平成 26 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 27 年 3 月

文部科学省研究開発局

独立行政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、独立行政法人防災科学技術研究所が実施した平成 26 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……5

３．事業の成果 ……6
3.1.　長周期を含む広帯域地震動ハザードの評価手法の検討等 ……6
3.2.　相模トラフの地震を対象とした地表面における広帯域地震動ハザード評価の検討等 ……36
3.3.　南海トラフの地震を対象とした地表面における広帯域地震動の基礎調査等……62
3.4.　長周期地震動ハザード評価結果等の提示方法の検討等 ……69

４．むすび ……116

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。

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ため、複数の広帯域地震動シミュレーション手法について検討し、長周期を含む広帯域地震動ハザード評価のための地震動計算手法を提示する。提示した手法に基づいて、相模トラフの地震を対象として、不確定性を考慮した多数の震源モデルにと首都圏の浅部・深部統合地盤モデルを用いた広帯域地震動シミュレーションを実施しハザード評価を試みるととみに、南海トラフの地震を対象とした広帯域地震動評価に必要となる地下構造モデルに関する情報を収集する。また、長周期地震動ハザード評価結果や評価に用いたデータを公開するための手段を提示するとともに、ハザード評価結果等が広く社会で活用され防災に資するための長周期地震動により生じ得る被害、対策等を提示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」試作版の作成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検討を実施する。

長周期を含む広帯域地震動ハザード評価に必要となる地震活動、震源、地下構造のモデル化および地震動計算手法に関する現状整理し、課題を抽出する。複数の計算手法による広帯域地震動計算結果と観測データ等との比較により、広帯域地震動ハザード評価のための地震動計算手法を提示する。そのため、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広帯域地震動計算を実施する上での課題を整理するとともに、既往の広帯域地震動計算手法を調査する。調査結果を踏まえて、複数の手法で観測機録画得られている地震を対象とした地震動シミュレーションを行い、観測記録との比較により広帯域地震動ハザード評価に適した地震動計算手法を提示する。また、ハザード評価で必要となる、様々な震源モデルによる広帯域地震動シミュレーションを実施することを可能にするためのスーパーコンピューターの利用について検討する。

（2）相模トラフの地震を対象とした地表面における広帯域地震動ハザード評価の検討等

相模トラフでの地震を対象として首都圏の広帯域地震動計算を行い、結果をハザード評価として取りまとめる案提示する。そのため、平成25年度までに実施されている相模トラフで発生するマグニチュー8クラス以上の地震等を対象として、震源パラメータの不確定性を考慮した多数の震源モデルを作成し、防災科学技術研究所で別途作成中である浅部・深部統合地盤モデルを用いて、（1）の検討結果を踏まえた広帯域地震動シミュレーションにより地震波形を計算するとともに、地震調査研究推進本部による長期評価等を参照して地震の発生頻度を考慮してハザードカーブとして示すことなどにより、広帯域地震動ハザード評価結果案として提示する。

（3）南海トラフの地震を対象とした地表面における広帯域地震の基礎調査等

大阪平野および濃尾平野の地下構造モデルの現状について整理し、南海トラフの地震を対象とした地表面における広帯域地震動評価を実施するにあたっての課題と解決に向けた方策を提示する。そのため、大阪平野および濃尾平野の地下構造モデルに関する情報を収集・整理し、モデル化に用いられているデータや手法について、首都圏の浅部・深部統合地盤モデルと比較する。

（4）長周期地震動ハザード評価結果等の提示方法の検討等

①長周期地震動ハザード情報の提示方法の検討

長周期地震動ハザードの評価結果および評価に用いた地震活動モデル、震源モデル、地下構造モデルについて、インターネットを通して国民に広く公開する手段を提示する。そのため、過去に実施した長周期地震動ハザード評価結果や（2）の広帯域地震動ハザード評価結

果について、評価のために作成したモデルも含めてインターネットを通して閲覧したり、ダウンロードできるシステムの案を提示する。

②長周期地震動による被害や対策の提示方法の検討

（2）の広帯域地震動シミュレーション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を提示する。さらに、現状の長大構造物における耐震基準や規格について、法律等も含めて調査し、長周期地震動の性質や過去の被害事例とともに広く周知するための方策を提示する。

２．事業の実施体制

所属機関	役職	氏名	担当課題
独立行政法人　防災科学技術研究所	研究領域長	藤原　広行	3.1～3.4
独立行政法人　防災科学技術研究所	主任研究員	森川　信之	3.1～3.4
独立行政法人　防災科学技術研究所	データセンター長	青井　真	3.1, 3.2
独立行政法人　防災科学技術研究所	主任研究員	河合　伸一	3.4
独立行政法人　防災科学技術研究所	主任研究員	前田　宜浩	3.1～3.4
独立行政法人　防災科学技術研究所	契約研究員	岩城　麻子	3.1, 3.2, 3.4
独立行政法人　防災科学技術研究所	契約研究員	東　宏樹	3.4

３．事業の成果

3.1.　長周期を含む広帯域地震動ハザードの評価手法の検討等

(1) 事業の内容

(a)　事業の題目

長周期を含む広帯域の地震動ハザードの評価手法の検討等

(b)　担当者

所属機関	役職	氏名
独立行政法人　防災科学技術研究所	研究領域長	藤原　広行
独立行政法人　防災科学技術研究所	主任研究員	森川　信之
独立行政法人　防災科学技術研究所	データセンター長	青井　真
独立行政法人　防災科学技術研究所	主任研究員	前田　宜浩
独立行政法人　防災科学技術研究所	契約研究員	岩城　麻子

(c)　事業の目的

長周期を含む広帯域地震動ハザード評価に必要となる地震活動、震源、地下構造のモデル化および地震動計算手法に関する現状を整理し、課題を抽出する。複数の計算手法による広帯域地震動計算結果と観測データ等との比較により、広帯域地震動ハザード評価のための地震動計算手法を提示する。

(2) 事業の成果

(a)　事業の要約

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広帯域地震動計算を実施する上での課題を整理するとともに、既往の広帯域地震動計算手法を調査した。調査結果を踏まえて複数の手法で地震動シミュレーションを行い、広帯域地震動ハザード評価に適した地震動計算手法を提示した。また、ハザード評価で必要となる、様々な震源モデルによる広帯域地震動シミュレーションを実施することを可能とするためのスーパーコンピューターの利用に関して検討した。

(b)　事業の成果

1)　長周期を含む広帯域地震動の評価手法の課題

現行の周期 3 秒程度以上を対象とした長周期地震動の計算手法（三次元差分法）に基づく、周期 1 秒程度までの広帯域地震動の計算手法として、

①　三次元差分法計算の短周期側への拡張

②　ハイブリッド法（三次元差分法＋統計的グリーン関数法）

③　岩城・藤原（2013）の方法

が挙げられる。ここでは、マグニチュード 8 クラス以上の海溝型巨大地震を対象とした広帯域地震動計算手法の課題について整理する。

（1） 震源モデル

現状の「レシピ」に基づいた特性化震源モデルは、マグニチュード 8 クラスの海溝型巨大地震に対しては、数 10km 四方の大きなアスペリティ（あるいは強震動生成域）が設定され、一定速度で伝播する同心円状の破壊が仮定されている。一方、これまで公表されている「長周期地震動予測地図」の試作版（地震調査委員会、2009、2012）では、想定東海地震を除いて過去の地震の記録に基づいて震源インバージョン解析から推定されている「前イベントモデル」が用いられている。渡辺・他（2008a）は、震源インバージョン解析から推定された震源モデルに基づいて特性化震源モデルに単純化した場合に、三次元差分法をはじめとした理論的手法による地震動評価において、2003 年十勝沖地震を対象とした検討から周期数秒～10 秒の地震動が過小評価となることを指摘しており、その中でも一定速度で伝播する同心円状の破壊の導入によるその影響が大きいことを示している(図 3.1-1)。

また、2003 年十勝沖地震を対象とした強震動予測手法の検証（地震調査委員会強震動評価部会、2004）ではハイブリッド法による広帯域地震動計算が実施されているが、長周期側の地震動計算結果と観測記録との比較に基づいて、接続周期が 5 秒となっている。

（2） 地下構造モデル

「全国地震動予測地図」では、全国の主要活断層帯を対象とした詳細法による「震源断層を特定した地震動予測地図」が作成されており、周期 1 秒程度の地震動を対象としてチューニングされた深部地盤モデルが用いられている。しかしながら、周期 1 秒程度の地震動が浅部地盤と深部地盤の両方に影響されるため、浅部地盤と深部地盤を個別にモデル化し、それぞれを用いて地震動計算を行うと周期 1 秒前後の地震動の精度が確保されない可能性がある。従って、広帯域地震動計算を行うためには、両者を統合した地盤モデルが必要である。周期 1 秒程度以上の周期を対象とする場合、必ずしも地表までの微細な地下構造モデルは必要ではないものの、Vs=400m/s 程度の工学的基盤までのモデルは必要となる。

また、海溝型地震を対象とする場合、震源域となる海域も含めた地下構造モデルが必要となる。「長周期地震動予測地図」2012 年試作版とあわせて公表されている「全国 1 次地下構造モデル（暫定版）」は海域も含めてチューニングされたモデルとなっているが、対象周期は 2 秒以上となっている。従って、上述の全国地震動予測地図で用いられている地下構造モデルと同様、別途作成されている浅部地盤との統合が必要となる。

（3） 計算手法

三次元差分法を短周期成分まで拡張するためには、地下構造モデルが必要となるとともに、計算機資源を必要とする。浅部と深部を統合した地盤モデルの構築に関する検討および計算機性能の飛躍的な向上が進みつつあるものの、現状では、マグニチュード 8 クラスの地震を対象として比較的広範囲の地震動計算を行えるのは、周期 1 秒程度までである。

ハイブリッド法は、全国地震動予測地図（震源断層を特定した地震動予測地図）をはじめとして、広帯域地震動評価に多くの実績がある。このとき、長周期地震動と短周期地震動が完全に独立に計算され、時間領域で両波形が合成されるが、短周期地震動の計算に用

いられている統計的グリーン関数法では、要素断層と評価地点の伝播距離を直線で近似することが多く、その場合、走時が差分法と一致しない。両者を合成する際、防災科研で現在用いている手法では、最初に破壊するアスペリティについて最大振幅が概ね一致する位置を探索し、その位置で合成するようにしている。この場合、震源モデルとしては長周期地震動と短周期地震動が同時に放出するにもかかわらず、波形の後の部分になるにつれて長周期側と短周期側で走時がずれた波形となる場合が生じる（図 3.1-2）。このことは、断層全体の破壊時間が数分に及ぶ巨大地震で特に顕著となる。

最近新たに提案された、岩城・藤原（2013）の方法は、長周期地震動の計算波形より、経験的に求めたエンベロープ形状等を用いて短周期地震動を合成するものであり、独立に計算した二種類の波形を合成する必要がない点において、上述のハイブリッド合成法の問題点を克服できるものである。ただし、マグニチュード 8 クラス以上の地震への適用性の検証が不十分である。また、観測記録が得られていない地点への適用法が確立されていないため、面的な評価を行うのは現時点では困難である。

なお、地震動ハザード評価においては地震活動のモデル化も必要となる。長周期地震動を対象とする場合は、比較的発生頻度が低くても規模の大きな地震の影響が大きいため、マグニチュード 8 クラス以上の地震が主対象となるが、広帯域地震動の場合は、より発生頻度が高いマグニチュード 7 クラスの地震、あるいはそれよりも小さい規模の地震まで対象とすることが必要となる。

2) 長周期地震動計算の広帯域化に向けた検討

（1）不均質震源モデルに関する検討

本検討で用いる特性化震源モデルのように震源パラメータがアスペリティサイズ以下の不均質性を持たないモデルでは、アスペリティサイズと破壊伝播特性に規定される卓越周期よりも短周期側の地震動が適切量生成されず、特に巨大地震の場合には工学的に重要な周期帯の地震動が過小評価される可能性があることが指摘されている（例えば関口・吉見、2006）。さらに、アスペリティ位置によって地震動が局所的に大きく変動することや、プレートの運動方向や破壊伝播速度を一定と仮定しているために波の重ね合わせの効果が強く出ることなどから、震源パラメータの設定に強く依存した地震動が生成される震源モデルとなっている。したがって、震源パラメータにアスペリティサイズ以下の不均質を付与することは、地震学的に妥当であるだけでなく、周期 1 秒程度以上の長周期地震動ハザード評価においても重要であると考えられる。

（A）均質破壊モデル

不均質性を付与する対象となる均質破壊モデル（特性化震源モデル）については、平成 25 年度の「長周期地震動ハザードマップ作成等支援事業」において作成した震源モデルを用いることとする。これらの震源モデルの震源パラメータの設定は次のように行っている。

○巨視的震源パラメータ

相模トラフで発生する M8 クラスの地震に関して、長期評価では「最大クラス」の地震の震源域が示されている。南海トラフの地震における領域区分や 1923 年大正関東地震の震源域、平成 24 年度の「長周期地震動予測地図作成等支援事業」の検討を参考に、

・フィリピン海プレート上面の深さ方向について「浅部」、「中部」、「深部」に分割する。このとき、プレート上面深さ 10km および 30km をそれぞれの境界とする。
・「浅部」と「中部」について、大正関東地震の震源域の東端を境界として東西に分割する。
・「浅部」、「深部」はそれぞれ単独では活動せず、常に「中部」と同時に活動する。

を仮定して「最大クラス」の地震の震源域を区分した。これにより、図 3.1-3 に示す No.1～No.8 の震源域が設定される。ここで、大正関東地震の震源域については、首都直下地震モデル検討会（2013）に基づいている。各領域を震源とする地震の規模については、震源域全体の平均応力降下量を海溝型プレート間地震の平均的な値である 3MPa（例えば、Kanamori and Anderson, 1975; Allmann and Shearer, 2009）と仮定して、震源域の面積より算出した（表 3.1-1）。

○微視的震源パラメータ

各地震の微視的震源パラメータは、以下の条件を考慮して設定した。

・アスペリティ（あるいは強震動生成域）は、各領域区分内に 2 個程度配置し、面積と平均すべり量は、各領域の面積と平均すべり量のそれぞれ 20%と 2.2 倍（Murotani, et al. 2008）とする。
・震源時間関数は、中村・宮武（2000）によるすべり速度時間関数を基本ケースとする。
・fmax は、「レシピ」における 13.5Hz を基本ケースとする。

このとき、浅部領域のすべりの大きな領域については、震源域が西側のみ（No.3）または東側のみ（No.4）の場合には設定せず、浅部全体の 20%の大きさで 1 個のみ配置する。

以上により設定される震源モデルをここでは「基本ケース」と呼ぶことにする。アスペリティおよび破壊開始点位置を図 3.1-4 に示す。基本ケースの組み合わせは、表 3.1-2 に示す 156 ケースとなっている。

○その他の震源パラメータ

その他の震源パラメータについては、以下の条件で設定した。

・破壊伝播速度は、「レシピ」にしたがい震源域の S 波速度の 72%（2.7km/s ; Geller, 1976）とする。
・破壊伝播の様式は破壊開始点から同心円状とするが、各アスペリティに到達後、アスペリティ内の破壊はその到達点から同心円状とする（マルチハイポセンター）。

上記の基本ケース（計 156 ケース；表 3.1-2）に対して、浅部の大すべり域を含む震源域（No.6 および No.8）のうち、特に計算波形の最大振幅に大きく影響を及ぼす「s1」のケースについて、浅い部分における破壊過程の不確実性を考慮した以下の震源モデルを追加している。

① 浅部西側に大すべり域を配置したケース（s1）について、浅部の大すべり域のすべり速度時間関数を中村・宮武（2000）から smoothed ramp に変更。

② 浅部西側に大すべり域を配置したケース（s1）について、破壊伝播速度を 2.7km/s から 2.3km/s に変更。

また、アスペリティの大きさに関する不確実性を考慮して、発生頻度が比較的高いと考えられる大正関東地震に相当する震源域（領域 No.1、No.3）に対して、以下のアスペリティ配置を追加している（表 3.1-5）。

③ アスペリティ数を 4 個としたもの（総面積は変わらず）

④ アスペリティ面積を 1/2 としたもの（「レシピ」に従って実効応力等のパラメータを再設定）

さらに、No.1～No.8 で対応しない元禄関東地震の震源域について、首都直下地震モデル検討会（2013）のモデルを参照して設定した（図 3.1-6 の No.10）。あわせて、元禄地震では破壊したが大正地震では破壊していない（「元禄地震－大正地震」）とされる房総半島南東沖の地震の震源域も設定した（図 3.1-6 の No.9）。このとき、巨視的震源パラメータは、震源断層全体の平均応力降下量を 3.0MPa と仮定して設定したが、アスペリティの数、位置および大きさは首都直下地震モデル検討会（2013）の強震断層モデルにおける強震動生成域に基づいて設定した。ただし、実効応力等のパラメータの値については、「レシピ」に従って設定しており、首都直下地震モデル検討会（2013）によるパラメータとは異なる。以上の追加モデルは 118 ケースである（表 3.1-2）。それぞれの震源パラメータを表 3.1-1 に示す。

（B）破壊伝播速度不均質モデル

地震動予測における震源モデルを構成するパラメータのうち、破壊伝播速度の複雑さが地震動計算結果に与える影響が特に大きいことが指摘されている（例えば、渡辺・他, 2008）。平成 24 年度の検討では大正関東地震に相当するサイズの数ケースのシナリオに対して破壊伝播速度の不均質性の影響を試算し、破壊の進行方向では地震動最大速度が不均質性を付与していない震源モデルと比べて最大で 1/2～1/5 程度小さくなる傾向が見られ、局所的に波の重ね合わせの効果を低減させることを示した。

関口・吉見（2006）で提案された手法にしたがい、以下のように一様破壊伝播速度（V_R = 2700 m/s）にマルチスケール不均質を載せる。ここではスケールの番号を添え字 i で表す。まず、一番大きいスケール（i =1）では、最小アスペリティより一回り小さな面積を持つ半径 r_i の円形のパッチをランダムな位置に m_i 個配置し、各パッチの内部の破壊伝播速度に±300 m/s 以下の一定の揺らぎをランダムに与える。このとき、パッチの個数 m_i 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。続

いて、2 番目以降のスケールでは、i 番目のスケールのパッチの半径 r_i を i -1 番目のスケールの 1/a 倍（a =1.5）とし、パッチ面積に対して同様に個数 m_i を決める。この作業を i =1,…,7 まで繰り返してマルチスケール不均質を導入した破壊伝播速度分布に基づいて破壊時刻分布を求めた。均質モデルおよび不均質モデルの破壊時刻分布の例を図 3.1-7 に示す。

（C）すべり量分布不均質モデル

すべり量分布についても同様に関口・吉見（2006）にしたがい不均質を付与し、その影響を調べる。すべり量分布に与える不均質は、破壊伝播速度の不均質と比べて地震動に与える影響が小さいと指摘されている（渡辺・他，2008; 宮武・他，2008）。すべり量分布不均質モデルを作成する際には、破壊伝播速度不均質モデルと同じパッチサイズと個数を用いたが、パッチの位置は新たに異なる乱数を用いて設定した。Schmedes et al. (2010) では多数の動的破壊シミュレーション結果から、局所的なすべり量と破壊伝播速度には相関が見られないとしている。すべり量分布への不均質性の付与においては、あらかじめ断層面全体の平均すべり量 D_{ave} を求めておき、各スケールでパッチ内のすべり量に $\pm p_k * D_{ave}$ だけの揺らぎを与える。すべり量の揺らぎの大きさを決める係数 p_k は、パッチの半径に比例させて $p_k=0.5/(a^{k-1})$ とする（a =1.5）。不均質を与えた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。さらに、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 $k^{-1.75}$ で落ちるようにすべり量を調整している。本検討でも、均質モデルと比べて不均質モデルのすべり量分布波数スペクトルが $k^{-1.75}$ の形状により近いことを確認しているが、さらなるすべり量の調整は行わなかった。No.1 の震源域に対して、10 個の異なる乱数を用いて作成したすべり量不均質モデルのすべり量分布の例を図 3.1-8 に、すべり量分布波数スペクトルの例を図 3.1-9 に示す。

（D）破壊伝播速度不均質とすべり量不均質の影響

関口・吉見（2006）に準じて破壊伝播速度とすべり量に不均質性を付与した震源モデルを用いて 3 次元差分法により長周期地震動を計算した。地下構造モデルは昨年度までの検討と同様に全国 1 次地下構造モデルを用いているが、周期 1 秒までの計算を目標としていることから、格子間隔と時間刻みを昨年度よりも小さく設定している（表 3.1-3）。

No.1 の震源域、パターン 1 のアスペリティ配置について破壊開始点の異なる 2 つのケースについて、均質モデルに対する不均質モデルの PGV 比の分布を図 3.1-10 に示す。不均質モデルについては 1 ケースのみの計算であるが、破壊伝播速度不均質性の影響の方が支配的であることが示唆される。以下では、破壊伝播速度不均質モデルを用いて、不均質性の影響を見積もるとともに、他の震源パラメータとの関係を考察することとする。

まず、東京都庁における計算結果を例として、震源モデルに不均質性を導入した影響

について検討する。速度波形を図 3.1-11 に、フーリエスペクトルを図 3.1-12 に示す。速度波形については、形状や最大振幅値に違いが見られるが、系統的なものとはいえない。一方で、フーリエスペクトルについては、0.5Hz 以上で不均質モデルの振幅レベルが高い傾向が見られる。

他の県庁地点の結果も用いて、全ケース（274 ケース）の不均質モデルと均質モデルのスペクトル比を重ね描いた結果を図 3.1-13 に示す。いずれの地点においても、高周波数側ほどスペクトル比のばらつきが大きくなっているが、赤線で示した平均としては不均質性を導入することで短周期側のスペクトル比が増大しているといえる。

平成 24 年度の検討では、破壊の進行方向において不均質性の影響により振幅の低減が認められた。そこで、全 274 ケースについての不均質モデルと均質モデルによる振幅（PGV、速度応答）の比を、破壊開始点とアスペリティ配置によってグループ分けし、それぞれの平均を求めた（図 3.1-14）。周期別にみると、周期 1 秒では不均質性を導入することで振幅レベルが増大する傾向が明らかである。周期 3 秒や 5 秒では、不均質性を導入することで振幅レベルが低減する領域が現れ、特に破壊開始点との関係を見ると（各図の最上段）、破壊の進行方向において振幅レベルが低減しているように見える。以上から、震源モデルに不均質性を導入することにより、短周期成分が励起される効果と、破壊伝播の指向性の影響を低減する効果が期待できると考えられる。

（２）浅部・深部統合地盤モデルに関する検討

本検討では、南関東地域を対象として現在作成中である浅部・深部統合地盤モデル［例えば、Senna et al.(2013)］を用いた地震動評価を行う。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、両方の地盤構造の影響を受ける周期帯（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（図 3.1-15）。したがって、浅部・深部統合地盤モデルを用いた計算結果について観測記録との詳細な比較はここでは行わない。

一方で、地震動計算において図 3.1-16 に示すような浅部地盤構造を考慮することの効果についての定性的な検討は可能だと考える。浅部地盤構造（Vs＝250m/s 層）を考慮した場合には、表層を Vs=500m/s とした場合にくらべ主に 0.5Hz 以上（周期 2 秒以下）において振幅レベルが高くなる傾向が見られ、周期 2 秒程度よりも短周期帯域までを対象とする計算では、Vs＝500m/s 未満の浅部地盤が適切に評価された地下構造モデルを用いることの重要性を示した。しかしながら、浅部・深部統合地盤モデルによる長時間の地震動シミュレーションの困難さについても指摘した。

（３） ハイブリッド法による計算

全国地震動予測地図（シナリオ地図）に用いられているハイブリッド合成法により広帯域地震動を計算し、差分法で計算した波形との比較を行った。対象ケースは大正関東地震に相当する No.1 および No.3 の震源域を持つ 24 ケースとした（アスペリティパターン 3

通り、破壊開始点 4 通り)。ハイブリッド合成法の接続周期は 2 秒とし、長周期帯側は全国１次地下構造モデルと不均質性を考慮しない震源モデルを用いて 3 次元差分法により計算した波形を用いた。短周期側の波形については、統計的グリーン関数法により次のように求めた。

対象ケースの震源モデルは２つのアスペリティ A1、A2 および背景領域からなる。ここではそれぞれを個別の地震とみなして統計的グリーン関数を作成し、破壊伝播の効果を考慮して足し合わせた。要素地震は各アスペリティについてはその中心点、背景領域については断層全体の重心に設定した。地下構造モデルは、先述の浅部・深部統合地盤モデルから得られる各計算ポイント直下の 1 次元地下構造を用いた。震源パラメータは差分法の計算に用いたものと同じもの（均質モデル）を用いた。ただし、差分法で用いた震源モデルは 0.5km 間隔の点震源からなるが、統計的グリーン関数法ではそれを集約し、要素断層の大きさを約 10km 四方とした。

ケース CS1_P1_h1（震源域：No.1、アスペリティ：パターン１、破壊開始点：h1）について、代表地点（東京、神奈川、千葉、埼玉の都県庁地点）におけるハイブリッド合成法による波形と差分法による波形の比較例を示す（図 3.1-17)。差分法による波形は、全国１次地下構造モデルを基本としたモデル（JIVSM）と、浅部・深部統合地盤モデル（SD）を用いて計算したものを示している。浅部・深部統合地盤モデルを用いた差分法の結果は、計算不安定（発散）の影響により 50 秒間程度までの結果しかない。差分法による波形には 0.05～1.0 Hz のバンドパスフィルタを施しており、ハイブリッド合成法による波形には同じバンドパスフィルタを掛けたものと掛けていないものの 2 種類を示している。また、フーリエスペクトルの比較における差分法の結果（JIVSM、SD）については、震源を「均質モデル（hm)」としたものに加えて、「破壊伝播速度不均質モデル（ht)」としたものについても示している。以下では、それぞれ JIVSM_hm、JIVSM_ht などと呼ぶこととする。

ハイブリッド合成法の結果は、接続周波数である 0.5Hz から 1 Hz にかけての周波数帯域では差分法 JIVSM_hm よりもスペクトル振幅が数倍程度大きい。また、この帯域では差分法 SD_hm の結果も、差分法 JIVSM_hm よりやや振幅が大きい。一方、前述したとおり、破壊伝播速度不均質性モデル（ht）では、0.5～1 Hz の周波数帯域で均質モデル（hm）よりも振幅が大きいことも確認できる。この帯域におけるハイブリッド合成法のスペクトル振幅レベルは、差分法 SD_ht モデルと最も近いといえる。

ハイブリッド合成法は、全国地震動予測地図（震源断層を特定した地震動予測地図）をはじめとして、広帯域地震動評価に多くの実績がある。一方、海溝型巨大地震に適用する際の課題もある。たとえば、本検討で用いた方法では、長周期と短周期の波形を重ね合わせる際、最初に破壊するアスペリティに対応する波群の最大振幅となるタイミングが両帯域で概ね一致するように波形を重ね合わせている。そのため、特に巨大地震では、統計的グリーン関数法と差分法で要素断層から評価地点までの走時のずれが波形の後ろの方で顕著に表れる可能性がある。図 3.1-17 の埼玉（SIT）で、ハイブリッド波形の高周波数成分が波形の最初の方に集中しているのはこの問題を反映していると考えられる。

3) スーパーコンピューターの利用に関する検討

防災科学技術研究所様が開発した地震動シミュレータ GMS を理化学研究所の「京」コンピュータにおいて利用するための検討を実施した。

長周期地震動計算の例題として大正型地震（領域 No.1、アスペリティ配置パターン P1、破壊開始点 h1、破壊伝播速度均一）のケースに対して、領域分割数を変えて「京」コンピュータで GMS による差分計算を行い、計算時間を計測した。なお、比較対象として東京工業大学の TSUBAME での同一ケースの GMS による差分計算の計算時間を参照した。計算時間は linux の time コマンドによる実時間（real）を参照することとした。計算に用いた格子数を表 3.1-4 に示す。

TSUBAME と「京」コンピュータとで領域分割数は 48 に揃えたが、TSUBAME では 16 ノード×3GPU/NODE=48GPU のフラット MPI 並列計算をしており、「京」コンピュータでは 48 ノード×8 スレッド/NODE のハイブリッド並列計算をしている。表 3.1-5 から領域分割数が同じでも x 方向分割数を大きくして y 方向分割数を小さくすると計算時間が大きくなっている。現時点においては、「京」コンピュータの方が計算時間がかかっており、GMS プログラムの「京」コンピュータ向けのチューニングがさらに必要である。

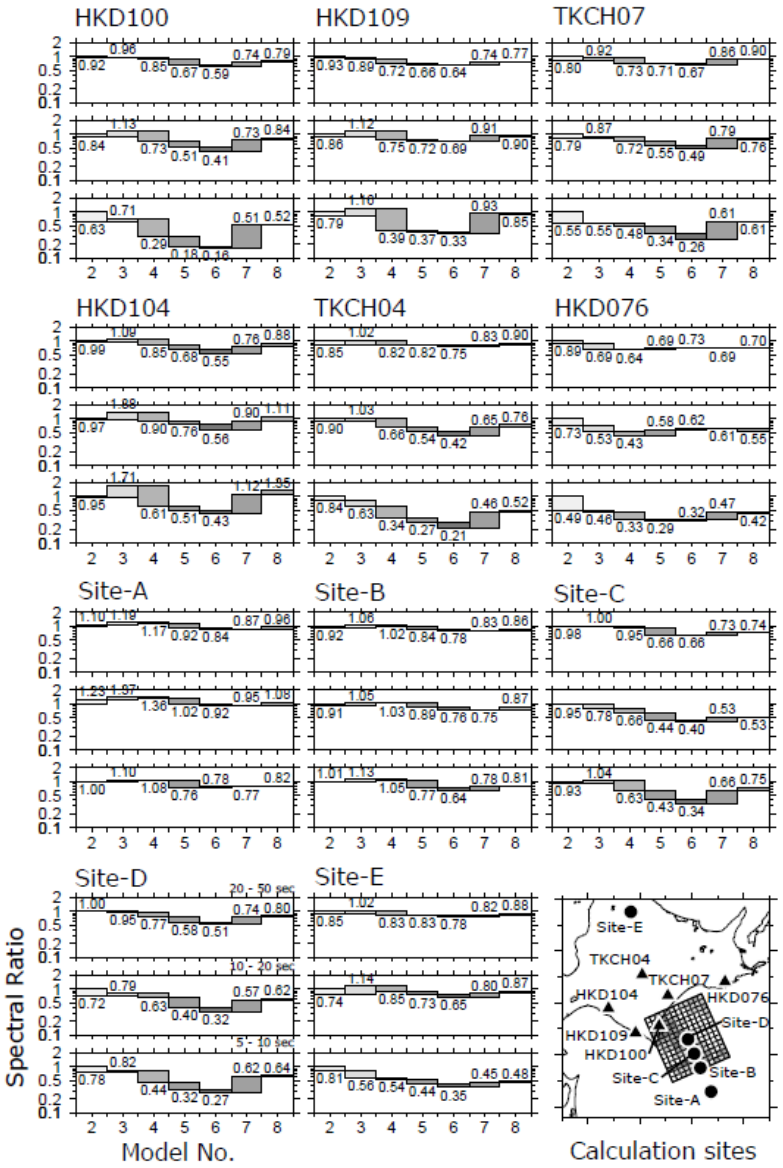


図 3.1-1　8 つの震源モデルと計算された減衰定数 5%の擬似速度応答スペクトルの比較(渡辺・他、2008a の表 2 および図 6 より引用)

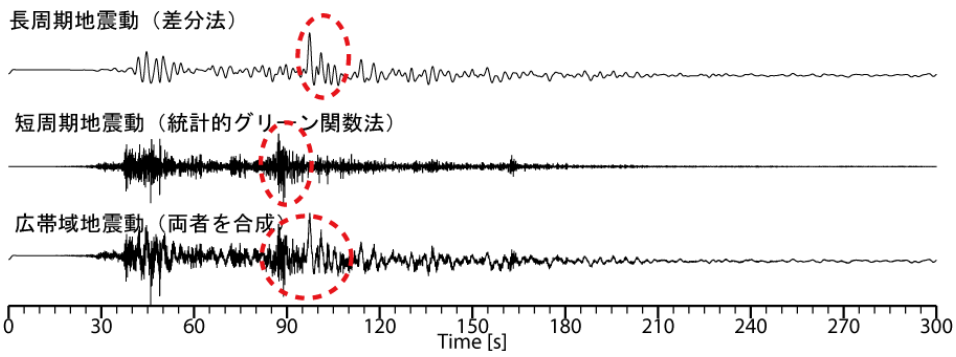


図 3.1-2　巨大地震を対象としたハイブリッド合成法の課題(長周期と短周期の位相ずれ)。

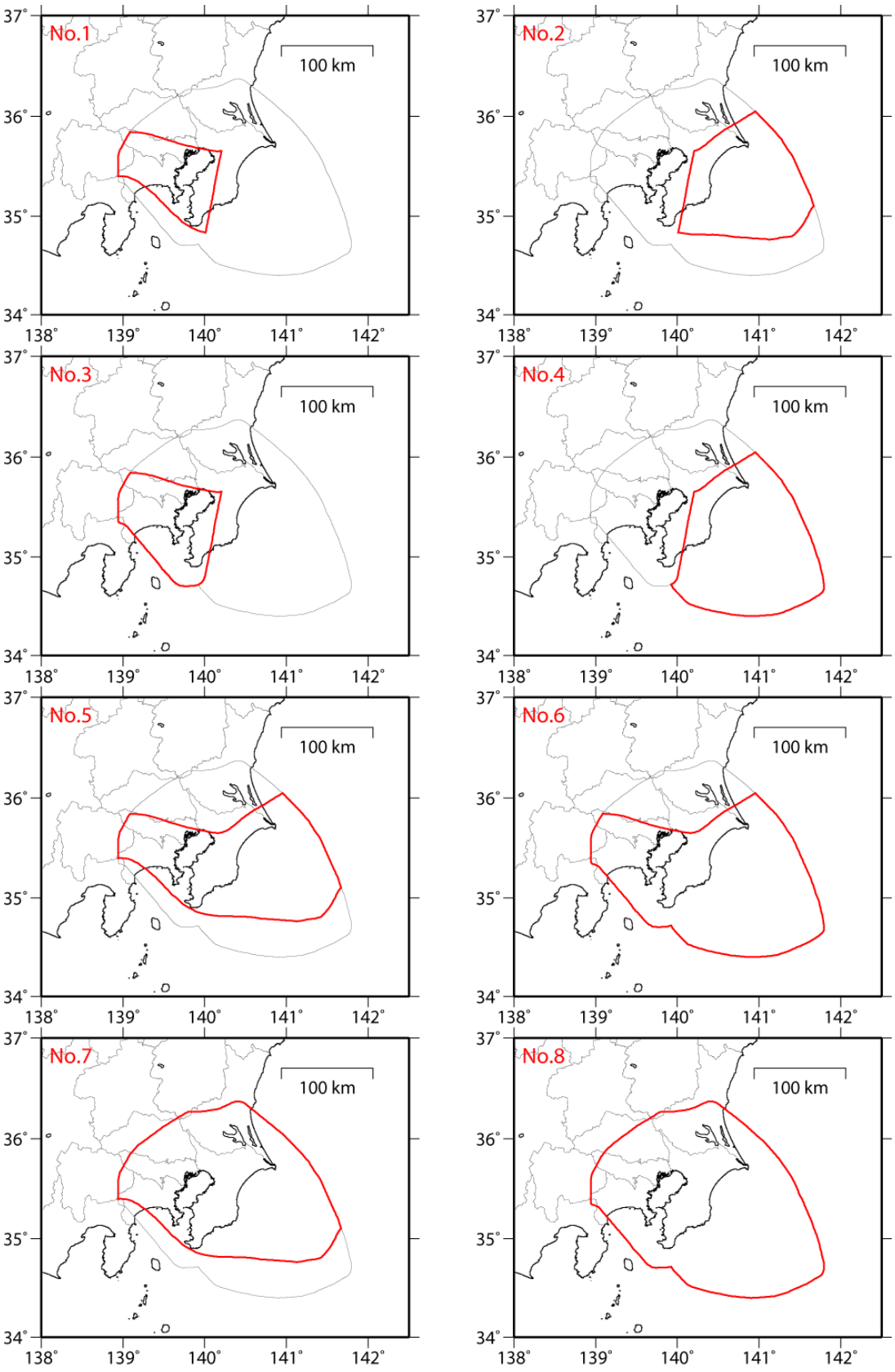


図 3.1-3　相模トラフのＭ８クラスの地震の震源域。

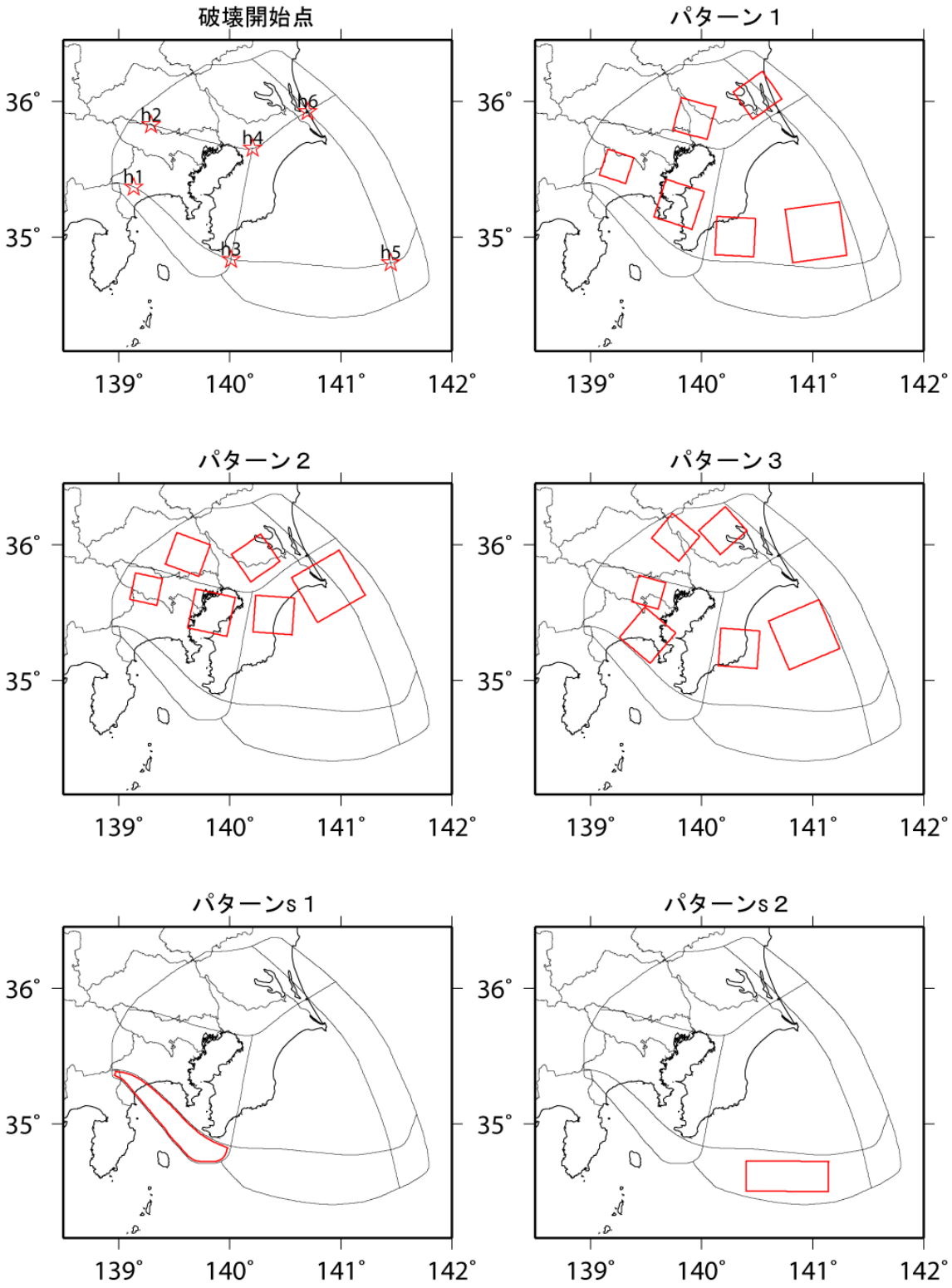


図 3.1-4　アスペリティ（強震動生成域：赤線で囲んだ領域）と破壊開始点（赤星印）の配置。

表 3.1-1　震源パラメーター一覧。

No		西	東	巨視的パラメータ			微視的パラメータ										面積比 (ΣSa/S)
				平均応力降下量 (MPa) 3.0 剛性率 (GPa) 40.4				m						d		s	背景領域	
								西				東						
								m1−1	m1−2	m1−3	m1−4	m2−1	m2−2	d−1	d−2	s1,s2		
1	d			面積 S (km²) M₀ (Nm) すべり量 (m) Mw	7950 8.7E+20 2.7 7.9	面積 Sa (km²) M₀ (Nm) すべり量 (m) 実効応力 (MPa)	1100 3.0E+20 6.7 14.8	510 9.5E+19 4.5 14.8								6340 4.8E+20 1.9 2.2	0.20
	m																	
	s																	
	パターン1, 2, 3																	
	パターン4						250 4.6.E+19 4.5 14.9	250 4.6.E+19 4.5 14.9	550 1.5.E+20 6.7 14.9	540 1.5.E+20 6.6 14.9						6350 4.9.E+20 1.9 1.6	0.20
	パターン5						550 1.5.E+20 6.7 29.7	250 4.6.E+19 4.5 29.7								7150 6.8.E+20 2.4 3.9	0.10
2	d				15260 2.3E+21 3.8 8.2						2020 7.5E+20 9.2 15.0	1030 2.7E+20 6.6 15.0				12210 1.3E+21 2.6 2.2	0.20
	m																	
	s																	
3	d				9990 1.2E+21 3.0 8.0		1100 3.3E+20 7.5 18.6	510 1.1E+20 5.1 18.6								8370 7.9E+20 4.2 1.2	0.16
	m																	
	s																	
	パターン1, 2, 3																	
	パターン4						250 5.2.E+19 5.1 18.7	250 5.1.E+19 5.0 18.7	550 1.7.E+20 7.5 18.7	540 1.6.E+20 7.4 18.7						8390 8.0.E+20 2.3 2.0	0.16
	パターン5						550 1.7.E+20 7.5 37.2	250 5.2.E+19 5.1 37.2								9180 1.0.E+21 2.7 4.5	0.08
4	d				21520 3.9E+21 4.5 8.3						2020 8.9E+20 10.9 21.2	1030 3.3E+20 7.8 21.2				18470 2.7E+21 3.6 3.0	0.14
	m																	
	s																	
5	d				23200 4.4E+21 4.6 8.4		1100 4.1E+20 9.2 14.9	510 1.3E+20 6.3 14.9			2020 1.0E+21 12.4 14.9	1030 3.7E+20 8.9 14.9				18540 2.4E+21 3.2 1.6	0.20
	m																	
	s																	
6	d				31500 6.9E+21 5.4 8.5		1100 4.6E+20 10.4 14.8	510 1.5E+20 7.1 14.8			2020 1.1E+21 14.0 14.8	1030 4.2E+20 10.1 14.8			1700 8.9E+20 12.9 14.8	25140 3.8E+21 3.8 1.4	0.20
	m																	
	s																	
7	d				31520 6.9E+21 5.4 8.5		1100 5.0E+20 11.3 14.9	510 1.6E+20 7.8 14.9			2020 1.3E+21 15.4 14.9	1030 4.6E+20 11.0 14.9	840 3.4E+20 9.9 14.9	860 3.5E+20 10.0 14.9		25150 3.8E+21 3.8 1.3	0.20
	m																	
	s																	
8	d				39810 9.8E+21 6.1 8.6		1100 5.4E+20 12.3 14.8	510 1.7E+20 8.4 14.8			2020 1.4E+21 16.6 14.8	1030 5.0E+20 11.9 14.8	840 3.7E+20 10.7 14.8	860 3.8E+20 10.8 14.8	1700 1.1E+21 15.3 14.8	31740 5.4E+21 4.2 1.2	0.20
	m																	
	s																	
9	d				7860 8.6E+20 2.7 7.9						1060 2.8E+20 6.6 14.9	530 9.9E+19 4.7 14.9				6270 4.8E+20 1.9 2.2	0.20
	m																	
	s																	
10	d				18280 3.0E+21 4.1 8.3		1090 4.5E+20 10.1 17.2	510 1.4E+20 6.9 17.2			1060 4.3E+20 10.0 17.2	530 1.5E+20 7.0 17.2				15090 1.9E+21 3.1 1.8	0.17
	m																	
	s																	

表 3.1-2　震源モデルのケース。

領域	強震動生成域	大すべり域	破壊開始点	すべり速度関数	破壊伝播速度	小計	基本ケース	追加ケース
No.1	5	1*	4	1	1	20	12	8
No.2	3	1*	4	1	1	12	12	
No.3	5	1*	4	1	1	20	12	8
No.4	3	1*	4	1	1	12	12	
No.5	3	1*	6	1	1	18	18	
No.6	3	2	6	1	1	36	36	
		1(s1)	6	1(smoothed ramp)	1	18		18
		1(s1)	6	1	1(Vr=2.3km/s)	18		18
No.7	3	1*	6	1	1	18	18	
No.8	3	2	6	1	1	36	36	
		1(s1)	6	1(smoothed ramp)	1	18		18
		1(s1)	6	1	1(Vr=2.3km/s)	18		18
No.9	3	1*	4	1	1	12		12
No.10	3	1*	6	1	1	18		18
計						274	156	118

＊ は「大すべり域」を配置しない１ケースを表す。

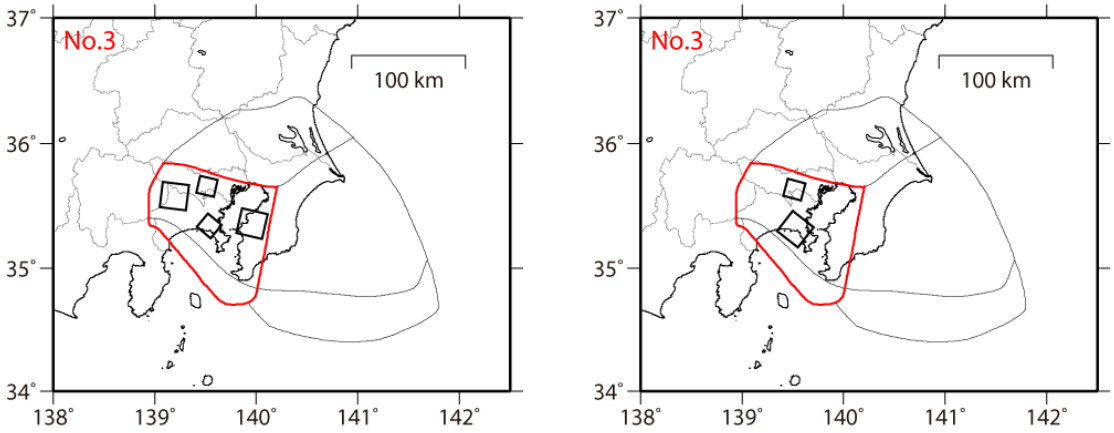


図 3.1-5　パターン４（左）、パターン５（右）のアスペリティ配置。

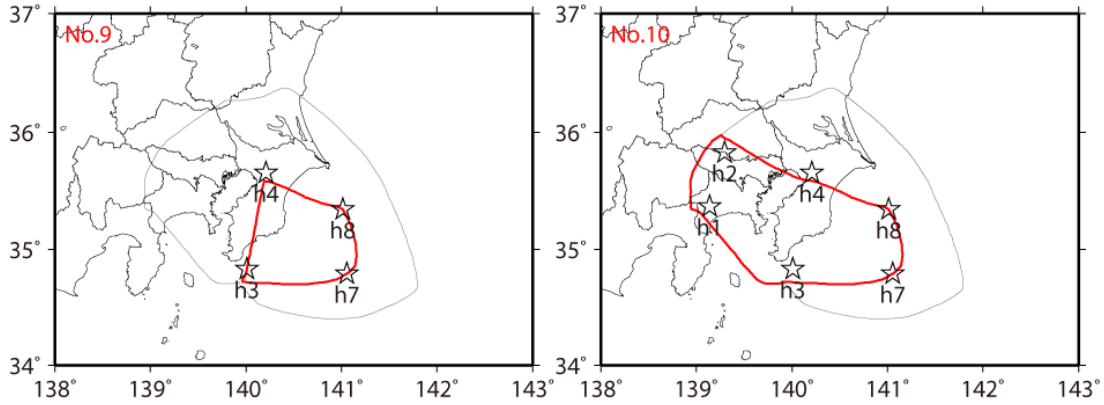


図 3.1-6　房総半島南東沖の地震（No.9）と、元禄地震（No.10）の震源モデル。星印は破壊開始点。

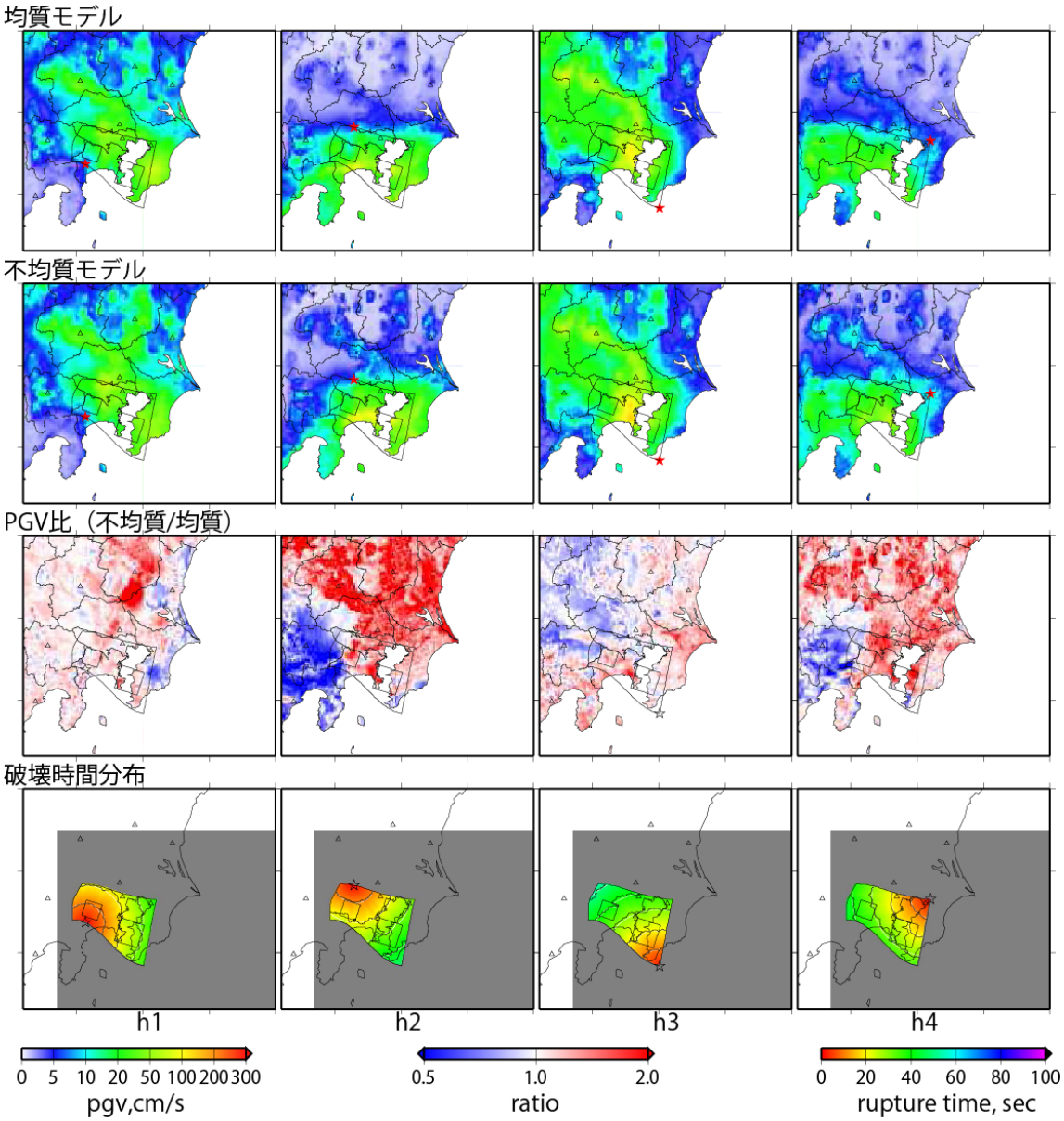


図 3.1-7　No.1 の震源域についての破壊伝播速度不均質モデルの破壊時刻分布（4 段目）の例。均質モデル（1 段目）、不均質モデル（2 段目）の PGV 分布とそれらの比（3 段目）についても示している。

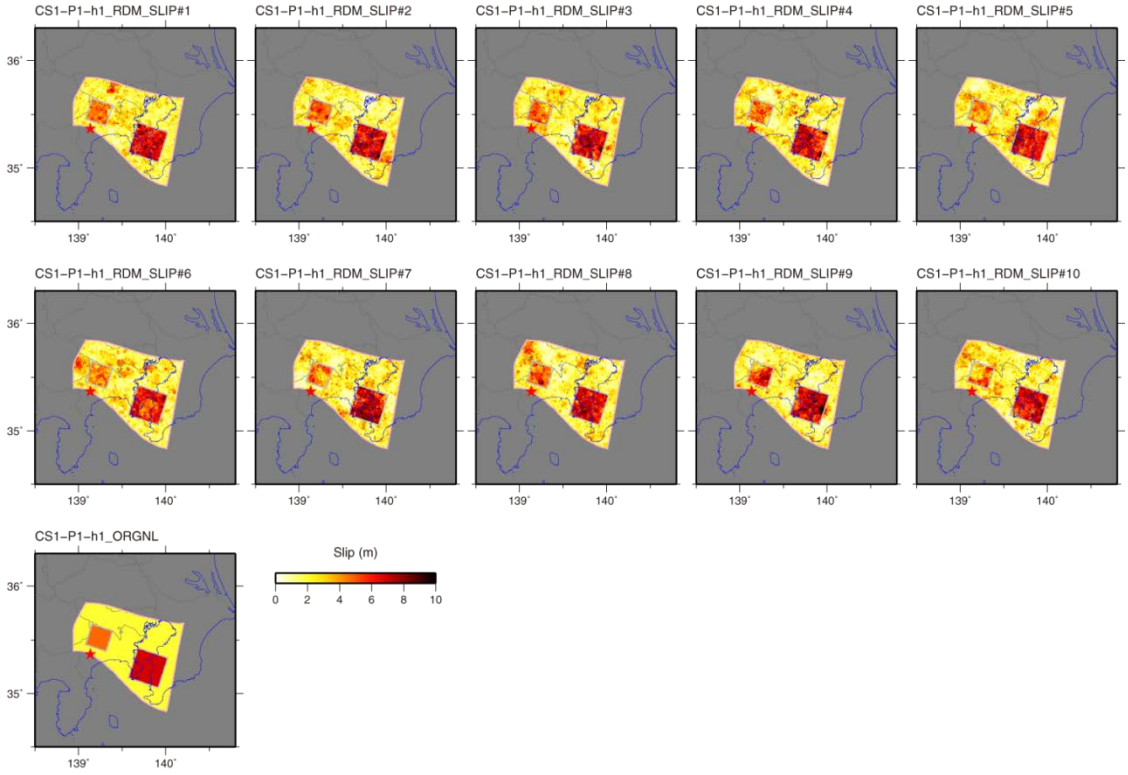


図 3.1-8　10 個の異なる乱数によるすべり量分布不均質モデル（上）と均質モデル（下）のすべり量分布。

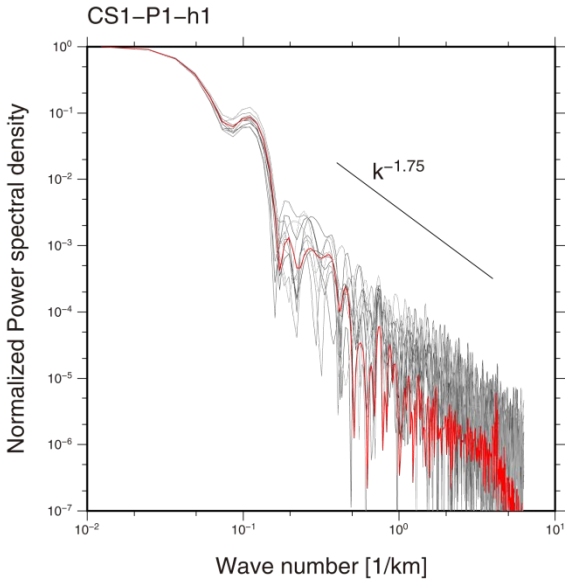


図 3.1-9　すべり量分布の波数スペクトル。赤：均質モデル、灰：10 個の異なる乱数に対する不均質モデル。

表 3.1-3　計算の概要。

地下構造モデル（全国 1 次地下構造モデル）		
格子数	第 1 領域	4005×4005×83
	第 2 領域	1335×1335×307
格子間隔	第 1 領域	100m（水平）、100m（鉛直）
	第 2 領域	300m（水平）、300m（鉛直）
計算条件		
時間間隔（秒）		0.005
タイムステップ数		50000

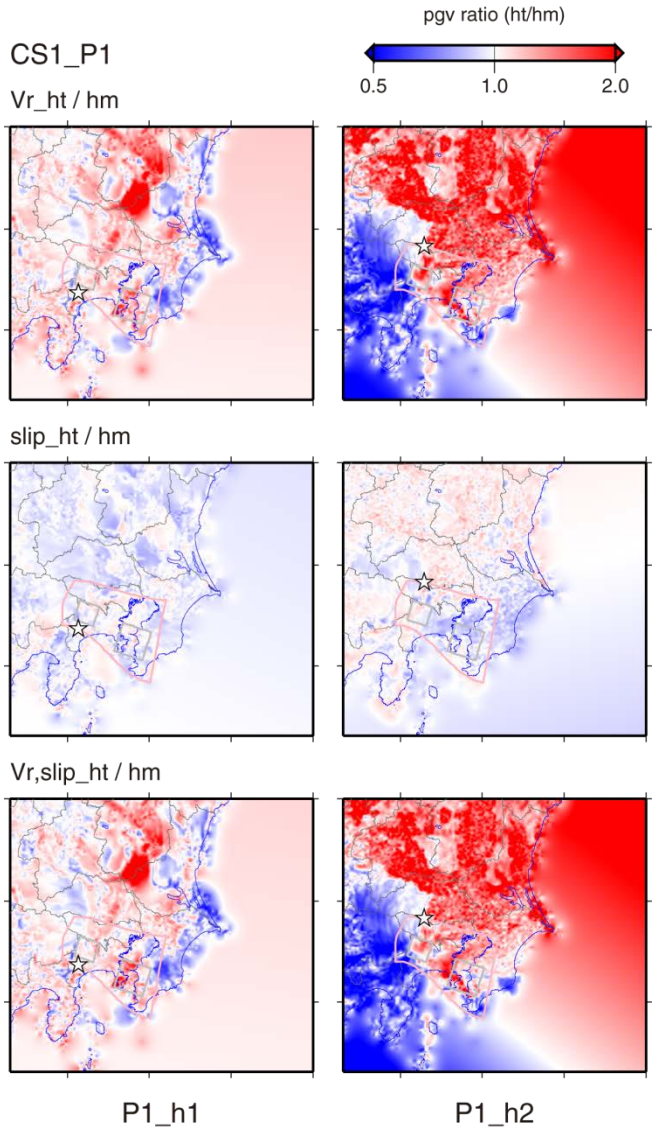


図 3.1-10　不均質モデルと均質モデルによる PGV 比の分布。1 段目：破壊伝播速度不均質モデル、2 段目：すべり量不均質モデル、3 段目：破壊伝播速度とすべり量の不均質モデル。



図 3.1-11　東京都庁における、No.1 の震源域に対する破壊伝播速度均質モデル（左側）と不均質モデル（右側）による速度波形（NS 成分と EW 成分）。波形の色は破壊開始点による。

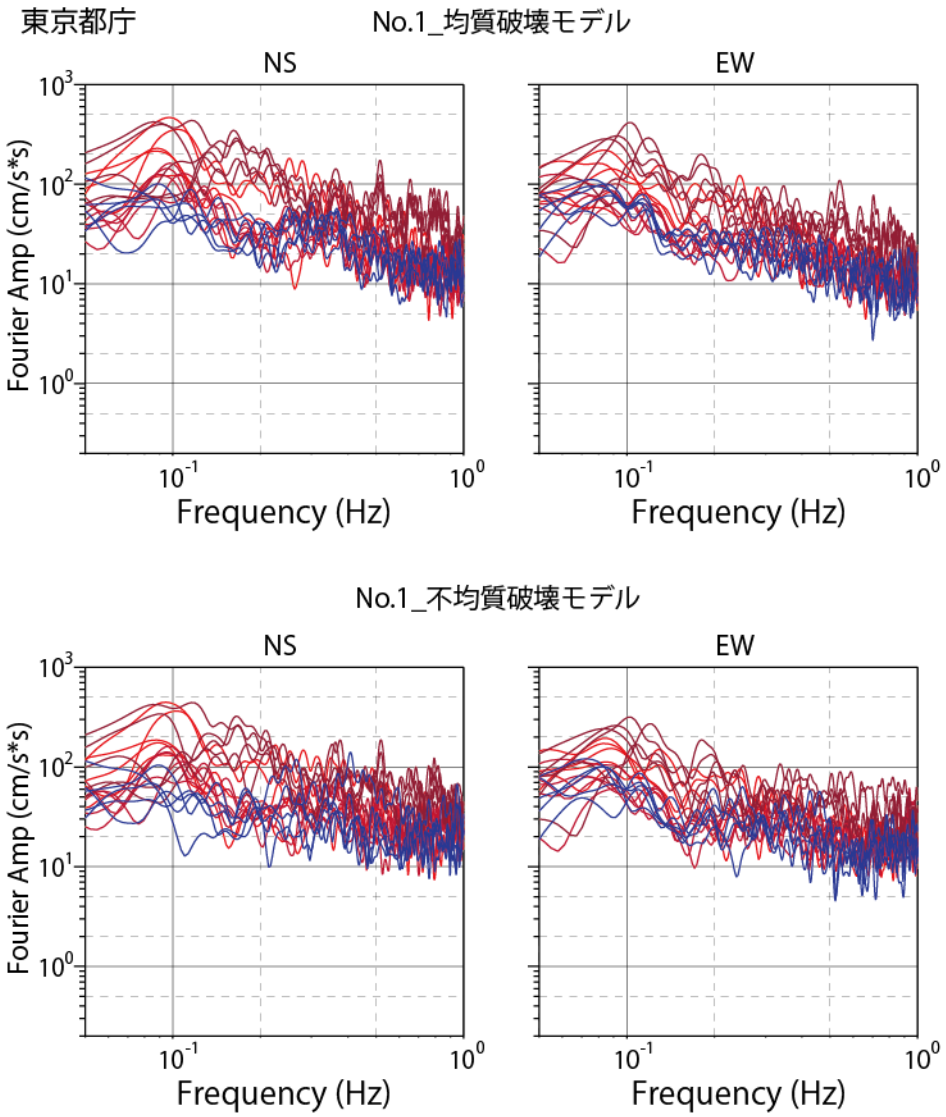


図 3.1-12　図 3.1-11 に示した波形から計算したフーリエスペクトル。均質破壊モデル（上段）と不均質破壊モデル（下段）の結果。色は波形と対応している。

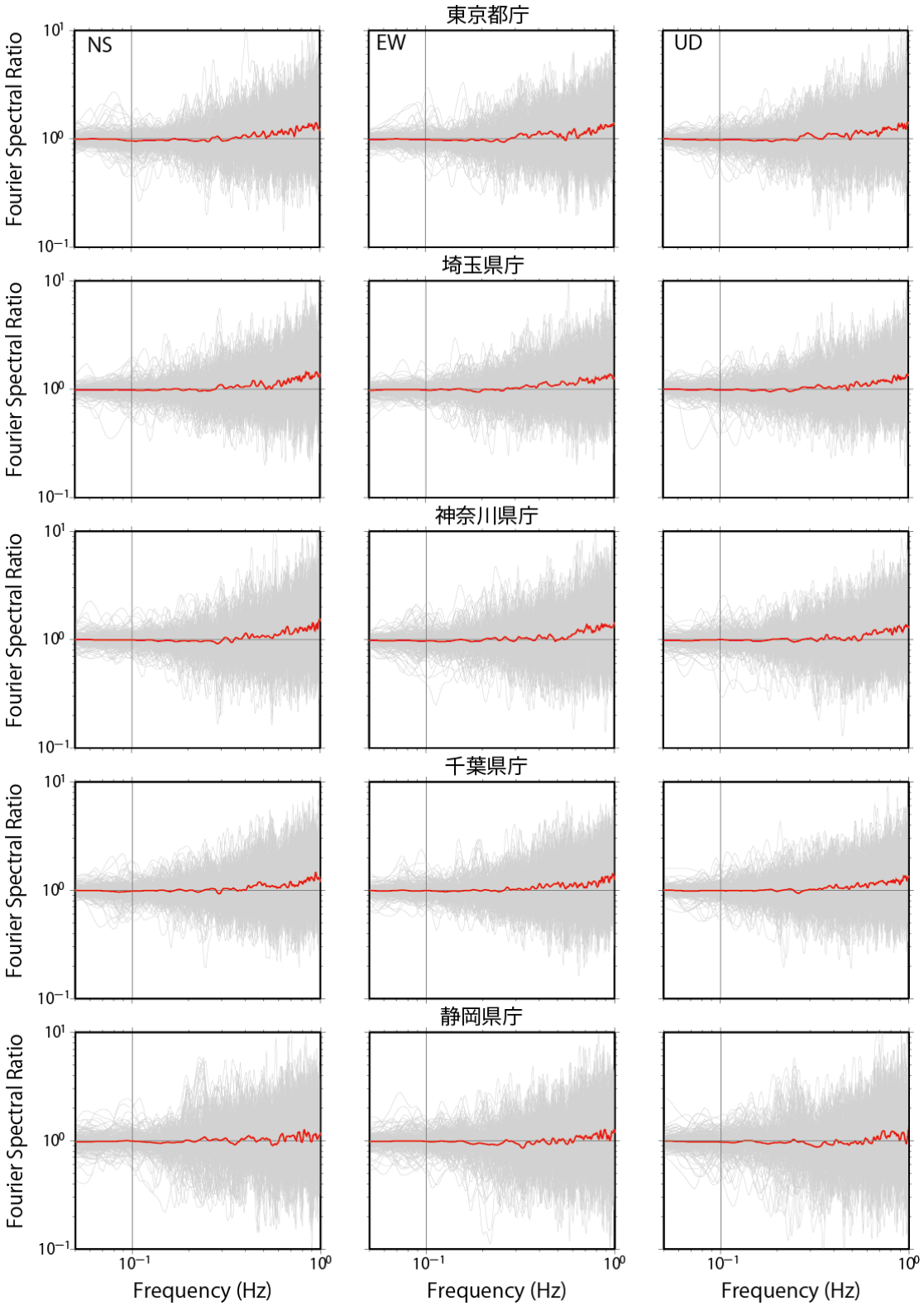


図 3.1-13　5 地点における全ケース（274 ケース）の不均質モデルと均質モデルのスペクトル比。

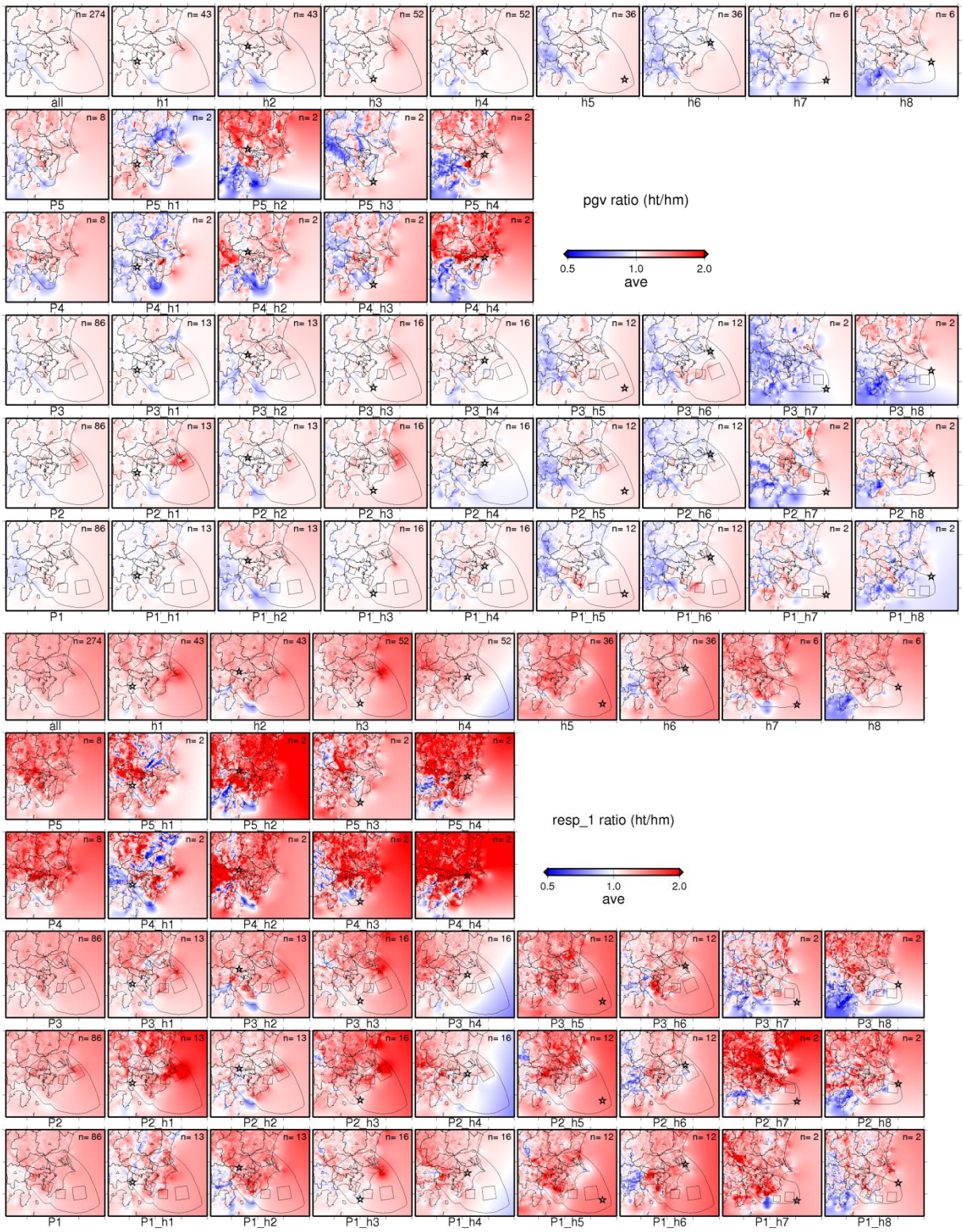


図 3.1-14　破壊伝播速度不均質モデルと均質モデルによる、PGV 比（上）と周期 1 秒の速度応答スペクトルの比（下）。左上は全 274 ケースの平均。左列はアスペリティ配置ごとの平均、上段は破壊開始点ごとの平均、他は同じアスペリティ配置と破壊開始点を持つケースの平均。

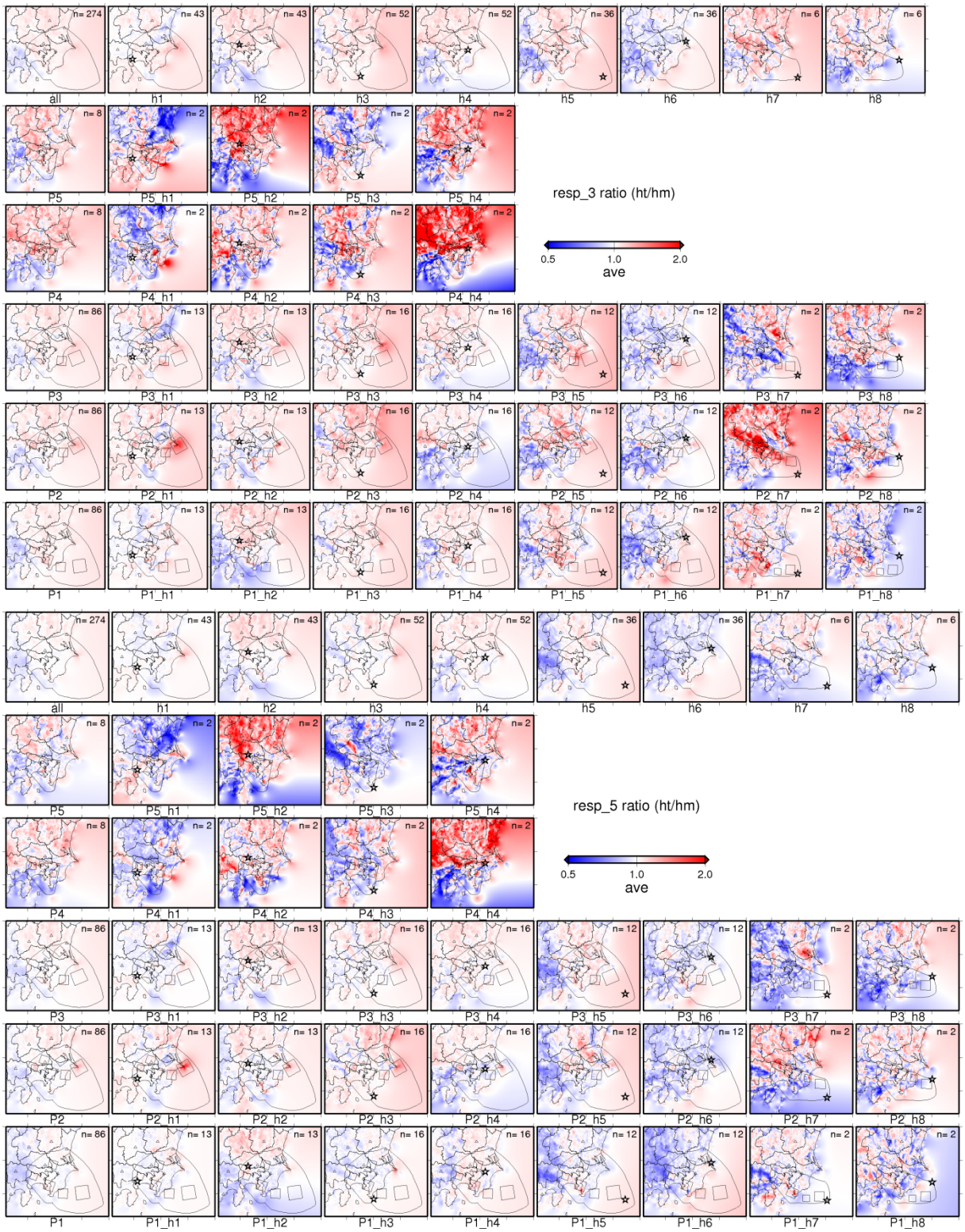


図 3.1-14　続き。上：周期 3 秒と、下：周期 5 秒の速度応答スペクトルの比。

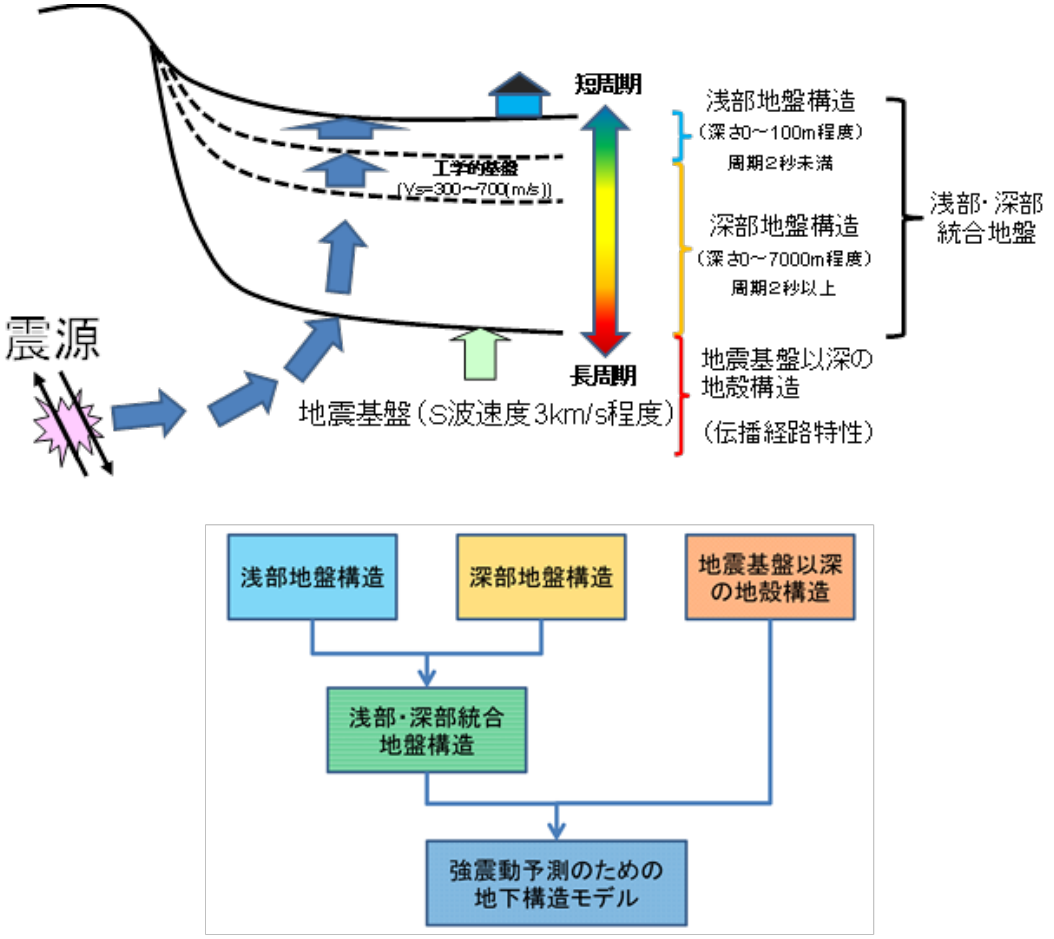


図 3.1-15　浅部・深部統合地盤モデルの概要（第 81 回地下構造モデル検討分科会資料より抜粋）。

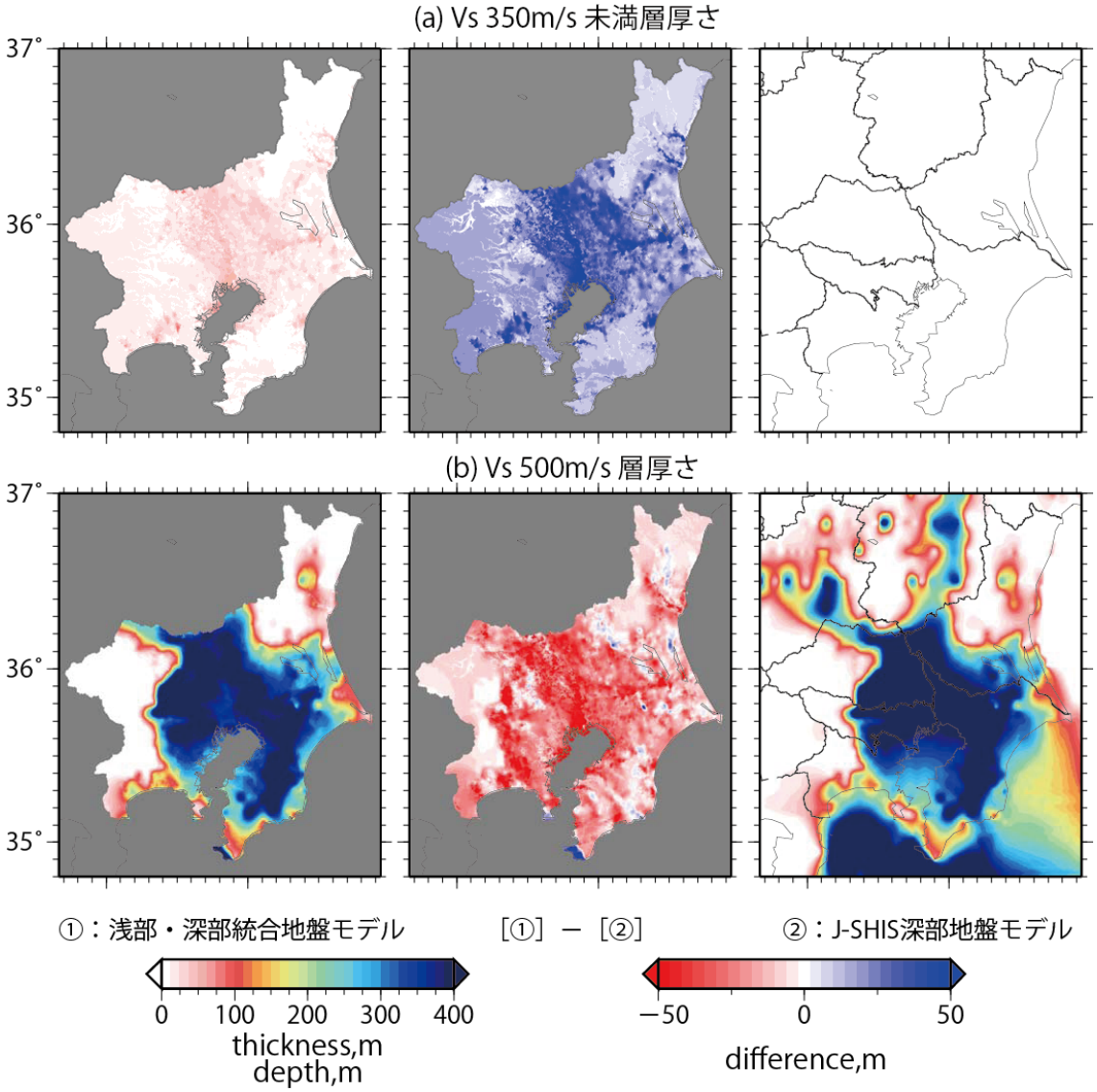


図 3.1-16　浅部・深部統合地盤モデル（左）と J-SHIS 深部地盤モデル（右）の主要な層の層厚と両モデルの差（中列）。

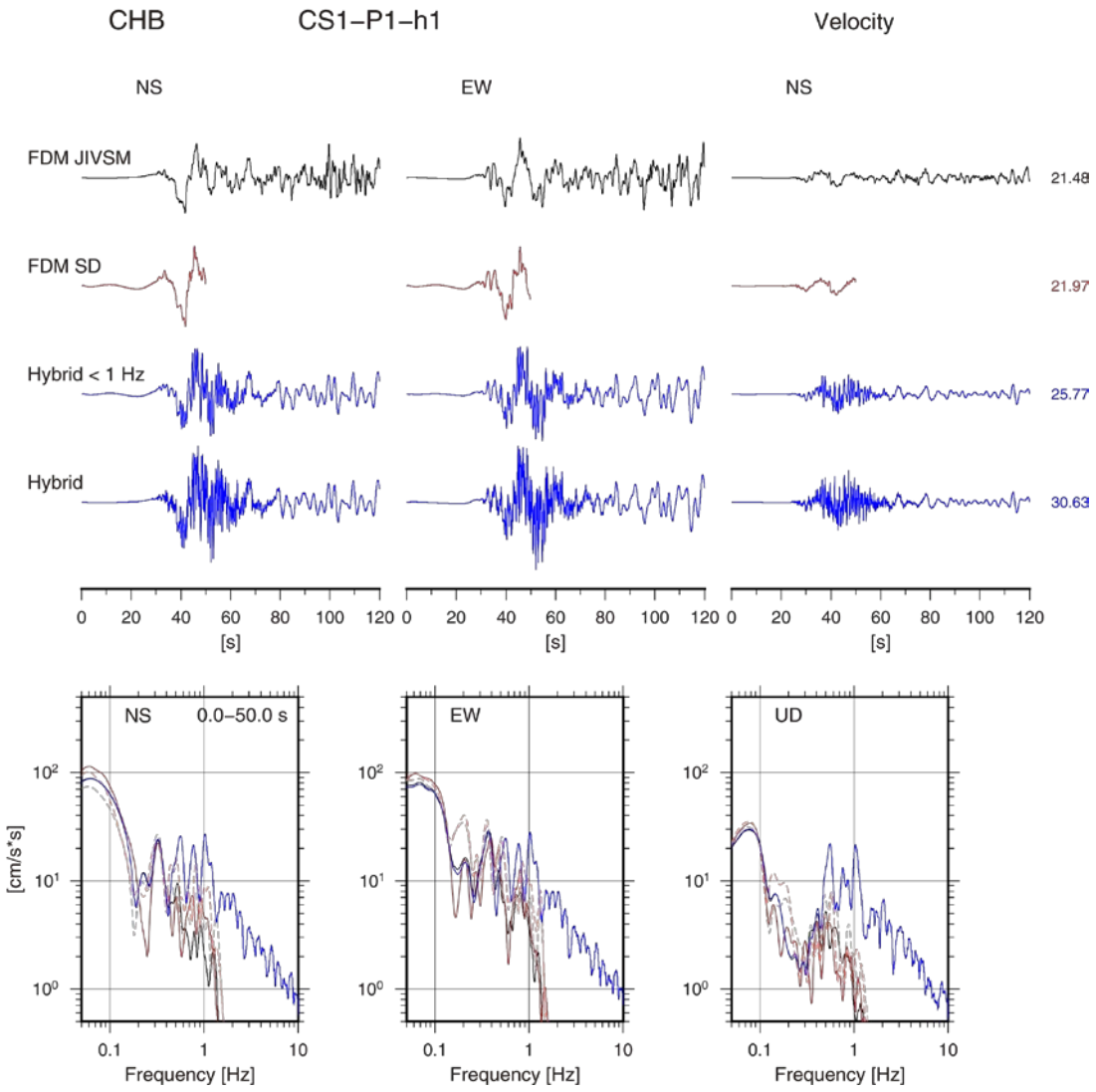


図 3.1-17　代表地点（千葉県庁）における差分法（黒：全国 1 次地下構造モデル、赤：浅部深部統合地盤モデル）とハイブリッド合成法（青）の速度波形およびフーリエスペクトルの比較。波形は 0.05～1 Hz のバンドパスフィルタを掛けているが、ハイブリッド合成法による波形のうち下段の波形にはフィルタを掛けていない。スペクトルは 0～50 秒間のタイムウィンドウで計算した。黒破線と赤破線のスペクトルは、それぞれ全国 1 次地下構造モデルと浅部深部統合地盤モデルを用いた差分法による結果で、震源モデルに破壊伝播速度不均質モデルを用いたものを表す。

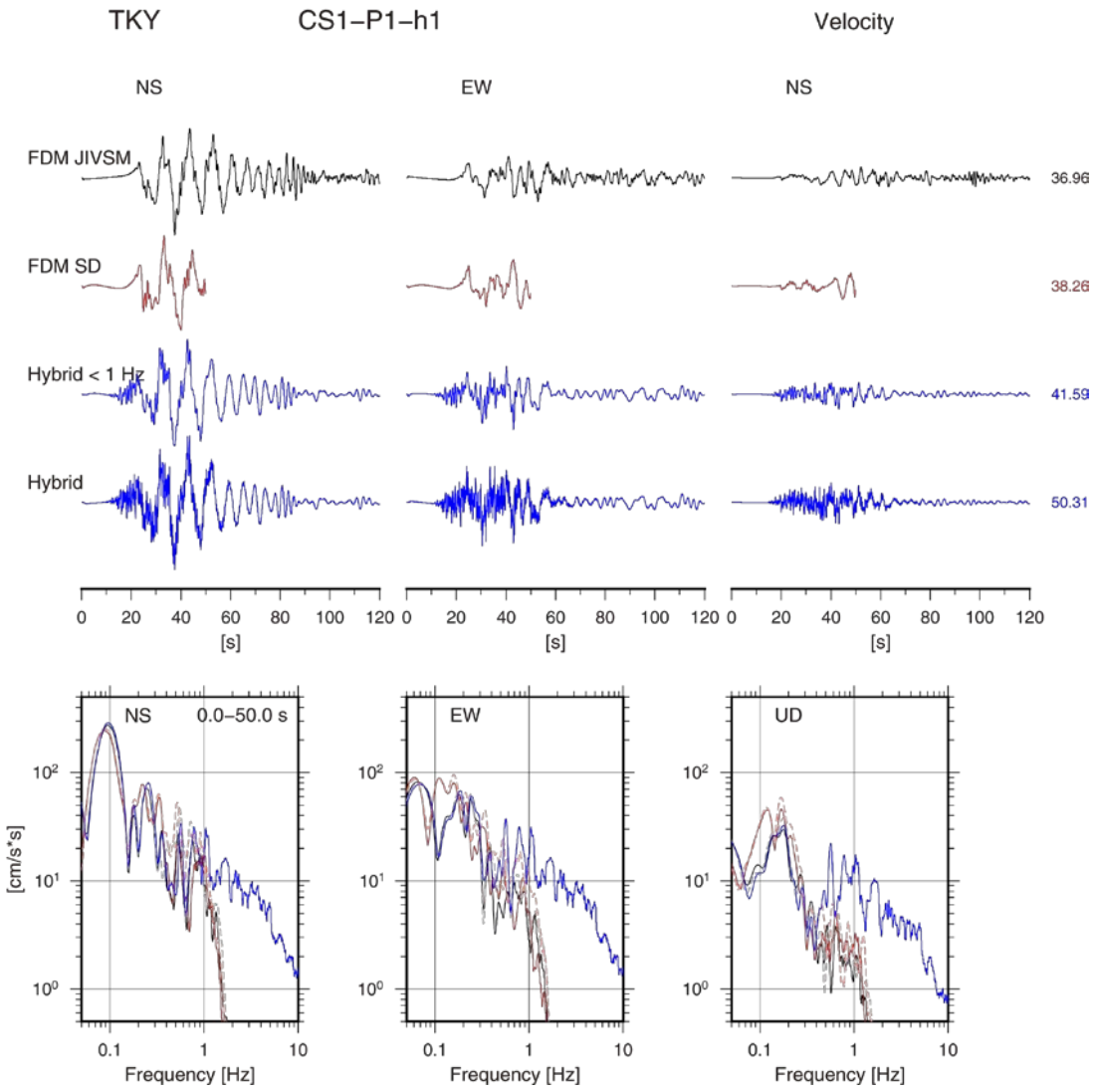


図 3.1-17　つづき。東京都庁について。

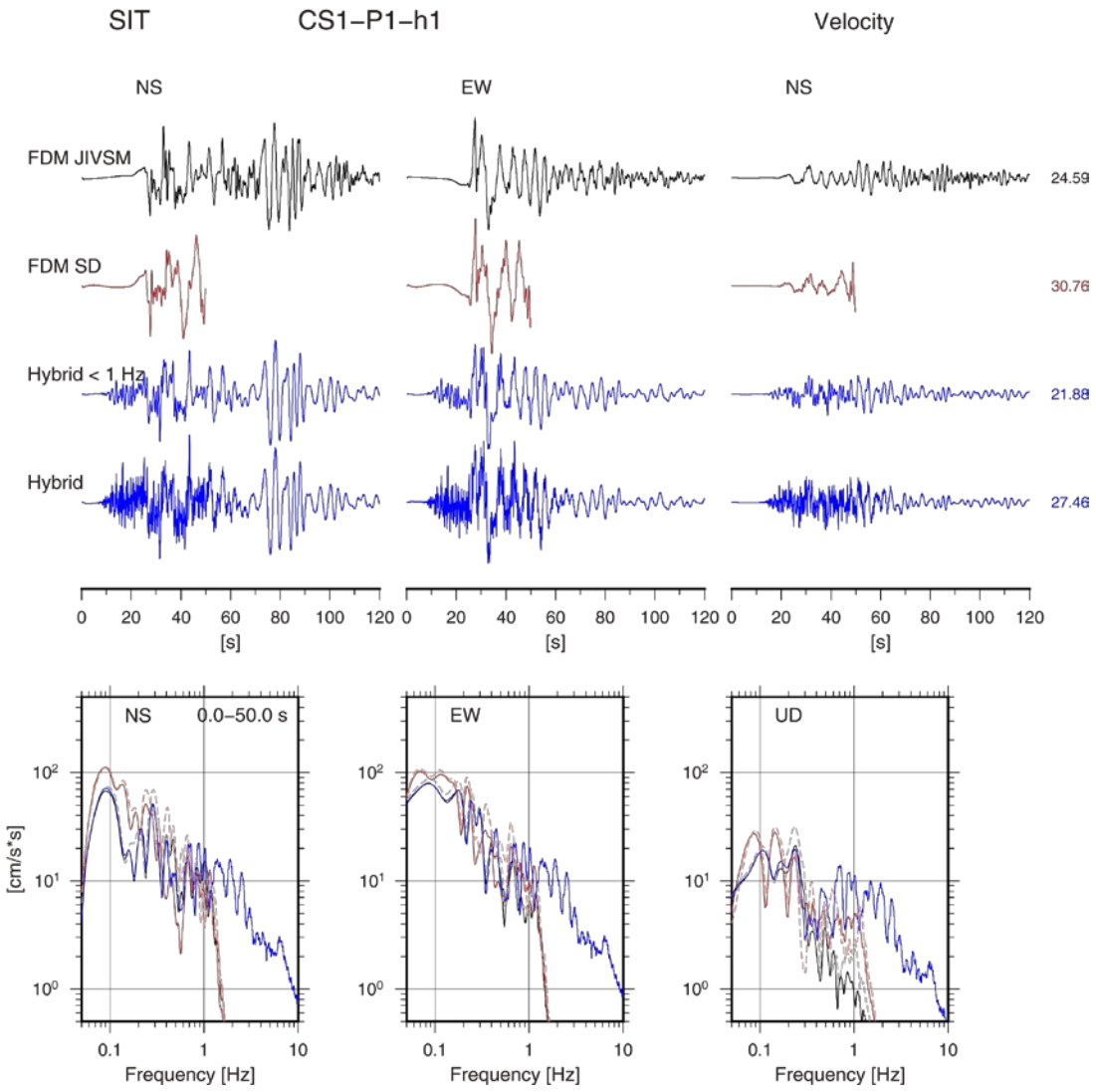


図 3.1-17　つづき。埼玉県庁について。

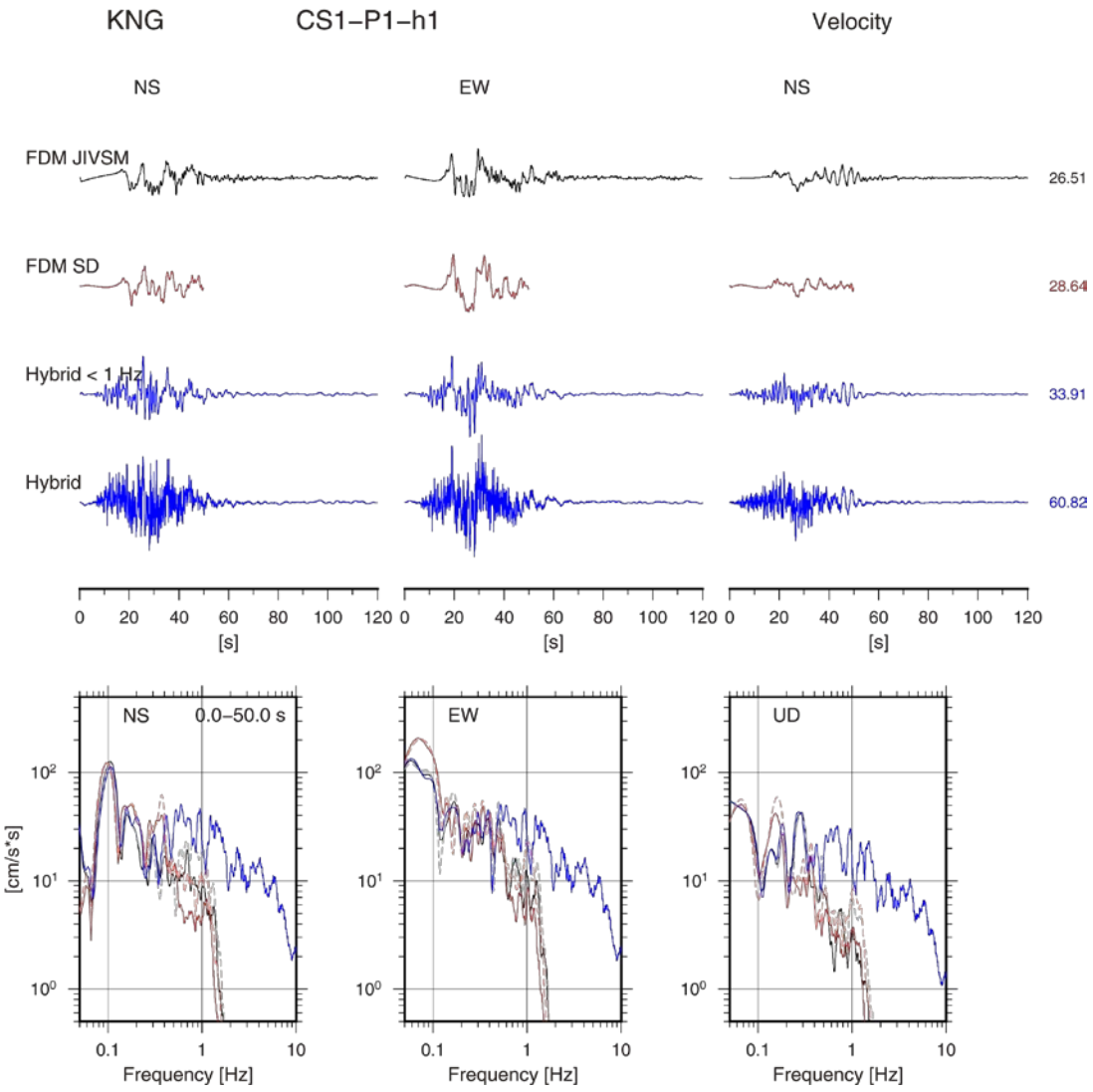


図 3.1-17　つづき。神奈川県庁について。

表 3.1-4　スーパーコンピューターの検討に用いた問題サイズ。

領域	X 方向格子数	Y 方向格子数	Z 方向格子数	合計格子数
第一領域	4005	4005	83	1331322075（約 13 億）
第二領域	1335	1335	307	547143075（約 5 億）
				合計約 18 億

表 3.1-5　計算時間の比較。

マシン	領域分割数	実時間
TSUBAME	6×8	59m31.343s (=3571.343s)
K	4×12	27796.08s
K	6×8	35674.94s

(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、従来の「レシピ」に基づく震源モデルより計算される地震動と比べて、周期 3 秒程度以下の地震動が大きくなることが確かめられた。また、浅部・深部統合地盤モデルを用いることにより、差分法による周期 0.5～2 秒の地震動が従来のモデルによる計算よりも大きな振幅となることも確かめられ、これらの震源モデル、地下構造モデルを広帯域地震動ハザード評価に用いる有効性を示した。

一方、このような不均質性を考慮した震源モデルによるマグニチュード 8 程度以上の地震に対する地震動シミュレーション結果と観測記録との比較は十分でなく、今後、検証を継続する必要がある。また、現時点で広帯域地震動計算を行う有力な手法であるハイブリッド合成法は、巨大地震に対しては二種類の波形を合成する際のタイミングを合わせる手法の問題点が明らかとなった。これらのことから、当面は周期 1 秒程度まで、差分法を用いた地震動シミュレーションにより長周期地震動を広帯域化した地震動ハザード評価を実施していくことが妥当であると考えられる。一方で、さらなる広帯域化については解決するために 5～10 年程度要する中長期的な検討課題であると考えられる。

また、多数の震源モデルによる広帯域地震動シミュレーションを実施することを可能にするための「京」コンピュータを用いた地震動シミュレーションに関する検討を行った結果、現時点ではまだ「京」コンピュータの性能を十分に発揮できておらず、さらなるプログラム等のチューニングが必要であることが分かった。

(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.

Hisada, Y., A theoretical omega-square model considering the spatial variation in slip and rupture velocity. Part 2: Case for a two-dimensional source model, Bull. Seismol. Soc. Am., 91, 651-666, 2001.

岩城麻子・藤原広行，低周波数地震動の情報を用いた高周波数地震動合成の試みー関東地域における検討ー，日本地震工学会論文集，13 (4)，1-18，2013.

地震調査委員会強震動評価部会，2003 年十勝沖地震の観測記録を利用した強震動予測手法の検証，千島海溝沿いの地震活動の長期評価（第二版）別添資料，2004.

Mai, M. P. and G. C. Beroza, A spatial random field model to characterize complexity in earthquake slip, J. Geophys. Res, 107, doi:10.1029/2001JB000588, 2002.

宮武隆・三宅弘恵・木村武志・隅谷謙一, 短周期地震波の成因についての考察, 地震２, 61, 91-97, 2008.

文部科学省研究開発局・防災科学技術研究所，平成 23 年度　長周期地震動予測地図作成等支援事業成果報告書，2012.

文部科学省研究開発局・防災科学技術研究所，平成 24 年度　長周期地震動予測地図作成等支援事業成果報告書，2013.

関口春子・吉見雅行，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 55，103-109，2006.

関口春子・吉見雅行・堀川晴央・吉田邦一，海溝型巨大地震の微視的震源パラメータの変動がもたらす予測地震動のばらつき，第 34 回地盤震動シンポジウム資料集，日本建築学会，83-88，2006.

Senna, S., T. Maeda, Y. Inagaki, H. Suzuki, H. Matsuyama, and H. Fujiwara, 2013, Modeling of the subsurface structure from the seismic bedrock to the ground surface for a broadband strong motion evaluation, *Journal of Disaster Research*, VOL.5, NO.8, pp.889-903.

渡辺基史・藤原広行・佐藤俊明・石井透・早川崇，断層破壊過程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 2，60，253-265，2008a.

渡辺基史・藤原広行・石井透・松島信一・早川崇，破壊伝播の複雑さを特性化する試みと強震動予測結果，日本地震工学会大会－2008 梗概集，2008b.

3.2. 相模トラフの地震を対象とした地表面における広帯域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地表面における広帯域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
独立行政法人　防災科学技術研究所	研究領域長	藤原　広行
独立行政法人　防災科学技術研究所	主任研究員	森川　信之
独立行政法人　防災科学技術研究所	データセンター長	青井　真
独立行政法人　防災科学技術研究所	主任研究員	前田　宜浩
独立行政法人　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て首都圏の広帯域地震動計算を行い、結果をハザード評価として取りまとめる案を提示した。

(2) 事業の成果

(a) 事業の要約

平成 25 年度までに実施されている相模トラフで発生するマグニチュード８クラス以上の地震等を対象として、震源パラメータの不確定性を考慮した多数の震源モデルを作成し、作成途中である浅部・深部統合地盤モデルを用いて、3.1 の検討結果を踏まえた広帯域地震動シミュレーションにより地震動波形を計算するとともに、地震調査研究推進本部による長期評価等を参照して地震の発生頻度を考慮してハザードカーブとして示すことなどにより、広帯域地震動ハザード評価結果案として提示した。

(b) 事業の成果

1) 震源モデルの設定

（A）巨視的震源パラメータ

平成 25 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、相模トラフのマグニチュード（以下、M）8 クラスの地震を対象とした長周期地震動シミュレーションが行われている。そこで設定した震源域の区分は、地震調査研究推進本部による「全国地震動予測地図 2014 年版」でも採用されていることから、本検討でも用いることとした。すなわち、「相模トラフ沿いの地震活動の長期評価（第二版）」（地震調査委員会、2014）で示されている「最大クラス」の震源域について、

・フィリピン海プレートの上面深さ方向について、「浅部」、「中部」、「深部」に分割する。このとき、プレート上面深さ 10km および 30km をそれぞれの境界とする。

・「浅部」と「中部」について、大正関東地震の震源域の東端を境界として東西に分割する。

・「浅部」と「深部」はそれぞれ単独では活動せず、常に「中部」と同時に活動する。

ことを仮定して区分した。これにより、図 3.2-1 に示す No.1～No.8 の震源域が設定される。ただし、元禄関東地震の震源域として推定されている領域がない。そこで、首都直下地震モデル検討会（2013）による元禄関東地震の震源モデルを参考に、No.9 および No.10 の震源域を追加した（図 3.2-1）。

各領域を震源とする地震の規模については、震源息全体の平均応力降下両を 3MPa（例えば、Kanamori and Anderson, 1975; Allmann and Shearer, 2009）と仮定して、震源域の面積より算出した（表 3.2-1）。

（B）微視的震源パラメータ

微視的震源パラメータについても、平成 25 年度の「長周期地震動ハザードマップ作成等支援事業」における検討で用いた設定を踏襲した（表 3.2-1、図 3.2-2）。

・アスペリティ（強震動生成域）は、中部および深部の各小領域に 2 個配置する。
・浅部領域（深さ 10km 以浅）にはすべりの大きな領域を 1 個設定する。
・浅部領域のうち、陸に近い西側部分に対しては、すべり速度時間関数として中村・宮武（2000）だけでなく、滑らかなすべりを表す smoothed ramp 関数とするケースも考慮する。
・首都直下地震モデル検討会（2013）の大正関東地震の震源域に相当する、No.3 の震源域については、アスペリティの総面積は変わらずに 4 個としたモデル、アスペリティ総面積を 1/2 として 2 個としたモデルも考慮する（表 3.2-2）。

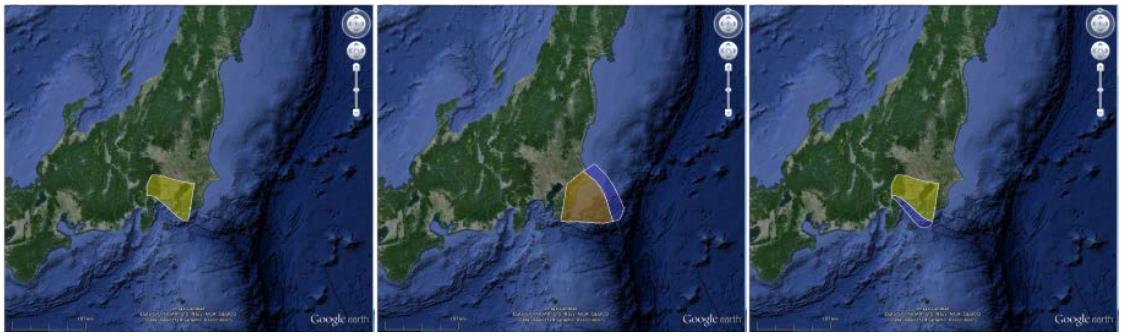
なお、本検討では、3.1 節で述べた通り、吉見・関口（2006）によるマルチスケール不均質性のうち、破壊速度の不均質性を考慮したモデルも作成した。破壊速度の不均質性を考慮しないモデルと考慮したモデルについて、図 3.2-3 に破壊開始時刻分布の比較例を示す。

（C）その他の震源パラメータ

その他の震源パラメータについても平成 25 年度の「長周期地震動ハザードマップ作成等支援事業」における検討で用いた設定を踏襲した。浅部領域の破壊伝播速度については、当該領域における S 波速度が遅い可能性を考慮して 2.7km/s よりも遅い 2.3km/s とするケースも仮定している。

（D）計算ケースの設定

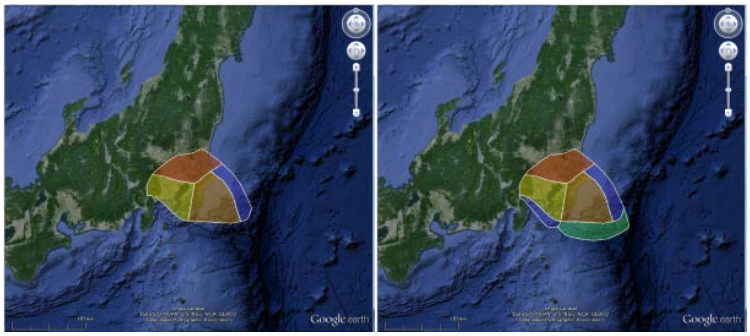
上記（A）～（C）に示した不確実性を考慮して、破壊伝播速度の不均質性を考慮しないモデルと考慮するモデルをそれぞれ 274 通り、計 548 通りの震源モデルを作成した（表 3.2-3）。



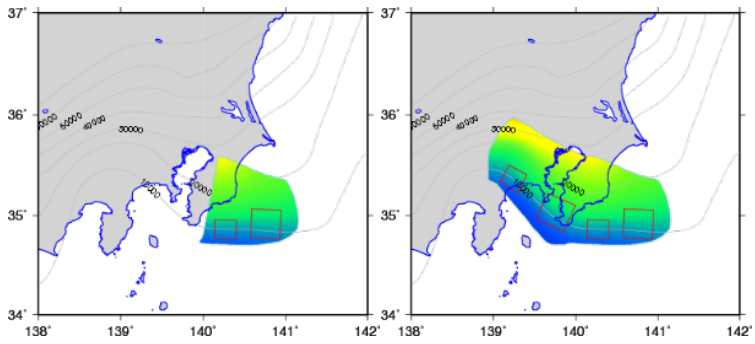
No.1　　No.2　　No.3



No.1　　No.2　　No.3



No.7　　No.8



No.9　　No.10

図 3.2-1　相模トラフの M8 クラスの地震の震源域。

表 3.3-1　長周期地震動ハザード評価のための震源パラメータ（基本モデル）。m は中部、d は深部、1 は西部、2 は東部。

No.	巨視的パラメータ		微視的パラメータ								
				m1-1	m1-2	m2-1	m2-2	d-1	d-2	s1, s2	背景領域
1	面積[km²]	7,950	面積[km²]	1,090	500						6,360
	M_0 [Nm]	8.7E+20	M_0 [Nm]	2.9E+20	9.1E+19						4.9E+20
20%	すべり量 [m]	2.7	すべり量 [m]	6.7	4.5						1.9
	Mw	7.9	実効応力 [MPa]	15.0	15.0						2.2
2	面積[km²]	15,030	面積[km²]			2,010	1,000				12,030
	M_0 [Nm]	2.3E+21	M_0 [Nm]			7.4E+20	2.6E+20				1.3E+21
20%	すべり量 [m]	3.7	すべり量 [m]			9.1	6.4				2.6
	Mw	8.2	実効応力 [MPa]			15.0	15.0				2.2
3	面積[km²]	9,990	面積[km²]	1,090	500						8,400
	M_0 [Nm]	1.2E+21	M_0 [Nm]	3.3E+20	1.0E+19						6.9E+20
16%	すべり量 [m]	3.0	すべり量 [m]	7.5	5.0						2.4
	Mw	8.0	実効応力 [MPa]	18.8	18.8						2.8
4	面積[km²]	21,510	面積[km²]			2,010	1,000				18,500
	M_0 [Nm]	3.9E+21	M_0 [Nm]			8.8E+20	3.1E+20				2.7E+21
14%	すべり量 [m]	4.5	すべり量 [m]			10.9	7.7				3.6
	Mw	8.3	実効応力 [MPa]			21.5	21.5				3.1
5	面積[km²]	22,990	面積[km²]	1,090	500	2,010	1,000				18,390
	M_0 [Nm]	4.3E+21	M_0 [Nm]	4.0E+20	1.3E+19	1.0E+21	3.5E+20				2.4E+21
20%	すべり量 [m]	4.6	すべり量 [m]	9.1	6.2	12.4	8.7				3.2
	Mw	8.4	実効応力 [MPa]	15.0	15.0	15.0	15.0				1.6
6	面積[km²]	31,490	面積[km²]	1,090	500	2,010	1,000			1,700	25,190
	M_0 [Nm]	6.9E+21	M_0 [Nm]	4.6E+20	1.4E+20	1.1E+21	4.0E+20			8.9E+20	3.9E+21
20%	すべり量 [m]	5.4	すべり量 [m]	10.3	7.0	14.0	9.9			12.9	3.8
	Mw	8.5	実効応力 [MPa]	15.0	15.0	15.0	15.0			15.0	1.4
7	面積[km²]	31,280	面積[km²]	1,090	500	2,010	1,000	830	830		25,020
	M_0 [Nm]	6.8E+21	M_0 [Nm]	5.0E+20	1.6E+20	1.3E+21	4.4E+20	3.3E+20	3.3E+20		3.8E+21
20%	すべり量 [m]	5.4	すべり量 [m]	11.3	7.6	15.3	10.8	9.9	9.9		3.8
	Mw	8.5	実効応力 [MPa]	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0		1.3
8	面積[km²]	39,790	面積[km²]	1,090	500	2,010	1,000	830	830	1,700	31,830
	M_0 [Nm]	9.8E+21	M_0 [Nm]	5.4E+20	1.7E+20	1.4E+21	4.7E+20	3.6E+20	3.6E+20	1.1E+21	5.5E+21
20%	すべり量 [m]	6.1	すべり量 [m]	12.2	8.3	16.6	11.7	10.7	10.7	15.3	4.3
	Mw	8.6	実効応力 [MPa]	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	1.2

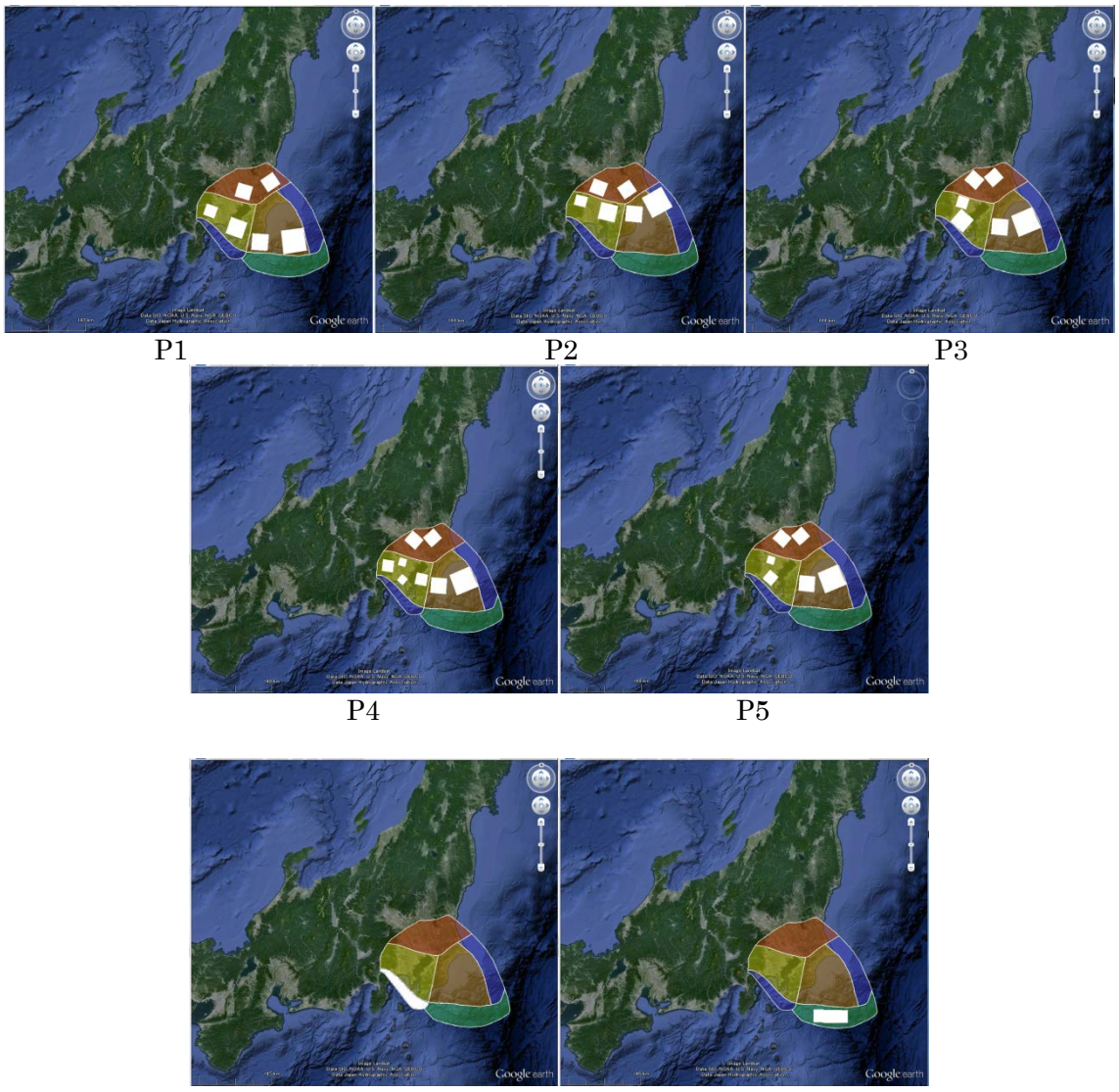


図 3.2-2 (1)　アスペリティ（強震動生成域）の配置パターン（の No.1～No.8 用）。
注：P4、P5 は No.1 および No.3 の領域のみ設定、それ以外は P3 と同じ位置を図示。

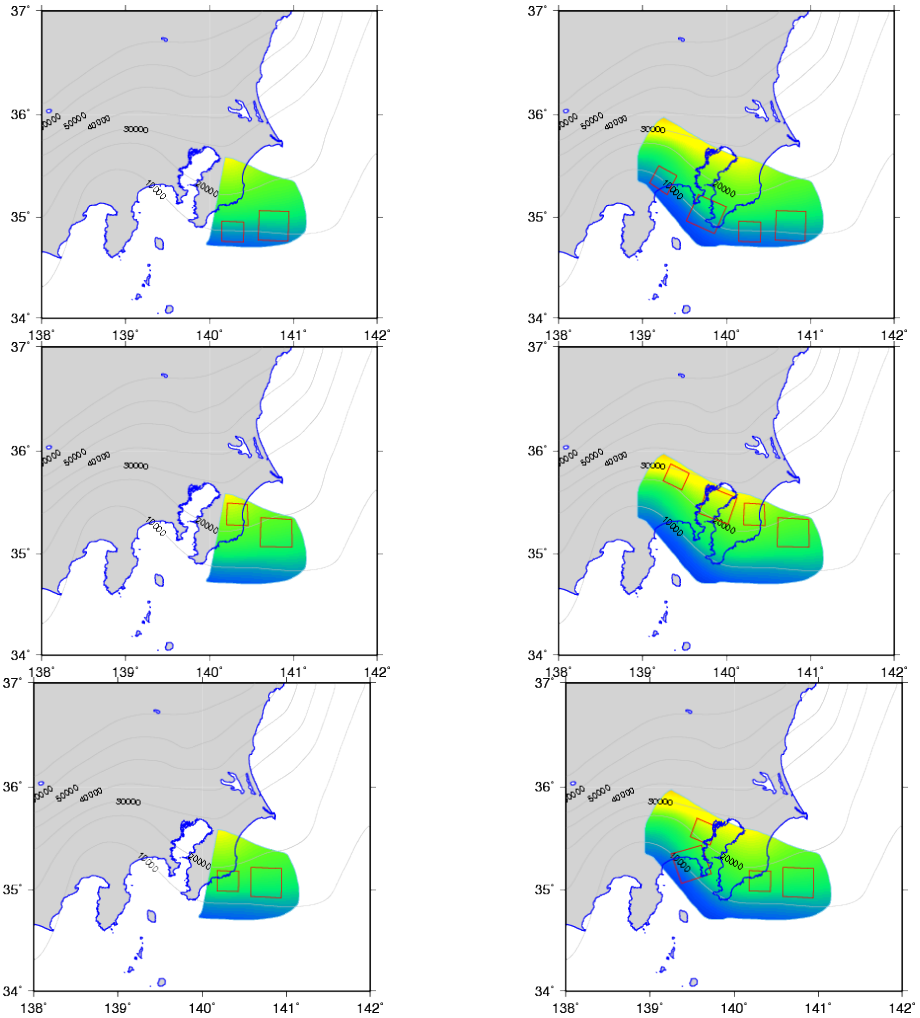


図 3.2-2 (2)　アスペリティ（強震動生成域）の配置パターン（追加の No.9、No.10 用）。

表 3.3-2　長周期地震動ハザード評価のための震源パラメータ（追加モデル）。

No.	巨視的パラメータ		微視的パラメータ								
				m1-1a	m1-1b	m1-2a	m1-2b				背景領域
3b	面積[km²]	9,990	面積[km²]	550	540	250	250				8,400
	M_0 [Nm]	1.2E+21	M_0 [Nm]	1.7E+20	1.6E+19	5.1E+19	5.1E+19				8.0E+20
16%	すべり量 [m]	3.0	すべり量 [m]	7.5	7.4	5.0	5.0				2.4
	Mw	8.0	実効応力 [MPa]	18.8	18.8	18.8	18.8				2.0
3c	面積[km²]	9,990	面積[km²]	550		250					9,190
	M_0 [Nm]	1.2E+21	M_0 [Nm]	1.7E+20		5.1E+19					1.0E+21
16%	すべり量 [m]	3.0	すべり量 [m]	7.4		5.0					2.7
	Mw	8.0	実効応力 [MPa]	37.7		37.7					4.6
				①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	背景領域
9*	面積[km²]	8,050	面積[km²]		306		315				7430
	M_0 [Nm]	8.9E+20	M_0 [Nm]		7.4E+19		7.7E+19				7.4E+20
8%	すべり量 [m]	2.7	すべり量 [m]		6.0		6.1				2.5
	Mw	7.9	実効応力 [MPa]		38.9		38.9				10.8
10*	面積[km²]	18,030	面積[km²]	313	306	401	315	314	474	262	15650
	M_0 [Nm]	3.0E+21	M_0 [Nm]	1.1E+20	1.0E+20	1.6E+20	1.1E+20	1.1E+20	2.0E+20	8.3E+19	2.1E+21
13%	すべり量 [m]	4.1	すべり量 [m]	8.5	8.4	9.6	8.5	8.5	10.5	7.8	3.3
	Mw	8.2	実効応力 [MPa]	22.7	22.7	22.7	22.7	22.7	22.7	22.7	5.0

* アスペリティの数、位置および面積は首都直下地震モデル検討会（2013）を参照して設定

表 3.3-3　震源モデルのケース。

領域 No.	強震動生成域	大すべり域	破壊開始点	小計
1	5	1*	4	20
2	3	1*	4	12
3	5	1*	4	20
4	3	1*	4	12
5	3	1*	6	18
6	3	2	6	36
6 (smoothed ramp)	3	1 (s1)	6	18
6 (Vr=2.3km/s)	3	1 (s1)	6	18
7	3	1*	6	18
8	3	2	6	36
8（smoothed ramp）	3	1 (s1)	6	18
8（Vr=2.3 km/s）	3	1 (s1)	6	18
9	3	1*	4	12
10	3	1*	6	18
計				274

*　は「大すべり域」を配置しない 1 ケースを表す。

** 上記各ケースについて破壊速度の不均質性を考慮する／しないの二通り。

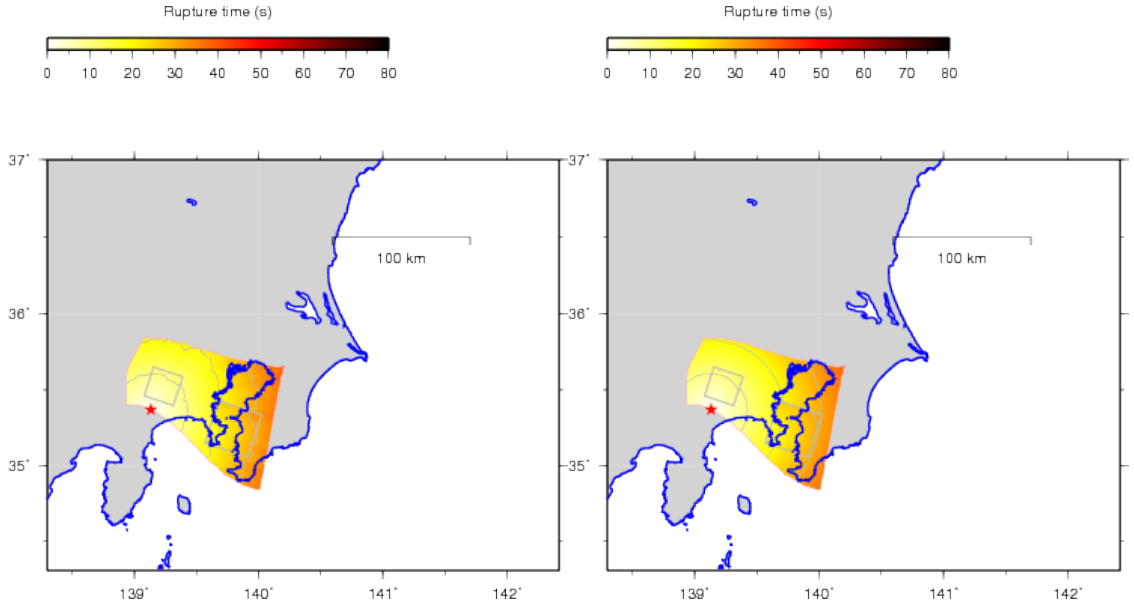


図 3.2-3　破壊速度の不均質性を考慮したモデル（左）と考慮しないモデル（右）の破壊開始時間のコンター図の例。

2) 計算結果

震源域 No.1 を例として、最大速度、速度応答スペクトル（減衰定数 5%、周期 2 秒、3 秒、5 秒、7 秒、10 秒）の分布を図 3.2-5～図 3.2-10 に示す。また、代表地点として東京都庁、神奈川県庁、千葉県庁および埼玉県庁位置における全ケースの速度応答スペクトル（減衰定数 5%）を図 3.2-11 に示す。

3) ハザード評価案

本検討では、結果をハザードカーブ等として提示することを目標としている。そこでまず、代表地点におけるハザードカーブを試算する。

まず、各震源域（図 3.2-1、No.1～10）についての条件付きハザードカーブを作成する。このとき、各ケースの重みは等しいとする。次に、作成された各震源域についての条件付きハザードカーブから、「全国地震動予測地図 2014 年版」（地震調査委員会、2014）で設定されている起こりやすさ（発生確率）を考慮した各領域の重み（表 3.2-4）を付してそれらを足し合わせることで、相模トラフの M8 クラスの地震全体での条件付きハザードカーブを求める。こうして得られた都県庁位置における速度応答スペクトルの条件付きハザードカーブを図 3.2-12～図 3.2-19 に示す。このようにして求められたハザードカーブにおいて、超過確率が 50%となる地震動強さを「平均値」とみなすと、「平均値」の地震動強さ分布を示すことができる（図 3.2-22、図 3.2-23）。なお、ここでは、破壊伝播速度の不均質性を考慮した場合（実線）としない場合（破線）で分けてハザードカーブを作成している。両者を比較すると、周期が長い（5 秒以上）ではほとんど違いが見られないが、周期が短い（2 秒、3 秒）では、破壊伝播速度の不均質を考慮した方がハザードのレベルがやや高いことがわかる。また、図 3.2-20 および図 3.2-21 では、各領域の重みを等しくした場合についても示してあるが、表 3.2-4 の重みを用いた場合と比べて地震動強さが大きい。これは、地震規模の小さい領域に大きな重みが与えられていることによる。

表 3.2-4　全国地震動予測地図 2014 年版で設定されている各領域に対する重み。

領域	重み
1	0.37
2	0.06
3	0.30
4	0.05
5	0.03
6	0.01
7	0.01
8	0.02
9	0.11
10	0.04

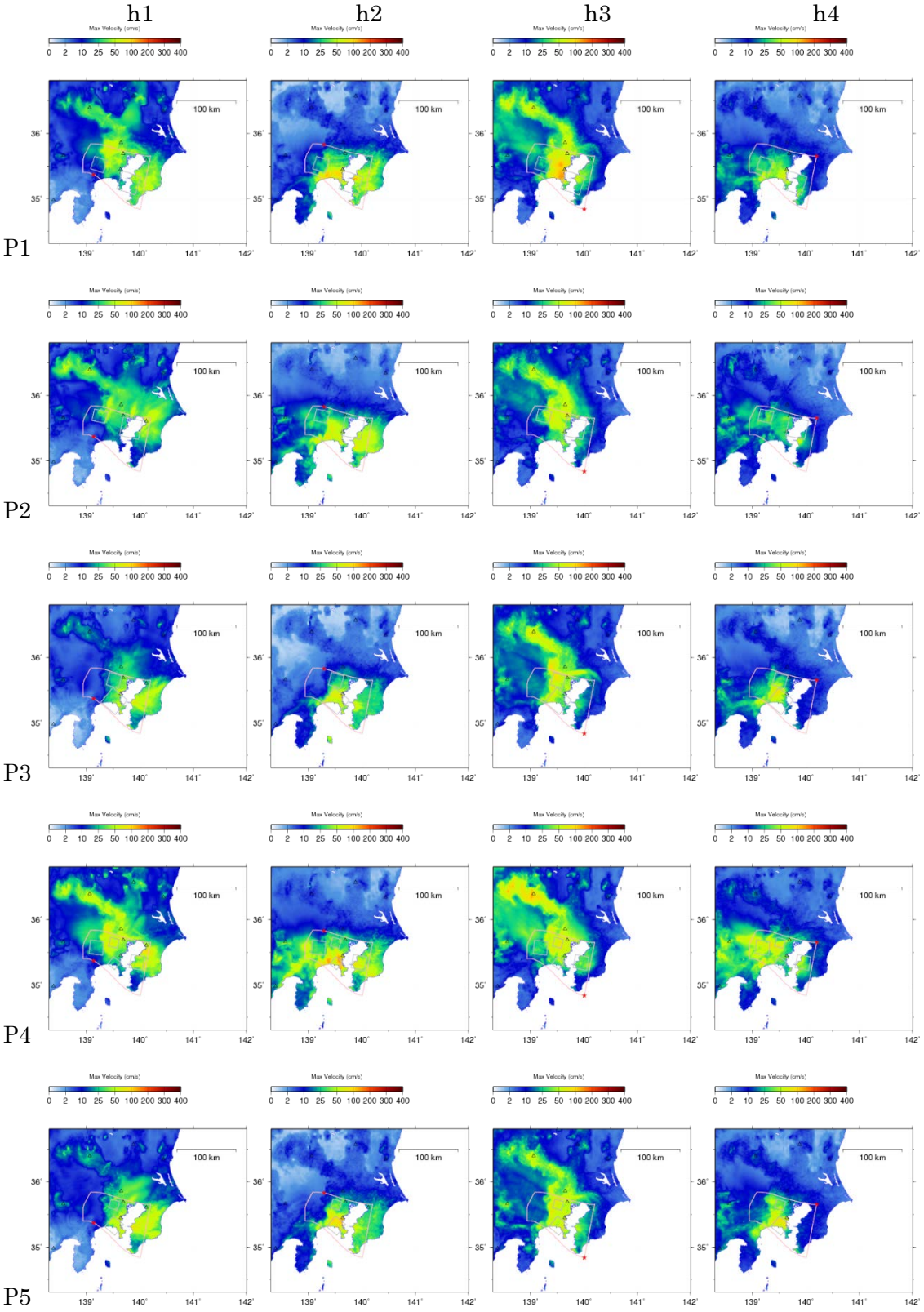


図 3.2-5　震源域 No.1 における 20 パターンの最大速度分布。P はアスペリティ位置、h は破壊開始点位置の違いを表す。（破壊伝播速度の不均質性を考慮した場合）。

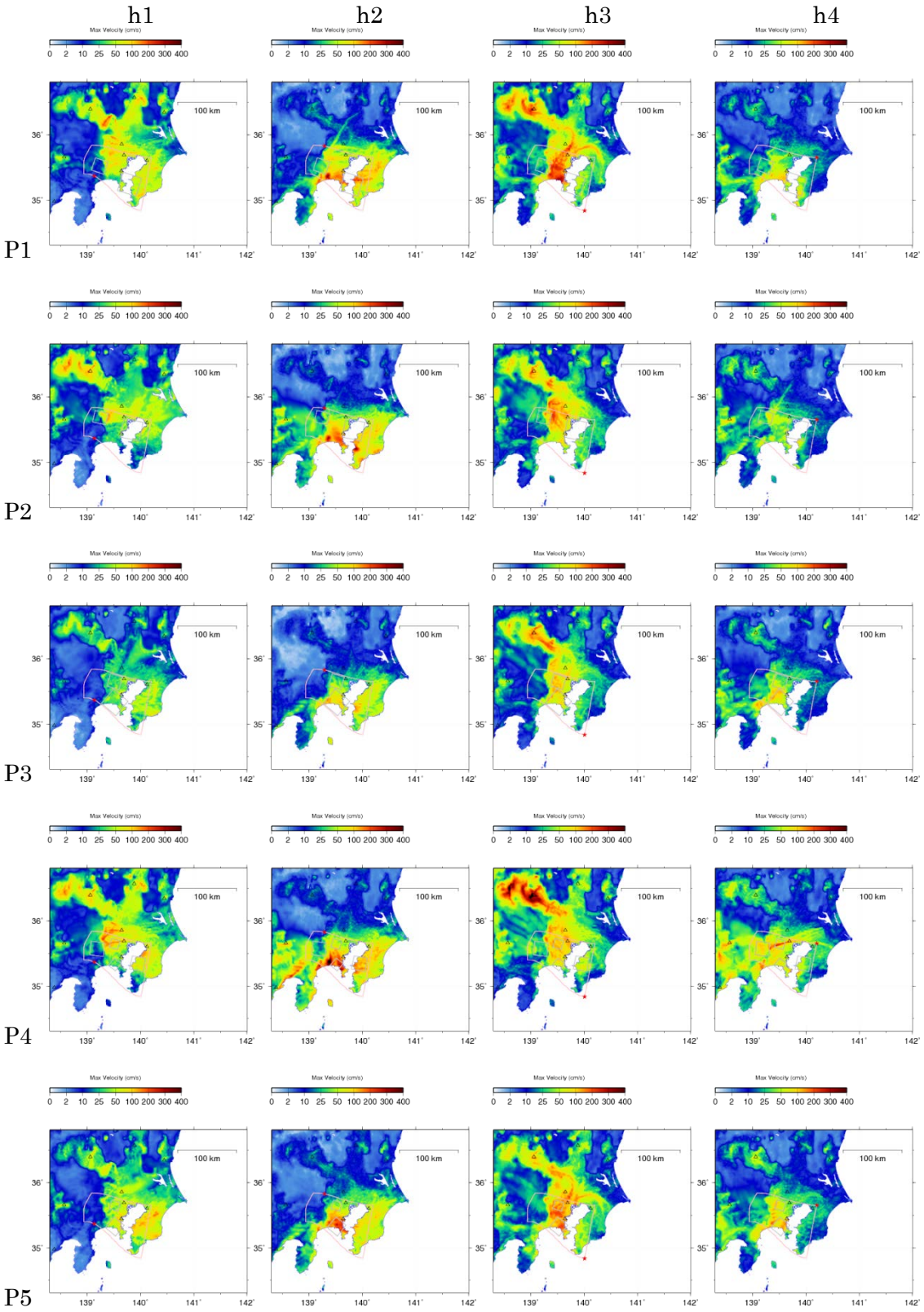


図 3.2-6　震源域 No.1 における 20 パターンの減衰定数 5%の速度応答スペクトル（周期 2 秒）。P はアスペリティ位置、h は破壊開始点位置の違いを表す。（破壊伝播速度の不均質性を考慮した場合）。

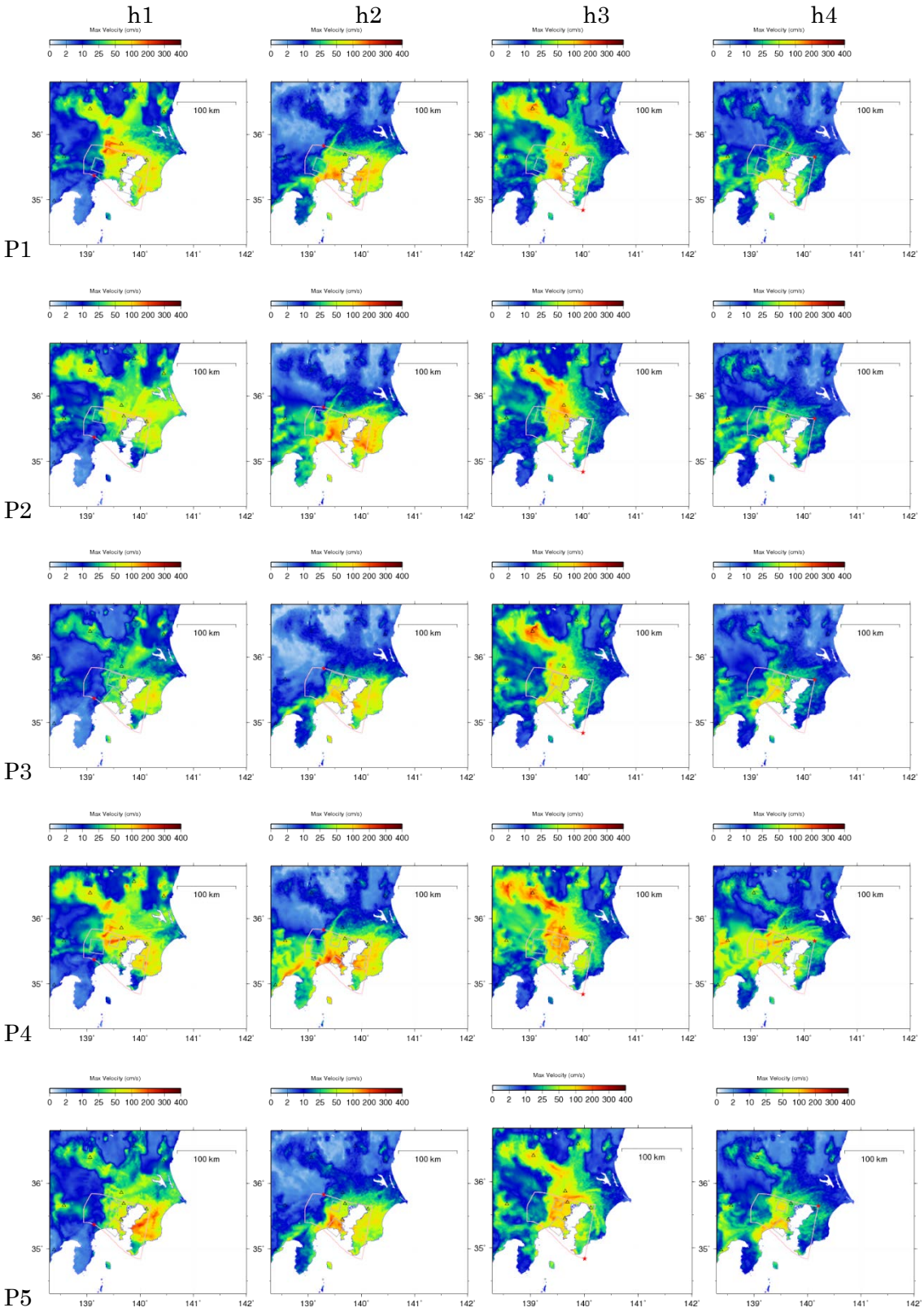


図 3.2-7　震源域 No.1 における 20 パターンの減衰定数 5%の速度応答スペクトル（周期 3 秒）。P はアスペリティ位置、h は破壊開始点位置の違いを表す。（破壊伝播速度の不均質性を考慮した場合）。

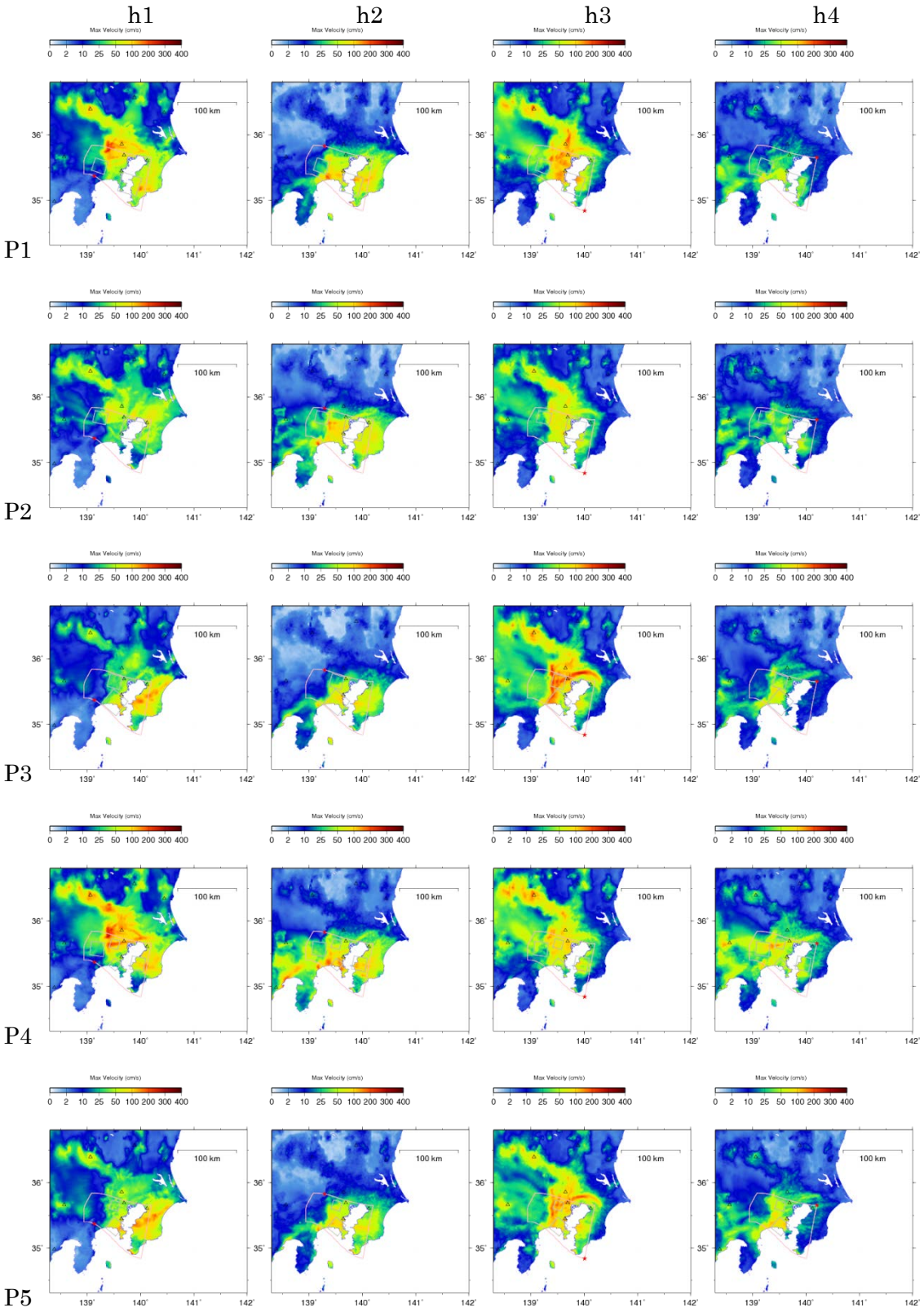


図 3.2-8　震源域 No.1 における 20 パターンの減衰定数 5%の速度応答スペクトル（周期 5 秒）。P はアスペリティ位置、h は破壊開始点位置の違いを表す。（破壊伝播速度の不均質性を考慮した場合）。

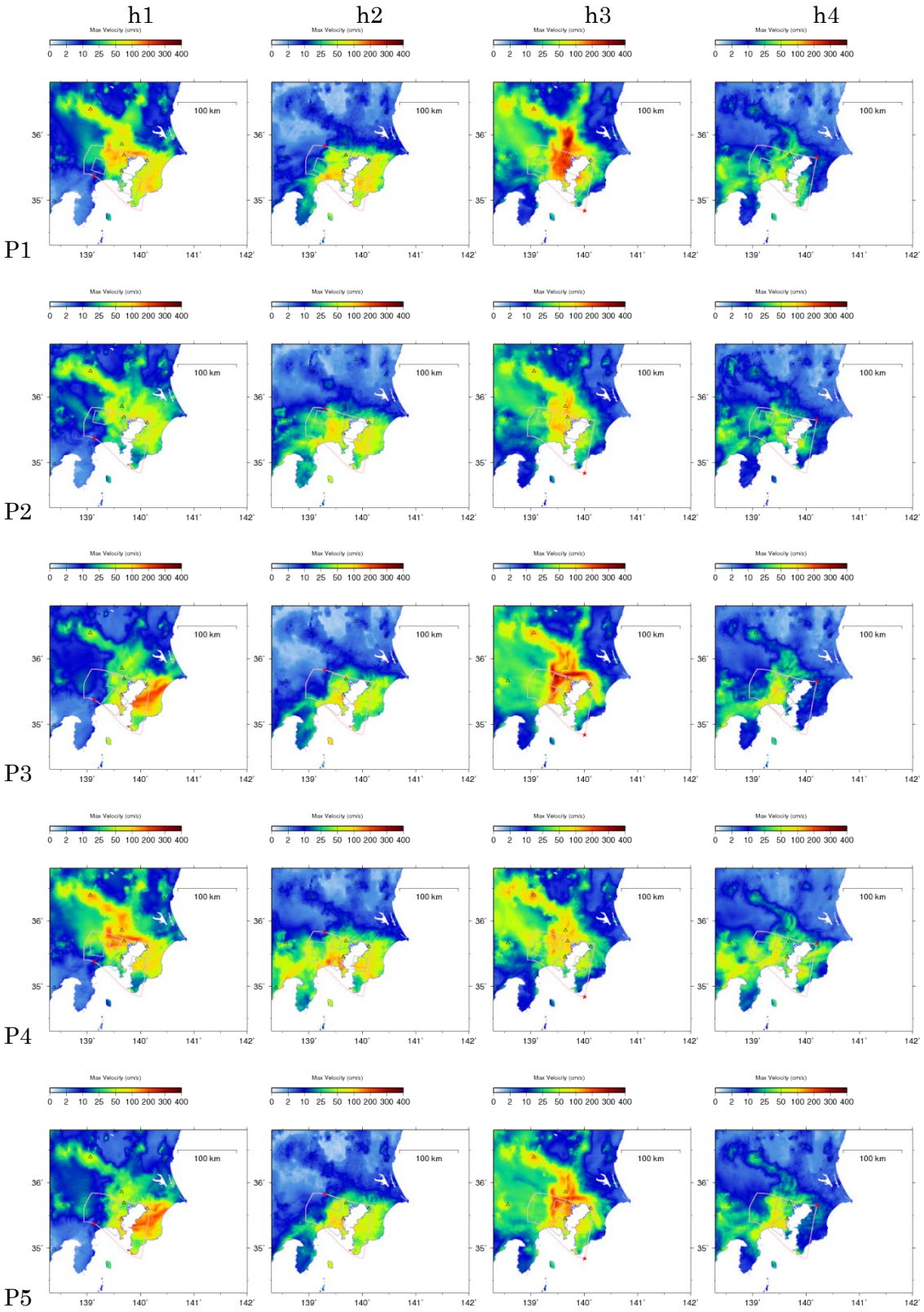


図 3.2-9　震源域 No.1 における 20 パターンの減衰定数 5%の速度応答スペクトル（周期 7 秒）。P はアスペリティ位置、h は破壊開始点位置の違いを表す。（破壊伝播速度の不均質性を考慮した場合）。

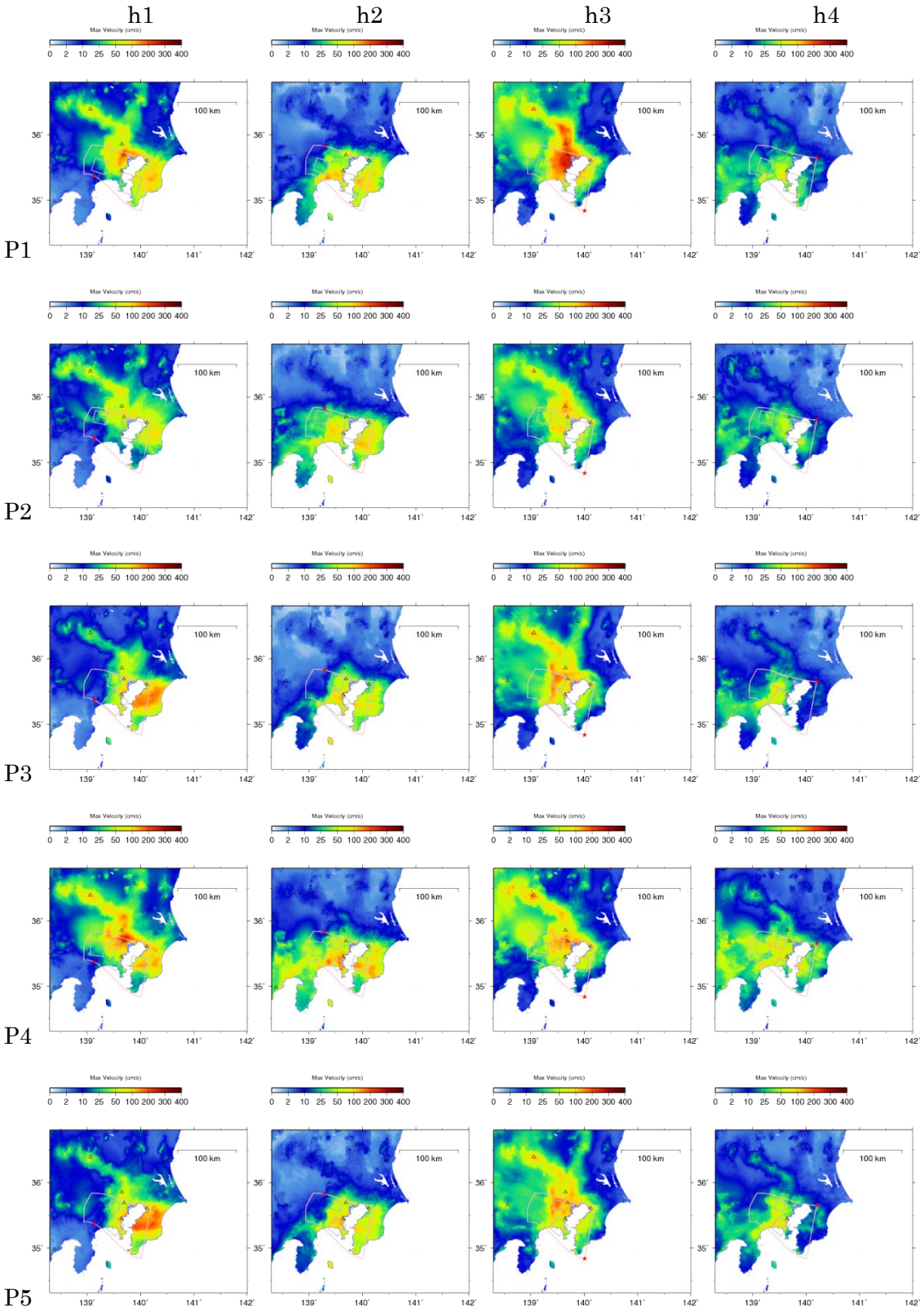


図 3.2-10　震源域 No.1 における 20 パターンの減衰定数 5%の速度応答スペクトル（周期 10 秒）。P はアスペリティ位置、h は破壊開始点位置の違いを表す。（破壊伝播速度の不均質性を考慮した場合）。

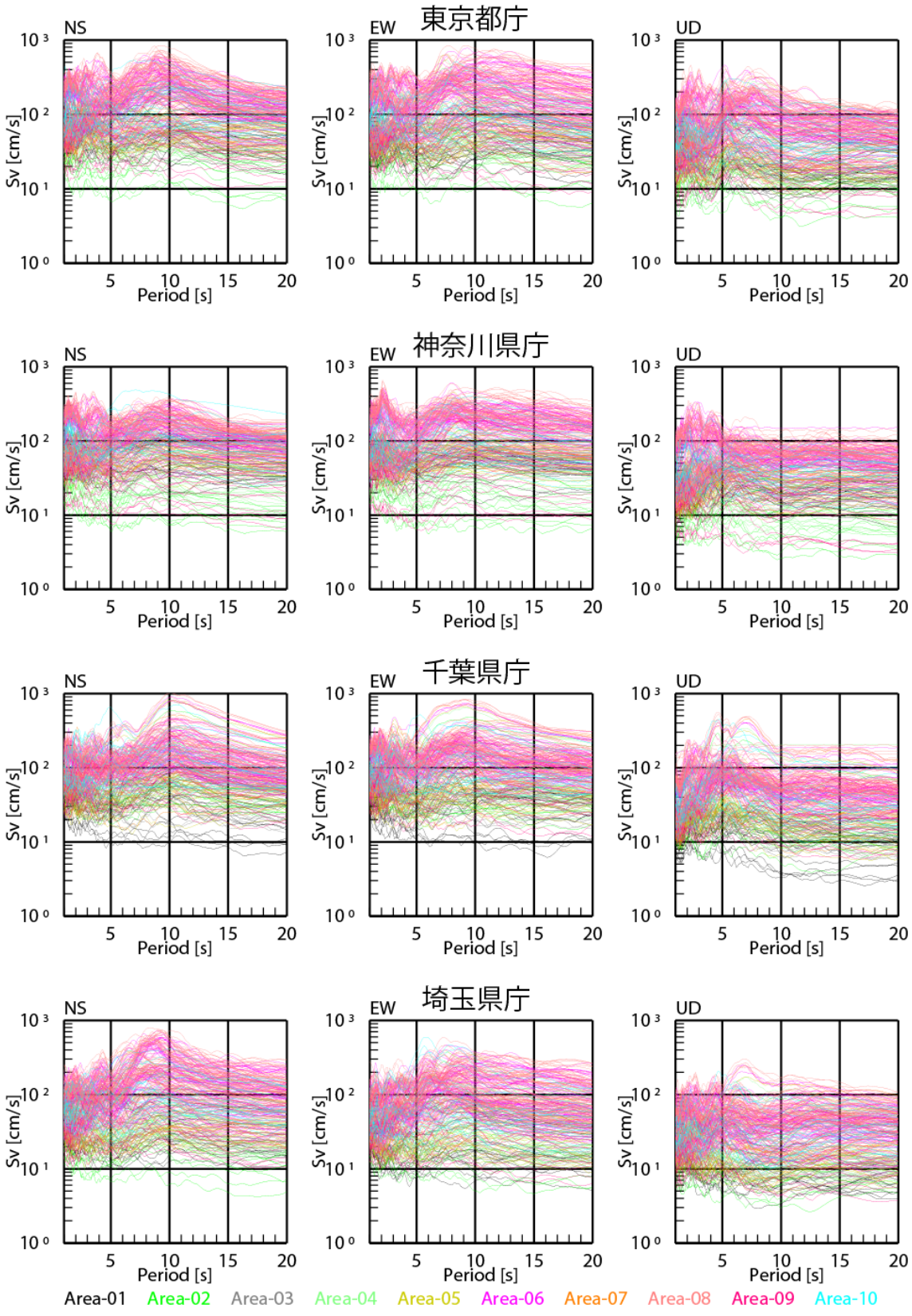


図 3.2-11　東京都庁、神奈川県庁、千葉県庁、埼玉県庁位置における速度応答スペクトル（破壊伝播速度の不均質を考慮した全 274 ケースを重ね描き）。

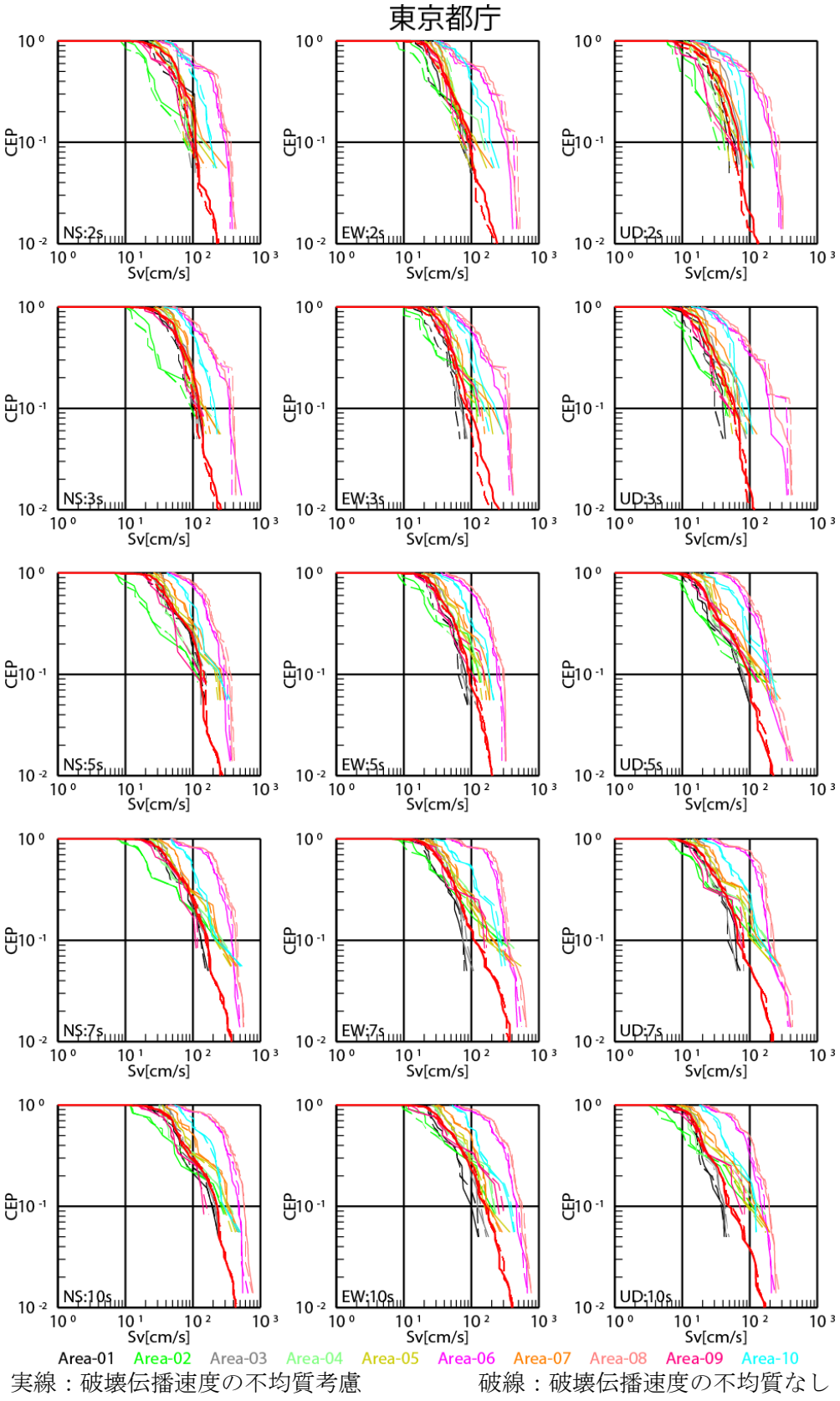


図 3.2-12　東京都庁位置における速度応答スペクトルのハザードカーブ。細線は各震源域に対する条件付き超過確率で赤太線は表 3.2-4 の重みをつけて統合したもの。

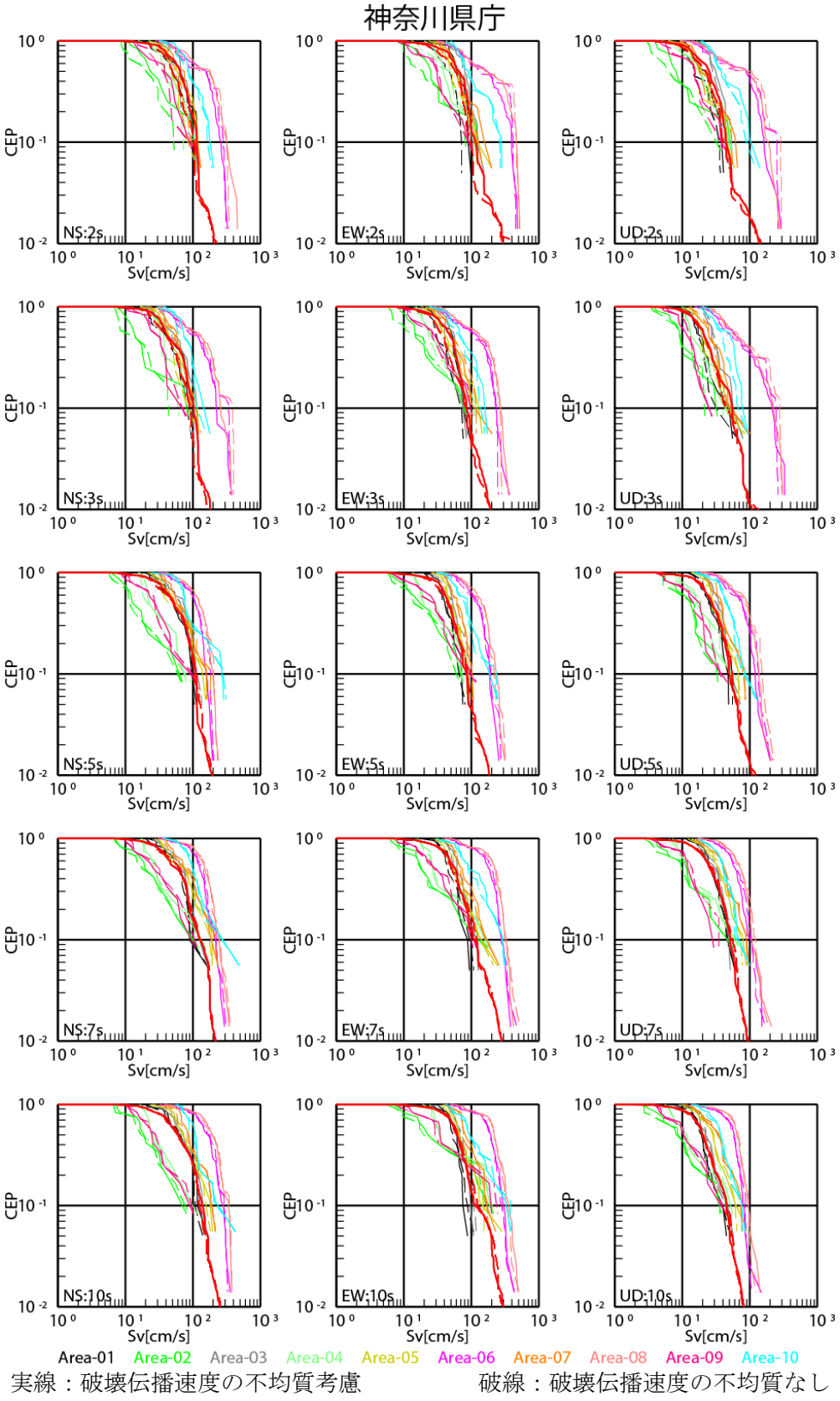


図 3.4-13　神奈川県庁位置における速度応答スペクトルのハザードカーブ。細線は各震源域に対する条件付き超過確率で赤太線は重みをつけて統合したもの。

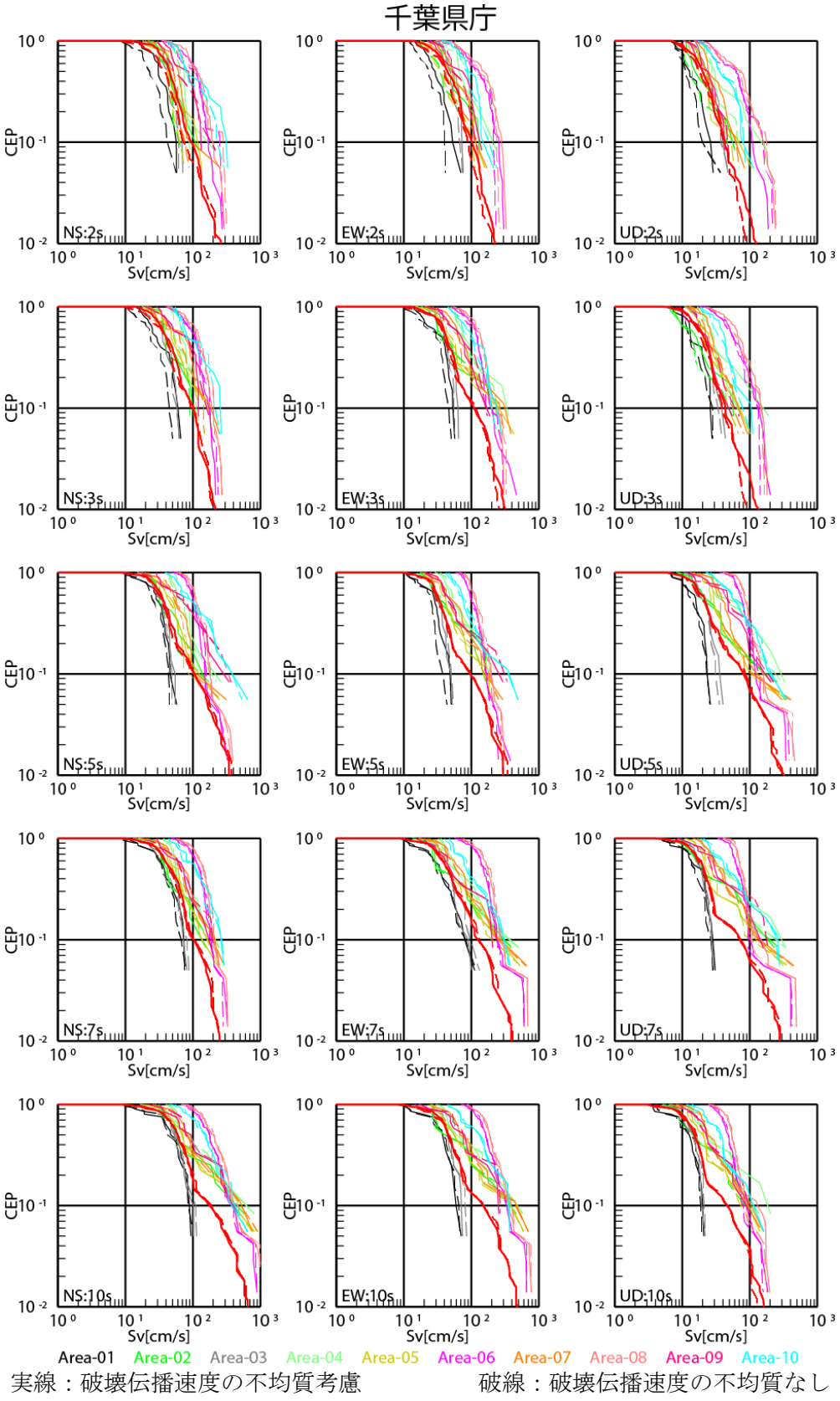


図 3.4-14　千葉県庁位置における速度応答スペクトルのハザードカーブ。細線は各震源域に対する条件付き超過確率で赤太線は重みをつけて統合したもの。

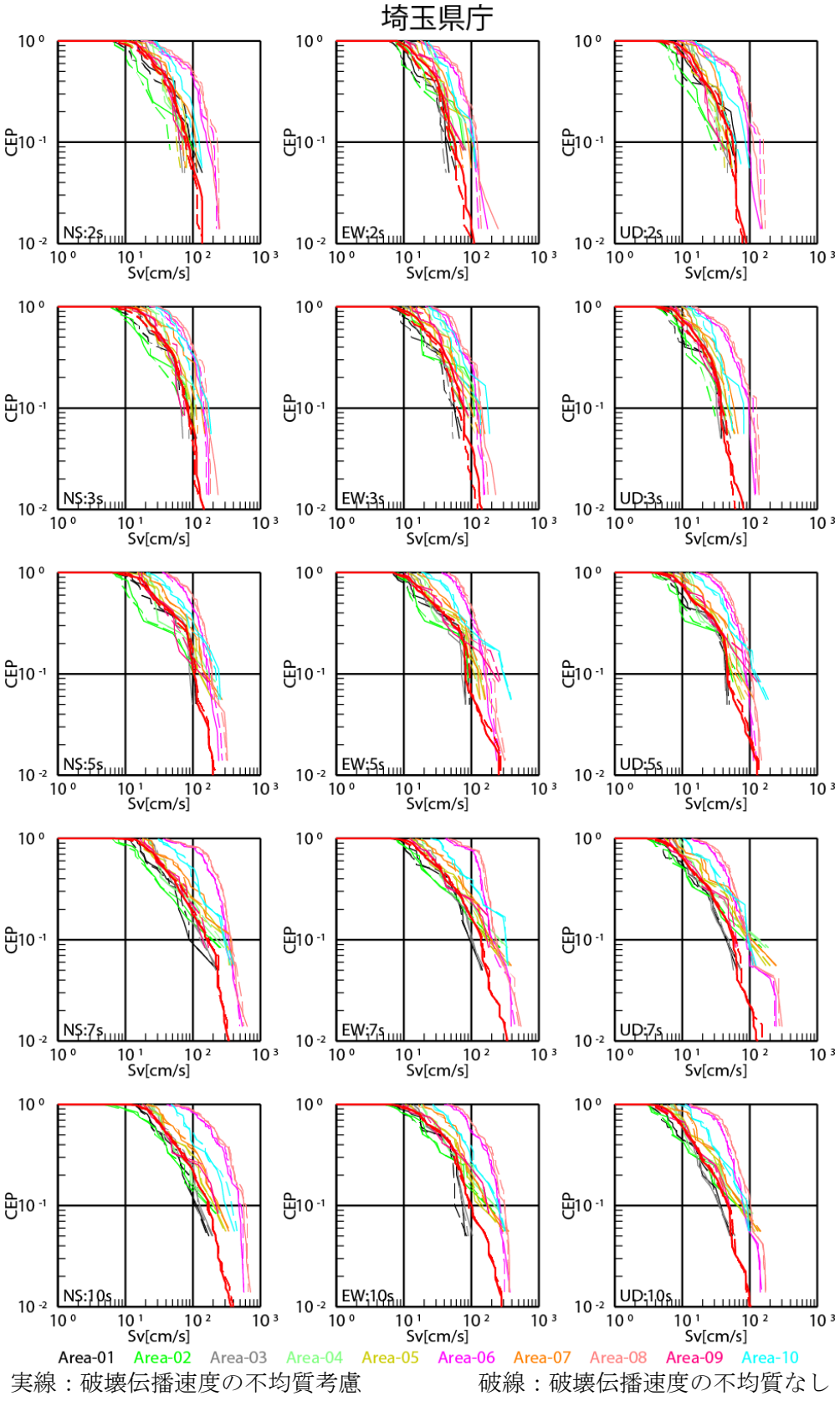


図 3.2-15　埼玉県庁位置における速度応答スペクトルのハザードカーブ。細線は各震源域に対する条件付き超過確率で赤太線は重みをつけて統合したもの。

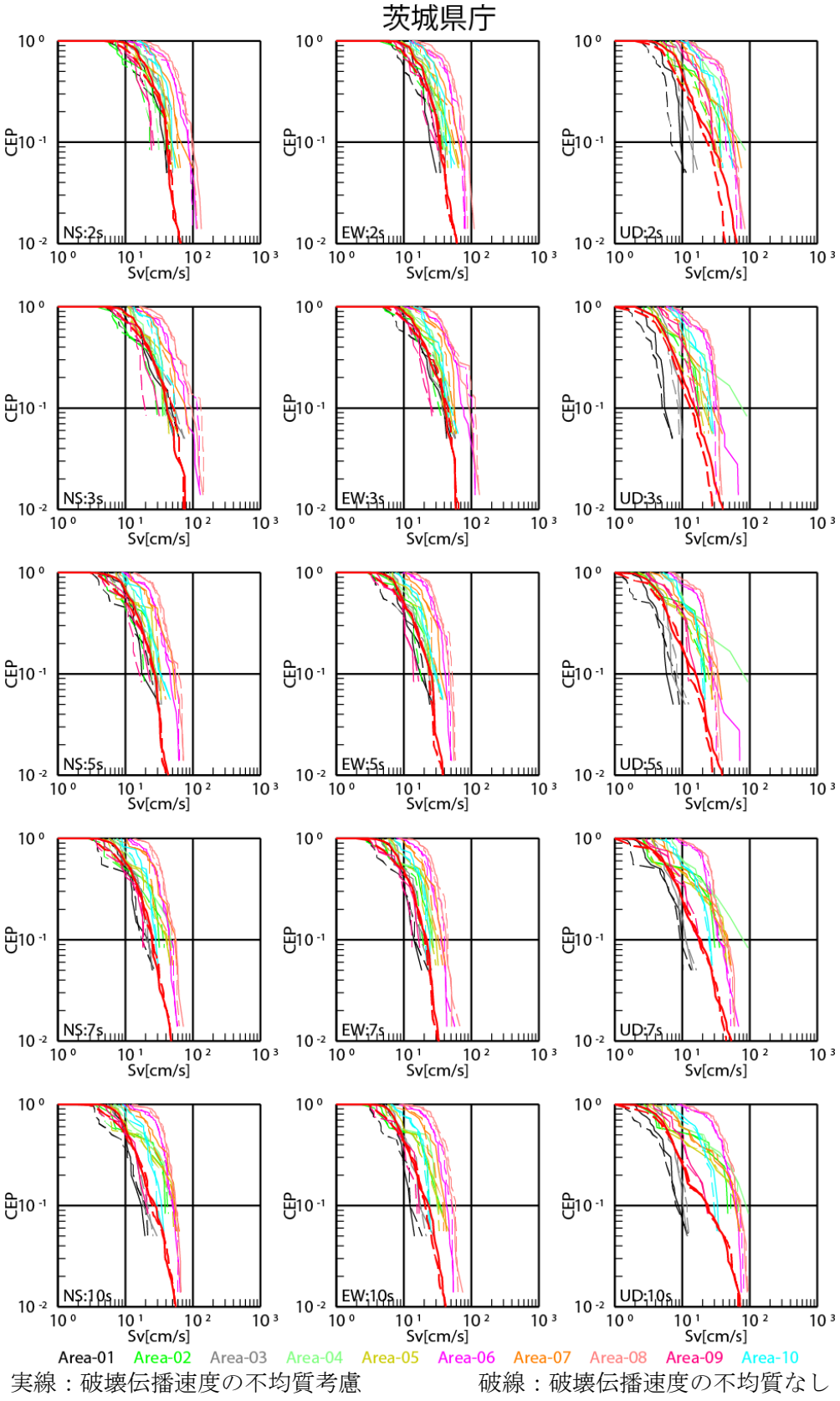


図 3.2-16　茨城県庁位置における速度応答スペクトルのハザードカーブ。細線は各震源域に対する条件付き超過確率で赤太線は重みをつけて統合したもの。

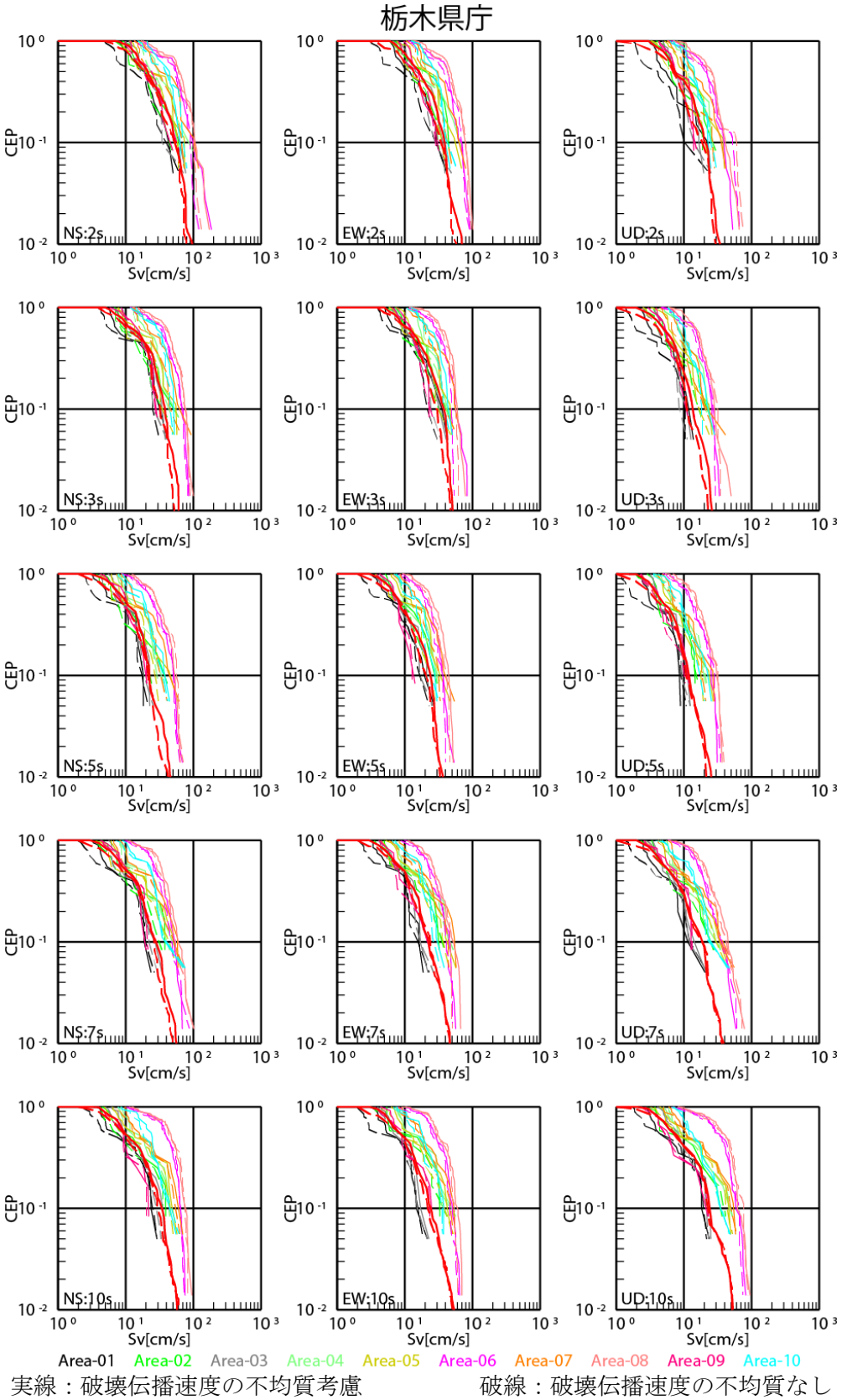


図 3.2-17　栃木県庁位置における速度応答スペクトルのハザードカーブ。細線は各震源域に対する条件付き超過確率で赤太線は重みをつけて統合したもの。

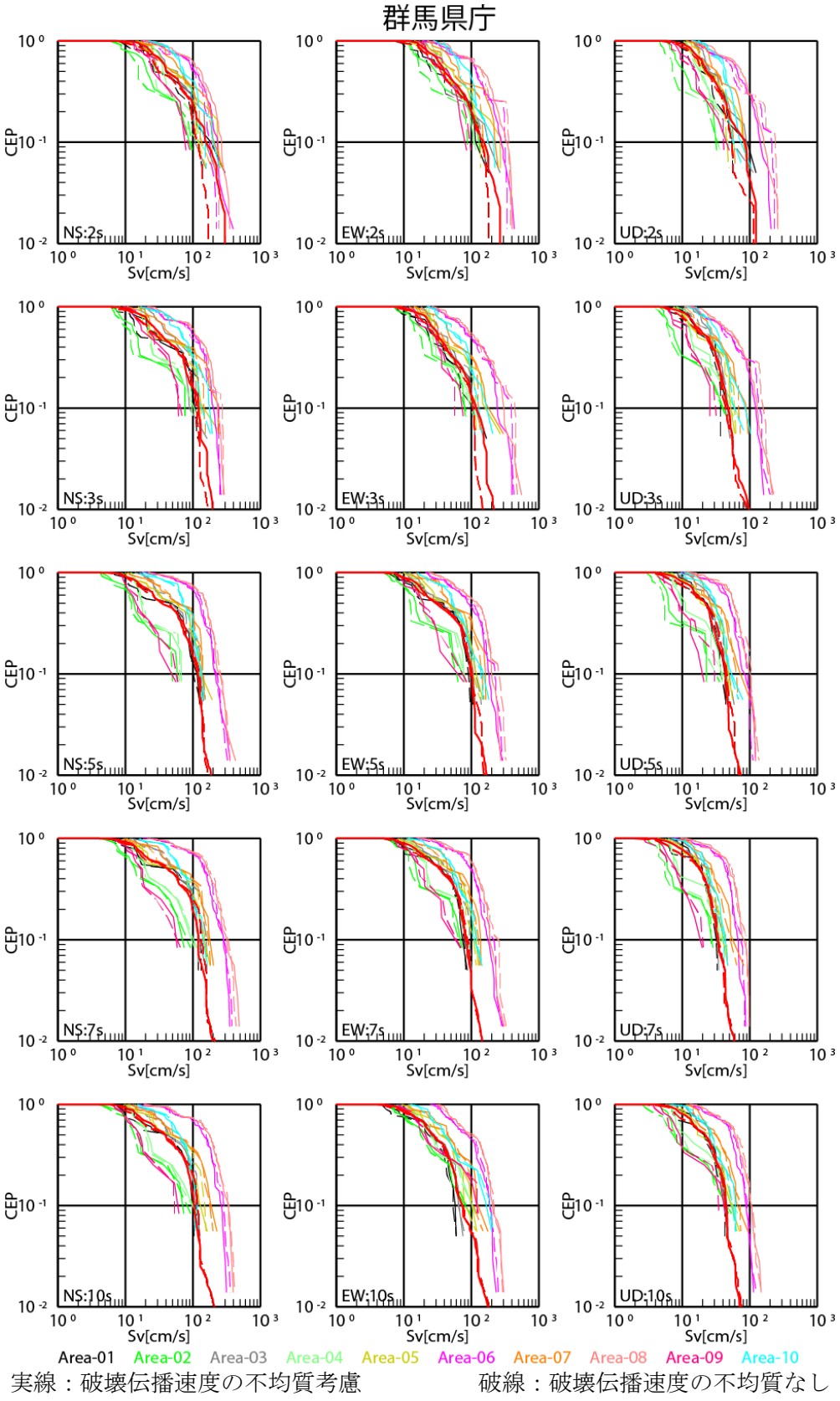


図 3.2-18　群馬県庁位置における速度応答スペクトルのハザードカーブ。細線は各震源域に対する条件付き超過確率で赤太線は重みをつけて統合したもの。

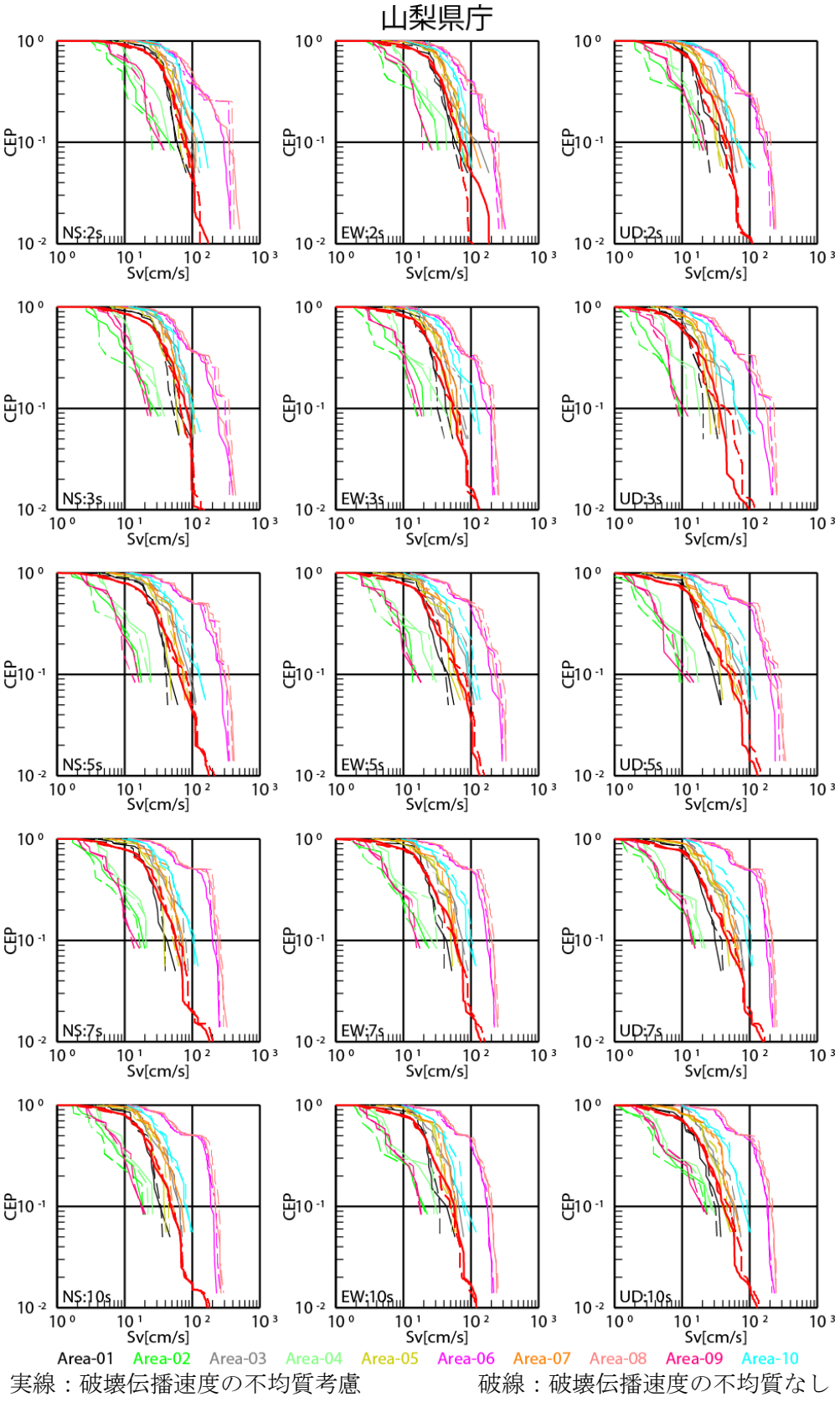


図 3.2-19　山梨県庁位置における速度応答スペクトルのハザードカーブ。細線は各震源域に対する条件付き超過確率で赤太線は重みをつけて統合したもの。

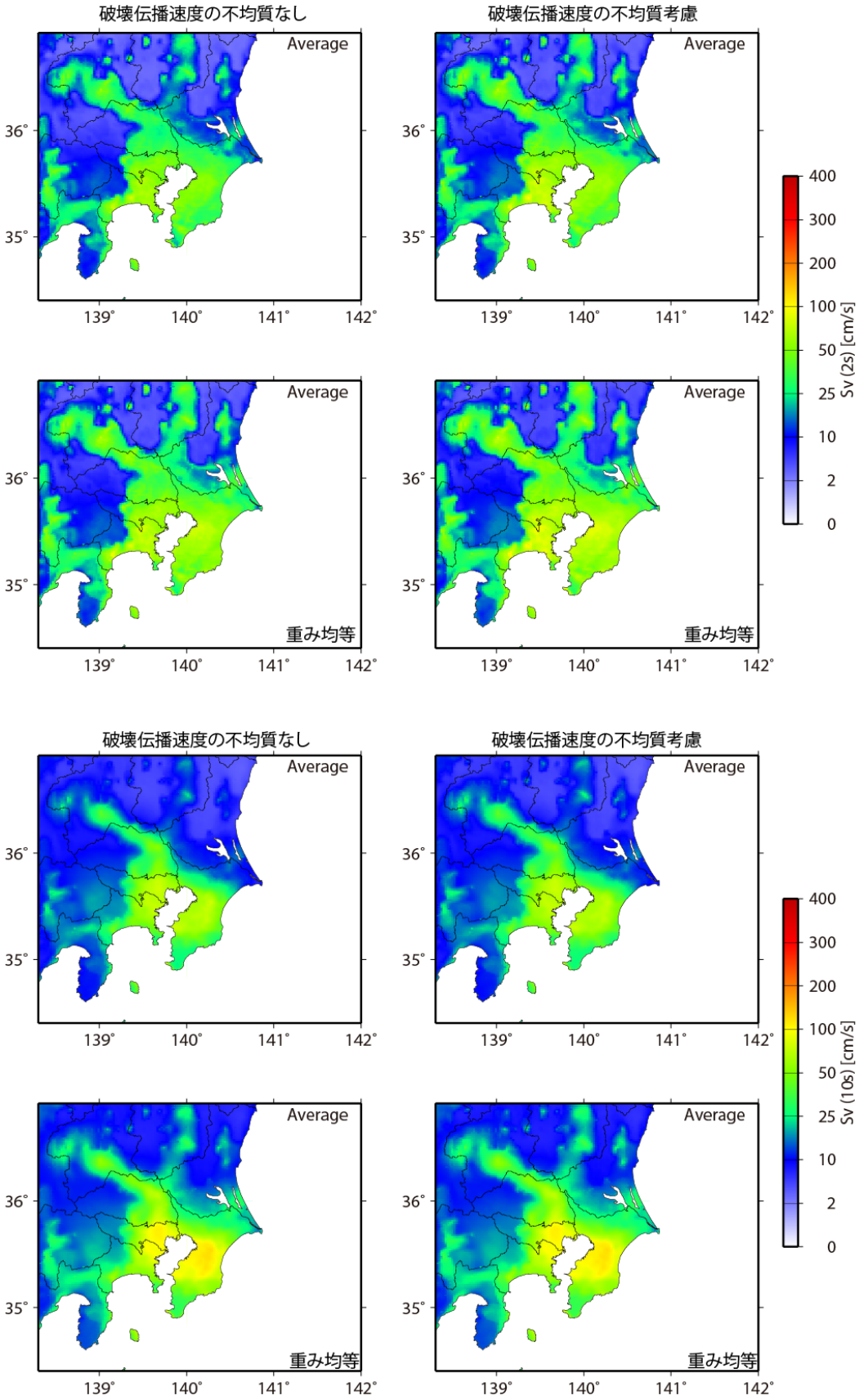


図 3.2-20　速度応答スペクトル（減衰定数 5%）の「平均値（条件付き超過確率 50%）」の分布。上）周期 2 秒、下）周期 10 秒。

(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M8クラスから最大クラスまでの地震を対象として274ケースの周期 1 秒以上を有効周期とする地震動シミュレーションを実施した。それらを、起こりやすさを勘案した「重み」を付すことによりハザードカーブとして統合するとともに超過確率が 50%となる地震動強さを「平均値」として、その分布を地図で示すハザードマップの例を提示した。

破壊伝播速度の不均質性を導入することにより、これまでの長周期地震動ハザード評価で対象としていた周期 3 秒程度よりも短い周期の地震動において、ハザードレベルが大きくなることが確認された。ただし、本検討で用いた破壊伝播速度の不均質性のモデル化手法は、マグニチュード 8 クラス以上の地震に対する検証が十分になされていない。そのためハザード評価結果の妥当性が保証されていない。従って、今後、実際の地震において得られた観測記録との比較などによる検証が必要である。

(d) 引用文献

Allmann, B. P. and P. M. Shearer, 2009, Global variations of stress drop for moderate to large earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, **114**, B01310, doi:10.1029/2008JB005821.

地震調査委員会，2014a，相模トラフ沿いの地震活動の長期評価（第二版）.

地震調査委員会，2014b，全国地震動予測地図 2014 年版　付録-1.

Kanamori, H. and D. Anderson, 1975, Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **65**, 1073-1095.

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，月間地球，号外 55，103-109.

3.3. 南海トラフの地震を対象とした地表面における広帯域地震動の基礎調査

(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地表面における広帯域地震動の基礎調査

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
独立行政法人　防災科学技術研究所	研究領域長	藤原　広行
独立行政法人　防災科学技術研究所	主任研究員	森川　信之
独立行政法人　防災科学技術研究所	主任研究員	前田　宜浩

(c) 事業の目的

大阪平野および濃尾平野の地下構造モデルの現状について整理し、南海トラフの地震を対象とした地表面における広帯域地震動評価を実施するにあたっての課題と解決に向けた方策を提示する。

(2) 事業の成果

(a) 事業の要約

大阪平野および濃尾平野の地下構造モデルに関する情報を収集・整理し、モデル化に用いられているデータや手法について、首都圏の浅部・深部統合地盤モデルと比較した。

(b) 事業の成果

1) 大阪平野

大阪平野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として、大阪府による地震被害想定（大阪府、2007）および、「上町断層帯における重点的な調査観測研究」（文部科学省研究開発局・京都大学防災研究所、2013）について調査した。

（A）大阪府

大阪府では、平成 19 年に地震被害想定が実施されている（大阪府、2007）。地震動及び液状化の想定は、500m メッシュで行われているが、大阪市域は 250m メッシュが採用されている。地盤モデルは、「深部地盤構造モデル」と「浅部地盤モデル」に分けて作成されている。このうち、浅部地盤モデルの作成には、関西圏地盤情報データベース（KG-NET・関西圏地盤情報協議会）のボーリングデータおよび市町村等からの提供データが用いられている。ただし、ボーリングデータの分布図は示されているものの（図 3.3-1）、具体的な数は記載されていない。

（B）上町断層帯における重点的な調査観測研究

上町断層帯における重点的な調査観測研究において、強震動計算が実施されている（文部科学省研究開発局・京都大学防災研究所，2013)。強震動計算においては、深部地盤と浅部地盤それぞれ分けて実施している。浅部地盤モデルについては、吉田・他（2010）が用いられている。吉田・他（2010）のモデルは、大阪平野のボーリングデータをもとに、1/2 地域メッシュ（約 500m メッシュ）ごとに鉛直方向 2m ごとの地質と N 値をまとめ、大阪平野における地質・N 値と S 波速度の関係式を用いることで S 波速度構造モデルとしている。

2) 濃尾平野

濃尾平野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として、愛知県および名古屋市による地震被害想定（愛知県、2014；名古屋市、）について調査した。

（A）愛知県

愛知県では、平成 23 年東北地方太平洋沖地震を教訓として、平成 23 年度から平成 25 年度にかけて地震被害予測調査を最新の知見に基づいて見直した（愛知県、2014)。そのうち、地盤モデルの作成に関する部分について、愛知県（2014）を引用して以下に示す。

地盤構造のモデル化は、250mメッシュ単位で図 3.3-の流れにしたがって行われている。

① ボーリングデータ、土質試験結果、ＰＳ検層等を収集
② 250m メッシュの微地形を設定
③ ボーリングデータ及び 250m メッシュの微地形をもとに、250m メッシュの代表ボーリングを設定
④ ③に土質ごとの N 値と S 波速度の関係から、250m メッシュごとに速度構造モデル（浅部地盤構造モデル）を設定
⑤ 最新の既往の深部地盤構造モデルを整理
⑥ 既往の微動計測資料及び地震観測記録の整理を行い、これらが不足している地域を中心に微動アレイ探査、単点微動計測を実施
⑦ ④の浅部地盤構造モデルと⑤の深部地盤構造モデルを統合し、地震基盤から地表までの統合モデルを設定
⑧ ⑦の統合モデルによるスペクトルと⑥常時微動及び地震観測記録によるスペクトルを比較し、統合モデルの修正を行い、高精度の地盤構造モデルを構築

新たに収集したボーリング柱状図は、59,454 であり、前回（平成 14 年度愛知県東海地震・東南海地震等被害予測調査）収集したボーリングと比較し、データの欠損や同一地点のボーリングを除いた結果、57,062 本となっている。分布は、図 3.3-に示す通り、愛知県内だけでなく、隣接する静岡県、岐阜県、三重県内の一部地域も含まれている。

また、愛知県内の地形・地質構成に関してもその概要がまとめられている（表 3.3-)。

（B）名古屋市

名古屋市では、中央防災会議による南海トラフ巨大地震の被害想定を踏まえ、50m メッシュごとの平成 26 年 2 月 3 日に独自の被害想定を発表している（名古屋市、2014）。その中では、36,400 本のボーリングデータを用いて作成した地盤データ（浅部地盤構造モデル）により、地震の波形が地表面にどのように伝わるかを計算していると述べられているが、地盤のモデル化の方法やボーリングデータの分布等に関する記述は見当たらず、詳細については不明である。

3) 南関東地域を対象とした浅部・深部統合地盤モデルとの対比

Senna et al. (2013) は、南関東地域における浅部・深部統合地盤モデルの作成に関する検討が行われている。浅部・深部統合地盤モデルは、周期 0.5 秒以上の地震動計算の精度を高めるため、深部地盤モデルと浅部地盤モデルの接続部分の改良を含めた統合化がなされたものである。モデル作成の流れは図 3.3-4 に示すとおりである。ボーリングデータ等をもとに初期モデルを作成し、地震観測記録および稠密な微動観測によりチューニングを行う。関東平野については 10 万本を超えるボーリングデータが収集されており（図 3.3-5）、地盤モデルは、250m メッシュで作成されている。

ボーリングデータの数については、大阪府、愛知県とも関東平野と匹敵する。また、愛知県のモデルは南関東地域のモデルと同様に浅部・深部統合モデルとして作成されている。ただし、微動観測の密度は低い。一方、大阪府のモデルは浅部地盤と深部地盤が別々となっており、今後統合したモデルの作成が望まれる。

(c) 結論ならびに今後の課題

大阪平野および濃尾平野における最近の地震動計算で用いられている浅部地盤モデルについて調査した。ボーリングデータの数は関東平野と匹敵している。大阪府のモデルでは、深部地盤と浅部地盤が別々であるのに対して、愛知県のモデルは浅部・深部統合地盤モデルが作成されている。大阪平野については、浅部・深部統合地盤モデルの作成に向けた検討が望まれる。なお、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）において、東海地域における浅部・深部統合地盤モデルの作成が進められる予定となっており、その成果が期待される。

(d) 引用文献

愛知県，2014，平成 23 年度～25 年度　愛知県東海地震・東南海地震・南海地震等被害予測調査報告書，平成 26 年 3 月.

近藤善教・坂田章吉・長沼和明・安江勝夫，1991，日本の地盤　愛知県の地盤，地質と調査 2，28-43.

文部科学省研究開発局・京都大学防災研究所，2013，上町断層他における重点的な調査観測研究　平成 22～24 年度成果報告書.
名古屋市，2014，南海トラフ巨大地震の被害想定について，平成 26 年 2 月 3 日.
大阪府，2007，大阪府自然災害総合防災対策検討（地震被害想定）　報告書.
Senna, S., T. Maeda, Y. Inagaki, H. Suzuki, H. Matsuyama and H. Fujiwara, 2013, Modeling of the subsurface structure from seismic bedrock to the ground surface for a broadband strong motion evaluation, Journal of Disaster Research, 8, 889-903.

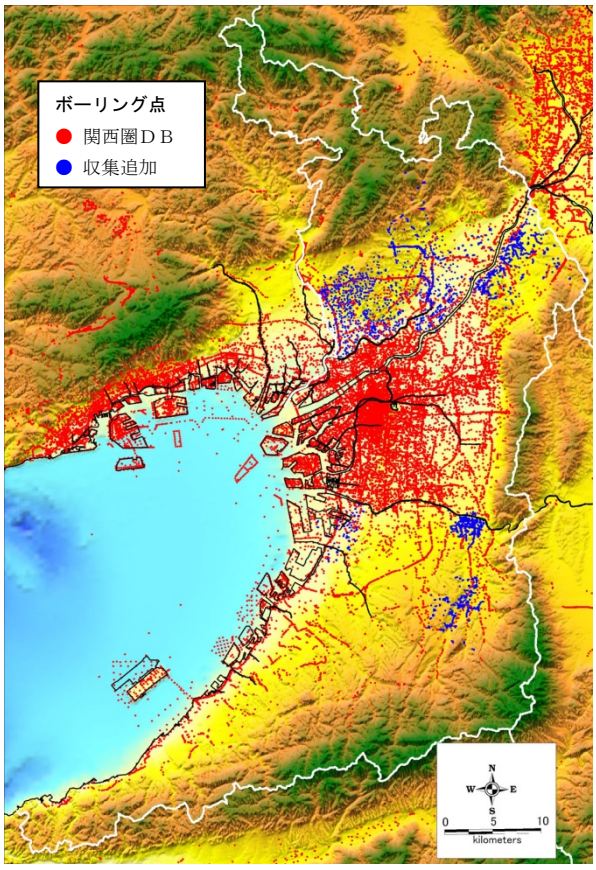


図 3.3-1　大阪府（2007）の浅部地盤モデル作成に用いられたボーリングデータの分布（大阪府、2007 の図 2-2）。

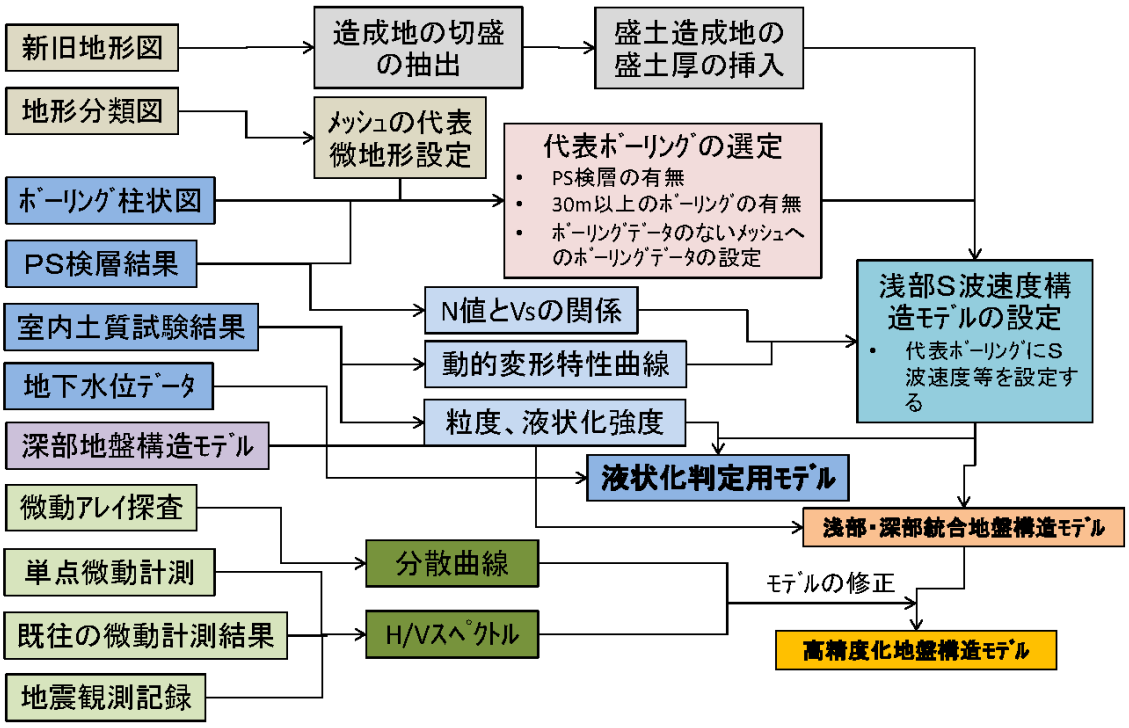


図 3.3-2　地盤（層構造）モデルの作成手順（愛知県、2014 の図 2-2）。

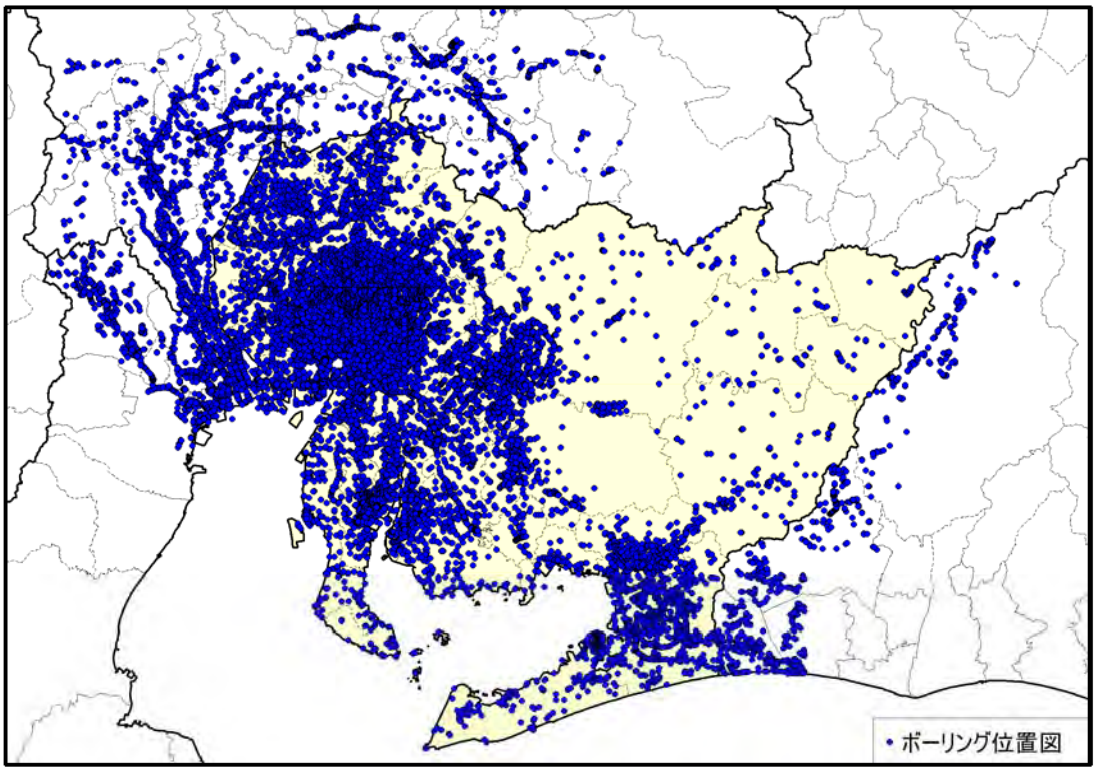


図 3.3-3　愛知県（2014）のボーリング分布図（愛知県、2014 の図 2-3）。

表 3.3-1　愛知県の地形別地質構成　近藤・他（1991）（愛知県、2014 の表 2-1)。

地質時代				地質学的区分の名称		
				伊勢湾北部臨海地区	岡崎平野周辺知多半島	東三河地区
新生代	第四紀	完新世（沖積世）		南陽層	沖積層	沖積層
		更新世（洪積世）	後期	濃尾層 第一礫層 鳥居松礫層 大曽根層 熱田層（上部層／下部層）	低位段丘層 碧海層（中位段丘層）	牛川累層（小坂井台地・豊橋段丘礫層）
			中期	第二礫層 海部累層 第三礫層 弥富累層	亀崎層（高位段丘層）	二川累層（高師原礫層／渥美累層）
			前期	八事層 唐山層	武豊層（高位段丘層）	
	新第三紀	鮮新世		東海層群，瀬戸層群（矢田川累層／瀬戸陶土層）	東海層群 常滑層群	
		中新世		瑞浪層群（品野層）	岡崎層群 師崎層群	設楽層群
中・古生代				美濃帯中・古生層 花崗岩類	領家花崗岩類 領家変成岩類	領家変成岩類 三波川変成岩類 秩父帯中・古生層

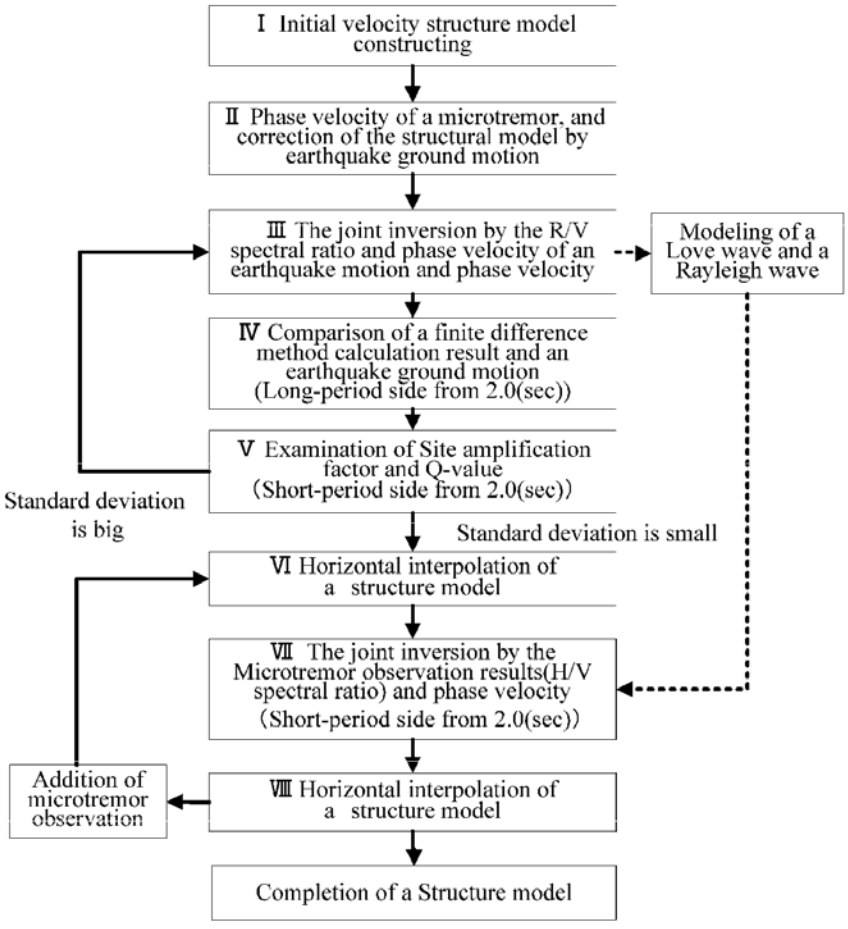


図 3.3-4　南関東地域における浅部・深部統合地盤モデル作成の流れ（Senna et al., 2013)。

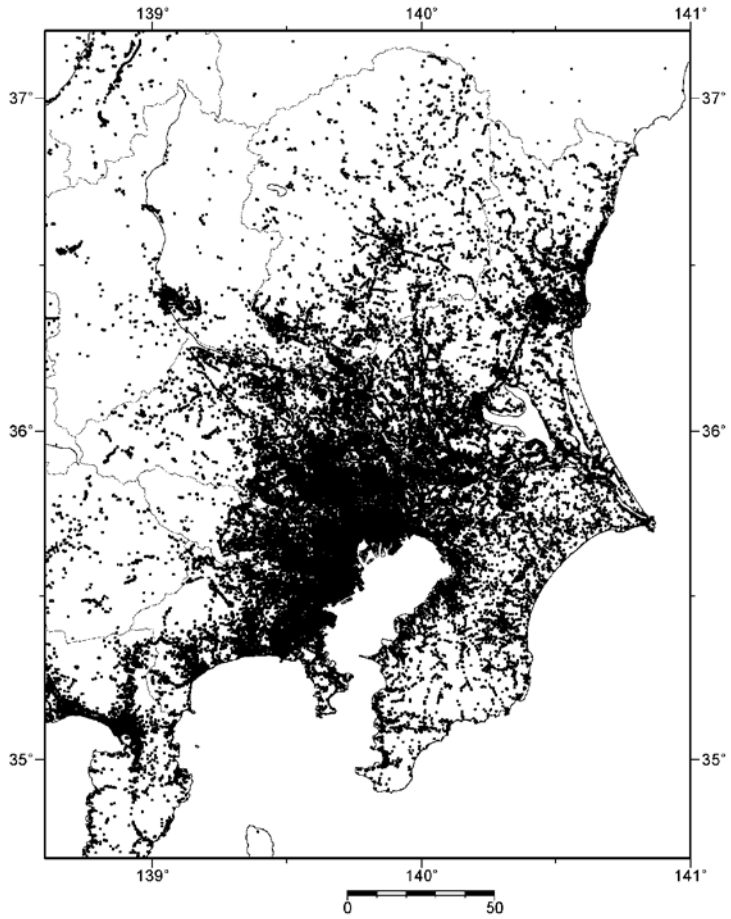


図 3.3-5　南関東地域において収集されているボーリングデータ（Senna et al., 2013）。

3.4. 長周期地震動ハザード評価結果等の提示方法の検討等

(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提示方法の検討等

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
独立行政法人　防災科学技術研究所	研究領域長	藤原　広行
独立行政法人　防災科学技術研究所	主任研究員	森川　信之
独立行政法人　防災科学技術研究所	主任研究員	河合　伸一
独立行政法人　防災科学技術研究所	契約研究員	東　宏樹
独立行政法人　防災科学技術研究所	契約研究員	前田　宜浩

(c) 事業の目的

長周期地震動ハザードの評価結果及び評価に用いた地震活動モデル、震源モデル、地下構造モデルについて、インターネットを通して国民に広く公開する手段を提示する。また、一般国民の防災・減災に資するため、長周期地震動の性質、被害事例や対策例を現状の耐震基準等も踏まえて公開する手段を提示する。

(2) 事業の成果

(a) 事業の要約

過去に実施した長周期地震動ハザードの評価結果や 3.2 節で示した広帯域地震動ハザード評価結果について、評価のために作成したモデルも含めてインターネットを通して閲覧・ダウンロードできるシステムを試作し提示した。また、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を提示するとともに、現状の長大構造物における耐震基準や規格について、法律等も含めて調査し、長周期地震動の性質や過去の被害事例とともに広く周知するための方策を提示した。

(b) 事業の成果

1) 長周期地震動ハザード評価データの公開方法に関する検討

防災科学技術研究所では、「地震ハザードの共通情報基盤」として「地震ハザードステーション J-SHIS」を開発し、2005 年より運用を開始している。J-SHIS は、地震調査研究推進本部より公表された確率論的地震動予測地図や震源断層を特定した地震動予測地図をウェブ上で閲覧できるだけでなく、計算結果や評価に用いた震源モデル、地下構造モデル等の各種データをダウンロードできる機能も備えている。このような J-SHIS のシステム・機能は、長周期地震動ハザード評価の結果そのものだけでなく、評価に用いた地震活動モデル、震源モデル、地下構造モデルに関する情報をウェブ上で提供するためのシステムにも活用できる。そこで、J-SHIS を参考にした長周期地震動ハザードに関する情報の公開システム

について、平成 25 年度に引き続き検討を行った。平成 26 年度に実施した主な内容は以下の 2 点である。

・平成 23 年度～平成 25 年度までに実施した南海トラフおよび相模トラフを対象とした地震の長周期地震動シミュレーション結果すべてを閲覧・ダウンロードできるようにした。
・特定地点（都道府県庁所在地）のみでなく、計算範囲内の陸域約 1km 四方メッシュごとにハザード情報を表示できるようにした。

（A）トップページ

長周期地震動ハザード評価においては、以下に示すように多種かつ大量のデータが存在しており、これらをウェブ上で提示あるいは提供するため、ある程度の項目に分類・整理し、トップページから利用者の必要とするそれぞれの項目に移動する形をとる。ここでは、大きく以下の 4 項目

・ハザードマップ（確率論的な長周期地震動ハザードマップ）
・シナリオマップ（個別ケースの計算結果）
・地下構造モデル
・データダウンロード

に分類している（図 3.4-1）。

提供する情報は、「長周期地震動ハザード評価結果そのもの」と「長周期ハザード評価のもととなった情報・データ」の大きく二種類に分類できる。以下でそれぞれについて述べる。

（B）長周期地震動ハザード評価結果そのものに関する情報

長周期地震動ハザード評価結果そのものの情報として、3.2 節でも示したように、平成 25 年度までの検討において提示した

・長周期地震動ハザードマップ（ある条件付き超過確率に対する地震動強さ分布を示した地図）
・個別ケース（シナリオ）の地震動強さ分布を示した地図
・任意地点における地震動強さの数値データ（ハザードマップ、シナリオマップ）
・特定地点におけるハザードカーブ
・特定地点において抽出された代表的な波形データ（平均、＋1σなど）と対応シナリオ
・特定地点における個別ケースの波形データ

が挙げられる。このうち、最初の二つは全体を概観できる情報であるのに対して、後の四つは個別地点での詳細な情報である。また、別の見方として、ハザードマップとハザードカーブ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」の確率論的地震動予測地図、個別ケースに関する地図・データは震源断層を特定した地震動予測地図に対応する。代表的な波形データと対応シナリオはハザードマップ・ハザードカーブから特定のシナリオを抽出するものであり、確率論的な評価とシミュレーションによる決定論的な評価をつ

なぐものとして位置づけられる。

長周期地震動ハザード評価では、将来発生する地震に対する震源モデルの様々な不確実性を考慮したきわめて多数の震源モデルによる地震動シミュレーションを実施してきた。情報の公開にあたっては、考慮したすべてのモデルについて行うことが望ましい。そのため、平成 23 年度から平成 25 年度まで実施してきたすべての長周期地震動シミュレーションを網羅するよう、データの再整備を行った。結果として、南海トラフの地震 469 ケース、相模トラフの地震 176 ケースである。なお、本検討では各シナリオを区別する便宜上、それぞれの長周期地震動シミュレーションを実施した 2011 年度（平成 23 年度）、2012 年度（平成 24 年度）、2013 年度（平成 25 年度）と表記した。

ハザードレベルの高低を概観する上ではハザードマップは有効であるが、一方で特定の地点において防災・減災対策を立案・実施するためには、その地点における詳細なハザード情報が必要となる。そのためには、これまで示してきた都道府県庁位置のみではなく、任意の地点における詳細なハザード情報を知ることができるようにすべきである。そこで、計算範囲内を地域標準メッシュの第 3 次区画（約 1km 四方）のメッシュごとに分割し、各メッシュで長周期地震動ハザード情報を提供できるよう、特定地点情報の表示について平成 25 年度に提案したシステムを改良した。ただし、ハザードカーブについてはその解釈、利活用に専門的な知識が必要であることもあり、本検討では代表地点のみのままとしている。なお、全国地震動予測地図における地表での地点情報の提供は 1/4 地域メッシュ（約 250m 四方）であるが、これは表層地盤の影響を考慮した地表での評価結果である。平成 25 年度までに実施した長周期地震動ハザード評価は工学的基盤上の値であるが、全国地震動予測地図でも工学的基盤上では 3 次メッシュでの情報提供となっていることから、現状では 3 次メッシュで十分な解像度であると言える。

それぞれの表示例を図 3.4-2～3.4-6 に示す。地図表示では、対象とする地震動強さ（最大速度、速度応答スペクトル（周期 3 秒、5 秒、7 秒および 10 秒）の分布だけでなく、対応する地震の震源域も合わせて表示する。ハザードマップでは南海トラフ、相模トラフそれぞれの最大クラスの地震の震源域を、シナリオマップではアスペリティや破壊開始点位置も含む震源モデルが表示される。背景地図として、Google Map を用いている。地点情報については、ある程度拡大したマップ上で任意の 3 次メッシュをクリックすることにより、最大速度等の数値を表示することができる。

（C）長周期地震動ハザード評価のもととなった情報・データ

（B）で示した長周期地震動ハザード評価のもととなる情報・データとして、

・地震活動モデル：各領域に付与した「重み」の情報
・震源モデル：個別ケースの各種震源パラメータ
・地下構造モデル：長周期地震動シミュレーションに用いた地下構造モデル。

が挙げられる。これらのデータは、対象となる地震に関する知見や長周期地震動と地下構造モデルとの関係に関する知見を提供することができるほか、利用者が独自の考えや情報に

基づく「重み」づけや震源モデル（あるいは地下構造モデル）を用いたハザード評価を行うことも可能となることから、評価結果データと同様、公開することは有益である。

これらのデータについて、（B）の長周期地震動ハザード評価結果と同様、平成 23 年度～平成 25 年度まで実施した地震動シミュレーションの震源モデルを網羅できるよう改修した。平成 25 年度の検討では、地震調査研究推進本部より新たに公表された南海トラフの地震の長期評価（第二版）（地震調査委員会、2013）および相模トラフ沿いの地震の長期評価（第二版）（地震調査委員会、2014）を反映したモデルであり、平成 24 年度以前と震源域の設定方法（領域）が若干異なっている。しかしながら、平成 24 年度以前のモデルについて新しい長期評価で否定されたわけではなく、ハザード評価の上では有効である。このような点を踏まえて、実施年度ごとに分けて震源モデルを整理した。

これらの表示例を図 3.4-7～図 3.4-9 に示す。地震活動モデルについては「ハザードマップ」、個別の震源モデルについては「シナリオマップ」の表示で見ることができる。一方、地下構造モデルについては、ハザード評価結果とは別の画面で面的な表示を行う。

（D）データダウンロード機能

地図データ、震源モデルおよび地下構造モデルデータについて、ダウンロードページを別途用意している（図 3.4-10）。シナリオマップのデータに関して、利用する側からは個々のシナリオでデータが得られる方が便利であると考えられるが、数百にもおよぶケース数の中から任意のケースを選択するような困難であった。そこで本検討では、震源域ごとに複数のケースを統合した形でデータを提供する方針とした（図 3.4-11）。なお、地下構造モデルについては地震本部のウェブページから公開されている全国 1 次地下構造モデル（暫定版）を用いているため、地下構造モデルのダウンロードについては、当該ページにリンクを貼っている（図 3.4-12）。

長周期地震動ハザード評価では、多数の地震動シミュレーションが実施される。本検討における南海トラフの地震波 500 ケース超であり、計算範囲全体を約 1km 四方ごとにそのデータ量はきわめて膨大なものとなる。このような情報の効率的な提供方法について、今後検討していく必要がある。また、本検討では Google Map を背景地図として用いているが、地図画像を多種多様な場面で利用できるよう、例えば、国土地理院の地図を背景地図とすることなども今後必要となるであろう。



図 3.4-1　試作した長周期地震動ハザード情報提供ウェブページのトップ画面。背景は Google Map。



図 3.4-2　長周期地震動ハザードマップの表示例。

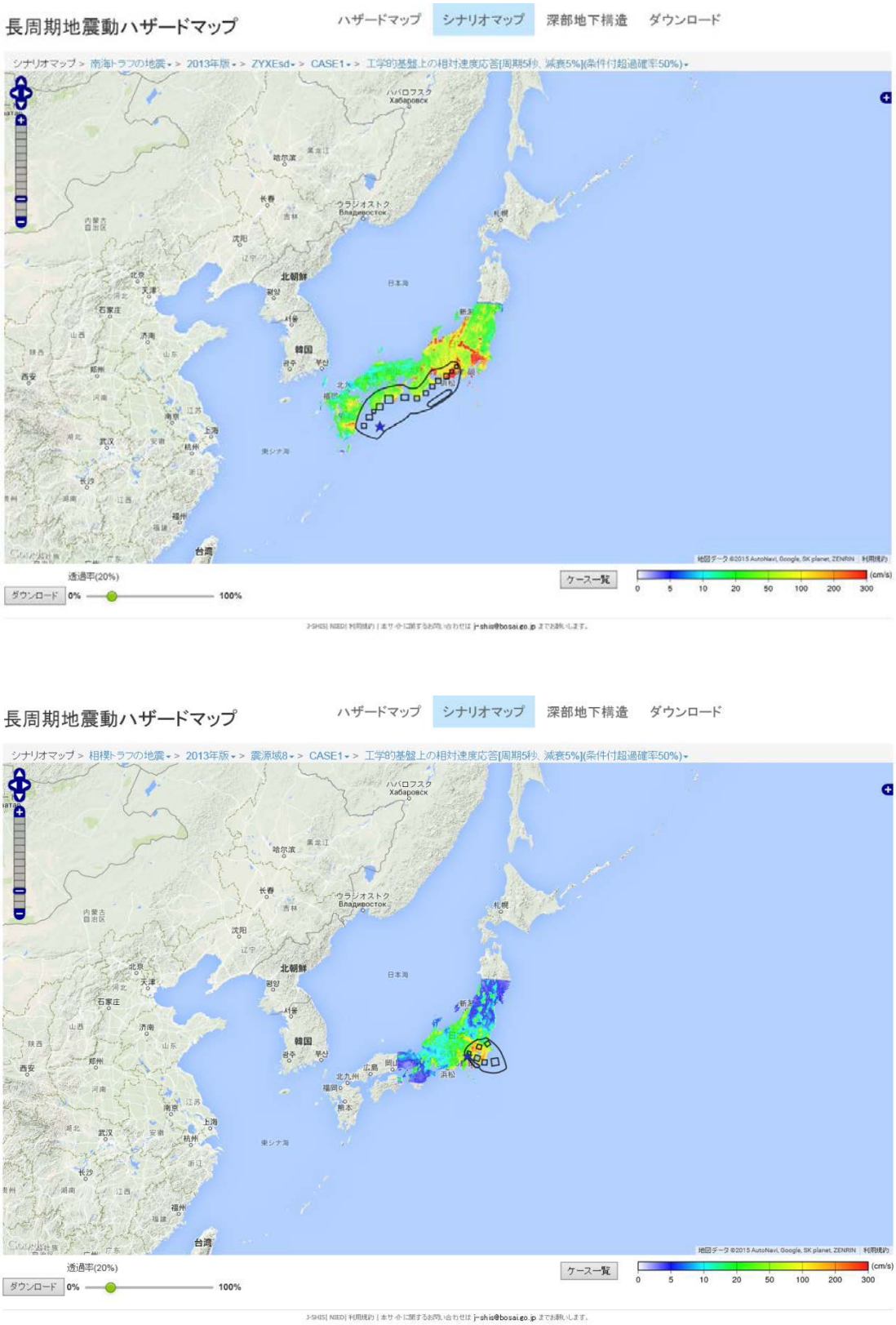


図 3.4-3　シナリオマップの表示例（上：南海トラフの地震、下：相模トラフの地震）。

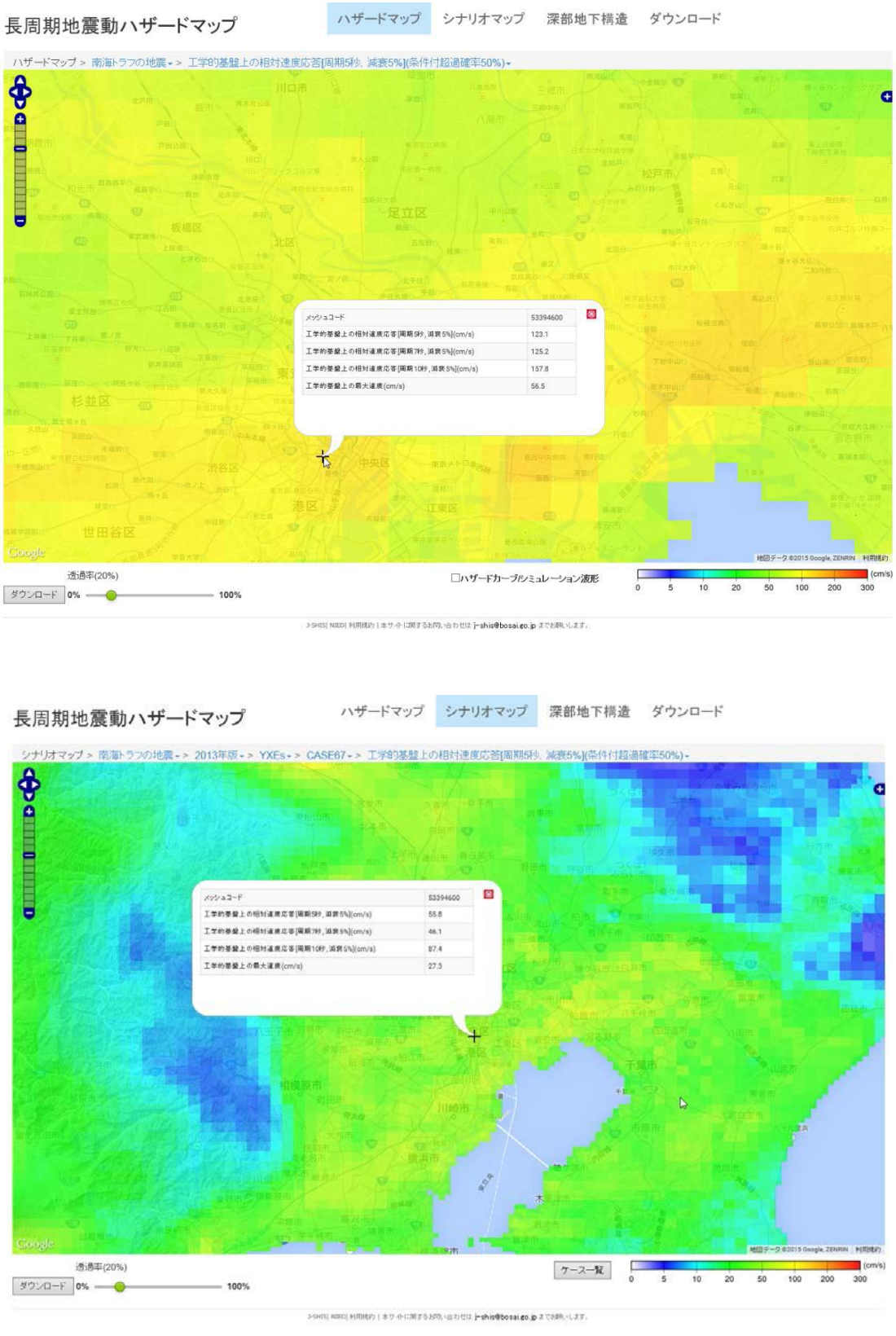


図 3.4-4　特定地点の情報表示。（上：ハザードマップ、下：シナリオマップ）

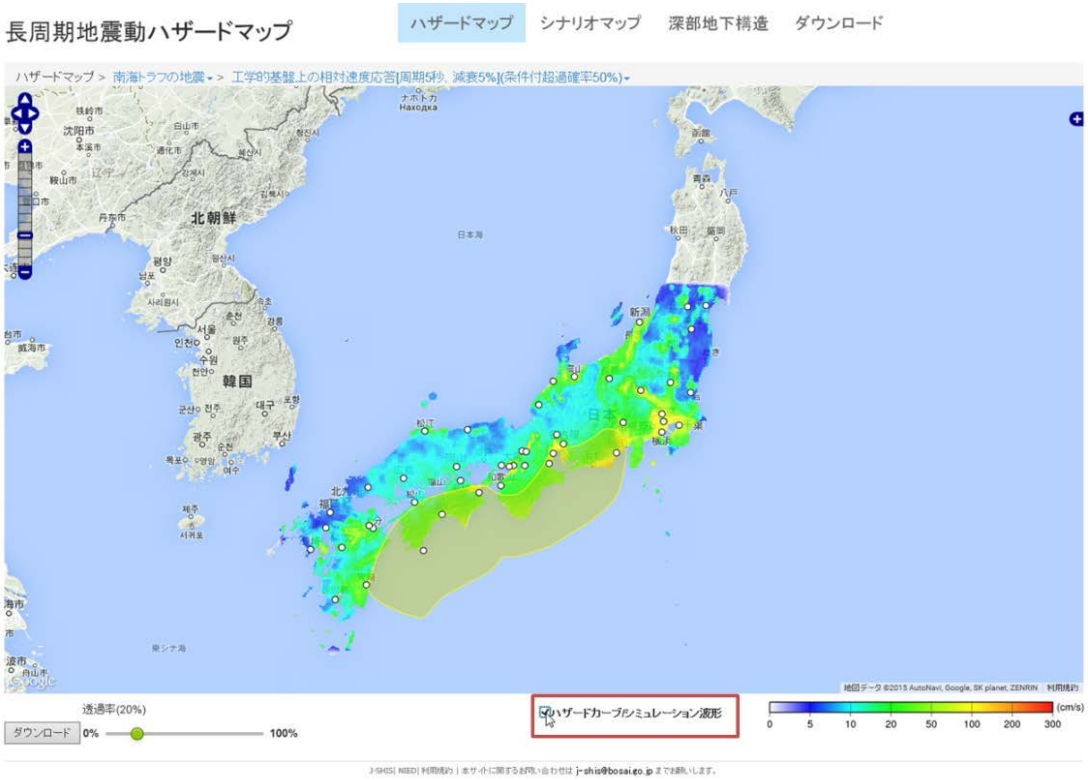


図 3.4-5　ハザードカーブを表示する代表地点。

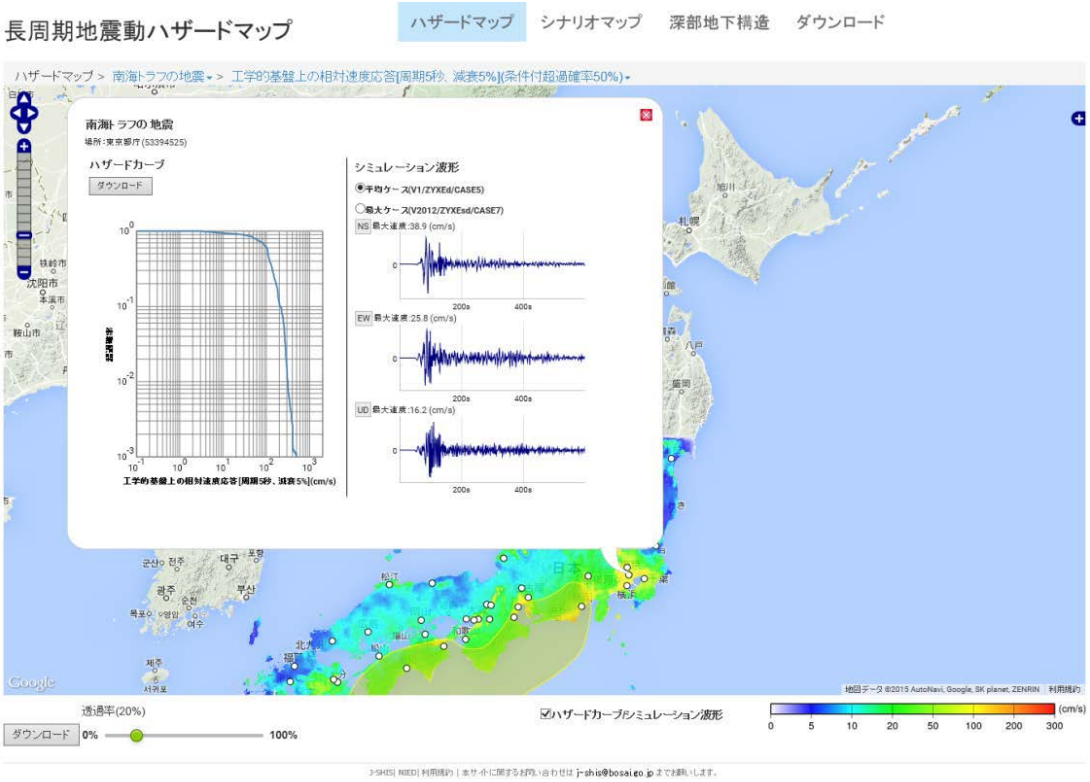


図 3.4-6　特定地点のハザードカーブおよび抽出されたシナリオの波形の表示例。

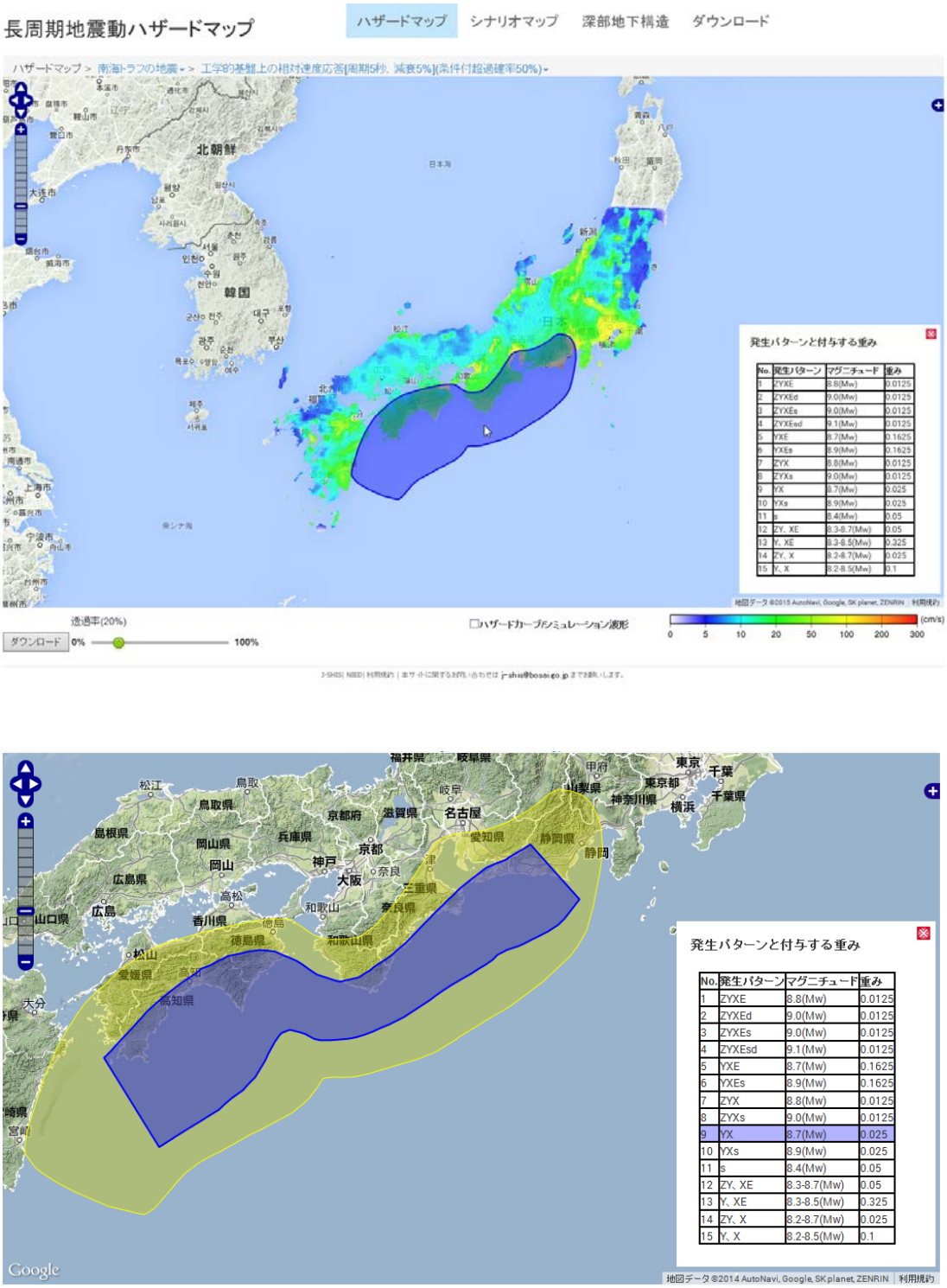


図 3.4-7　地震活動モデル（震源域と「重み」）の表示例（上：南海トラフ全体の表示、下：個別震源の表示）。

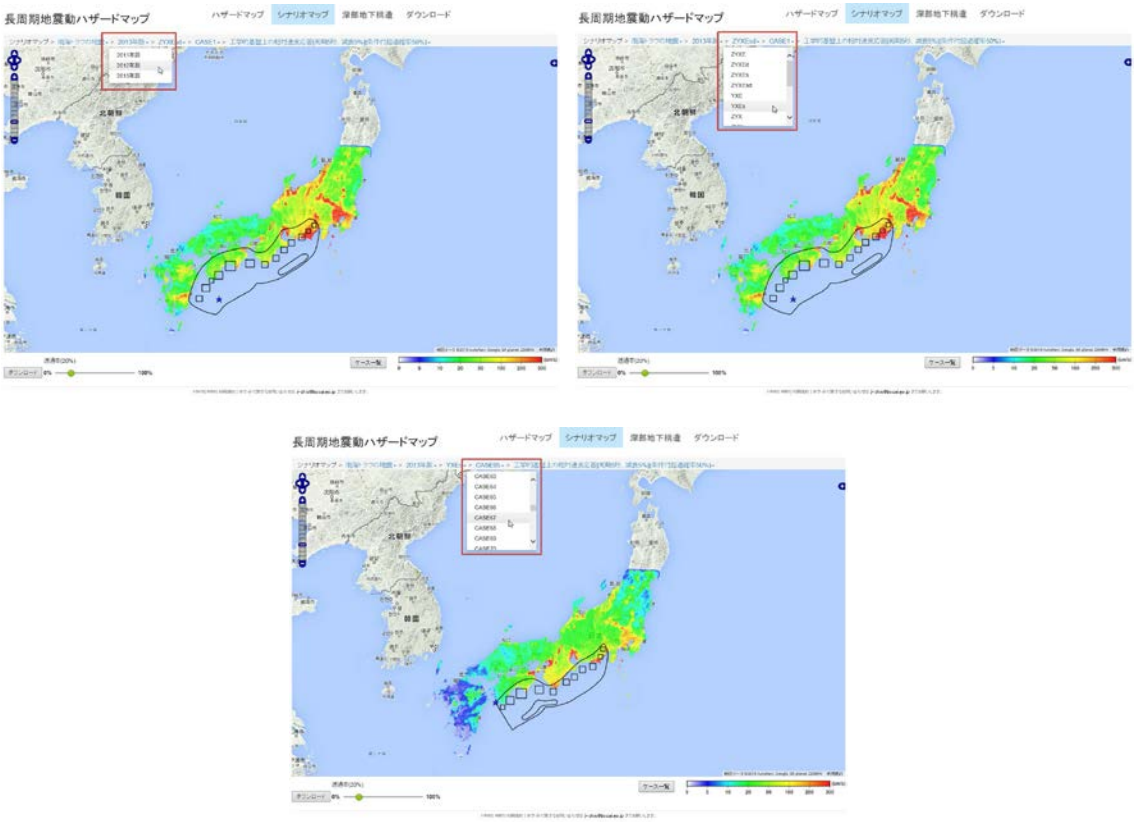


図 3.4-8　シナリオマップにおける個別震源モデルの選択（左上：震源域、右上：年度、下：ケース）。

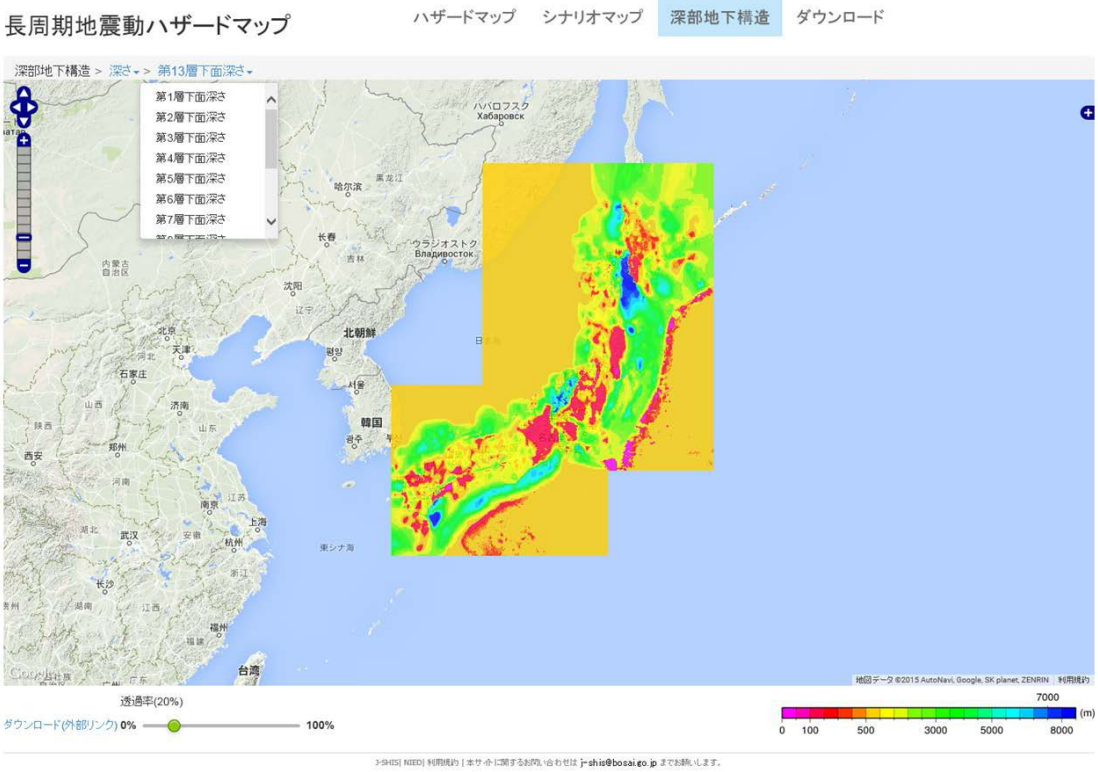


図 3.4-9　地下構造モデルの表示例（地震基盤上面深さ分布）。



図 3.4-10　データダウンロードページのメニューリスト例。



図 3.4-11　震源域ごとに統合したシナリオマップデータのダウンロード画面。



	相模トラフの地震	相模トラフの地震(震源域1)	12KB
		相模トラフの地震(震源域2)	20KB
		相模トラフの地震(震源域3)	33KB
		相模トラフの地震(震源域4)	22KB
		相模トラフの地震(震源域5)	35KB
		相模トラフの地震(震源域6)	85KB
		相模トラフの地震(震源域7)	30KB
		相模トラフの地震(震源域8)	71KB

・深部地下構造(外部リンク)

ページ先頭に戻る

長周期地震動予測地図 データダウンロード

代表地点における長周期地震動の速度波形データや速度応答スペクトルデータ、地下構造モデルデータ、各予測地図画像をダウンロードすることができます。

◆ 南海地震(昭和型)

▸ 速度波形 (2,371 KB)

※zip形式で圧縮してあります。
県庁所在地等(下の地図の●の地点は府県庁、●はそれ以外)での速度波形です。(全地点のデータがこのファイルに含まれています。)
⇒ファイルフォーマットについて

▸ 速度応答スペクトル (27 KB)

※zip形式で圧縮してあります。
県庁所在地等(下の地図の●の地点は府県庁、●はそれ以外)での速度応答スペクトルです。(全地点のデータがこのファイルに含まれています。)
⇒ファイルフォーマットについて

南海地震(昭和型)の速度応答スペクトル及び計算波形を示した地点

▸全国1次地下構造モデル(暫定版)
・東日本 (84,082 KB)
・西日本 (96,662 KB)

※zip形式で圧縮してあります。南海地震(昭和型)の長周期地震動予測地図の計算に用いたものと同じです。計算に用いた深い地盤構造モデルのデータです。
⇒ファイルフォーマットについて
⇒地下構造モデルの物性値(報告書p.53の付表2.1)(PDF 48KB)

▸ 図の一覧(高解像度版)

報告書に掲載した速度応答スペクトル(周期3秒、周期5秒、周期7秒、周期10秒)の分布図、長周期地震動における最大速度の分布図、長周期地震動の継続時間の分布図の高解像度版(PNG形式)をダウンロードすることができます。ご覧になりたい図を下の表から選んでください。

図(高解像度版)のダウンロード

図の種類	掲載ページ 図番号	ファイルサイズ
速度応答スペクトル(周期3秒)の分布	15ページ 図 3.1-1	394 KB
速度応答スペクトル(周期5秒)の分布	15ページ 図 3.1-1	386 KB
速度応答スペクトル(周期7秒)の分布	16ページ 図 3.1-2	379 KB
速度応答スペクトル(周期10秒)の分布	16ページ 図 3.1-2	363 KB
長周期地震動における最大速度の分布	16ページ 図 3.2	377 KB
長周期地震動の継続時間の分布	16ページ 図 3.3	439 KB

トップに戻る

図 3.4-12　地下構造モデルのデータダウンロード画面。上の「深部地下構造（外部リンク）」をクリックすると地震調査研究推進本部のページ（下）に移動する。

2) 長周期地震動の性質や被害事例に関する検討

長周期地震動ハザードマップを利活用するためには、長周期地震動により生じる現象や被害を知ることは重要である。ここでは、長周期地震動ハザードマップの防災・減災対策への活用および、今後展開される広帯域化という観点から、以下の 3 つの検討を実施した。

（A）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

長周期地震動シミュレーション結果を用いた超高層建物の応答評価について、平成 25 年度までは特定地点を対象として実施してきた。一方、ハザードマップでは地震動強さが面的に評価されることから、面的な応答評価を行うことで地震による被害の全数を推計することも可能となる。ここでは、東京周辺地域（関東平野）、名古屋周辺地域（濃尾平野）、大阪周辺地域（大阪平野）の三大都市圏が含まれる平野を対象として、平成 25 年度までに実施した南海トラフの地震の長周期地震動シミュレーション結果を用いて、面的な超高層ビルの応答評価を実施した。

平成 25 年度に実施した発生頻度を考慮したハザード評価結果を用いて、東京都庁、愛知県庁、大阪府庁、大阪舞洲の 4 地点における地震動の平均および平均＋σ（σは正規分布を仮定した場合の標準偏差）のスペクトルに最も近い特性を有するケースを選定した。ここで、平均および平均＋σのスペクトルに対して、周期 3～8 秒の区間で誤差が最小となるケースを選定している。このとき、各地点における NS（南北）成分と EW（東西）成分の大きい方となるケース選択し、面的評価には対象地点で選定されたケースによる地震動分布を用いる。ケースの選定例を図 3.4-13 に示す。

選択したケースの面的な長周期地震動データ（工学的基盤上の波形）を用いて、地震動の特性について考察する。長周期地震動の特性を表す場合、相対速度応答スペクトル pSv（減衰定数 h=0.05）の値がよく用いられる。また、長時間地震動の場合には繰返しの影響を考慮するために、エネルギースペクトル VE（減衰定数 h=0.10）も参照されることが多い。そこで、周期 3～8 秒の pSv と VE の関係を整理する。

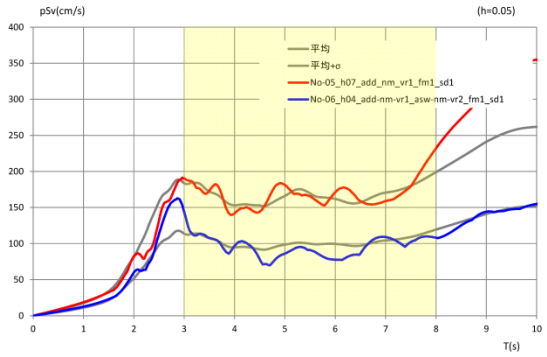
$$pSv\,(h=0.05) - VE\,(h=0.10) \,/\, pSv\,(h=0.05) \qquad (3.4\text{-}1)$$

の関係について、

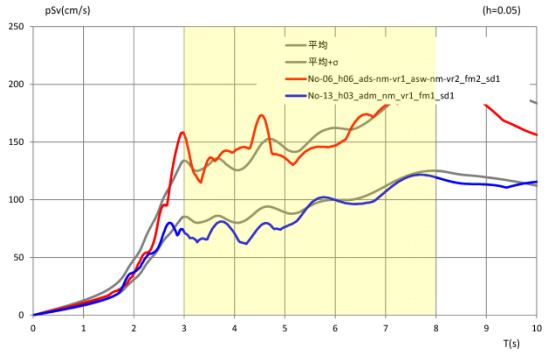
$$VE \,/\, pSv = a \cdot pSv^{b} \qquad (3.4\text{-}2)$$

なる関数形を用い、最小二乗法により係数 a、b を求めた（表 3.4-1）。得られた近似式を図 3.4-14 に、pSv (h=0.05)－VE (h=0.10) 関係の重ね描きを図 3.4-15 に示す。図 3.4-14 では、得られた近似式を破線で示しているが、pSv が大きいところで VE が過小評価になる傾向があるため、下限値として 1.5 とした場合を実線で示した。実用上は実線を用いる方が妥当であると考えられる。

TKY：東京都庁

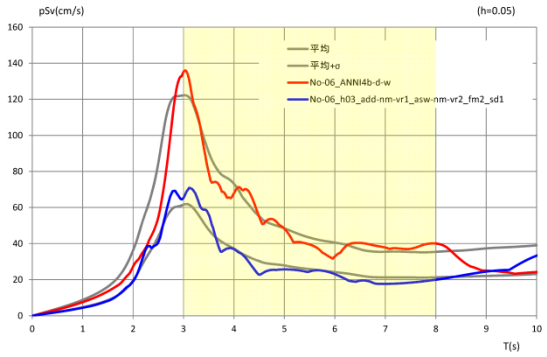


TKY (NS)

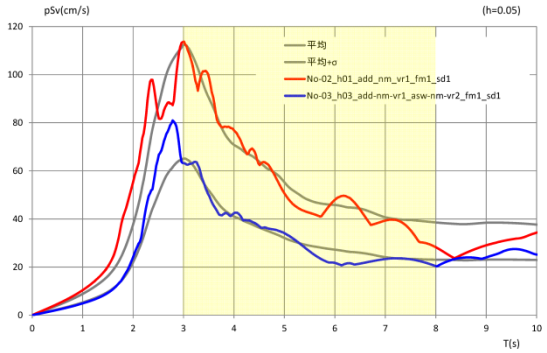


TKY (EW)

AIC：愛知県庁

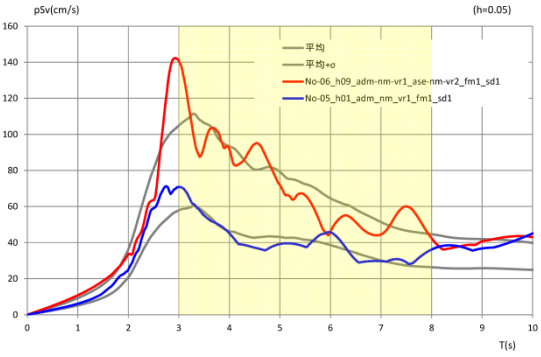


AIC (NS)

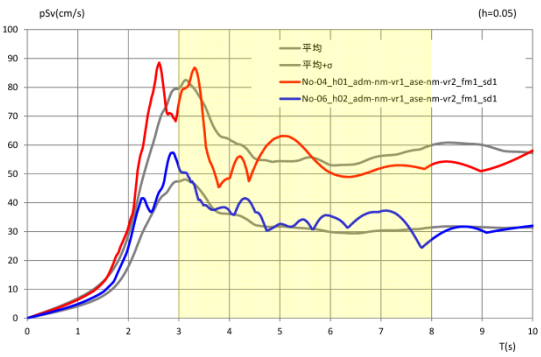


AIC (EW)

OSK：大阪府庁

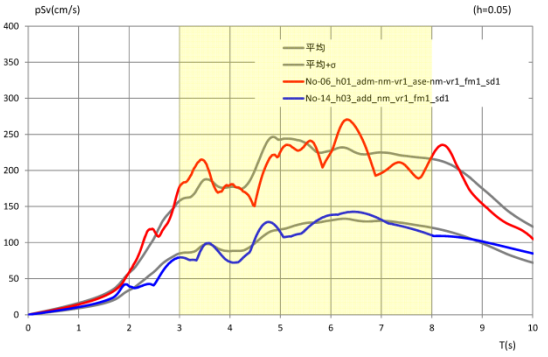


OSK (NS)

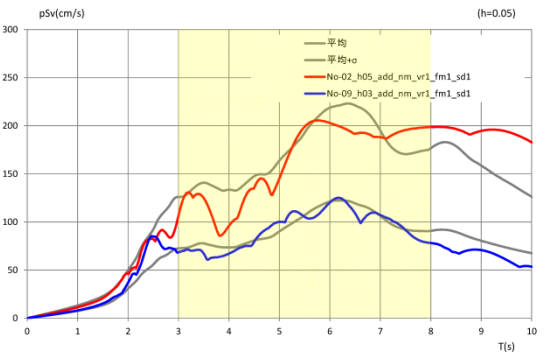


OSK (EW)

OSM：大阪舞洲



OMS (NS)



OMS (EW)

図 3.4-13　スペクトルの平均および平均＋σ（灰色）と選択した地震動スペクトル。

表 3.4-1　求められた近似式（3.4-2）の係数。

地点	a	b	地点	a	b
東京都庁	6.4	-0.28	大阪府庁	8.9	-0.28
愛知県庁	9.4	-0.28	大阪舞洲	8.9	-0.28

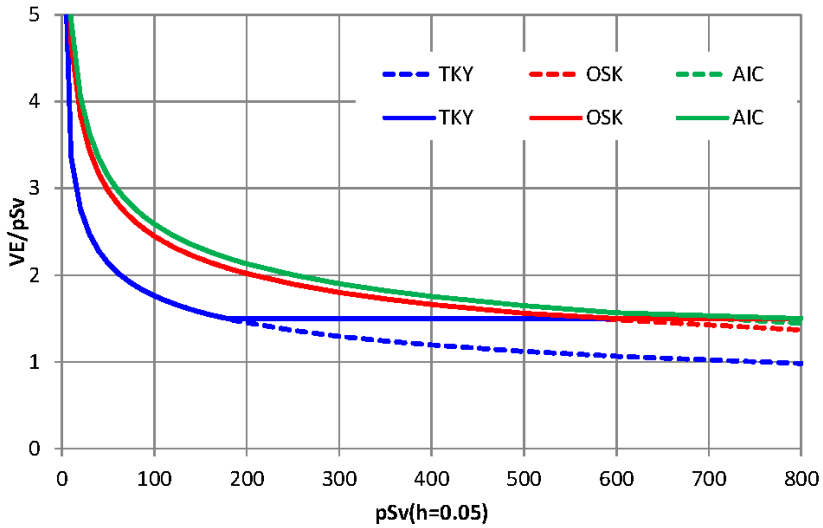
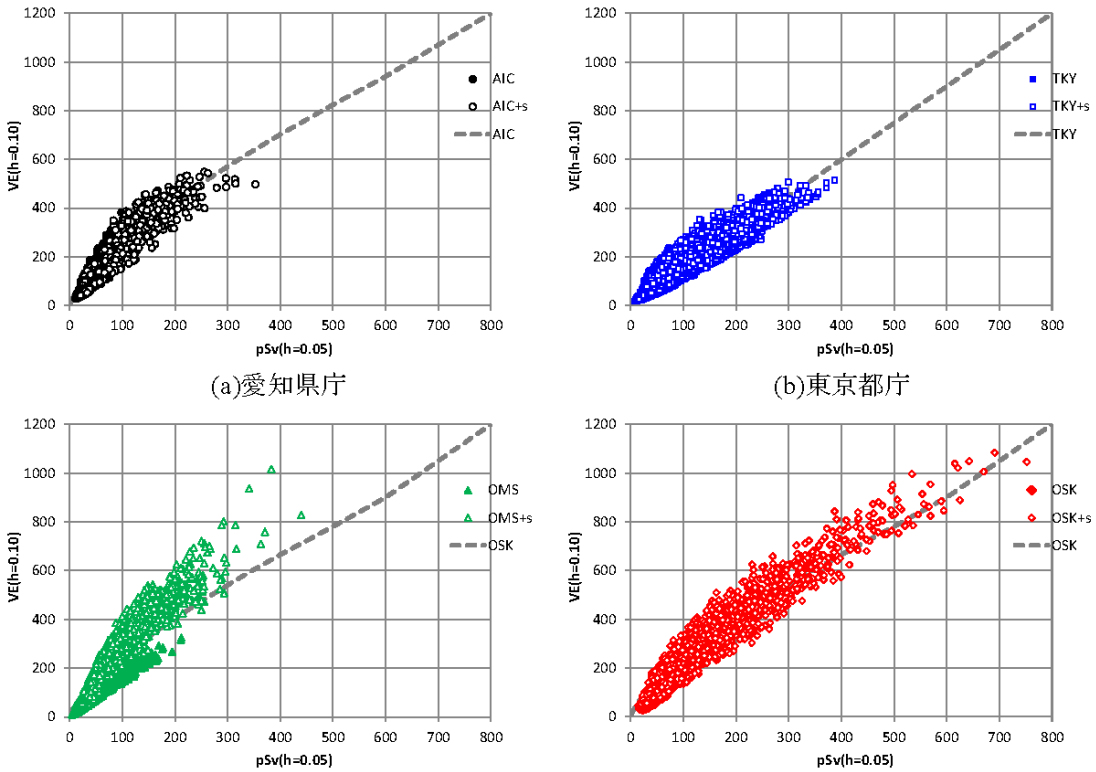


図 3.4-14　求められた近似式。実線は下限値 1.5 を設定した場合。



(a)愛知県庁　(b)東京都庁

(c)大阪舞洲　(d)大阪府庁

図 3.4-15　pSv（h=0.05）－VE（h=0.10）の関係。

平成 25 年度までの検討で用いた多様性を考慮した 6 種類の超高層建物モデル

・均等スパン純ラーメン架構 S 造 30 階建て（S30）
・均等スパン純ラーメン架構 S 造 45 階建て（S45）
・均等スパン純ラーメン架構 S 造 60 階建て（S60）
・3.2m 短スパンを基本とした S 造 45 階建て（S45X）
・15.6m 長スパン＋耐震壁 S 造 45 階建て（S45Y）
・RC 造 40 階建て（RC40）

を用いて、長周期地震動による面的な建物応答評価を行った。

東京周辺地域における結果として、擬似速度応答スペクトルの分布および最大層間変形角の分布を図 3.4-16 および図 3.4-17 にそれぞれ示す。擬似速度応答スペクトルについて、周期 3、4、5 秒では東京の中央部（中央線沿い）やや南側において、周辺地域と比べて大きくなる傾向が見られる。一方で周期 6 秒以上になると、東京湾岸にそのピーク位置が現れるようになる。S30 は周期 3～5 秒の応答の大きい地域が限定的に現れる一方、S45、S60、S45Y、RC40 では、それよりも周期の長い地震動応答が大きい湾岸地域にも広がり広域で応答が大きくなる傾向が見られる。

名古屋地域における結果を図 3.4-18 および図 3.4-19 に示す。擬似速度応答スペクトルについて、全体的には周期 3～5 秒にかけて大きくなる地域が多い。詳細にみると、名古屋駅南東の内陸側で周期 3 秒が大きく、それより海側になるほど周期 4 秒から 5 秒と卓越する周期が変わっている。これは地盤構造の影響と考えられる。超高層建物の応答は、S30、S45、RC40 の応答が大きい傾向が見られる。

大阪地域については、大阪府庁位置と大阪舞洲で選択されたケースが異なっている。ここでは大阪府庁で選択された地震動による結果を例として図 3.4-20 および図 3.4-21 に示す。沖積平野である湾岸地域と河内平野地域において、擬似速度応答スペクトルおよび超高層建物の最大層間変形角が周辺と比べて大きくなっている。

次に、これらの地域間での相違点について考察する。検討に用いる最大応答値は最大層間変形角とし、長周期地震動指標は、気象庁による長周期地震動階級で用いられる絶対速度応答スペクトル（減衰定数 h=0.05、周期 1.6～7.8 秒）の最大値 aSvp と、過去の検討において最大層間変形角との相関係数が最も大きかった相対速度応答スペクトル（減衰定数 h=0.05、周期 1.6～7.8 秒）の平均値 rSvm とする。入力地震動は、東京都庁、愛知県庁、大阪府庁位置で平均および平均＋σ の各 2 ケースとしている。絶対速度応答スペクトルによる長周期地震動指標に対する層間変形角の関係を 2 種類の超高層建物（S30 および S60）に対して、東京、愛知、大阪の平野部 3 地域について、記号を変えて図 3.4-22 に示す。大阪のみ層間変形角が 0.03 を超える地点があるが、これは入力地震動レベルの範囲が湾岸部（舞洲付近）で大きいためである。階数が高いほどばらつきが大きく、地域差も大きくなっている。S60 では、長周期地震動指標に対して層間変形角が東京、大阪、愛知の順に大きくなる傾向が見られる。周期 3～4 秒の絶対速度応答スペクトルの最大値に対する周期 6～7 秒のスペクトルの最大値の比を図 3.4-23 に示す。東京、大阪、愛知の順に大きくなっており、層間変形角の大小関係と対応している。すあわち、長周期側が卓越する地域において

S60 の応答が大きくなる。相対速度応答スペクトルによる長周期地震動指標に対する最大層間変形角の関係を同様に図 3.4-24 に示す。絶対速度応答スペクトルに比べて最大層間変形角の相関性が高くなり、ばらつきが小さくなっている。また、地域間の大小関係は絶対速度応答スペクトルと変わらないものの、その差は小さくなっている。

さらに、面的に評価した長周期地震動に対する超高層建物の最大応答値と減衰定数 5%の速度応答スペクトルの関係を地域間で比較する。応答値として最大層間変形角を用い、1 次固有周期の減衰 5%を有する単振り子の最大速度応答値（1 次固有周期時減衰 5%Sv）との関係を整理する。ただしこの時、RC 系建物モデル（RC40）の場合はひび割れや降伏等による剛性低下を想定して、弾性時 1 次固有周期の 1.4 倍の固有周期を用いている。入力地震動については東京都庁、愛知県庁、大阪府庁での平均および平均＋σの各 2 ケースである。最大層間変形角と 5%単振り子の最大速度応答値の関係を図 3.4-25 に建物モデルごとに分けて示す。それぞれの図には 3 地域の結果を重ね描いている。結果として

- 東京、愛知、大阪の地域による差異はなく、1 次固有周期の 5%単振り子速度応答最大値と最大層間変形角の相関は高い。
- 入力（あるいは応答）が大きくなるにつれてばらつきは大きくなる。その要因として、建物を構成する部材の塑性化による長周期化が考えられる。
- RC40 は、振動時の 1 次固有周期を弾性時 1 次固有周期の 1.4 倍と設定したが、ひび割れや降伏による剛性低下は振幅レベルによる一律ではないため、その誤差によるばらつきが大きい。

このことから、ある程度のばらつきはあるものの、地域によらず 1 次固有周期時の 5%単振り子速度応答最大値により、超高層建物の応答最大層間変形角の推定が可能であると言える。

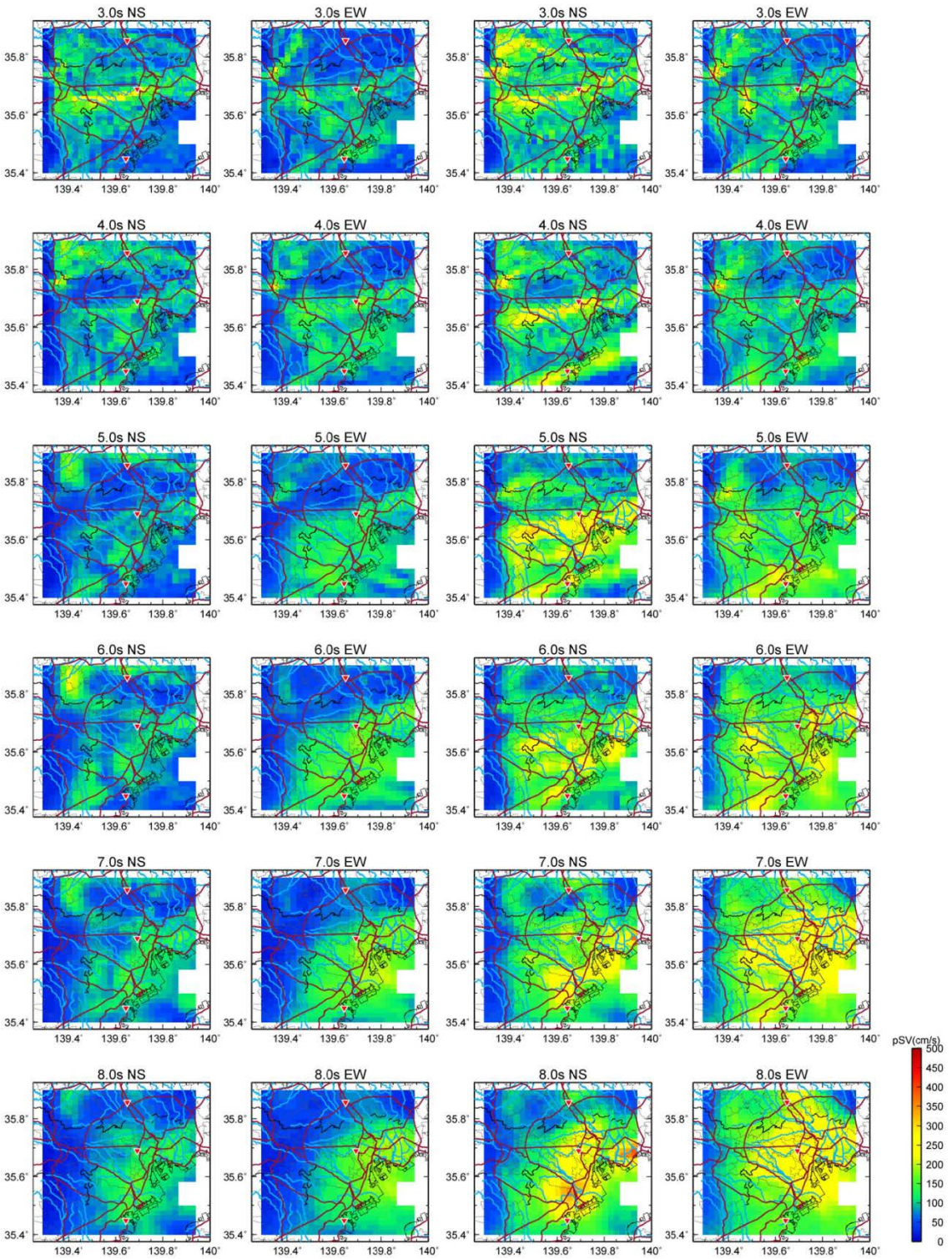


図 3.4-16　擬似速度応答スペクトル値の面的分布（減衰定数 5%、東京）。

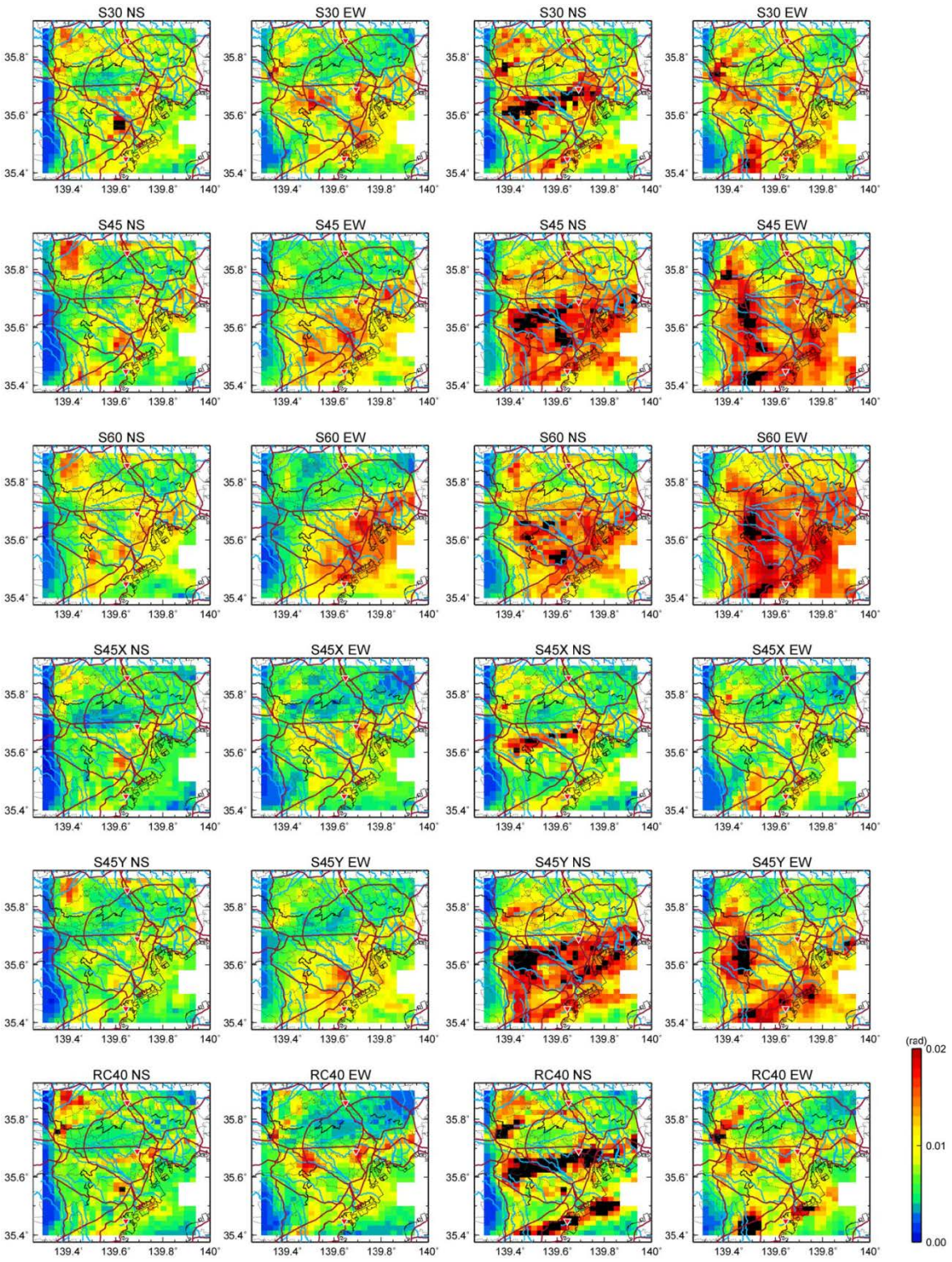


図 3.4-17　最大層間変形角の面的分布（東京）。

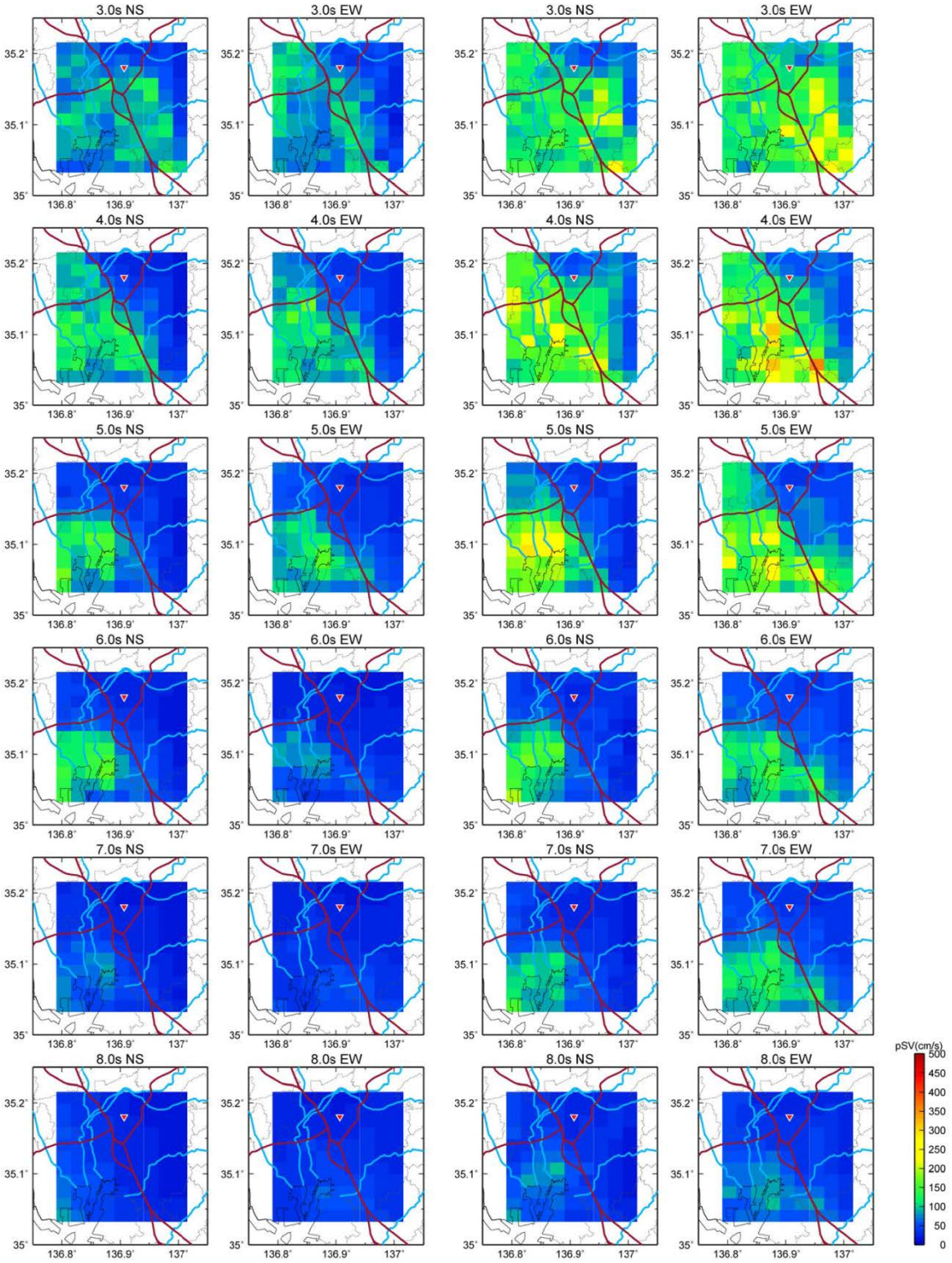


図 3.4-18　擬似速度応答スペクトル値の面的分布（減衰定数 5%、愛知）。

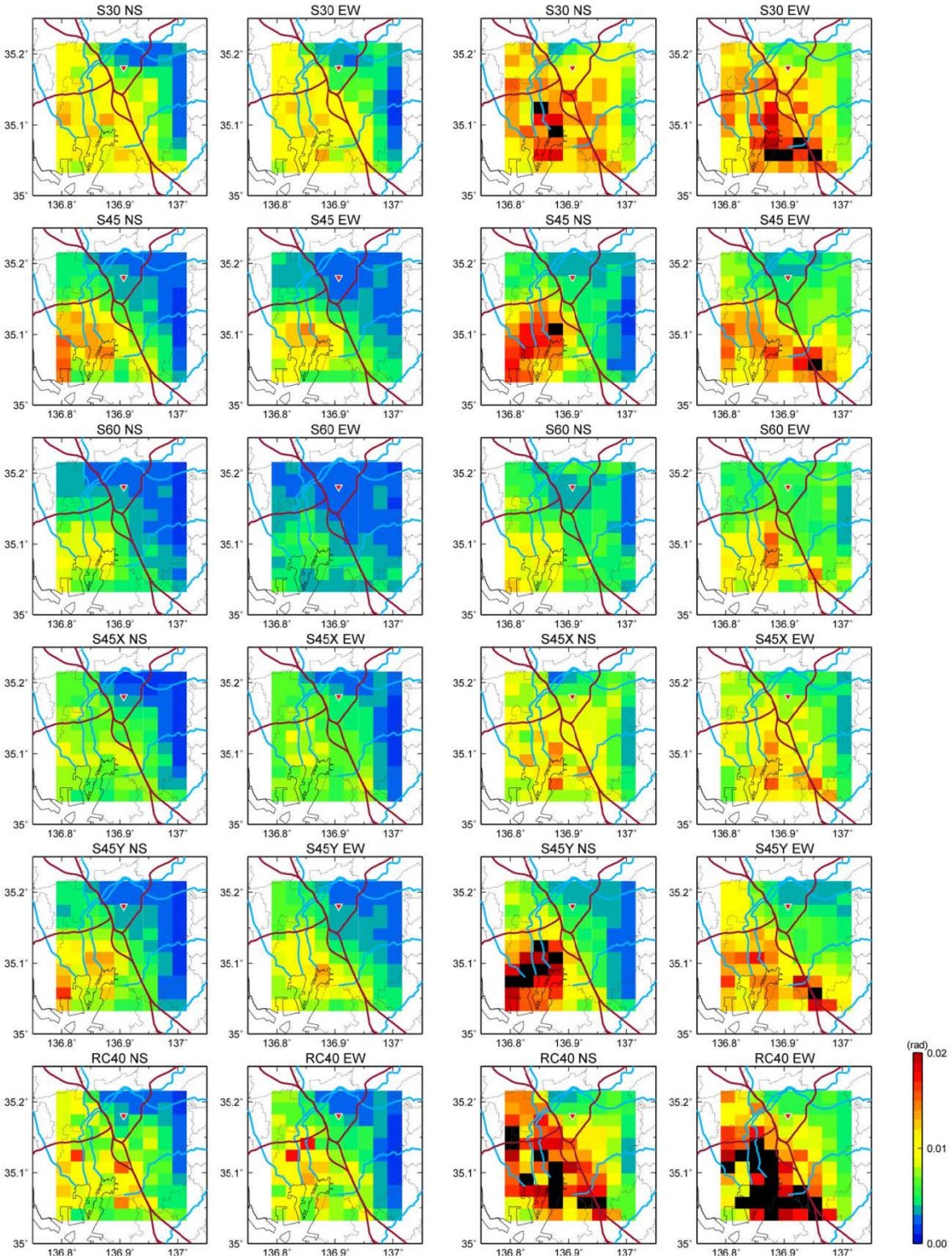


図 3.4-19　最大層間変形角の面的分布（愛知）。

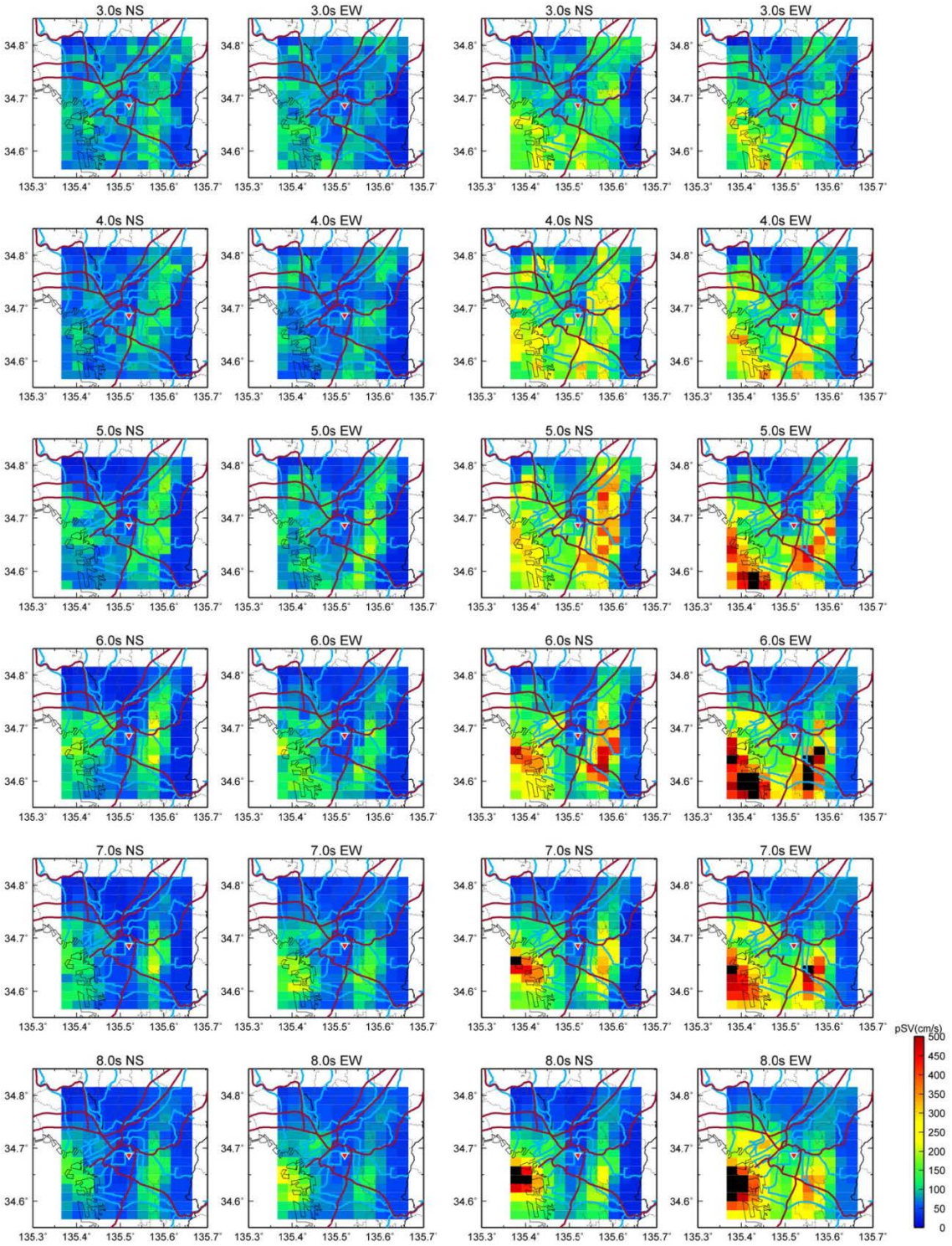


図 3.4-20　擬似速度応答スペクトル値の面的分布（減衰定数 5%、大阪）。

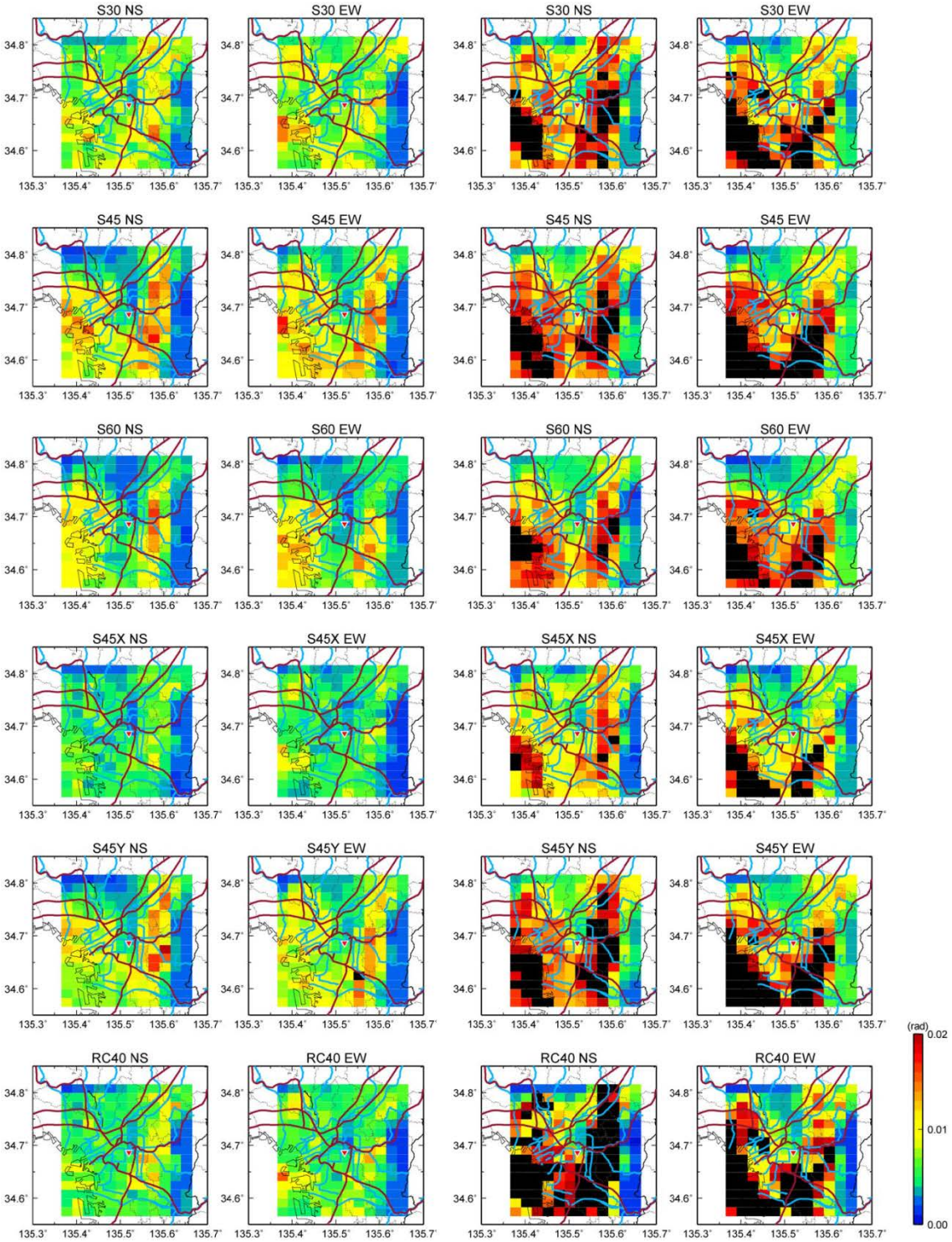


図 3.4-21　最大層間変形角の面的分布（大阪）。

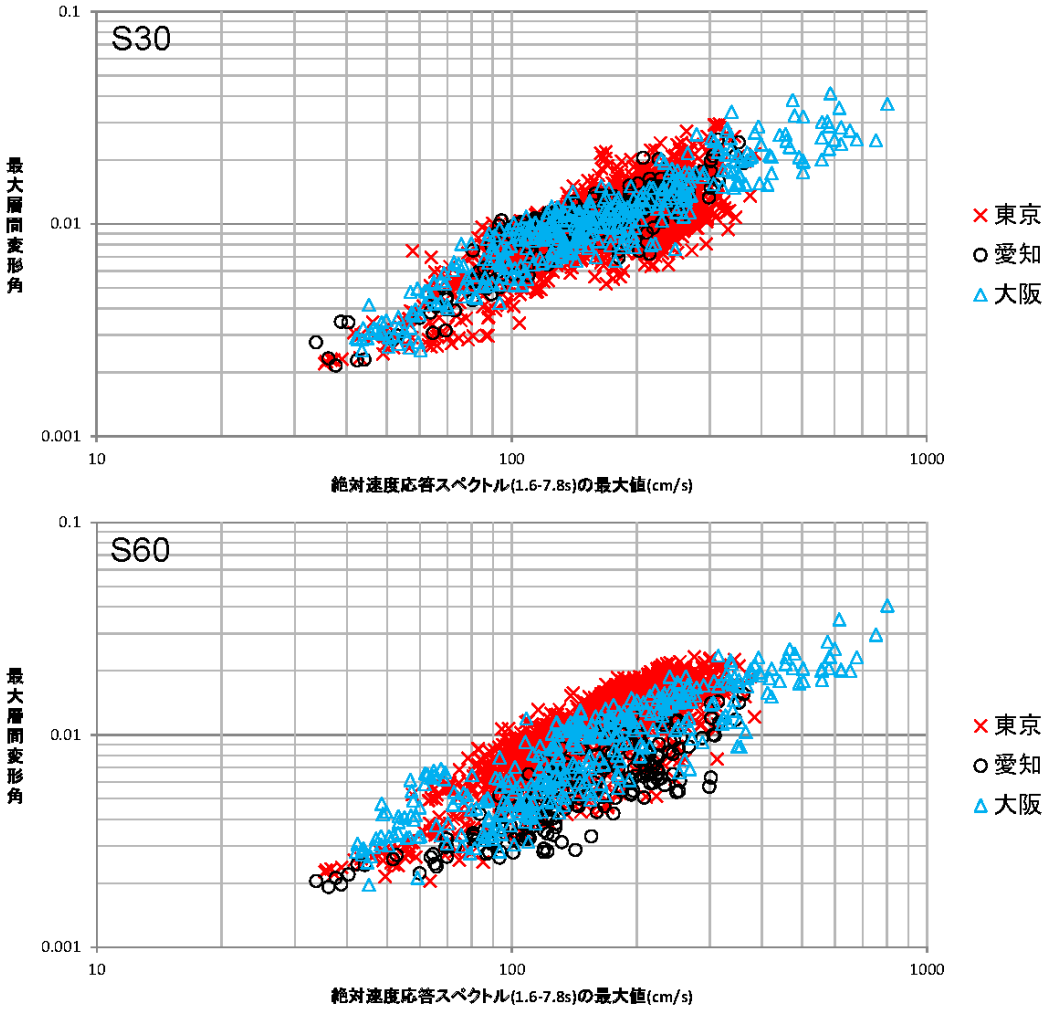


図 3.4-22　絶対速度応答スペクトルと最大層間変形角。

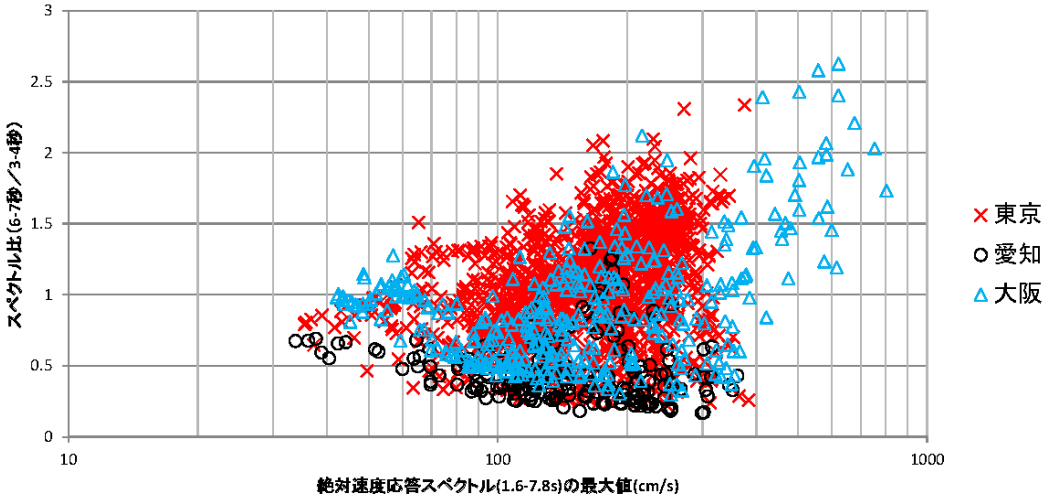


図 3.4-23　絶対速度応答スペクトルの最大値の比（周期 6～7 秒／周期 3～4 秒）。

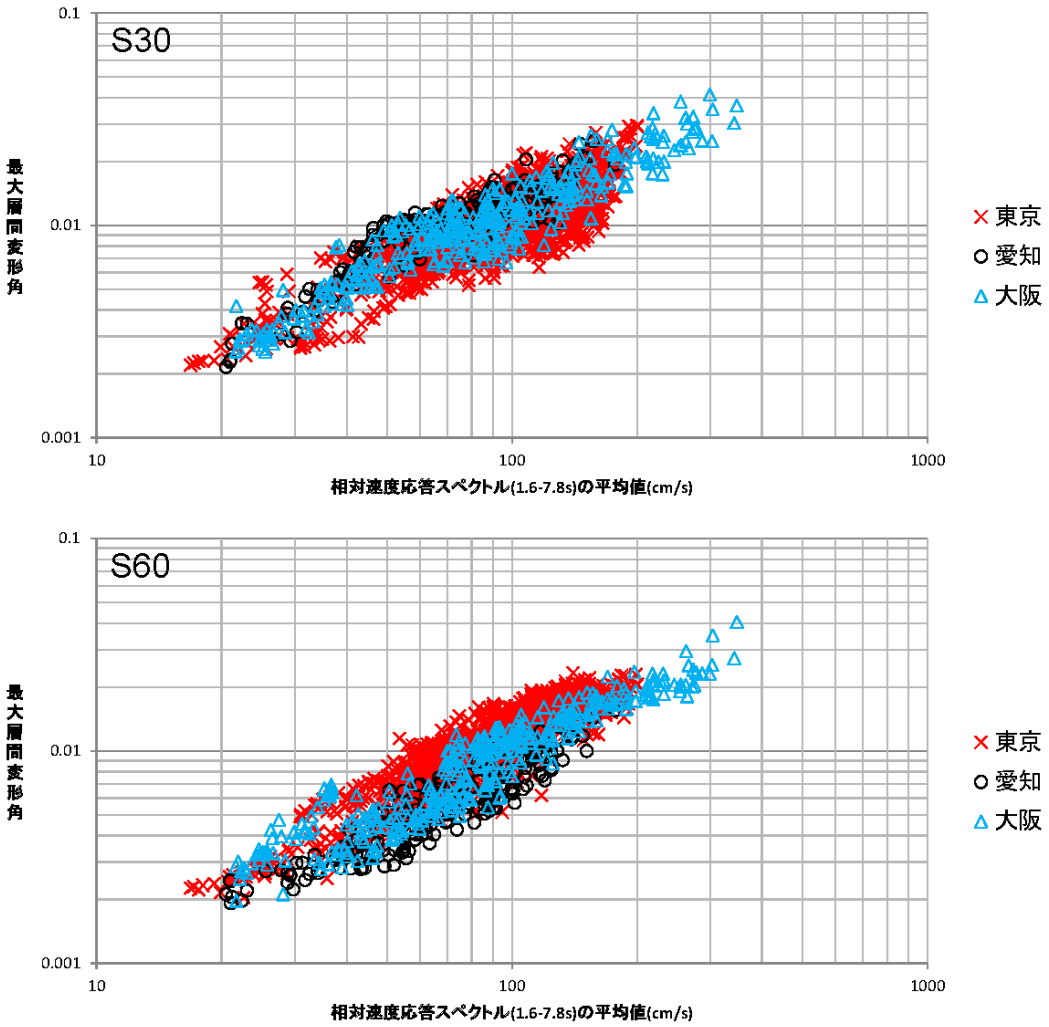


図 3.4-24　相対速度応答スペクトルと最大層間変形角。

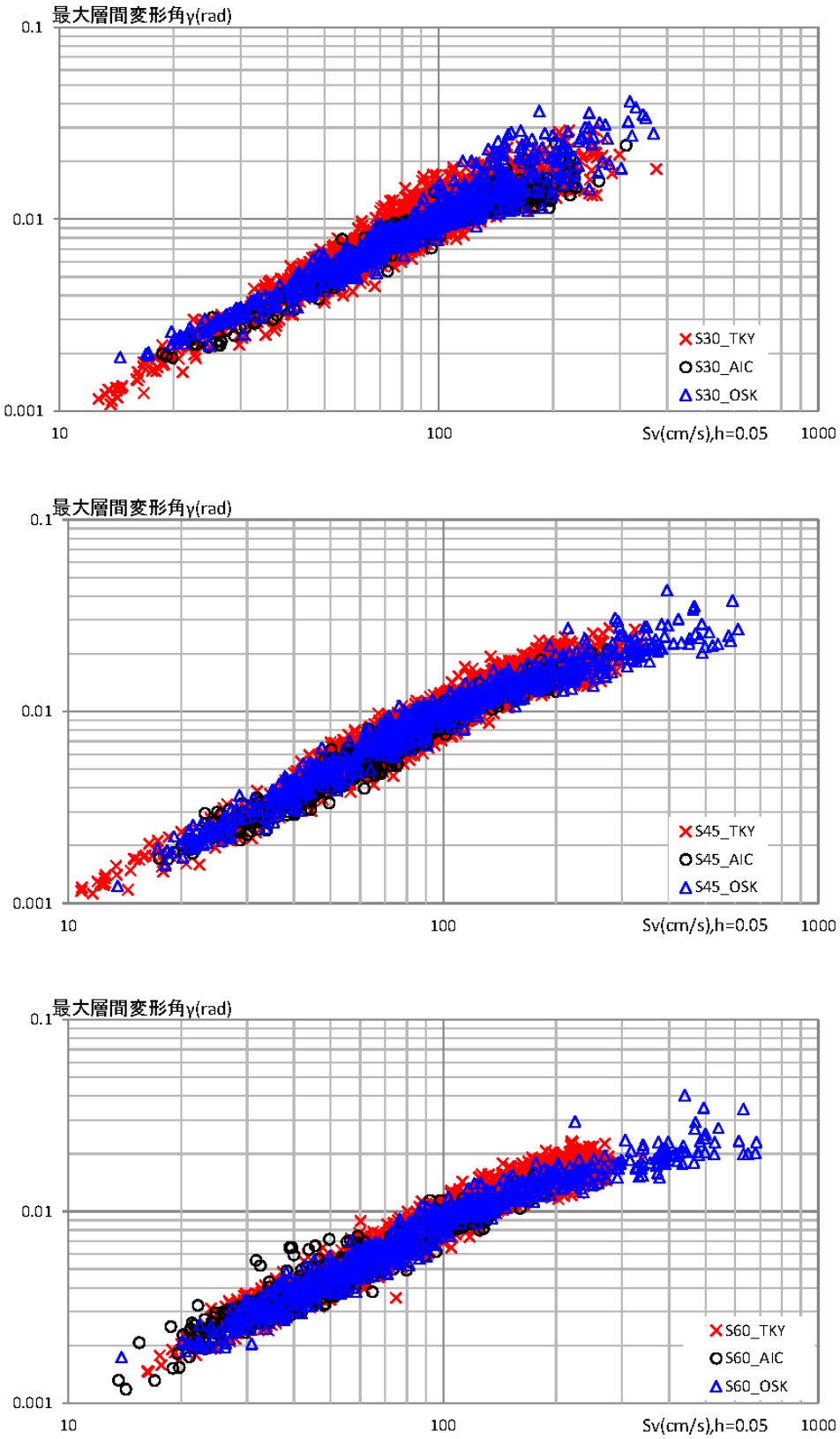
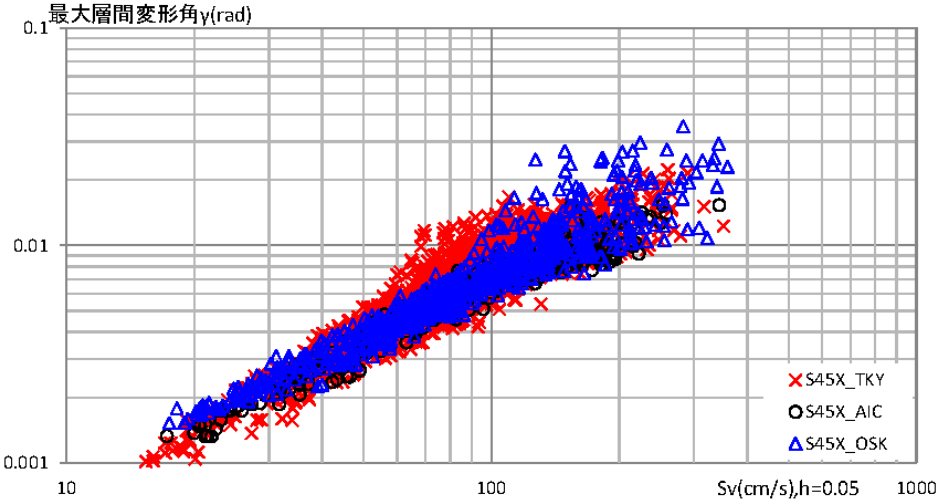
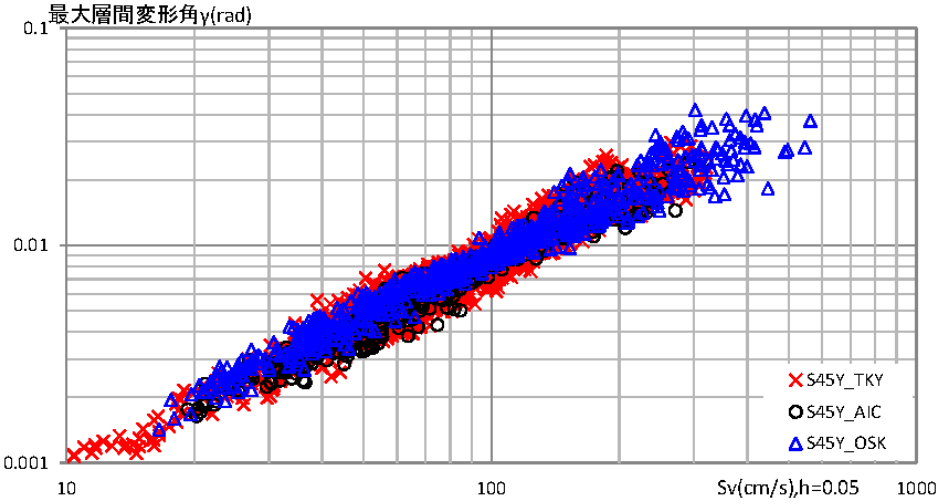


図 3.4-25　1 次固有周期時の 5%速度応答値（Sv）と最大層間変形角の関係。





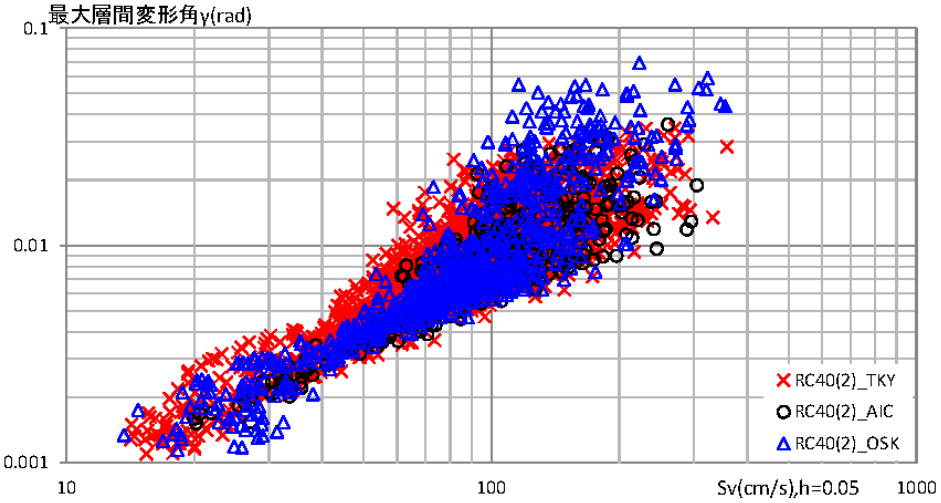


図 3.4-25　1 次固有周期時の 5%速度応答値（Sv）と最大層間変形角の関係（つづき）。

最後に、最大応答値と被害の関係について整理する。建物の応答量として、最大層間変形角が最も用いられているが、地震動の速度応答スペクトルと高い相関があることが本検討でも示されている。従って、最大層間変形角は建物の応答を表すのに適した代表的な指標と言える。しかし、最大層間変形角と建物を構成する部材の損傷は、構造形式の影響を受けるため、最大層間変形角と部材損傷の間には単純な相関関係は成立しないと考えられる。建物応答の最大層間変形角 R と建物の損傷の関係に着目して既往の研究を整理すると、以下のようになる（図 3.4-26）。

1) 最大層間変形角 R が 1/200～1/100 に達すると、梁や柱に損傷が発生し始める。
2) 梁に深刻な損傷が発生し始める層間変形角は、1/150～1/30 に広がっており、大きなばらつきがある。
3) スパンが短いほど、層間変形角に対する梁の損傷は大きくなる。同様に、ブレースや壁が存在すると、層間変形角に対する梁の訴訟は大きくなる。

一方、建物の最大加速度と 2 次部材・家具什器との被害については、2011 年東北地方太平洋沖地震における観測記録との対応が調査されている（日本建築学会長周期建物地震対応委員会、2012）。

1) 天井は、100cm/s² 前後でもボードの一部落下が生じ、新宿の超高層ビルでは 100～350cm/s² の加速度が発生し、天井落下率が 85%に達している（図 3.4-27）。総合すると、特別な対策が施されていない天井では、100cm/s² を超えるとかなり高い確率で落下が生じる。
2) 小物類の移動・散乱は 100cm/s² 弱から生じ始めている。重いオフィス家具は 150～350cm/s² で多少位置のずれたものが 1/4、転倒したものが 5%程度であった。超高層住宅では、100cm/s² 以下でも転倒・移動が発生している（図 3.4-28）。

なお、上記の分析は、2011 年東北地方太平洋沖地震の調査結果に関するもので、同地震の特徴、例えば、継続時間や地震動の周期特性等の影響を受けている可能性があることには留意する必要がある。

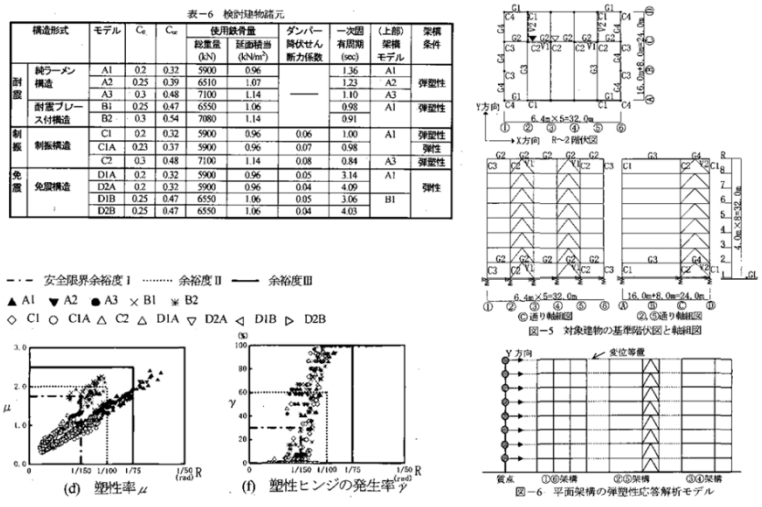
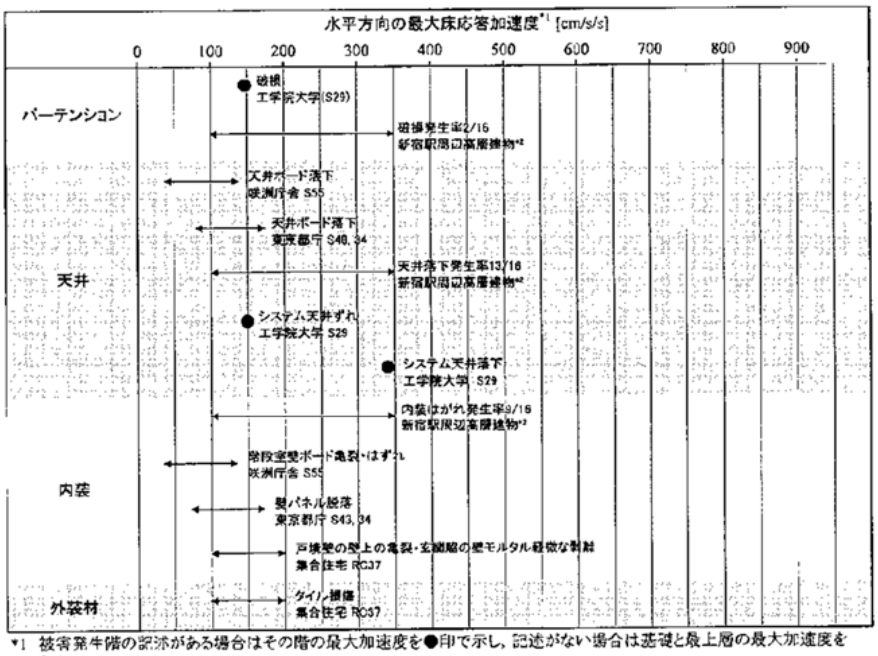


図 3.4-26　層間変形角の梁と塑性率（北村・他，2004 より引用）。

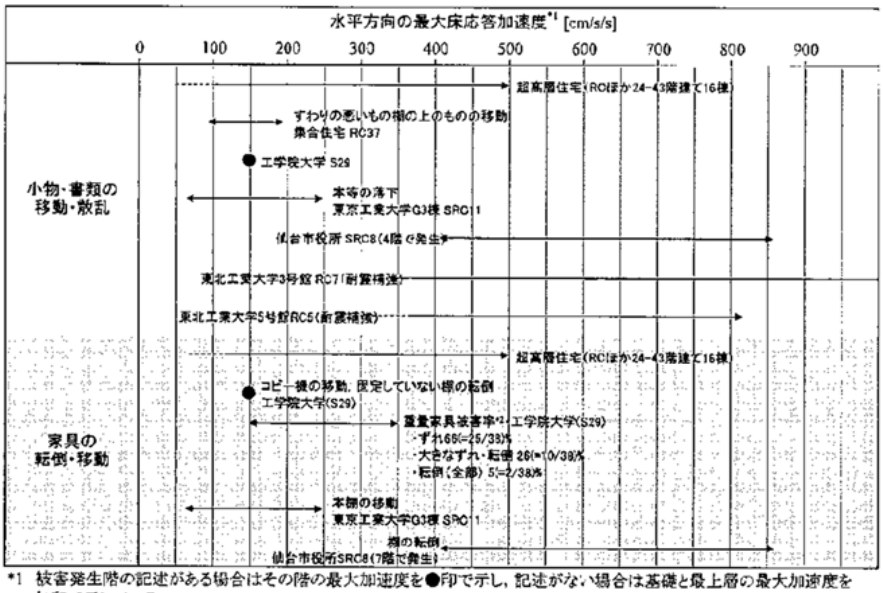


*1 被害発生階の記述がある場合はその階の最大加速度を●印で示し，記述がない場合は基礎と最上層の最大加速度を矢印で示している。

*2 新宿区の高層ビルの揺れを工学院大学の地震記録から100～350cm/s^{2}程度と仮定した。新宿駅周辺高層建物の被害発生率は，調査した16棟のうち，被害が発生した建物の割合を表しており，被害の程度や箇所数は不明である。

図 4.1.14 内外装被害と建物最大応答加速度との関係

図 3.4-27 内外装被害と建物最大応答加速度（日本建築学会長周期建物地震対応委員会, 2012 より引用)。



*1 被害発生階の記述がある場合はその階の最大加速度を●印で示し，記述がない場合は基礎と最上層の最大加速度を矢印で示している。

*2 工学院大学の被害率は，震度5弱以上の揺れを観測した22～29階を対象にしたアンケート調査において，回答のあった38件のうち被害があった割合を示している。最大床応答加速度は調査した22～29階の値を示している。

図 4.1.13 室内被害と建物最大応答加速度との関係

図 3.4-28 室内内被害と建物最大応答加速度（日本建築学会長周期建物地震対応委員会, 2012 より引用)。

（B）超高層建物等における耐震基準等の調査・整理

○超高層建築物等における長周期地震動への対策試案（国土交通省）

国土交通省では、長周期地震動を考慮した建築物の設計用地震動に関する調査を進め、平成 22 年 12 月に「超高層建築物等における長周期地震動への対策試案について」に関する意見募集を行った。その後、2011 年東北地方太平洋沖地震の発生により見直しがなされることとなったが、対策試案の中では佐藤・他（2010）による距離減衰式を用いた設計用長周期地震動の作成方法が提示されている。そこで、平成 25 年度の南海トラフの地震に対する長周期地震動ハザード評価に用いた三次元差分法による地震動シミュレーション結果（以下、FDM）と、佐藤・他（2010）の距離減衰式による評価結果を比較する。本検討では、評価地点は図 3.4-29 に示す東京都庁、大阪府庁、OSKH02（KiK-net 此花）の 3 点として、水平動 2 成分の周期 3～10 秒の応答スペクトルの幾何平均を対象とした。

距離減衰式による応答スペクトルの予測値は、モーメントマグニチュード Mw と断層最短距離より求められる。南海トラフで発生する地震に対する評価は、建築研究所（2013）を参考に、断層モデルを 6 つのセグメントに分割し、各セグメントの Mw は 8.4 を頭打ちとした。各セグメントの Mw と断層最短距離から各セグメントの応答スペクトルを求め、震源断層全体に対する評価は波の重なり合いも考慮して、隣り合うセグメントの評価結果の二乗和平方根の最大値として求めた。

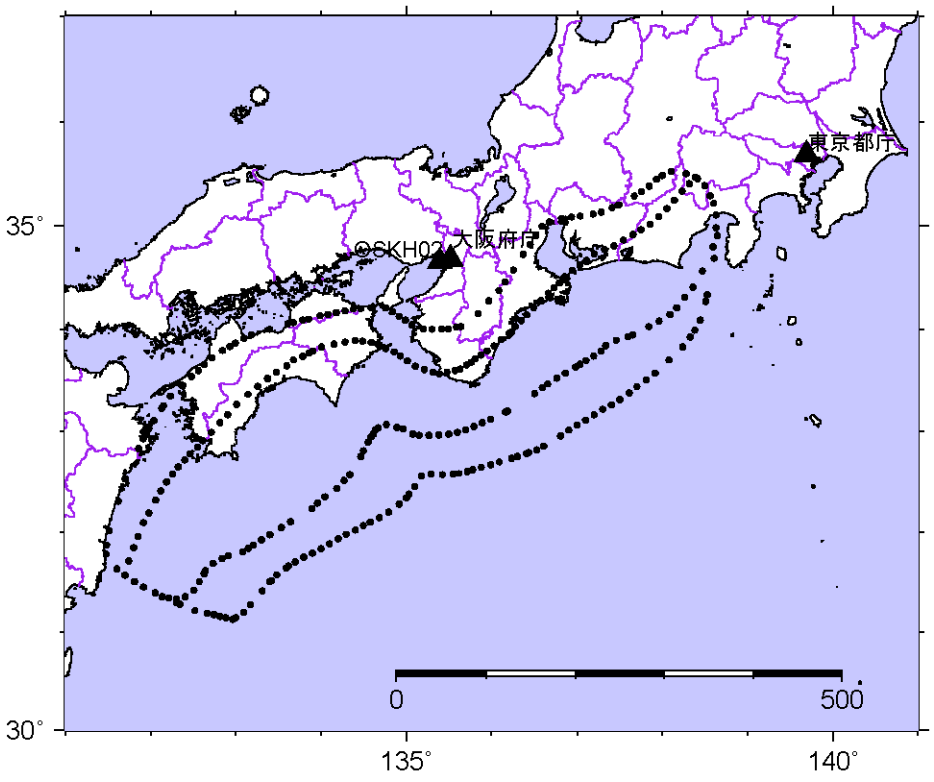


図 3.4-29　断層最短距離を求めるための南海トラフの地震の断層モデルと表点位置

（▲）。

断層モデルのセグメント位置や Mw が異なる No.1～15 の 16 パターンの震源域に対して、OSKH02 における FDM と距離減衰式の評価結果の比較を図 3.4-30 に示す。平均した結果で見ると、FDM と距離減衰式の結果は概ね対応している。ばらつきは FDM の結果の方が大きいが、これは FDM では破壊伝播の影響により極端に振幅が大きくなったり小さくなったりするケースが含まれていることが要因として挙げられる。

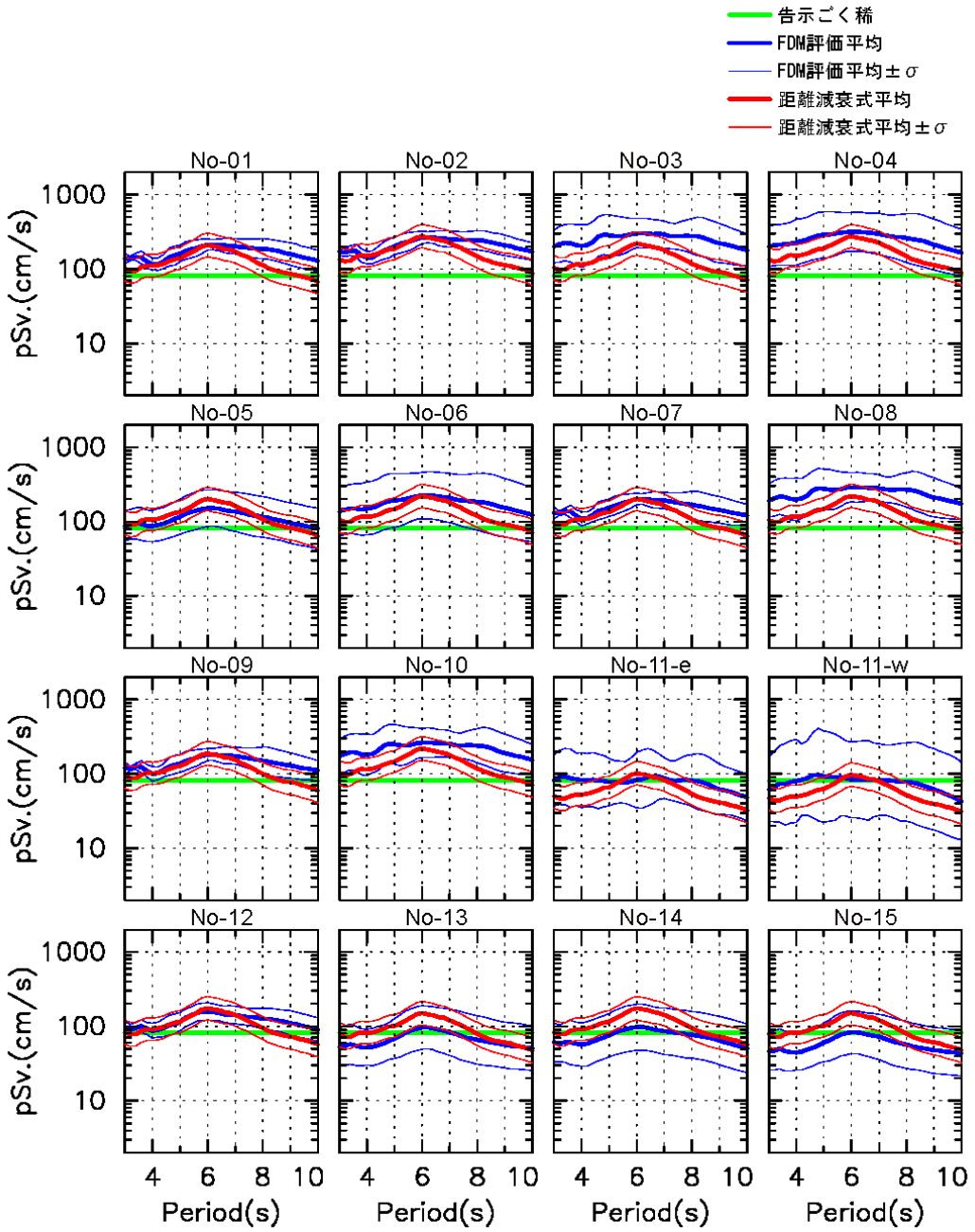


図 3.4-30　大阪府庁における FDM による応答スペクトルの各ケースの平均、平均±σと佐藤・他（2010）の距離減衰式による評価の比較。

各評価地点の FDM／距離減衰式の応答スペクトル比の周期 3～10 秒の平均と Mw の比較を図 3.4-31 に示す。図 3.4-30 に示した 16 パターンを、想定東海地震の領域を含むパターンと含まないパターンに分類してプロットしている。3 地点ともスペクトル比は Mw に対して正の相関が見られる。この要因として、距離減衰式が Mw8.4 で打ち切っているのに対して FDM の結果では振幅が頭打ちしていないことが考えられる。Mw8.7 以下の領域で見ると、大阪府庁と OSKH02 のスペクトル比は距離減衰式の標準偏差内にほとんどのケースが含まれており、この範囲では頭打ちの影響がないようである。

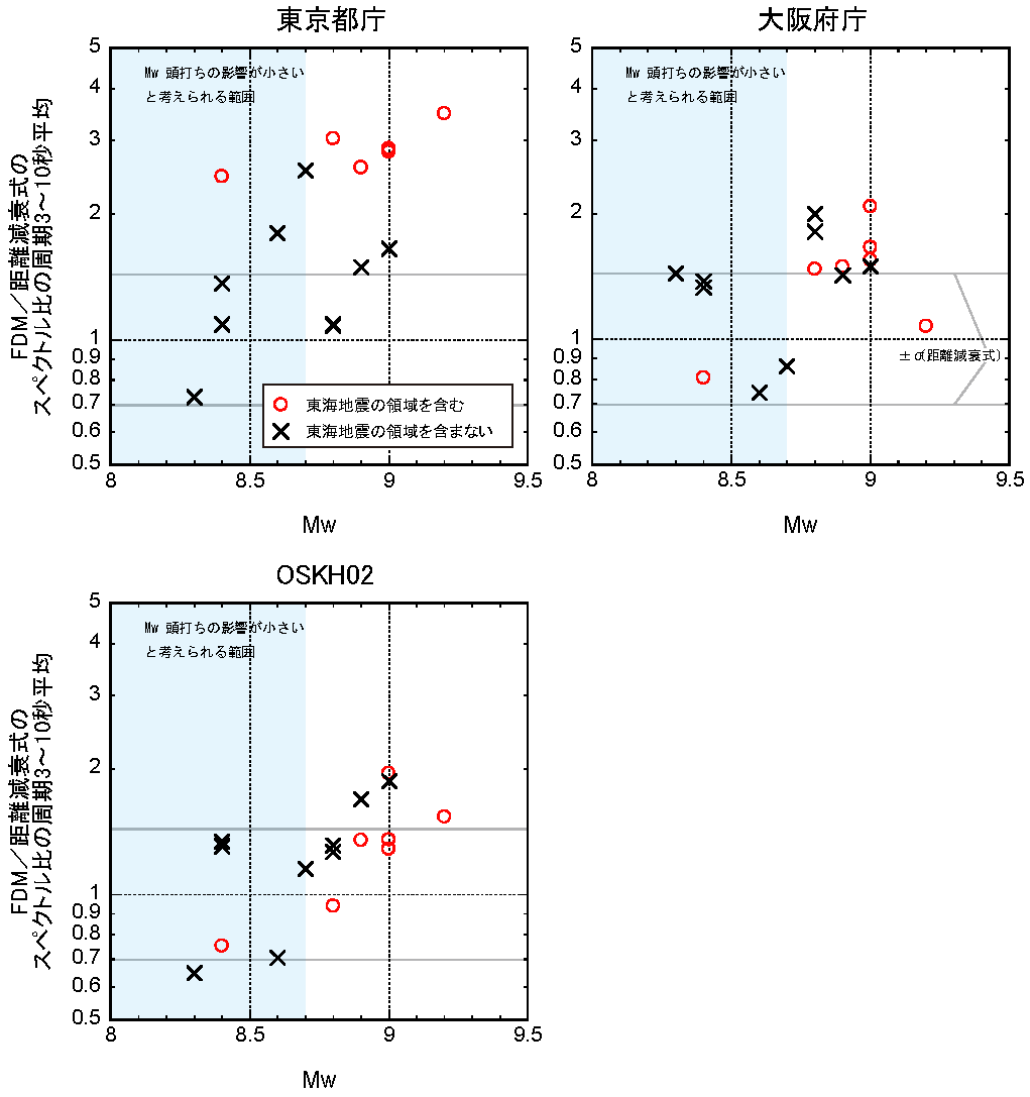


図 3.4-32　各評価地点における FDM／距離減衰式の応答スペクトル比の周期 3～10 秒の平均と断層モデルの Mw の関係。

FDM と距離減衰式の面的な比較を行うため、関東地域 1 都 6 県の地震観測店を対象として両手法の地盤増幅率の比較を行った。FDM の地盤増幅率は、評価地点直下の地震基盤に位置する地中のシミュレーション波形に対する地表の波形の応答スペクトル比として。距離減衰式は地震基盤上の予測値に加えるサイト係数を地盤増幅率とした。両者とも地震基盤に対する増幅率を表している。まず、地盤増幅率の 1 次周期を比較した。1 次周期は図 3.4-33 に示すように増幅率を平滑化し、長周期側の極大となる周期を求めた後にその周辺の増幅率の最大となる周期とした。FDM と距離減衰式の増幅率の 1 次周期の差の分布を図 3.4-34 に示す。寒色は FDM による周期が距離減衰式よりも短く評価された地点を、暖色は長く評価された地点を表している。東京都の中心付近は概ね両手法の 1 次周期は対応している。神奈川県中央部から埼玉県、群馬県に至る地域では FDM の 1 次周期が距離減衰式より短く、千葉県中央部では反対に FDM の 1 次周期が長く評価されている。

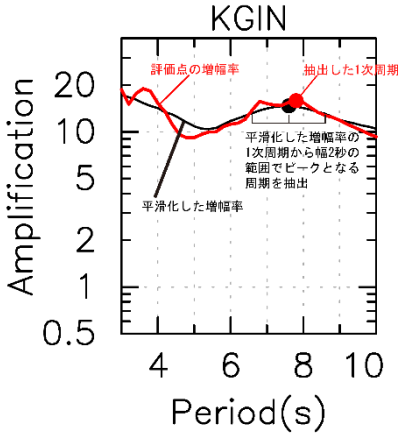


図 3.4-33　地盤増幅率の 1 次周期抽出方法。

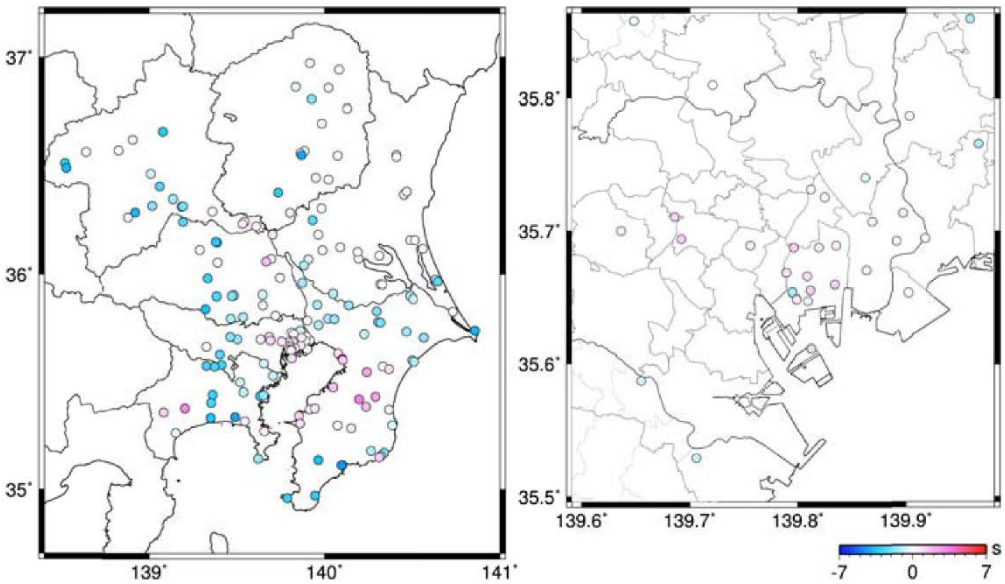


図 3.4-34　FDM による 1 次周期の 8 ケース平均の距離減衰式の 1 次周期からの差。

次に、FDM と距離減衰式の地盤増幅率を比較する。周期 3, 5, 7, 10 秒の 4 つの周期帯において FDM と距離減衰式の地盤増幅率の比を図 3.4-35 に示す。FDM の地盤増幅率には、東京都庁における南海トラフの地震の平均ケースを用いている。周期 3 秒において、群馬県中心部からやや南の地域では FDM の増幅が大きく（赤）、周期 3, 5 秒において茨城県南部では FDM の増幅が小さい（青）。周期 7, 10 秒では、周期 3, 5 秒と比べて地域性は目立たない。概して周期 7, 10 秒では FDM の増幅率が距離減衰式の増幅率よりも小さく、周期 3 秒は FDM の増幅率の方が大きくなる結果となっている。

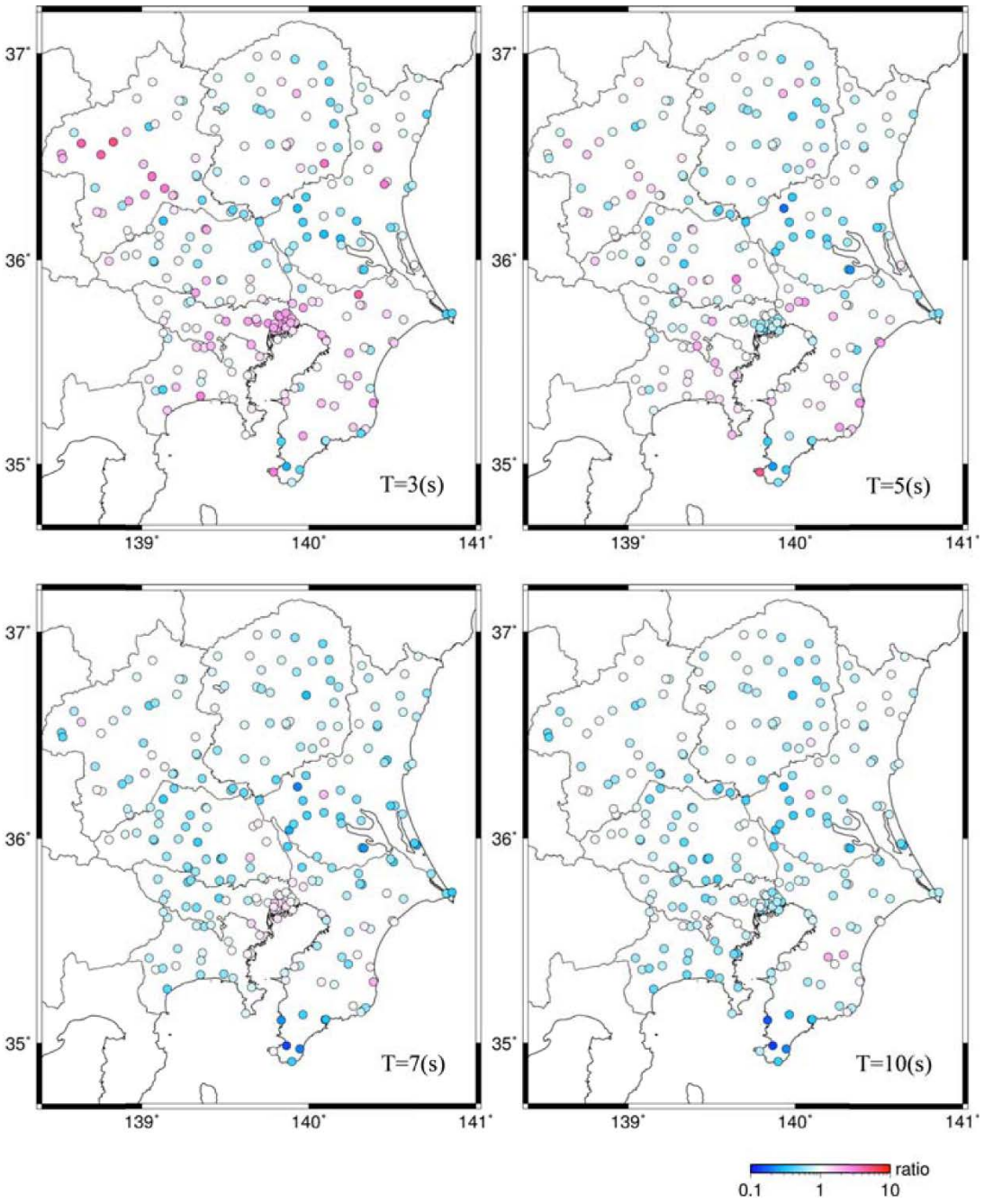


図 3.4-35　FDM と距離減衰式の増幅率比の分布（FDM／距離減衰式）。

上述のように、FDM と距離減衰式の地盤増幅率を比較した結果、ばらつきがある結果が得られた。ここでは、既往研究結果を参考にして本検討で得られたばらつきについて考察する。湯沢・南雲（2012）は、距離減衰式の検討に基づいて地震発生地域による関東平野内の地震観測点の地盤増幅率を検討している。増幅率の算定に地震を区別せずすべてを用いる場合は、地震発生地域を限定して算定した場合と比べて増幅率のばらつきが大きくなることを示している。本検討で対象としている佐藤・他（2010）の距離減衰式は、地震発生域によらない地盤増幅率のため、地盤の増幅率に南海トラフ以外の地震の影響が含まれている。FDM と距離減衰式の増幅率の対数残差の RMS（二乗平均）と湯沢・南雲（2012）による増幅率の標準偏差の比較を図 3.4-36 左に示す。赤破線で示す湯沢・南雲（2012）の増幅率の標準偏差は、すべての地震に対する値を示している。FDM と距離減衰式の残差は、湯沢・南雲（2012）に示されているすべての地震に対する標準偏差の平均よりも小さい。これは、FDM で評価した増幅率が距離減衰式の増幅率に含まれているばらつき内に評価されていることを意味する。

最後に、FDM 内の評価結果のばらつきを検討する。各評価地点の 8 ケースの各周期に対する増幅率の対数標準偏差を図 3.4-36 右に示す。灰色線は各評価地点の対数標準偏差を、赤線はそれらの平均、青破線は湯沢・南雲（2012）による地震の地域を限定した際の標準偏差を示している。図中の赤線で示す FDM による平均的なばらつきは、観測記録のばらつきよりも小さい。ただし、評価地点によっては観測記録よりもばらつきが大きい場合もある。ばらつきが大きい評価地点（観測地点）は、増幅率が大きく、表面波が卓越する地点が多いことが分かった。

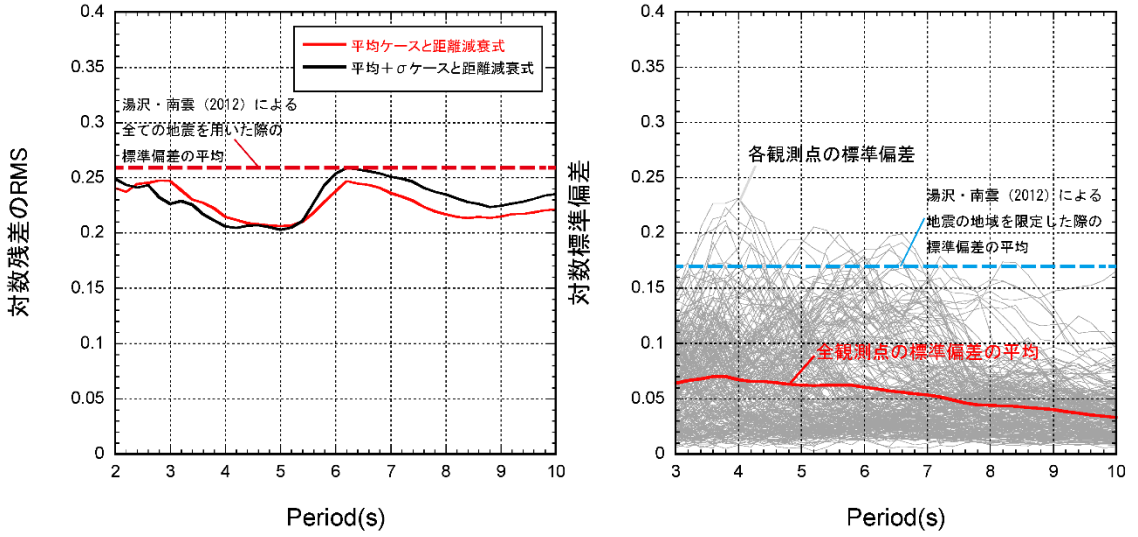


図 3.4-36　（左）距離減衰式と FDM の増幅率に対する対数残差の比較。（右）FDM の 8 ケースにおける対数標準偏差の比較。

○超高層建物の設計用入力地震動に関する基準等

調査対象は、建設省（現、国土交通省）平 12 建告第 1461 号に示される「超高層建築物の構造耐力上の安全性を確かめるための構造計算の基準を定める件」に示される地震動、指定性能評価機関（日本建築センター、日本 ERI）の業務方法に示されている地震動、国土交通省「超高層建築物等における長周期地震動の対策試案について」に示される地震動とした。

設計用地震動は、平成 12 年 5 月 31 日に平 12 建告第 1461 号において、以下のように定められている。

(1) 解放工学的基盤における加速度応答スペクトル（減衰定数 h=0.05）を次の表に定める数値に適合するものとし、表層地盤による増幅を適切に考慮すること。

周期（秒）	加速度応答スペクトル（単位　メートル毎秒毎秒）	
	稀に発生する地震動	極めて稀に発生する地震動
T＜0.16	(0.64 + 6T) Z	稀に発生する地震動に対する加速度応答スペクトルの五倍の数値とする。
0.16≦T＜0.64	1.6Z	
0.64≦T	(1.024／T) Z	
この表において、T 及び Z はそれぞれ建築物の周期（単位　秒）及び令第八十八条第一項に規定する Z の数値を表す。		

(2) 開始から終了までの継続時間を六十秒以上とすること。

(3) 適切な時間の間隔で地震動の数値が明らかにされていること。

(4) 建築物が地震動に対して構造耐力上安全であることを検証するために必要な個数以上であること。

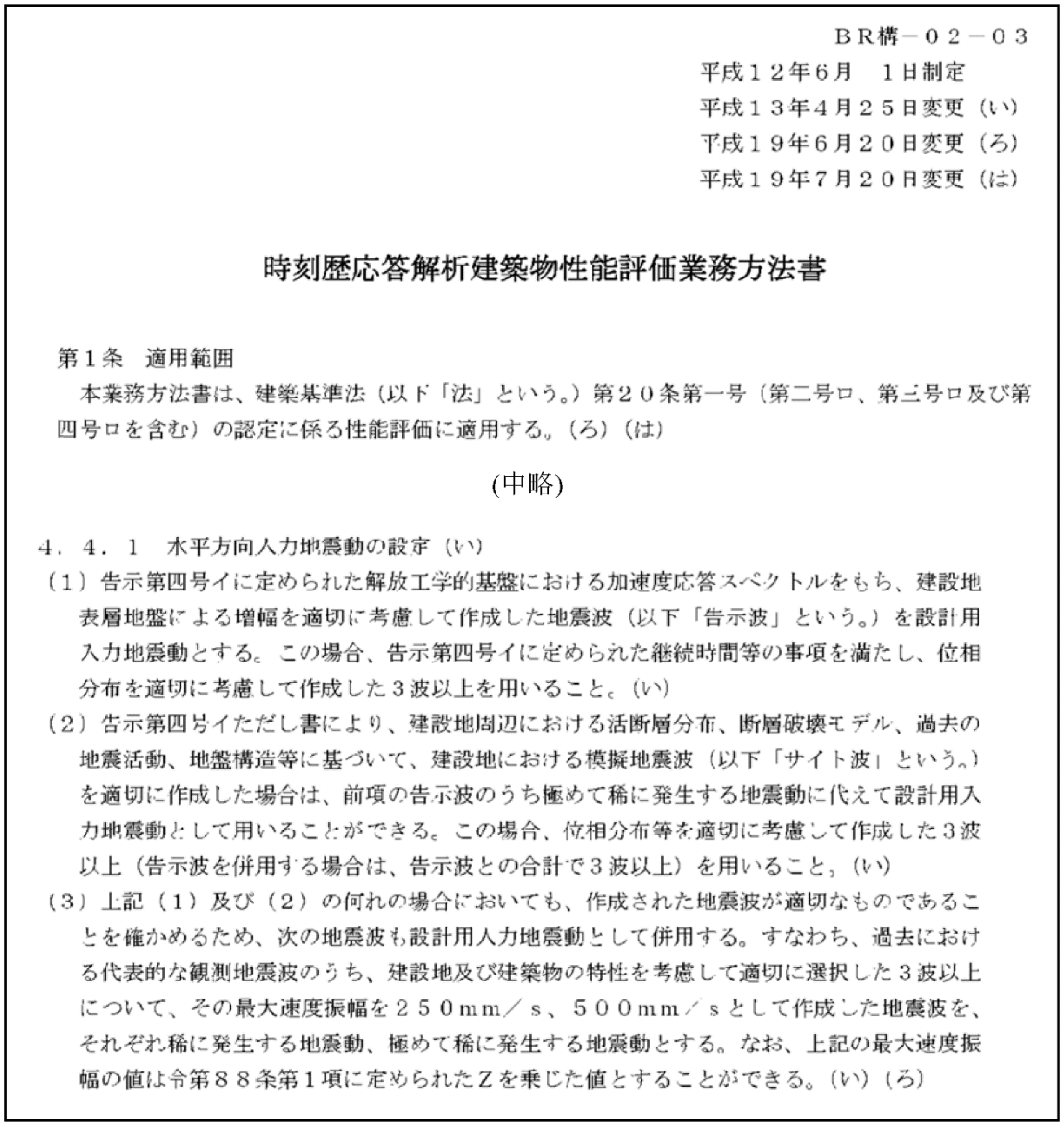


図 3.4-37　地震地域係数 Z（建築物の構造関係技術基準解説書編集委員会、2007）。

以上の具体的な運用は、日本建築センターや日本 ERI などの指定性能評価機関が各々の

業務方法所に基づいて行っている。評価機関による業務方法書の大きな相違は見られないため、日本建築センター（図 3.4-38）を例にとり概要を以下に示す。

1) 位相分布を適切に考慮して作成した 3 波以上の告示波、または
2) 位相分布を適切に考慮して作成した 3 波以上のサイト波（告示波を併用する場合は、告示波との合計で 3 波以上）
3) 上記 1) および 2) の何れの場合においても、既往波の最大速度振幅を 25cm/s、50cm/s に規準化した地震波を、それぞれ稀に発生する地震動、極めて稀に発生する地震動とする。その際、地域係数の Z（図 3.4-37）は考慮可能。



ＢＲ構－０２－０３
平成１２年６月　１日制定
平成１３年４月２５日変更（い）
平成１９年６月２０日変更（ろ）
平成１９年７月２０日変更（は）

時刻歴応答解析建築物性能評価業務方法書

第１条　適用範囲
本業務方法書は、建築基準法（以下「法」という。）第２０条第一号（第二号ロ、第三号ロ及び第四号ロを含む）の認定に係る性能評価に適用する。（ろ）（は）

(中略)

４．４．１　水平方向入力地震動の設定（い）
（１）告示第四号イに定められた解放工学的基盤における加速度応答スペクトルをもち、建設地表層地盤による増幅を適切に考慮して作成した地震波（以下「告示波」という。）を設計用入力地震動とする。この場合、告示第四号イに定められた継続時間等の事項を満たし、位相分布を適切に考慮して作成した３波以上を用いること。（い）
（２）告示第四号イただし書により、建設地周辺における活断層分布、断層破壊モデル、過去の地震活動、地盤構造等に基づいて、建設地における模擬地震波（以下「サイト波」という。）を適切に作成した場合は、前項の告示波のうち極めて稀に発生する地震動に代えて設計用入力地震動として用いることができる。この場合、位相分布等を適切に考慮して作成した３波以上（告示波を併用する場合は、告示波との合計で３波以上）を用いること。（い）
（３）上記（１）及び（２）の何れの場合においても、作成された地震波が適切なものであることを確かめるため、次の地震波も設計用入力地震動として併用する。すなわち、過去における代表的な観測地震波のうち、建設地及び建築物の特性を考慮して適切に選択した３波以上について、その最大速度振幅を２５０ｍｍ／ｓ、５００ｍｍ／ｓとして作成した地震波を、それぞれ稀に発生する地震動、極めて稀に発生する地震動とする。なお、上記の最大速度振幅の値は令第８８条第１項に定められたＺを乗じた値とすることができる。（い）（ろ）

図 3.4-38　日本建築センターによる業務方法書。

○石油タンクの設計用入力時震動（消防法）

調査対象は、消防法関係法規集とした。石油タンクに係る地震による荷重は、設置場所や大きさから以下に分類されている 4 種類の石油タンクにおいて設定されている。

・特定屋外貯蔵タンク（地上に設置された 1000kl 以上の貯蔵所）
・準特定屋外貯蔵タンク（地上に設置された 500kl 以上 1000kl 未満の貯蔵所）
・それ以外の屋外貯蔵タンク（地上に設置された 500kl 未満の貯蔵所）
・地中貯蔵タンク（地下に設置された貯蔵所）

ここでは、特定屋外貯蔵タンクに対する地震荷重を示す。消防関係法規集から引用した記述を以下に示し、要点となる記述に赤線を付す。ここで示す告示は、昭和 49 年自治省告示第 99 号（危険物の規制に関する技術上の基準の細目を定める告示）を示しており、2003 年十勝沖地震を受けて平成 17 年に改訂されている。

地震外力は、タンク本体にかかる慣性力と波面揺動に対する力を考慮する必要がある。タンク本体に係る慣性力と波面揺動に係る設計震度は各々規定されており、それらを以下に示す。

①タンク本体に係る設計震度

図 3.4-39 に示す設計震度は設計水平震度であり、設計鉛直震度は設計水平震度の 2 分の 1 とする。

告示第 4 条の 20 第 2 項

2　地震の影響に関する特定屋外貯蔵タンクの設計震度の計算方法は、次に定めるとおりとする。

一　設計水平震度は、次の式によること。

$Kh_1 = 0.15 \nu_1 \cdot \nu_2 \cdot \nu_3$

ν_1は、地域別補正係数（次の表イの中欄に掲げる地域区分に応じ、同表の下欄〔右欄〕に掲げる値とする。第三号、第４条の23第一号、第４条の45第２項第一号及び第二号、第13条第２項第一号並びに第79条第二号において同じ。）

ν_2は、地盤別補正係数（次の表ロの上欄〔左欄〕に掲げる特定屋外貯蔵タンクが設置される地盤の区分に応じ、同表の下欄〔右欄〕に掲げる値とする。第４条の23第一号、第４条の45第２項第二号及び第79条第二号において同じ。）

ν_3は、特定屋外貯蔵タンクの固有周期を考慮した応答倍率（次の図ハに掲げる地盤の区分に応じて特定屋外貯蔵タンクの固有周期より求めた値とする。第79条第二号において同じ。）

図 3.4-39　石油タンク本体に係る設計震度（昭和 49 年自治省告示第 99 号より）。

②波面揺動に係る設計震度

波面揺動に係る設計水平震度を図 3.4-40 に示す。波面揺動の設計水平震度 Kh_2 は、速度応答スペクトル Sv (cm/s) により以下の式で表せる。

$$Kh_2 = \frac{1}{g}\left(\frac{2\pi}{T_S}\right)Sv(T_S)$$

G は重力加速度（cm/s²）、T は周期を表す。式展開すると、以下の式が得られる。v_5 は T_S の関数を表す。

$$Sv\,(T_S) = 105.4 \cdot v_1 \cdot v_5 \text{ (cm/s)}$$

告示第 4 条の 20 第 2 項第三号

三　液面揺動の設計水平震度は次の式によること。

$Kh_2 = 0.15 \nu_1 \cdot \nu_4 \cdot \nu_5$

Kh_2は、液面揺動の設計水平震度

ν_1は、地域別補正係数

ν_4は、液面揺動の一次固有周期を考慮した応答倍率であつて、次の式により求めた値

$\nu_4 = \frac{4.5}{Ts}$

T_{s1}は、液面揺動の一次固有周期であつて、次の式により求めた値

$T_{s1} = 2\pi\sqrt{\frac{D}{3.68g} \cdot \coth\left(\frac{3.68H}{D}\right)}$

T_{s1}は、液面揺動の一次固有周期（単位　s）

Dは、特定屋外貯蔵タンクの内径（単位　m）

gは、重力加速度（単位　m／s²）

Hは、最高液面高さ（単位　m）

ν_5は、長周期地震動に係る地域特性に応じた補正係数（次のイからハまでに規定する区域に設置される特定屋外貯蔵タンクにあつては当該特定屋外貯蔵タンクの存する敷地又はその周辺で得られた強震計地震動記録等に基づき、地域特性を考慮して予想された速度応答スペクトルから、当該特定屋外貯蔵タンクの液面揺動の一次固有周期に応じた速度を100cm／sで除した値（当該値が次のイからハまでにそれぞれ掲げる図から当該特定屋外貯蔵タンクの液面揺動の一次固有周期に応じて求めた値を下回る場合にあつては、当該図から求めた値とする。ただし、適切な強震計地震動記録等が得られていない場合にあつては、当該図から求めた値とすることができる。）とし、その他の特定屋外貯蔵タンクにあつては1.0とする。）

図 3.4-40　波面揺動に係る設計震度（昭和 49 年自治省告示第 99 号より）。

○昇降機の耐震設計

昇降機（エレベーターおよびエスカレーター）は、過去の地震被害の経験をもとに、建築物の新耐震基準制定（1981 年）以後、建築基準法令等の改正や関連告示の公布に基づいて具体化するため、以下の指針が制定されてきた。2014 年改訂の最新の指針を基本として、長周期地震動対策や超高層建物に関係した部分を中心に調査した。

1995 年兵庫県南部地震で過去に経験のない釣合おもり片の脱落やエスカレータ本体の落下の被害が発生し、更なる耐震性能強化が求められた。2004 年新潟県中越地震で約 150km 離れた関東平野で長周期地震動が発生し、高層ビルのエレベーターのロープ類が昇降路内の機器に引っかかる被害が発生した。さらに 2005 年千葉県北西部の地震で広範囲に多数のエレベーターが地震時管制運転で長時間休止する状況が発生した。これらを契機として、2009 年に昇降機の耐震に関する建築基準法施行令と関連告示の見直しによって長周期地震動対策を含む耐震対策が行われることとなった。

① 滑節部の外れ防止
② 滑車からの外れ防止
③ 昇降路内突起物への保護措置
④ 駆動装置及び制御器の転倒移動防止措置
⑤ 地震時管制運転（P 波管制運転）

なお、2014 年にも 2011 年東北地方太平洋沖地震の教訓を生かして改訂が行われているが、長周期地震動対策は含まれていない。

a) 耐震性能の目標

2014 年版の耐震設計・施行指針における耐震性能の目標は以下の通りである。

・エレベーターは、稀に発生する地震動に対して、地震後に支障がなく運行できるものとする。極めて稀に発生する地震動に対しては、機器に損傷は生じても、かごが懸垂支持されているものとする。
・エスカレータは、極めて稀に発生する地震動に対して機器の損傷が生じても建築梁等の支持材から外れて脱落しないものとする。

これらの思想に加え、エレベーターについては、極めて稀に発生する地震動に対しては、かご内の乗客を救出できる性能を求めている。また、建築物の固有周期での揺れの大きさや揺れの継続時間等によって、昇降路内で引っかかり被害が発生しやすいロープやテールコード等長尺物が存在する。そこで、地震を感知した時点でエレベーターを原則として最寄階にいったん停止させ、不可能な場合は速やかに一旦停止した後、地震が収まった後に長尺物の揺れの大小によって自動復帰、手動点検復帰、あるいは早期の復旧が求められる建築物施設にあっては自動診断運転による運転早期復旧手段を採用することによって復帰させる。そこで、稀に発生する地震に対しては、かごの釣合おもりの昇降案内機器の運行限界の耐力評価方法を規定するとともに、地震時管制運転で運行限界を補い、自動復旧できる機能で対応できることを目標とする。極めて稀に発生する地震に対しては、人命安全に関わるため、かごに閉じ込められた乗客を救出できるよう、巻上機等のかごの懸垂限界の耐力評価方法

を規定する。

b) 地震被災後の早期復旧を目的とする耐震設計区分の考え方

エレベーターが被災したときの建築物内の混乱を軽減する耐震設計区分が導入されている。

・高層建物用エレベーターの設計用地震力

多くの利用者が集中すると考えられる 60m を超える超高層建物については、被害の影響度を考慮して設計震度（重力比加速度）の割り増しを行う。

・エレベーターの使われ方に応じた耐震設計方法

耐震設計目標から定める一版建物の耐震設計クラス（A_{14}）よりも高い耐震クラス（S_{14}）を設ける。S_{14} は建物規模や地震被災後に早期に運転を要求する場合に設定する。S14 では A14 の約 1.5 倍の地震力を考慮する。耐震クラスと性能について表 3.4-2 のようにまとめられている。

c) エレベーターの地震時管制運転、乗客の救出および利用者の混乱低減策

設置される建築物の高さ、エレベーターの用途等に応じて、次の地震時管制運転の機能を導入し、地震時の乗客の閉じ込め被害や、地震中や地震後のエレベーターの走行による 2 次被害を避ける地震時の運転方法を取り込み、エレベーターの耐震性能目標を補う。

① P 波管制運転

主に基部の地震計で P 波（初期微動）を検知して、エレベーターを最寄階に停止させる。閉じ込め防止を目的としている。昇降行程が 7m 以下などのエレベーターには義務付けられていない。緊急地震速報が活用されている場合もある。

② S 波管制運転

主に頂部の地震計で主要動や表面波を観測し、エレベーターの最寄階停止、運転再開を制御する。ロープの外れや引っかかり被害対策と再起動時の 2 次被害を防止することを目的としている。

③ 長尺物振れ管制運転

長周期地震動が卓越し P 波検知が困難な地震に対して、超高層建物においてロープやケーブル類の長借物が共振して昇降路内の突起物に引っかかっている状態でのエレベーター走行を避けることを目的としている。

さらに、地震後の乗客の救出と利用者の混乱を低減する方法として、以下の機能がある。

① 停電時の最寄階運転機能

停電していても最寄階運転を継続するための予備電源を設けることを義務付けされている。

② 地震時・地震後の乗客へのエレベーターの運転情報提示

エレベーター内で利用者の混乱防止のため地震時管制運転の状況を表示することを義

務付けされている。乗場ホールへの情報提供は推奨されている。

③ 閉じ込め時リスタート運転機能

地震時に安全装置作動により階の中間に停止した場合、地震後に安全装置が復帰した場合、最寄階運転を再開する機能を設ける。

④ 地震後の早期復旧の取り組みによる利用者の混乱回避

専門技術者の診断を待つことなく、仮復旧運転を再開できる自動診断機能を設ける。

各種の管制運転等の法令や指針での義務付け区分をまとめて表 3.4-3 に示す。ただし、管制運転の範囲は、エレベーターの速度、昇降行程、建築物の高さ等により適用要否がある。

表 3.4-2　エレベーターの耐震クラスと耐震性能。

	項目	耐震クラス	
		A_{14}	S_{14}
運行限界耐力	建築物基礎部の加速度基準値	120 Gal 注 1)	200 Gal 注 1)
	ロープ等の長尺物の引っかかり防止措置	昇降路内突出物に，ロープ類の引っ掛かりを防止する保護措置を設ける。 昇降路全高さ 60m 単位で保護措置を強化する。	耐震クラス A_{14} に対して防止措置を強化 （昇降路高さに関し，1 ランク上の措置を施す。）
	地震時管制運転	P 波管制運転を儲け閉じ込め回避運転を行う。	耐震クラス A_{14} と同じ。ただし、耐震強度を向上させているため、早期運転再開が可能となる。
安全限界耐力	建築物基礎部の加速度基準値	400 Gal	600 Gal
	層間変形角	エスカレータの場合、平 25 国告第 1046 号による層間変形角で本体が脱落しない措置を行う。	耐震クラス A_{14} と同じ。
	ロープの外れ防止措置	ロープガード等を設ける。	耐震クラス A_{14} と同じ。

注1)　建築物の高さ 60m 以下の場合を示す。建築物の高さが 60m を超える場合には、耐震クラス A14 で 200Gal、耐震クラス S14 で 300Gal とする。エレベーターの運行限界耐力の評価に用いる建築物基礎部想定加速度は、稀に発生する地震における建築物基礎部想定加速度よりも裕度を持たせている。

表 3.4-3　各種管制運転の義務付け区分。

管制運転等の内容	法令での義務付け	指針での標準仕様	指針でのオプション仕様
P 波管制運転	○	○	
S 波管制運転	○	○	
予備電源の設置（管制運転の補助）	○	○	
運転情報提示（かご内への表示）	○	○	
運転情報提示（かご内への情報提供）		○	
長尺物振れ管制運転		○	
運転情報提示（乗場への情報提供）			○
閉じ込め時リスタート運転機能			○
自動診断仮復旧運転			○

（C）広帯域地震動による超高層建物の応答への影響

本年度の「長周期地震動ハザードマップ作成等支援事業」では、広帯域化に向けた検討が進められている。また、相模トラフで発生する地震は、震源に近い首都圏、特に南関東地域においては、長周期地震動のみならず短周期地震動も含む広帯域地震動の影響も大きくなる。これまでの超高層ビルの応答に関する検討は、主として周期 3 秒以上の地震動に対して実施されてきたが、短周期地震動の影響が考慮されていない。

本検討では、短周期地震動の超高層建物への影響について調べた。地震動については、相模トラフの M8 クラスの地震を対象として実施した長周期地震動シミュレーション結果に岩城・藤原（2013）の方法により付加することにより作成した。東京都庁および神奈川県庁位置における加速度時刻歴、加速度応答スペクトルおよび速度応答スペクトルの比較例を図 3.4-41 に示す。

時刻暦応答解析により、短周期成分を含む広帯域地震動と含まない長周期地震動に対する応答の比較を行った。検討に用いた超高層建物モデルは多様性を考慮して設定した全 6 種類であるが、ここでは特徴的な例として S60 および S30 の結果のみを示す。最大層間変形角の分布を図 3.4-42 に示す。

- 長周期成分と比較して相対的に短周期成分のスペクトルが小さい地震動の場合（東京）、応答指標の違いは小さい。
- 長周期成分と比較して相対的に短周期成分のスペクトルが大きい地震動の場合（神奈川）、応答指標に違いが見られ、短周期成分の影響が大きいことが分かる。また、この場合には高次震動モードの影響が大きく見られ、中層階では両者に差がないのに対し、広帯域地震動では上層階と下層階が大きくなる、いわゆる二こぶの応答分布となる。

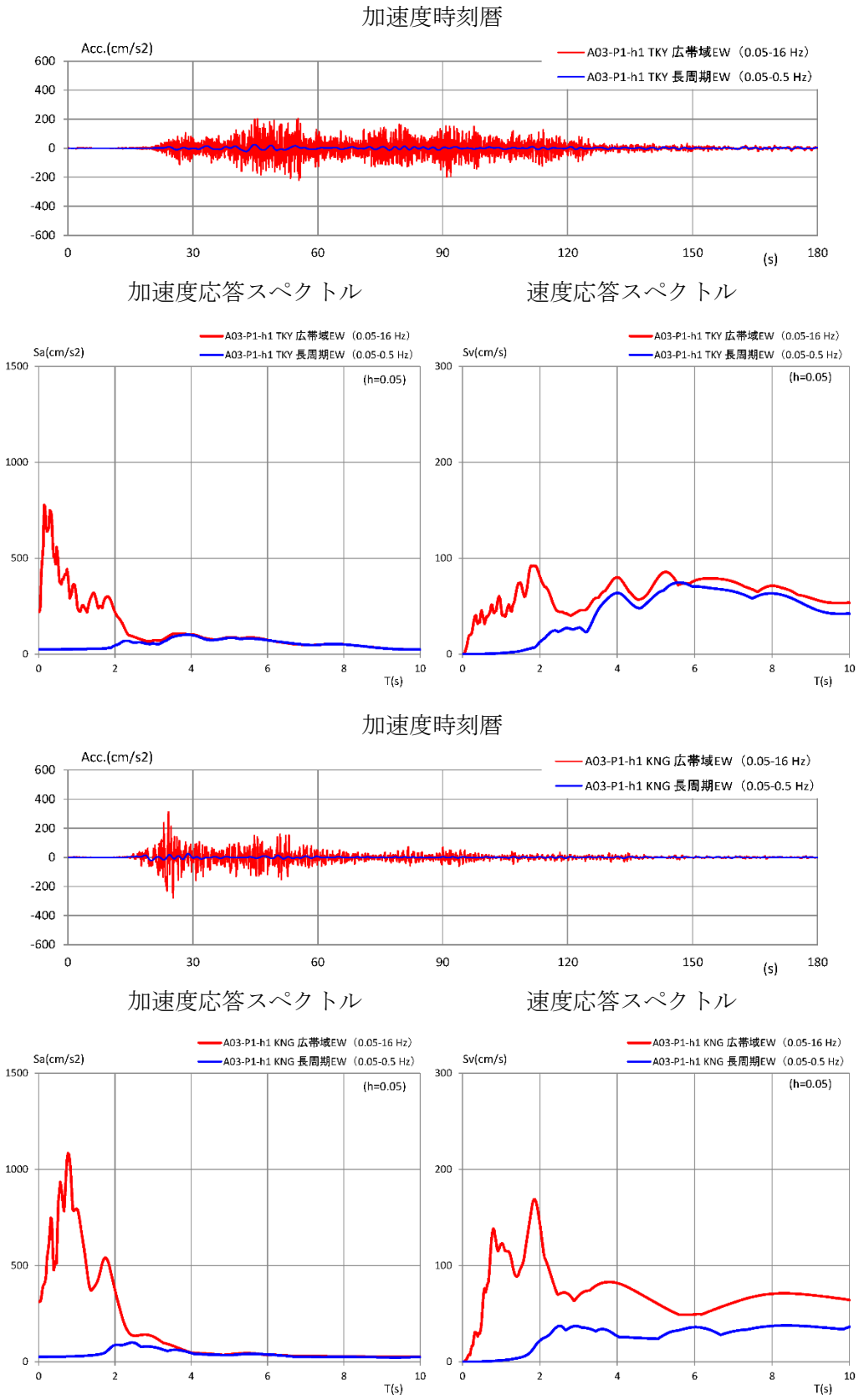


図 3.4-41　長周期地震動と広帯域地震動の加速度時刻暦、加速度応答スペクトル、速度応答スペクトルの比較。上）東京都庁 EW、下）神奈川県庁 EW。

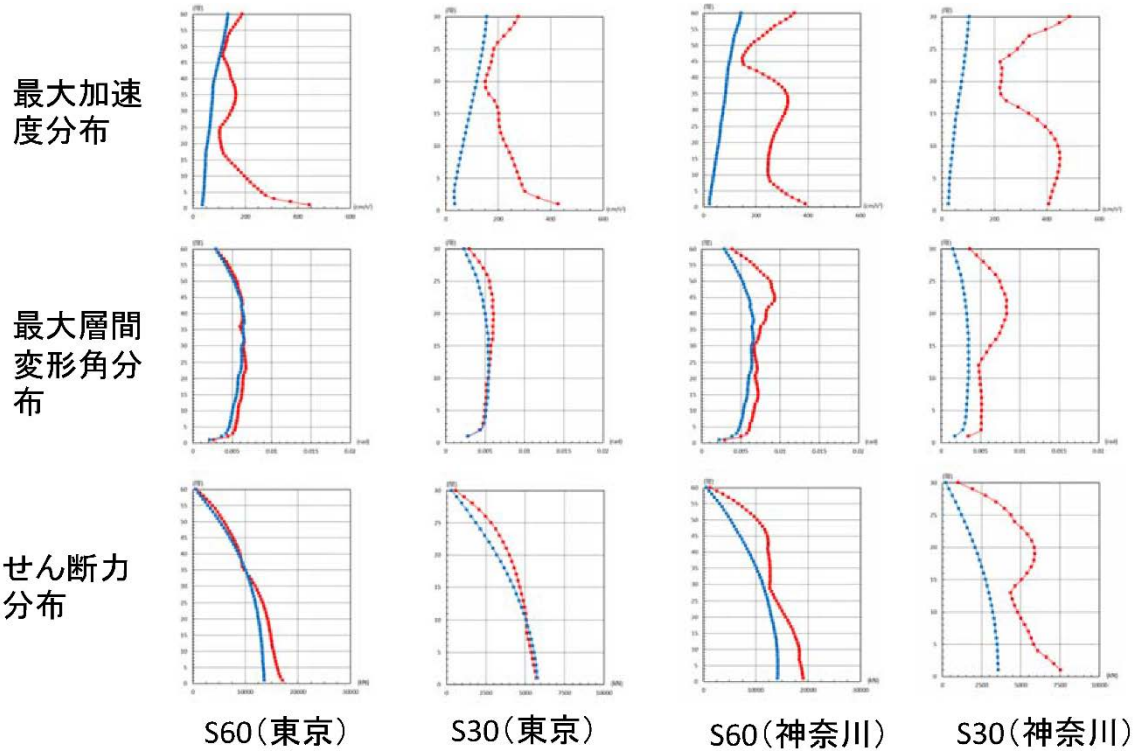


図 3.4-42　長周期地震動（青）と広帯域地震動（赤）での最大加速度分布、最大層間変形角分布およびせん断力分布の比較。上）東京都庁 EW、下）神奈川県庁 EW。

(c)　結論および今後の課題

本検討では、長周期地震動ハザード評価結果および評価に用いた地震活動、震源モデル、地下構造モデルについて、図面等を表示するだけでなく、それらの数値データを公開するシステムの一案を示すことができた。また、長周期ハザード評価結果に基づいて、東京、名古屋、大阪の三大都市圏について面的な長周期地震動と超高層建物の被害について検討し、地震動レベルや周期特性が同じ平野内でも大きく異なり、被害の様相が異なることが明らかとなった。このような面的な評価はハザードマップの活用につながるものである。さらに、長周期地震動の影響を受ける超高層建物、石油タンク、昇降機の設計入力地震動や耐震対策の考え方を調査し整理した。

一方で、本検討における地図表示において、Google Map を背景地図としたが、幅広くマップが活用されるためには例えば国土地理院による地図を背景として用いることも考えられる。また、これまでの長周期地震動ハザード評価で対象となっているのは周期 3 秒程度以上であり、対象となる超高層建物が S 造で 30 階建て以上、RC 造で 40 階建て以上となっており、大多数を占める 30 階未満の建物への影響が評価できていない。また、超高層ビルの応答においても短周期地震動の影響を受けることが確認されている。本検討で実施した広帯域化に向けた検討をさらに進めることにより、これらの建物も含めた長周期地震動

対策を提示していくことが可能になる。また、長周期地震動がどの方向から入射するかによって周期特性や増幅特性に影響を及ぼしていることも本検討で確かめられた。今後は入射方向による影響の違いも明らかにしていく必要がある。

(d) 引用文献

一般社団法人日本建築設備・昇降機センター・一般社団法人日本エレベーター協会，2014，建築基準法及び同法関連法令、昇降機技術基準の解説、2014 年版（昇降機耐震設計・施行指針 2014 年版を含む）.

岩城麻子・藤原広行，2013，低周波数地震動の情報を用いた高周波数地震動合成の試みー関東地域における検討ー，日本地震工学会論文集，13 (4)，1-18.

近代消防社刊，2008，注解消防関係法規集 2008 年版.

北村春幸・宮内洋二・福島順一・深田良雄・森伸之，2004，性能設計における性能判断基準値に関する研究ー時刻歴応答解析に基づく JSCA 耐震性能メニューの検証ー，日本建築学会構造系論文集，第 576 号，pp.47-54.

建築物の構造関係技術基準解説書編集委員会，2007，2007 年版　建築物の構造関係技術基準解説書，720p.

国土交通省，2010，超高層建築物等における長周期地震動への対策試案について，http://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000218.html.

日本建築学会長周期建物地震対応委員会，2012，長周期地震動対策に関する公開研究集会.

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.

石油コンビナート等特別防災区域を指定する政令（区域令），http://www.e-gov.go.jp/htmldata/S51/S51SE192.html.

総務省消防庁，2011，内部浮き蓋付き屋外貯蔵タンクの安全対策に関する検討報告書，http://www.fdma.go.jp/html/data/tuchi2305/pdf/230512-first.pdf.

湯沢豊・南雲秀樹，2012，長周期地震動の揺れ易さ係数の変動要因とその低減対策ー関東平野を例としてー，日本地震工学会論文集，12 (2)，41-59.

座間信作・畑山健・西晴樹・山田實，2012，石油タンクのスロッシングによる被害，第 15 回消防防災研究講演会資料（平成 24 年 1 月），消防研究センター，http://nrifd.fdma.go.jp/publication/koenkai_gaiyou/files/kouenkai_15th.pdf.

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評価へ向けて、平成 25 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広帯域化に向けた検討を実施し、以下の成果が得られた。

- 破壊伝播および従来のモデルで設定されるアスペリティ（強震動生成域）よりも小さいすべり量の不均質性を震源モデルに導入することにより、周期 1～3 秒の地震動の振幅が大きくなることが確認された。
- 南関東地域を対象とした浅部・深部統合地盤モデルを用いることにより、周期 1 ～2 秒の地震動の振幅が従来のシミュレーション結果と比べて大きくなることが確認された。
- 不確実性を考慮した多数の震源モデルを作成し、周期 2 秒以上を対象とした地震動ハザード評価の試算を行った。破壊伝播の不均質性を付与することにより、周期 2～3 秒のハザードレベルが上昇することが確認された。
- 大阪平野および濃尾平野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、使用されているボーリングデータの数は南関東地域に匹敵している。また、愛知県域では南関東地域の浅部・深部統合地盤モデルと似た方法によるモデル化がなされつつあるが、大阪府域では浅部と深部が別々の状況であった。
- 長周期地震動ハザード評価結果として統合した結果だけでなく、個々のケース（シナリオ）のシミュレーション結果や用いた震源モデル等も含めてデータ等を公開、ダウンロードできるシステムの案を提示した。
- 長周期地震動ハザードマップの利活用に向けた検討のひとつとして、三大都市圏を対象とした面的な超高層建物の応答解析を実施した。その結果、同じ平野内でも地震動レベルや周期特性が大きく異なることを示した。
- 短周期地震動が長周期地震動と同等に大きい場合には、超高層建物の応答に対しても短周期地震動が大きく影響することが確認された。
- 長周期地震動の影響を受ける超高層建物、石油タンク、昇降機の設計入力地震動や耐震対策の考え方を整理した。

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 8 クラスの地震の観測記録等を用いた検証が不十分であり、今後進める必要がある。
- 差分法など、三次元地下構造モデルを用いて理論的手法により周期 1 秒程度までの地震動計算を実施するためには、計算の不安定（発散）を防ぐための地下構造モデルの調整が必要である。
- インターネット上でハザードマップを表示する際の背景地図について、国土地理院による地図を用いることも考えられる。

・長周期地震動影響を受ける構造物として、超高層建物だけでなく免震建物等も今後考慮する必要がある。
・長周期地震動の射する方向による周期特性や増幅特性に影響の違いを明らかにすることも必要である。