisoutei/shiryou.html>.

植村善博，2000，京都の地震環境，ナカニシヤ出版。

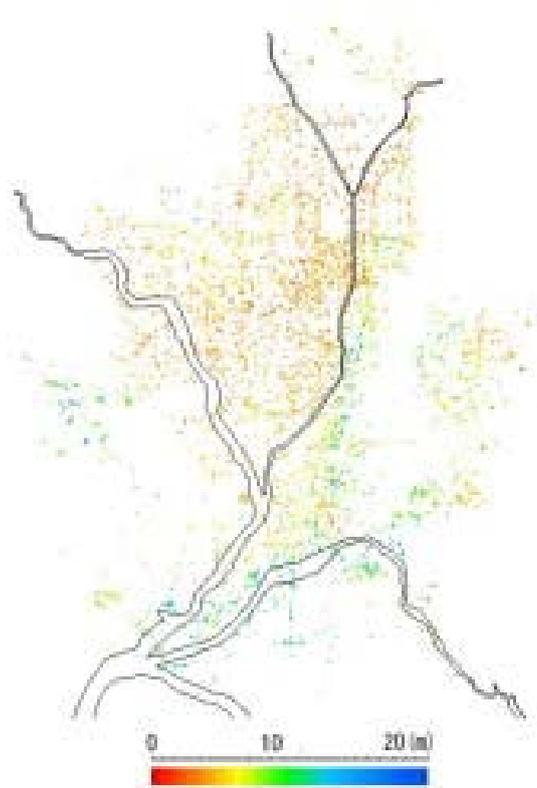


図 3-3-1 京都市(2014)で収集されたボーリングデータの分布(京都市、2014の図-2.6)。
 カラースケールは工学的基盤深度を表している。

表 3-3-1 奈良県(2005)における地盤タイプと地盤種分類(奈良県、2005の表II-1)。

地盤タイプ	固有周期	地形種別
01	0.09	1種
02	0.28	2種
11	0.25	
12	0.21	
13	0.30	
14	0.28	
15	0.26	
16	0.22	
17	0.21	
18	0.20	
19	0.30	
21	0.26	
22	0.22	
23	0.26	
24	0.26	

地盤タイプ	固有周期	地形種別
31	0.40	3種
32	0.44	
33	0.43	
34	0.42	
35	0.49	
36	0.55	
37	0.54	
04	0.64	4種

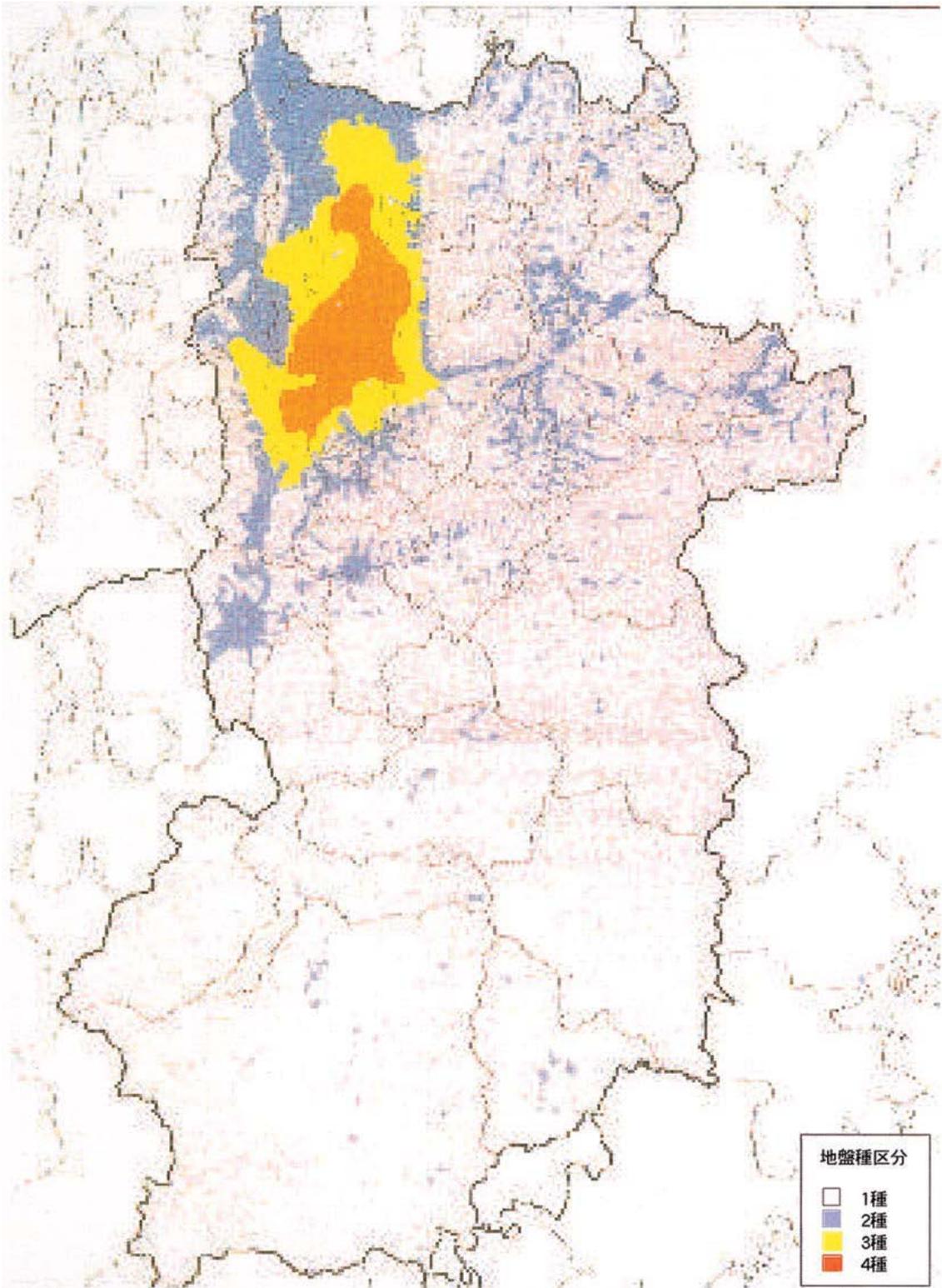


図 3-3-2 奈良県（2005）による浅部地盤モデル（奈良県、2005 の図 II-3）。

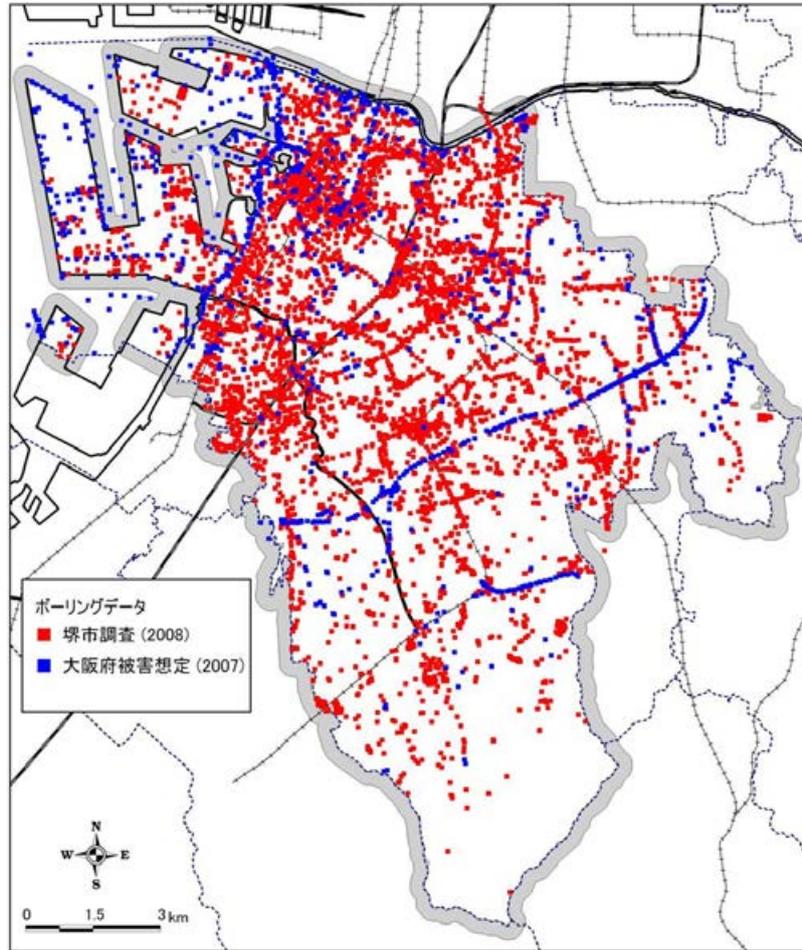


図 3.3-3 堺市 (2009) のボーリング分布図 (堺市、2009 の図 2.1-1)。

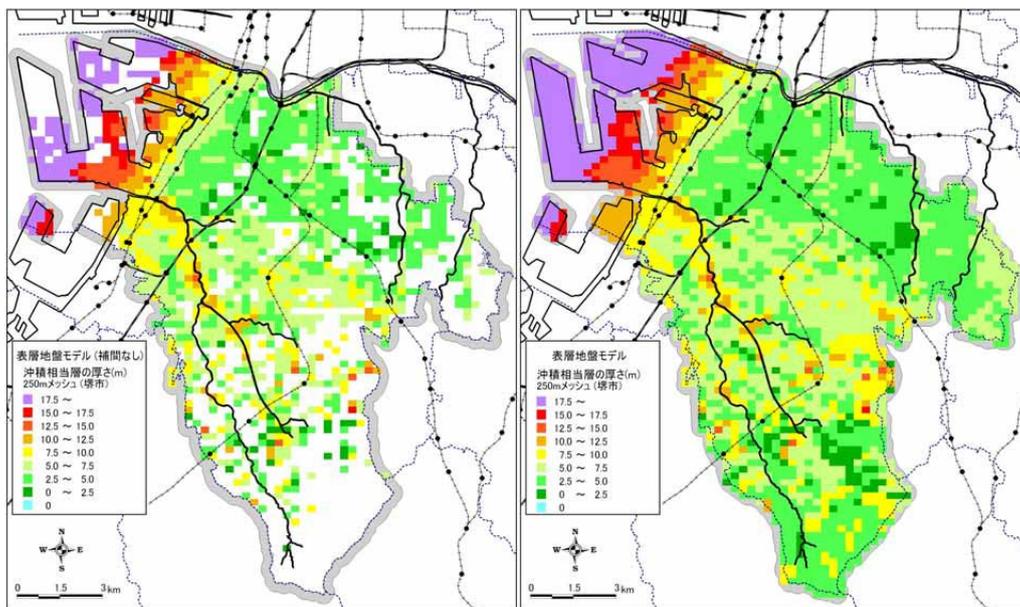


図 3-3-4 堺市 (2009) による浅部地盤モデル (冲積相当層の厚さ分布)。左はボーリングデータによるモデル、右は補間したモデル (堺市、2009 の図 2.2-7)。

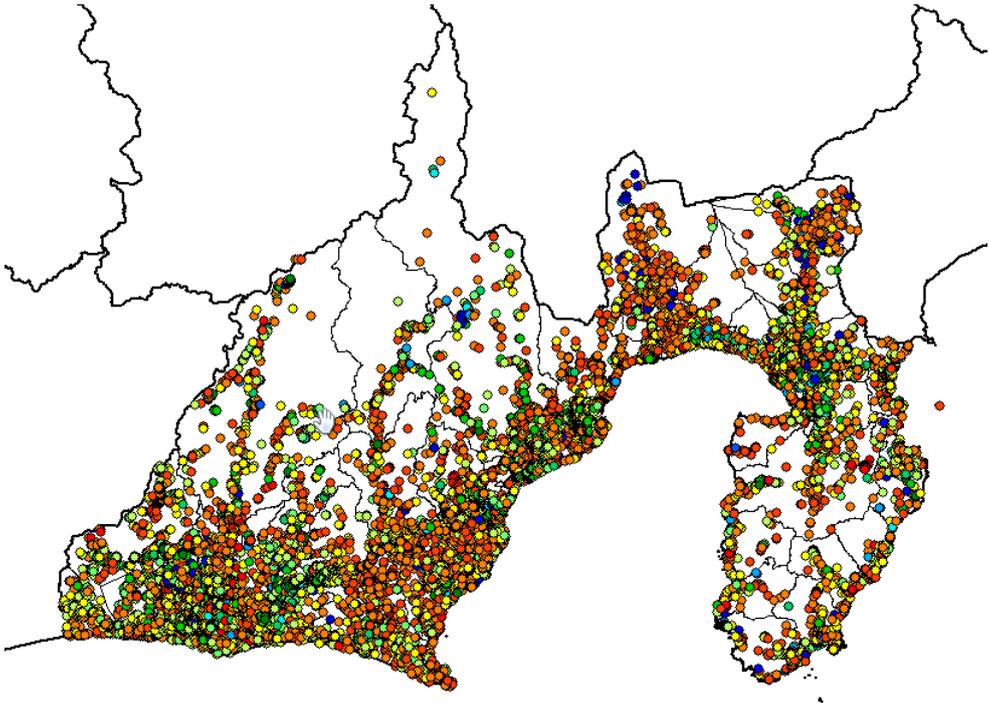


図 3.3-5 静岡県 (2016) で収集されているボーリングデータ (静岡県、2016 の図 II-1.6)。

3.4. 長周期地震動ハザード評価結果の活用の検討等

(1) 事業の内容

(a) 事業の題目

長周期地震動ハザード評価結果等の活用の検討等

(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

長周期地震動ハザード評価結果の利活用ならびに長周期地震動に対する防災・減災に資するための方策を提示する。

(2) 事業の成果

(a) 事業の要約

長周期地震動シミュレーション結果から想定される超高層ビル等の被害等を示した。また、平成26年度までの長周期地震動ハザードマップ作成等支援事業等による成果等に基づいて、長周期地震動ハザード評価結果と長大構造物における耐震基準や規格（例えば、建築基準法及び建築基準法施行令など）との対応について調査・整理した。これらの長周期地震動に関する知見等について一般国民等に広く周知できるウェブページを試作した。

(b) 事業の成果

1) 長周期地震動ハザード評価結果から想定される被害等に関する検討

(A) 4.1 長周期地震動ハザード評価に基づく面的な応答評価の検討

a) 相模トラフの長周期地震動ハザード評価結果による応答スペクトルと解析地震の選定

相模トラフを震源とする地震による長周期地震動の面的評価を行う検討ケースを選択するために、埼玉県庁位置、千葉県庁位置、東京都庁位置及び神奈川県庁位置の4地点における、発生の頻度を念頭に置いて設定した重みを考慮して算定した地震動の平均及び平均+ σ のスペクトルに最も近い特性を有するケースを抽出する。

相模トラフを震源とする地震による長周期地震動の計算ケースは平成26年度に実施した合計274ケース、これらは、10通りの震源域を考慮し、アスペリティ配置と破壊開始点位置等をパラメータとして複数ケースの計算が行われている。想定する震源域ごとにそれぞれ重みが設定されており、その重み係数を表3-4-1に示す。震源域を同じにする評価ケースについては、重み係数は同一とする。

想定した震源域毎の pSv の平均を比較する。参考のため想定震源域を図3-4-1に示す。比較した結果を図3-4-2から図3-4-5に示す。

次に、各地点でのスペクトルの平均及び平均+ σ （標準偏差）、並びに、それぞれに近いスペクトル特性を持つ評価ケースの地震動のスペクトルを図 3-4-6～図 3-4-9 に示す。平均及び平均+ σ のスペクトルに対し、1.5 秒～8 秒の区間で誤差が最少となるケースを平均及び平均+ σ のケースとして選定している。ここで選択された地震動は下表に示す評価ケースのものである。

表 3-4-1 想定する震源域毎に設定した重み係数（地震調査委員会, 2014）。

震源域	Mw	重み	評価ケース数
No. 1	7.9	0.37	20
No. 2	8.2	0.06	12
No. 3	8.0	0.30	20
No. 4	8.3	0.05	12
No. 5	8.4	0.03	18
No. 6	8.5	0.01	72
No. 7	8.5	0.01	18
No. 8	8.6	0.02	72
No. 9	7.9	0.11	12
No.10	8.2	0.04	18
合計		1.00	274

表 3-4-2 選択した評価ケース。

地点	レベル	ケース
SIT 埼玉県庁	平均	AREA09_P2_h7
	平均+ σ	AREA08_s2_P2_h3
CHB 千葉県庁	平均	AREA04_P2_h3
	平均+ σ	AREA08_s2_P1_h1
TKY 東京都庁	平均	AREA03_P2_h3
	平均+ σ	AREA06_s2_P1_h1
KNG 神奈川県庁	平均	AREA08_s2_P3_h6
	平均+ σ	AREA03_P3_h2

陸側+海側 ● →
 浅い領域の付加 ● - - ->
 深い領域の付加 ● - - ->

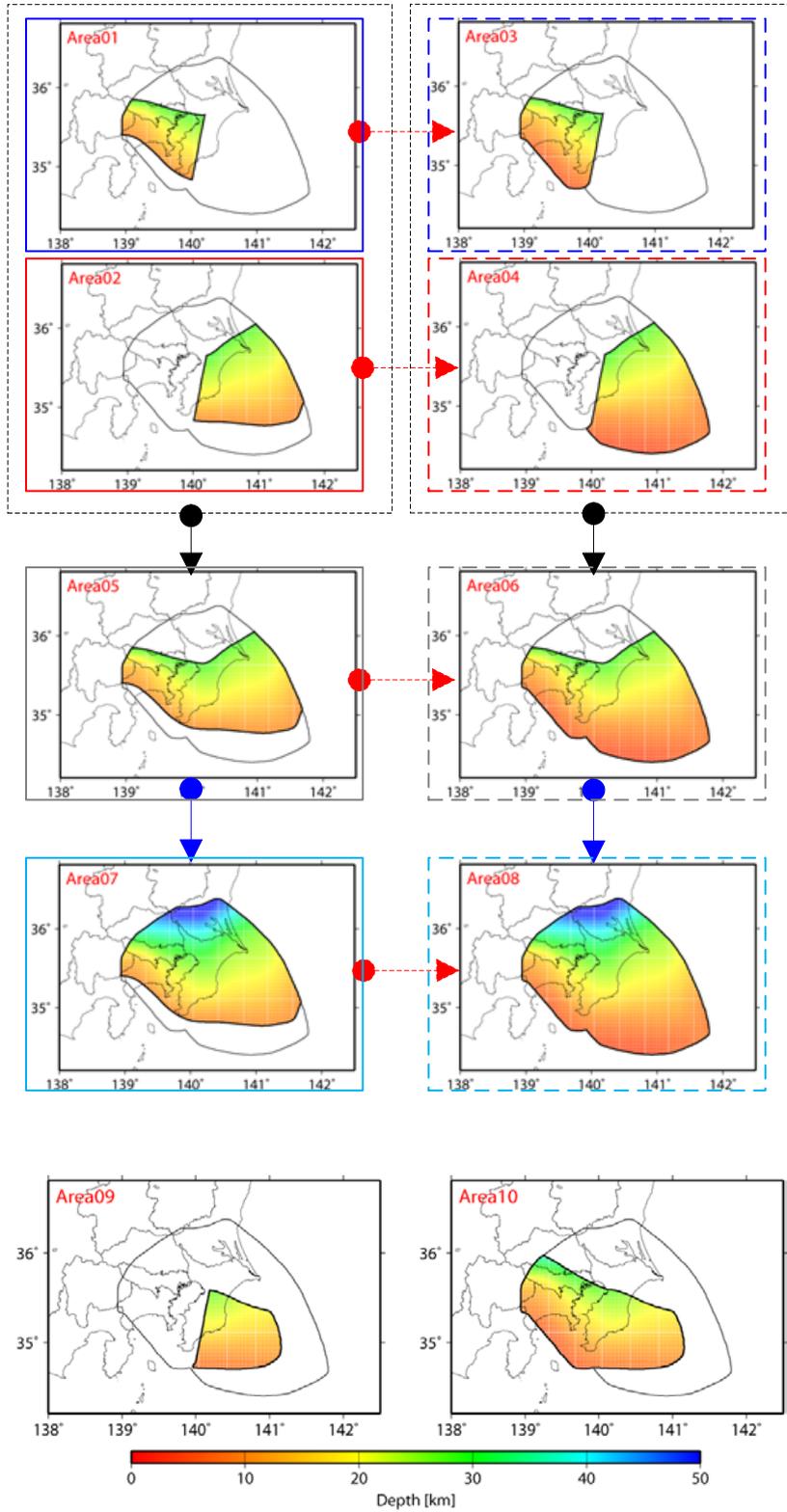


図 3-4-1 検討対象の相模トラフ沿いの M8 クラスの地震の震源域。

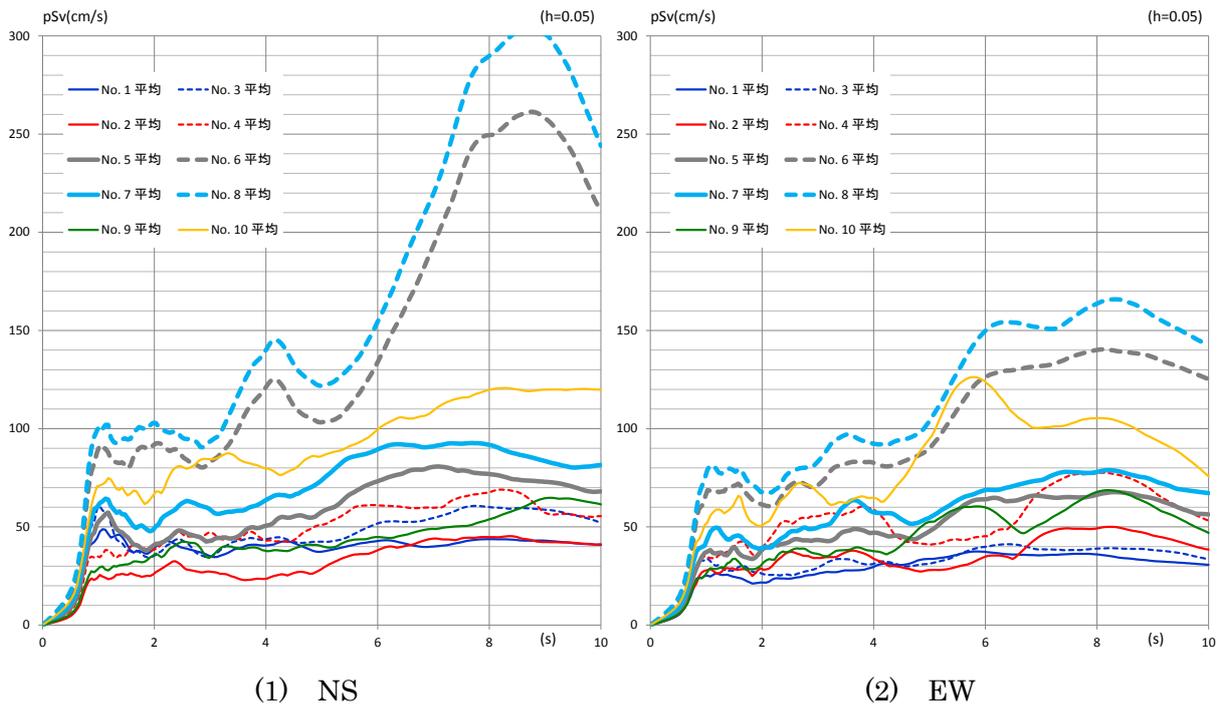


図 3-4-1 想定する震源域毎の平均比較（埼玉県庁）。

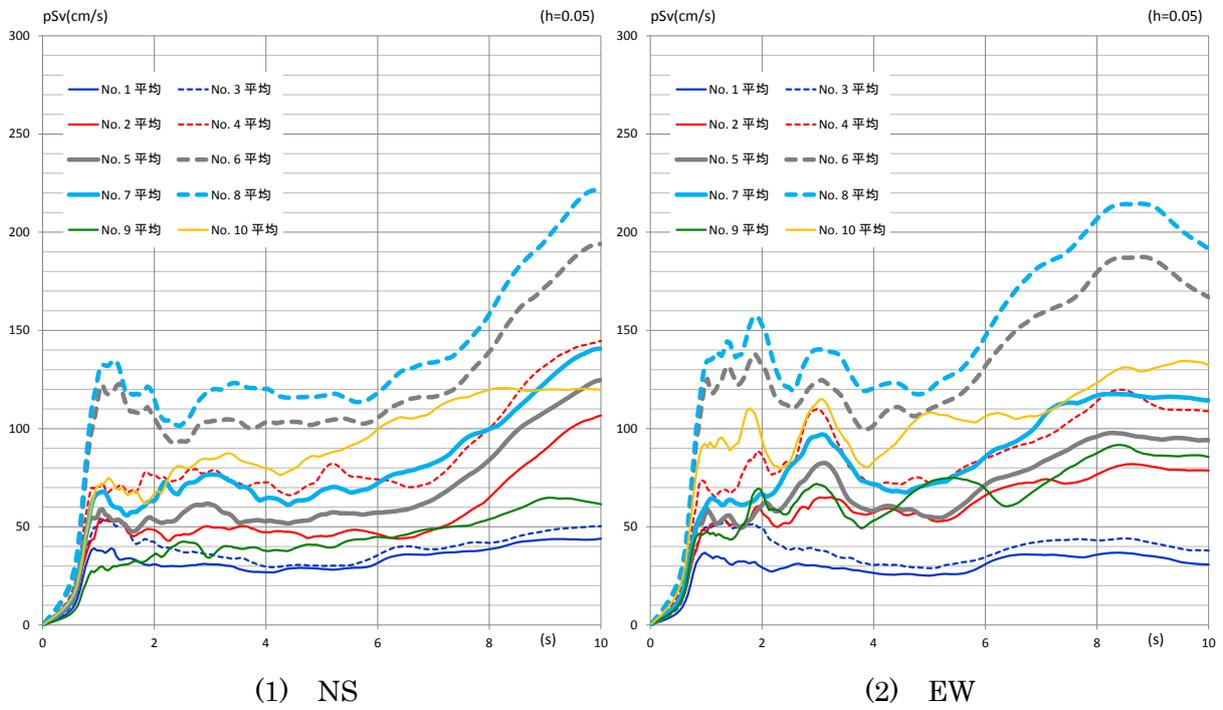


図 3-4-2 想定する震源域毎の平均比較（千葉県庁）

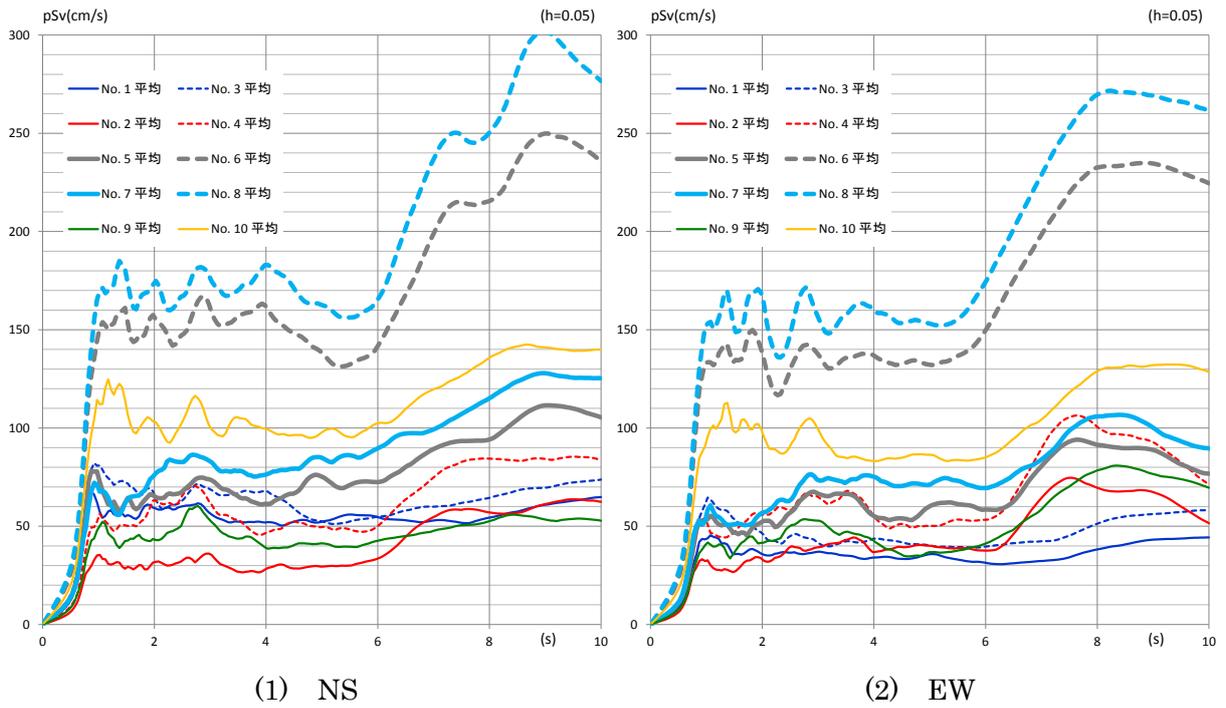


図 3-4-3 想定する震源域毎の平均比較（東京都庁）

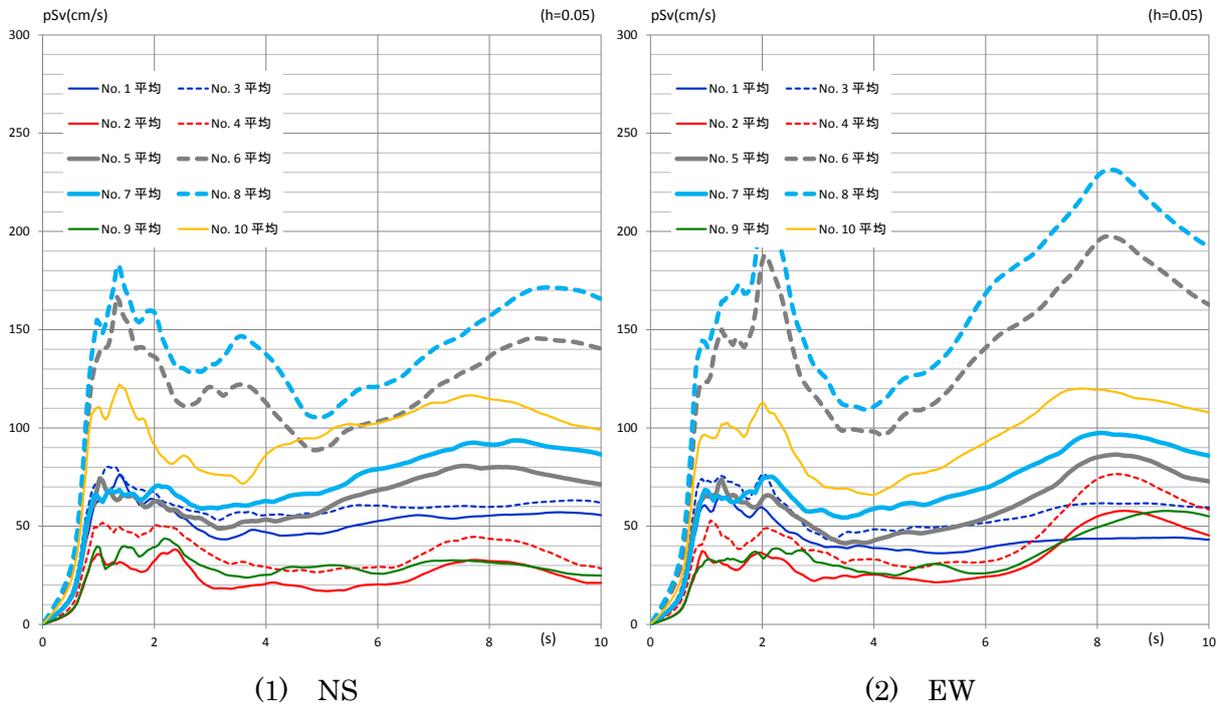


図 3-4-4 想定する震源域毎の平均比較（神奈川県庁）

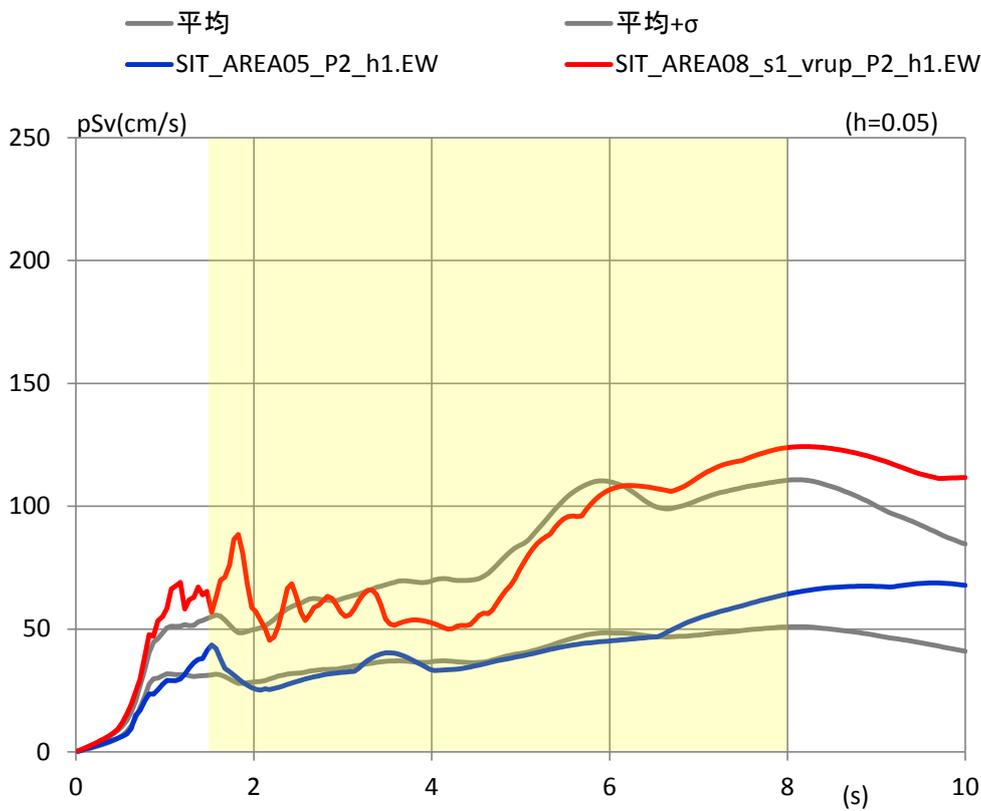
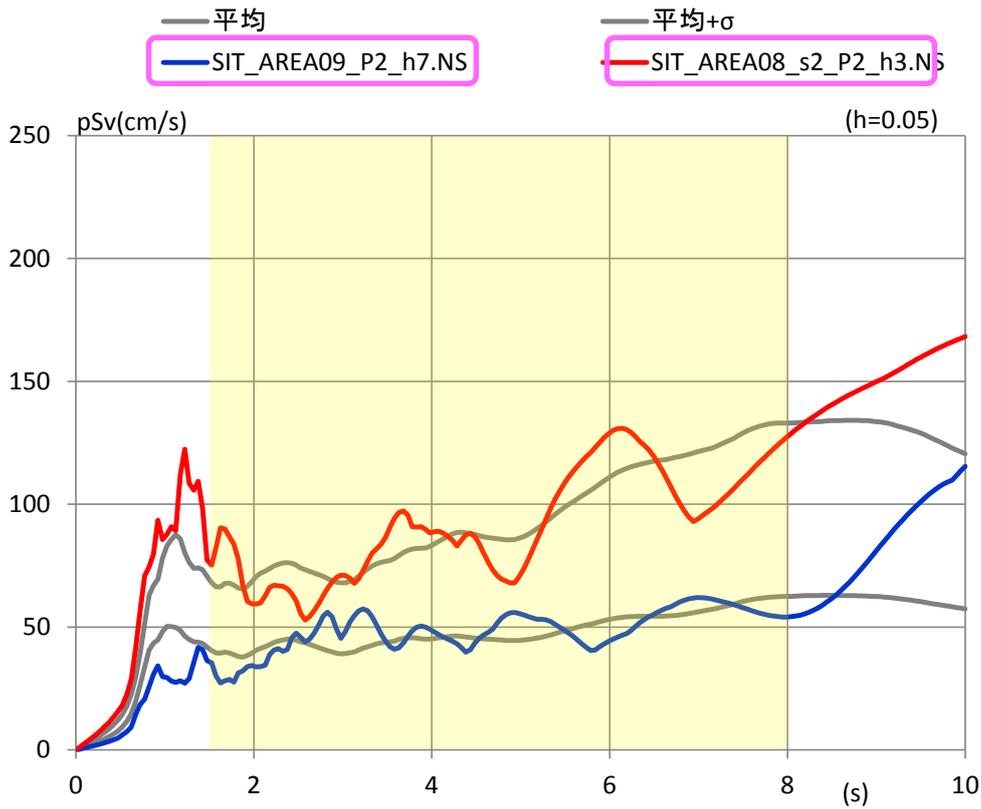


図 3-4-5 平均及び平均+σ並びに選択した評価ケースのスペクトル（埼玉県庁位置）。
 (選択ケースは、平均及び平均+σのスペクトルと黄色のハッチで示した1.5秒～8秒の区間で
 誤差が最少となるシナリオ地震)

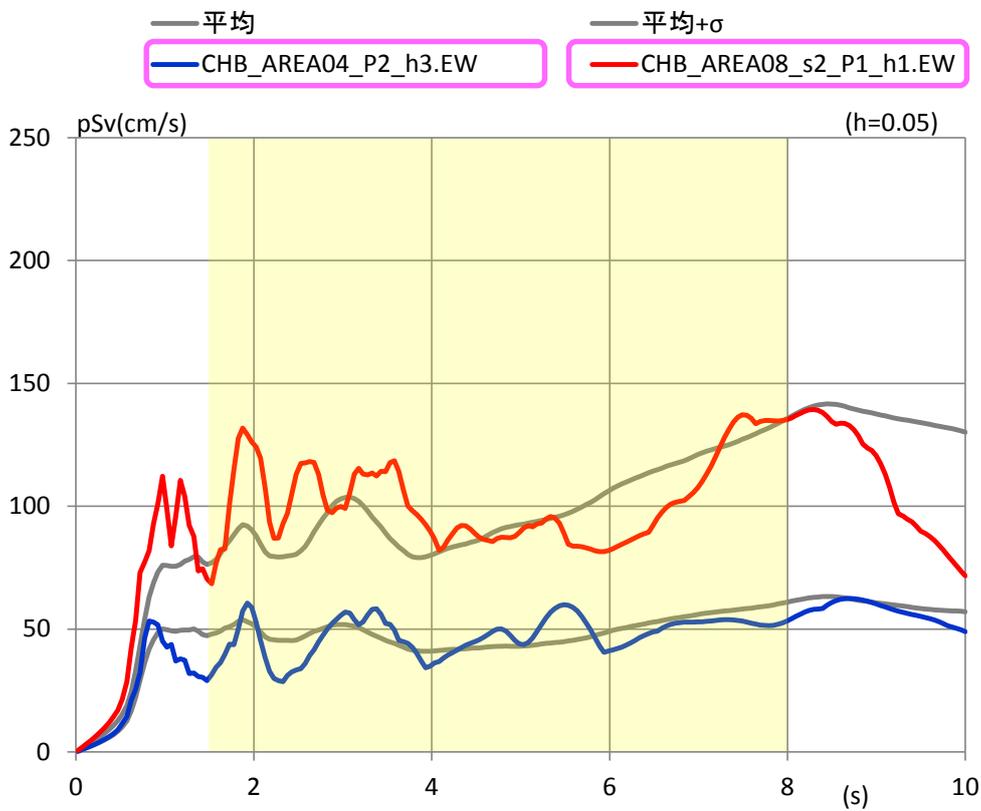
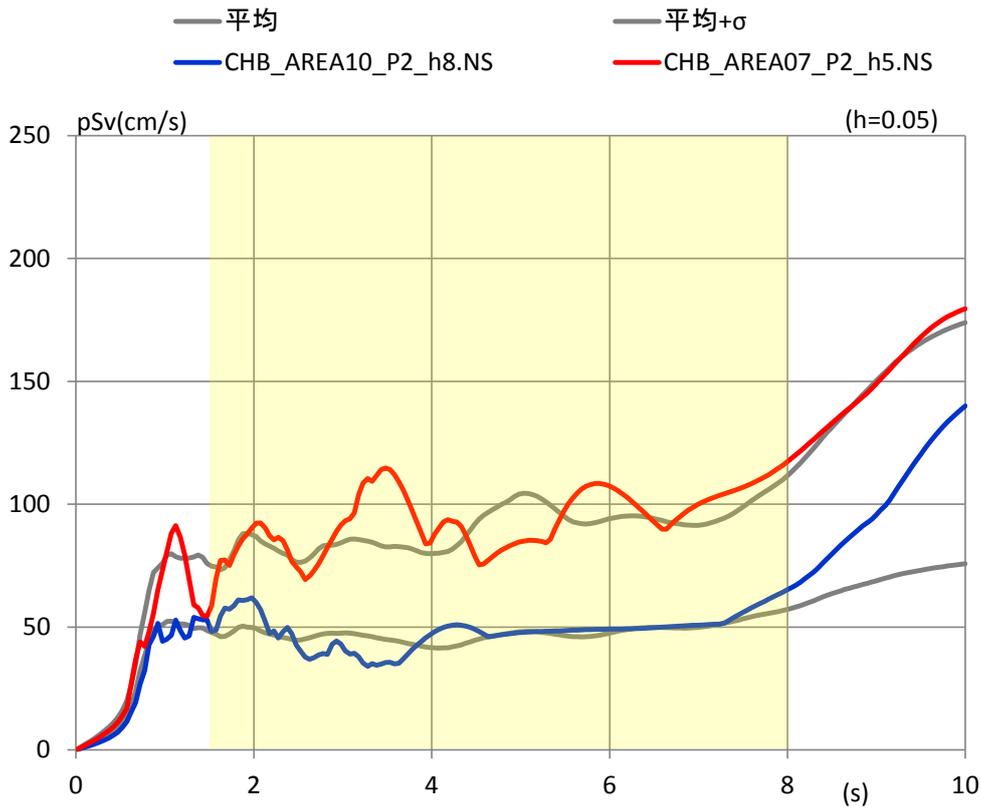


図 3-4-6 平均及び平均+ σ 並びに選択した評価ケースのスペクトル（千葉県庁位置）。
 （選択ケースは、平均及び平均+ σ のスペクトルと黄色のハッチで示した 1.5 秒～8 秒の区間で
 誤差が最少となるシナリオ地震）

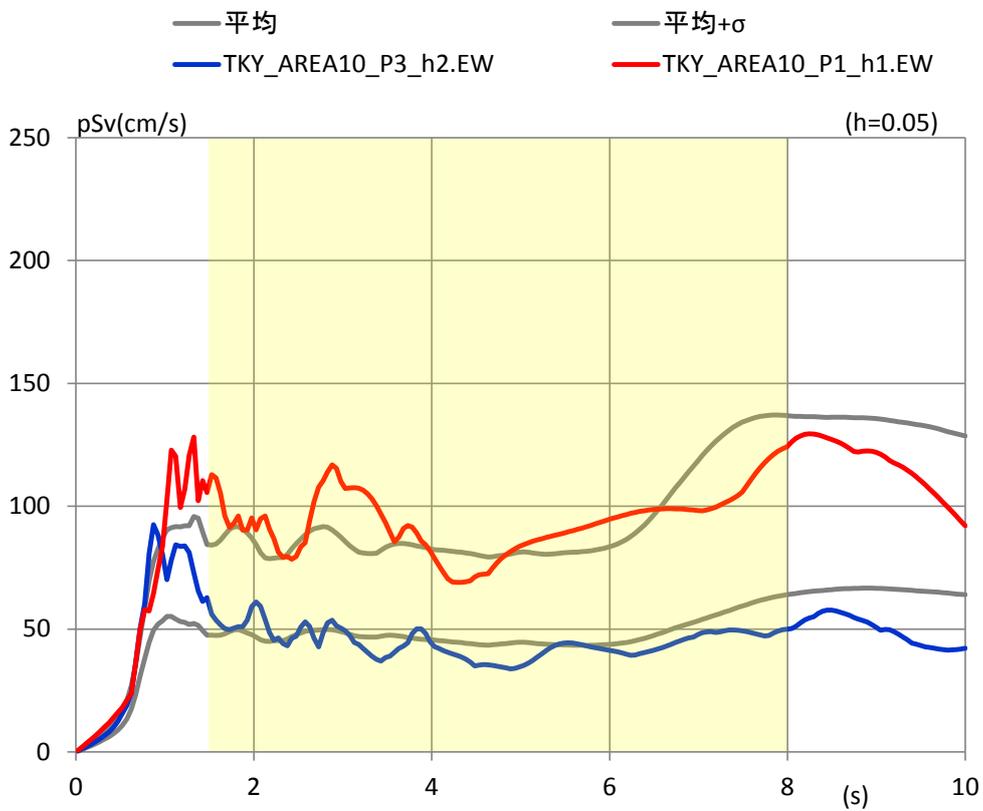
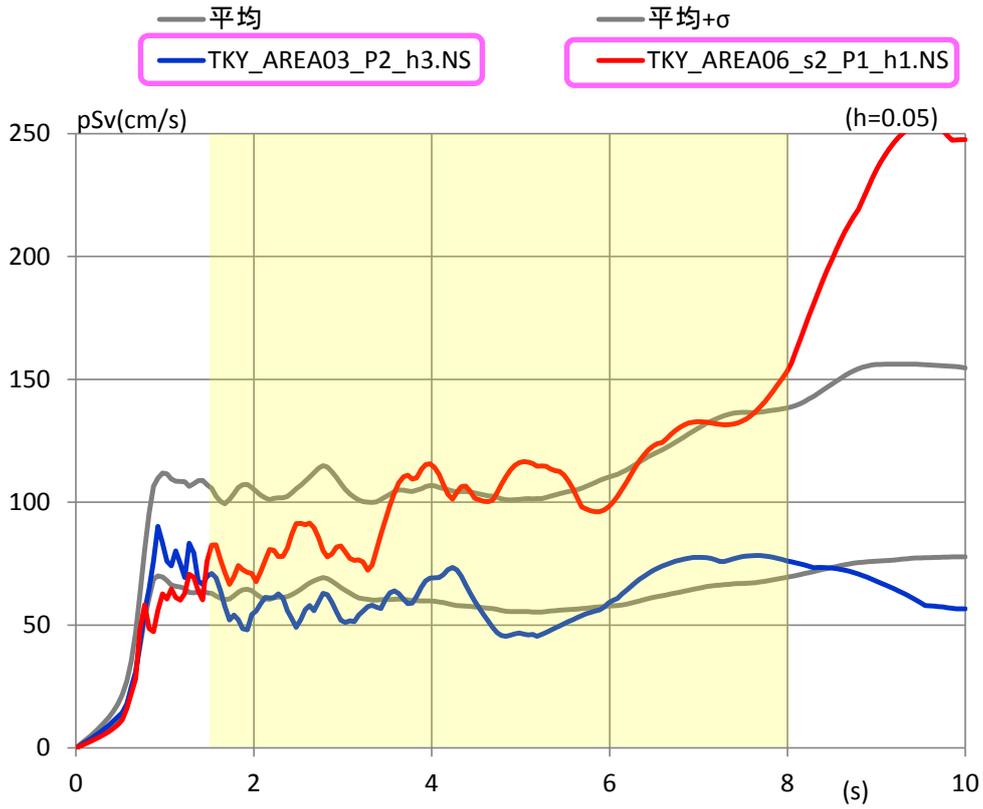


図 3-4-7 平均及び平均+ σ 並びに選択した評価ケースのスペクトル（東京都庁位置）。
 （選択ケースは、平均及び平均+ σ のスペクトルと黄色のハッチで示した 1.5 秒～8 秒の区間で
 誤差が最少となるシナリオ地震）

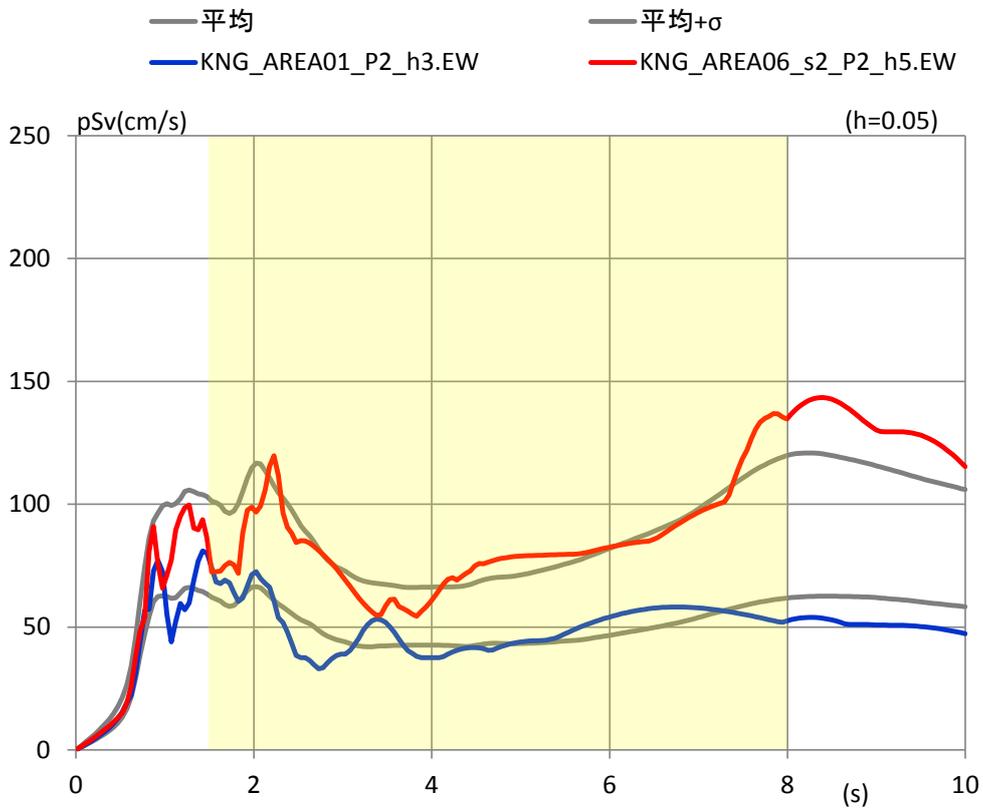
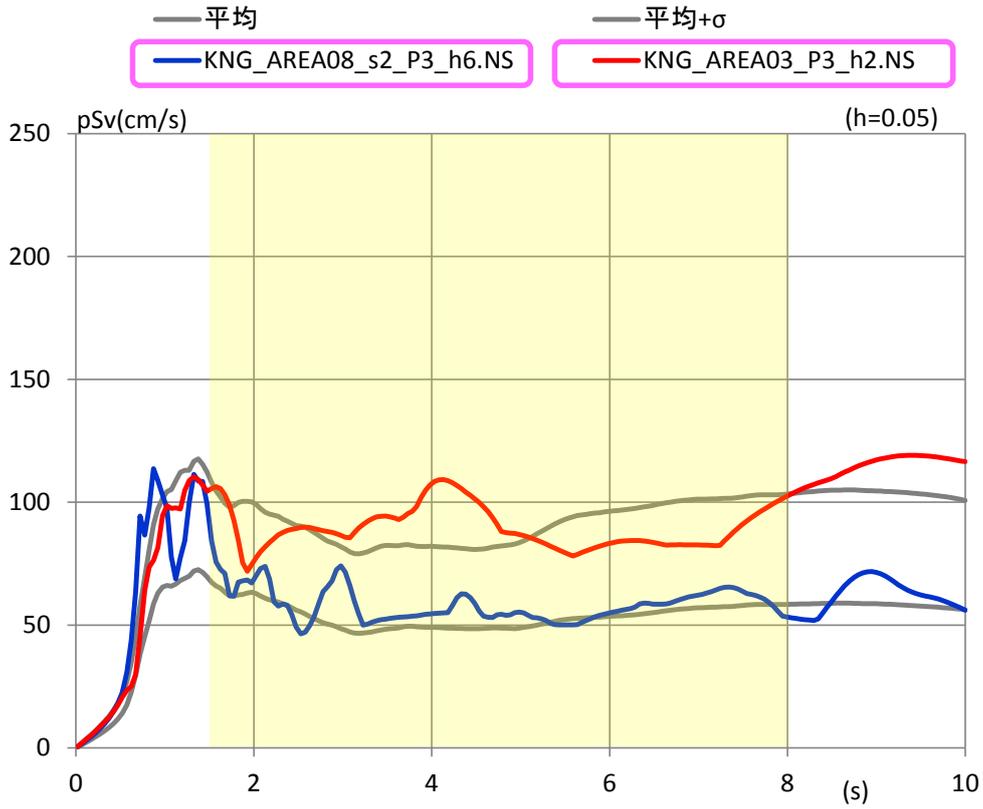


図 3-4-8 平均及び平均+ σ 並びに選択した評価ケースのスペクトル（神奈川県庁位置）。
 （選択ケースは、平均及び平均+ σ のスペクトルと黄色のハッチで示した 1.5 秒～8 秒の区間で
 誤差が最少となるシナリオ地震）

b) 相模トラフ地震の長周期地震動指標の分析

(1) 全ケースによる指標の確率分布

相模トラフ沿いのプレート境界地震について三次元差分法によりシミュレーションされた長周期地震動を用いて、各地の長周期地震動の指標の確率分布について評価を行う。長周期地震動は、10通りの震源域を用い、破壊開始点やアスペリティを変えた全体で274ケースの断層モデルで解析された。評価地点は、首都圏の都庁や県庁位置とし、茨城県庁、栃木県庁、群馬県庁、千葉県庁、埼玉県庁、東京都庁、神奈川県庁、山梨県庁の合計8か所とした。確率分布を求める際には、震源域ごとに与えた重みを用い、それぞれの震源域の中のケースは均等確率と仮定した。

・相対速度応答スペクトル指標

相対速度応答スペクトル($h=5\%$)は、南海トラフの地震による平成26年度までの検討によると1.6秒～7.8秒の0.2秒刻みの値の平均値である指標が超高層建物の最大層間変形角などの最大応答値と最も相関が高いことが示されている。この指標の確率分布を図3-4-10に示す。この指標では100cm/sで超高層建物の最大層間変形角が平均的には1/100を超え、ごく稀の入力地震動に対するクライテリアレベルとなる。1/100となる確率は、東京、神奈川、千葉、埼玉、群馬で1割前後、山梨、茨城、埼玉でゼロに近い。

・長周期地震動階級

気象庁が発表する長周期地震動階級は、絶対加速度応答スペクトル($h=5\%$)1.6～7.8秒の0.2秒刻みの最大値の指標を用いて4段階の階級を判定する。絶対速度応答スペクトルの指標の確率分布を図3-4-11に示す。階級4以上を示す確率は、東京、神奈川、埼玉、群馬で1/3程度あり、千葉が2割強、山梨が1割、茨城、栃木はほとんどないことが分かる。相模トラフでM8クラスの地震が発生すれば、断層モデルに依らず、首都圏全域で1以上の長周期地震動階級が発表されることが想定される。

・長周期指標 I_{L2}

次に、平成26年度まで体感に近い尺度という位置づけで提案してきた計測震度のフィルタ特性を長周期側に拡張して計算する長周期指標について検討する。ここでは、2～10秒の帯域のフィルタを用いた長周期指標 I_{L2} を各地で求め、その確率分布を評価し、図3-4-12に示す。相対速度応答スペクトル指標の100cm/sは $I_{L2}=5.9$ に、10cm/sは $I_{L2}=4.0$ くらいにそれぞれ相当する。

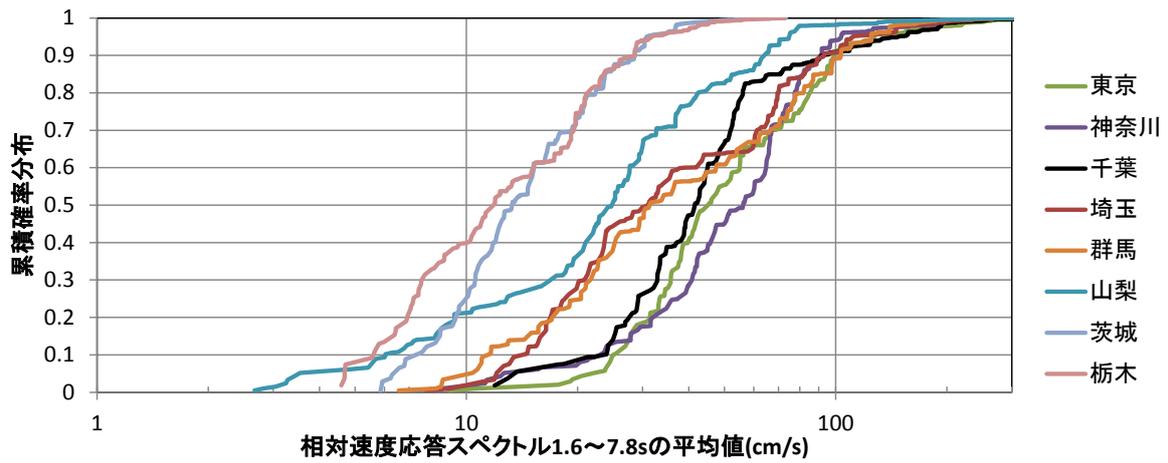


図 3-4-10 相模トラフ地震による相対速度応答スペクトル指標の各地の確率分布。

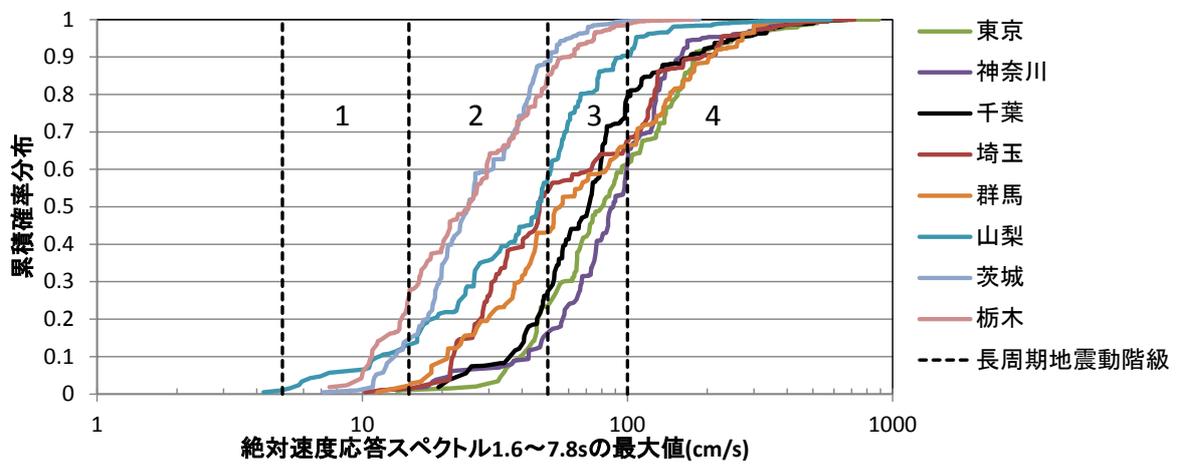


図 3-4-11 相模トラフ地震による絶対速度応答スペクトル指標各地の確率分布。

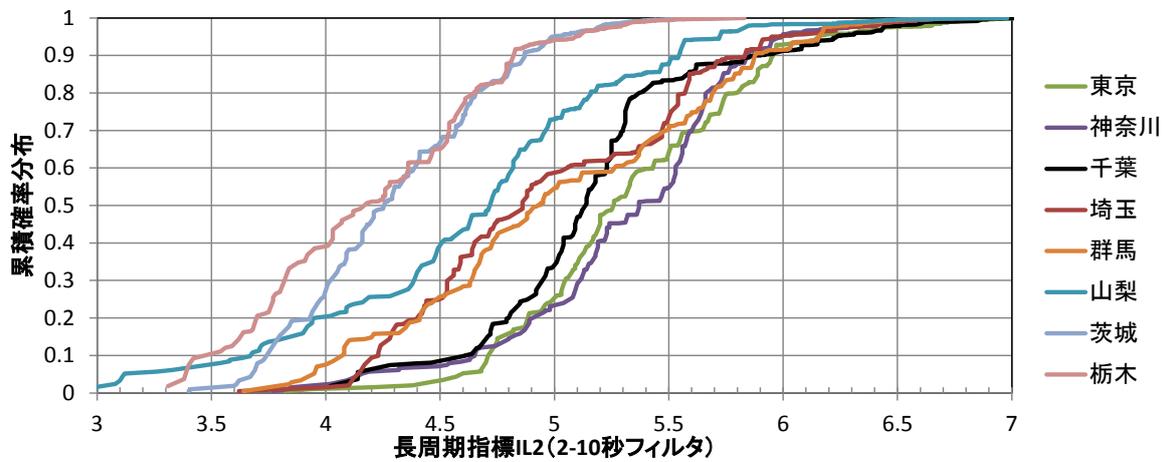


図 3-4-12 相模トラフ地震による長周期指標 I_{L2} の各地の確率分布。

(2) 東京近郊の面的評価による指標の確率分布

埼玉県南部から東京都、神奈川県西部、千葉県北部湾岸部に亘る領域を対象に 2km メッシュで求めた面的長周期地震動から各長周期地震動指標を算定した。メッシュの数は合計 878 点となる。

東京都庁位置では平均と平均+ σ に一番近いケースは図 3-4-13 に示す断層モデルの場合で、それぞれシナリオ①およびシナリオ②と呼ぶことにする。シナリオ①は、大正関東地震の震源域で、アスペリティが東京寄りにあり、破壊開始点が房総沖にあって、破壊が大正関東地震と逆に南東から北西方向に伝播するケースとなっている。シナリオ②は、元禄タイプの震源域で、トラフ沿いにアスペリティを含んでおり、アスペリティおよび破壊開始点は大正関東地震に近い。この 2 ケースについて東京近郊の 2km メッシュに長周期地震動を評価し、スペクトル指標を計算する。

面的評価の相対速度応答スペクトルの 1.6~7.8 秒の 0.2 秒刻みの平均値である指標を求め、その面的分布を図 3-4-14 に示す。

図 3-4-15 に面的評価の速度応答スペクトルによる指標の確率分布を示す。上図に示す絶対速度応答スペクトルの最大値の指標からは長周期地震動階級が評価されるが、概ね階級は 3 から 4 の評価となる。下図に示す相対速度スペクトルの指標によると、シナリオ① (赤) では、すべての地点で 100cm/s を超えず、ごく稀の地震動に対するクライテリアである 1/100 の最大層間変形角を超えない。シナリオ② (青) では 1/100 の最大層間変形角を超える可能性がある。

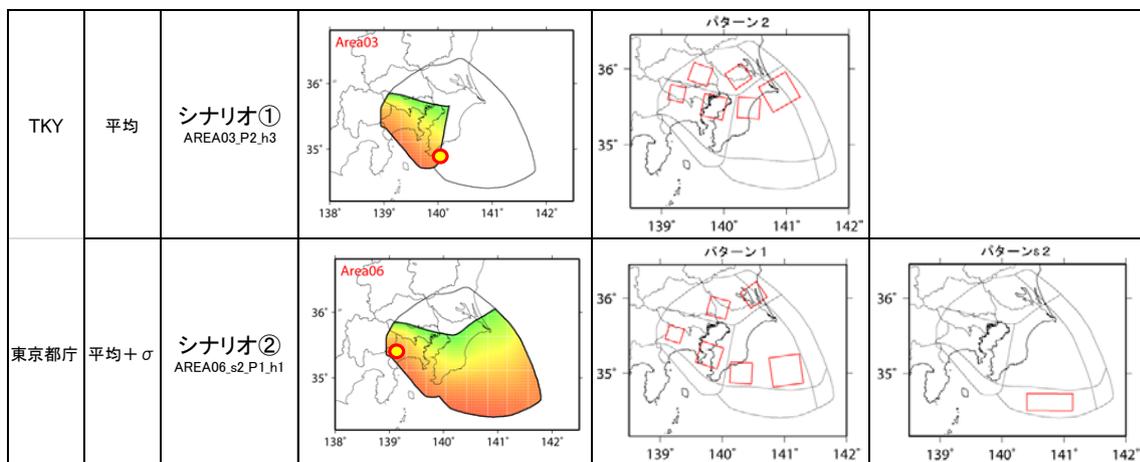
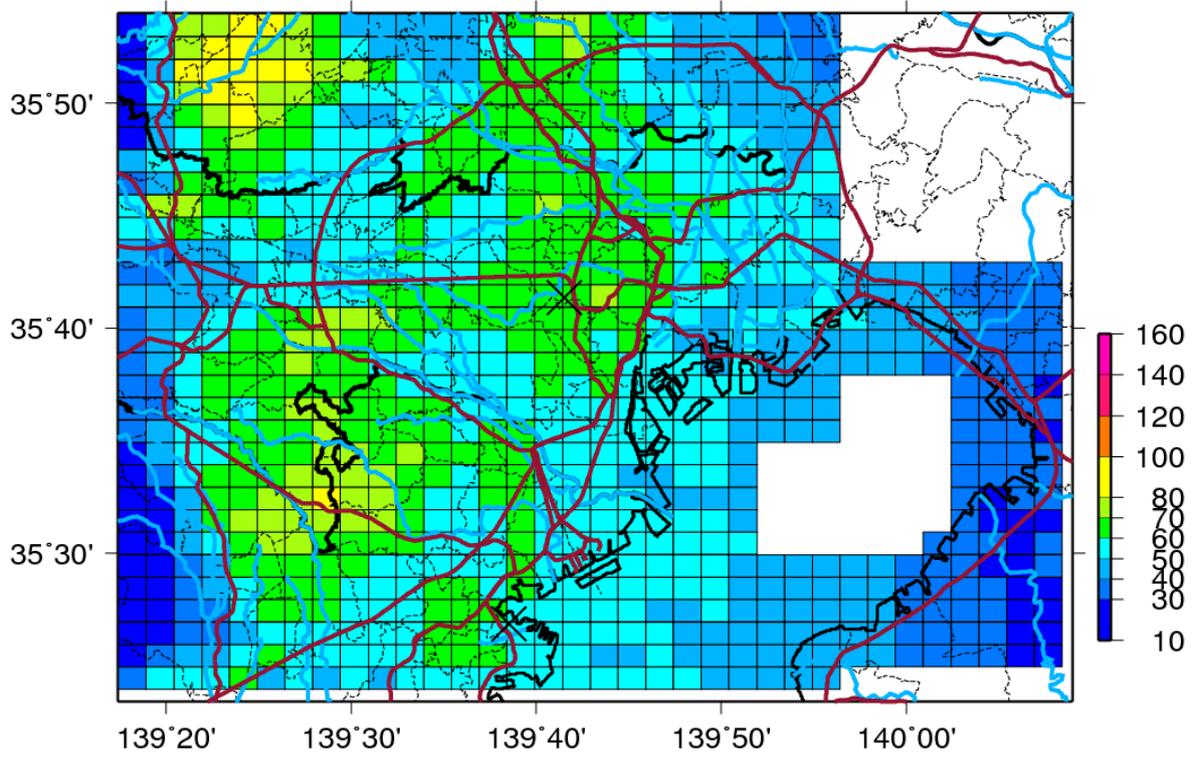
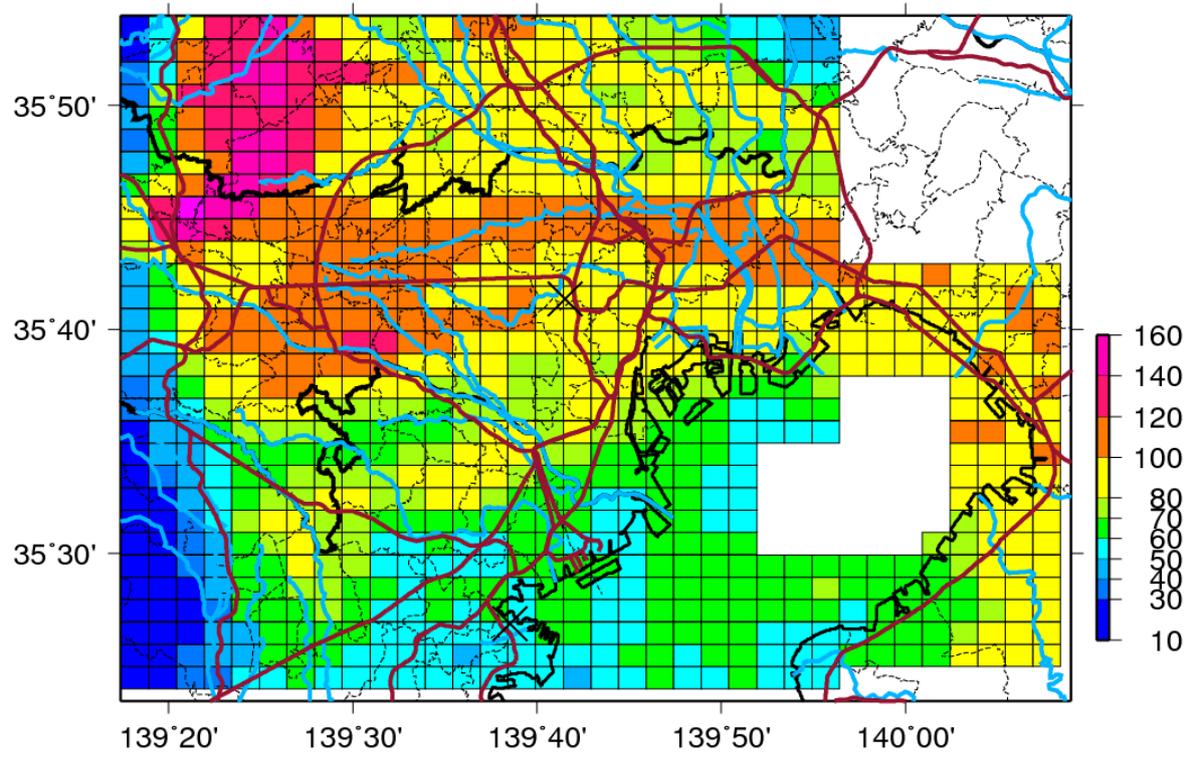


図 3-4-13 東京都庁位置での選択地震 (○が破壊開始点)。



(a) シナリオ① (A3_P2_h3)



(b) シナリオ② (A6_s2_P1_h1)

図 3-4-14 相対速度応答スペクトル指標の面的分布(cm/s)。

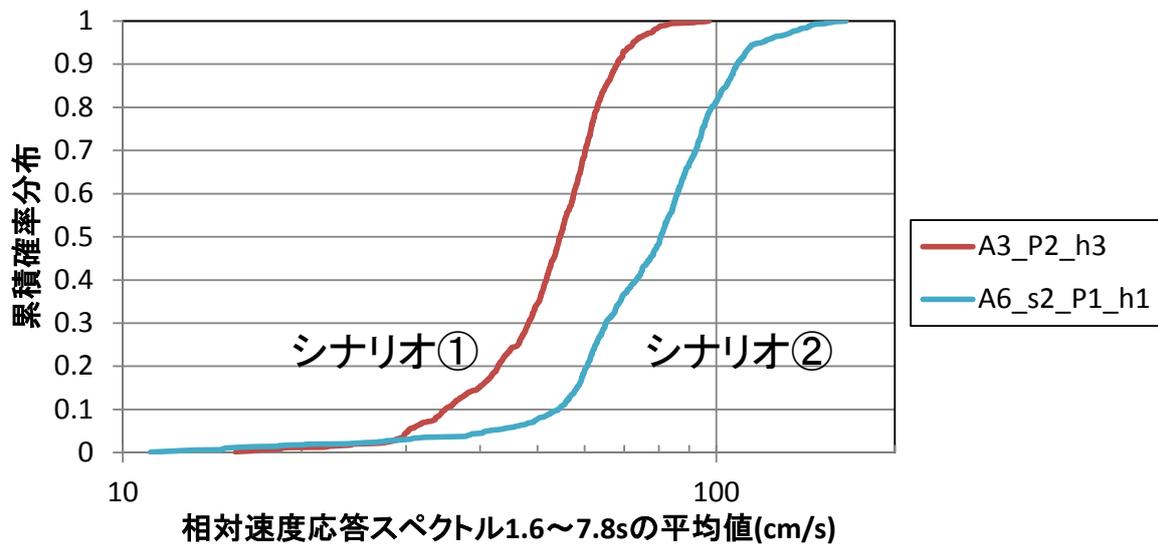
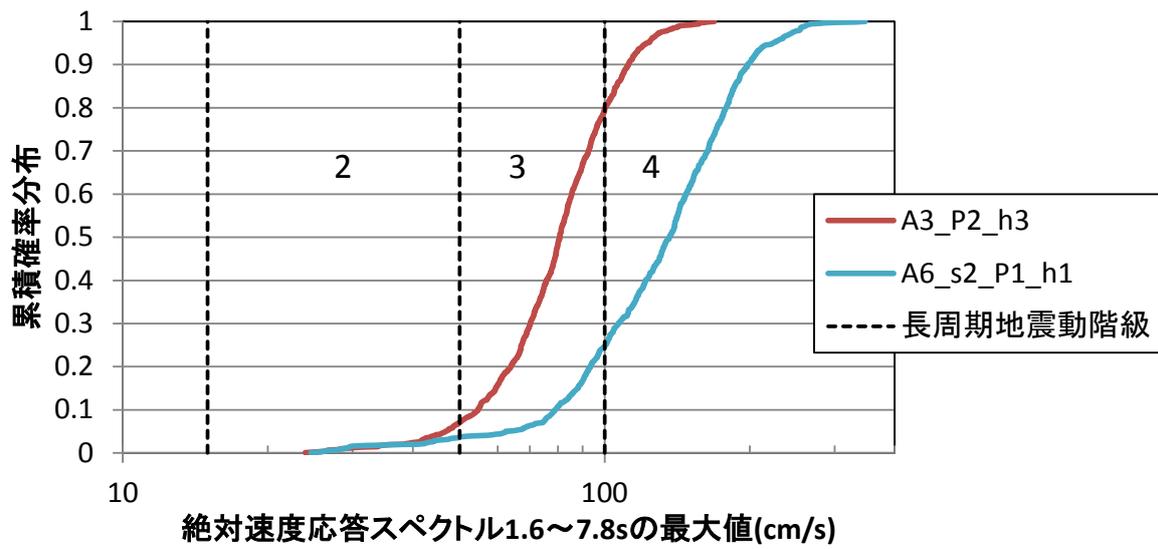


図 3-4-15 東京都庁位置で選択された地震ケースによる速度応答スペクトル指標の面的確率分布。

c) 相模トラフ地震の超高層建物および免震建物の面的応答評価

(1) 検討対象の建物モデル

多様性を考慮した建物モデルとして、本検討では、検討対象周期が短周期側に拡大されたことに対応して S20（鉄骨造 20 階建て）を、免震構造として ISO15（鉄骨造 15 階建て）の 2 種を追加することとした。

建物モデルの一覧を表 3-4-3 に示す。

(2) 入力地震動

東京都庁位置で平均、平均 + σ として選択された、AREA03_P2_h3 及び AREA06_s2_P1_h1 を、多様性を考慮した建物モデルへの入力地震動として選択する。それぞれシナリオ①及びシナリオ②の地震動と称す。

地震動の特性を代表する指標として、代表周期における擬似速度応答スペクトル値の面的分布を図 3-4-16 と図 3-4-17 に示す。

(3) 応答解析結果

超高層建物については最大応答層間変形角を、免震建物については免震層最大変形を採用し、その最大応答値の面的分布を示す（図 3-4-18～図 3-4-21）。

表 3-4-3 建物モデル一覧。

建物モデル	構造	階数	固有周期
S20	鉄骨、純ラーメン	20 階	2.68 秒
S30	鉄骨、純ラーメン	30 階	3.70 秒
S45	鉄骨、純ラーメン	45 階	5.36 秒
S60	鉄骨、純ラーメン	60 階	6.49 秒
S45X	鉄骨、純ラーメン、短スパン	45 階	3.82 秒
S45Y	鉄骨、耐震壁付きラーメン、長スパン	45 階	4.99 秒
RC40	RC、純ラーメン	40 階	3.83 秒
ISO15	免震構造	15 階 +免震層	3.67 秒 (40cm 変形時)

○入力地震動の pSV の面的分布

- ・ 全体的に見ると、NS 方向が EW 方向よりも大きい傾向がある。
- ・ 図 3-4-16 pSV シナリオ①の分布を見ると、NS 方向 6～8 秒の帯域で埼玉県庁周辺などに 100～150cm/s 程度の分布が見られるものの、その他は概ね 50cm/s 程度のレベルである。
- ・ 図 3-4-17 pSV シナリオ②の分布を見ると、NS 方向 3～5 秒の帯域で、埼玉県から東京都北部にかけて 150～250cm/s の分布が見られる。NS 方向 6 秒以上では、150～250cm/s の分布が千葉の湾岸に見られる。また、EW 方向 3～5 秒の帯域で西部の横田基地周辺に 200～300cm/s の分布が見られる。EW 方向については、3 秒や 7～8 秒では千葉周辺で 150cm/s 程度となっている。

○応答最大層間変形角の面的分布

- ・ 図 3-4-18 シナリオ①入力時の面的分布を見ると、概ね 1/100 程度となっている。S60 の NS 方向入力時については、さいたま市東部で 1/100 を超える地域が見られる。これは、同地域の pSV 値が 6 秒以上で比較的大きくなっていることと符合する。S20 は、他の建物に比べて、1/100 程度となる地域が広く分布している。
- ・ 図 3-4-19 シナリオ②入力時の面的分布を見ると、1/75 程度となる地域が多く、横田基地周辺や入間、狭山では、1/50 を超える箇所も見られる。固有周期が 2.5～4 秒の建物 (S20、S30、RC40) では、埼玉県から東京都北部にかけて 1/75 程度となる地域が広く分布しており、これは、同地域の pSV 値の分布に符合する。ただし、S30 に比べて RC40 は、より大きな変形が出る傾向が見られる。これは、履歴特性の差による履歴減衰分の違いといった建物モデル特性が影響していると考えられる。

○応答最大免震層変形の面的分布

- ・ 図 3-4-20 シナリオ①入力時の面的分布を見ると、30cm 程度である。EW 方向は、相模原南部と座間北部において 30～40cm 程度と比較的大きく、4～5 秒の pSV 値の分布と符合する。
- ・ 図 3-4-21 シナリオ②入力時の面的分布を見ると、埼玉県から東京都北部にかけて 40cm 以上の地域が分布している。クリアランス 50cm を超える地域も見られ、擁壁への衝突などが想定される。

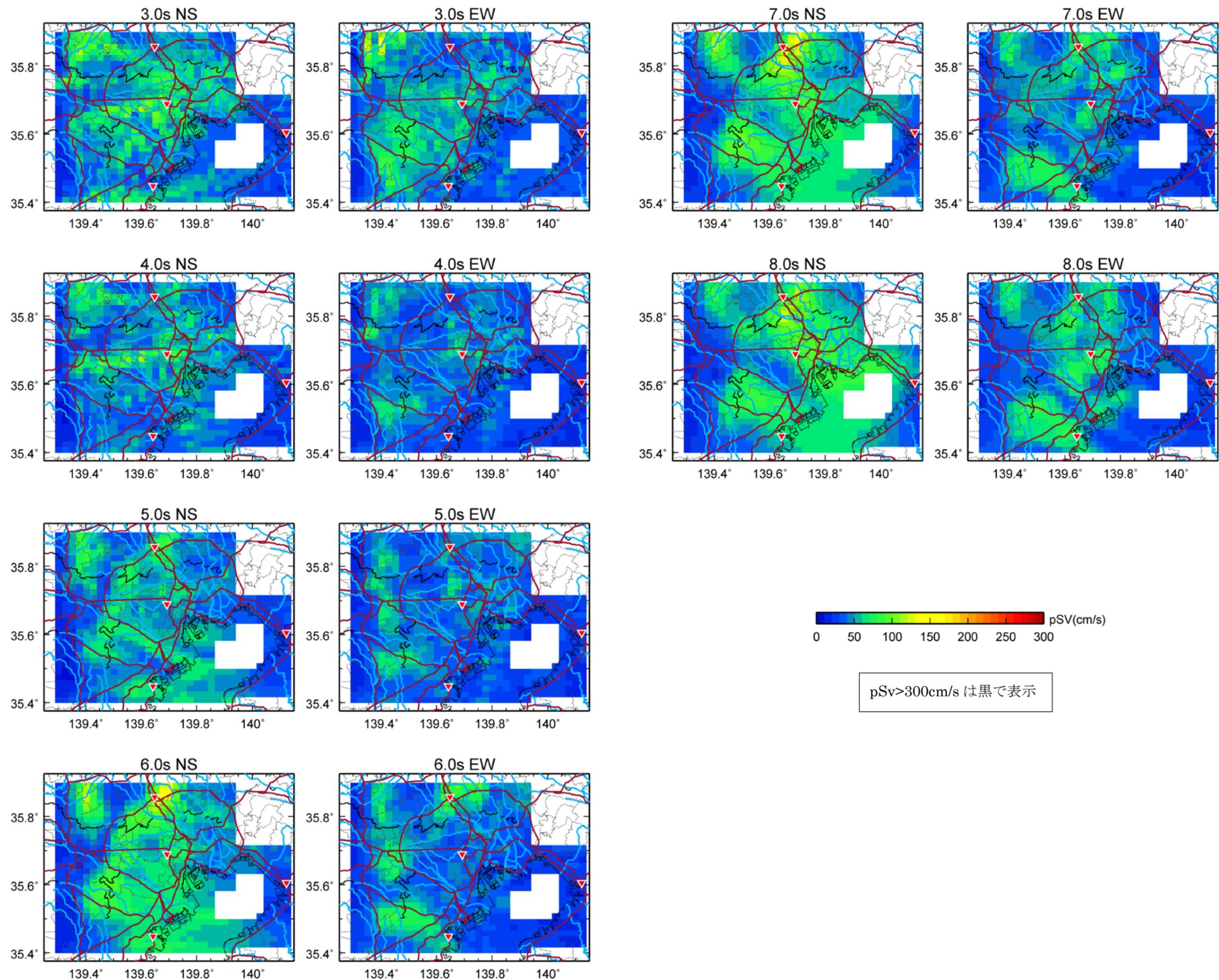


図 3-4-16 特定周期における擬似速度応答スペクトル値の分布 (相模トラフ長周期地震動、シナリオ①)。

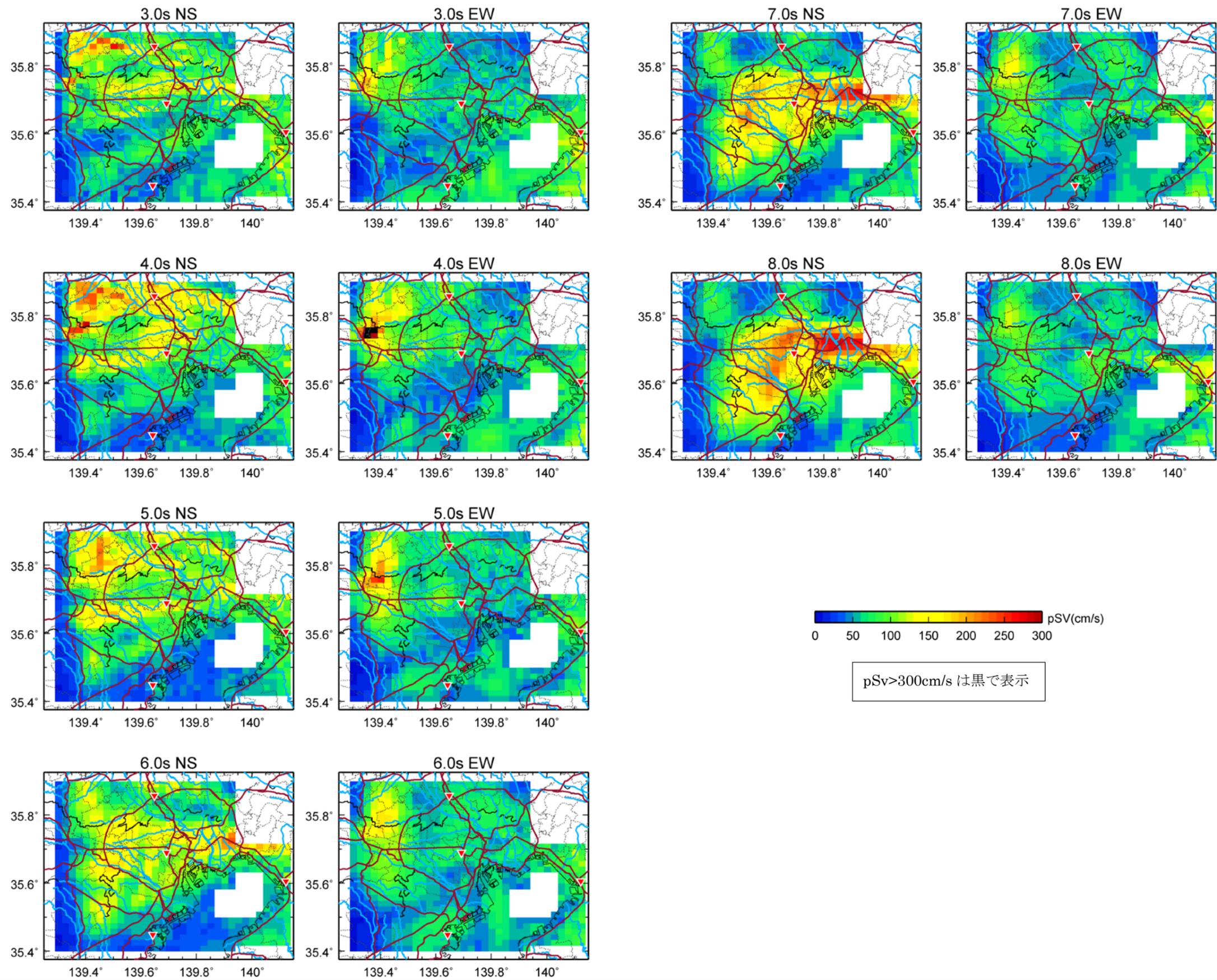


図 3-4-17 特定周期における擬似速度応答スペクトル値の分布 (相模トラフ長周期地震動、シナリオ②)。

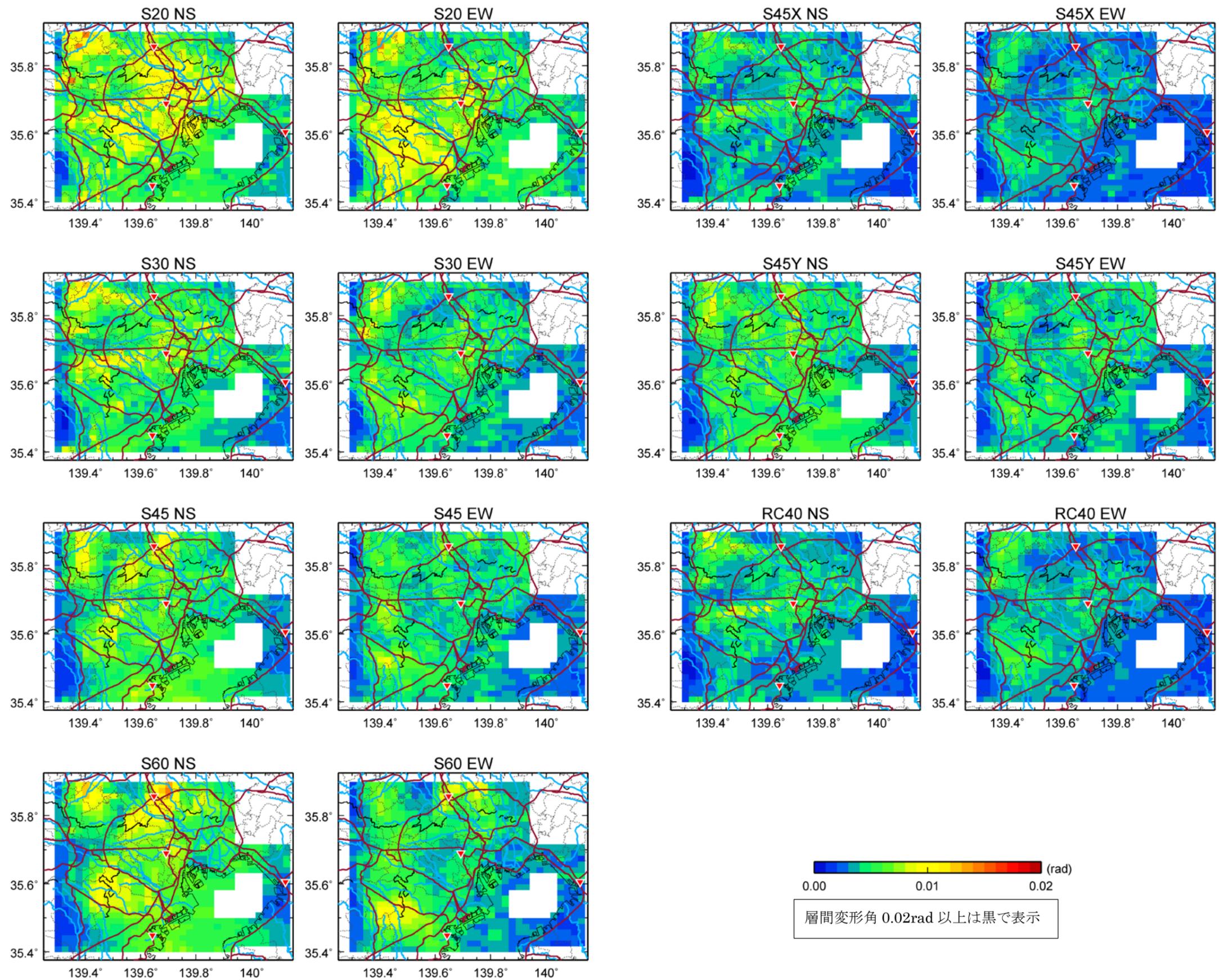


図 3-4-18 超高層建物の最大層間変形角の分布 (相模トラフ長周期地震動、シナリオ①)。

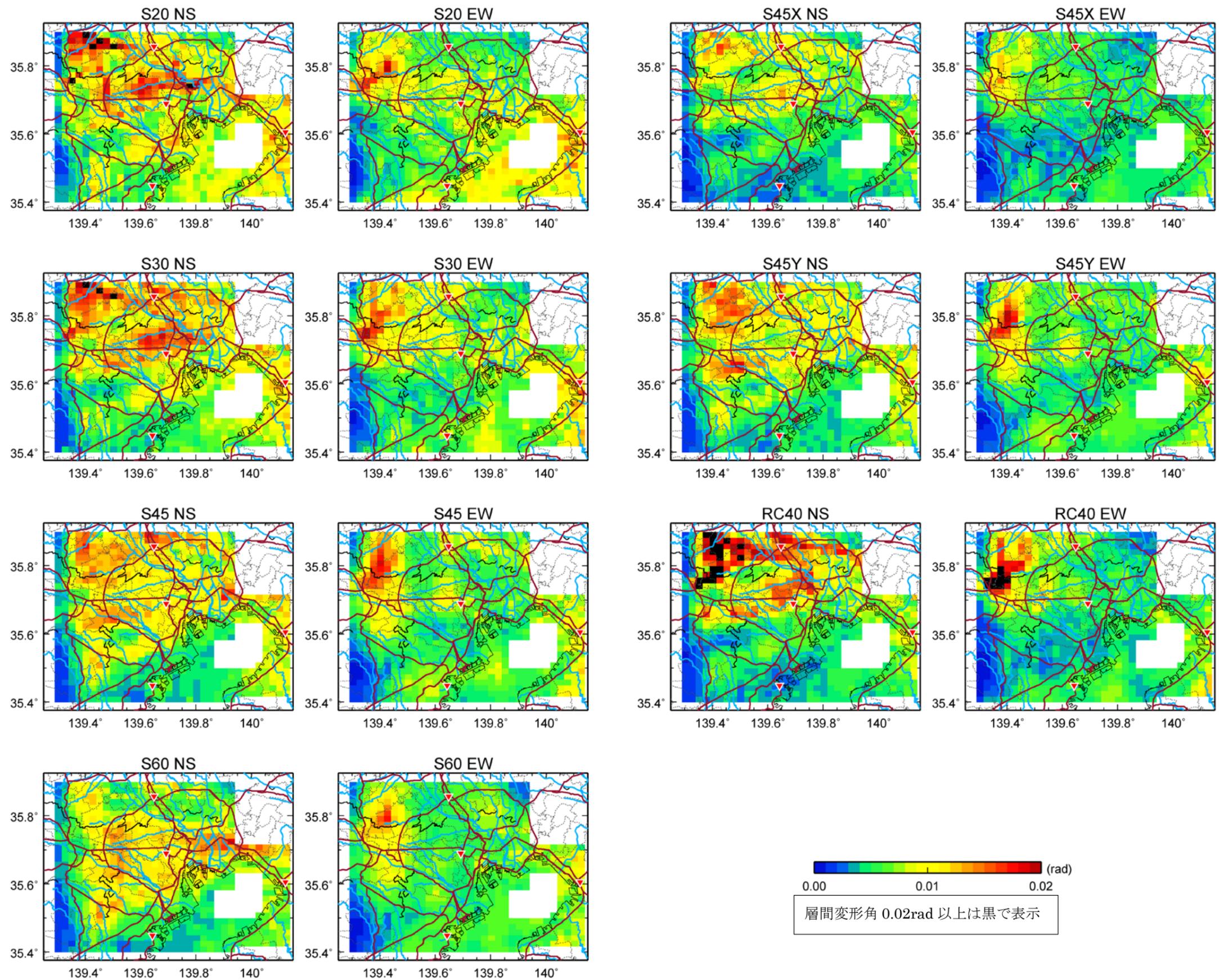


図 3-4-19 超高層建物の最大層間変形角の分布 (相模トラフ長周期地震動、シナリオ②)。

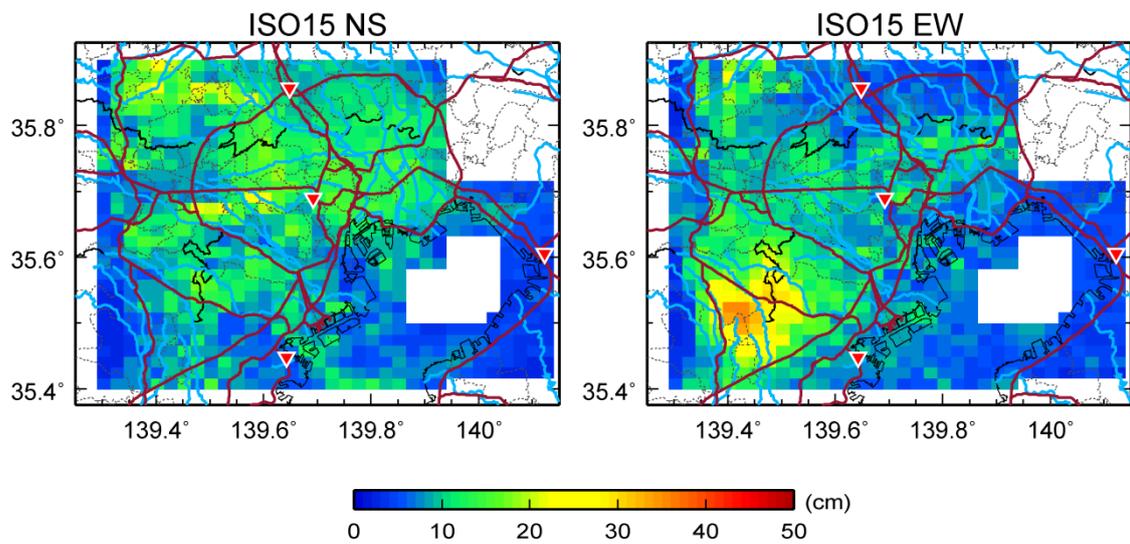


図 3-4-20 免震建物の免震層最大変形の分布 (相模トラフ長周期地震動、シナリオ①)。

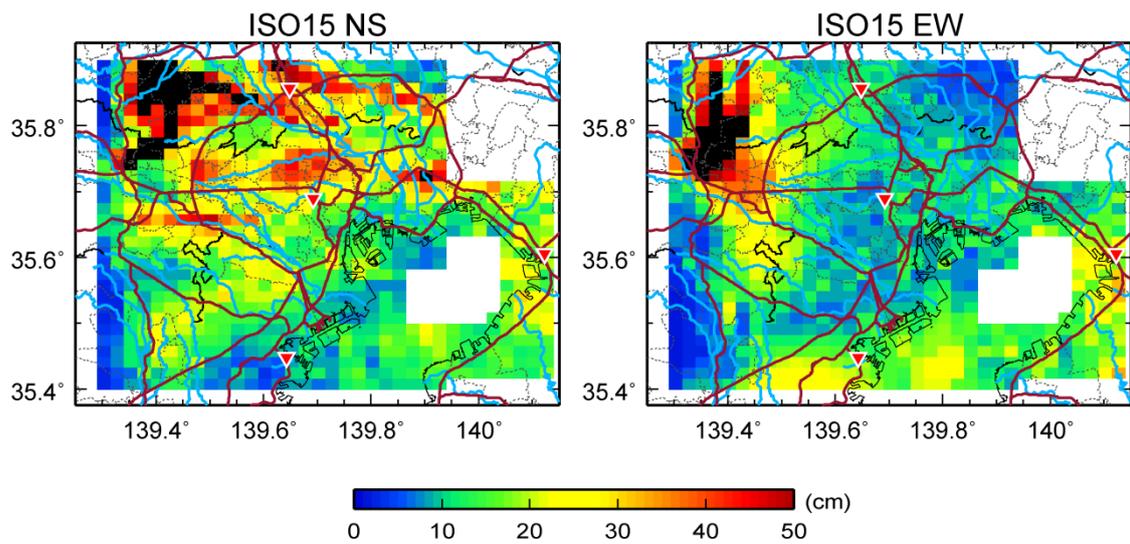


図 3-4-21 免震建物の免震層最大変形の分布 (相模トラフ長周期地震動、シナリオ②)。
(免震層最大変形 50cm 以上は黒で表示)

d) 超高層建物の統計データの分析

(1) 調査対象の資料

①東京都：建築統計年報 2014 年度版

東京都内の超高層建物の一覧が、資料 11-2 に示されている。これにより、全 1159 棟の東京都内の各区に建つ超高層建物数、構造種別、高さ、竣工予定年の統計データが得られる。

②日本建築センター：ビルディンググレート性能評価シート（代表例）

性能評価シートには、代表階平面が示されている。それを用いてスパン長の統計データが得られる。ここに、1980 年代で無作為に 20 棟、1990 年代で 20 棟、2000 年代で 20 棟の計 60 棟について調査した。

(2) 調査結果

東京都内の超高層建物について、高さ、構造種別、竣工予定年の分類を以下の表 3-4-4 に、代表例 60 棟について調査したスパン長を表 3-4-6 に、また、各区の超高層建物の高さ毎の棟数を図 3-4-22 に示す。

表 3-4-4 東京都内超高層建物の高さ・構造種別分類（建築統計年報）。

		高さ(m)						計	
		60以上	80以上	100以上	120以上	140以上	160以上		180以上
構造種別	S	202	165	98	48	39	20	34	606
	RC	131	148	69	43	31	20	11	453
	SRC	55	26	9	2	2	4	2	100
計		388	339	176	93	72	44	47	1159

表 3-4-5 東京都内超高層建物の竣工予定年・構造種別分類（建築統計年報）。

		構造種別			計
		S	RC	SRC	
年代 ※1	～1990年	105	12	52	169
	1990～2000年	185	47	26	258
	2000年～	316	394	22	732
計		606	453	100	1159

※1: 竣工予定年による

表 3-4-6 超高層建物代表例（全 60 棟）のスパン長（ビルディンググレート）。

		スパン長※3		
		長	標準	短
年代 ※2	～1990年	16	22	2
	1990～2000年	19	20	1
	2000年～	26	14	0

※2: 評定取得年による

※3: 調査対象20棟のX・Y方向両スパンの合計

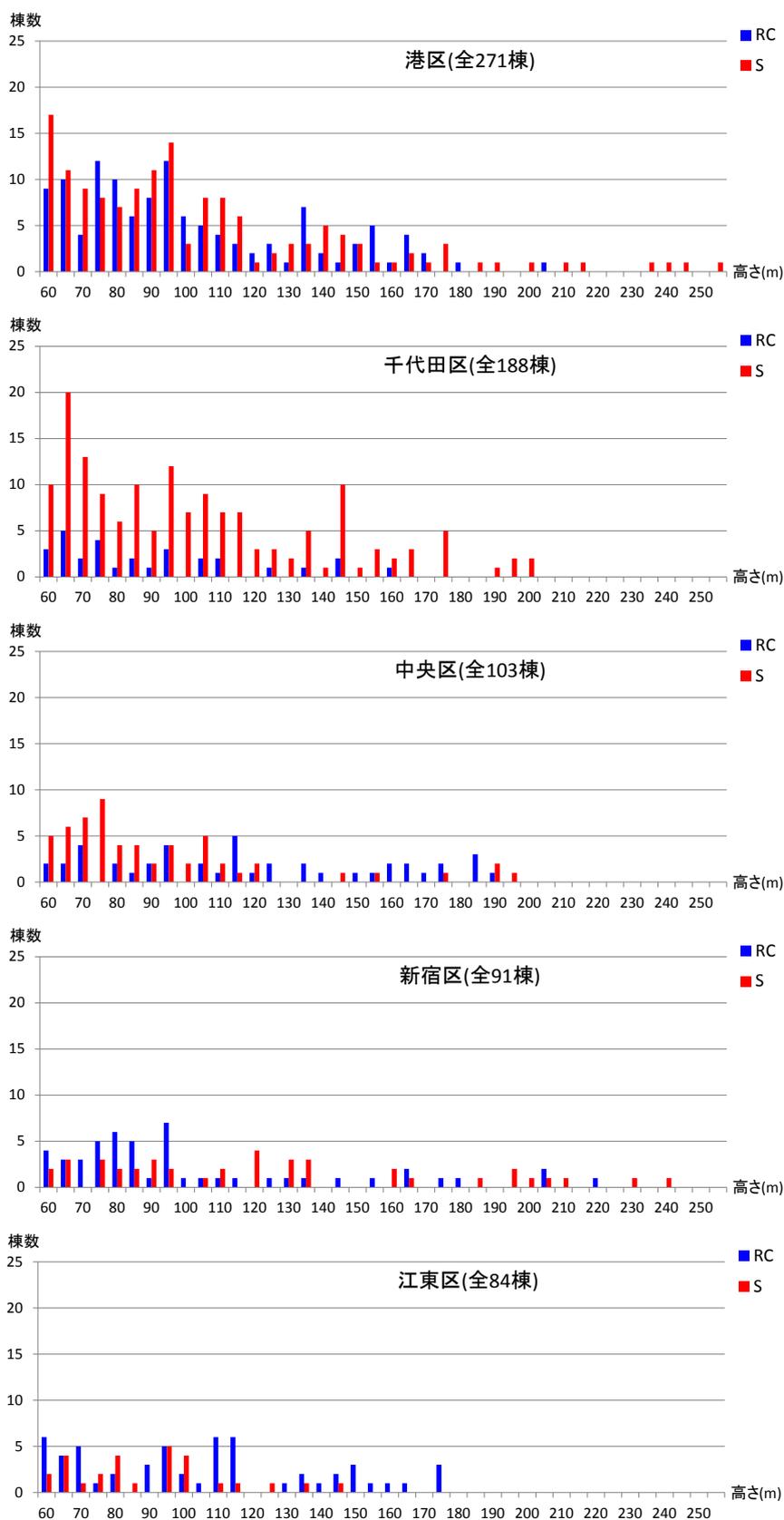


図 3-4-22 (1) 東京都内超高層建物の高さ (その 1)

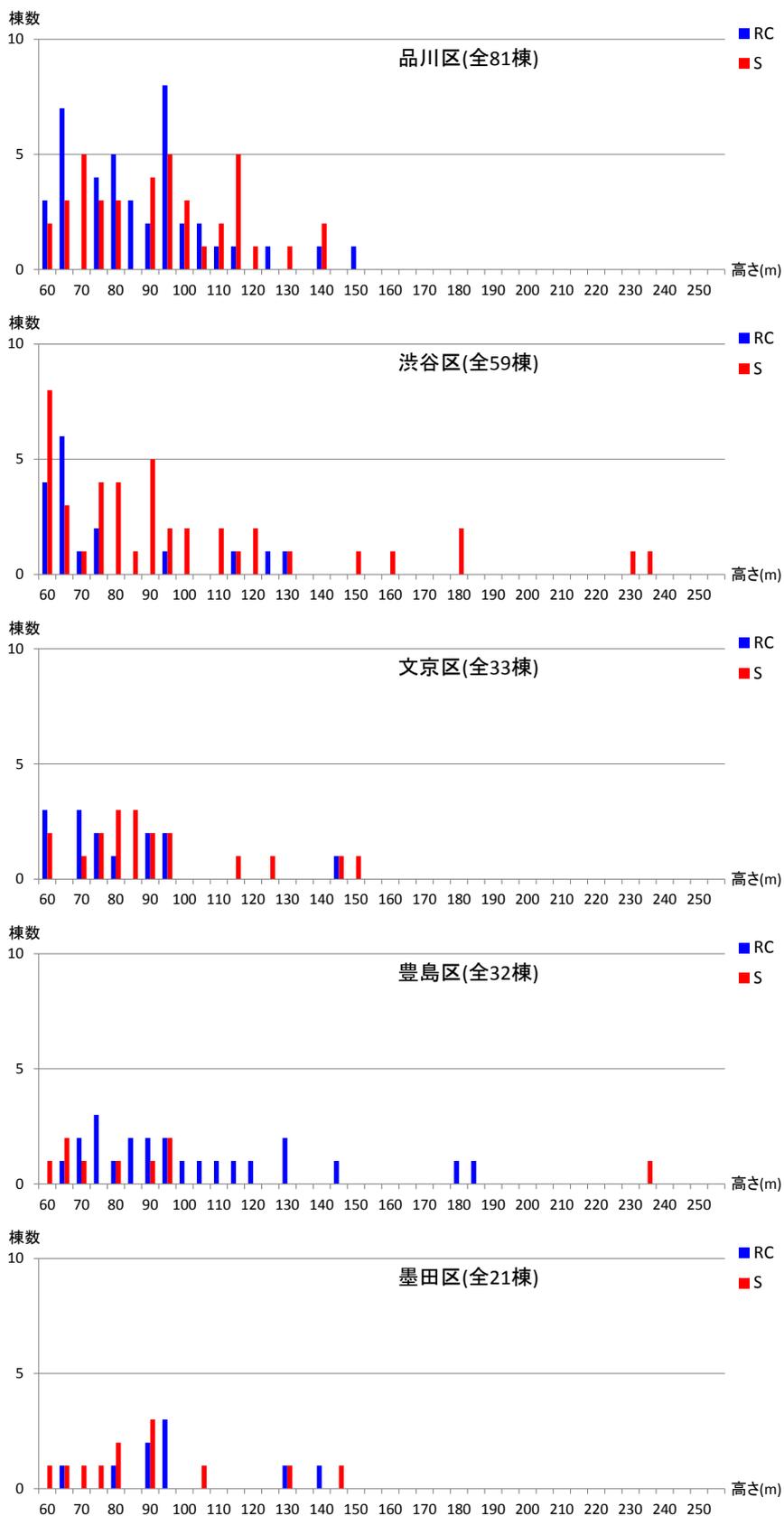


図 3-4-22 (2) 東京都内超高層建物の高さ (その 2)

e) 離散 Sv 値による超高層建物の応答推定

(1) 最大層間変形角の推定

相模トラフの長周期地震動ハザード評価の東京の平均と平均+σケースの面的評価を対象とし、2秒、3秒、5秒、7秒の Sv 値（水平2成分の二乗和平方根）を用いて、表 3-4-7 に示すそれぞれの建物の対象周期の Sv 値を線形補間して求める。推定した対象周期 Sv 値と最大層間変形角（NS 方向と EW 方向の最大値）の関係を分析する。推定した対象周期 Sv 値と層間変形角の関係を建物モデルごとに図 3-4-22 に示す。対象周期 Sv 値と層間変形角とともに常用対数を求めて、(3-4-1) 式のように線形回帰を行う。建物モデルごとに面的評価のすべてのメッシュデータを含めて回帰係数 a, b とばらつきを示す項 ε の標準偏差 β を求めて表 3-4-7 に示す。

$$\log(\phi) = a \log(S_v) + b + \varepsilon \quad (3-4-1)$$

表 3-4-7 Sv と層間変形角の関係の回帰分析結果（相模トラフ、東京圏）。

建物モデル	対象周期(秒)	傾き a	切片 b	残差 ε の標準偏差 β	最大層間変形角に対する Sv(cm)		
					1/200	1/100	1/75
S20	2.7	0.989	-4.012	0.076	53.6	108.0	144.5
S30	3.7	1.042	-4.184	0.081	64.2	124.8	164.5
S45	5.4	0.941	-4.002	0.063	64.3	134.3	182.4
S60	6.5	0.904	-3.955	0.060	67.6	145.5	200.0
S45X	3.8	1.040	-4.342	0.083	91.5	178.1	234.9
S45Y	5.0	0.894	-3.934	0.049	67.1	145.7	200.9
RC40	3.8	1.280	-4.760	0.096	83.3	143.2	179.3
S20~S60		0.949	-3.999	0.082	61.5	127.8	173.0

注) S 造は 1 次周期、RC 造は 1 次周期の約 1.5 倍

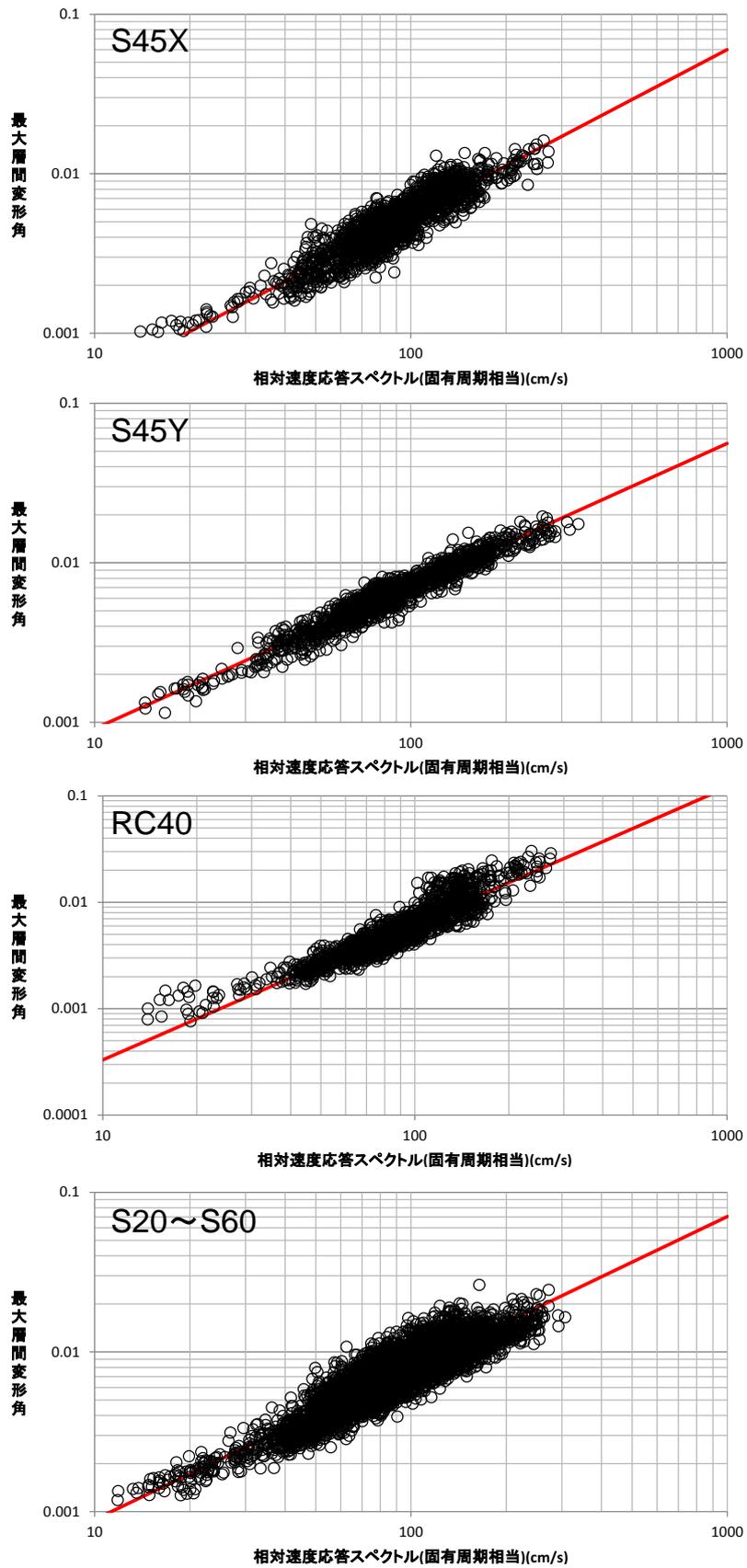


図 3-4-22 評価 Sv と最大層間変形角の関係。

(2) 最大部材塑性率の推定

最大層間変形角の推定と同様に、2秒、3秒、5秒、7秒の Sv 値（水平2成分の二乗和平方根）を用いて、表 3-4-8 に示すそれぞれの建物の対象周期の Sv 値を線形補間して求める。推定した対象周期 Sv 値と最大部材塑性率（NS 方向と EW 方向の最大値）の関係を分析する。推定した対象周期 Sv 値と最大部材塑性率 η の関係を建物モデルごとに図 3-4-23 に示す。対象周期 Sv 値と最大部材塑性率ともに常用対数を求めて、(3-4-2) 式のように線形回帰を行う。建物モデルごとに面的評価のすべてのメッシュデータを含めて回帰係数 a, b とばらつきを示す項 ε の標準偏差 β を求めて表 3-4-8 に示す。

$$\log(\eta) = a \log(S_v) + b + \varepsilon \quad (3-4-2)$$

表 3-4-8 Sv と部材塑性率の関係の回帰分析結果（相模トラフ、東京）。

建物モデル	対象周期(秒)	傾き a	切片 b	残差 ε の標準偏差 β	最大部材塑性率に対する Sv(cm)		
					1	2	3.75
S20	2.7	1.285	-2.307	0.110	62.4	106.9	174.4
S30	3.7	1.275	-2.456	0.115	84.4	145.3	237.8
S45	5.4	1.171	-2.272	0.086	87.1	157.4	269.2
S60	6.5	1.138	-2.220	0.087	89.3	164.1	285.1
S45X	3.8	1.753	-3.240	0.173	70.6	104.9	150.1
S45Y	5.0	1.020	-2.133	0.063	123.3	243.2	450.4
RC40	3.8	1.323	-2.788	0.100	127.9	215.9	347.1
S20~S60		1.184	-2.25	0.129	79.5	142.8	242.8

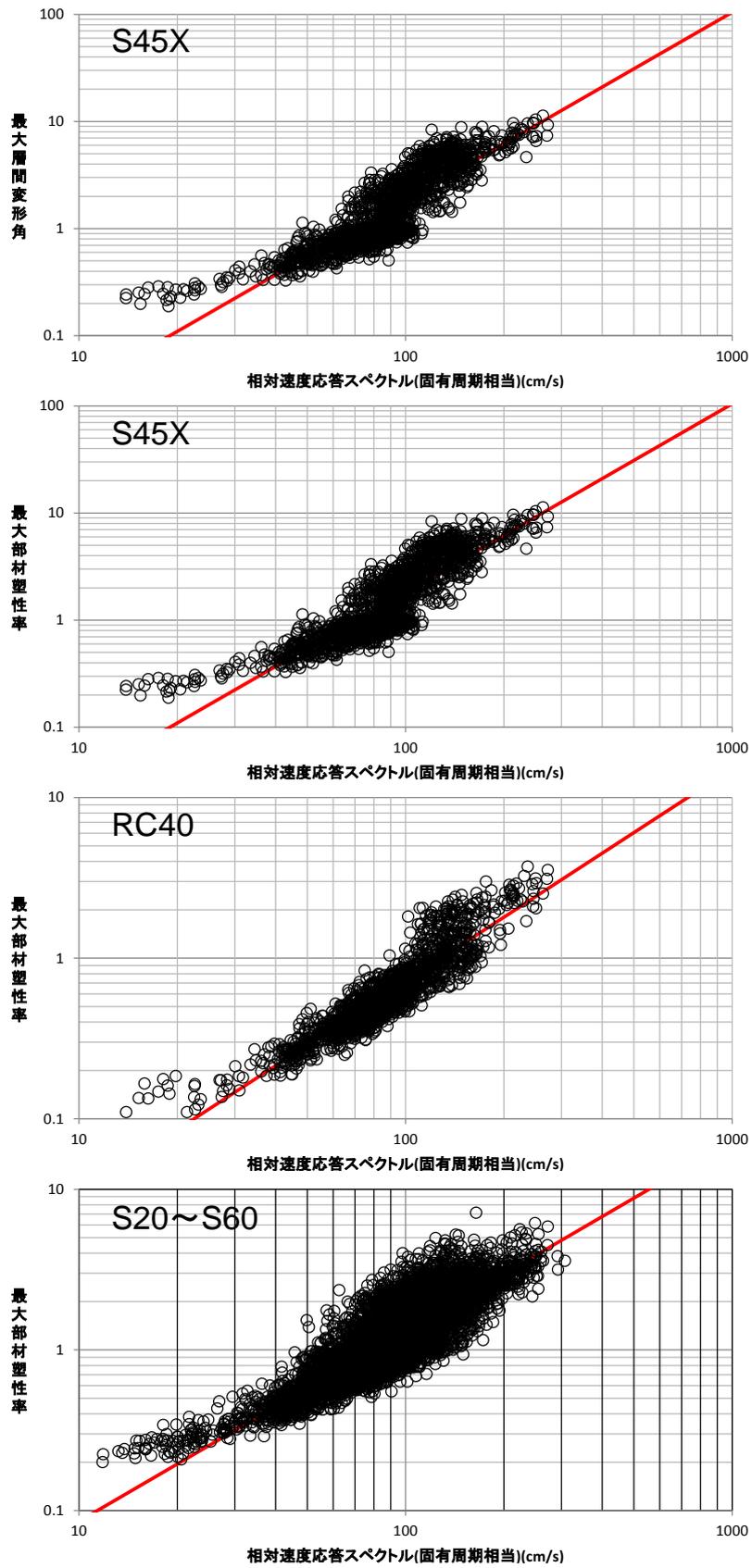


図 3-4-23 評価 Sv と最大部材塑性率の関係。

(3) 補間 Sv 値と層間変形角の相関式の南海トラフと相模トラフの比較

南海トラフおよび相模トラフの地震それぞれにおいて、回帰分析によって得られた補間した固有周期相当の Sv 値と最大層間変形角の相関式について、比較を行う。両方で解析結果があるケースを対象とし、S30, S45, S60 および S45X, S45Y, RC40 に分けて図 3-4-24 に比較して示す。Sv=100cm/s 付近では建物の種類による差および南海トラフと相模トラフの差は比較的小さいことが分かる。これは、設計的な機能限界である層間変形角 1/100 付近でもあり、設計プロセスにおいてクライテリアを満たそうとして人為的にばらつきが小さくなっている可能性もある。

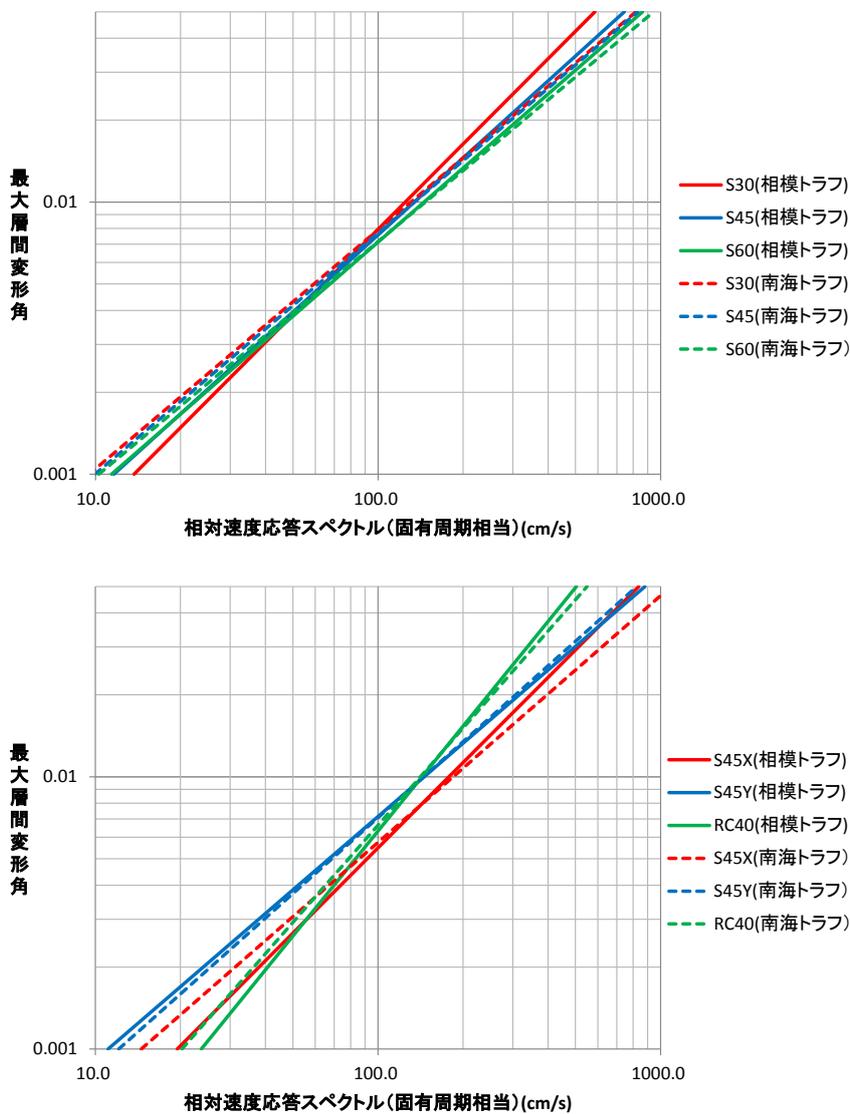
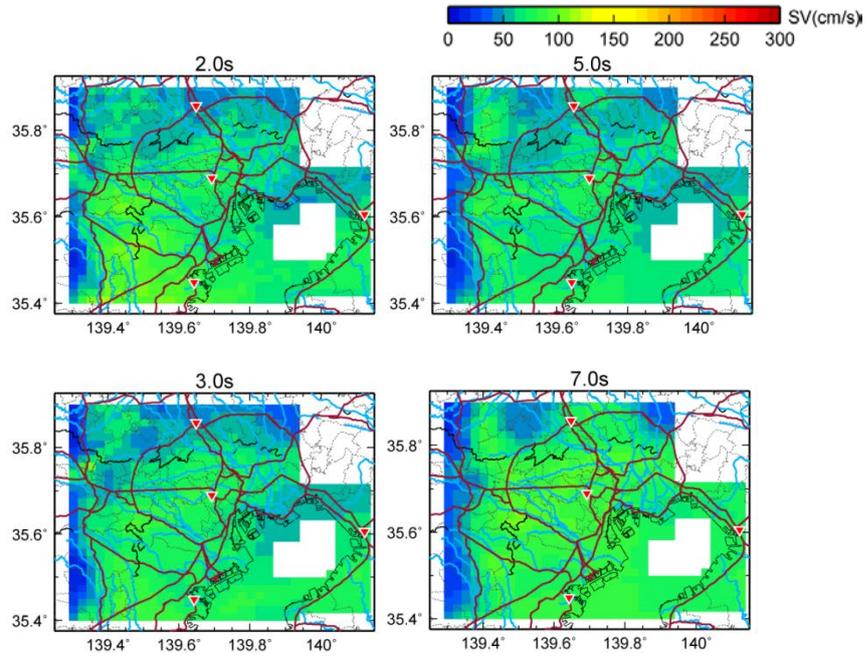


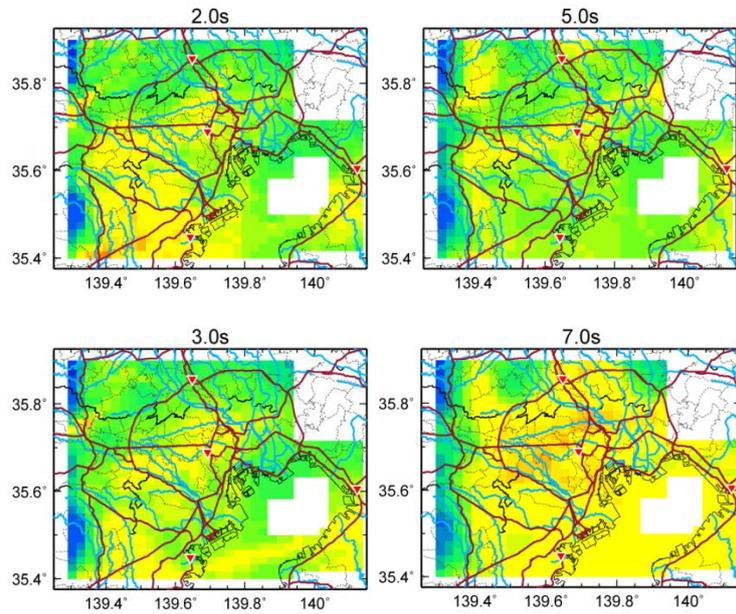
図 3-4-24 Sv と最大層間変形角との関係式。

(4) ハザード評価に基づく離散 Sv 値の平均と平均+ σ の分布

全てのケースの全メッシュの2秒、3秒、5秒、7秒の Sv 値は求められているので、ハザード評価により重みを掛けて Sv 値の確率分布を評価して、その50%に当たる「平均」および84.1%に当たる「平均+ σ 」の分布を求めて、それぞれ図3-4-25に示す。



(a) 相模トラフ長周期地震動、平均レベル



(b) 相模トラフ長周期地震動、平均+ σ レベル

図3-4-25 各メッシュにおける Sv 値の分布。

f) 頻度分布を考慮した首都圏の超高層建物の被災度評価

東京都内の超高層建物の統計情報と、想定した相模トラフの各ケースの重み係数、応答スペクトル振幅（1,2,3,5,7 秒の離散値）より、東京都内に建つ超高層建物の被災可能性を評価する。

ここでは超高層建物の多く建つ 10 区を選択し、その区ごとに超高層建物の被災可能性を評価した結果を示す。

これらによれば、各区での応答層間変形角を示す棟数の頻度はそれほど変わらず、1/200 以下となる建物が約 3/4、逆に大きな被害の想定される 1/100 となる建物が約 5%程度である。そのうち半分程度で 1/75 以上の大きな層間変形角が想定される。

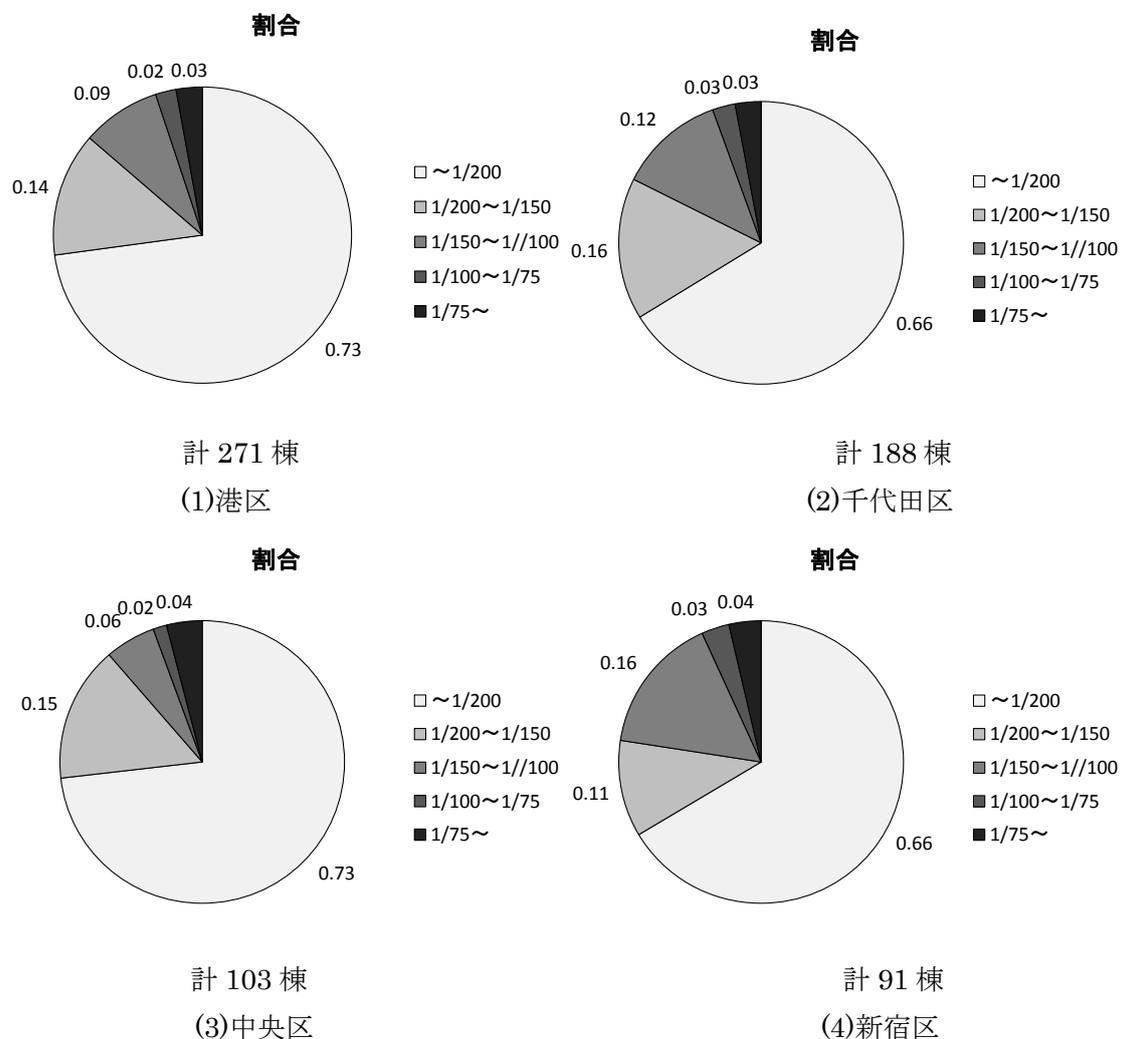
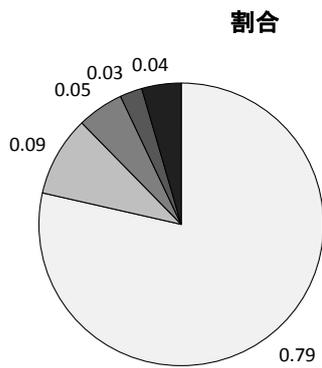
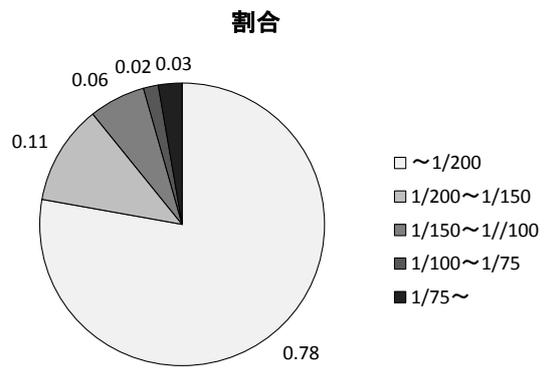


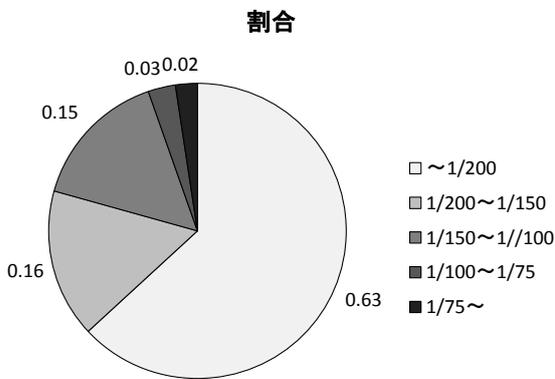
図 3-4-26 (1) 区内の超高層建物の層間変形角頻度分布。



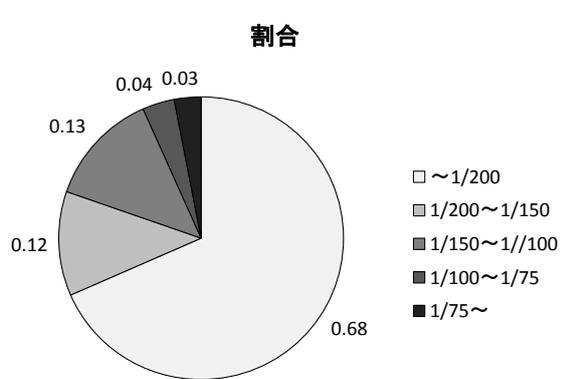
計 84 棟
(5)江東区



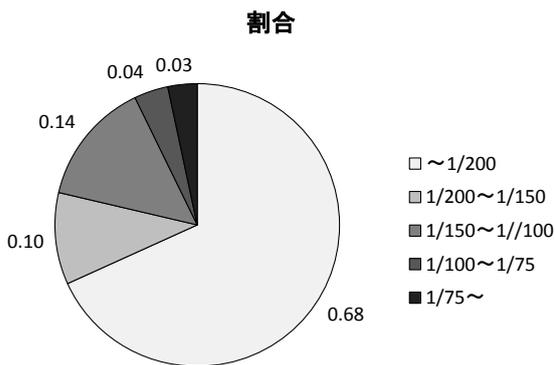
計 81 棟
(6)品川区



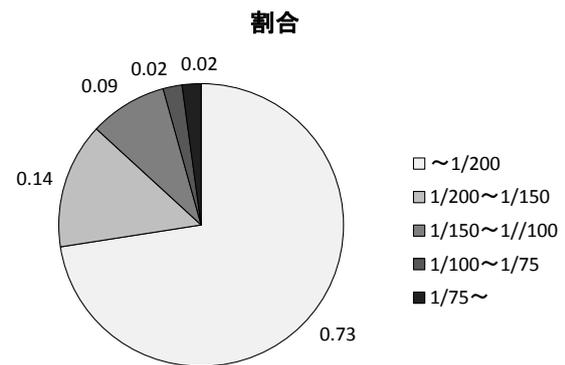
計 59 棟
(7)渋谷区



計 33 棟
(8)文京区



計 32 棟
(9)豊島区



計 21 棟
(10)墨田区

図 3-4-26 (2) 区内の超高層建物の層間変形角頻度分布。

(B) 長周期地震動ハザード評価結果と耐震基準等との比較検討

a) 相模トラフ地震を対象とした長周期地震動ハザード評価と既存の基準や距離減衰式の比較分析

(1) 距離減衰式と長周期ハザード評価結果の比較

相模トラフ地震に対する長周期ハザード評価に用いた三次元差分法（以降、FDM）の評価結果と、距離減衰式（佐藤・他、2010、2012）による評価結果を比較することにより、差分法の結果の妥当性を検証する。対象地点は関東1都7県庁の8点として、水平2成分の幾何平均で比較する。FDMによる地震動は、図3-4-1に示す10通りの震源域に、破壊開始点やSMGA位置などを変えた複数のケースを想定して評価されている。FDMによる評価波の平均応答スペクトルを各震源域で求め、距離減衰式の予測値と比較する。

東京都庁におけるFDMによる評価波の平均応答スペクトルと、距離減衰式による応答スペクトルの比較を図3-4-27に示す。FDM（青線）は距離減衰式（赤線、橙線）よりも振幅レベルが小さいケースが多い。スペクトル形状の比較において、距離減衰式には約6秒に卓越周期がみられるが、FDMの評価結果は6秒付近に谷に近い形状がみられる。

距離減衰式の評価結果にサイト係数の寄与も大きく、東京都庁の卓越周期とサイト係数のピーク周期は一致している。距離減衰式の特徴は、回帰に使用されている地震に依存するが、図3-4-1に示す震源域で発生した地震は含まれていない。距離減衰式の増幅特性が相模トラフで発生する地震に必ずしも対応するとは限らない。距離減衰式の基になっている地震と相模トラフの地震に違いがあるため、ずれが生じていると考えられる。

震源規模との関係性を調べるために、距離減衰式の予測値に対するFDMによる評価波の応答スペクトル比の周期2～10秒の平均をArea01～10に対して求め、Mwとの関係を図3-4-28（佐藤・他（2010）に対する比）に示す。図には、評価地点と震源の位置関係で区別してプロットしている。神奈川県庁の評価結果は直上にある場合がそれ以外の場合よりも大きく評価されているが、その他の評価地点ではそのような傾向は見られなかった。

群馬県庁を除くほとんどの観測点で1よりも小さく評価され、FDMによる評価結果が距離減衰式よりも小さい結果となった。違いが生じる要因の一つとして、距離減衰式の見直しに相模トラフの地震が含まれていないことが考えられる。

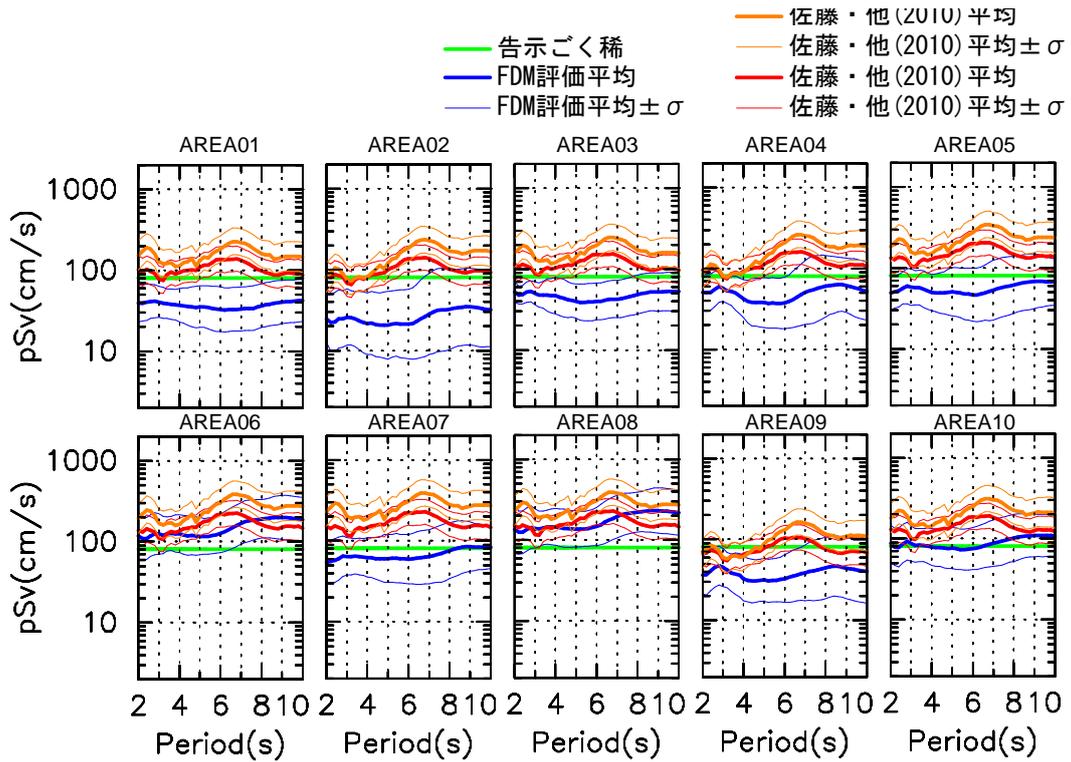


図 3-4-27 東京都庁における FDM による応答スペクトルと佐藤・他（2010、2012）の距離減衰式による評価の比較。

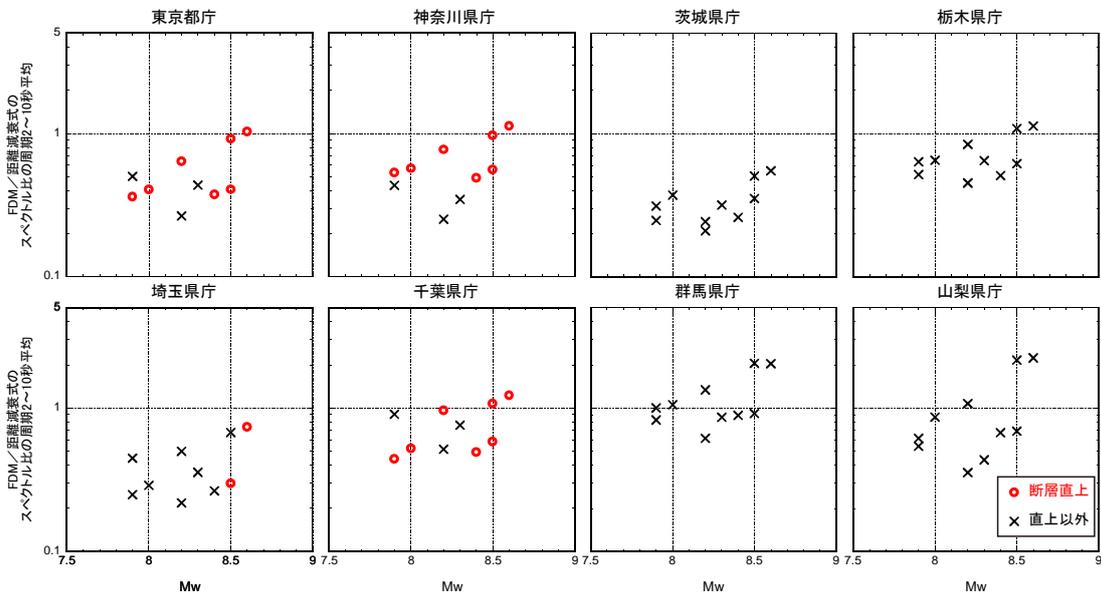


図 3-4-28 各評価地点における FDM/佐藤・他（2010）の距離減衰式の周期 2～10 秒の平均と断層モデルの Mw の関係。

(2) 耐震基準と長周期ハザード評価結果の比較

相模トラフ地震が発生した時の地震動レベルが耐震基準を超える確率を求める。ここでは、超高層建築物（以降、建築物と呼ぶ）に対する基準と、石油タンクに対する基準を対象とする。それらの基準レベルと各ケースの評価結果を比較し、基準を超えるケースの起こりうる確率を積算して評価する。

建築物の耐震基準は、建築物に水平方向に作用する地震動として加速度応答スペクトルが定められており、ここでは極めて稀に発生する地震動（以降、ごく稀と呼ぶ）を対象とする。ここでは周期 2 秒以上を対象としているので、基準値は $pSv=5*1.024/2\pi$ (m/s) の一定の値となる。告示ごく稀との比較は 8 都県庁を対象とする。

2015 年 12 月に国交省から「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策案（以降、国交省試案、2015 と呼ぶ）」が示され、現在意見募集を行っている。将来的に、超高層建築物を設計する際に考慮すべき地震動となりうると考えられるので、関東地域で設定されている地震動レベル KA1 も対象とする。東京都庁、神奈川県庁、千葉県庁、埼玉県庁が指定地域内にあるので、KA1 の超過確率は 4 地点を対象とする。

石油タンクの液面揺動に対する地震外力は、以下の式のように整理できる。

$$Sv(T_{sl}) = 105.4 \cdot v_5 \text{ (cm/s)} \quad (3-4-3)$$

v_5 は石油コンビナートがある各地域で定められており、東京湾岸は神奈川県、千葉県沿岸の指定地域に設定されている。それらの地域の近傍に位置する神奈川県庁、千葉県庁の 2 地点を対象とした。なお、減衰は 0.5% の速度応答スペクトルで規定する。

相模トラフ沿いのプレート境界地震の発生確率は、図 3-4-1 に示す各震源域に設定された値を用い、それぞれの震源域内のケースは均等確率を仮定した。東京都庁における応答スペクトルの振幅と、各周期の累積確率分布を図 3-4-29 に示す。寒色が 2 秒付近の短周期の値を表し、暖色が 10 秒付近の長周期の値を表す。また約 80cm/s に示す灰色の線は告示ごく稀の基準値を表す。

告示ごく稀のレベルを上回る確率を図 3-4-30 に示す。東京都庁の超過確率が高く、約 25～45% で推移しており、長周期ほど確率が高くなっている。茨城県庁、栃木県庁の確率は低くほぼ 0 を示している。神奈川県庁、千葉県庁、埼玉県庁、群馬県庁は約 20～40% の範囲で推移している。同様に国交省試案（2015）の KA1 のレベルを上回る確率を図 3-4-31 に示す。基準のレベルが小さくなっている 6 秒より短い周期で値が大きくなっている。KA1 の基準は南海トラフで発生する安政東海地震 (Mw8.6) を対象とする評価結果に基づいており、南海トラフは関東から震源距離が離れているため、短周期では減衰し振幅レベルが下がっている。一方、相模トラフで発生する地震では、図 3-4-27 に示すように周期 2 秒付近でも振幅は下がっていない。相模トラフと南海トラフの評価されるスペクトル形状の違いにより、基準が下がっている周期で超過確率が大きくなる結果となっている。

各県庁での液面揺動の耐震基準に対する超過確率を図 3-4-32 に示す。国交省試案（2015）の KA1 との比較時と同様に、基準の値が小さくなる 5 秒付近で確率が高くなっており、そ

の周期で約 40%を示している。周期 10 秒程度の長い周期に対しては神奈川県庁で 10%、千葉県庁で 20%と評価された。

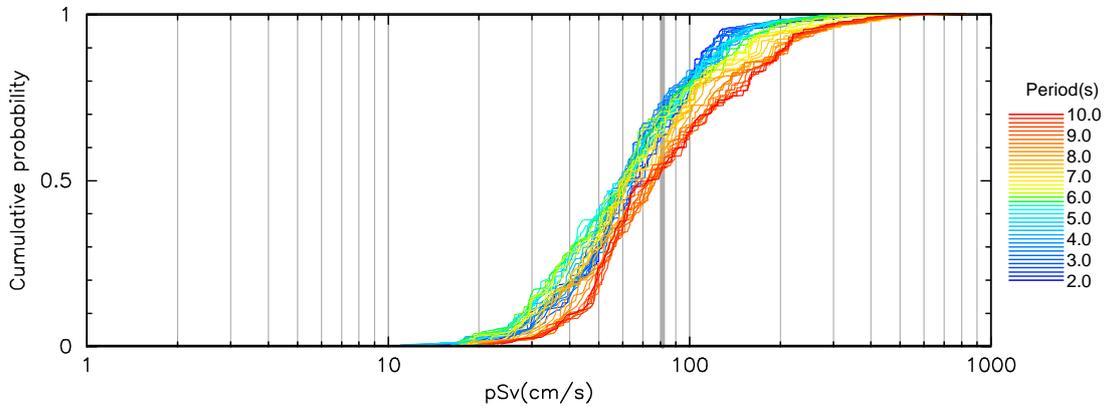


図 3-4-29 相模トラフ地震が発生した時の東京の擬似速度応答スペクトルの累積確率分布 (灰太線は建設省 1461 号告示 Lv2)。

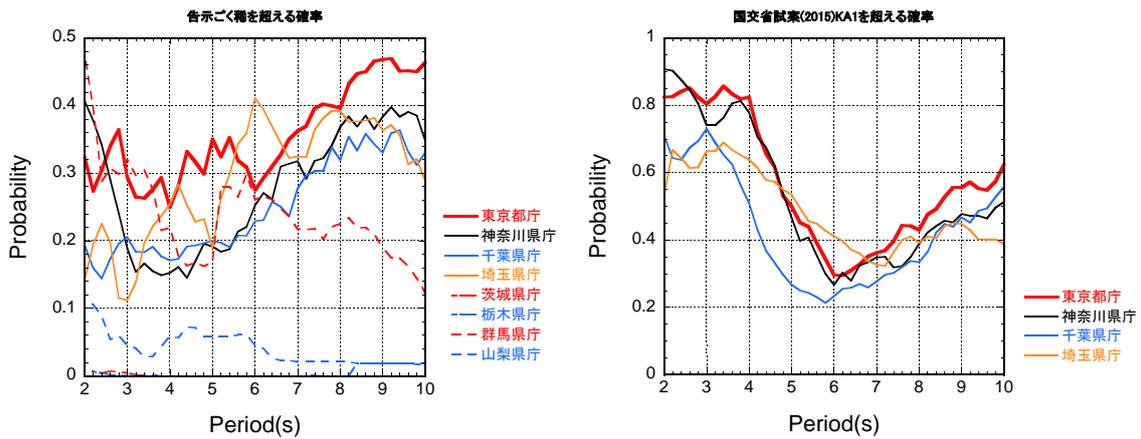


図 3-4-30 建設省告示 Lv2 の超過確率。 図 3-4-31 国交省試案(2015)KA1 の超過確率。

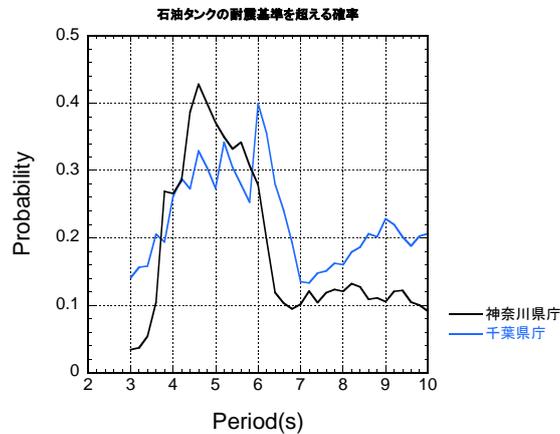


図 3-4-32 石油タンクの液面揺動の耐震基準を超える確率。

b) 関東平野における地盤増幅率の検討

(1) FDM による評価結果に基づく増幅率と距離減衰式のサイト係数の比較

相模トラフ地震に対する FDM による評価において、関東平野の堆積層による増幅率の妥当性を検証するため、距離減衰式のサイト係数や震源域付近で発生した地震の記録に基づく増幅率と比較する。また FDM による増幅率の性質を把握するため、1次元増幅率、南海トラフ地震を対象とした時の増幅率と比較し、さらに相模トラフ震源域内での記録に基づく増幅率の違いを調査した。各種評価法の増幅率は以下のように定義した。

- ・「FDM」は、地震基盤の評価波に対する関東地盤モデルの評価波の応答スペクトル比
- ・「距離減衰式」は、サイト係数の真数（対数の底は 10）
- ・「記録に基づく増幅率」は、地震基盤に近い観測点で残差補正した距離減衰式の予測値に対する観測記録の応答スペクトル比

まず FDM と距離減衰式による増幅率の比較の例を図 3-4-33 に示す。距離減衰式の増幅率を黒線と灰線、FDM による南海トラフを対象とした時の増幅率を青線（昨年度の検討結果）、相模トラフを対象とした時の増幅率を橙線で表す。4 観測点とも相模トラフを対象とした FDM による増幅率は、距離減衰式による増幅率よりも小さく、4 観測点以外でも同様の結果が得られた。TKY004（八王子）を除く 3 点では相模トラフ地震時の増幅率より、南海トラフ地震時の増幅率が距離減衰式の増幅率に近い。距離減衰式の回帰に用いられている地震の中に関東直下の地震は含まれておらず、南海トラフ付近で発生した地震は 2004 年紀伊半島沖の地震等が含まれている。相模トラフ地震時の増幅率よりも南海トラフ地震時の増幅率に近いことは、回帰に用いている地震の特性を表していることに調和している。それは、相模トラフの地震時の評価に対して、距離減衰式を用いると増幅率が過大となるため、振幅の絶対値も過大評価になる可能性がある。

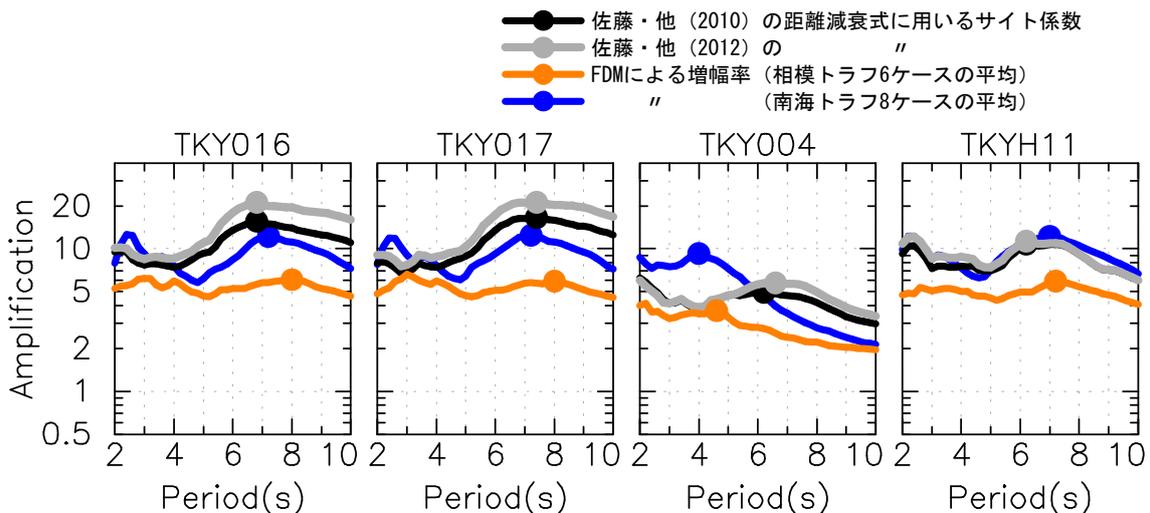


図 3-4-33 FDM の評価結果（相模トラフの結果、南海トラフの結果（昨年度成果））と距離減衰式の増幅率の比較。

(2) FDMによる評価結果に基づく増幅率と観測記録に基づく増幅率の比較

相模トラフの地震の震源域に近い位置で発生した地震を選定し、それらの記録に基づき増幅率を評価した。解析に使用する地震として、震央が北緯 34.5~36.5 度、東経 139.0~141.0 度、 M_j 5.0 以上、かつ地震基盤に近い観測点で 3 点以上記録が得られていることを条件として 46 地震を選定した。まず、地震基盤に近い観測点で、距離減衰式の予測値と観測記録の残差を地震毎に求めた後、各観測点で、残差を加えた地震基盤の予測値に対する観測記録の応答スペクトル比を求め、複数の地震の応答スペクトル比の平均値を記録に基づく増幅率とした。

各種評価法の増幅率の比較の例を図 3-4-34 に示す。相模トラフの地震を対象とした FDM による増幅率を橙線、距離減衰式によるサイト係数を黒線と灰線、記録に基づく増幅率を赤線で示す。TKY004 (八王子) では記録に基づく増幅率は FDM による増幅率よりも、距離減衰式特性の増幅率によく対応する。一方、それ以外の 3 観測点では、記録に基づく増幅率は、距離減衰式の増幅率よりも、FDM による増幅率とよく対応する。

関東平野上にある 1 都 6 県の K-NET、KiK-net 観測点に対して、記録に基づく増幅率に、距離減衰式か FDM による増幅率のどちらが近いかを、増幅率比の対数の L1 ノルムを基準にして求めた。記録に基づく増幅率に近い評価法の分布を図 3-4-35 に示す。橙色の観測点は FDM による評価が、黒色は佐藤・他 (2010) が、灰色は佐藤・他 (2012) が、記録に基づく増幅率に近い観測点を表している。東京湾岸など基盤が深い地域は、FDM の評価が記録の増幅率に近いことが確認できた。関東平野周辺の観測点で、FDM の評価と記録に基づく増幅率に違いが生じた原因として、盆地端部付近の地下構造モデルの精度が地震動を説明するほど高くないことなどがあげられる。

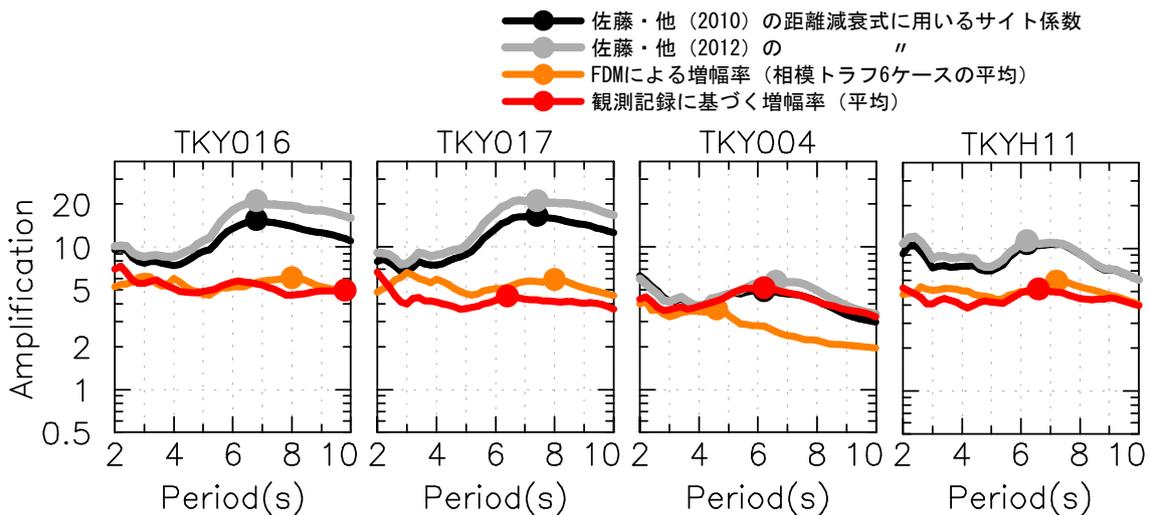


図 3-4-34 観測記録に基づく増幅率、FDM による増幅率、および距離減衰式のサイト係数の比較。

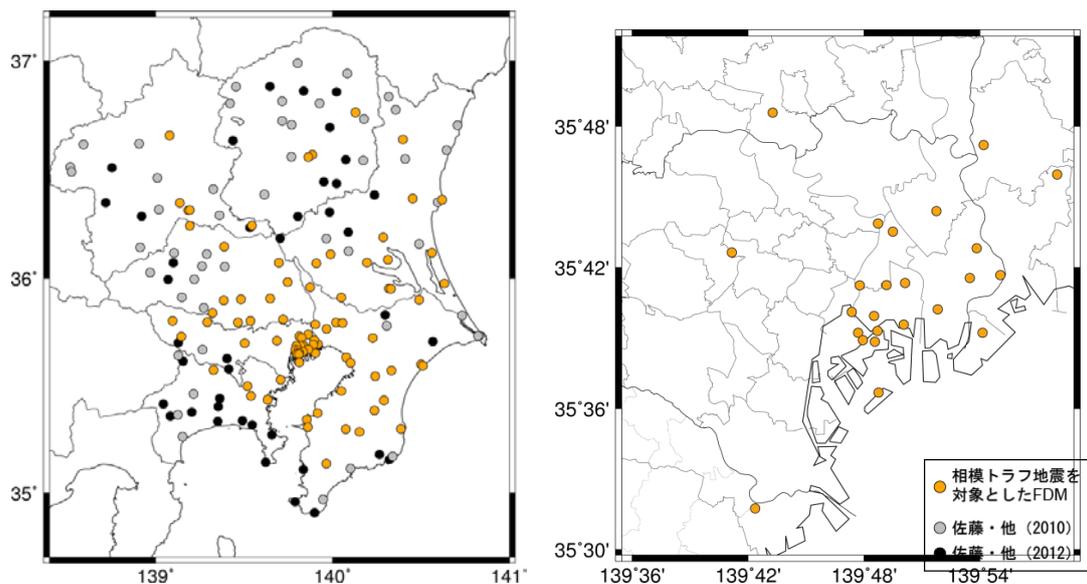


図 3-4-35 観測記録に基づく増幅率に、最も近い増幅率の評価分類。

(3) FDM による評価結果に基づく増幅率と 1 次元増幅率の比較

相模トラフの地震の震源域は関東直下に位置し、直下から入射する地震波に対しては、表面波の影響が小さく実体波で説明ができる可能性がある。そこで、直下の 1 次元地下構造モデルに基づく地盤増幅率と FDM による増幅率を比較した。

鉛直下方から入射した時の地表面の評価波の、入射波に対する応答スペクトル比（1 次元増幅率）と、3 次元 FDM による増幅率の比較を図 3-4-36 に示す。TKY004 では周期 5 秒以上で両者は対応するものの、その他の 3 観測点では周期 2~10 秒で 3 次元増幅率が 1 次元増幅率よりも 2 倍大きい結果となった。

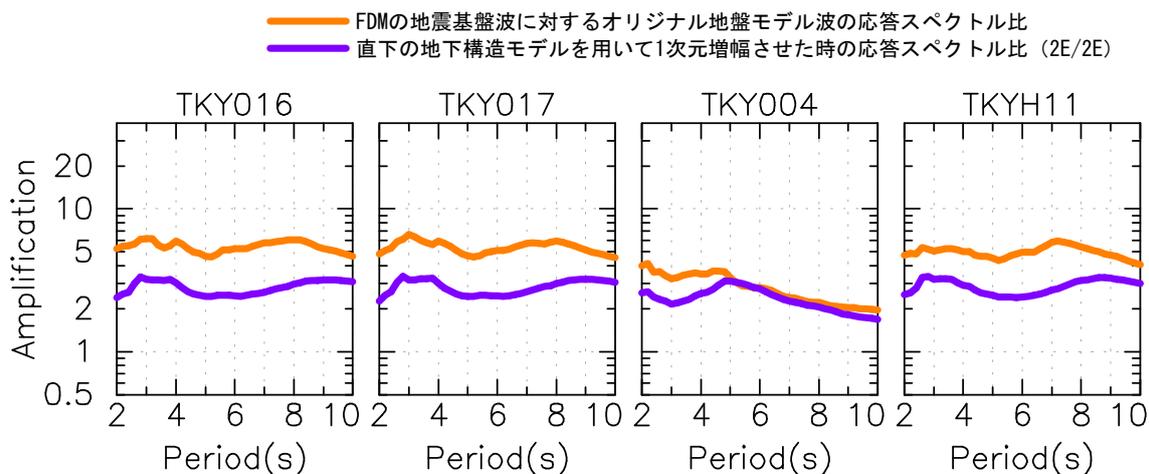


図 3-4-36 観測点直下の地盤モデルを用いて 1 次元増幅させた時の入力波に対する応答スペクトル比と、FDM による増幅率の比較。

(4) 震源域毎の増幅率の分布検討

記録に基づく増幅率の解析対象にしている地震は、広い範囲を対象としているため、震央位置によって増幅率に違いが現れる可能性が考えられる。ここでは地震域による増幅率の違いを調べるため、各観測点で全地震の増幅率の平均に対する、各地震の増幅率の比を求めた。ここでは、周期 2~5 秒と周期 5~10 秒の二つの帯域に分けて、各帯域の幾何平均の値で調べた。

TKY007 における増幅率の平均に対する比の分布を図 3-4-37 に示す。左図が周期 2~5 秒、右図が周期 5~10 秒の平均を表す。増幅率の比には、各地域によって違いが明瞭に現れており、例えば、図 3-4-37 右図の青破線で囲った地域は増幅率が小さく、赤破線で囲った地域は増幅率が大きくなることを表している。残差に対して偶然的な不確実性が支配的であれば、図 3-4-37 のように、特性が類似する地震が地域ごとに固まって分布するとは考えにくいため、地震の発生場所によって増幅率に違いがあると推察される。

他の観測点でも地域ごとに増幅率の比が分布する結果が得られたが、観測点による分布の特性は異なる結果が得られた。増幅率が異なる要因として、地下構造の不整形性、震源の放射特性の違い、減衰の地域性などがあげられるが、その解析については、今後の課題としたい。

ここでは、FDM と記録の比較において平均で比較して、増幅率が対応する結果を得ているが、必ずしも震源の場所は一致していない。震源の場所によって異なる結果が得られているため、相模トラフの地震（特に神奈川県直下に対して）に対して、説明性を高めるためには、震源を合わせて解析することが有効であると考えられる。

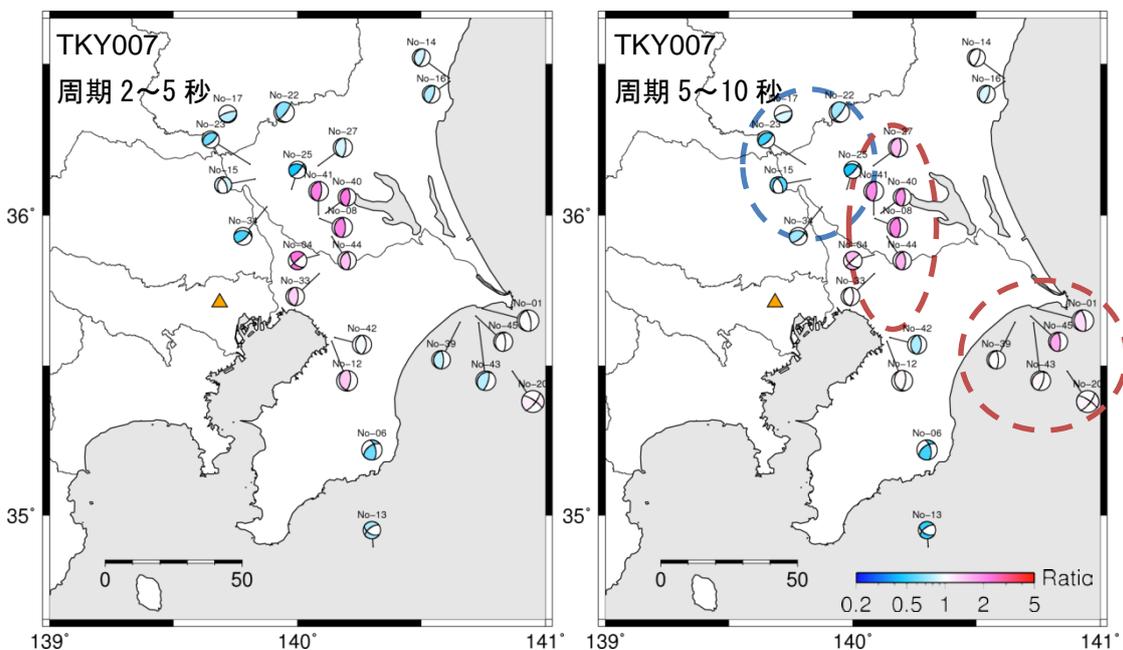


図 3-4-37 増幅率の平均に対する、各地震の増幅率の比の分布 (▲: TKY007、青は増幅率が小さくなる地震を、赤は増幅率が大きくなる地震を表す)。

(5) 距離減衰式のサイト係数を観測記録に基づく増幅率とした時の再評価した結果と長周期ハザード評価結果の比較

距離減衰式による評価が FDM に対して振幅が大きい結果が得られ、増幅率の検討の結果、距離減衰式の回帰に用いている地震の違いにより、増幅率が過大評価していると考察した。ここでは、記録に基づく増幅率を用いて、距離減衰式の予測値を再評価した。

距離減衰式の予測値を再評価した結果に対する FDM の応答スペクトルの比を求め、周期 2~10 秒の帯域で平均した値の M_w との関係を図 3-4-38 に示す。左図にもとのサイト係数を、右図に記録に基づく増幅率を使用した時の評価結果を示す。元のサイト係数時ではスペクトル比は 1 を下回るケースが多かったが、記録に基づく増幅率を使用した時は、スペクトル比は 1 に近づくケースが増えている。

サイト係数の変更前後の応答スペクトル比の違いを図 3-4-39 に示す。群馬県庁を除いた評価地点で 1 に近づいている。FDM の評価結果が距離減衰式の予測値より小さく評価された要因は、距離減衰式のサイト係数と関東直下で発生した時の増幅率が異なることによると考えられる。

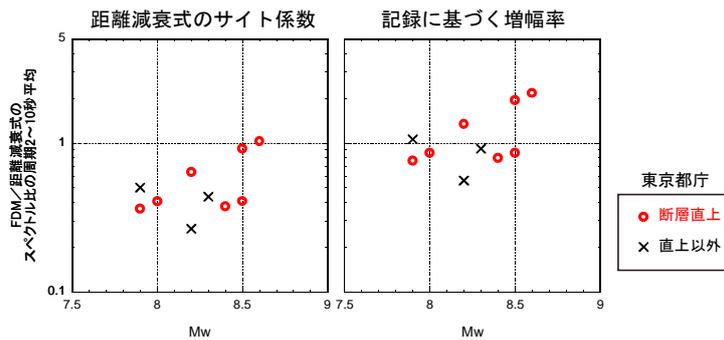


図 3-4-38 サイト係数の変更前後の、東京都庁における FDM/佐藤・他 (2010) の距離減衰式の周期 2~10 秒の平均と断層モデルの M_w の関係。

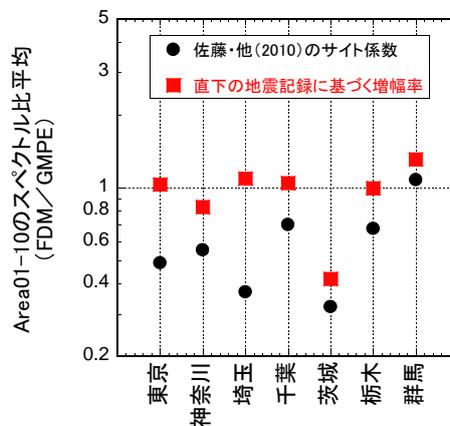


図 3-4-39 増幅率を距離減衰式のサイト係数 (黒色) から記録に基づく増幅率に変更したとき (赤色) の、Area01 から Area10 の周期 2~10 秒のスペクトル比平均の違い。

2) 長周期地震動の事例等に関するウェブページの試作

平成 26 年度までの「長周期地震動予測地図作成等支援事業」および「長周期地震動ハザードマップ作成等支援事業」における検討により、長周期地震動そのものや被害に関する事例、ハザード評価に基づく超高層建物の応答等に関する知見などが蓄積されてきた。そこで、これらの成果を説明するウェブページを試作した。

(A) 事例等に関する解説ページの試作

平成 24 年度から平成 26 年度までに実施してきた、長周期地震動ハザード評価結果の活用に関する検討について、ウェブページは、各年度の検討内容ごとにまとめた（図 3-4-40）。内容の例を図 3-441〇に示す。作成した上記ウェブページの HTML のソースファイルについては、付録の CD-ROM に納めている。

(B) 長周期地震動に関するインタラクティブウェブ教材ページの試作

長周期地震動による超高層建物の応答を視覚的に見せるため、長周期地震動ハザード評価実施地点において、波形の種類や対象とする建物（階数）を選択することで、アニメーション表示するウェブページを試作した。階数の違いによる応答の違いを同時に 3 種類の階数を表示するようにしている。平成 24 年度および平成 25 年度に実施した南海トラフ地震および相模トラフ地震を対象とした長周期地震動ハザード評価の試算結果における、「平均」および「最大」に近いケースの波のいずれかを選択できるようにしている。建物応答については、ビルを模したアニメーション表示だけでなく、応答波形も表示される。

表示画面の例を図 3-4-42 に示す。なお、階数の上限は 100 階であり、応答計算は質点系モデルにより減衰定数 5%として行っている。

(C) 長周期地震動ハザードカルテの試案

防災科学技術研究所では、地震調査研究推進本部より公表されている全国地震動予測地図の情報をもとに、各評価地点における確率論的地震動ハザード評価に関する情報を A4 サイズ 1 枚の紙にまとめた「地震ハザードカルテ」を公開している。ここでは、長周期地震動ハザード評価を対象とした「長周期地震動ハザードカルテ」の作成に関する検討を行った。以下の情報をまとめたものを「カルテ」の試案とした（図 3-4-43）。

1. 地点情報
2. 総合評価（レーダーチャートにまとめた表示）
3. 代表的な長周期地震動ハザード
4. 地下構造情報（地震基盤深さ）
5. 長周期地震動ハザードカーブ（南海トラフ地震および相模トラフ地震）
6. 長周期地震動継続時間の分布

平成 24 年度

長周期地震動予測地図の利活用に関する検討支援のまとめ

目次

1. 長周期地震動に対する超高層ビルの応答解析検討
 - 1.1 [南海トラフ地震に対する超高層ビルの応答](#)
 - 1.2 [相模トラフ地震に対する超高層ビルの応答](#)
2. 長周期地震動に対する被害と指標
 - 2.1 [長周期地震動により生じる想定被害と防災・減災対策](#)
 - 2.2 [長周期地震動の強さの指標と被害の関係](#)
3. 超高層ビルに対する簡易被害推定法
 - 3.1 [簡易被害推定法と耐震診断](#)
 - 3.2 [超高層ビルの簡易被害推定と長周期地震動指標](#)

平成 25 年度

長周期地震動ハザード評価の利活用に関する検討支援

目次

1. 超高層建物の応答と被害
 - 1.1 [南海トラフ地震に対する超高層建物の応答](#)
 - 1.2 [相模トラフで想定される地震動に対する応答解析](#)
2. 長周期地震動の大きさの尺度
 - 2.1 [観測波の分析](#)
 - 2.2 [長周期地震動の尺度と超高層建物の応答値](#)
 - 2.3 [長周期地震動の尺度の比較](#)
3. 超高層建物の多様性の検討
 - 3.1 [構造形式の異なる超高層建物の応答](#)
 - 3.2 [超高層建物のフレンジの評価](#)
4. 揺れの継続時間の影響
 - 4.1 [距離継続時間とエネルギースペクトル](#)
 - 4.2 [最大梁累積塑性変形倍率](#)

平成 26 年度

長周期地震動ハザード評価の利活用に関する検討支援

目次

1. 長周期地震動ハザード評価に基づく超高層建物の面的な応答評価の検討
 - 1.1 [面的評価に用いる長周期地震動ハザード評価結果の選定](#)
 - 1.2 [大阪平野の面的評価](#)
 - 1.3 [濃尾平野の面的評価](#)
 - 1.4 [東京近傍の面的評価](#)
 - 1.5 [地域的な違いの考察](#)
2. 超高層建物の被害に関する検討
 - 2.1 [長周期地震動指標分布と超高層建物](#)
 - 2.2 [広帯域地震動による超高層建物の応答への影響](#)
 - 2.3 [最大応答値と被害の関係の整理と解説](#)
3. 超高層建物等における耐震基準等の調査・整理
 - 3.1 [距離減衰式と長周期地震動ハザード評価の比較](#)
 - 3.2 [距離減衰式と長周期地震動ハザード評価の地盤増幅率の比較](#)
 - 3.3 [長周期地震動に関連した超高層建物等の基準などの調査・整理](#)

図 3-4-40 試作した長周期地震動ハザード解説ウェブページのトップ画面。

- 1. 超高層建物の応答と被害
 - 1.1 南海トラフ地震に対する超高層建物の応答
 - 1.2 相模トラフで想定される地震動に対する応答解析
- 2. 長周期地震動の大きさの尺度
 - 2.1 観測波の分析
 - 2.2 長周期地震動の尺度と超高層建物の応答値
 - 2.3 長周期地震動の尺度の比較
- 3. 超高層建物の多様性の検討
 - 3.1 構造形式の異なる超高層建物の応答
 - 3.2 超高層建物のフラジリティの評価
- 4. 揺れの継続時間の影響
 - 4.1 距離継続時間とエネルギースペクトル
 - 4.2 最大梁累積塑性変形倍率

2.2 長周期地震動の尺度と超高層建物の応答値

2011年東北地方太平洋沖地震の観測値

2011年東北地方太平洋沖地震において観測された記録の最大応答値が公開されているもの(日本建築学会、2012)からのデータを用いて、超高層建物の最大変形角と長周期指標の関係をFigure 2.2-1に示す。2次部材や家具什器に被害が発生した東京、大阪の超高層建物においては、長周期指標は5前後だったことが分かる。各長周期指標に対する最大変形角 ϕ について直線回帰して(2.2-1)式～(2.2-3)式の関係式を得た。

$$\log \phi = 0.41I_{L1} - 4.68 \quad (2.2-1) \text{式}$$

$$\log \phi = 0.46I_{L2} - 4.92 \quad (2.2-2) \text{式}$$

$$\log \phi = 0.51I_{L2} - 5.20 \quad (2.2-3) \text{式}$$

Figure 2.2-1に相関係数の一番大きい I_{L2} に対する回帰式((2.2-2)式)を実線で示すが、外挿して考えると最大変形角1/100となるには長周期指標が6を超えると推定される。

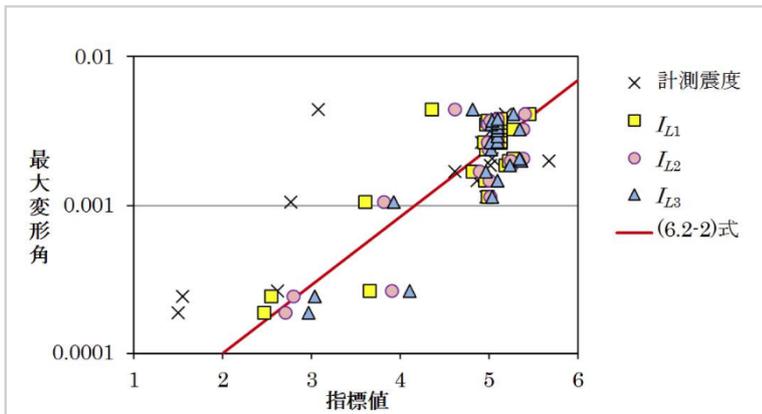


Figure 2.2-1: 超高層建物の最大変形角(日本建築学会、2012)と震度及び長周期指標の関係(2011年東北地方太平洋沖地震)

南海トラフの想定波の東京付近での長周期の尺度

地震調査委員会強震動評価部会(2001)および地震調査委員会(2009)を参照して作成されたFigure 2.2-2に示す南海トラフ沿いの東海・東南海・南海の3連動震源モデル(深部アスベリティ、紀伊半島沖から破壊: ANNI3d-c、以後「南海トラフ3連動」と称する)と全国1次地下構造モデル(暫定版)(地震調査委員会、2012)を用いて3次元差分法で解析された東京近傍の範囲の2kmメッシュの周期2秒以上の長周期シミュレーション波形(Maeda et al., 2012)から長周期地震動の尺度を計算し、応答解析による超高層建物の最大応答値との関係を検討した。

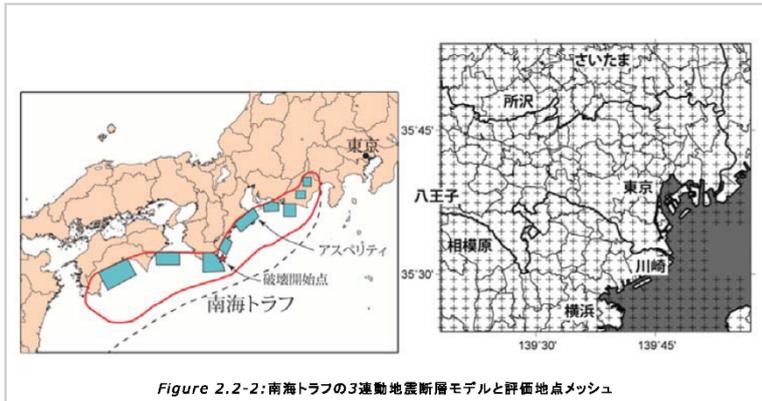


Figure 2.2-2: 南海トラフの3連動地震断層モデルと評価地点メッシュ

Figure 2.2-3に長周期指標 I_{L2} と長周期地震動階級に用いられている周期1.6-7.8秒の絶対速度応

図 3-4-41 超高層建物の応答解析に関する検討部分の表示例。

Web教材

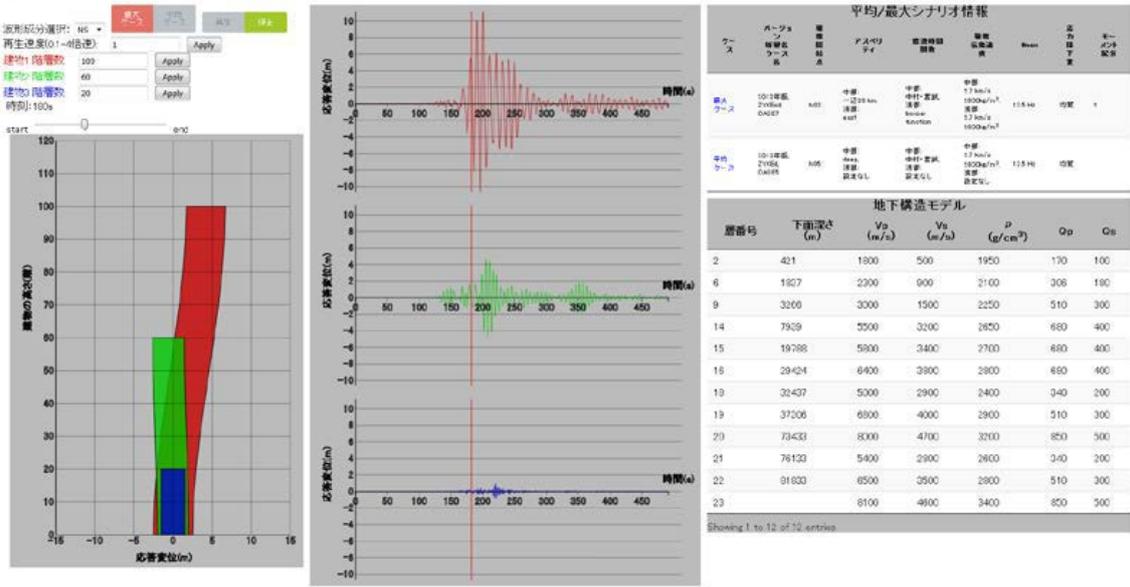


図 3-4-42 試作した長周期インタラクティブ教材の画面例。

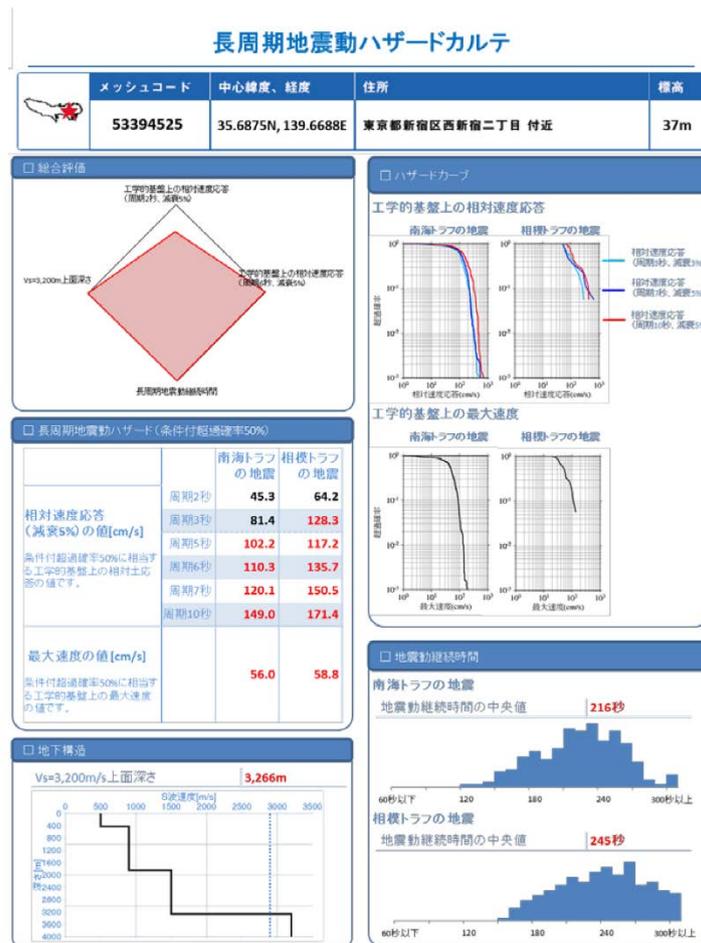


図 3-4-43 「長周期地震動ハザードカルテ」のイメージ。

(c) 結論および今後の課題

長周期地震動ハザード評価結果等の活用に資するための以下の検討を実施した。

- ・平成 26 年度に実施した相模トラフ地震の長周期地震動ハザード評価に基づいて、東京圏の面的最大応答分布を評価した。
- ・長周期地震動ハザード評価に基づいて、長周期地震動指標の確率分布を推定し、首都圏の被害の概要を推定した。
- ・長周期地震動ハザード評価結果と建築基準の告示波、国土交通省による長周期地震動に関する対策試案、石油タンクの耐震基準との比較から、耐震基準を超える地震動に見舞われる確率を推定した。

また、長周期地震動に関する知見の普及に資するため、平成 26 年度までの検討内容について説明するウェブページ、超高層建物の応答に関するウェブインタラクティブ教材を試作し、長周期地震動ハザードカルテの試案を示した。

一方で、これまでの検討は超高層建物そのものの被害に着目したものであるが、より被害が多区の被害が発生する、天井や家具什器などの 2 次部材の被害評価を行う必要がある。さらに、これまでは制震装置を考慮していないモデルを対象とした検討であった。従って、ダンパーなどの対策を付したモデルによる応答評価を行い、対策の有効性の検証も進めていくべきである。また、長周期地震動に関する知見をより一般社会に普及していくためには、本検討で試作したウェブやハザードカルテのコンテンツを充実させていくことが必要である。

(d) 引用文献

地震調査委員会，2014：全国地震動予測地図 2014 年版～全国の地震動ハザードを概観して～ 付録 1，http://www.jishin.go.jp/main/chousa/14_yosokuchizu/f1.pdf.

国土交通省，2015，「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策案について」に関するご意見募集について，http://www.milt.go.jp/report/press/house05_hh_000601.html.

佐藤智美・大川出・西川孝夫・佐藤俊明・関松太郎，2010，応答スペクトルと位相スペクトルの経験式に基づく想定地震に対する長周期時刻暦波形の作成，日本建築学会構造系論文集，649，521-530.

佐藤智美・大川出・西川孝夫・佐藤俊明，2012，長周期地震動の経験式の改良と 2011 年東北地方太平洋沖地震の長周期地震動シミュレーション，日本地震工学会論文集，第 12 巻第 4 号，354-373.

3.5. 長周期地震動ハザードマップ公表に向けた支援等

(1) 事業の内容

(a) 事業の題目

長周期地震動ハザードマップ公表に向けた支援等

(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

地震調査研究推進本部による長周期地震動ハザードマップの公表に向けて、資料等を作成することにより支援する。

(2) 事業の成果

(a) 事業の要約

地震調査研究推進本部からの要求に応じて、波形や応答スペクトルの例示の図、計算に用いた震源モデル、地下構造モデルの図面やパラメータ表等を作成し提出した。

(b) 事業の成果

1) 地震調査研究推進本部の委員会への資料提出

長周期地震動ハザードマップの作成および公表に向けて、地震調査研究推進本部の強震動評価部会、強震動予測手法検討分科会、地下構造モデル検討分科会での審議に資するために資料を提出するとともに必要に応じて説明を行った。

また、公表するハザードマップにおいて、継続時間のマップも作成した。最大振幅の10%以上かつ5cm/s以上を継続時間と定義し、4つの震源域ごとに平均値と平均+標準偏差のマップを作成した。最大振幅について、3.2で示した水平動二成分（東西方向および南北方向）の大きい方ではなく、「RotD50」が採用されることとなったため、それによる地図を新たに作成した。また、減衰定数5%の相対速度応答スペクトルだけでなく、気象庁による「長周期震度階級」のマップも作成した。さらに、波形、相対速度応答スペクトル（減衰定数5%）および例示する地点について、都県庁位置以外に

小田原市（メッシュコード 52397134）

八王子市（メッシュコード 53393362）

横浜市港南区（メッシュコード 53390467）

あきる野市（メッシュコード 53394294）

前橋市（メッシュコード 54394091）

長野原町（メッシュコード 54385498）

富津市（メッシュコード 52396742）

逗子市（メッシュコード 52397447）

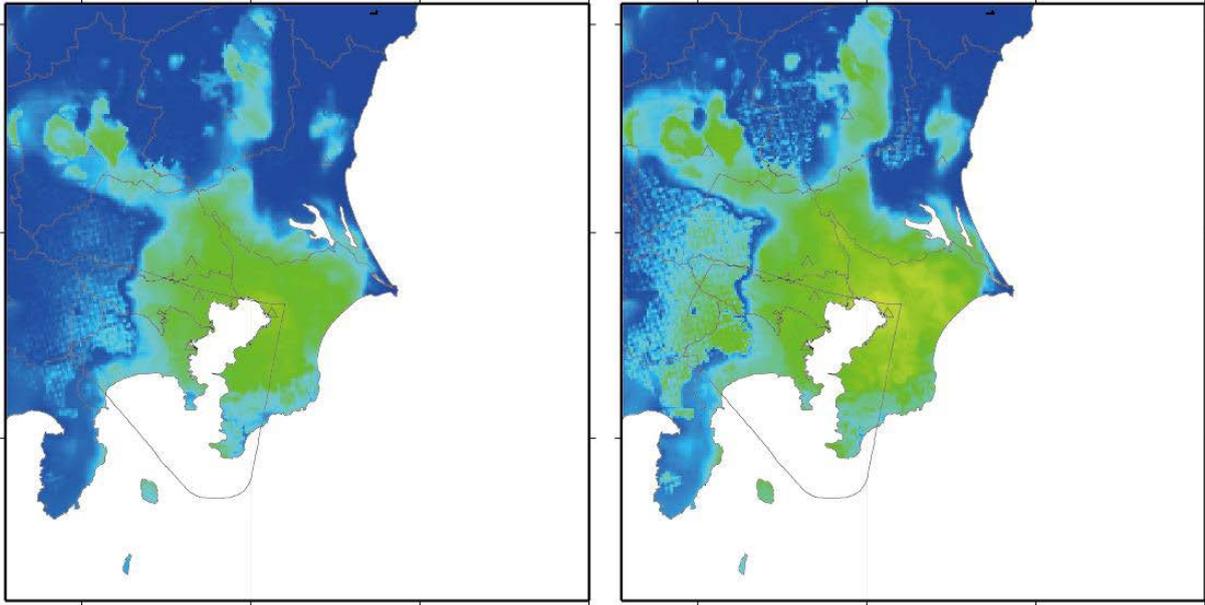
所沢市（メッシュコード 53395344）

が追加された。

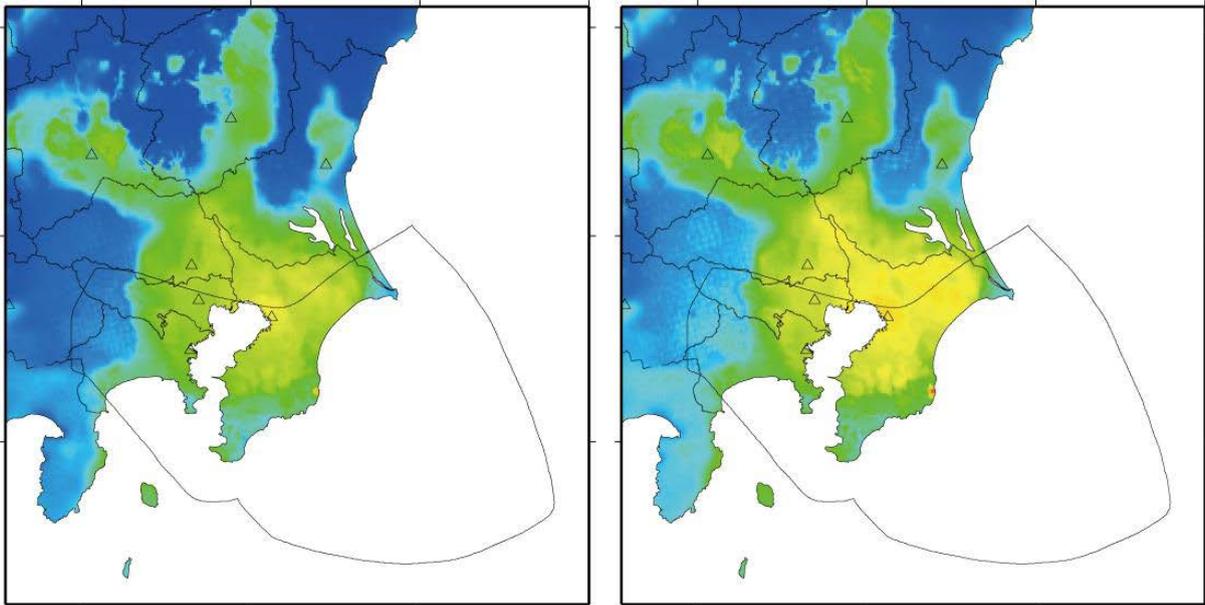
以下では、長周期地震動ハザードマップ報告書案に収録されている図表のうち、3.1 および 3.2 で示した以外のものを示す。

平均

平均+標準偏差



大正関東地震型



元禄関東地震型

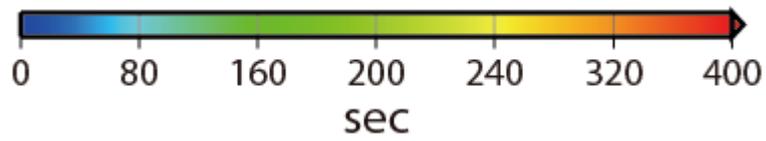


図 3-5-1 継続時間の分布。

平均

平均+標準偏差

周期 10 秒

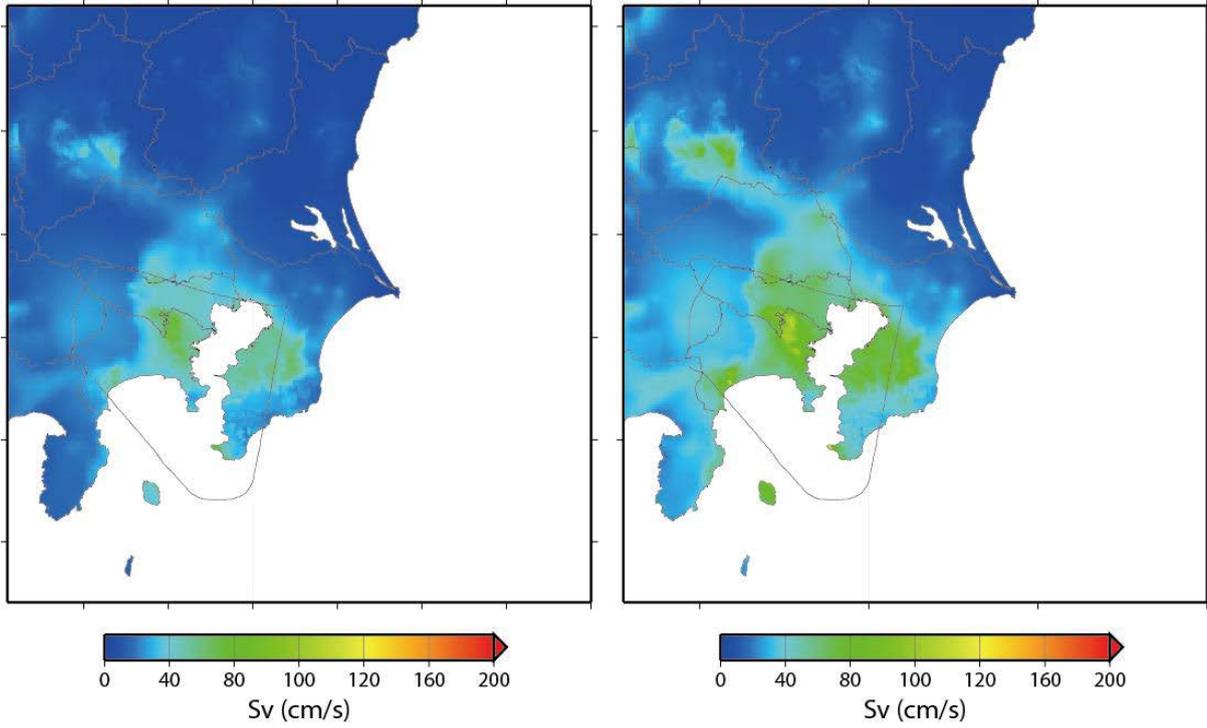


図 3-5-2 減衰定数 5%の相対速度応答スペクトルの分布（大正関東地震型；つづき）。

平均

平均+標準偏差

周期 2 秒

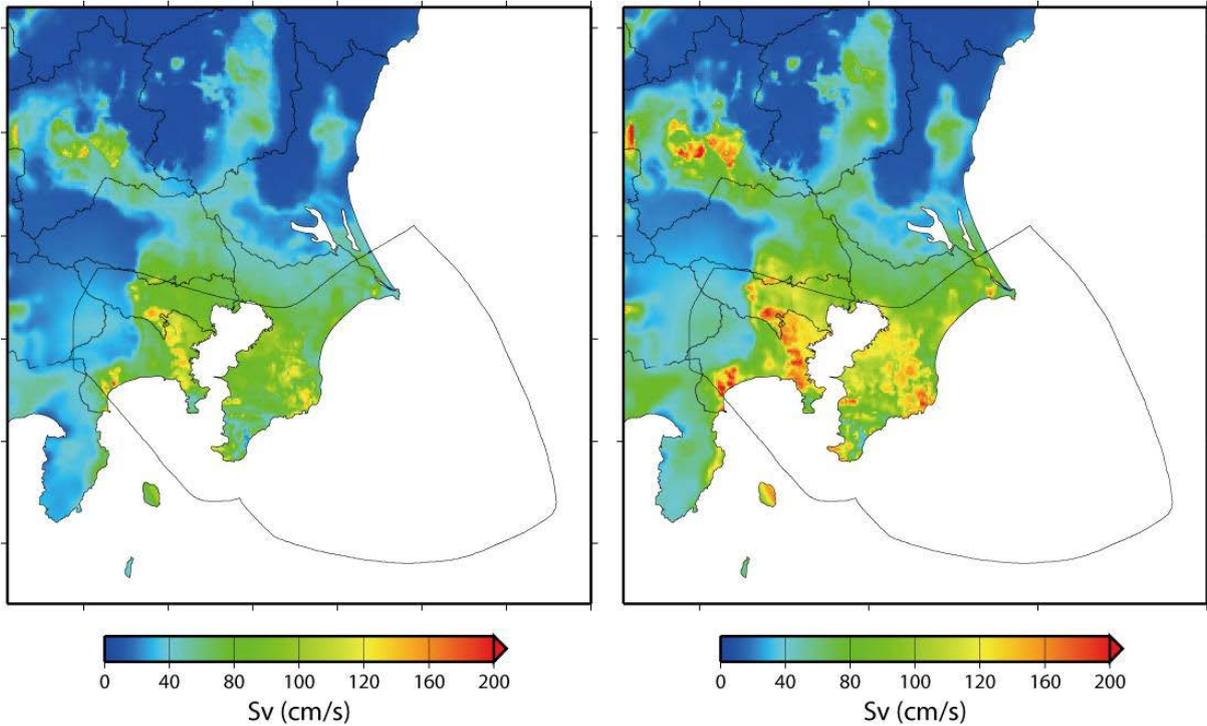
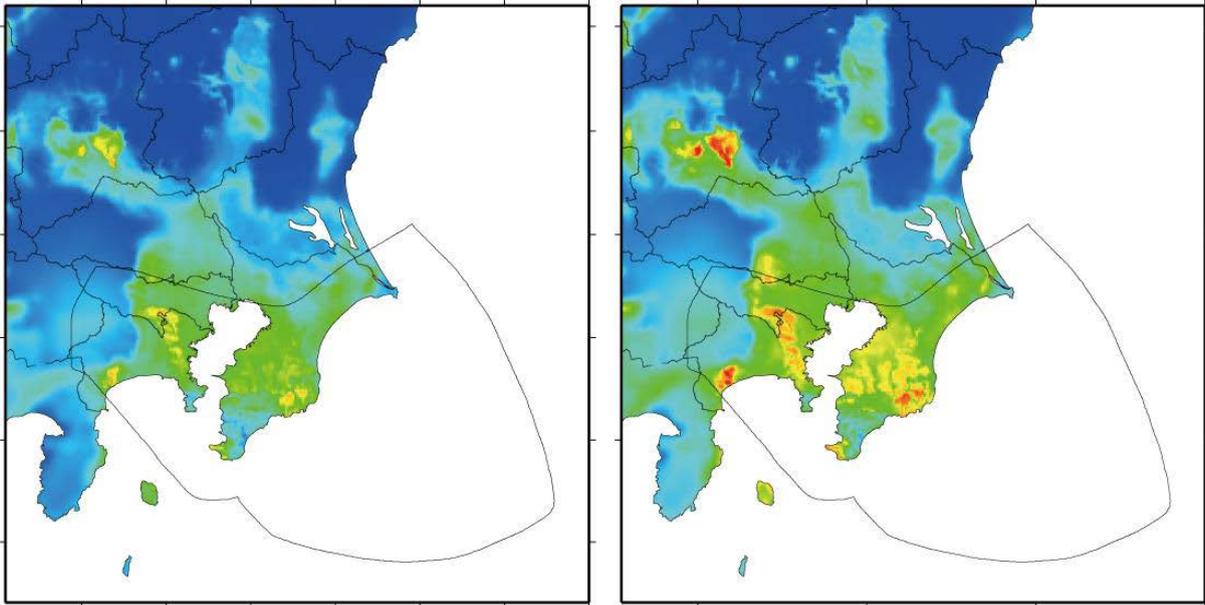


図 3-5-3 減衰定数 5%の相対速度応答スペクトルの分布（元禄関東地震型）。

平均

平均+標準偏差

周期 3 秒



周期 4 秒

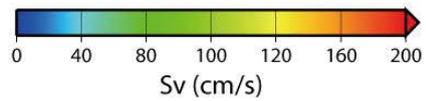
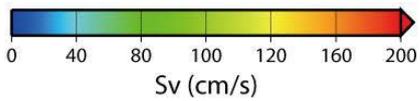
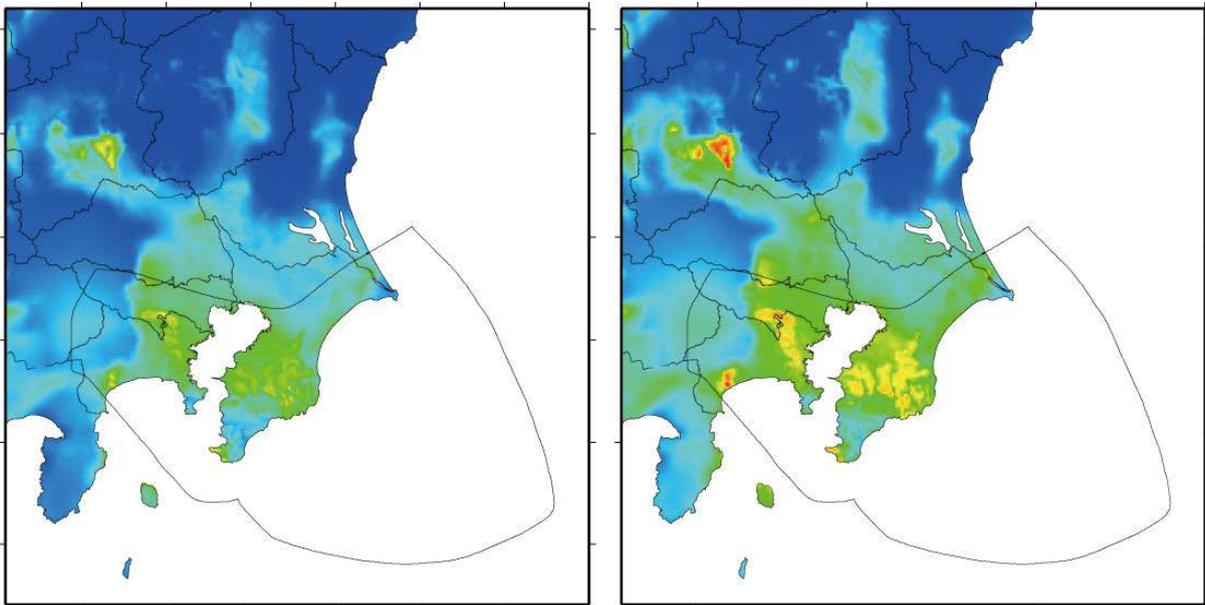
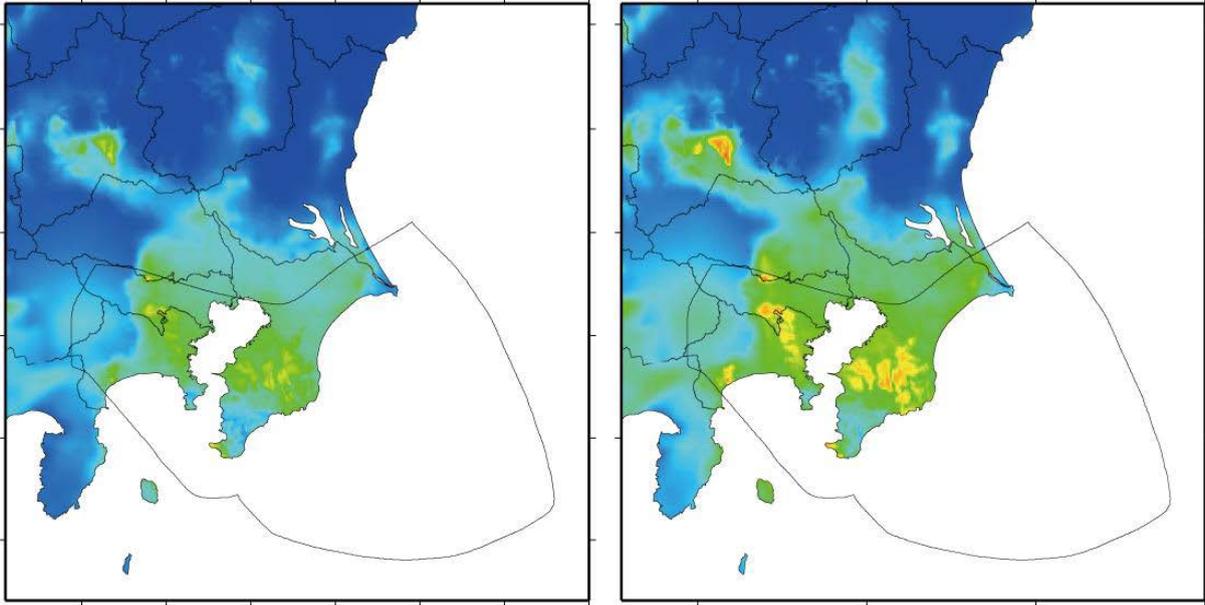


図 3-5-3 減衰定数 5%の相対速度応答スペクトルの分布（元禄関東地震型；つづき）。

平均

平均+標準偏差

周期 5 秒



周期 6 秒

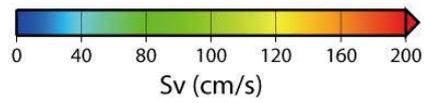
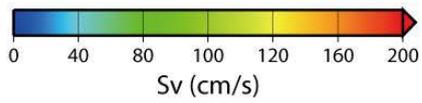
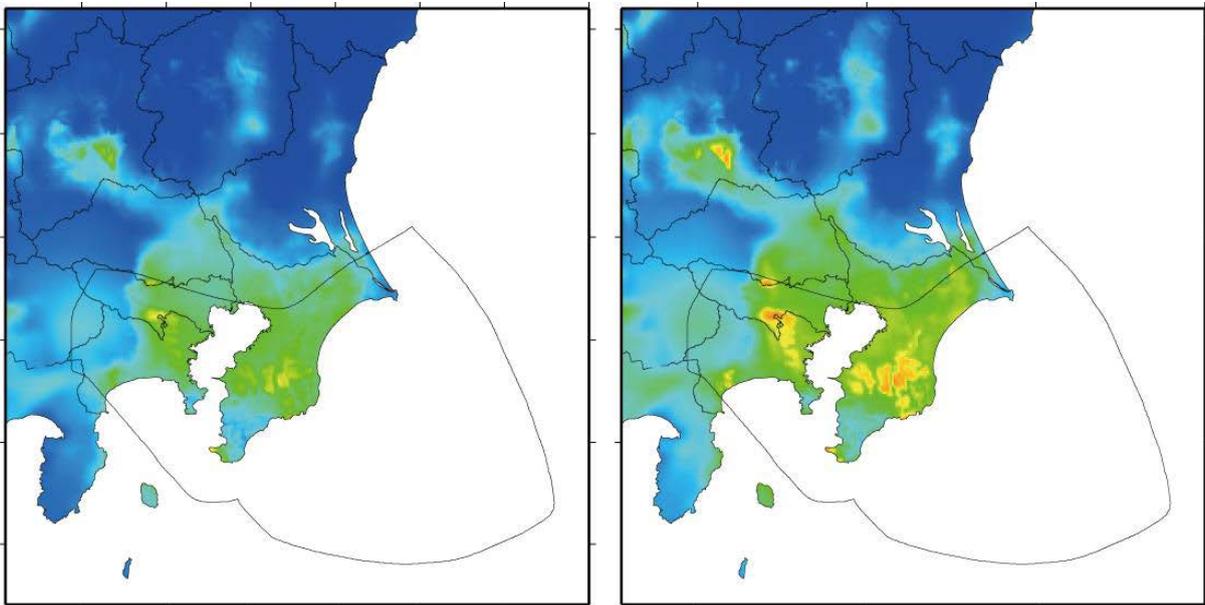
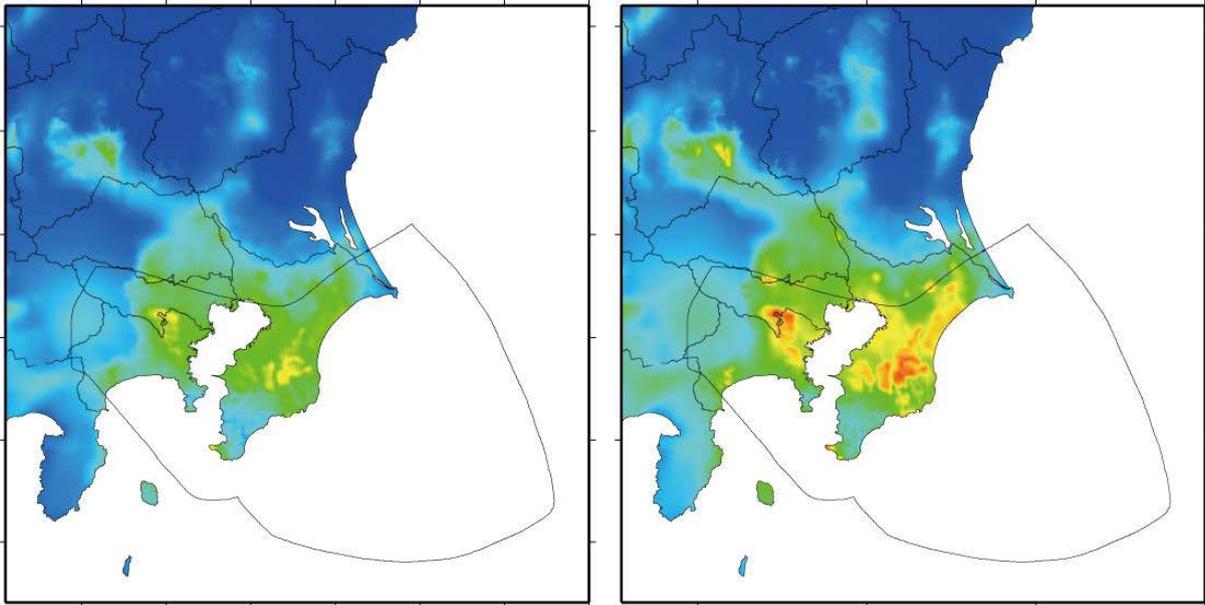


図 3-5-3 減衰定数 5%の相対速度応答スペクトルの分布（元禄関東地震型；つづき）。

平均

平均+標準偏差

周期 7 秒



周期 8 秒

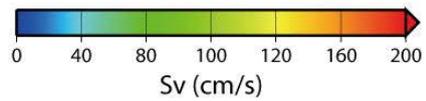
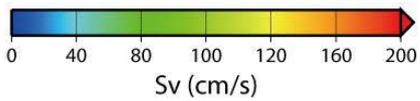
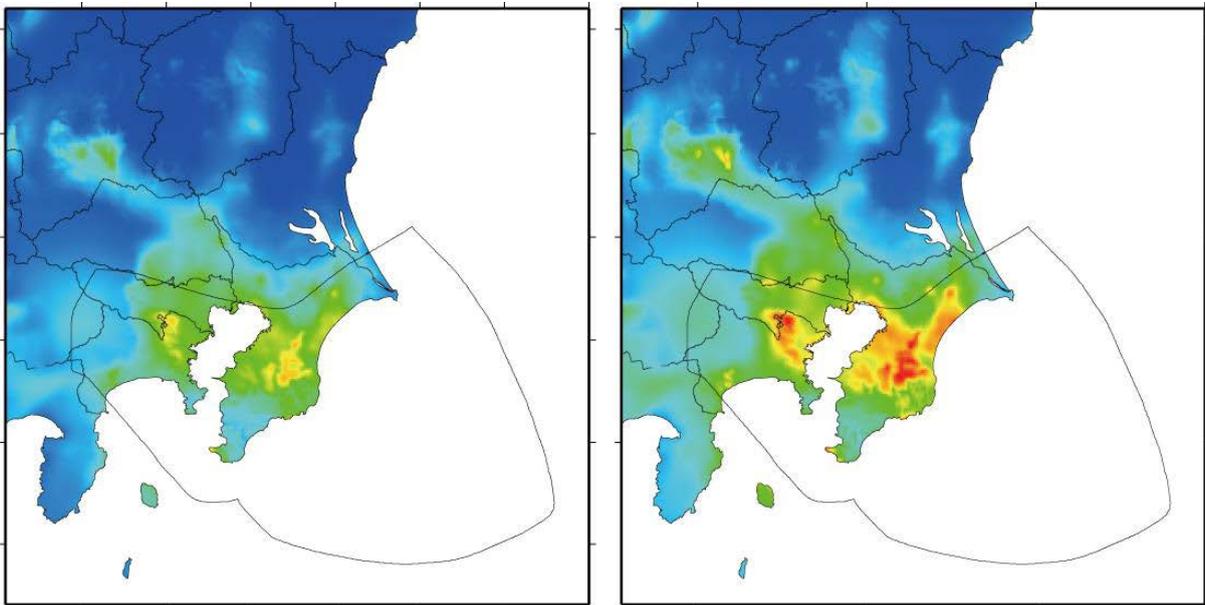
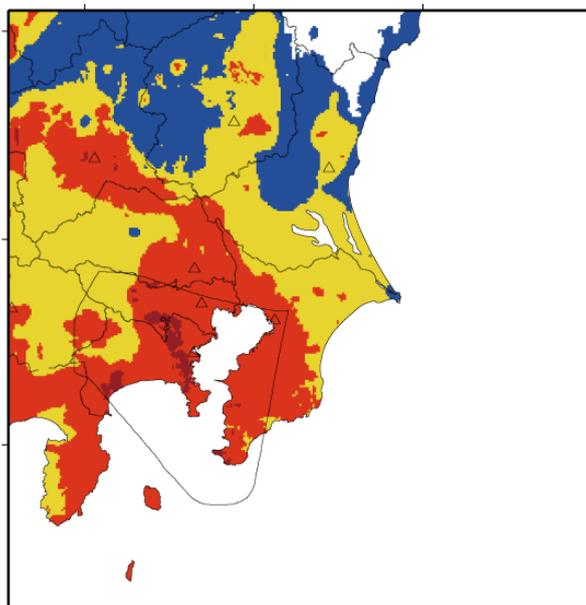
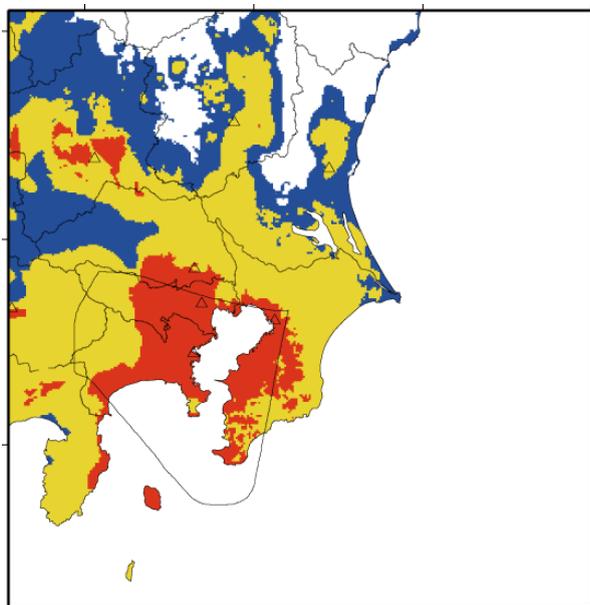


図 3-5-3 減衰定数 5%の相対速度応答スペクトルの分布（元禄関東地震型；つづき）。

平均

平均+標準偏差

大正関東地震型



元禄関東地震型

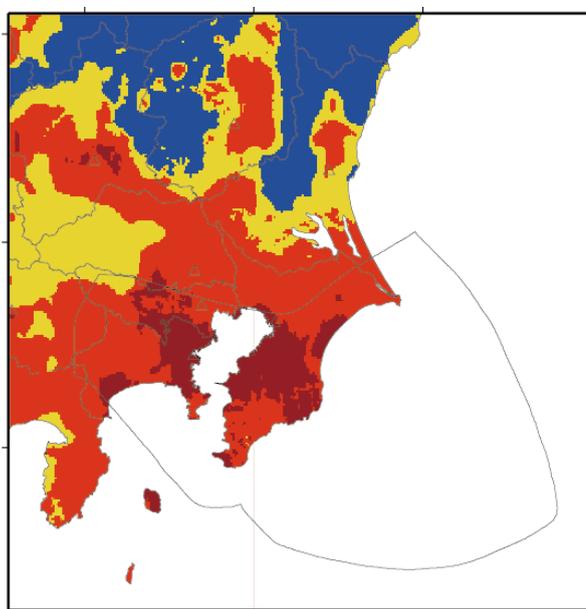
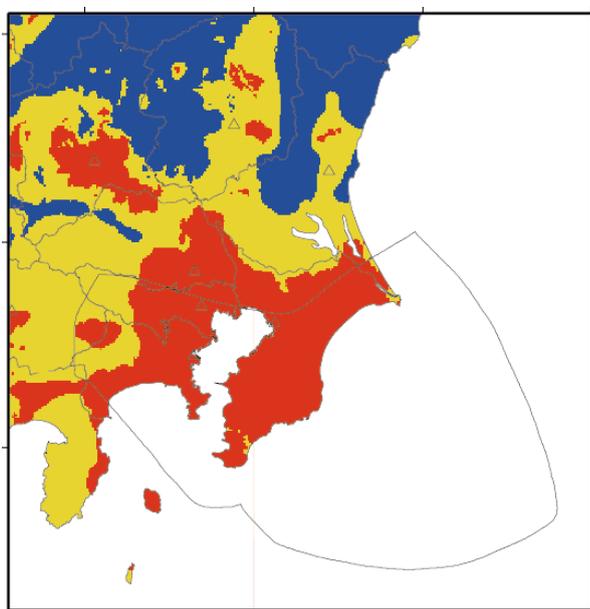
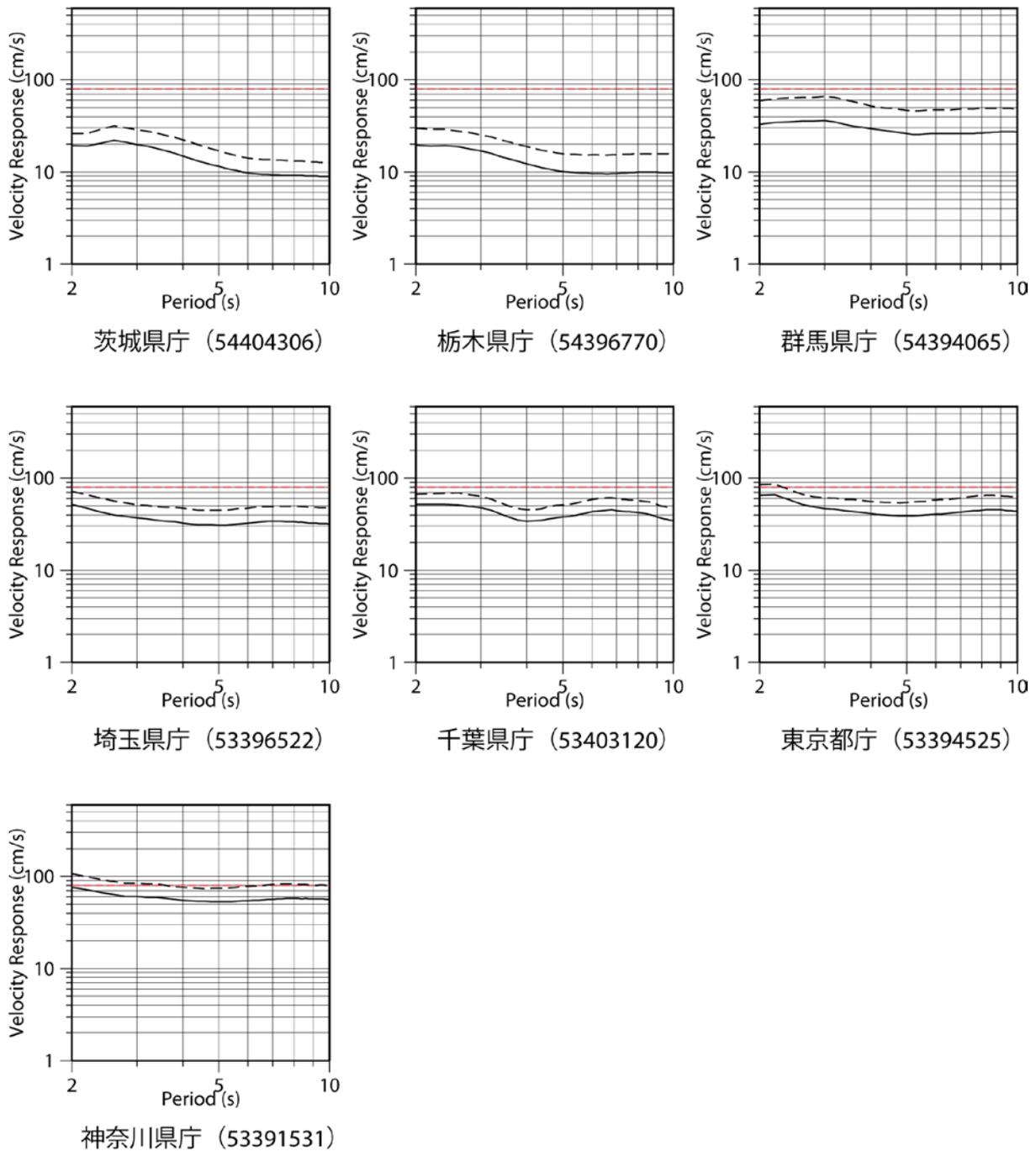
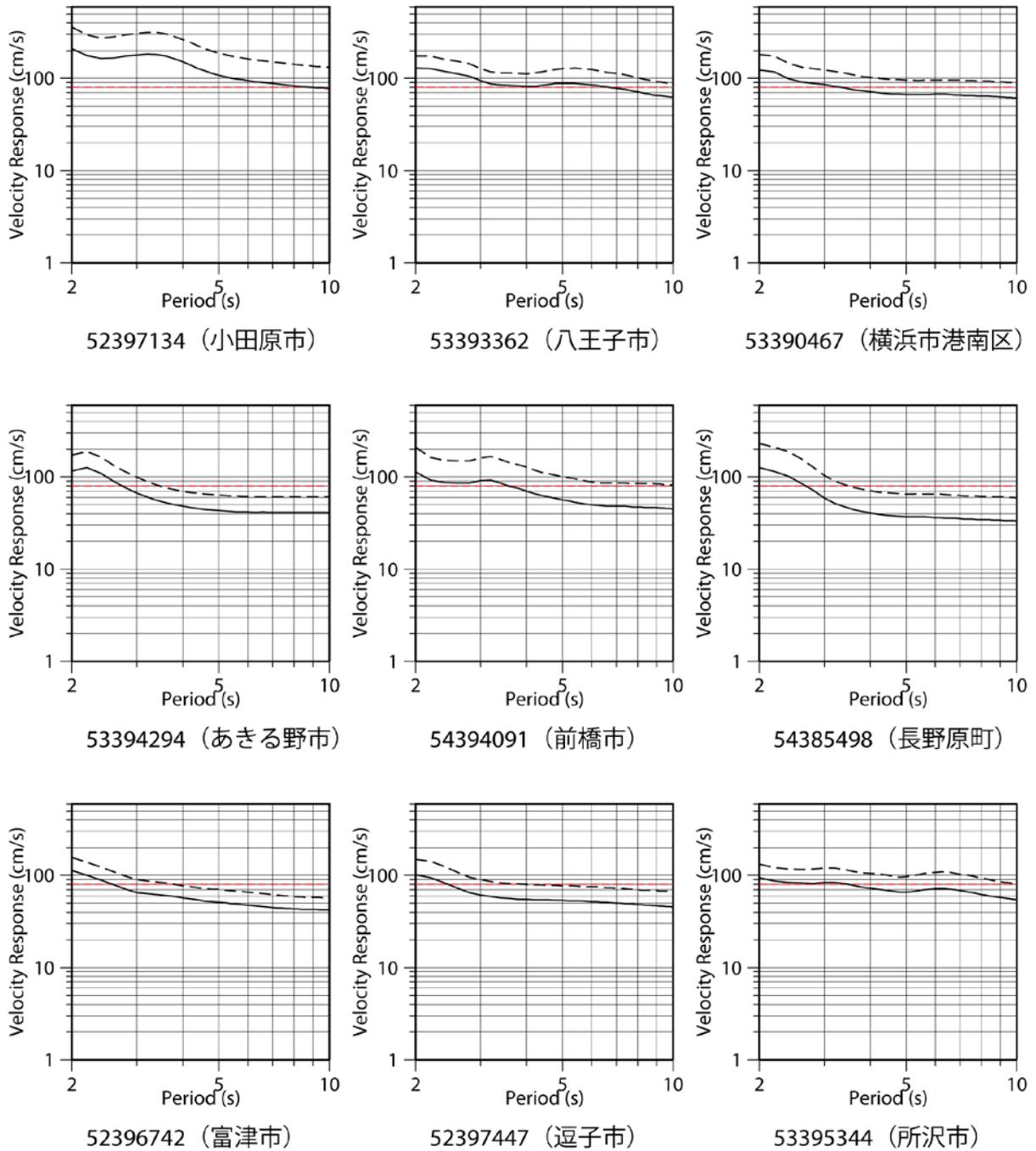


図 3-5-4 長周期地震動階級の分布。



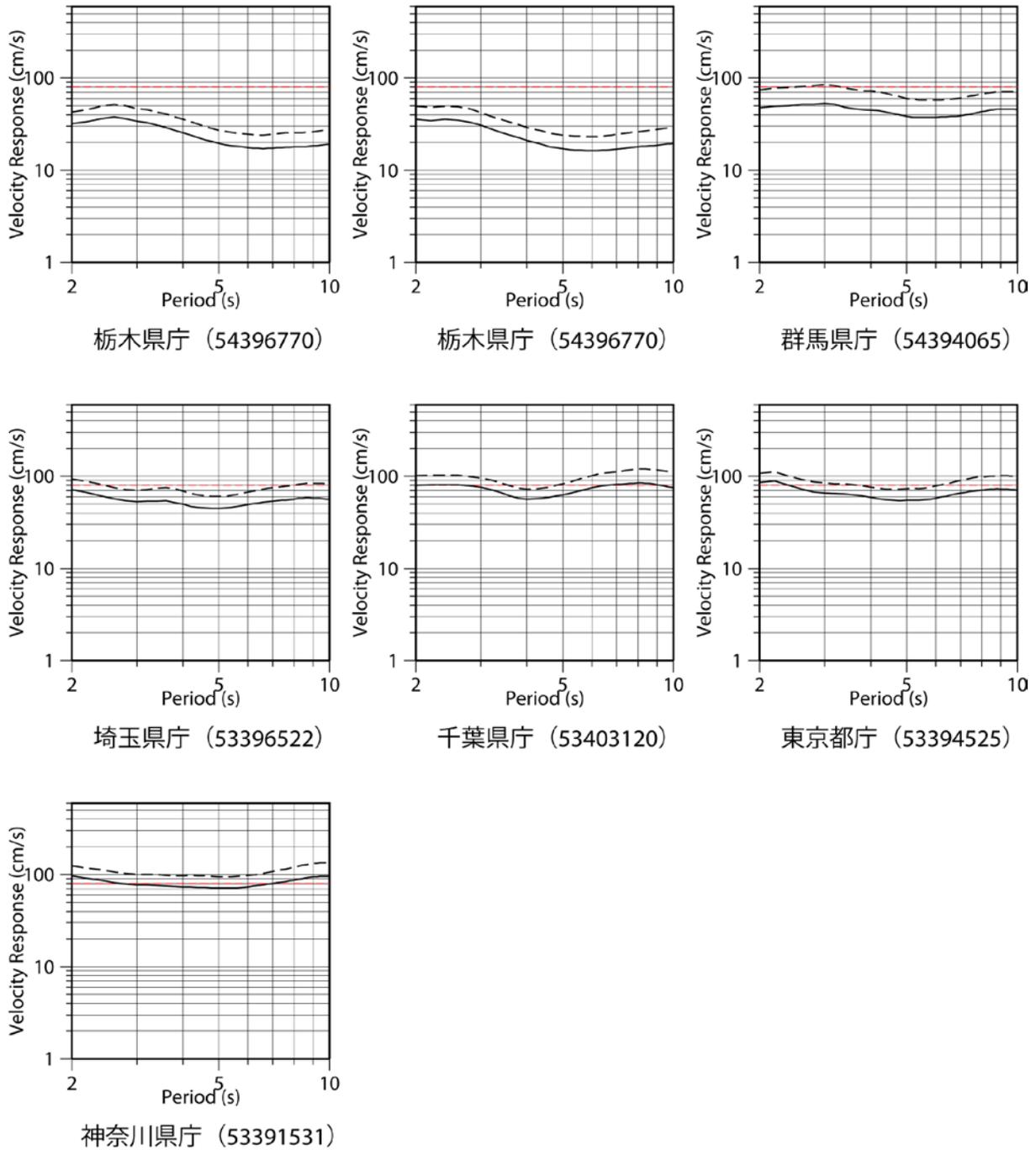
実線は平均値、破線は平均値+標準偏差

図 5-3-5 都県庁位置における減衰定数 5%の相対速度応答スペクトル (大正関東地震型)。



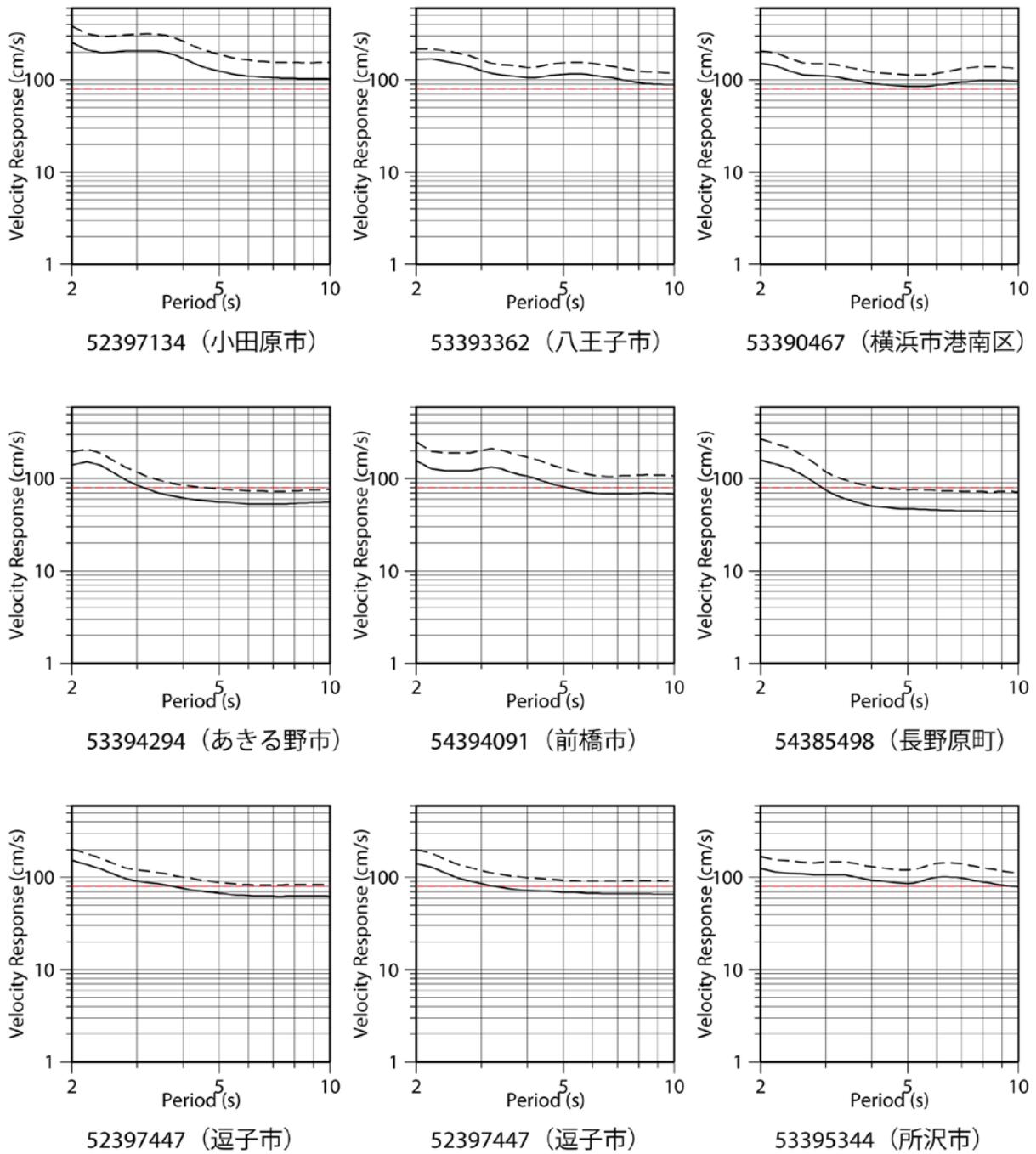
実線は平均値、破線は平均値+標準偏差

図 5-3-5 都県庁位置以外における減衰定数 5%の相対速度応答スペクトル (大正関東地震型)。



実線は平均値、破線は平均値+標準偏差

図 5-3-5 都県庁位置における減衰定数 5%の相対速度応答スペクトル (元禄関東地震型)。



実線は平均値、破線は平均値+標準偏差

図 5-3-5 都県庁位置以外における減衰定数 5%の相対速度応答スペクトル (元禄関東地震型)。

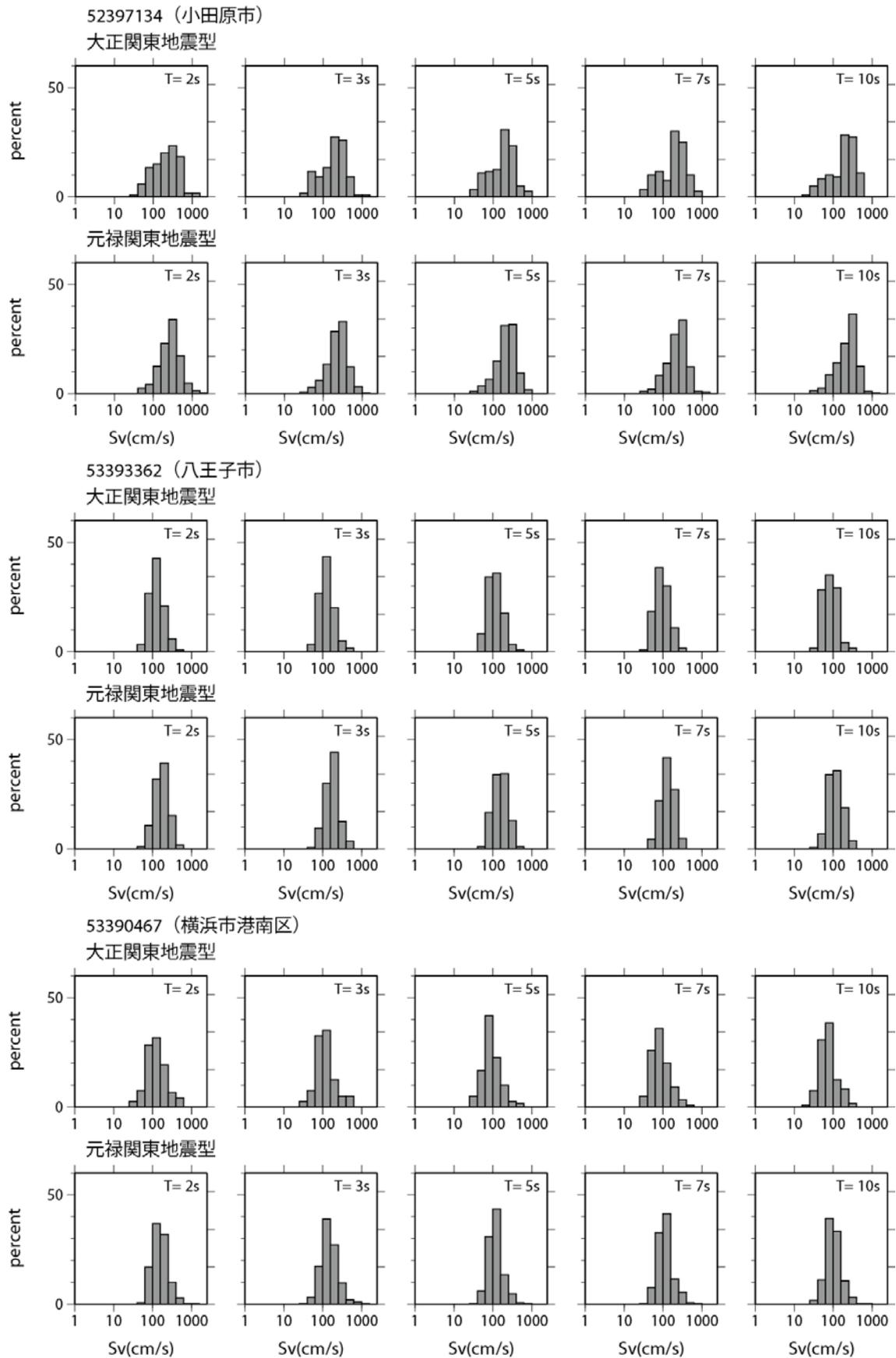


図 3-5-6 都県庁位置以外の地点における減衰定数 5%の相対速度応答値の周期別分布。

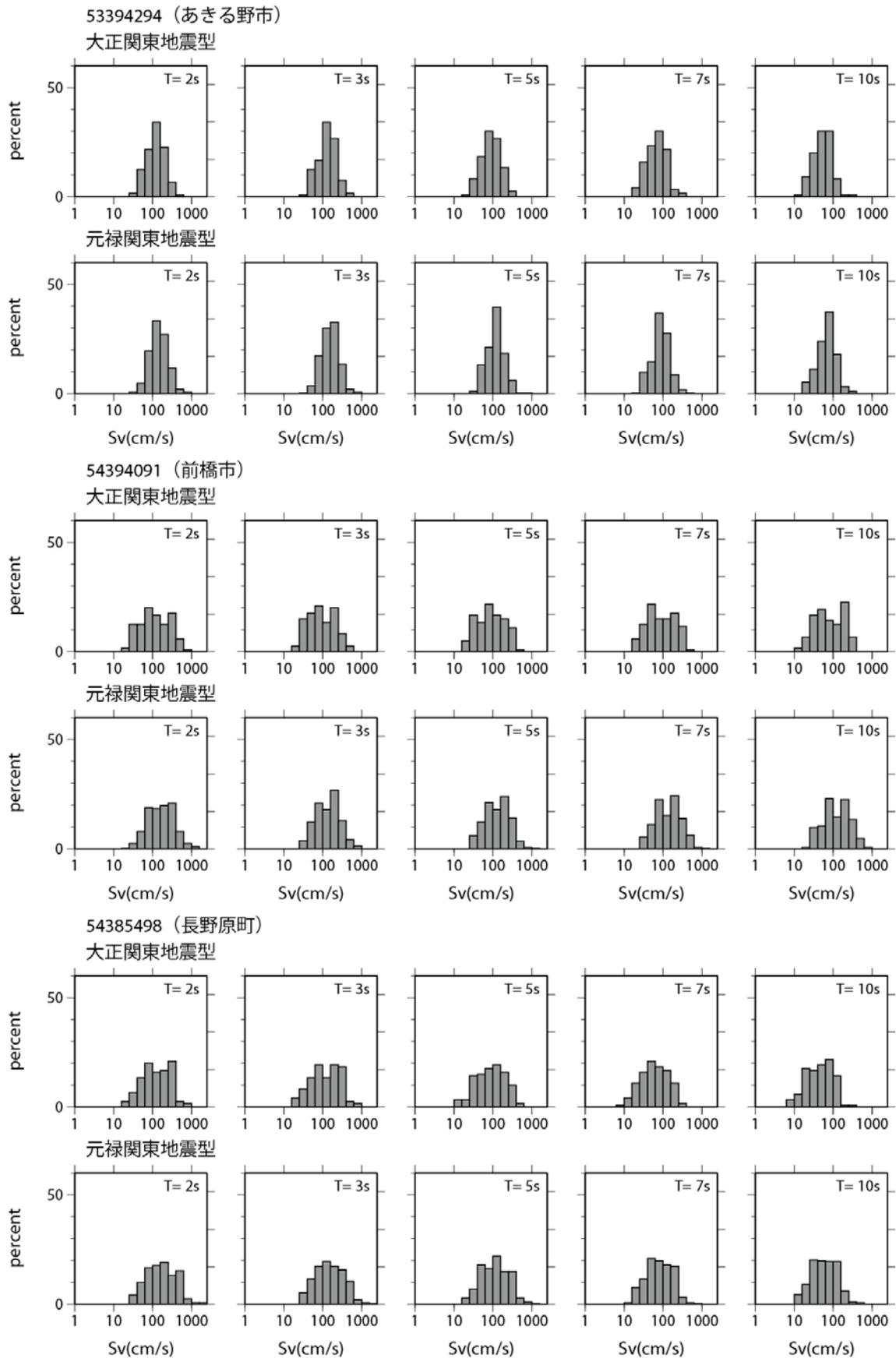


図 3-5-6 都県庁位置以外の地点における減衰定数 5%の相対速度応答値の周期別分布(つづき)。

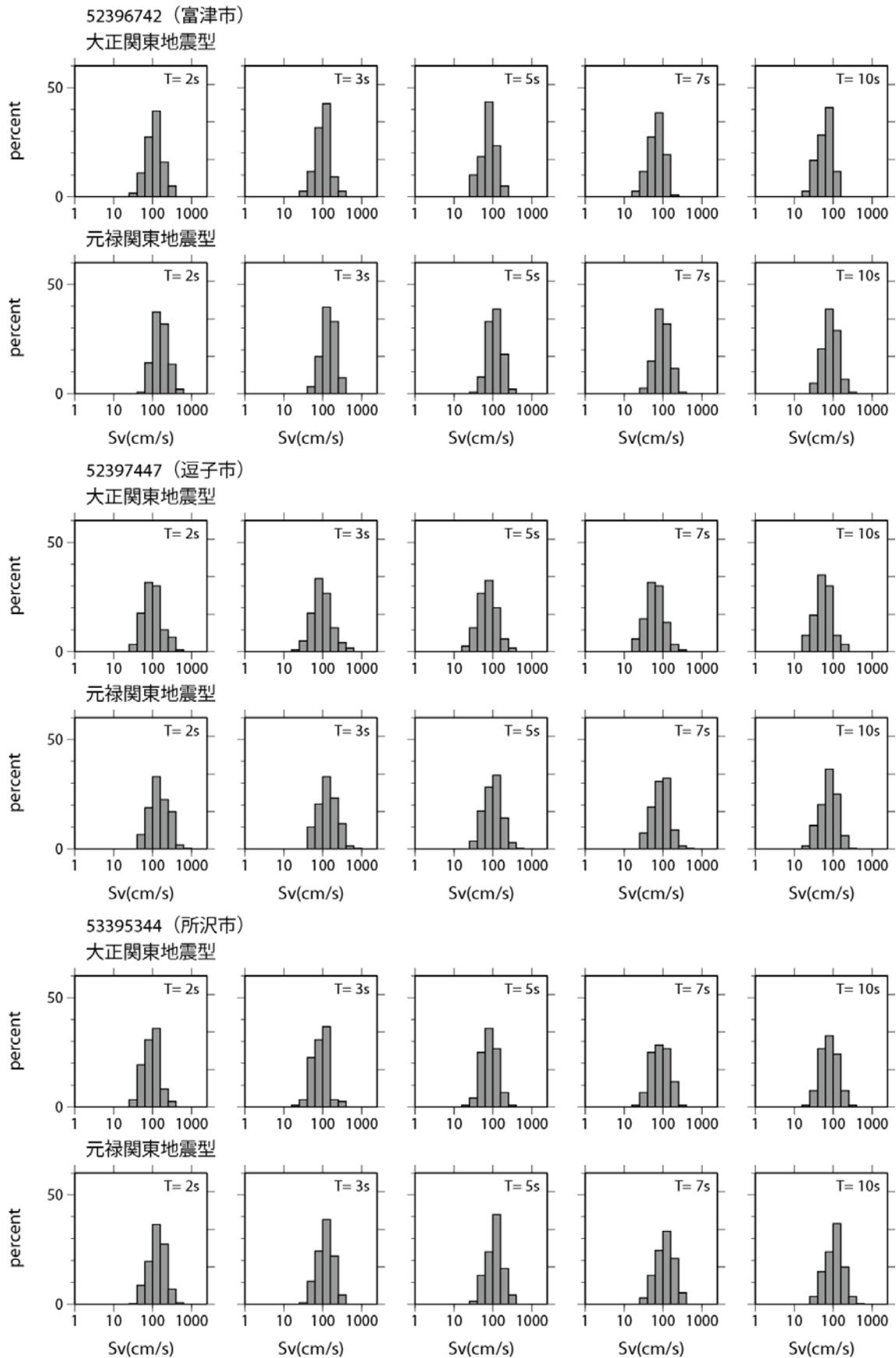
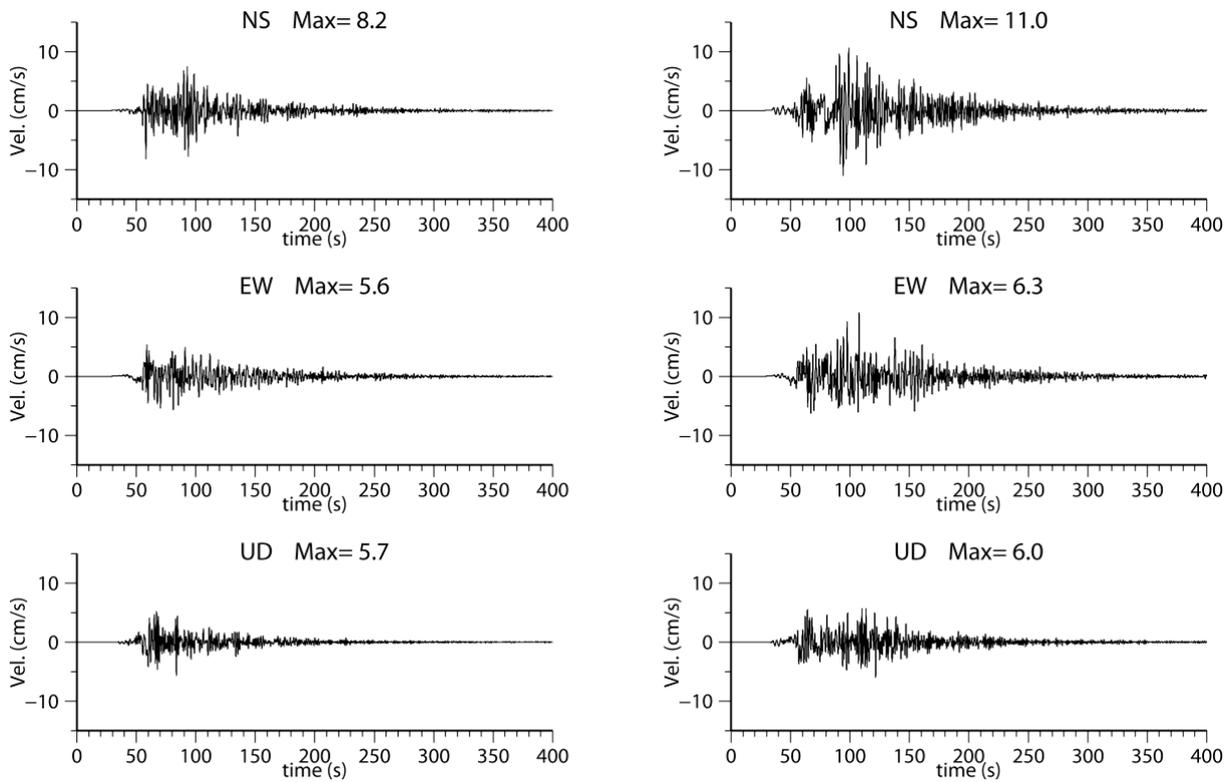


図 3-5-6 都県庁位置以外の地点における減衰定数 5%の相対速度応答値の周期別分布(つづき)。

大正関東地震型



元禄関東地震型

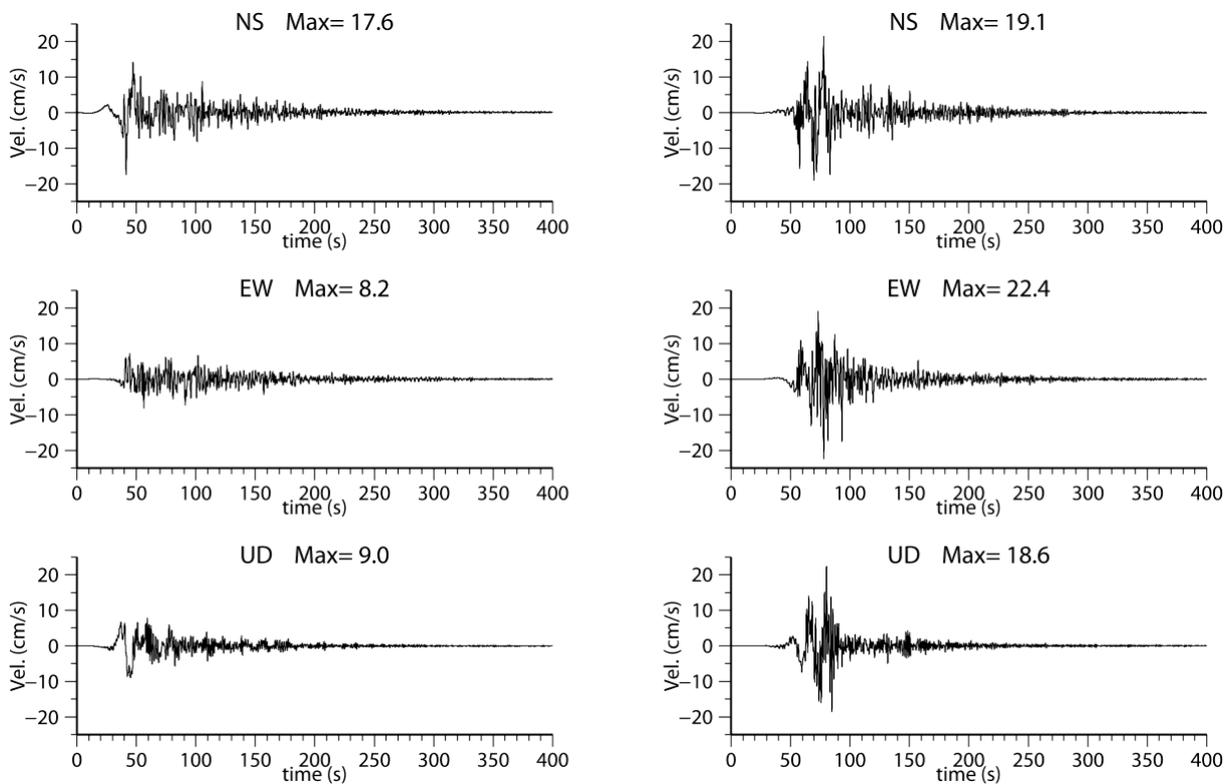
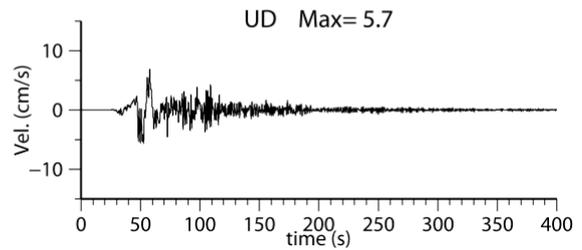
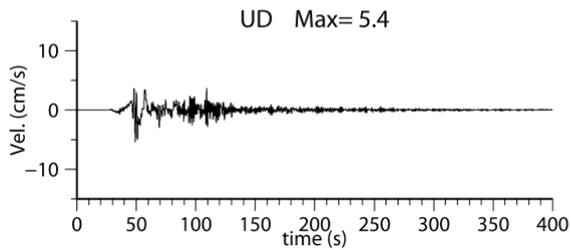
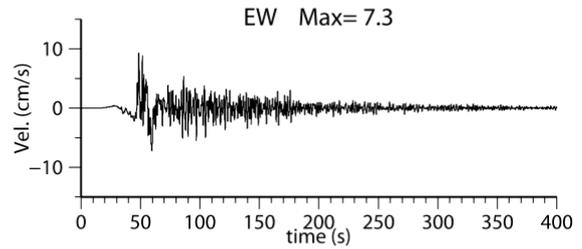
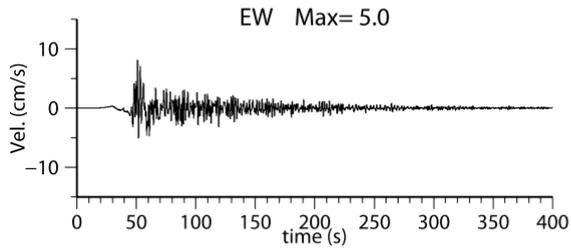
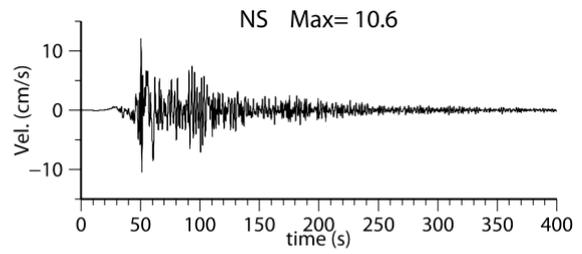
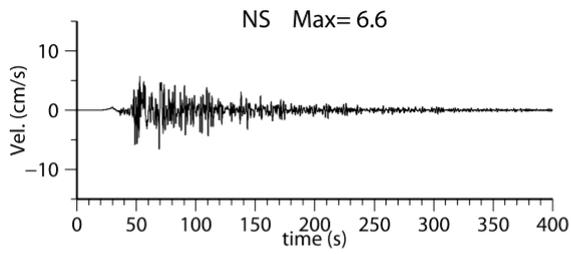


図 3-5-7 減衰定数 5%の相対速度応答スペクトルが平均値および平均値+標準偏差に最も近いケースの速度波形（茨城県庁）。

大正関東地震型



元禄関東地震型

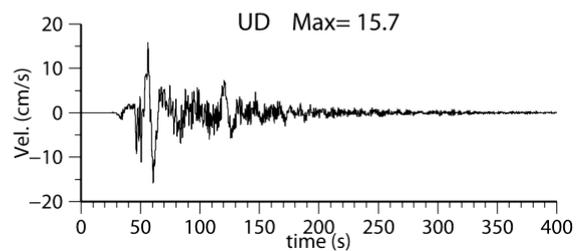
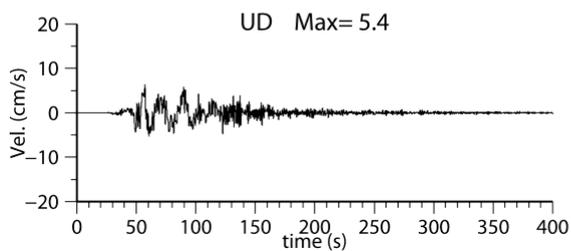
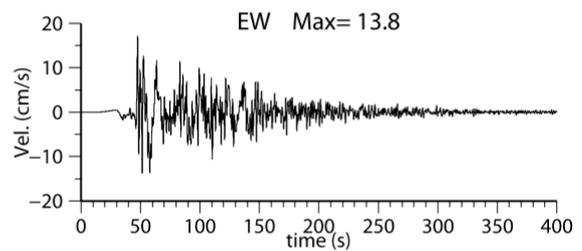
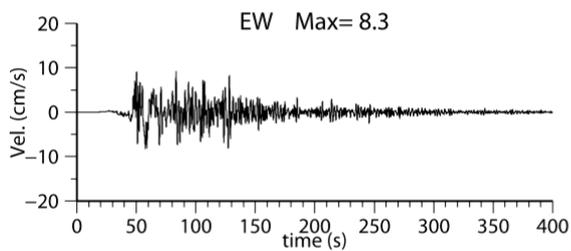
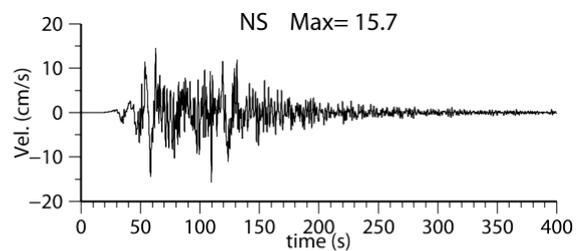
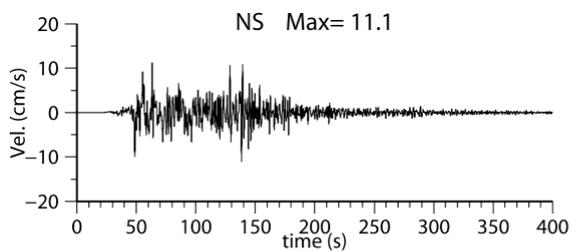
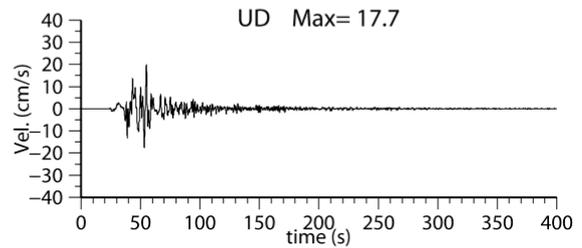
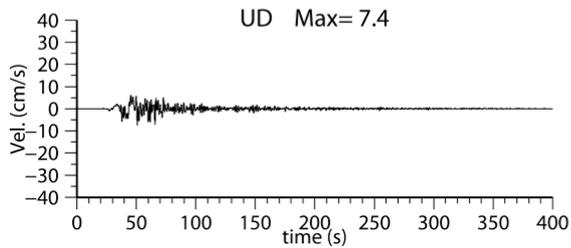
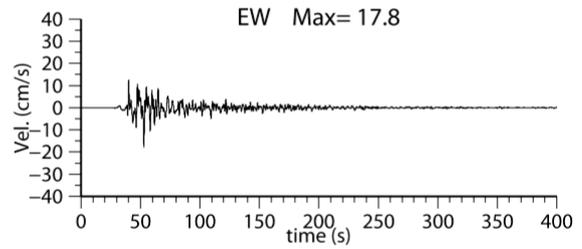
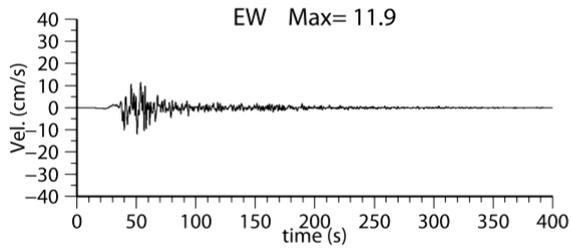
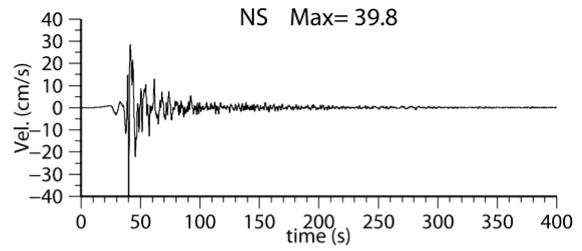
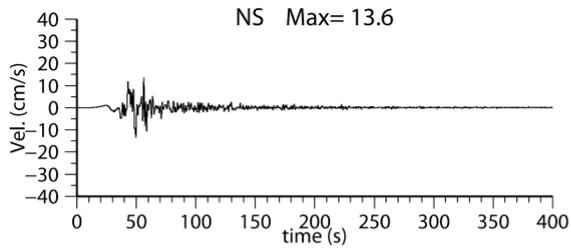


図 3-5-7 減衰定数 5%の相対速度応答スペクトルが平均値および平均値+標準偏差に最も近いケースの速度波形（栃木県庁）。

大正関東地震型



元禄関東地震型

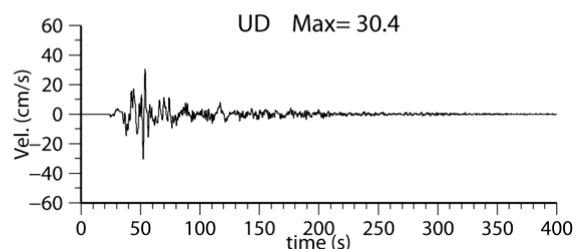
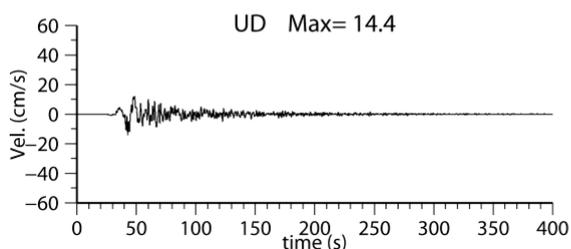
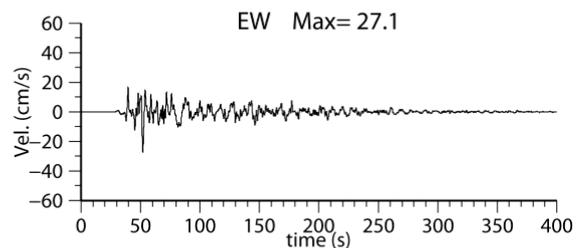
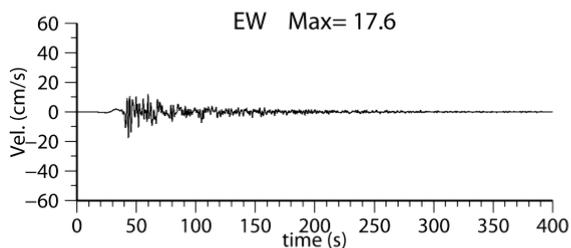
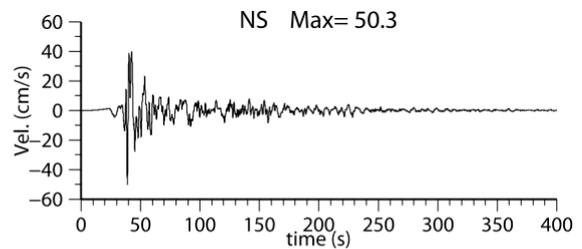
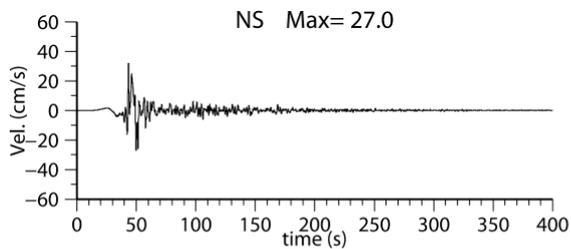
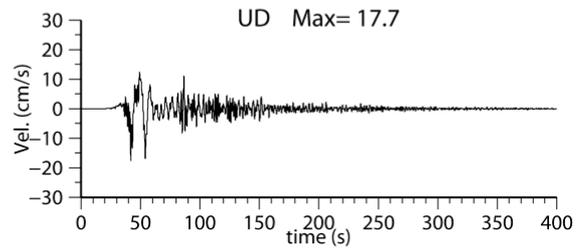
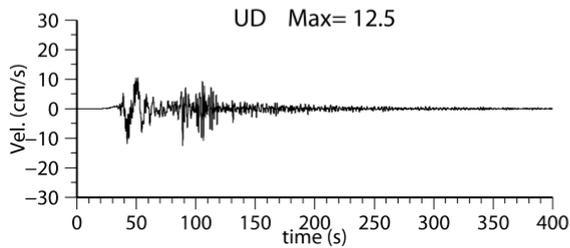
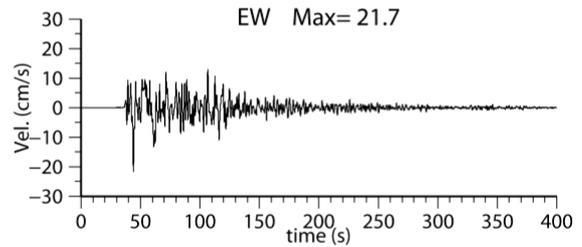
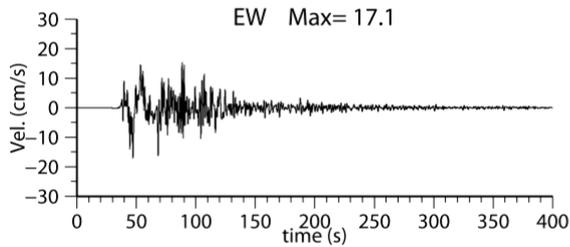
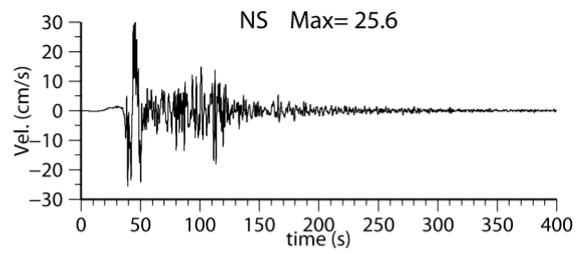
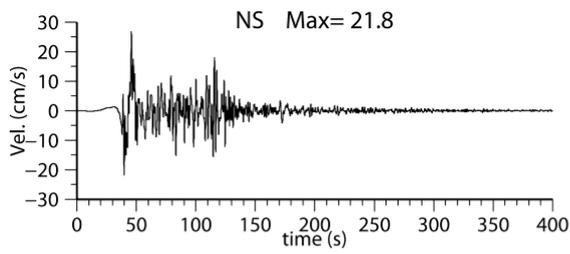


図 3-5-7 減衰定数 5%の相対速度応答スペクトルが平均値および平均値+標準偏差に最も近いケースの速度波形（群馬県庁）。

大正関東地震型



元禄関東地震型

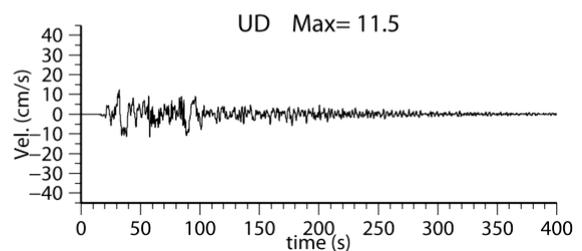
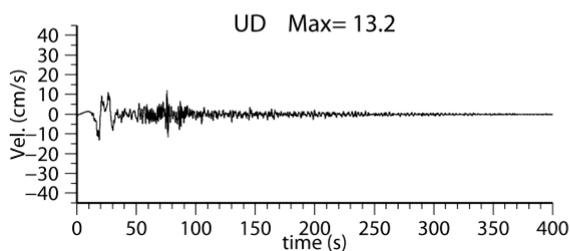
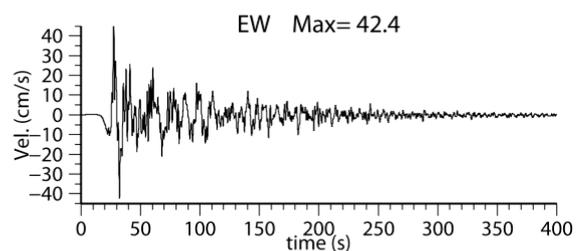
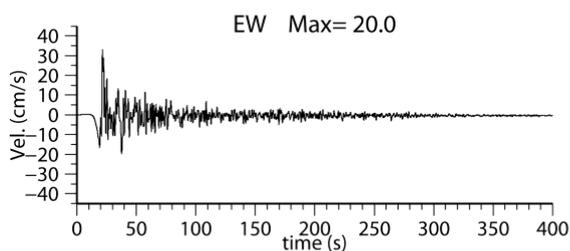
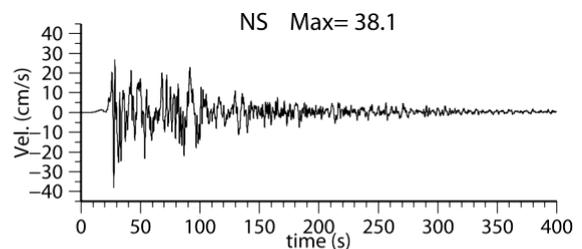
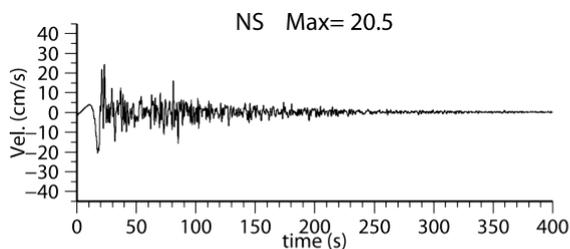
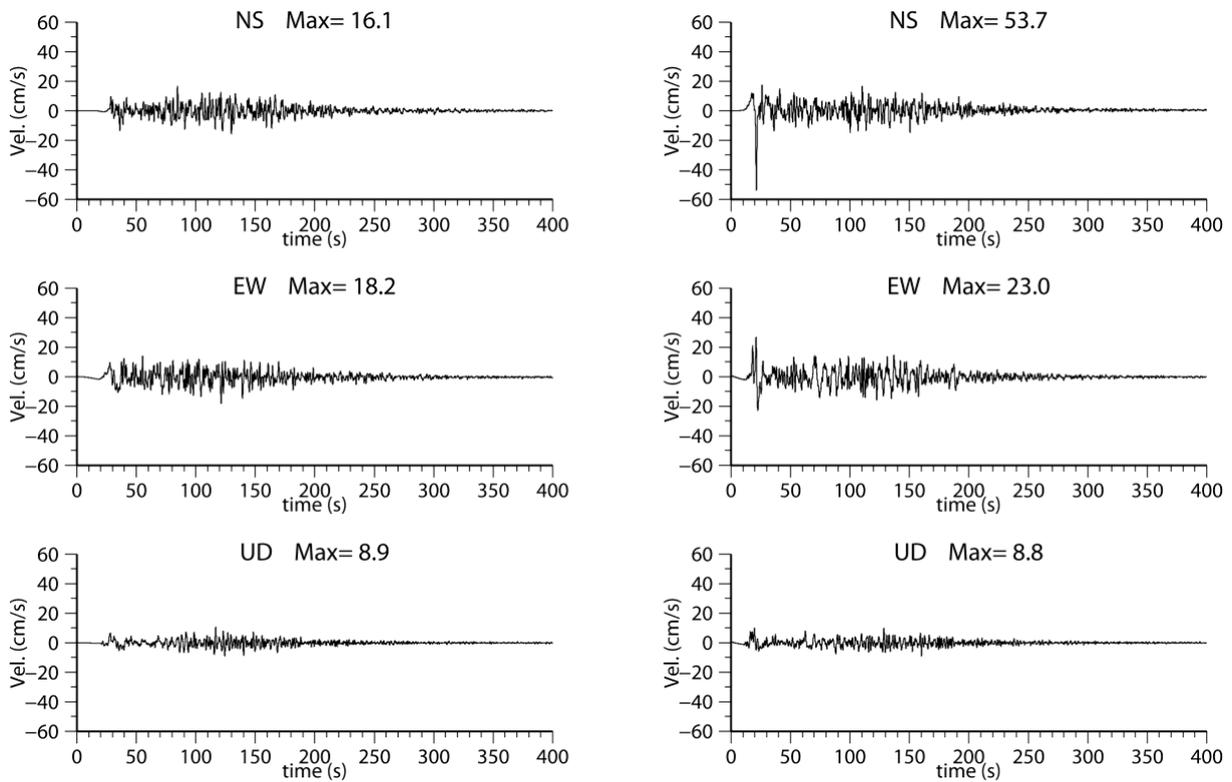


図 3-5-7 減衰定数 5%の相対速度応答スペクトルが平均値および平均値+標準偏差に最も近いケースの速度波形 (埼玉県庁)。

大正関東地震型



元禄関東地震型

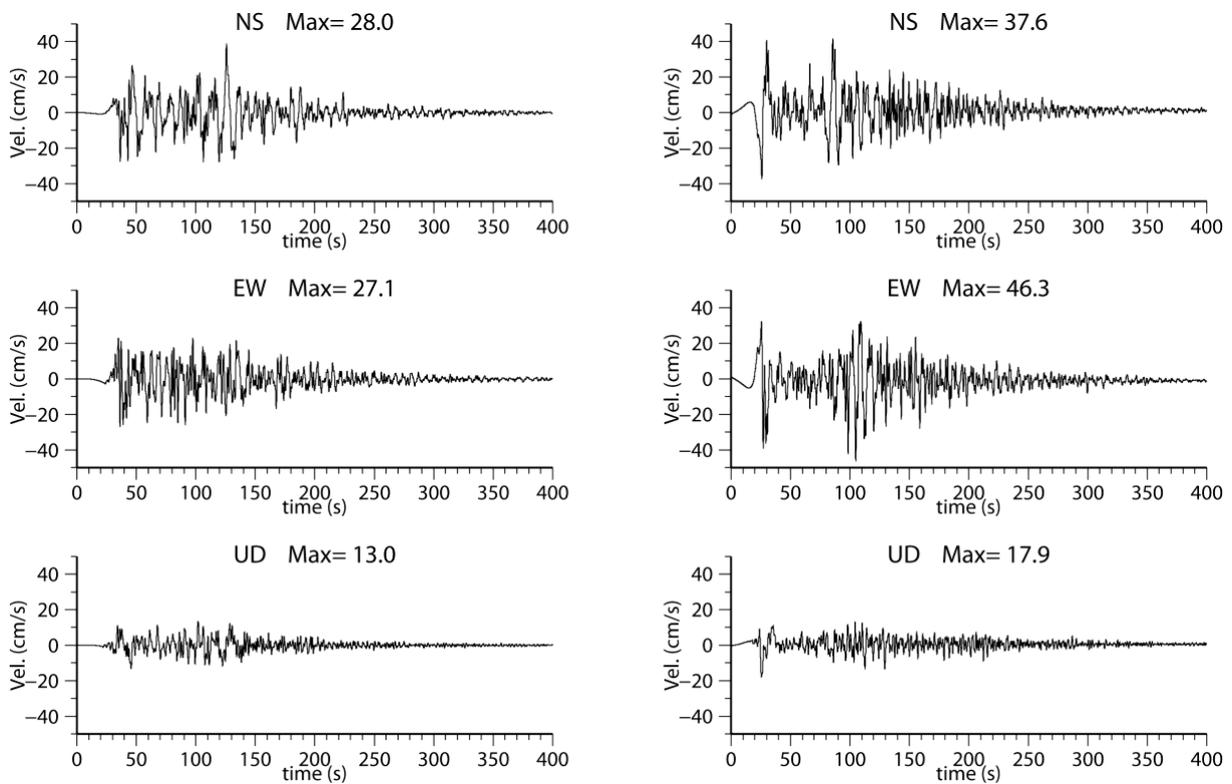
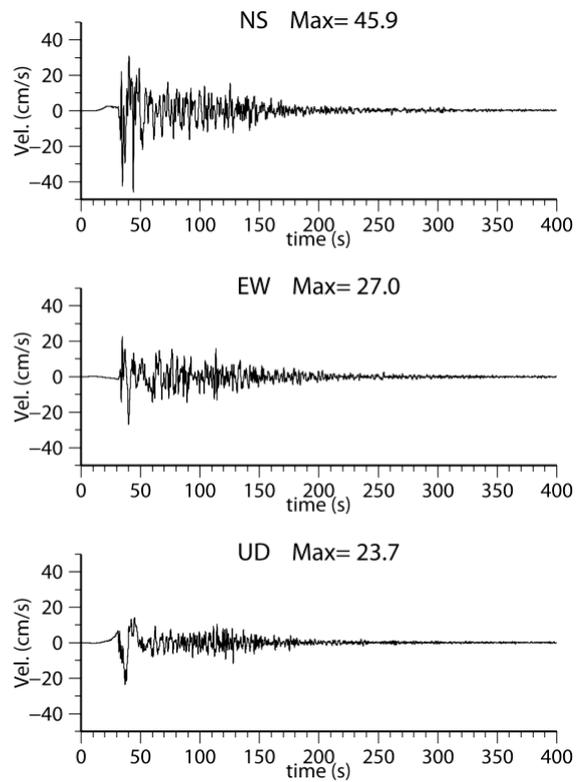
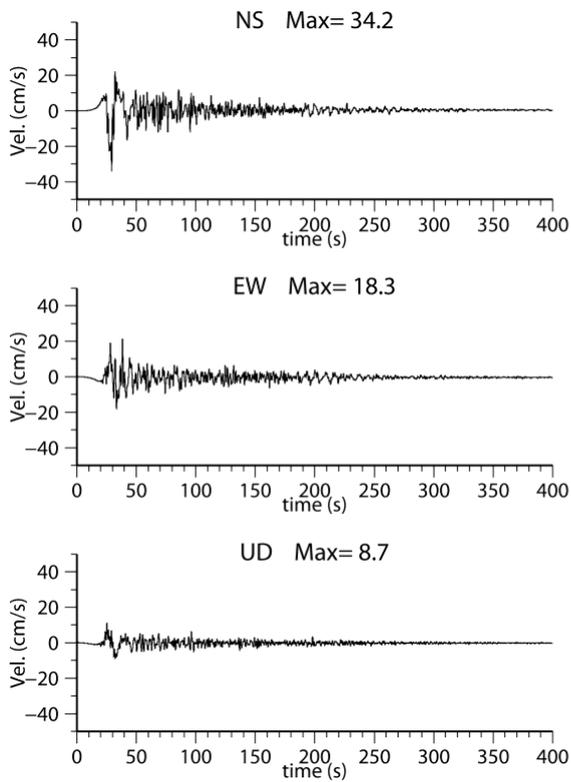


図 3-5-7 減衰定数 5%の相対速度応答スペクトルが平均値および平均値+標準偏差に最も近いケースの速度波形 (千葉県庁)。

大正関東地震型



元禄関東地震型

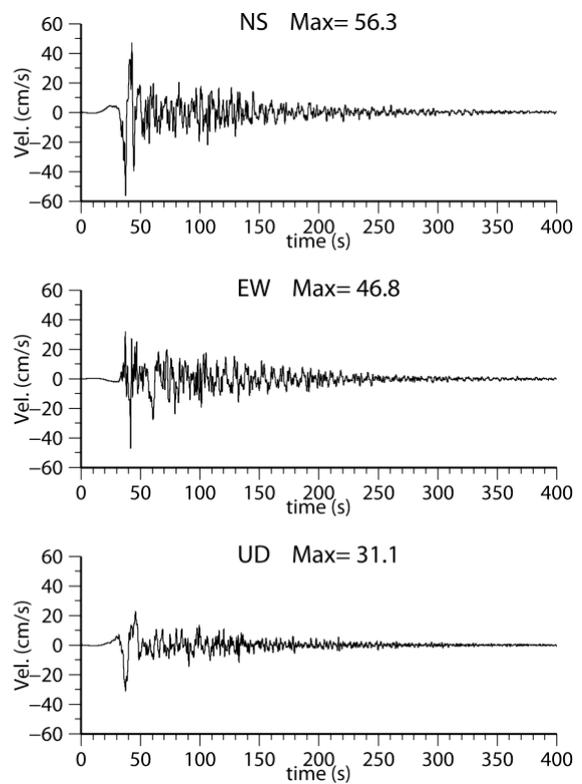
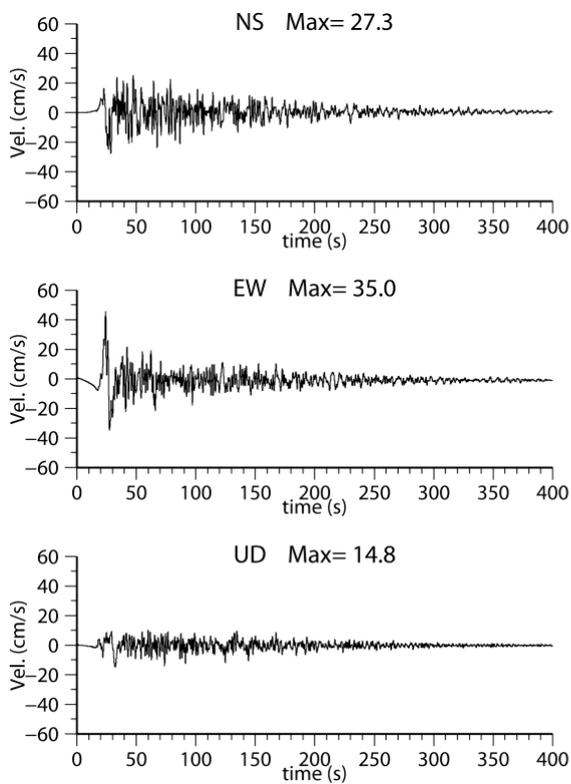
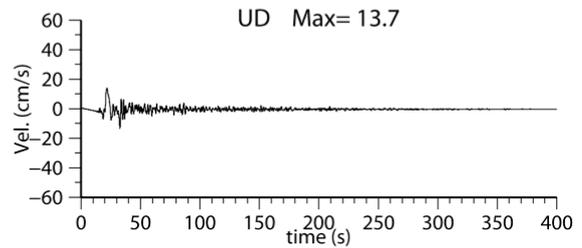
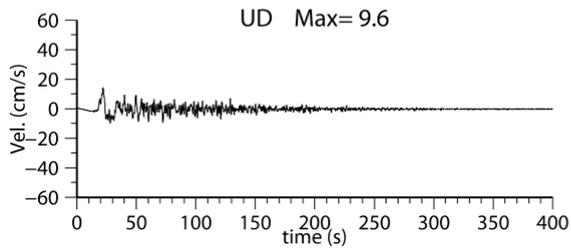
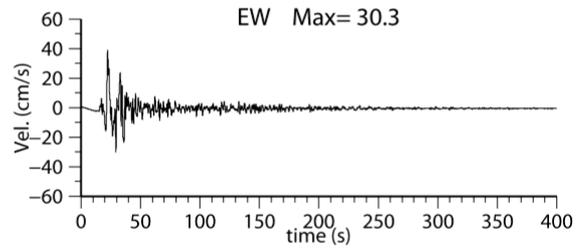
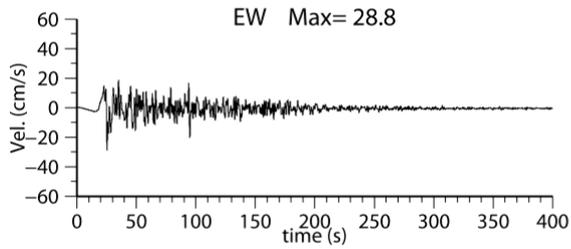
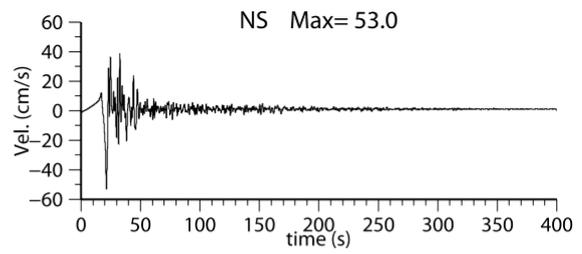
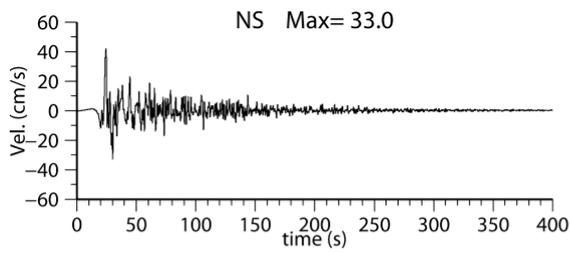


図 3-5-7 減衰定数 5%の相対速度応答スペクトルが平均値および平均値+標準偏差に最も近いケースの速度波形（東京都庁）。

大正関東地震型



元禄関東地震型

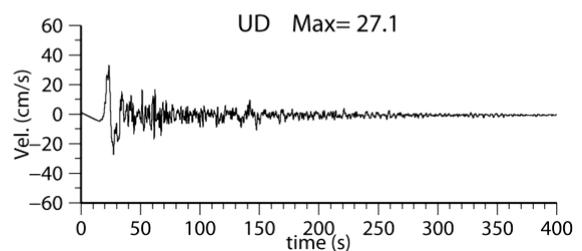
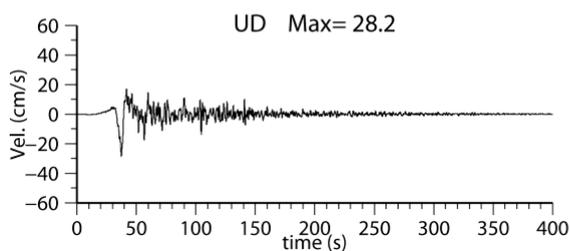
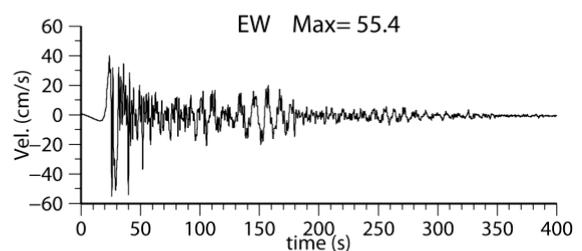
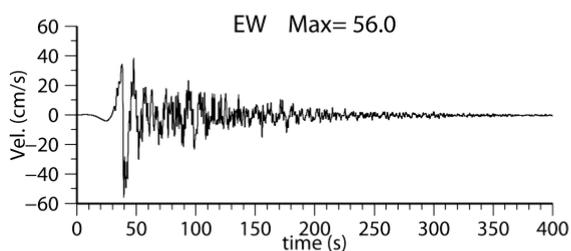
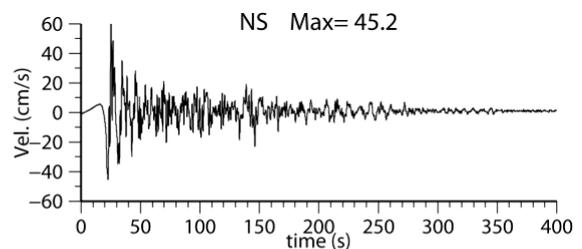
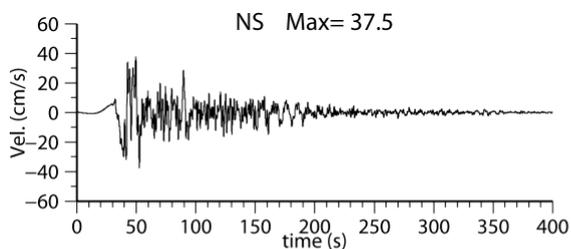
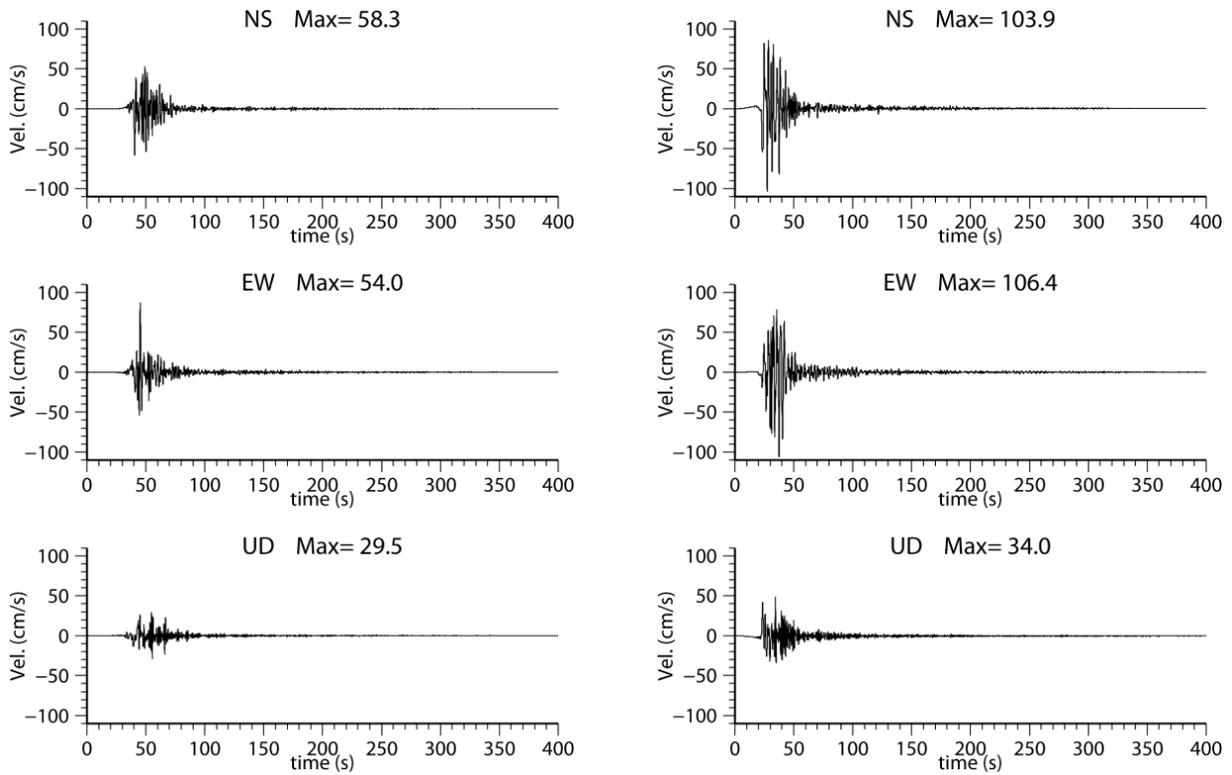


図 3-5-7 減衰定数 5%の相対速度応答スペクトルが平均値および平均値+標準偏差に最も近いケースの速度波形 (神奈川県庁)。

大正関東地震型



元禄関東地震型

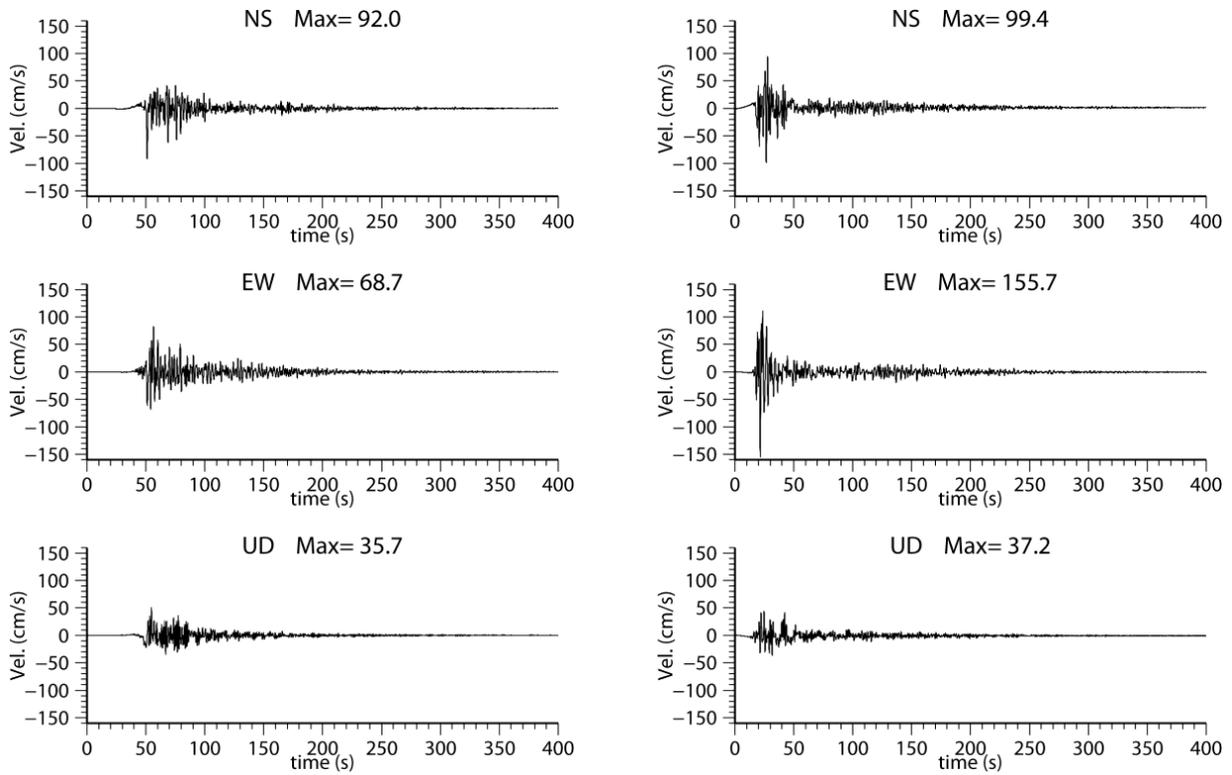
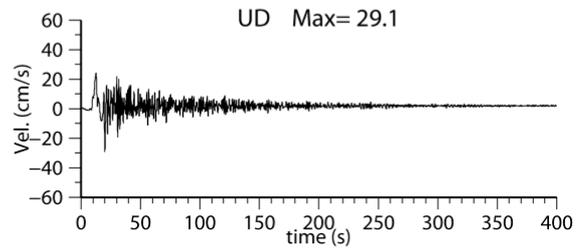
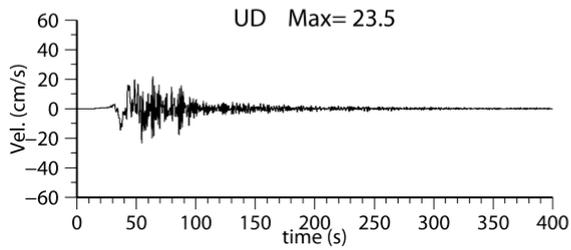
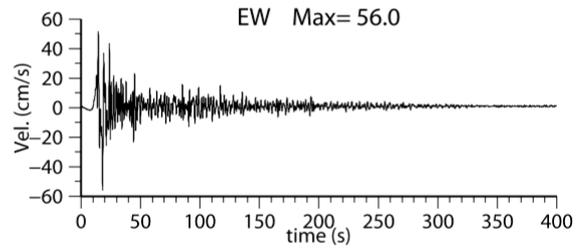
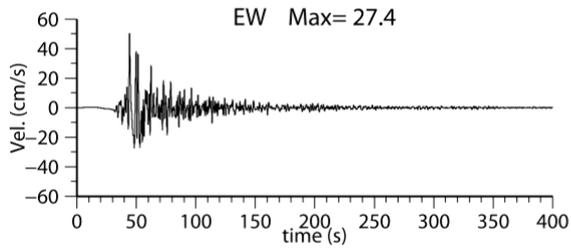
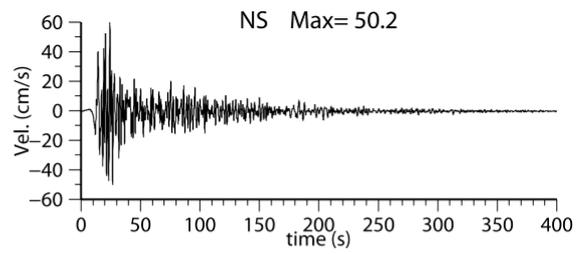
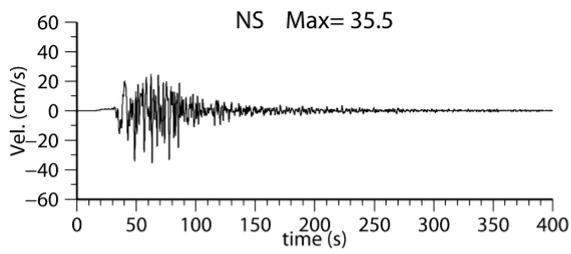


図 3-5-7 減衰定数 5%の相対速度応答スペクトルが平均値および平均値+標準偏差に最も近いケースの速度波形 (小田原市)。

大正関東地震型



元禄関東地震型

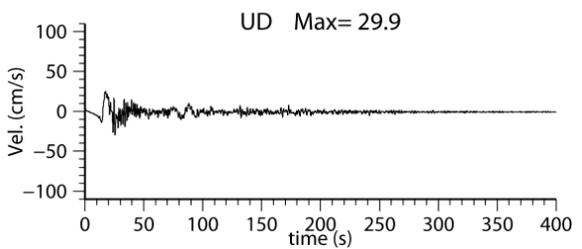
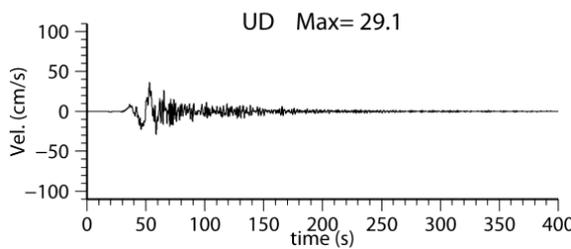
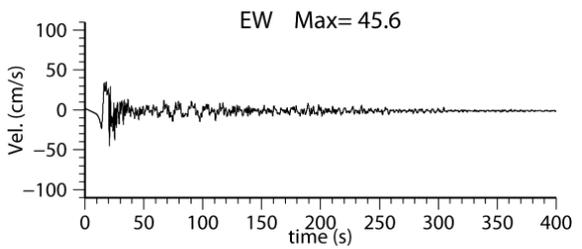
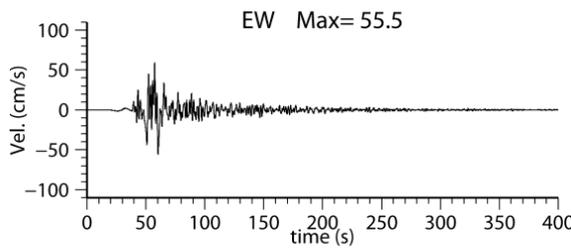
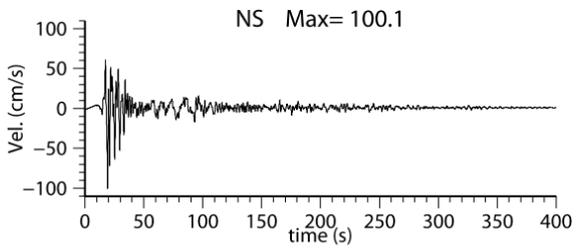
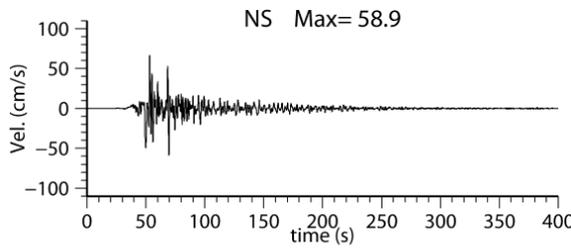
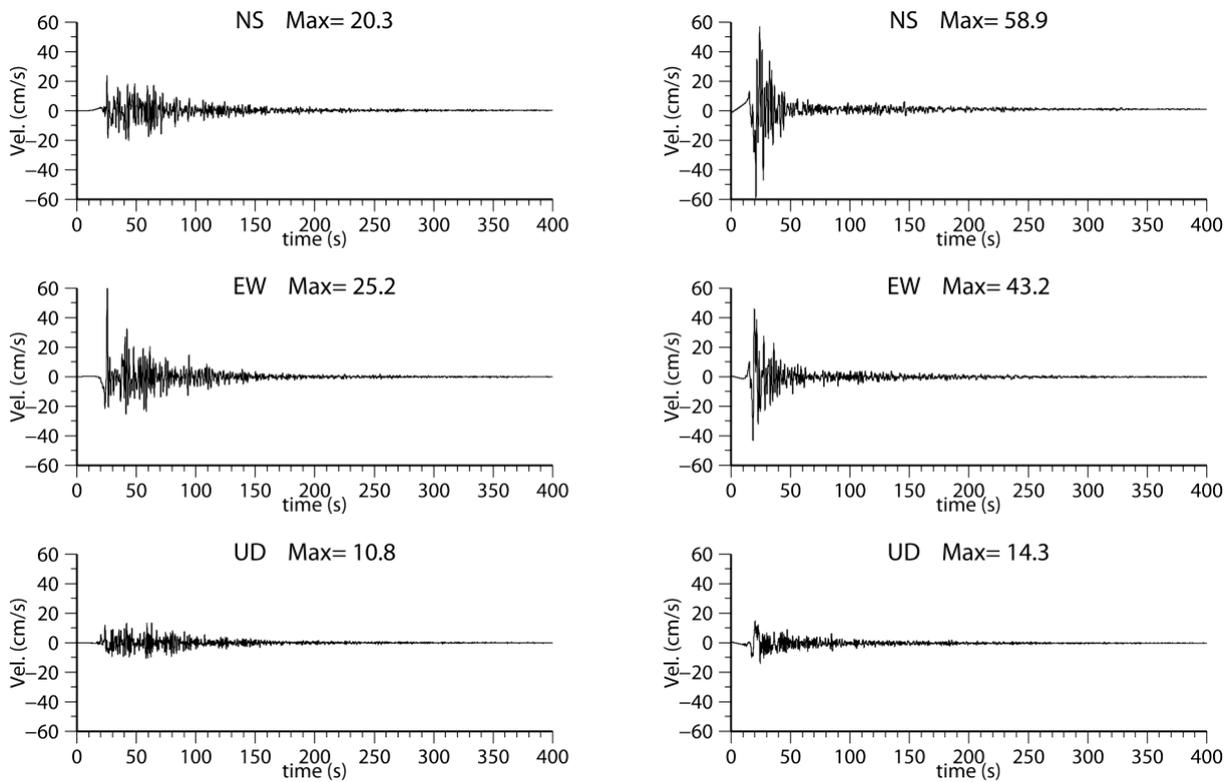


図 3-5-7 減衰定数 5%の相対速度応答スペクトルが平均値および平均値+標準偏差に最も近いケースの速度波形（八王子市）。

大正関東地震型



元禄関東地震型

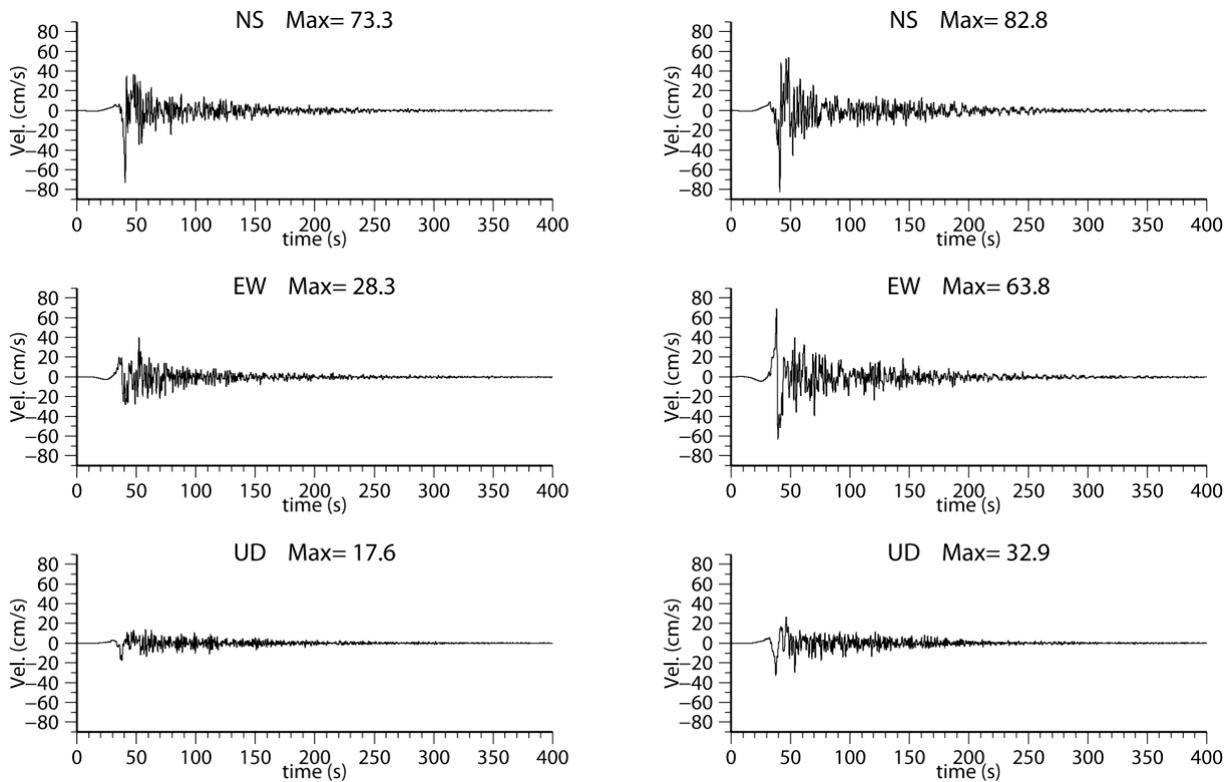
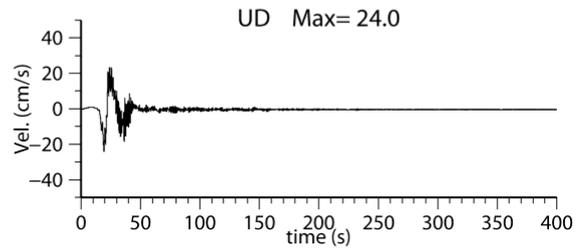
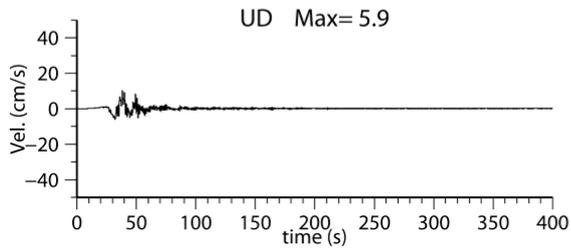
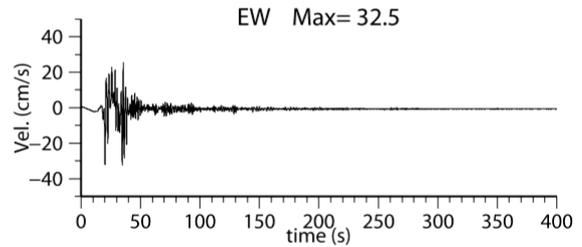
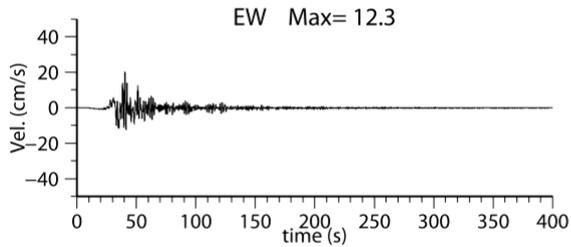
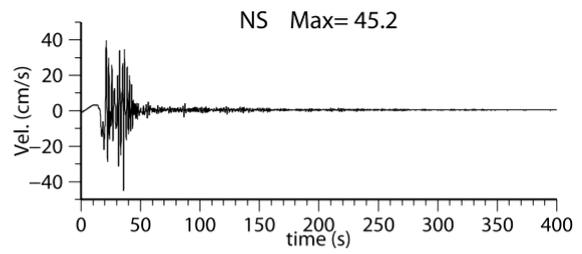
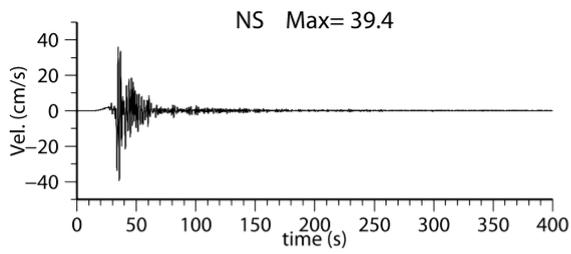


図 3-5-7 減衰定数 5%の相対速度応答スペクトルが平均値および平均値+標準偏差に最も近いケースの速度波形（横浜市港南区）。

大正関東地震型



元禄関東地震型

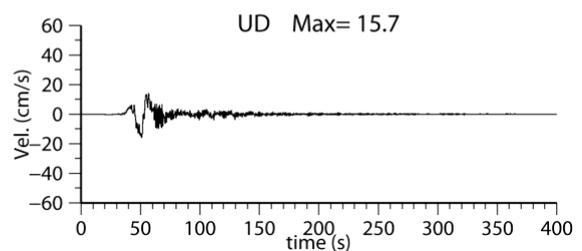
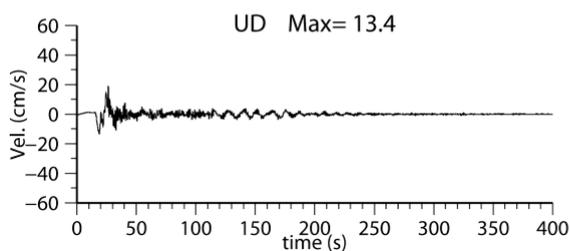
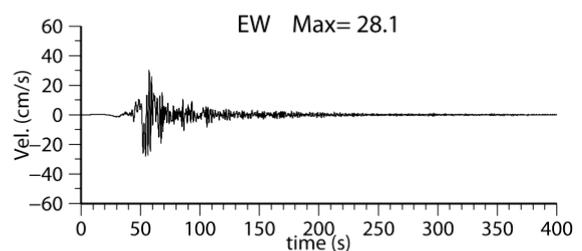
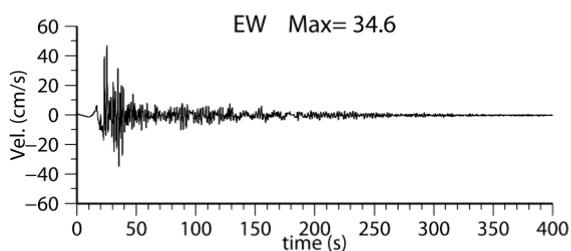
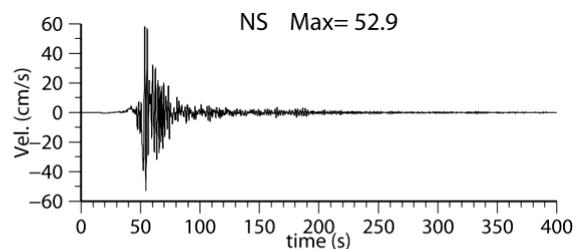
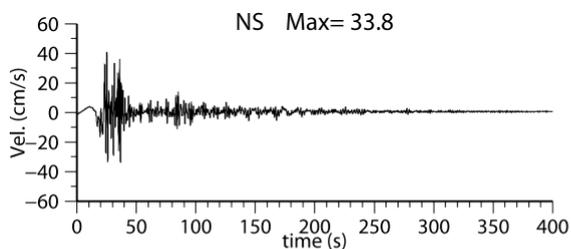
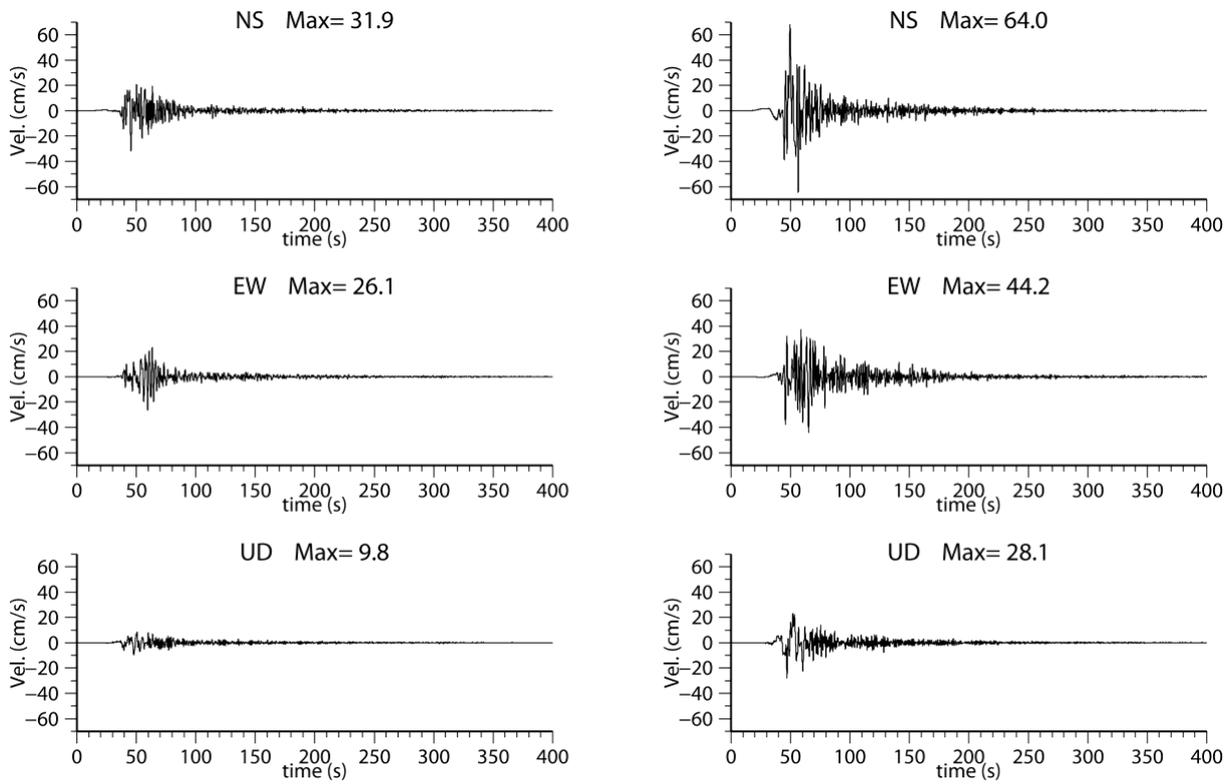


図 3-5-7 減衰定数 5%の相対速度応答スペクトルが平均値および平均値+標準偏差に最も近いケースの速度波形 (あきるの市)。

大正関東地震型



元禄関東地震型

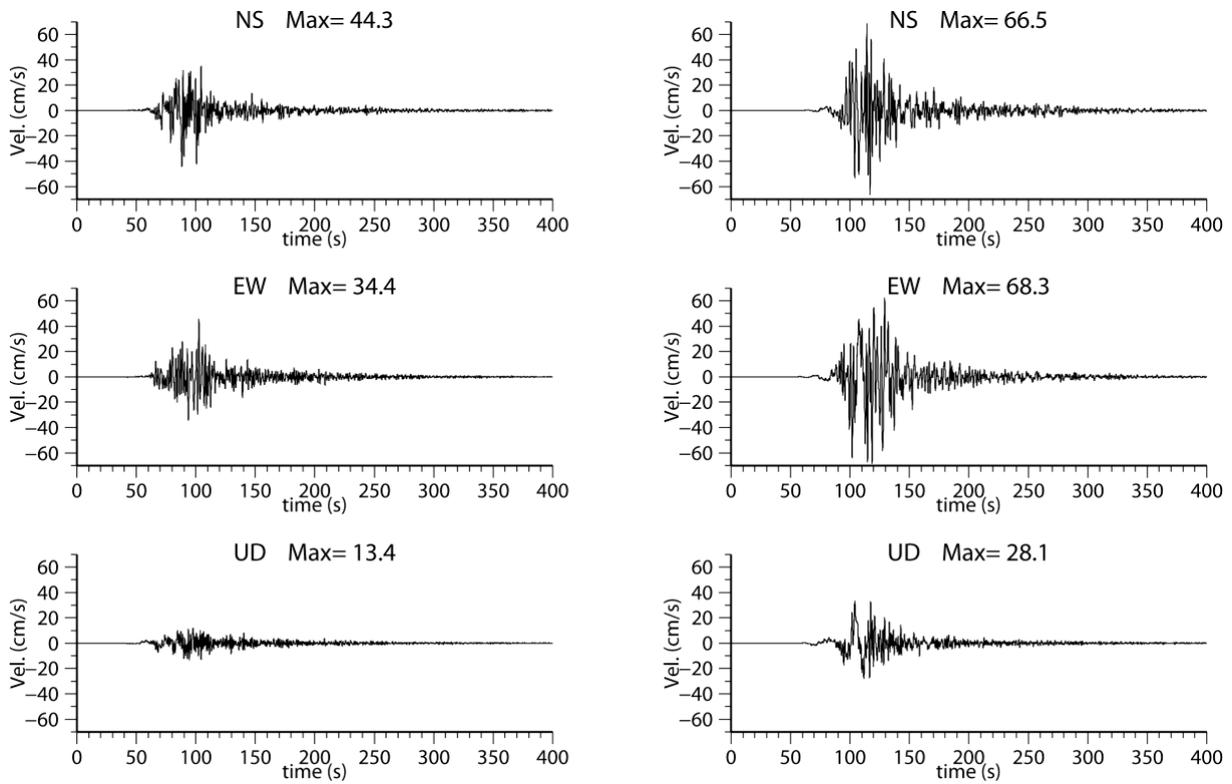
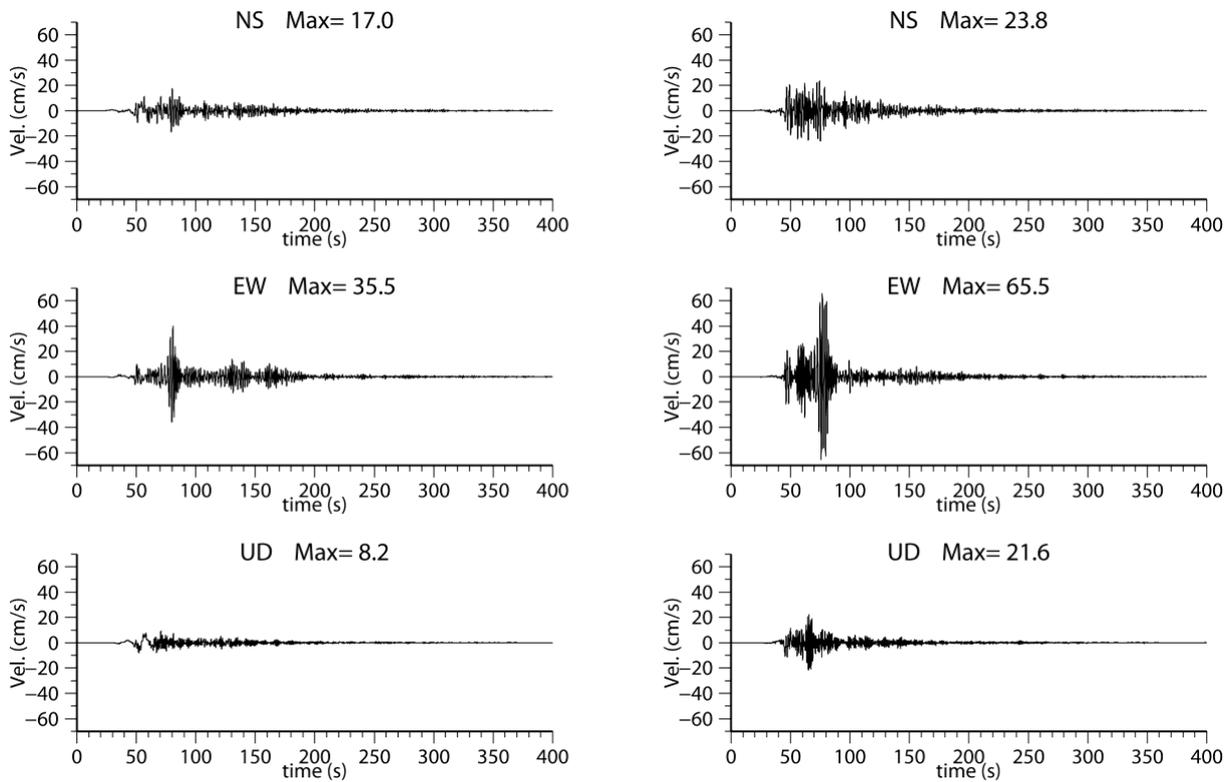


図 3-5-7 減衰定数 5%の相対速度応答スペクトルが平均値および平均値+標準偏差に最も近いケースの速度波形 (前橋市)。

大正関東地震型



元禄関東地震型

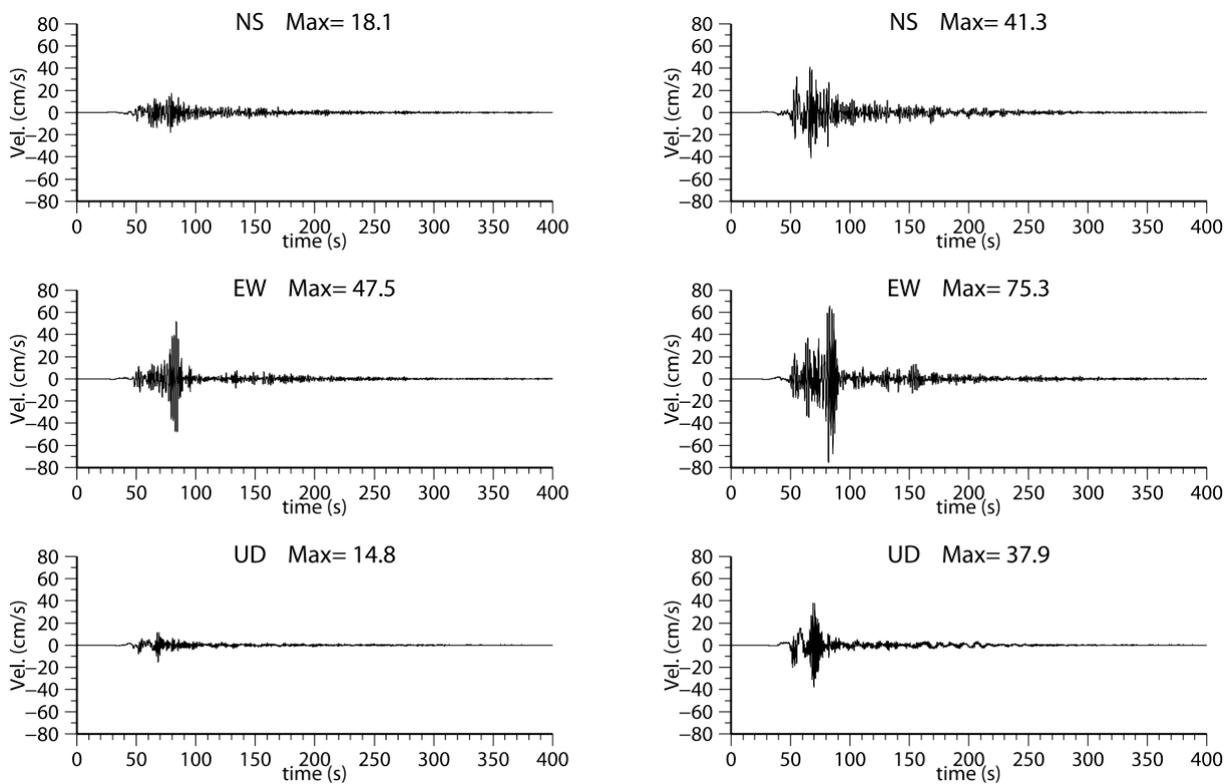
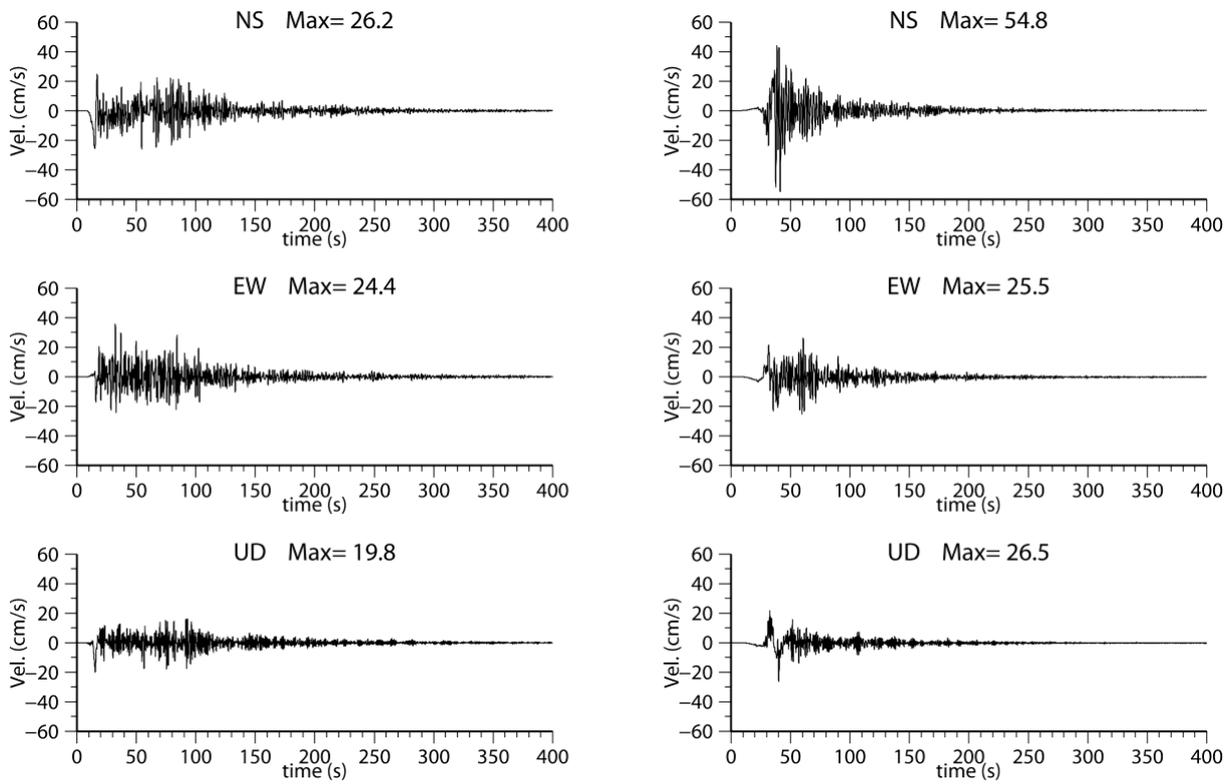


図 3-5-7 減衰定数 5%の相対速度応答スペクトルが平均値および平均値+標準偏差に最も近いケースの速度波形 (長野原市)。

大正関東地震型



元禄関東地震型

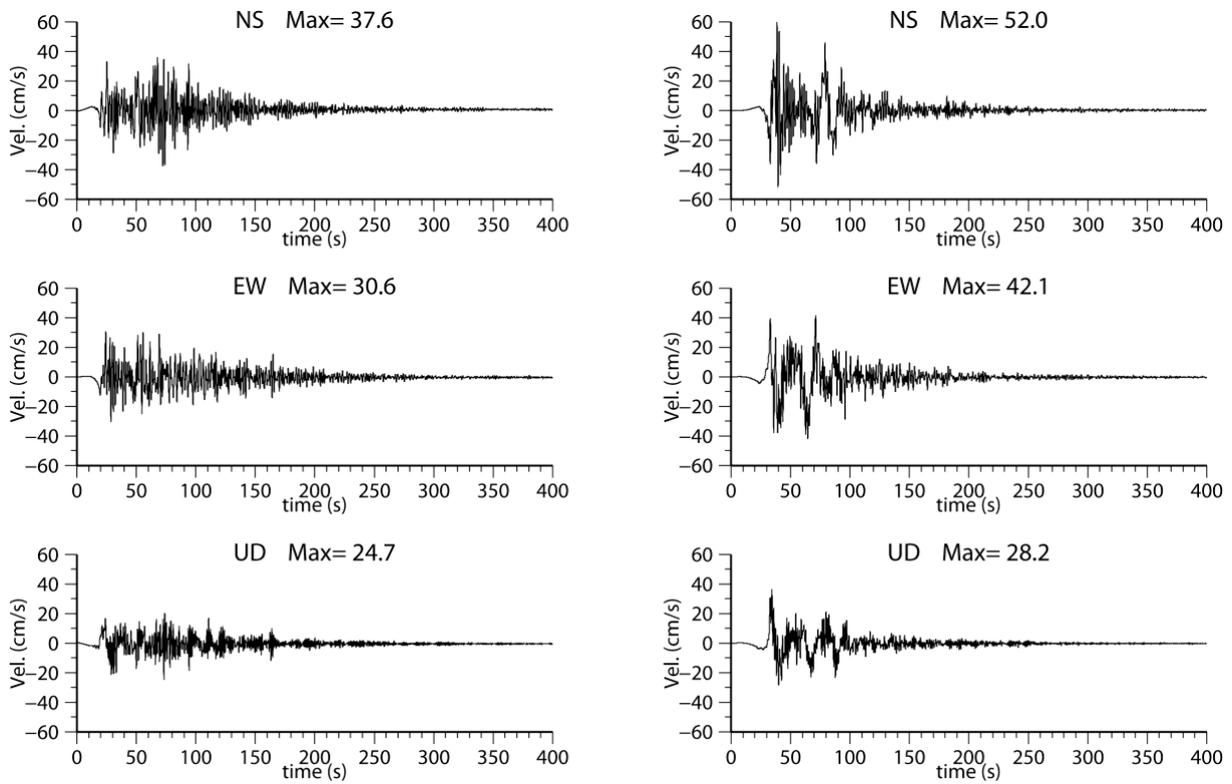
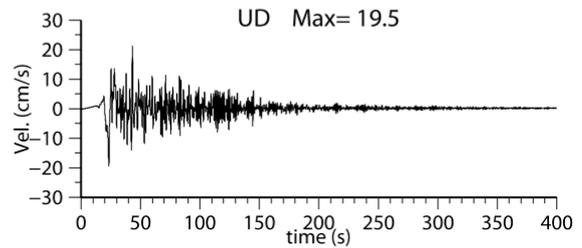
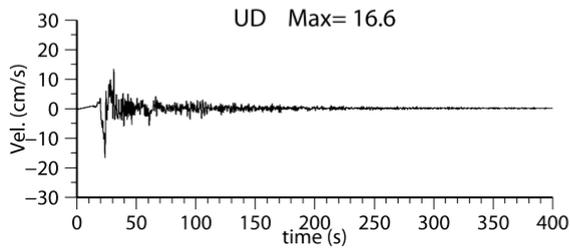
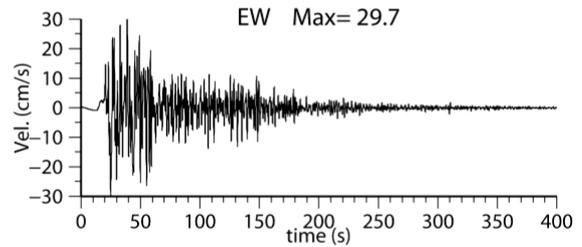
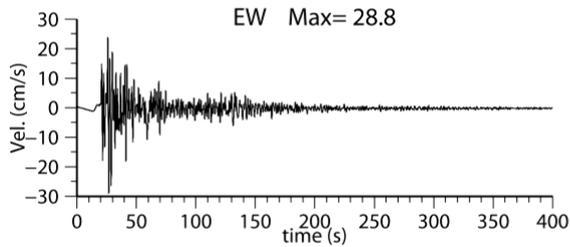
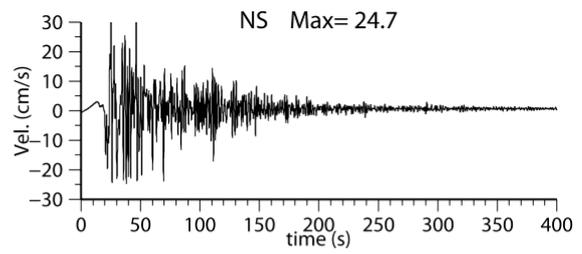
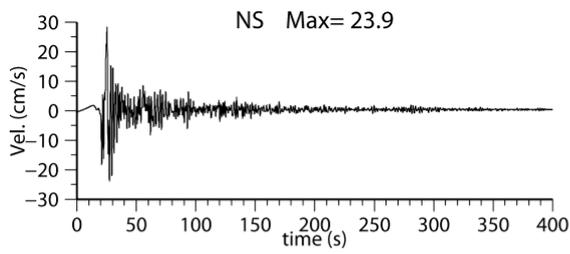


図 3-5-7 減衰定数 5%の相対速度応答スペクトルが平均値および平均値+標準偏差に最も近いケースの速度波形（富津市）。

大正関東地震型



元禄関東地震型

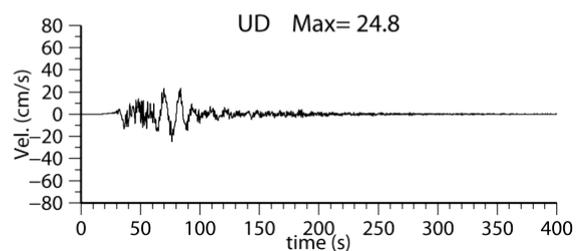
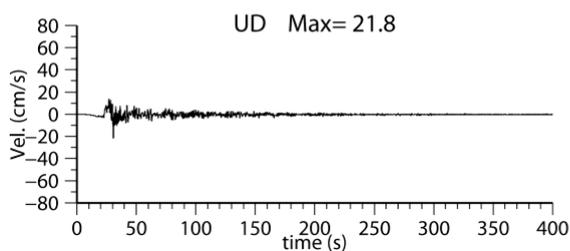
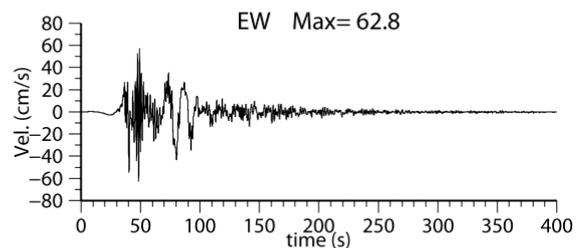
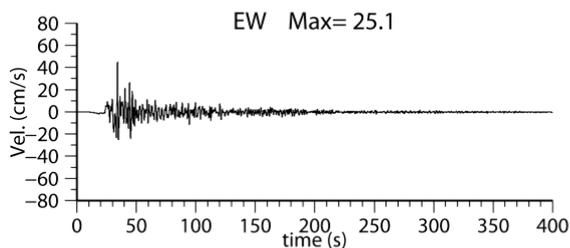
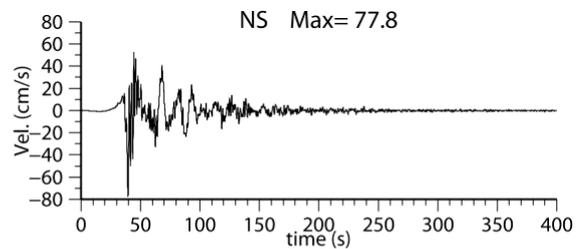
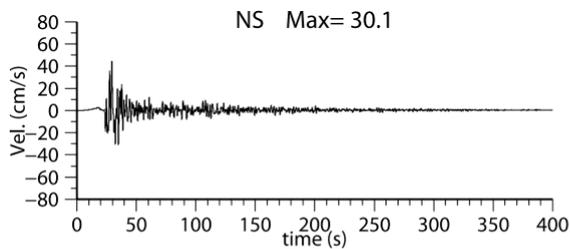
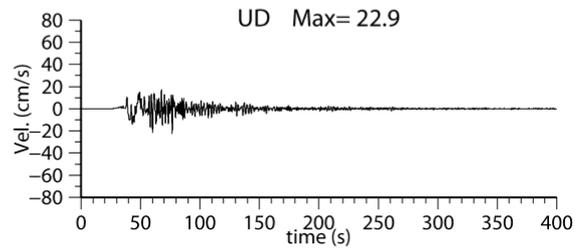
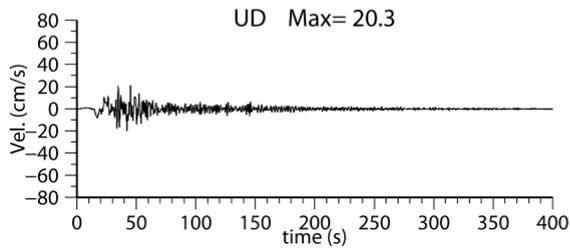
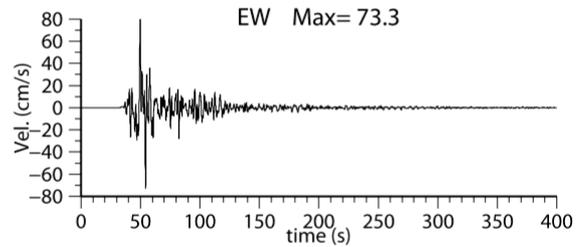
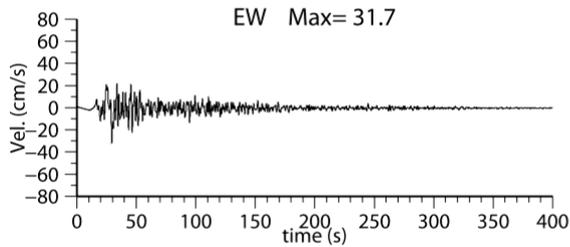
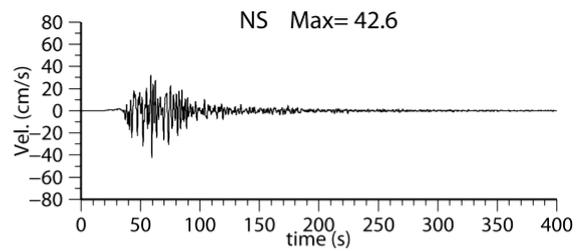
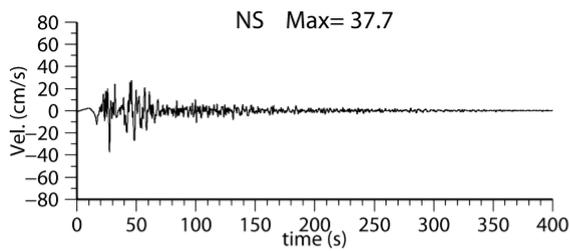


図 3-5-7 減衰定数 5%の相対速度応答スペクトルが平均値および平均値+標準偏差に最も近いケースの速度波形（逗子市）。

大正関東地震型



元禄関東地震型

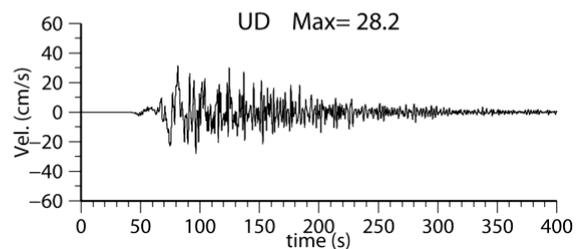
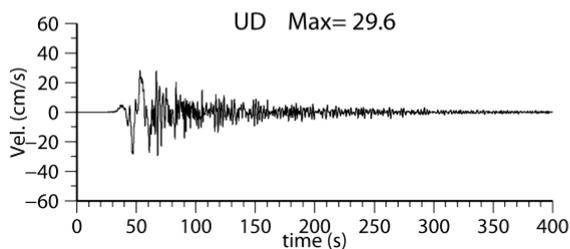
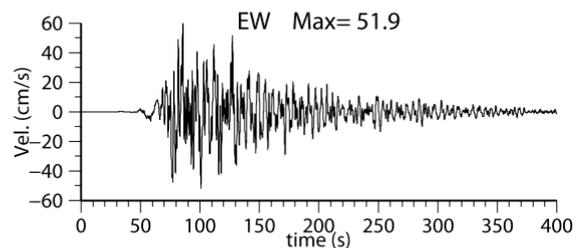
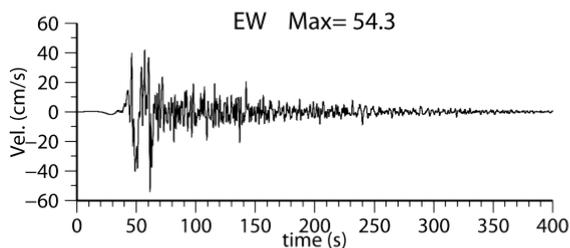
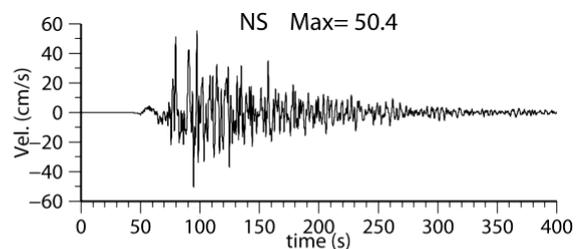
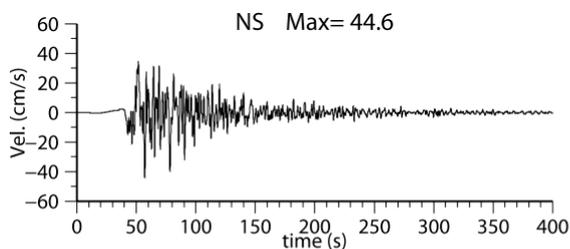


図 3-5-7 減衰定数 5%の相対速度応答スペクトルが平均値および平均値+標準偏差に最も近いケースの速度波形 (所沢市)。

4. むすび

相模トラフの地震に対する長周期地震動ハザードマップの公表へ向けて、平成 26 年度までの「長周期地震動予測地図作成等支援事業」および「長周期地震動ハザードマップ作成等支援事業」の検討内容を踏まえ、長周期地震動ハザードマップの作成のための検討を実施し、以下の成果が得られた。

- ・ 2003 年十勝沖地震を対象とした検討により、マグニチュード 8 クラスの地震の周期 2 秒以上を対象とした長周期地震動ハザード評価を可能とするすべり量、破壊伝播およびすべり角の適切な不均質性を付与することができた。
- ・ 関東地域を対象とした浅部・深部統合地盤モデルに基づく地下構造モデルを用いることにより、周期 2 秒以上の地震動の振幅が全国 1 次地下構造モデル（暫定版）よりも観測記録との合致度が良くなっていることが確認された。
- ・ 大正型関東地震および元禄型関東地震に相当する 4 つの震源域の地震を対象として、アスペリティおよび破壊開始点位置の不確実性を考慮し、かつ、震源過程の不均質性を付与した 400 以上の震源モデルを作成し、周期 2 秒以上を対象とした長周期地震動シミュレーションを実施し、震源域ごとに平均および平均+標準偏差の分布を地図上に示した長周期地震動ハザードマップを作成した。
- ・ 大阪平野周辺および濃尾平野周辺における最近の地震被害想定等で用いられている地盤モデルについて調査した。その結果、濃尾平野周辺の東海地域では関東地域の浅部・深部統合地盤モデルの作成と同様の方法によるモデル化が戦略的イノベーションプログラム（SIP）のもとで進められている一方で、大阪平野周辺では浅部と深部が別々のままの状況であった。
- ・ 個々のシナリオ（ケース）による被害にとどまらず、長周期地震動ハザード評価結果に基づいた地震動強さ（層間変形角）の頻度分布を考慮した被災度評価を試行した。より、多数のケースが考慮された長周期地震動ハザード評価結果そのものの直接的な活用につながることを期待される。
- ・ 平成 26 年度に実施した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について、告示スペクトル、国土交通省の「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策案」と比較した結果、東京都庁位置では、告示ごく稀のレベルを超過する確率が 25～45%、国土交通省の対策案に対しては周期 2～3 秒でレベルを超過する確率が 80%超と推定された。また、石油タンクの液面揺動の耐震基準と比較した結果、周期 10 秒で超過する確率は神奈川県庁で 10%、千葉県庁で 20%程度と推定された。
- ・ 平成 26 年度までの「長周期地震動予測地図作成等支援事業」、「長周期地震動ハザードマップ作成等支援事業」で得られた、長周期地震動に関する被害の事例等を説明するウェブページの試作版を作成した。

一方で、以下の課題が残されていることも明らかとなった。

- ・ 破壊伝播やすべり量分布の不均質性の付与の仕方について、マグニチュード 9 クラス

の地震まで適用可能であるかどうかの検証は不十分である。また、マグニチュード 8 クラスの地震に対しても、周期 1 秒までの検証が必要である。ただし、そのためには周期 1 秒まで適切に計算できる地下構造モデルも必要となる。

- 多数の震源モデルに基づいた長周期地震動ハザード評価を行ったが、考慮される全ての震源モデルが網羅されているわけではない。特に「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だけでなく、範囲外のばらつきについても検討する余地がある。
- 制震装置など、長周期地震動対策を行った超高層建物の応答評価を行い、対策の有効性を検証することも重要となる。一方で、建物そのものの被害だけでなく、天井や家具什器などの 2 次部材の被害の評価も必要である。
- 耐震基準等との比較に関して、本検討では平成 26 年度に実施した長周期地震動ハザード評価の結果を用いたが、本年度実施したハザード評価結果とも比較する必要がある。