

応答スペクトルに関する 地震動ハザード評価（試作版）

令和4年（2022年）11月28日

地震調査研究推進本部

地震調査委員会

強震動評価部会

応答スペクトルに関する地震動ハザード評価（試作版）

目次

1. はじめに	1
2. 応答スペクトルに関する地震動ハザード評価の基本的な考え方	3
2.1 応答スペクトルに関する地震動ハザード評価の位置づけ	3
2.2 応答スペクトルに関する地震動ハザード評価の基本的な考え方	4
3. 応答スペクトルに関する地震動予測式の整理と選定	9
3.1 近年における応答スペクトルに関する地震動予測式の整理	9
3.2 地震動予測式の選定	12
3.2.1 地震動ハザード評価を前提とした地震動予測式の選定条件	12
3.2.2 選定した地震動予測式の比較	15
3.2.3 地震動予測式による応答スペクトルの予測値と観測値の比較	30
3.3 地震動予測式の選定結果	31
4. 応答スペクトルに関する地震動ハザードの評価条件	32
4.1 地震動予測式のばらつき	32
4.2 地震動ハザードの評価条件の設定	33
5. 各地点の地震動ハザードの試算結果	36
5.1 東京都庁位置	36
5.2 名古屋市役所位置	41
5.3 大阪市役所位置	46
6. 今後に向けて	51
6.1 利活用に向けて	51
6.2 今後の課題	51
6.2.1 地震動予測式の精度向上の課題	51
6.2.2 地震動ハザード評価の予測精度向上の課題	52
6.2.3 利活用に関する課題	52
参考文献	53
付録1 全国地震動予測地図 2020年版の地震活動モデルの概要	
付録2 近年の地震に対する地震動予測式の評価結果	
付録3 地震動予測式のばらつき	
付録4 地震動予測式と地震動ハザード評価	

1. はじめに

地震調査研究推進本部は、「地震調査研究の推進について―地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策―」（平成11年4月23日）において、活断層調査、地震発生可能性の長期評価、強震動予測等の成果を統合し、強い地震動の発生の確率的な予測情報を含む全国を概観した地震動予測地図を作成することが、当面推進すべき地震調査研究の主要な課題としてあげられ、平成17年3月に「全国を概観した地震動予測地図」を公表した。この地図は、地震防災意識の高揚のために用いられるほか、我が国の国や地域で作成する防災計画に利用されることなどを想定して取り組んだものである。

平成23年（2011年）に発生した東北地方太平洋沖地震を受けて、それまでの確率論的地震動予測地図における様々な課題が指摘された。具体的には、東北地方太平洋沖型の地震が長期評価の対象とされていなかったこと、長期評価されていない地震の考慮が不十分であったことなどが挙げられる。これらを踏まえ、東北地方太平洋沖地震等を踏まえた長期評価等を反映することや、不確実性の考慮の仕方を工夫すること（発生位置・規模・発生間隔などが明らかでないため長期評価されていない地震について従来よりも大きな規模の地震まで考慮する等）などの方針に基づき検討・改良を行い、平成26年12月に「全国地震動予測地図2014年版」を公表した。

その後も引き続き、地震動予測地図の高度化に向けて、地震動予測手法や地下構造モデルなどの改良を検討してきた。そして、それらの成果をとりまとめた最新版として、令和3年3月に「全国地震動予測地図2020年版」を公表した。

これとは別に、「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が長周期地震動であったことを受け、長周期地震動に焦点を当てた地震動予測地図として、平成21年9月に想定東海地震・東南海地震及び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」を公表した。その後、対象地震の震源モデルの構築とその改良、地下構造モデルの構築とその改良を経て、平成24年1月に南海地震（昭和型）を対象とした「長周期地震動予測地図2012年試作版」を、平成28年10月に相模トラフ巨大地震を対象とした「長周期地震動評価2016年試作版」をそれぞれ公表した。現在も予測地図の活用法を含めた長周期地震動の調査研究を推進している。

今般、前述の「全国地震動予測地図」による成果は着実に社会へと還元され始めている。全国地震動予測地図や各種長期評価は、防災計画、地震保険の基準料率算定、耐震対策の計画に活用され始めている。他方、各種長期評価を行う過程で生み出される様々なデータや分析手法が建築物の耐震化等に活用できる可能性は指摘されているが、十分活用が進んでいるとは言えない。

このような状況を踏まえて、「地震調査研究の推進について―地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策（第3期）―」（令和元年5月31日）において、「工学的利活用に向けて、地震動の応答スペクトルに関する地震動予測地図を作成する。」方針が打ち出されている。ここで、応答スペクトルとは、耐震設計など工学分野において、地震動特性を表現する1つの指標である。様々な周期特性を持つ構造物に対して、その地震動がどの程度の揺れの強さ（応答）を生じさせるかを示すものである。応答スペクトルは、ある固有周期と減衰定数を有する1質点系モデルに地震動を入力し計算される応答波形の最大値とその固有周期の関係として求められる（図1-1参照）。上述した長周期地震動予測地図（試作版）においても地

震動の周期特性を示す指標として用いられている。また、参考として、高層建物の固有周期と建物高さ・階数との関係を図 1-2 に示す。

上記の方針のもと、今後、様々なニーズを踏まえた成果のあり方や利活用、地震動予測式や地震動ハザード評価の予測精度向上などの諸課題の検討を進めるための基礎資料となるよう、地震動ハザードの評価条件や試算結果を中心にまとめ、応答スペクトルに関する地震動ハザード評価の試作版を作成した。本試作版では、応答スペクトルとして工学的基盤での減衰定数 5%の絶対加速度応答スペクトル（以下、単に加速度応答スペクトルと称する）を検討対象とする。具体的には、影響度の高い地震が異なる複数の評価地点を選定し、各評価地点における周期ごとのハザードカーブに加えて、一様ハザードスペクトル、ハザードの再分解による地震タイプごとの影響度などの情報も含めている。ただし、面的な評価は今後の課題である。なお、地表面における応答スペクトルを求める場合には、工学的基盤から地表面に至る表層地盤の増幅効果を考慮する必要がある。

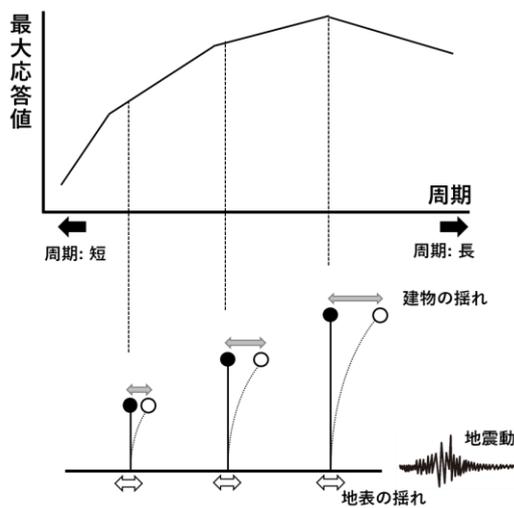


図 1-1 応答スペクトルの模式図

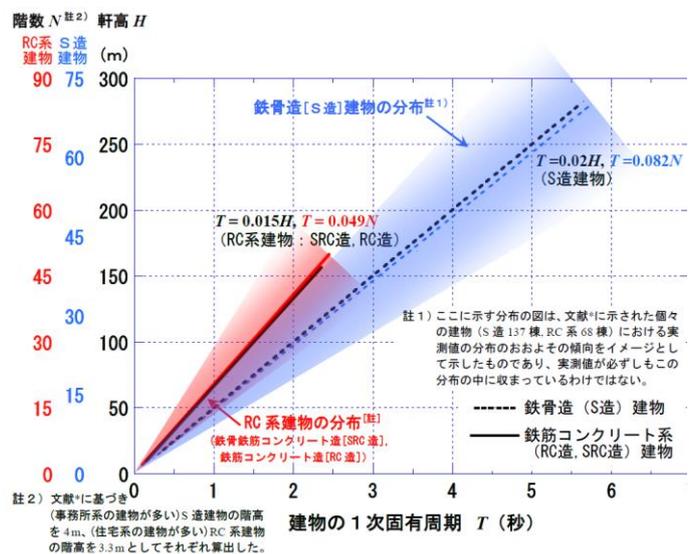


図 2.5 高層建物の固有周期と建物高さ・階数との関係
(日本建築学会, 2000 をもとに作成)。

図 1-2 高層建物の固有周期と建物高さ・階数との関係。

「長周期地震動評価 2016 年試作版」(地震調査研究推進本部地震調査委員会、2016) より抜粋。

2. 応答スペクトルに関する地震動ハザード評価の基本的な考え方

2.1 応答スペクトルに関する地震動ハザード評価の位置づけ

従来、地震調査研究推進本部で作成してきた「地震動予測地図」には、「全国地震動予測地図」及び「長周期地震動予測地図（試作版）」があり、「全国地震動予測地図」は、さらに「確率論的地震動予測地図」及び「震源断層を特定した地震動予測地図（シナリオ地震動予測地図）」で構成される。各地震動予測地図の種類と用途について、表 2.1-1 に示す。

表 2.1-1 地震調査研究推進本部で作成してきた地震動予測地図の種類と用途

地震動予測地図		用途
全国地震動予測地図	確率論的地震動予測地図	リスク評価等のための基礎資料、耐震対策の計画など
	シナリオ地震動予測地図	特定の地震を想定した強震動の予測、耐震対策の計画など
長周期地震動予測地図（試作版）		長い固有周期を持つ建造物を対象とした耐震・制震・免震対策など

上記のうち、確率論的地震動予測地図は、地震発生の長期的な確率評価と地震動の評価とを組み合わせたものである。現時点で考慮し得る全ての地震の位置・規模・確率に基づき各地点（地表）がどの程度の確率でどの程度揺れるのかをまとめて計算し、その分布を地図上に示している。具体的には、多種・多数の地震の発生をモデル化した上で、地震動予測式（地震動強さの距離減衰式）を用いて工学的基盤の地震動最大速度を求め、表層地盤増幅率を乗じて地表の地震動最大速度を求め、経験式を用いた変換により地表の震度を求めている（簡便法）。ただし、ここでの揺れの評価は（最大速度から算出される）震度で示しており、周期による地震応答値の違いは考慮されていない。

一方、シナリオ地震動予測地図及び長周期地震動予測地図（試作版）は、特定の地震に対して、ある想定されたシナリオに対する詳細な強震動評価に基づき作成されたものである。これらの作成においては、精緻なモデルに基づく詳細な手法（詳細法）で強震動評価を行っており、特定の条件の下により精緻な震源モデルと地下構造モデルを用いて、災害発生への影響が大きいと考えられる周波数帯域をカバーした地震波形を予測することが可能である。ただし、特定の地震を対象とした地震動の予測であるため、発生時期の異なる複数の地震を考慮した地震応答振幅の確率評価などへの適用は難しい。また、震源断層を予め特定しにくい地震など、震源断層モデルの想定が難しい地震に対して、シナリオ地震動予測への適用が困難である。

ここで新たに検討する応答スペクトルに関する地震動ハザード評価は、今後の一定期間内に強い揺れに見舞われる可能性を、工学的基盤における地震動の応答スペクトルの観点から示したものである。ただし、地震動評価においては、従来の簡便法で用いてきた最大速度に関する地震動予測式ではなく、加速度応答スペクトルに関する地震動予測式を用いる。従って、加速度応答ス

ペクトルに関する地震動予測式を用いることにより、複数の固有周期を考慮した地震応答振幅の確率評価を行うことが可能となる。すなわち、本試作版は確率論的な評価手法を用いた、工学的基盤における地震動の応答スペクトルについての評価であるといえる。地震動の評価手法及び評価対象に対する本試作版の位置づけを表 2.1-2 に示す。

表 2.1-2 地震動の評価手法及び評価対象に対する本試作版の位置づけ

地震動の評価手法	地震動の評価対象	
	地表の震度	工学的基盤における地震動の応答スペクトル
確率論的評価	確率論的地震動予測地図	本試作版
決定論的評価	シナリオ地震動予測地図	長周期地震動予測地図（試作版）

「確率論的地震動予測」に相当する手法の工学的利用の例として、米国地質調査所 (United States Geological Survey, USGS) の全国地震ハザード地図プロジェクト (USGS National Seismic Hazard Mapping Project) が挙げられる。このプロジェクトは 1990 年代に開始され、1996 年に米国本土を、1997 年にアラスカ・ハワイを対象として、「確率論的地震動予測」に相当する手法に基づいた地震動予測地図が公表されている。この地震動予測では、今後 50 年間での超過確率 2%、5%、10% に対応する岩盤での最大加速度、及び周期 0.2 秒、0.3 秒、1.0 秒の加速度応答スペクトルが公表されている。

上記の USGS が作成した地震ハザード地図の成果は、米国での耐震設計等に用いられる Maximum Considered Earthquake Ground Motion Map (MCE 地震動マップ) として、米国土木学会 (American Society of Civil Engineers; ASCE) の ASCE 7 standard の Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures に取り入れられ、全米共通の建築基準である International Building Code (IBC) はこれに基づいている。これらは定期的に改訂されている。米国など海外において「確率論的地震動予測」が利活用されていることと同様に、我が国でも応答スペクトルに関する地震動ハザード評価結果の工学的な利活用が進むことが期待される。

2.2 応答スペクトルに関する地震動ハザード評価の基本的な考え方

全国地震動予測地図（例えば、地震調査研究推進本部地震調査委員会、2021）の確率論的地震動予測地図では、各評価地点での確率論的地震動ハザード評価を図 2.2-1 に示す手順で作成している。最初に対象とする地震を想定し、それぞれの地震の場所、マグニチュード、発生確率（頻度）を長期評価結果に基づいて設定する。それぞれの地震に対し、最大速度の地震動予測式に基づいてある地点における地震動の強さとそれを特定の期間内に超える確率の関係、すなわち、ハザードカーブの評価を行う。これらの結果を全ての地震について足し合わせることで、各地点での地震動ハザードカーブが評価される。この評価手法の詳細は、全国地震動予測地図 2020 年度版の「地震動予測地図の手引編・解説編」や「作成条件・計算結果編」、全国地震動予測地図 2014 年

版（地震調査研究推進本部地震調査委員会、2014）の付録1などを参照されたい。

本試作版で検討する「応答スペクトルに関する地震動ハザード評価」では、上記の最大速度の地震動予測式の代わりに、周期ごとの加速度応答スペクトルに関する地震動予測式を使用することで、各地点の工学的基盤での応答スペクトルについての地震動ハザードカーブの評価を行う（図2.2-2参照）。地震活動のモデル化については全国地震動予測地図2020年度版の「確率論的地震動予測地図」と同一の設定である。この概要については本試作版の付録1を参照されたい。なお、本試作版では、地表ではなく工学的基盤上における応答スペクトルについて試算した。Uniform California Earthquake Rupture Forecast, Version 3 (UCERF3)¹や Senior Seismic Hazard Analysis Committee (SSHAC)²では、ロジックツリーに複数の地震動予測式を取り込み、各々の式の重みを設定することにより認識論的不確定性を考慮している。ここでは試作版であることを考慮して、一つの地震動予測式のみを選定して地震動ハザード評価に用いることとした。複数の地震動予測式に基づく地震動ハザード評価は、今後の検討課題と位置付けている。

この結果を用いて、一様ハザードスペクトルの試算も行う。一様ハザードスペクトルとは、周期ごとの応答スペクトルに関する地震動ハザードカーブに基づき、同一の超過確率となる応答スペクトルの値を、周期を横軸としてつないだものである（図2.2-3）。全周期において同じ超過確率となる地震動を表現したものであり、種々の地震の影響が周期ごとに異なる度合いで統合されている。

¹ 米国カリフォルニア州を対象とした総合的な地震発生予測モデルであり、米国地質調査所（United States Geological Survey, USGS）、南カリフォルニア地震センター（Southern California Earthquake Center）、カリフォルニア州立地質調査所（California Geological Survey）により研究が進められている。2014年に発行された第3版が最新である。

² 確率論的な地震動評価で必要となる認識論的不確定性について、その検討内容や検討手順を検討するために米国に設置された委員会であり、その検討結果がSSHACガイドラインとして制定されている。

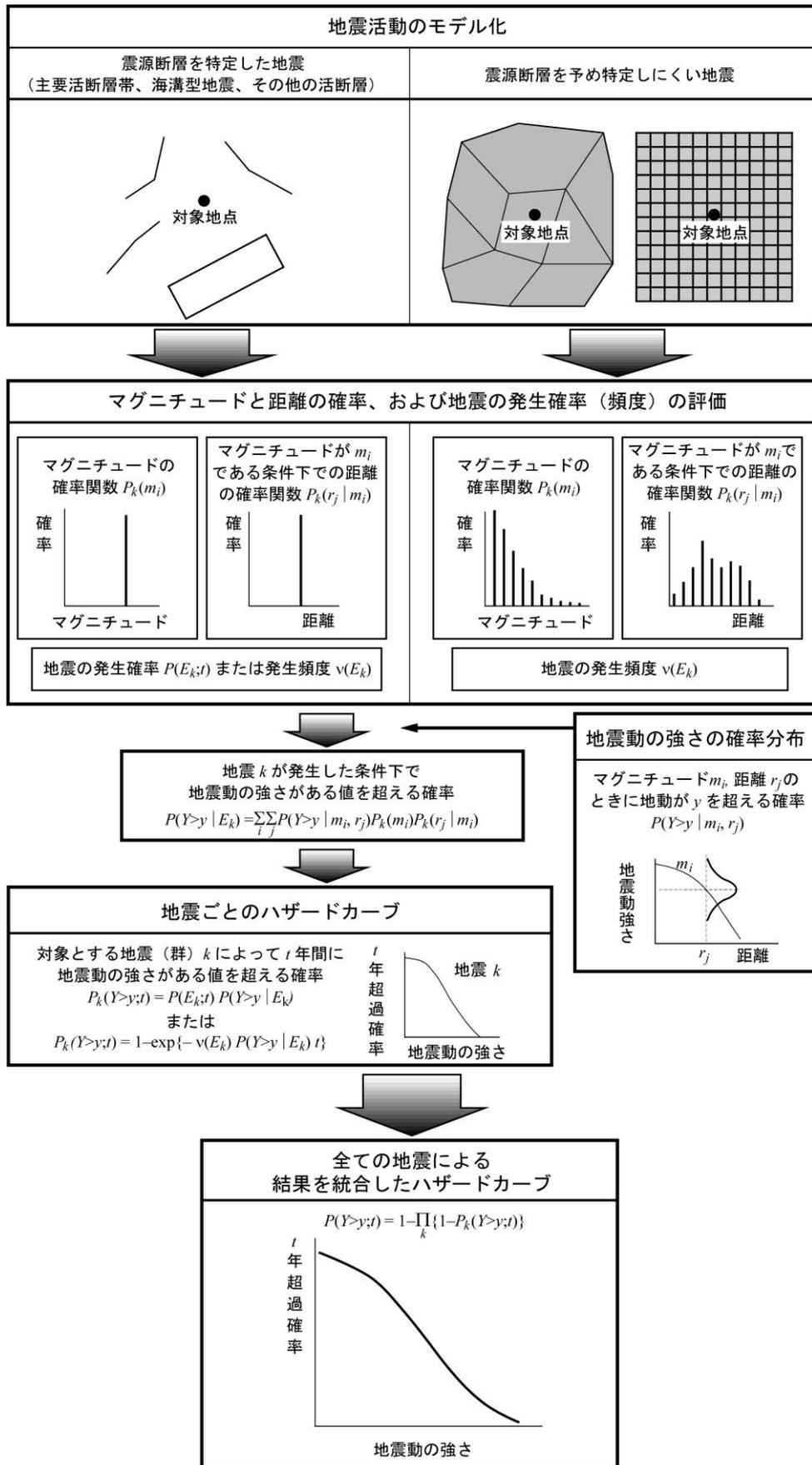


図 2.2-1 全国地震動予測地図 2020 年度版における確率論的地震動ハザード評価の手順

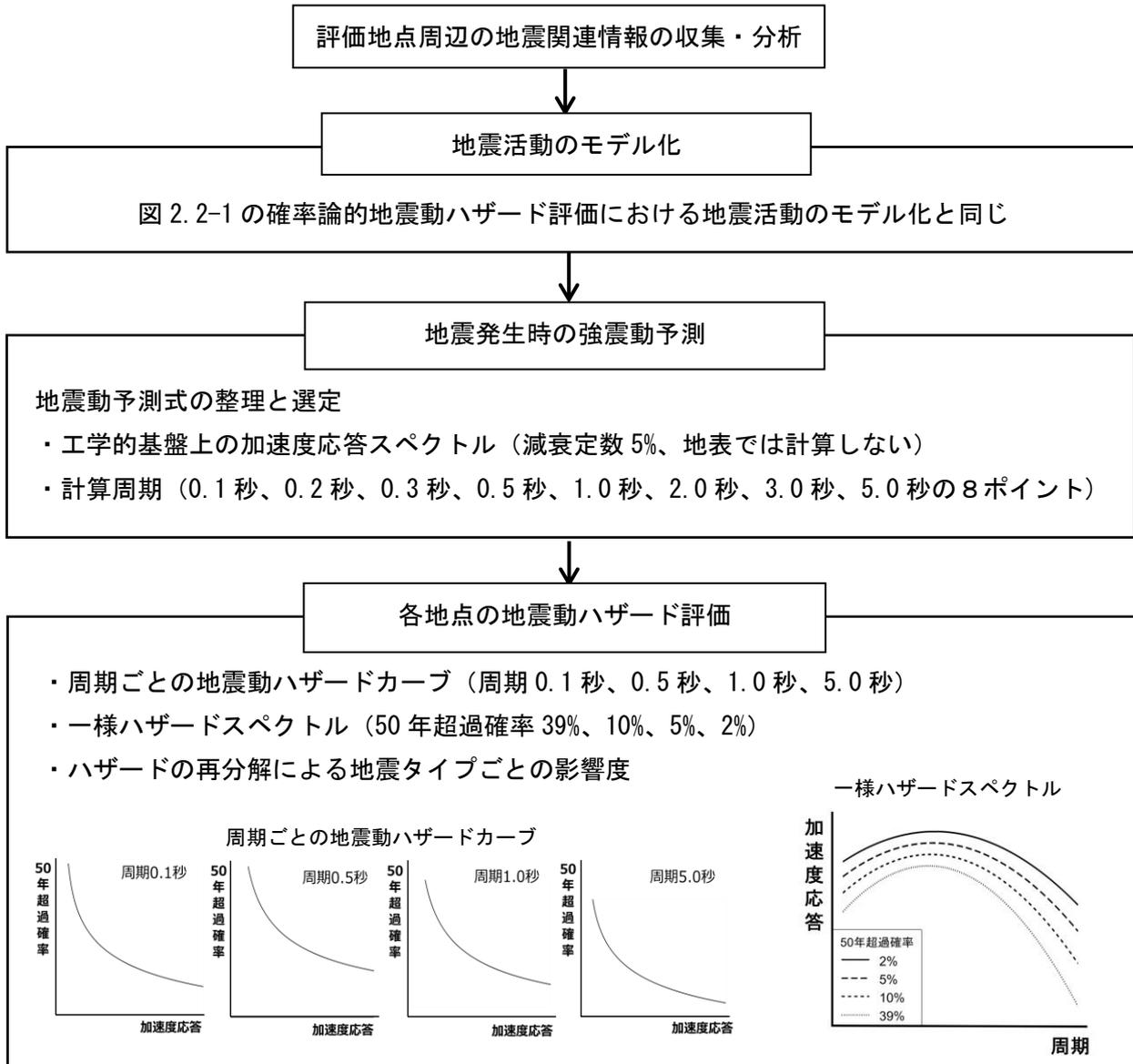


図 2.2-2 本試作版における応答スペクトルに関する地震動ハザード評価の手順

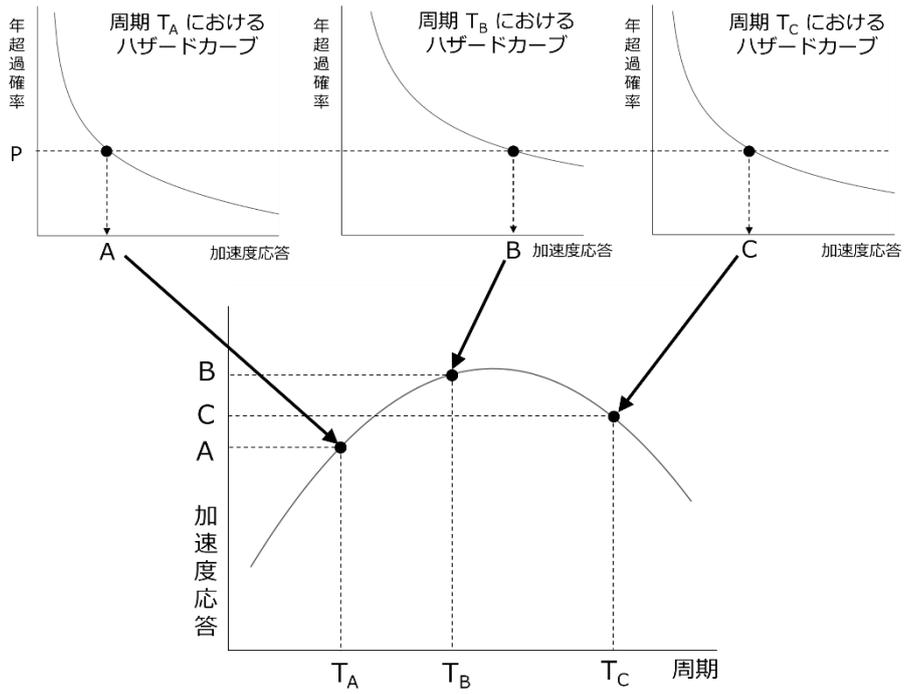


図 2.2-3 一様ハザードスペクトルの模式図

3. 応答スペクトルに関する地震動予測式の整理と選定

近年の応答スペクトルに関する地震動予測式を整理し、本試作版の地震動ハザード評価に用いる地震動予測式を選定した。本章では特に断りのない限り、応答スペクトルに関する地震動予測式を単に地震動予測式と称することとする。なお、以下で設定した地震動予測式の選定条件は、地震動ハザード評価に用いる観点から定めた条件であり、選定結果が地震動予測式の優劣を表しているわけではない。

3.1 近年における応答スペクトルに関する地震動予測式の整理

Douglas (2019) による世界中の地震動予測式のリストによれば、応答スペクトルを指標とする地震動予測式は 280 ほど提案されている。

我が国の地震動ハザード評価を検討するにあたって、より適切な地震動予測式であると考えられるのは、国立研究開発法人防災科学技術研究所が 1996 年（平成 8 年）6 月から運用を開始した K-NET をはじめとする高密度な強震観測網が国内に整備された以降の、多数の高精度な日本国内の強震動記録を地震動予測式作成の際に用いている式である。さらに、「確率論的地震動予測地図」において、海溝型地震による地震動ハザードが大きくなる地域が多いことを考慮すると、K-NET 設置後に初めて発生した海溝型の巨大地震である、2003 年十勝沖地震の強震動記録を用いている式であることが望ましい。また、地震動予測式の中には、特定地点が対象にされている式もあるが、全国を対象とした応答スペクトルの地震動ハザードを検討するにあたっては、日本国内での汎用性を前提として作成されているものが適切である。以上を踏まえ本試作版で用いる地震動予測式を以下の条件で整理した。

【本試作版で用いる地震動予測式の条件】

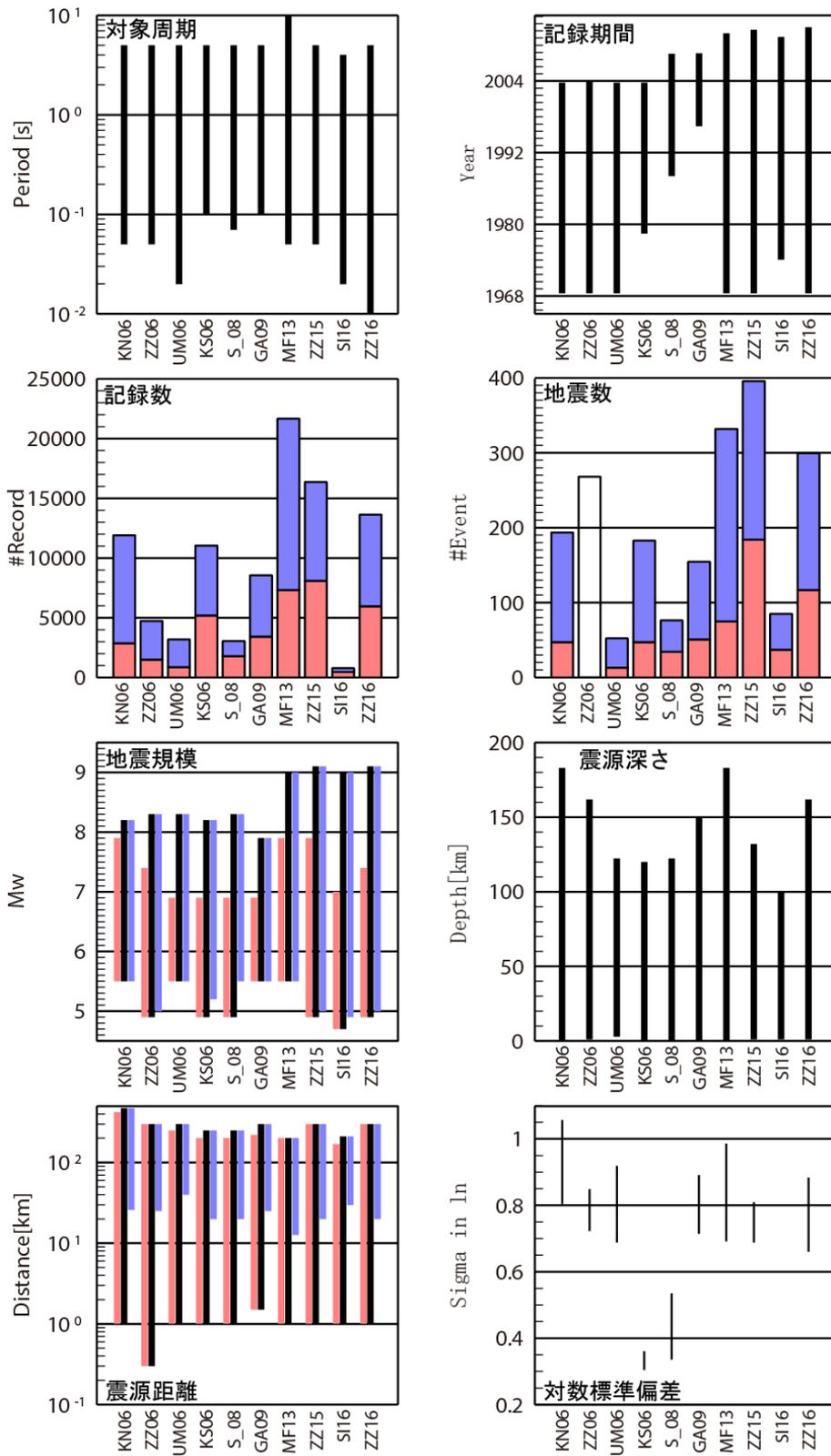
- ・主に日本の観測記録を用いている。
- ・K-NET 設置後に初めて発生した海溝型巨大地震である、2003 年十勝沖地震による強震動記録を含む。
- ・少なくとも周期 0.1～1.0 秒が含まれる。
- ・特定の地震あるいは観測点のみを対象としていない。
- ・査読付き論文として発表されている（期間は当該部分を調査した 2016 年末までとする）。

これらの条件により、以下の 10 組の地震動予測式が抽出された。

- ・【KN06】： Kanno et al. (2006)
- ・【ZZ06】： Zhao et al. (2006)
- ・【UM06】： 内山・翠川 (2006)
- ・【KS06】： 片岡・他 (2006)
- ・【S_08】： 佐藤 (2008, 2010)
- ・【GA09】： Goda and Atkinson (2009)
- ・【MF13】： Morikawa and Fujiwara (2013)

- ・【ZZ15】： Zhao et al. (2015)
- ・【SI16】： 佐々木・伊藤 (2016)
- ・【ZZ16】： Zhao, Liang et al. (2016a), Zhao, Jiang et al. (2016b), Zhao, Zhou et al. (2016c)

ここで、【S_08】及び【ZZ16】については複数の論文を記載しているが、それぞれ筆頭著者が同じでありデータの処理方法などが統一されているという点において、組み合わせて用いることができるものとして扱う。各地震動予測式に用いたデータ及び予測結果と観測データとの対数標準偏差の比較を図 3.1-1 に示す。



黒：全データ、赤：地殻内地震、青：海溝型地震

図 3.1-1 各地震動予測式に用いたデータ及び予測結果と観測データとの対数標準偏差の比較。地震数について、【ZZ06】では総数（269）の記載はあるものの、図表等からその内訳を把握することができなかつたため、白抜きで示した。

3.2 地震動予測式の選定

3.1 節では本試作版で用いる応答スペクトルに関する地震動予測式の条件を設定し、計 10 式を抽出した。本節では地震動ハザードを評価することを前提として新たに 3 条件を設定し、地震動予測式の絞り込みを行った。絞り込んだ地震動予測式について、特定の地震規模 M 、震源深さ H 、断層からの最短距離（断層最短距離） X の条件下での応答スペクトルの振幅や距離減衰特性を比較した。さらに、地震動予測式の構築に用いていない近年の地震について、観測記録の説明性を比較した。

3.2.1 地震動ハザード評価を前提とした地震動予測式の選定条件

日本全国を対象とした地震動ハザード評価を行う上で、全国地震動予測地図 2020 年版の地震活動モデルなどを用いる場合、使用する地震動予測式は以下の条件を満たすことが望ましいと考えられる。

① マグニチュード (M) 9 クラスまで適用可能

南海トラフ沿いで発生する大地震や日本海溝沿いの超巨大地震（東北地方太平洋沖型）といった $M9$ クラスの地震まで対応する必要がある。 $M9$ クラスの地震の記録が使われている式としては以下の 4 式が該当する。

【MF13】、【ZZ15】、【SI16】、【ZZ16】

ただし、 $M9$ クラスの地震は平成 23 年東北地方太平洋沖地震のみであり、 $M8$ 以上の地震の数はいずれの式においても 10 未満で少ないため、不確実性が大きい点に留意する必要がある。

② 地震タイプ別の適用が可能

全国地震動予測地図の地震活動モデルは、活断層などの浅い地震や海溝型地震ごとにモデル化されている。また、内陸地殻内地震や海溝型地震のプレート間地震、プレート内地震などは、それぞれ短周期地震動の励起特性などが異なるため、地震動予測式は地震タイプの違いが考慮できることが望ましく、【ZZ06】、【KS06】、【S_08】、【MF13】、【ZZ15】、【SI16】、【ZZ16】の 7 式が該当する。

③ 前弧域と背弧域での減衰特性の違いを考慮可能

震源が深い地震については、火山フロントの前弧側と背弧側で地震動の減衰特性が異なる傾向があり、この点も考慮できる式が望ましい。該当するのは以下の 5 式である。

【KN06】、【GA09】、【MF13】、【ZZ15】、【ZZ16】

地震動予測式の選定条件と選定結果を表 3.2-1 に示す。3.1 節で抽出した 10 組の地震動予測式のうち、これらの条件を満たす式は【MF13】、【ZZ15】及び【ZZ16】であった。なお、【ZZ15】と【ZZ16】の選定条件への対応度合いは同一であるが、【ZZ15】の論文の目的は地震動予測式の構築ではなく、地震動予測式を介して内陸地殻内、プレート間、プレート内などの地震の分類法を

提案することにある。実際、【ZZ15】の地震分類法に基づいてデータセットが上記3タイプの地震に分けられ、各々の地震タイプについて個別の地震動予測式が【ZZ16】にて提案されている。以上より、【ZZ15】を選定対象から除外し、【MF13】及び【ZZ16】を選定した。なお、調査対象文献を2017年以降に拡張したところ、3.1節の5つの条件を満たす文献は3件該当したが、上記①～③を満たす新たな文献は抽出されなかった（2021年9月時点）。

選定された【MF13】及び【ZZ16】について、対象とする地震動強さや、震源特性・伝播経路・サイト特性のモデル化に関する比較を表3.2-2に示す。モデル化が大きく異なる部分は3項目ある。1項目目は前弧域と背弧域での減衰特性の違いの考慮の仕方であり、【MF13】は火山フロントからの距離 X_{vf} を、【ZZ16】は火山帯を通過する距離 X_v を用いている。2項目目は浅部地盤によるサイト特性の考慮の仕方であり、【MF13】は地表から30mの平均S波速度(AVS30)を、【ZZ16】は地盤種別(I種からIV種)を用いている。3項目目は深部地盤によるサイト特性の考慮の仕方であり、【MF13】は $V_s \geq 1400\text{m/s}$ となる層の上面深度を用いているが、【ZZ16】は深部地盤による地盤増幅特性に関するパラメータを設定していない。

表 3.2-1 地震動予測式の選定条件と選定結果

予測式	選定条件と選定結果*1		
	①M9 まで適用	②地震タイプ考慮	③前弧域と背弧域での減衰特性の違いを考慮
KN06	-	△	○
ZZ06	-	○	-
UM06	-	△	-
KS06	-	○	-
S_08	-	○	-
GA09	-	△	○
MF13	○	○	○
ZZ15*2	○	○	○
SI16	○	○	-
ZZ16	○	○	○

*1 ○:条件に該当する。△:地震タイプ分類ではないが、震源深さ30kmを境にデータを2つに分け、各々予測式を推定している。

*2 ZZ15の内容は【ZZ16】に包含される。

表 3.2-2 Morikawa and Fujiwara (2013) と Zhao et al. (2016a, b, c) の比較

		Morikawa and Fujiwara (2013) 【MF13】	Zhao et al. (2016a, b, c) 【ZZ16】
地震動強さ		水平 2 成分の時刻歴応答のベクトル和	水平 2 成分の最大応答の幾何平均
震源特性	M _w と地震動強さの関係	2 次関数 (Model 1) とバイリニア型 (Model 2) でのモデル化* ¹ ※本試作版では Model 1 を採用	バイリニア型でのモデル化 (プレート内は 2 次関数も併用)
	地震タイプ	地殻内、プレート間、プレート内	地殻内、プレート間、プレート内 (別々の文献で提案されている)
	フィリピン海プレートのプレート内地震の補正項	地震動強さの震源深さ依存性やプレートの違いを考慮するため森川・藤原 (2015) で提案* ²	—
減衰特性	式の特徴	【ZZ16】に比べて減衰特性に関する項及び係数が少ない、ややシンプルなモデル式* ³	【MF13】に比べて減衰特性に関する項及び係数が多い、やや複雑なモデル式* ³
	前弧域と背弧域での減衰特性の違いの考慮の仕方	火山フロント (藤原・他、2015) からの距離と震源深さ (震源深さ 30km 以深の地震に適用)	火山帯を通過する距離 ※論文に倣い下限値 12km、上限値 80km
サイト特性	浅部地盤	地表から 30m の平均 S 波速度 (AVS30)	SC I : AVS30 > 600m/s SC II : AVS30 = 300~600m/s SC III : AVS30 = 200~300m/s SC IV : AVS30 < 200m/s
	浅部地盤の非線形性	—	基盤での推定値を入力に浅部地盤の非線形性を考慮 ※本試作版では考慮しない
	深部地盤	V _s ≥ 1400m/s となる層の上面深度 (D ₁₄₀₀)	—

*1 Morikawa and Fujiwara (2013) では、Model 1 の標準偏差は Model 2 の標準偏差よりもわずかに小さいと述べている。また、地盤や前弧域/背弧域の減衰特性に関する補正項は、Model 1 による残差データ (Model 1 に基づく予測値と観測値の残差) を用いた場合のみ提案している。

*2 森川・藤原 (2015) では、フィリピン海プレートのプレート内地震に対して、特に短周期成分 (周期 0.5 秒程度以下) の予測値が過大評価となっている傾向が見られたことから追加補正項を提案している。詳細については 4.2 節を参照されたい。

*3 本試作版の付録 2 において、【MF13】を式(1)~(4)、【ZZ16】を式(5)~(7)で示した。

3.2.2 選定した地震動予測式の比較

前項で選定した地震動予測式【MF13】と【ZZ16】について、表 3.2-3 に示す様々な地震タイプや発生位置を想定した条件で比較した。【ZZ16】の地震動予測式に含まれる火山帯を通過する距離 X_v (km) は観測点位置と地震発生位置により決まるが、本項の比較では、最小の 12km とした場合と最大の 80km とした場合の 2 通りを考慮した。表 3.2-3 に示す条件に対し、横軸を周期 T (s) とした減衰定数 5% の加速度応答スペクトルの比較、及び横軸を断層最短距離 X (km) とした各周期の応答スペクトルの距離減衰特性の比較を以後に示す。なお応答スペクトルの図は、本検討で試算する 8 つの周期ポイント (0.1 秒、0.2 秒、0.3 秒、0.5 秒、1.0 秒、2.0 秒、3.0 秒、5.0 秒) の値を図上にて直線で結んでいる。浅部地盤については工学的基盤上の地盤条件とし、【MF13】は $AVS30=400\text{m/s}$ 、【ZZ16】は地盤種別 I (片岡・他、2006) で評価している。

応答スペクトルの比較においては、地震動ハザード評価結果に影響が大きい比較的近距离の地震を考慮した。その結果、いずれも $X < 80\text{km}$ が対象となることから、【ZZ16】では $X_v=12\text{km}$ の場合のみを示し、距離減衰特性の比較における $X > 80\text{km}$ についてのみ【ZZ16】の $X_v=80\text{km}$ の場合を示す。フィリピン海プレート内の地震を想定した比較については、関東地方、特に南関東に対する影響が大きい相模トラフ沿いの地震を対象としたものと、それ以外の地域を対象としたものを想定しそれぞれ比較する。

表 3.2-3 地震動予測式【MF13】と【ZZ16】の比較条件

地震タイプ	地殻内	プレート間	プレート間	プレート内	プレート内	プレート内
震源深さ	$H=10\text{km}$	$H=50\text{km}$	$H=20\text{km}$	$H=60\text{km}$	$H=25\text{km}$	$H=30\text{km}$
Mw	5.5, 6.5, 7.5	6.0, 7.0, 8.0	6.0, 7.0, 8.0	6.0, 7.0, 8.0	6.0, 7.3	6.0, 7.0, 8.0
断層最短距離*1	$X=5\text{km}$	$X=50\text{km}$	$X=20\text{km}$	$X=60\text{km}$	$X=20\text{km}$	$X=30\text{km}$
距離減衰	2km~	50km~	20km~	60km~	20km~	30km~
【MF13】	地殻内	プレート間 $X_{vf}=0\text{km}$	プレート間	プレート内 $X_{vf}=\pm 50\text{km}$	プレート内 +追加補正*2	プレート内 +追加補正*2
【ZZ16】	地殻内	プレート間 (深い)	プレート間 (浅い)	プレート内	プレート内	プレート内
備考*3	【ZZ16】は 横ずれ	PAC	PHL	PAC	PHL (南関東)	PHL

*1 応答スペクトル図の比較を行う断層最短距離である。

*2 森川・藤原 (2015) による、フィリピン海プレートのプレート内地震に対する追加補正項を適用した。詳細については 4.2 節を参照されたい。

*3 PAC : 太平洋プレートの地震を想定した。PHL : フィリピン海プレートの地震を想定した。

(1) 地殻内地震

地殻内地震を対象とし、震源深さを 10km、Mw を 5.5、6.5、7.5 とした場合の断層最短距離 $X=5\text{km}$ における加速度応答スペクトルの【MF13】と【ZZ16】の比較を図 3.2-1 に示す。周期 0.1 秒、1.0 秒、5.0 秒の加速度応答スペクトルの距離減衰特性の比較を図 3.2-2 に示す。【ZZ16】は断層タイプの区別が可能であり、ここでは横ずれ断層による予測値を示す。なお、【MF13】は断層タイプの区別はない。【MF13】は $X_v=0\text{km}$ 、【ZZ16】は X_v の下限の 12km 及び上限の 80km による予測値を示した。

○断層最短距離 $X=5\text{km}$ における加速度応答スペクトルの特徴

- 周期 0.1 秒では地震規模によらず【MF13】より【ZZ16】が大きくなる。
- 周期 0.2 秒では地震規模によらず【MF13】と【ZZ16】がほぼ等しくなる。
- 周期 0.3 秒以上では、Mw5.5 の場合は【MF13】と【ZZ16】がほぼ等しいが、地震規模が大きくなるほど【MF13】が【ZZ16】より大きくなり、周期 1.0~3.0 秒付近で顕著となる。

○距離減衰特性

- 左列の周期 0.1 秒では、 X が約 50km 以内の場合は【MF13】の距離減衰が【ZZ16】より小さいものの、それより遠くなると【MF13】の距離減衰が大きい。【MF13】では $X \leq 10\text{km}$ における振幅の頭打ちが強く、【ZZ16】よりも小さくなる一方、10~100km では地震規模が大きくなるほど【MF13】の振幅が大きくなる。
- 中列の周期 1.0 秒では全体的に【MF13】が【ZZ16】より振幅が大きい。 X が 20~100km において【ZZ16】の距離減衰が大きいこともあり、この距離範囲において両者の差が大きくなっている。この傾向は地震規模が大きくなるほど顕著となる。
- 右列の周期 5.0 秒も周期 1.0 秒と似た傾向が見られるが、両者の差は周期 1.0 秒よりも小さい。
- 【ZZ16】における $X_v=12\text{km}$ と $X_v=80\text{km}$ の違いは周期 0.1 秒で見られるが、周期 5.0 秒では両者はほぼ重なっている。

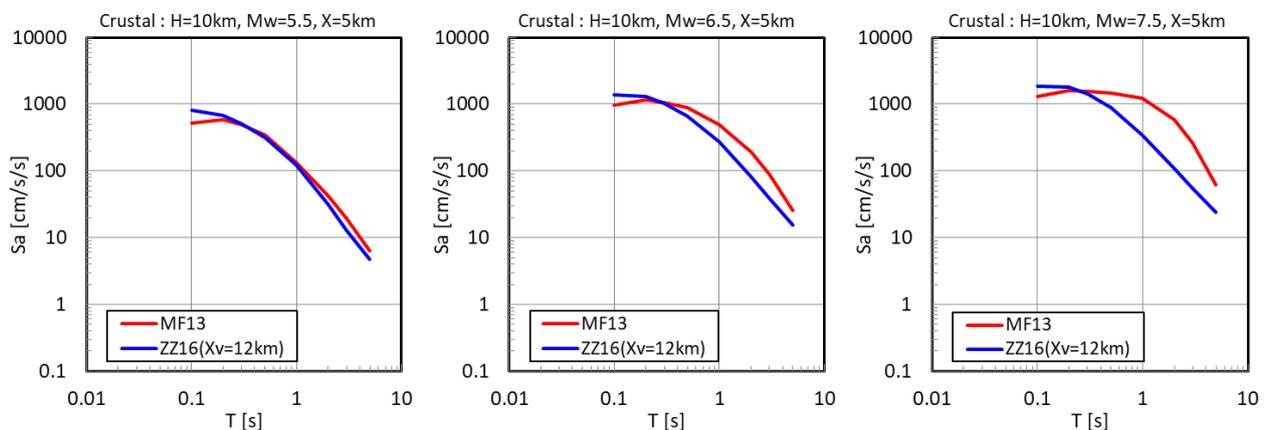


図 3.2-1 地震動予測式による加速度応答スペクトルの比較。地殻内地震を対象。左列は Mw5.5、中列は Mw6.5、右列は Mw7.5 を示す。

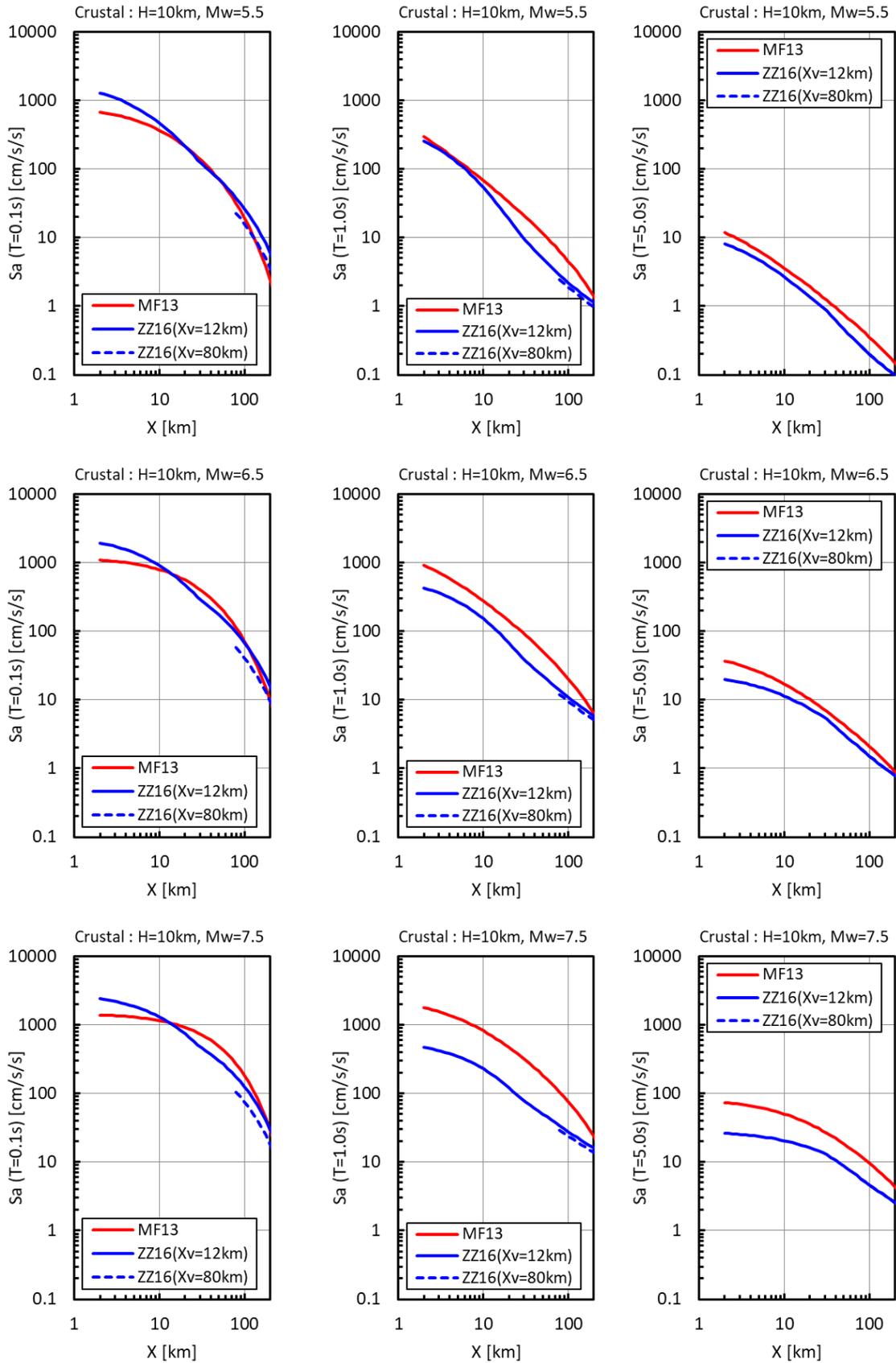


図 3.2-2 地震動予測式の距離減衰特性の比較。地殻内地震を対象。上段は Mw5.5、中段は Mw6.5、下段は Mw7.5 を示す。また、左列は周期 0.1 秒、中列は周期 1.0 秒、右列は周期 5.0 秒を示す。

(2) 深さ 50km のプレート間地震 (太平洋プレートの地震を想定)

太平洋プレートのプレート間地震を対象とし、震源深さを 50km、Mw を 6.0、7.0、8.0 とした場合の断層最短距離 $X=50\text{km}$ における加速度応答スペクトルの比較を図 3.2-3 に示す。周期 0.1 秒、1.0 秒、5.0 秒の加速度応答スペクトルの距離減衰特性の比較を図 3.2-4 に示す。

○断層最短距離 $X=50\text{km}$ における加速度応答スペクトルの特徴

- 周期 0.1 秒では地震規模によらず【ZZ16】の方がわずかながら大きくなっている。
- 周期 0.2~3.0 秒では、地震規模が大きくなるほど【MF13】が【ZZ16】より大きくなり、その傾向は周期 0.3~1.0 秒で顕著になる。
- 周期 5.0 秒では地震規模によらず【MF13】と【ZZ16】はほぼ等しい。

○距離減衰特性

- 左列の周期 0.1 秒では、【MF13】の距離に対する減衰が大きく、 X が 100km 以内では【ZZ16】の $X_v=12\text{km}$ と同程度であるが、 X が大きくなるにつれて【ZZ16】の $X_v=80\text{km}$ に近づく。
- 中列の周期 1.0 秒では全体的に【MF13】が【ZZ16】より大きく、特に Mw8.0 では両者の差が顕著に大きくなっている。ただし、距離に対する減衰特性は両者に顕著な違いはない。
- 右列の周期 5.0 秒では【MF13】と【ZZ16】はほぼ等しい、または【MF13】の方がやや大きい傾向がある。
- 【ZZ16】における $X_v=12\text{km}$ と $X_v=80\text{km}$ の違いは周期 0.1 秒で顕著であり、両者の違いは地殻内地震での違いよりも大きくなっているが、周期 5.0 秒では両者はほぼ重なっている。

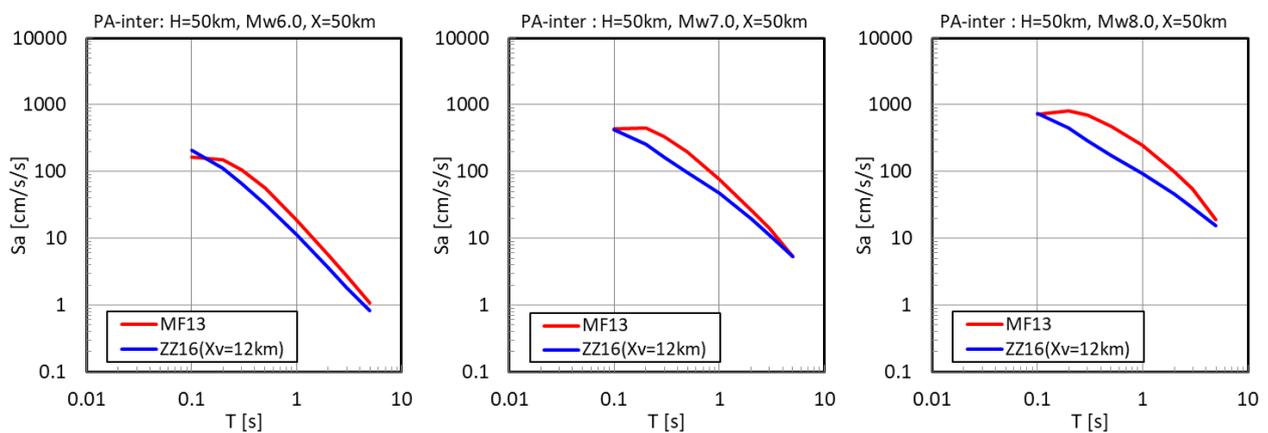


図 3.2-3 地震動予測式による加速度応答スペクトルの比較。太平洋プレートのプレート間地震を想定。左列は Mw6.0、中列は Mw7.0、右列は Mw8.0 を示す。

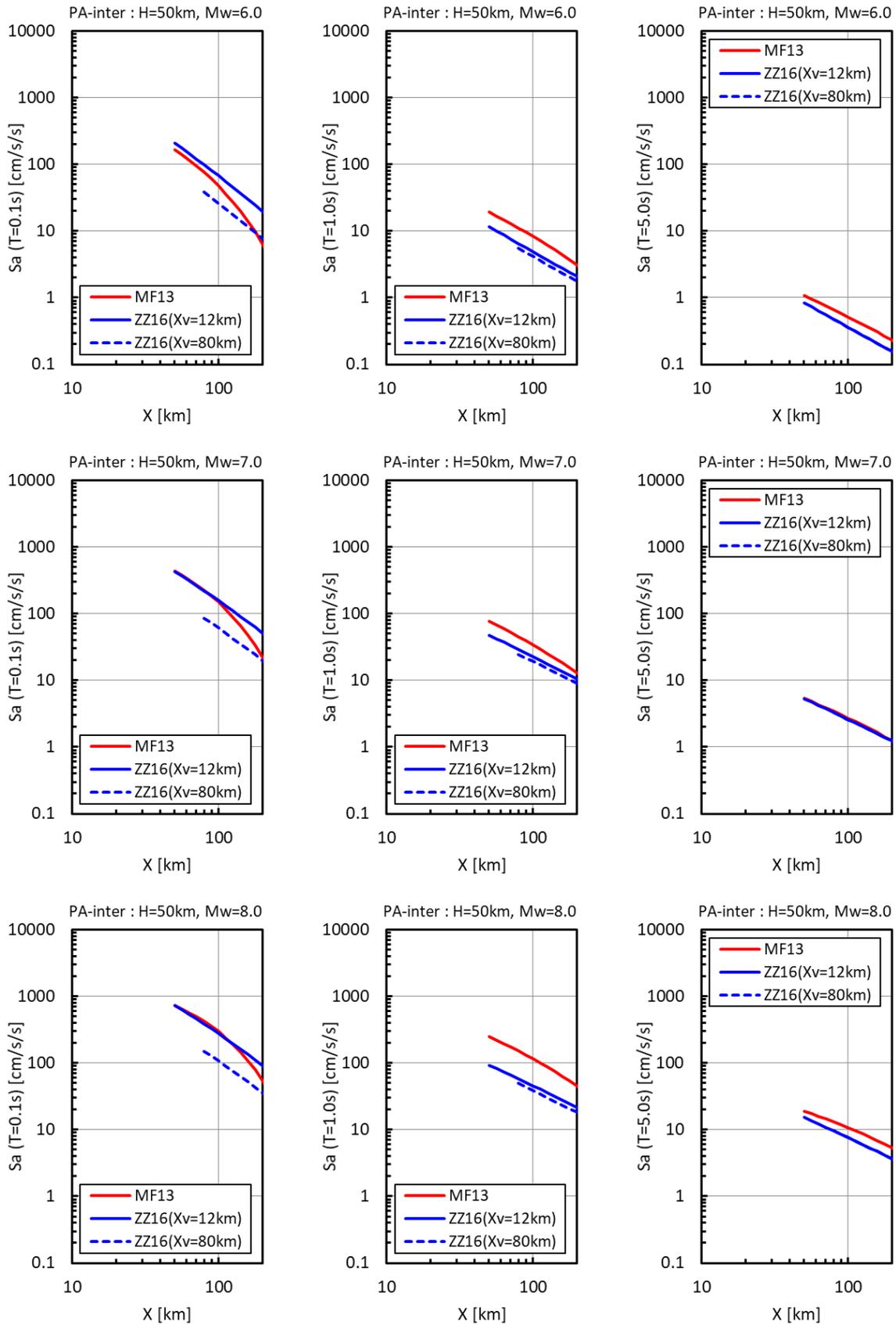


図 3.2-4 地震動予測式の距離減衰特性の比較。太平洋プレートのプレート間地震を想定。上段は Mw6.0、中段は Mw7.0、下段は Mw8.0 を示す。また、左列は周期 0.1 秒、中列は周期 1.0 秒、右列は周期 5.0 秒を示す。

(3) 深さ 20km のプレート間地震 (フィリピン海プレートの地震を想定)

フィリピン海プレートのプレート間地震を想定し、震源深さを 20km、Mw を 6.0、7.0、8.0 とした場合の断層最短距離 $X=20\text{km}$ における加速度応答スペクトルの比較を図 3.2-5 に示す。周期 0.1 秒、1.0 秒、5.0 秒の加速度応答スペクトルの距離減衰特性の比較を図 3.2-6 に示す。

○断層最短距離 $X=20\text{km}$ における加速度応答スペクトルの特徴

- 周期 0.1~0.2 秒では地震規模が大きくなるほど【MF13】より【ZZ16】が大きくなり、周期 0.1 秒で顕著となっている。
- 周期 0.3~3.0 秒では、Mw6.0 と Mw7.0 の場合の【MF13】と【ZZ16】はほぼ等しいが、Mw8.0 では【MF13】が【ZZ16】より大きくなっている。
- 周期 5.0 秒では地震規模によらず【MF13】と【ZZ16】がほぼ等しくなっている。

○距離減衰特性

- 左列の周期 0.1 秒では【MF13】の近距離における振幅の頭打ちが強く、【MF13】より【ZZ16】が大きくなる傾向があり、規模が大きくなるほど差が広がっている。また、差が明瞭になる距離範囲も Mw6.0 では 30km 以内だが、Mw8.0 では 50km 以内と広がっている。
- 中列の周期 1.0 秒では地震規模が大きくなるほど【MF13】が【ZZ16】より大きくなっている。なお、 X が 100km 以遠での距離減衰は【ZZ16】の方が大きい。
- 右列の周期 5.0 秒では【ZZ16】より【MF13】の方がやや大きい。
- 【ZZ16】における $X_v=12\text{km}$ と $X_v=80\text{km}$ の違いは太平洋プレートのプレート間地震を想定した図 3.2-4 と同様の傾向である。

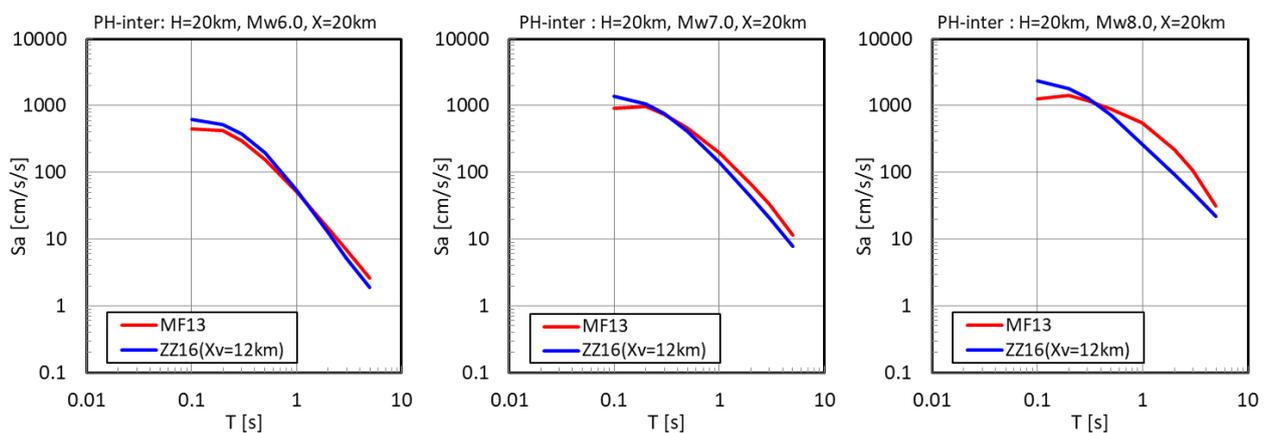


図 3.2-5 地震動予測式による加速度応答スペクトルの比較。フィリピン海プレートのプレート間地震を想定。左列は Mw6.0、中列は Mw7.0、右列は Mw8.0 を示す。

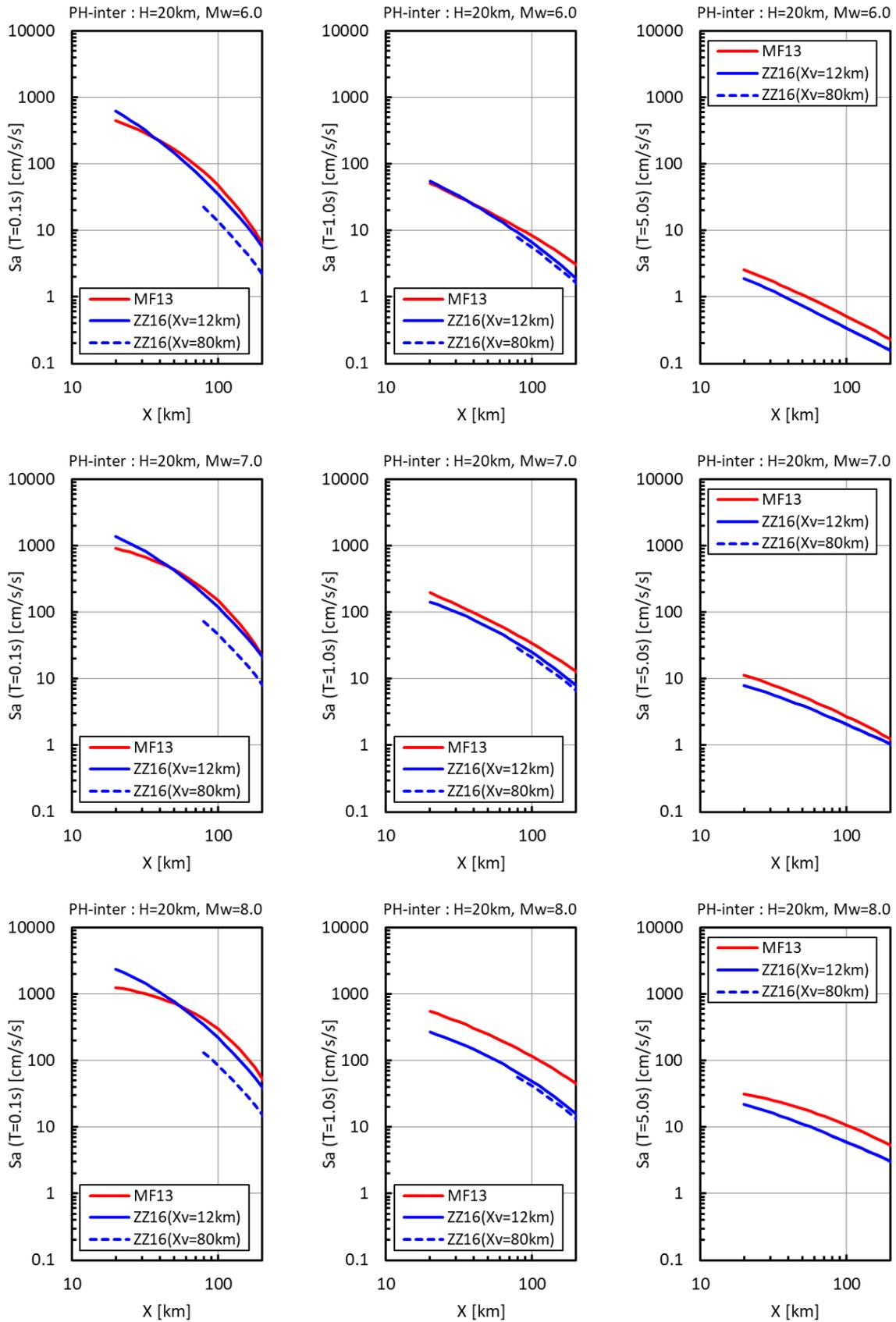


図 3.2-6 地震動予測式の距離減衰特性の比較。フィリピン海プレートのプレート間地震を想定。上段は Mw6.0、中段は Mw7.0、下段は Mw8.0 を示す。また、左列は周期 0.1 秒、中列は周期 1.0 秒、右列は周期 5.0 秒を示す。

(4) 深さ 60km のプレート内地震 (太平洋プレートの地震を想定)

太平洋プレートのプレート内地震を想定し、震源深さを 60km、Mw を 6.0、7.0、8.0 とした場合の断層最短距離 $X=60\text{km}$ における加速度応答スペクトルの比較を図 3.2-7 に示す。【MF13】については前弧側 ($X_v=50\text{km}$) を上段に、背弧側 ($X_v=-50\text{km}$) を下段に示す。周期 0.1 秒、1.0 秒、5.0 秒の加速度応答スペクトルの距離減衰特性の比較を図 3.2-8 及び図 3.2-9 に示す。

○断層最短距離 $X=60\text{km}$ における加速度応答スペクトルの特徴

- 上段に示す前弧側 ($X_v=50\text{km}$) では、Mw6.0 と Mw7.0 では周期 1.0 秒程度以下、Mw8.0 では周期 5.0 秒以下で【MF13】が【ZZ16】より大きくなっている。
- 下段に示す背弧側 ($X_v=-50\text{km}$) では【MF13】と【ZZ16】はほぼ等しくなっている。

○距離減衰特性

- 前弧側 ($X_v=50\text{km}$) では、周期 0.1 秒の【MF13】は【ZZ16】 ($X_v=12\text{km}$) より近距離側で大きくなっている。周期 1.0 秒は【MF13】が【ZZ16】より大きい。周期 5.0 秒の Mw6.0 と Mw8.0 は【MF13】と【ZZ16】はほぼ等しいが、Mw7.0 では【ZZ16】が【MF13】より大きい。
- 背弧側 ($X_v=-50\text{km}$) では周期 0.1 秒の 100km 以遠、周期 1.0 秒の Mw8.0、周期 5.0 秒の Mw7.0 以外は【MF13】と【ZZ16】 ($X_v=12\text{km}$) はほぼ等しく、前弧側 ($X_v=50\text{km}$) ほど両者の差が見られない。
- 【ZZ16】における $X_v=12\text{km}$ と $X_v=80\text{km}$ の違いは太平洋プレートのプレート間地震の図 3.2-4 と同様の傾向である。

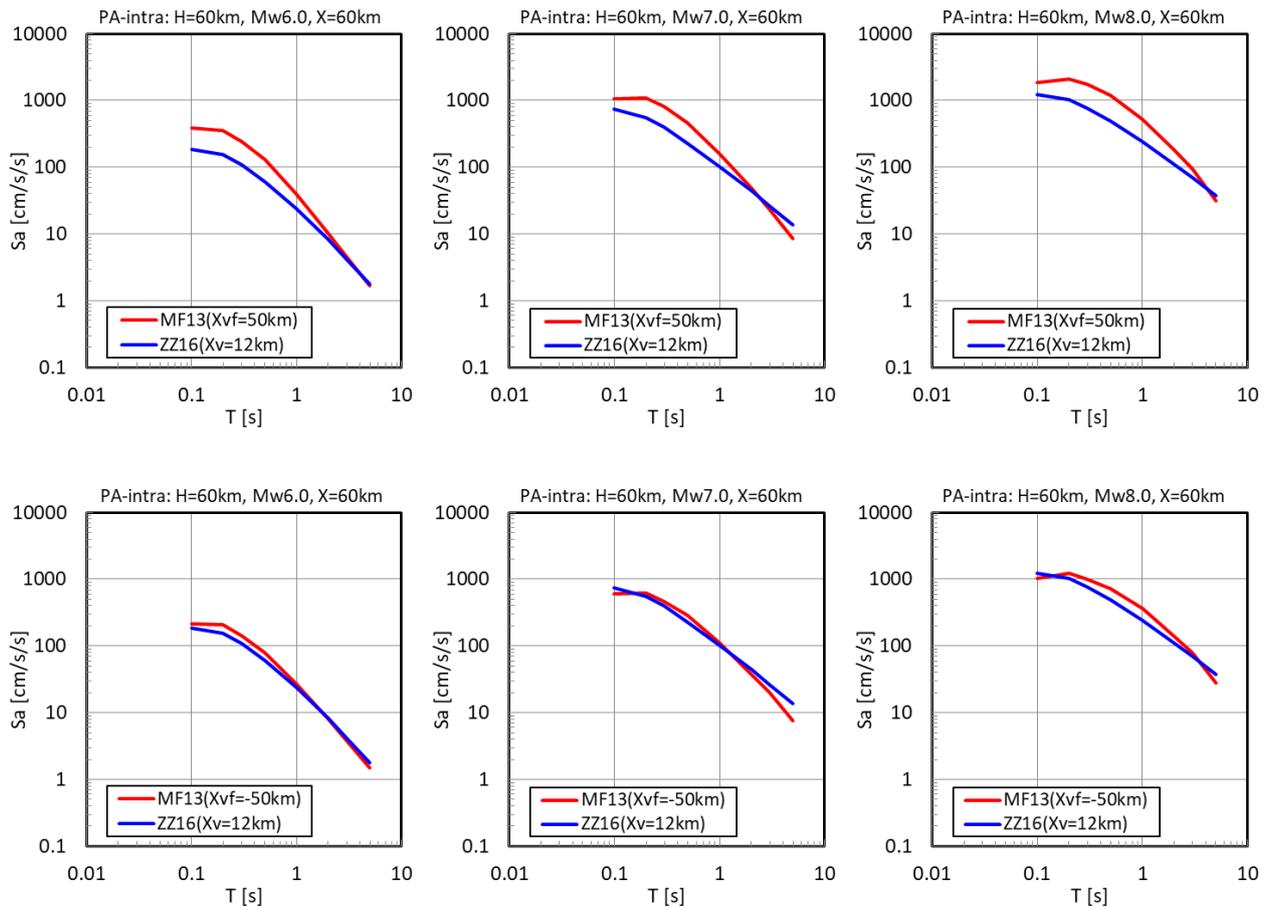


図 3.2-7 地震動予測式による加速度応答スペクトルの比較。太平洋プレートのプレート内地震を想定。【MF13】について、上段は前弧側 ($X_v=50$ km)、下段は背弧側 ($X_v=-50$ km) を示す。また、左列は Mw6.0、中列は Mw7.0、右列は Mw8.0 を示す。

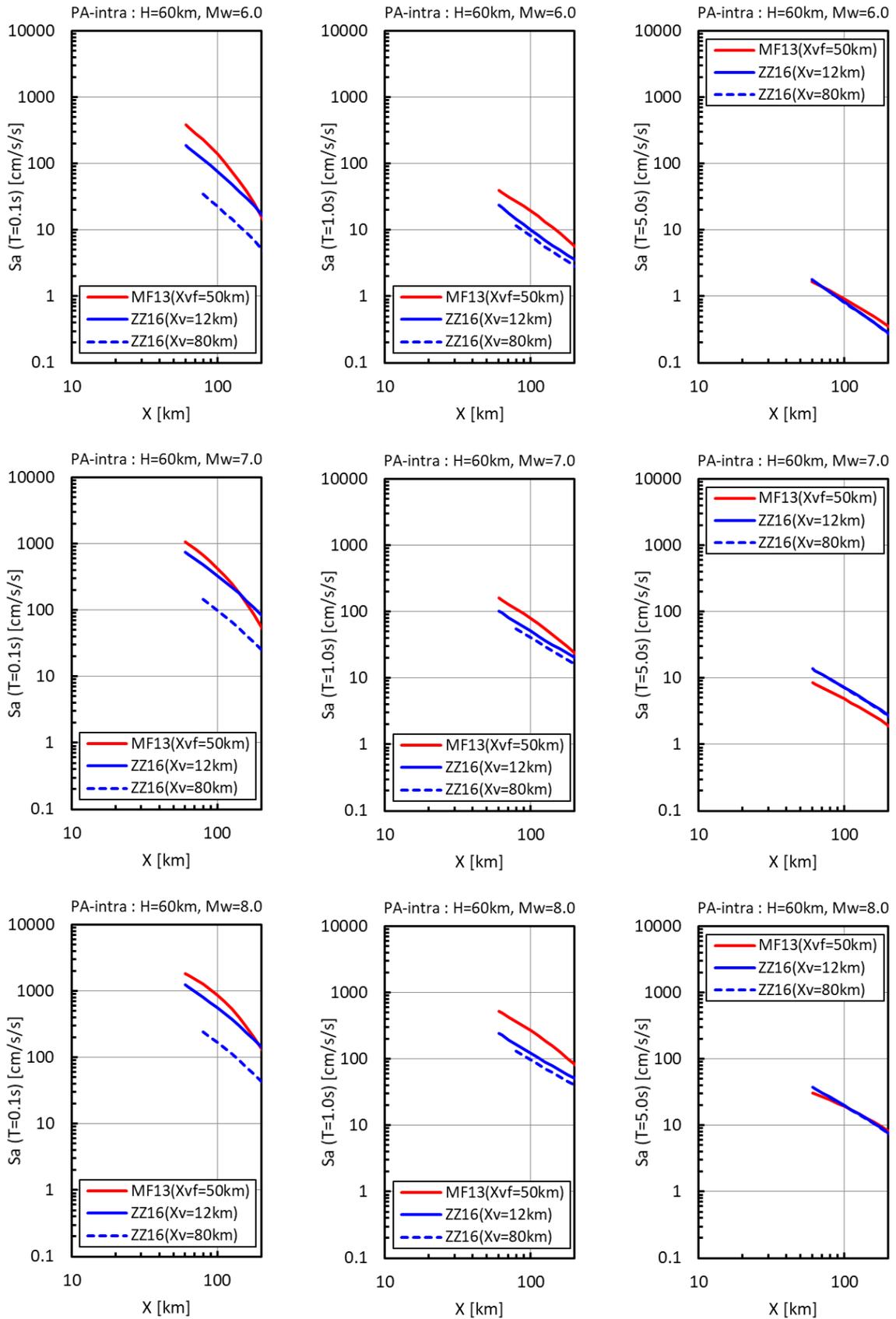


図 3.2-8 地震動予測式の距離減衰特性の比較。太平洋プレートのプレート内地震を想定。【MF13】は前弧側 ($X_{vf}=50\text{km}$)。上段は $M_w=6.0$ 、中段は $M_w=7.0$ 、下段は $M_w=8.0$ を示す。また、左列は周期 0.1 秒、中列は周期 1.0 秒、右列は周期 5.0 秒を示す。

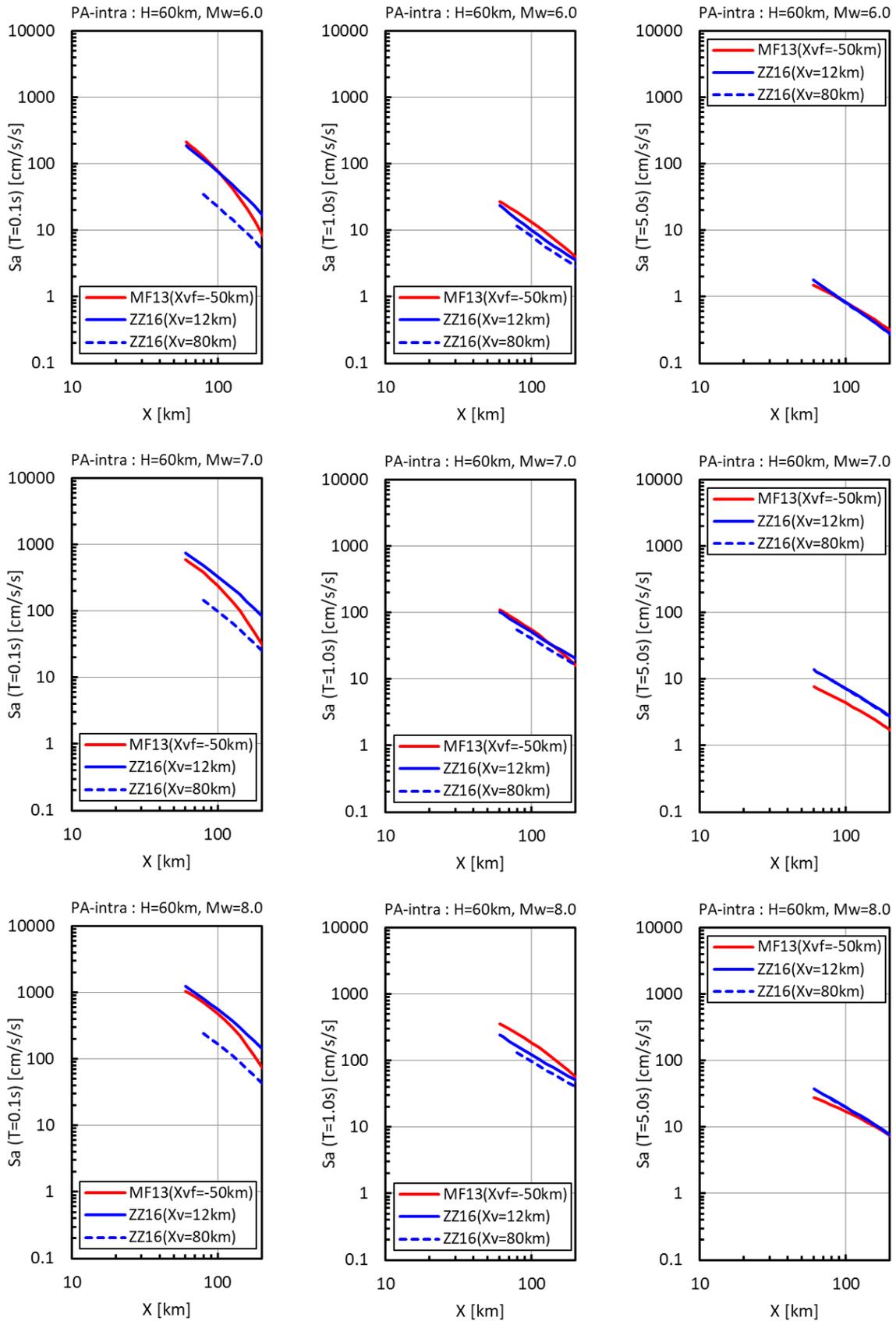


図 3.2-9 地震動予測式の距離減衰特性の比較。太平洋プレートのプレート内地震を想定。【MF13】は背弧側 ($X_{vf}=-50\text{km}$)。上段は Mw6.0、中段は Mw7.0、下段は Mw8.0 を示す。また、左列は周期 0.1 秒、中列は周期 1.0 秒、右列は周期 5.0 秒を示す。

(5) 深さ 25km のプレート内地震（南関東のフィリピン海プレート地震を想定）

南関東のフィリピン海プレートのプレート内地震を想定し、震源深さを 25km、Mw を 6.0、7.3 とした場合の断層最短距離 $X=20\text{km}$ における加速度応答スペクトルの比較を図 3.2-10 に示す。周期 0.1 秒、1.0 秒、5.0 秒の加速度応答スペクトルの距離減衰特性の比較を図 3.2-11 に示す。

○断層最短距離 $X=20\text{km}$ における加速度応答スペクトルの特徴

- 周期 1.0 秒以下では【MF13】と【ZZ16】はほぼ等しい。Mw6.0 では周期 1.0 秒程度以上になると【ZZ16】が【MF13】よりやや大きくなっている。

○距離減衰特性

- 左列の周期 0.1 秒では【MF13】の距離減衰が【ZZ16】より大きい、振幅は概ね一致している。
- 中列の周期 1.0 秒では【MF13】が【ZZ16】よりやや大きい傾向にある。
- 右列の周期 5.0 秒の Mw6.0 では比較的近距离で【ZZ16】が【MF13】より大きな振幅となっている。Mw7.3 では距離によらず【ZZ16】が【MF13】より大きくなっている。
- 【ZZ16】における $X_v=12\text{km}$ と $X_v=80\text{km}$ の違いは太平洋プレートのプレート間地震の図 3.2-4 と同様の傾向である。

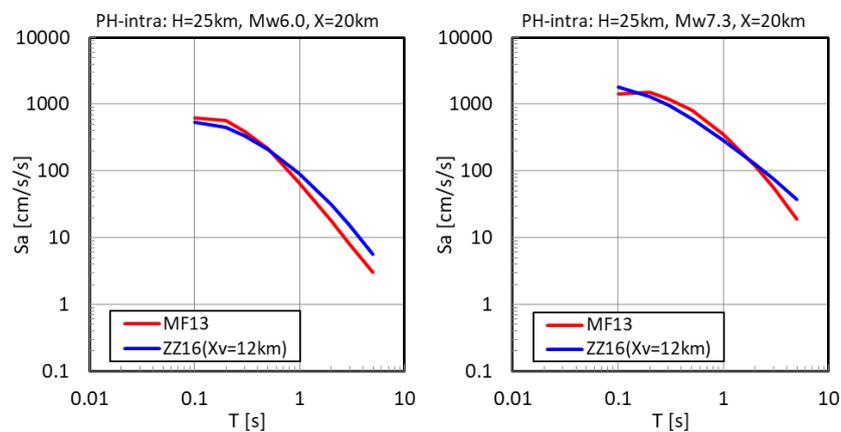


図 3.2-10 地震動予測式による加速度応答スペクトルの比較。南関東のフィリピン海プレートのプレート内地震を想定。左列は Mw6.0、右列は Mw7.3 を示す。

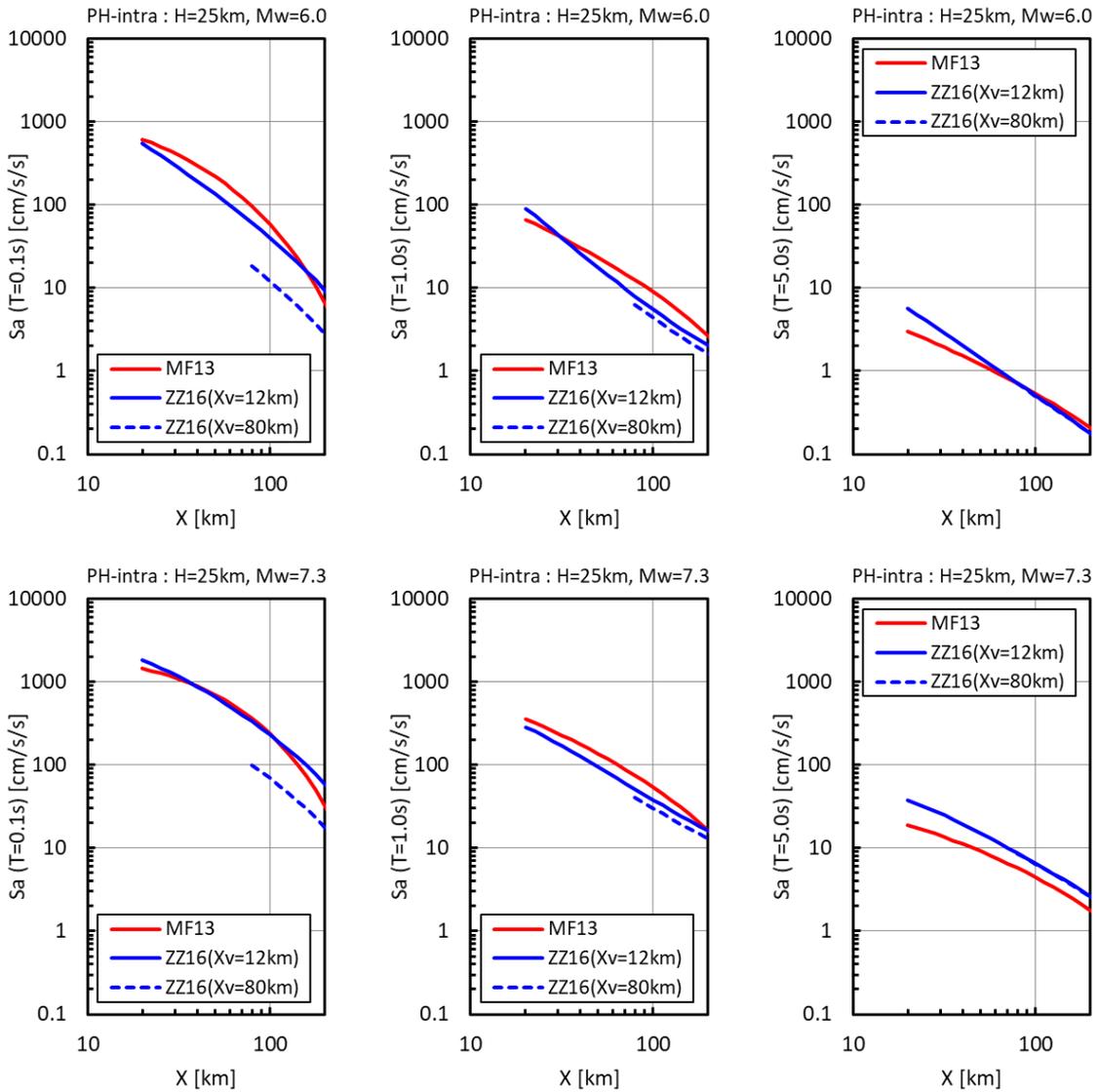


図 3.2-11 地震動予測式の距離減衰特性の比較。南関東のフィリピン海プレートのプレート内地震を想定。上段は $M_w6.0$ 、下段は $M_w7.3$ を示す。また、左列は周期 0.1 秒、中列は周期 1.0 秒、右列は周期 5.0 秒を示す。

(6) 深さ 30km のプレート内地震（南海トラフから南西諸島にかけてのフィリピン海プレートの地震を想定）

南海トラフから南西諸島にかけてのフィリピン海プレートのプレート内地震を想定し、震源深さを 30km、 M_w を 6.0、7.0、8.0 とした場合の断層最短距離 $X=30\text{km}$ における加速度応答スペクトルの比較を図 3.2-12 に示す。周期 0.1 秒、1.0 秒、5.0 秒の加速度応答スペクトルの距離減衰特性の比較を図 3.2-13 に示す。

○断層最短距離 $X=30\text{km}$ における加速度応答スペクトルの特徴

- $M_w6.0$ 及び $M_w7.0$ の周期 1.0 秒以下は【MF13】が【ZZ16】よりやや大きい、周期 1.0 秒以上は逆の傾向を示している。
- $M_w8.0$ の周期 0.5~3.0 秒の【MF13】は【ZZ16】より大きくなるが、周期 5.0 秒では逆の傾向を示している。

○距離減衰特性

- 左列の周期 0.1 秒の 100km 程度以遠では【MF13】の距離減衰が【ZZ16】より大きい、振幅は概ね対応している。
- 中列の周期 1.0 秒では【MF13】が【ZZ16】よりやや大きい傾向にある。
- 右列の周期 5.0 秒の $M_w6.0$ と $M_w8.0$ では比較的近距离で【ZZ16】が【MF13】より大きな振幅となっている。 $M_w7.0$ では距離によらず【ZZ16】が【MF13】より大きくなっている。
- 【ZZ16】における $X_v=12\text{km}$ と $X_v=80\text{km}$ の違いは太平洋プレートのプレート間地震の図 3.2-4 と同様の傾向である。

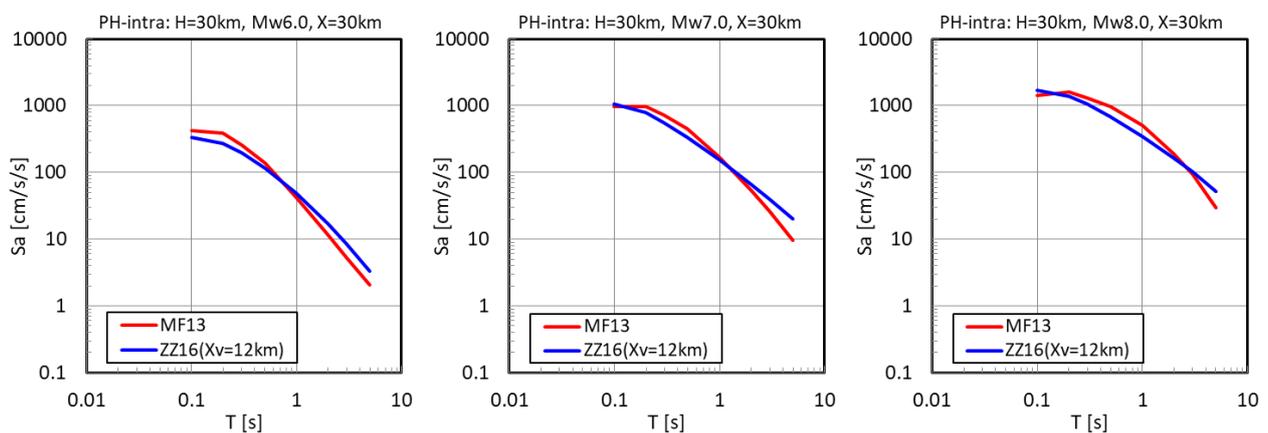


図 3.2-12 地震動予測式による加速度応答スペクトルの比較。南海トラフから南西諸島にかけてのフィリピン海プレートのプレート内地震を想定。左列は $M_w6.0$ 、中列は $M_w7.0$ 、右列は $M_w8.0$ を示す。

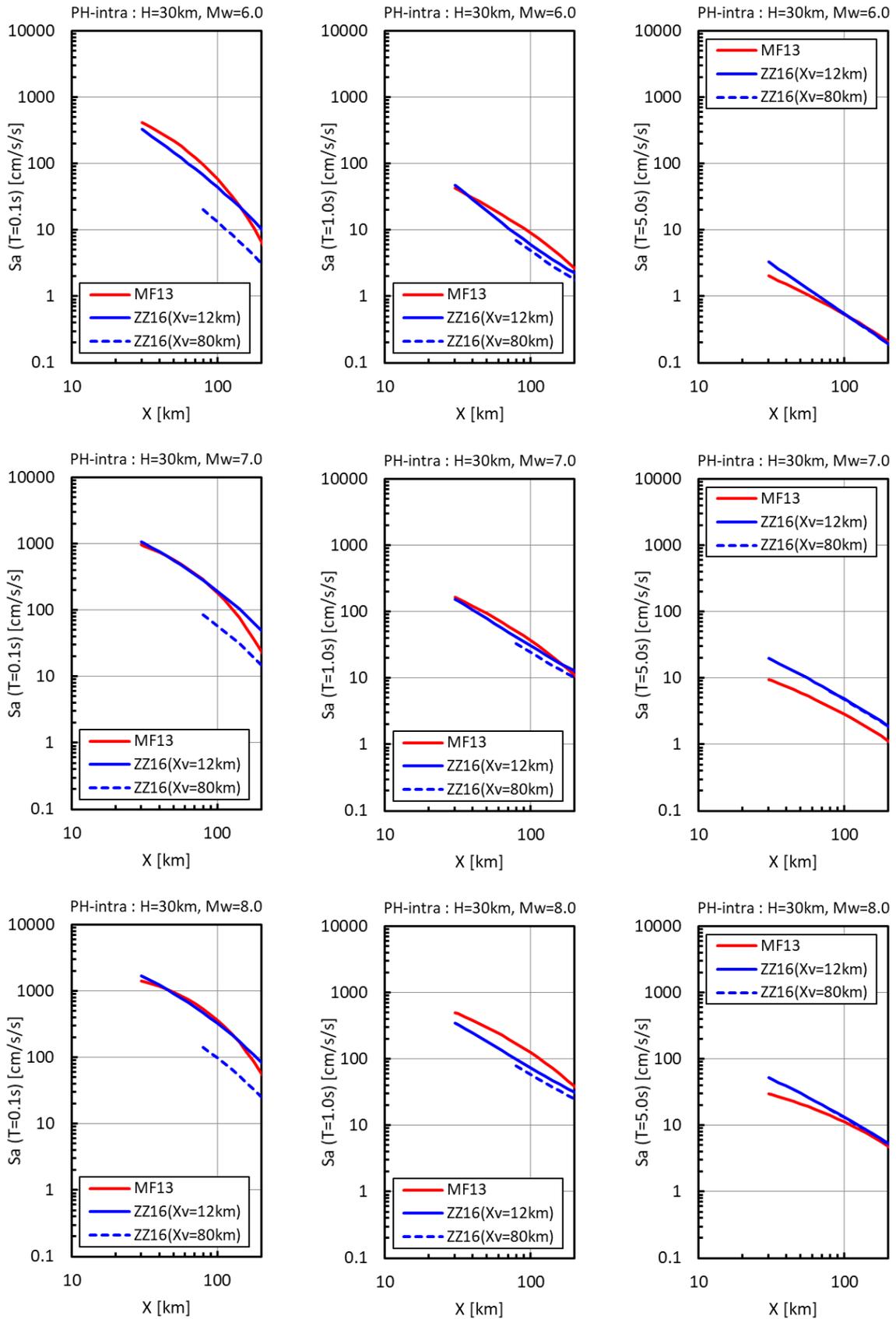


図 3.2-13 地震動予測式の距離減衰特性の比較。南海トラフから南西諸島にかけてのフィリピン海プレートのプレート内地震を想定。上段は Mw6.0、中段は Mw7.0、下段は Mw8.0 を示す。また、左列は周期 0.1 秒、中列は周期 1.0 秒、右列は周期 5.0 秒を示す。

3.2.3 地震動予測式による応答スペクトルの予測値と観測値の比較

【MF13】と【ZZ16】の構築に使用されていない2013年以降の計23地震(Mw5.5~7.1)を対象とし、地震動予測式による応答スペクトルの予測値と観測値の残差を検討した。用いた地震の震央位置を震源メカニズムと共に図3.2-14に示す。検討に用いた記録はK-NET及びKiK-netの地表観測記録の内、以下の条件を満たす記録を対象とした。

- PS検層結果より翠川・野木(2015)の方法でAVS30の算出が可能な観測点の記録
- 断層最短距離が200km以内の観測点の記録
- 波形のペーストアップの確認よりS波主要動が含まれている記録

上記3条件を満たす4488記録に対し、周期0.1~5.0秒について、下式より残差RMSを評価した結果を図3.2-15に示す。

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum \{\log(Obs/Pre)\}^2}{n}} \dots\dots\dots(1)$$

周期1.0秒程度より短周期側における残差は【MF13】と【ZZ16】で大きな差は見られない。一方、周期1.0秒程度より長周期帯域は【MF13】の残差が【ZZ16】より小さい傾向にある。【MF13】は深部地盤による増幅(実際には $V_s \geq 1400\text{m/s}$ となる層の上面の深さで表現)の違いを考慮しており、その結果、周期1.0秒程度以上の長周期帯域の残差が小さくなったと推定される。従って【MF13】を用いると、堆積層が厚く深部地盤による増幅が現れる平野における周期1.0秒以上の周期帯の地震動ハザードをより精度良く評価できる可能性がある。なお、応答スペクトルの予測値と観測値の比較・検討の詳細は付録2を参照されたい。

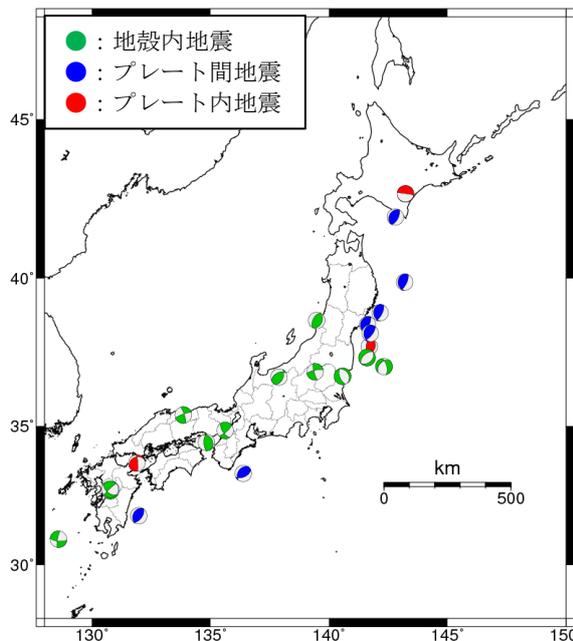


図 3.2-14 残差の検討に用いた地震の震央位置

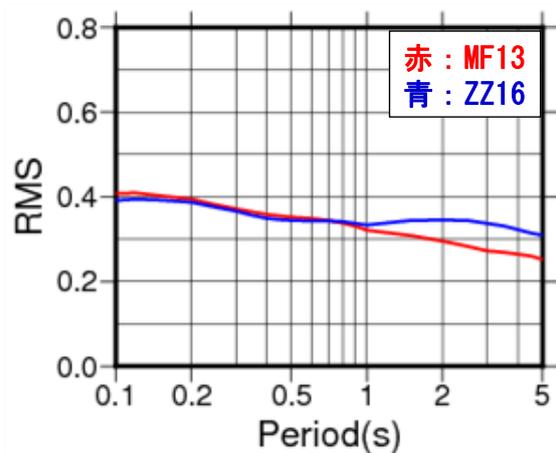


図 3.2-15 予測値と観測値の残差の比較

3.3 地震動予測式の選定結果

以上の検討より、地震動ハザード評価に用いる地震動予測式として【MF13】を用いることとする。地震動予測式の選定過程を以下に再掲する。繰り返しとなるが、以下で設定した地震動予測式の選定条件は、地震動ハザード評価に用いる観点から定めた条件であり、選定結果が地震動予測式の優劣を表しているわけではない。

- (1) 地震動予測式の1次絞り込み：以下の選定条件を満たすこと。 →10組を抽出
 - 主に日本の観測記録を用いている。
 - K-NET 設置後に初めて発生した海溝型巨大地震である、2003年十勝沖地震による強震動記録を含む。
 - 少なくとも周期0.1~1.0秒が含まれる。
 - 特定の地震あるいは観測点のみを対象としていない。
 - 査読付き論文として発表されている。

- (2) 地震動予測式の2次絞り込み：以下の選定条件を満たすこと。 →2組を抽出(【MF13】【ZZ16】)
 - 日本で発生したM9クラスの地震まで適用可能である。
 - 地震タイプ別の適用が可能である。
 - 前弧域と背弧域での減衰特性の違いを考慮可能である。

- (3) 近年の23地震($M_w \geq 5.5$)に対する残差の比較検討。 →【MF13】を選定
 - 短周期側(1.0秒以下)の残差は【MF13】と【ZZ16】で大差なし。
 - 長周期側は【MF13】の残差が【ZZ16】に比べて小さい。

以降では、【MF13】を用いて地震動ハザード評価を行う。参考として、【ZZ16】を用いた場合の地震動ハザード評価結果を付録4に示すので、必要に応じて参照されたい。

4. 応答スペクトルに関する地震動ハザードの評価条件

4.1 地震動予測式のばらつき

近年、豊富な実観測データをもとに、応答スペクトルを含む地震動のばらつき（標準偏差）についての研究成果が検討されはじめ、観測記録と地震動予測式間の残差を地震間や地震内に分離する事が試みられている（例えば Rodriguez et al., 2011; Lin et al., 2011; 引田・友澤, 2013; Villani and Abrahamson, 2015; Morikawa et al., 2008 など、付録3参照）。一方、地震動のばらつきに関する検討事例はまだ十分とは言えず、蓄積途中であることから、本検討では全国地震動予測地図 2020 年版で用いている以下のばらつきの値を周期によらずに用いた。また、対数正規分布における標準偏差 σ の3倍を超える範囲に対する打ち切りを暫定的に用いることとした。なお、Morikawa et al. (2008) によれば、震源域と観測点を固定した場合のばらつきは常用対数標準偏差で 0.15~0.20 となることが示されており、周期に対する依存性は大きくない。

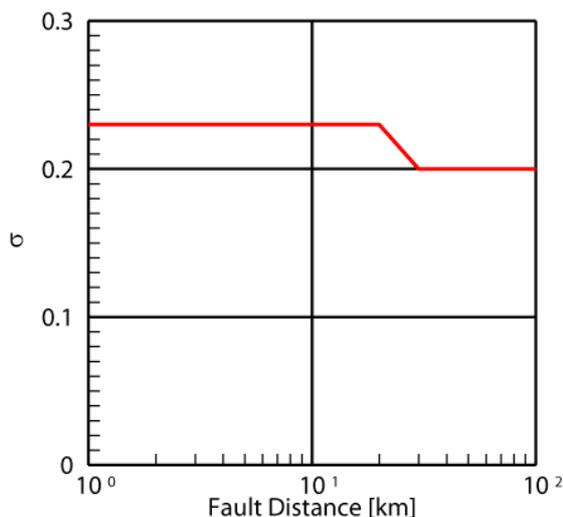
活断層などの浅い地震：断層最短距離 X に依存したばらつき（図 4.1-1(a)）

$$\sigma = \begin{cases} 0.23 & X \leq 20\text{km} \\ 0.23 - 0.03 \frac{\log_{10}(X/20)}{\log_{10}(30/20)} & 20 < X \leq 30\text{km} \\ 0.20 & X > 30\text{km} \end{cases}$$

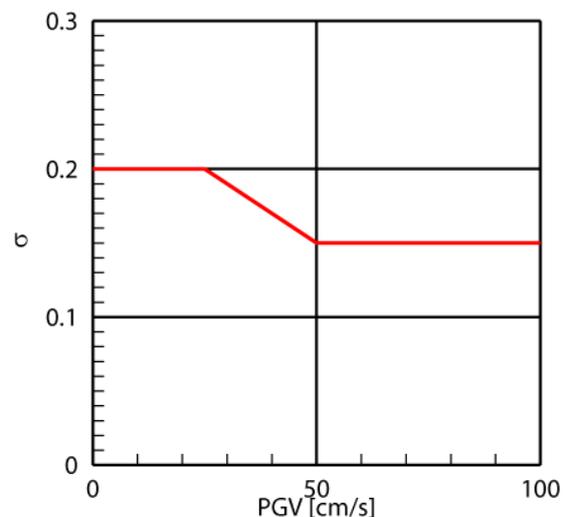
海溝型地震：振幅に依存したばらつき（図 4.1-1(b)）

$$\sigma = \begin{cases} 0.20 & PGV_{b600} \leq 25\text{cm/s} \\ 0.20 - 0.05 \frac{PGV_{b600} - 25}{25} & 25 < PGV_{b600} \leq 50\text{cm/s} \\ 0.15 & PGV_{b600} > 50\text{cm/s} \end{cases}$$

PGV_{b600} : 司・翠川（1999）の式による $V_S=600\text{m/s}$ 上の最大速度 [cm/s]



(a) 距離依存（活断層などの浅い地震）



(b) 振幅依存（海溝型地震）

図 4.1-1 試算に用いたばらつき（ σ は常用対数標準偏差）

4.2 地震動ハザードの評価条件の設定

減衰定数 5%の加速度応答スペクトルに関する地震動ハザード評価について、以下の条件で試算を行う。なお、対象とする地震（群）の分類と【MF13】における補正項を表 4.2-1 に整理する。

- 地震活動モデルは全国地震動予測地図（確率論的地震動予測地図）2020 年版と同じモデルを用いる。地震発生確率の評価基準日は 2020 年 1 月 1 日としている。
- 本試作版での評価地点は、地震動ハザードへの影響度の高い地震の種別が異なる東京都庁、名古屋市役所、大阪市役所位置の 3 地点とする。後述するように、東京都庁は震源断層を予め特定しにくい地震の海溝型地震が、名古屋市役所は海溝型地震が、大阪市役所は活断層などの浅い地震の影響度が高い。
- フィリピン海プレートの震源断層を予め特定しにくいプレート内地震のうち、比較的浅いプレート内地震（図 4.2-1 における震源が深い領域 4 以外の領域）については森川・藤原（2015）による追加補正項を適用する³。
- 利活用の検討が進むように、各評価地点における周期ごとのハザードカーブに加えて、一様ハザードスペクトル、ハザードの再分解による地震タイプごとの影響度などの情報も掲載する。
- ハザードカーブ及び一様ハザードスペクトルは、工学的基盤（表層 30m の平均 S 波速度 $AVS30=400\text{m/s}$ ）上で評価する。
- ハザードカーブは周期 0.1 秒、0.5 秒、1.0 秒、5.0 秒に対する 50 年超過確率を掲載する。
- 一様ハザードスペクトルは 50 年超過確率 2%、5%、10%、39%の 4 種類（再現期間は約 2,500 年、1,000 年、500 年、100 年相当）を掲載する。周期は 0.1 秒、0.2 秒、0.3 秒、0.5 秒、1.0 秒、2.0 秒、3.0 秒、5.0 秒の 8 ポイントで算定する。
- 一様ハザードスペクトルについては、再分解による地震タイプごとの影響度評価、及び詳細な再分解による影響度評価を行う。詳細な再分解は、表 4.2-1 に示す 19 の地震（群）に再分解しているが、いずれかの周期ポイントにおいて上位 3 つの地震グループとなるもののみ個別に表示し、それ以外は「その他の地震」と表現している。

³ 森川・藤原（2015）では、フィリピン海プレートのプレート内地震に対して、特に短周期成分（周期 0.5 秒程度以下）の予測値が過大評価となっている傾向が見られたことから追加補正項を提案している。「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（『レシピ』）」（地震調査研究推進本部地震調査委員会、2020）では、スラブ内地震を対象とした短周期レベルの設定において、「フィリピン海プレートの地震に対しては、この値の 0.5 倍とする」と提案しており、森川・藤原（2015）の補正項はこの記載に対応している。なお、これらは深さ 50km 程度より浅いフィリピン海プレートの地震が対象である。そこで、本試作版では、図 4.2-1 における震源が比較的深い領域 4 を除く、フィリピン海プレートの震源断層を予め特定しにくいプレート内地震を対象に森川・藤原（2015）による補正項を適用する。

表 4.2-1 地震（群）の分類と【MF13】における補正項

地震（群）	地震 タイプ	前弧/ 背弧	ばら つき
・活断層などの浅い地震	地殻	—	距離 依存
・千島海溝沿いの超巨大地震（17世紀型） ・十勝沖のプレート間巨大地震 ・根室沖のプレート間巨大地震 ・十勝沖から択捉島沖の海溝寄りのプレート間地震（津波震等） ・日本海溝沿いの超巨大地震（東北地方太平洋沖型） ・青森県東方沖及び岩手県沖北部のプレート間巨大地震 ・宮城県沖のプレート間巨大地震 ・青森県東方沖から房総沖にかけての海溝寄りのプレート間地震（津波地震等） ・太平洋プレートの震源断層を予め特定しにくいプレート間地震	プレート 間	東北 日本	振幅 依存
・日本海溝の海溝軸外側の地震 ・太平洋プレートの震源断層を予め特定しにくいプレート内地震	プレート 内	東北 日本	振幅 依存
・南海トラフ沿いで発生する大地震 ・相模トラフ沿いの M8 クラスの地震*1 ・日向灘のプレート間地震 ・日向灘のひとまわり小さいプレート間地震 ・与那国島周辺の地震 ・フィリピン海プレートの震源断層を予め特定しにくいプレート間地震	プレート 間	西南 日本	振幅 依存
・フィリピン海プレートの震源断層を予め特定しにくいプレート内地震*2	プレート 内	西南 日本	振幅 依存

*1 この報告書では、全国地震動予測地図 2020 年版で個別にモデル化している相模トラフ沿いの M8 クラスの地震について、相模トラフ地震と呼ぶ。

*2 フィリピン海プレートの比較的浅いプレート内地震（図 4.2-1 における震源が比較的深い領域 4 以外の領域）については森川・藤原（2015）による追加補正項を適用する。

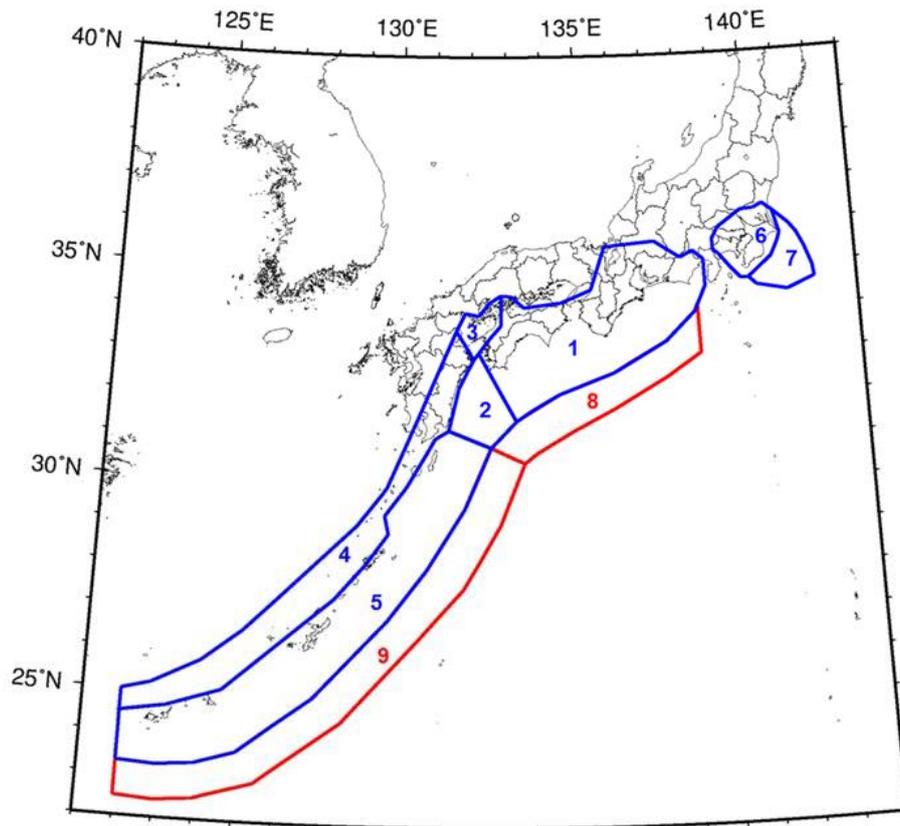


図 4.2-1 フィリピン海プレートの震源断層を予め特定しにくい地震の領域区分

5. 各地点の地震動ハザードの試算結果

5.1 東京都庁位置

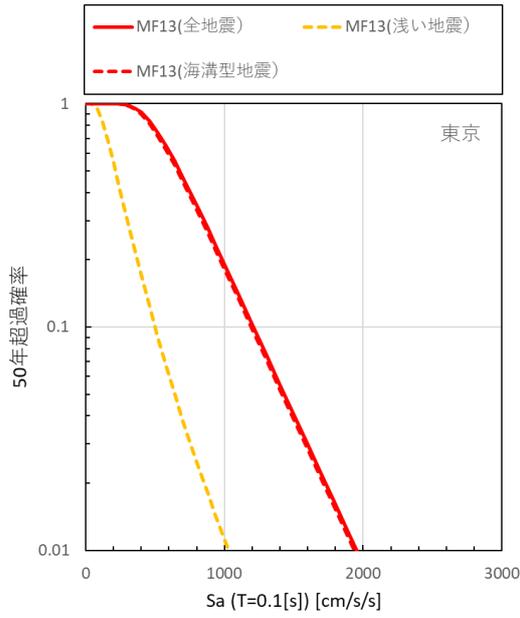
東京都庁位置における周期 0.1 秒、0.5 秒、1.0 秒、5.0 秒の加速度応答スペクトル（減衰定数 5%）に関するハザードカーブを図 5.1-1 に示す。縦軸は 50 年超過確率としている。赤実線は全地震、赤破線は海溝型地震、黄破線は活断層などの浅い地震によるハザードカーブに対応している。50 年超過確率の高低にかかわらず、全地震のハザードカーブと海溝型地震のハザードカーブはほぼ重なっており、いずれの周期帯においても海溝型地震が支配的となっている。

加速度応答スペクトル（減衰定数 5%）の一樣ハザードスペクトルを全地震、活断層などの浅い地震、海溝型地震に分けて図 5.1-2(a)~(c) に示す。50 年超過確率 2%、5%、10%、39%（再現期間は約 2,500 年、1,000 年、500 年、100 年相当）の 4 種類を示している。図 5.1-2(a) の全地震と図 5.1-2(c) の海溝型地震のスペクトル形状と振幅はよく似ており、ハザードカーブで示した 4 ポイント以外の周期で見ても、海溝型地震の一樣ハザードスペクトルの寄与が大きい傾向にある。

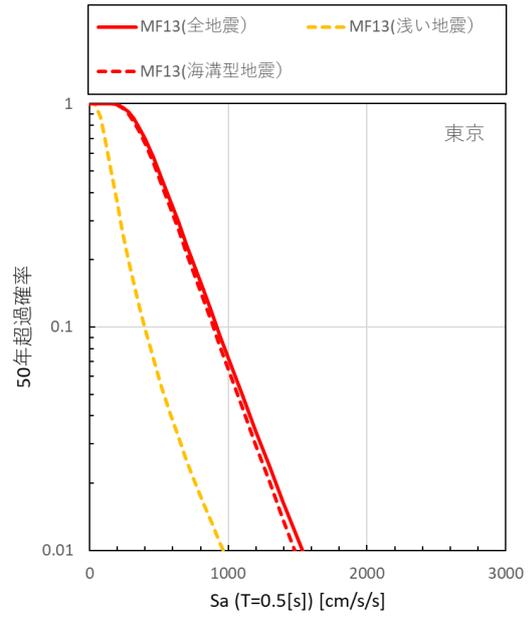
この傾向を定量的に確認するために、50 年超過確率 5%（再現期間は約 1,000 年）の一樣ハザードスペクトルを活断層などの浅い地震と海溝型地震に再分解し、周期ごとに各々の影響度を見た結果を図 5.1-2(d) に示す。どの周期ポイントにおいても、海溝型地震の影響度が卓越している。4.2 節に示した 19 の地震（群）について、より詳細に再分解した結果を図 5.1-2(e) に示す。周期 0.5 秒以下の短周期帯域では、海溝型地震のうちフィリピン海プレートのプレート間やプレート内の震源断層を予め特定しにくい地震の影響度が大きい。一方、周期 1.0 秒から長周期になるにつれて太平洋プレートのプレート間やプレート内の震源断層を予め特定しにくい地震や、相模トラフ及び南海トラフの地震など、震源が遠くても規模の大きい地震の影響度が大きくなっている。周期が長い地震動ほど距離減衰が小さく、遠くまで伝わりやすいことが現れている。

以上は 50 年超過確率 5% の結果であるが、他の超過確率についても活断層などの浅い地震と、海溝型地震に再分解した結果を図 5.1-3 に示す。どの超過確率で見ても海溝型地震の影響が大きい。さらに詳細に再分解した結果を図 5.1-4 に示す。周期 0.5 秒以下の帯域では、超過確率の値によらずにフィリピン海プレートのプレート間やプレート内の震源断層を予め特定しにくい地震の影響度が大きい。周期 1.0 秒以上の帯域に着目すると、50 年超過確率 39% から 2% になるにつれて相模トラフの地震の影響度が大きくなっている。

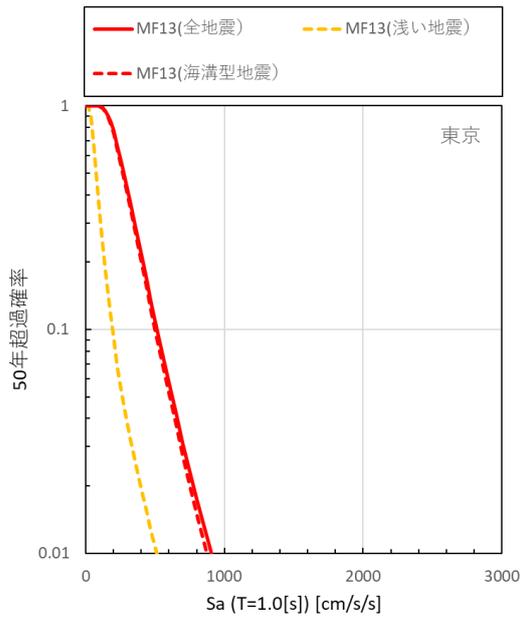
また、50 年超過確率 2%（図 5.1-4 (d)）において、周期 1.0 秒、2.0 秒、及び 3.0 秒では相模トラフ地震の影響が大きくなることが確認できる。【MF13】は、震源近傍（例えば M8 程度の地震で 30km 程度以内）において周期 1～3 秒付近の加速度応答値が大きくなる形状を有する特徴がある。このことは、例えば図 3.2-5 からも見て取れる。相模トラフ沿いの M8 程度の地震に対する東京都庁位置での断層最短距離は、房総半島沖のみを震源とする一部の地震を除き約 25km であるため、予測される振幅が特に大きくなる周期 1.0 秒、2.0 秒、及び 3.0 秒の影響度が大きくなっていることが考えられる。



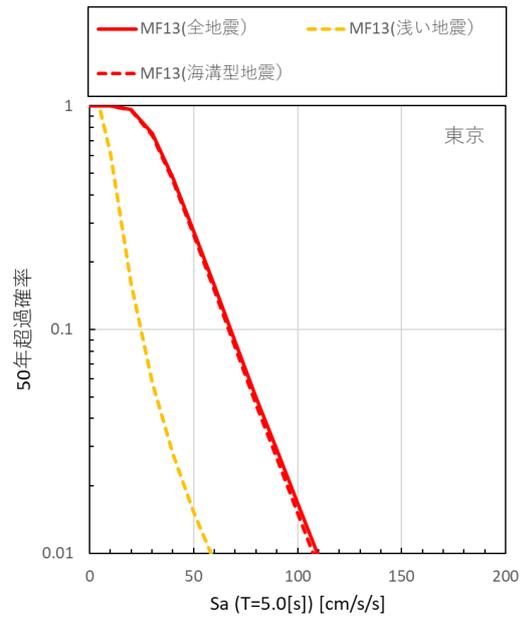
(a) 周期 0.1 秒



(b) 周期 0.5 秒



(c) 周期 1.0 秒



(d) 周期 5.0 秒

図 5.1-1 東京都庁位置におけるハザードカーブの比較

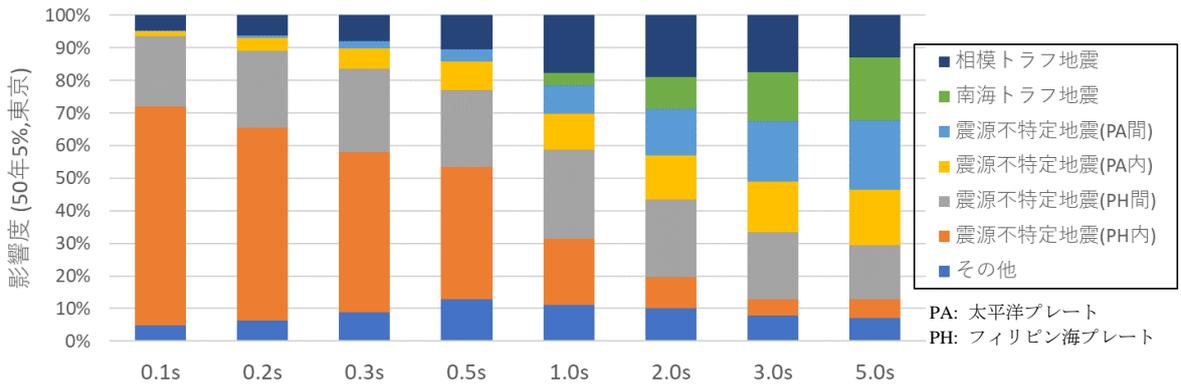
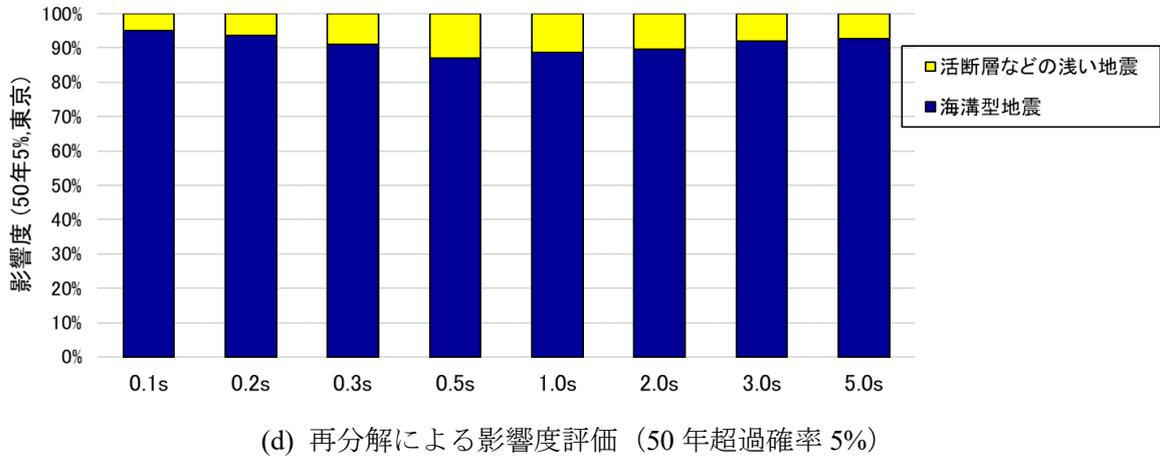
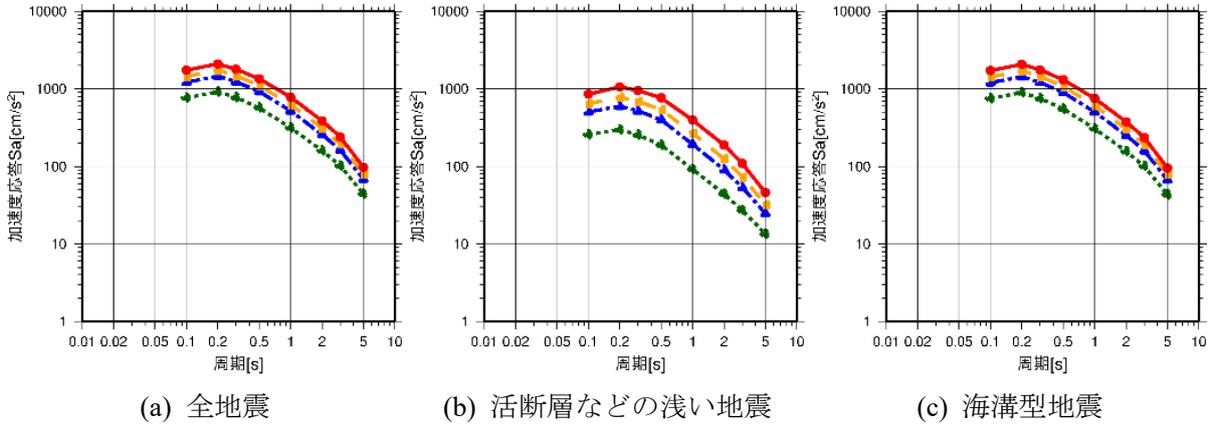
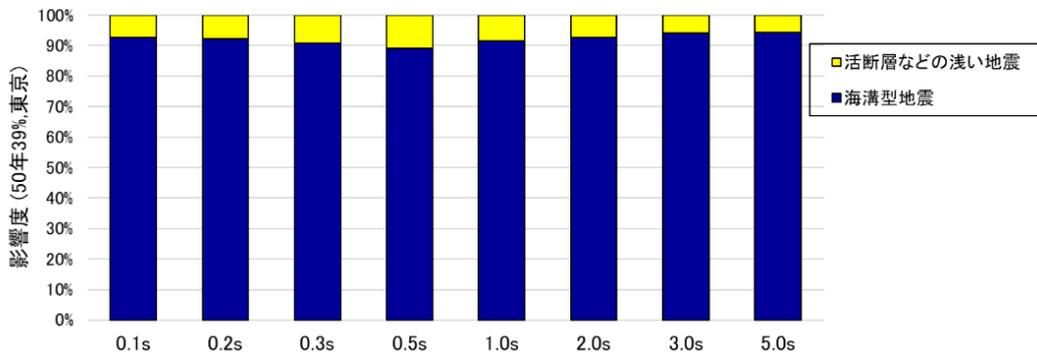
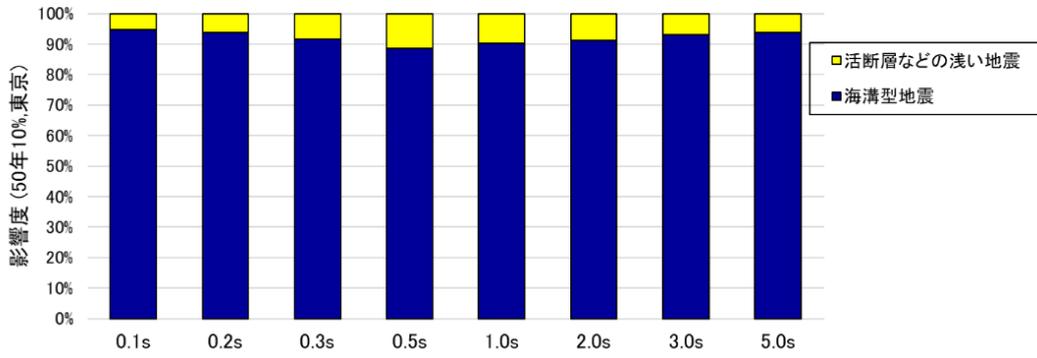


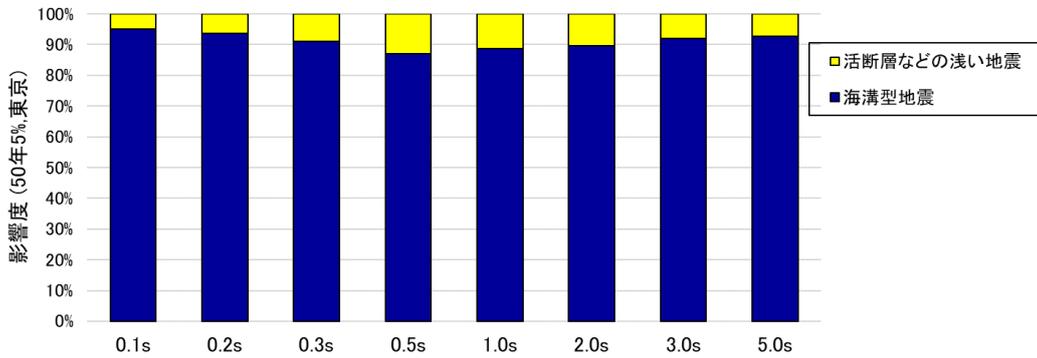
図 5.1-2 東京都庁位置の一樣ハザードスペクトルの評価結果



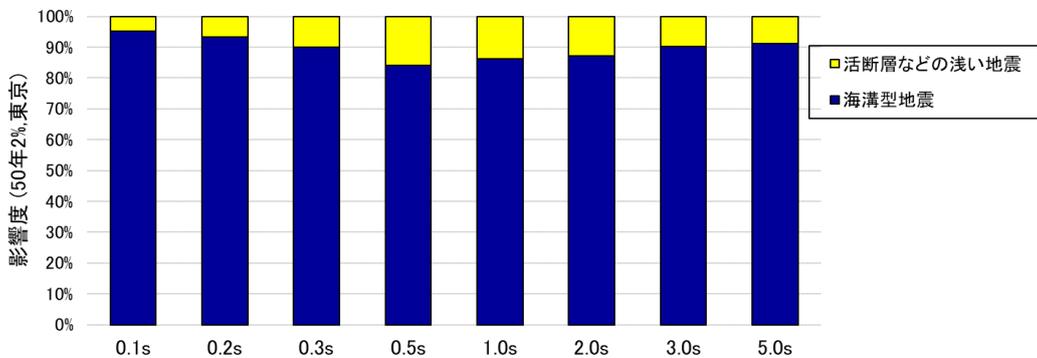
(a) 50年超過確率 39%



(b) 50年超過確率 10%

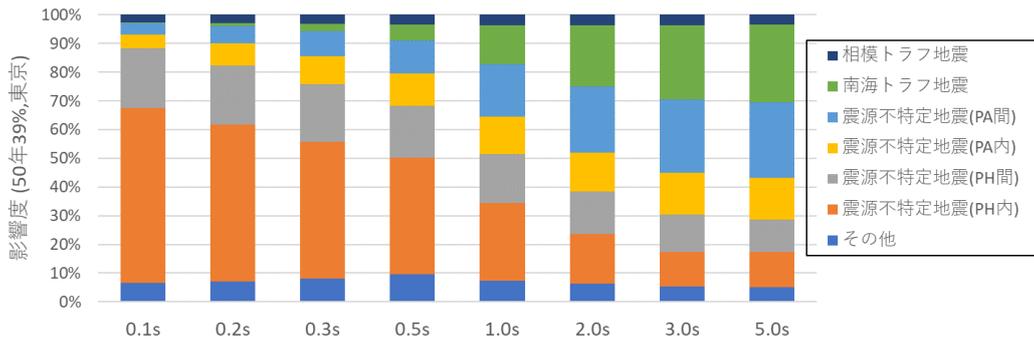


(c) 50年超過確率 5%

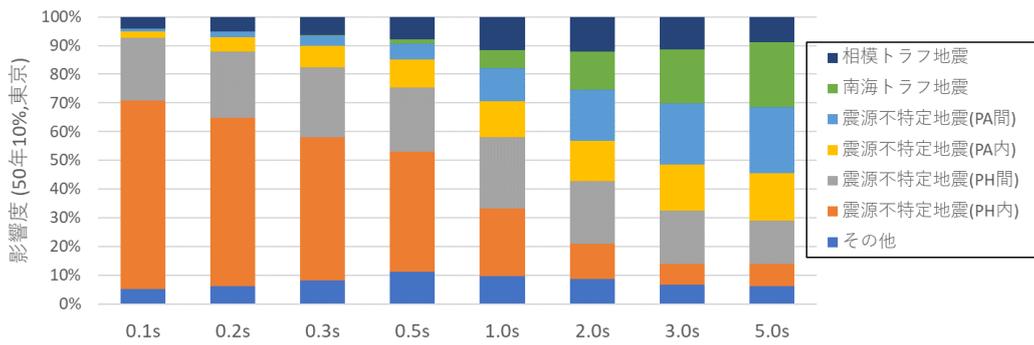


(d) 50年超過確率 2%

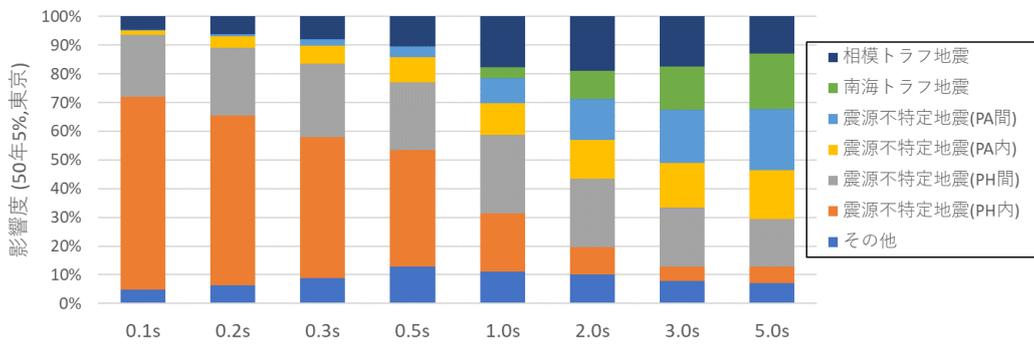
図 5.1-3 東京都庁位置の再分解による影響度評価



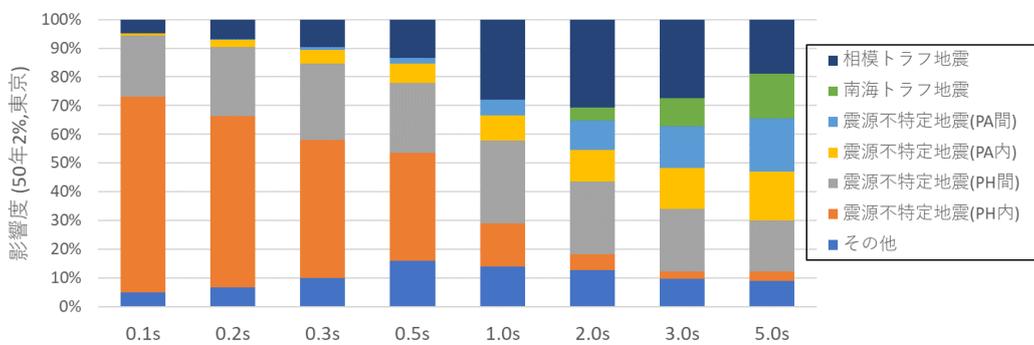
(a) 50年超過確率 39%



(b) 50年超過確率 10%



(c) 50年超過確率 5%



(d) 50年超過確率 2%

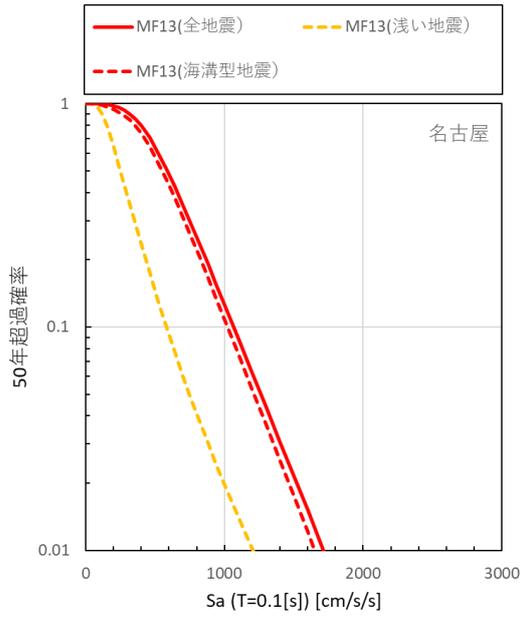
図 5.1-4 東京都庁位置の詳細な再分解による影響度評価 (PA: 太平洋プレート、PH: フィリピン海プレート)

5.2 名古屋市役所位置

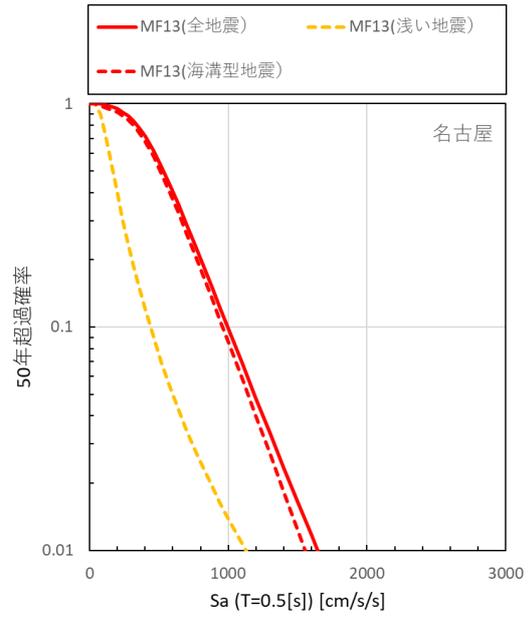
名古屋市役所位置における周期 0.1 秒、0.5 秒、1.0 秒、5.0 秒の加速度応答スペクトル（減衰定数 5%）のハザードカーブを図 5.2-1 に示す。縦軸は 50 年超過確率としている。東京都庁位置と同様に、全地震と海溝型地震のハザードカーブはほぼ重なっており、いずれの周期帯においても海溝型地震が支配的となっている。

加速度応答スペクトル（減衰定数 5%）の一樣ハザードスペクトルを全地震、活断層などの浅い地震、海溝型地震に分けて図 5.2-2(a)~(c)に示す。図 5.2-2(a)の全地震と図 5.2-2(c)の海溝型地震のスペクトル形状と振幅はよく似ており、ハザードカーブで示した 4 ポイント以外の周期で見ても、海溝型地震の一樣ハザードスペクトルの寄与が大きい傾向にある。この傾向は 50 年超過確率 5%（再現期間は約 1,000 年）の一樣ハザードスペクトルを再分解した結果の図 5.2-2(d)にも認められる。また、地震の影響をより詳細に再分解した図 5.2-2(e)の結果を見ると、海溝型地震の中では南海トラフの地震の影響が卓越しており、この傾向は東京都庁位置と異なっている。

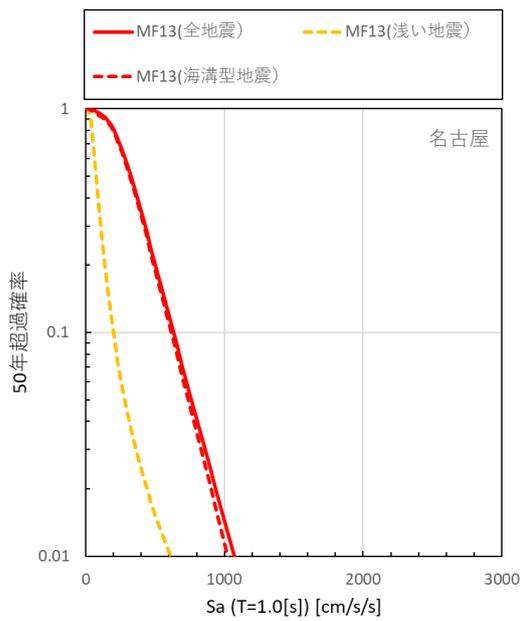
他の超過確率について再分解した結果を図 5.2-3 に、さらに詳細に再分解した結果を図 5.2-4 に示す。超過確率の値によらず、海溝型地震、特に南海トラフの地震の影響度が大きい傾向にある。



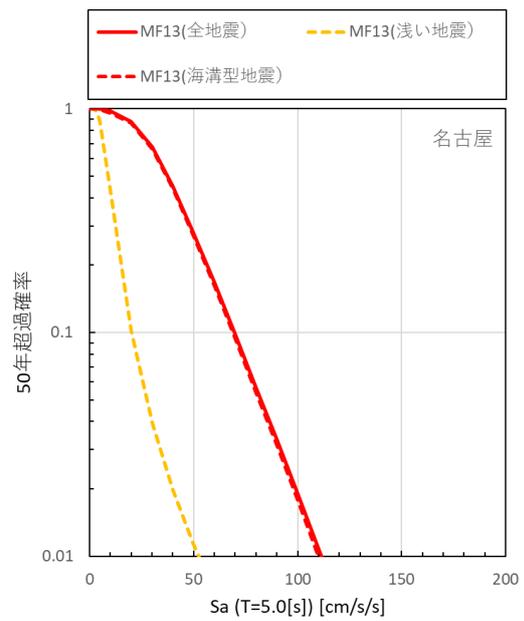
(a) 周期 0.1 秒



(b) 周期 0.5 秒



(c) 周期 1.0 秒



(d) 周期 5.0 秒

図 5.2-1 名古屋市役所位置におけるハザードカーブの比較

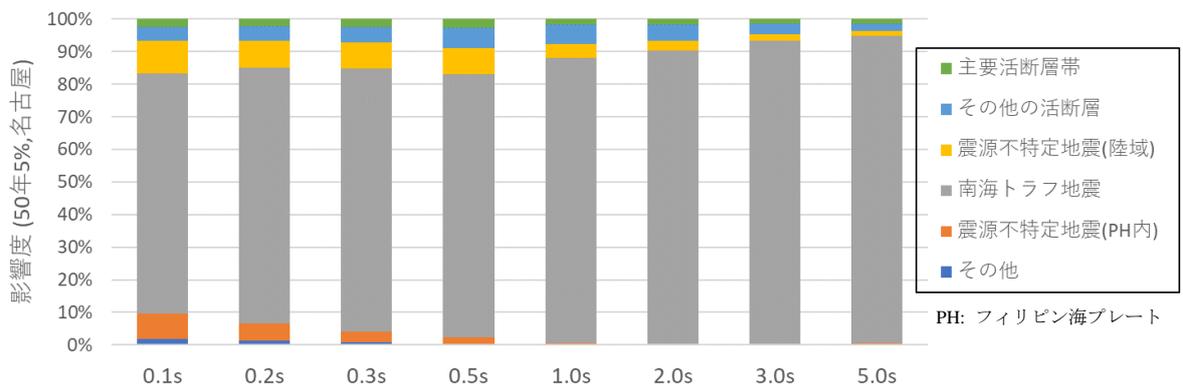
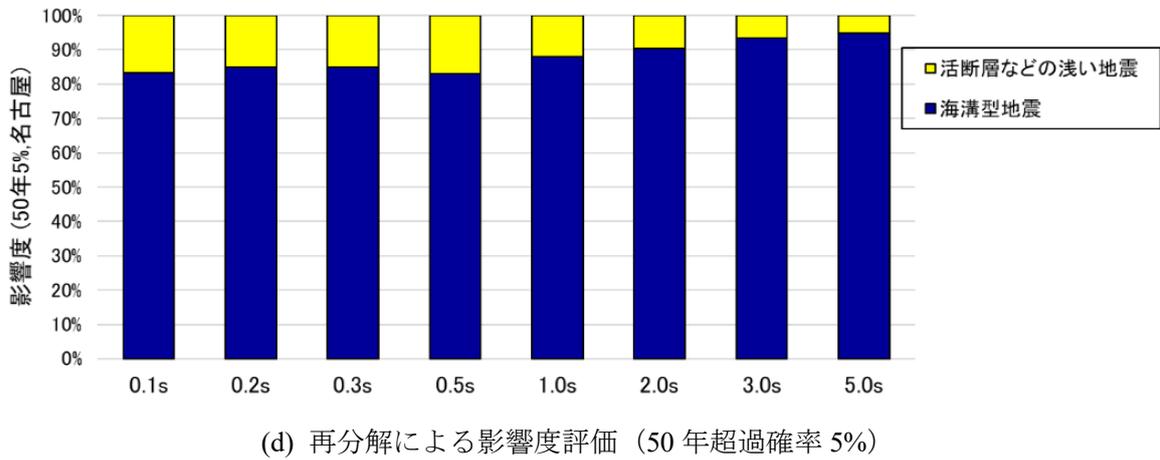
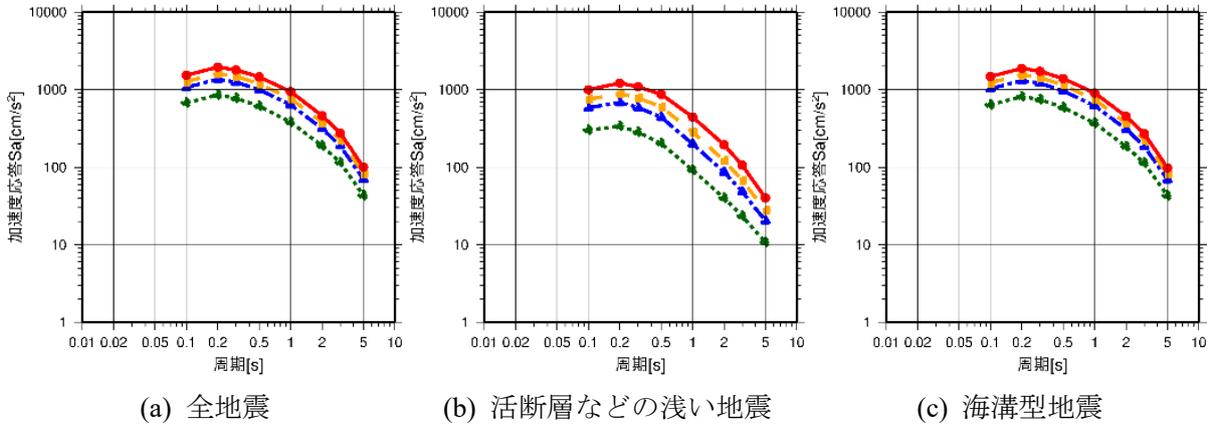
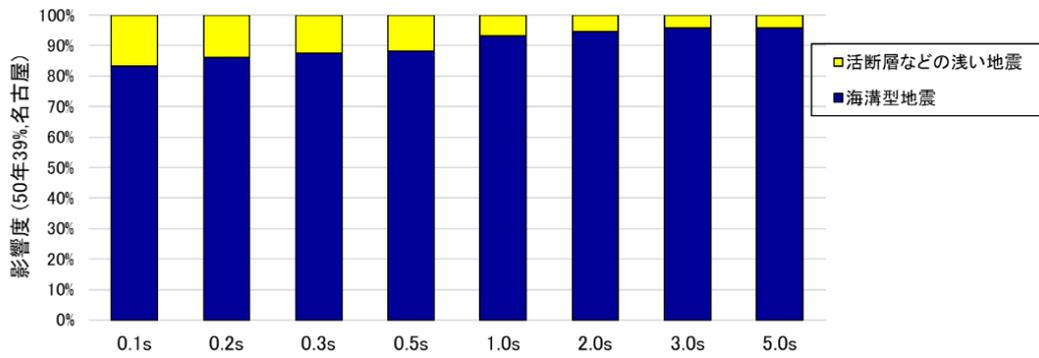
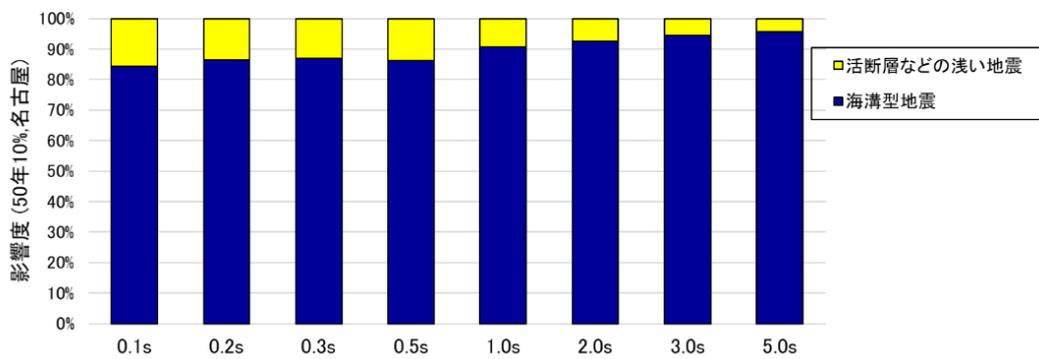


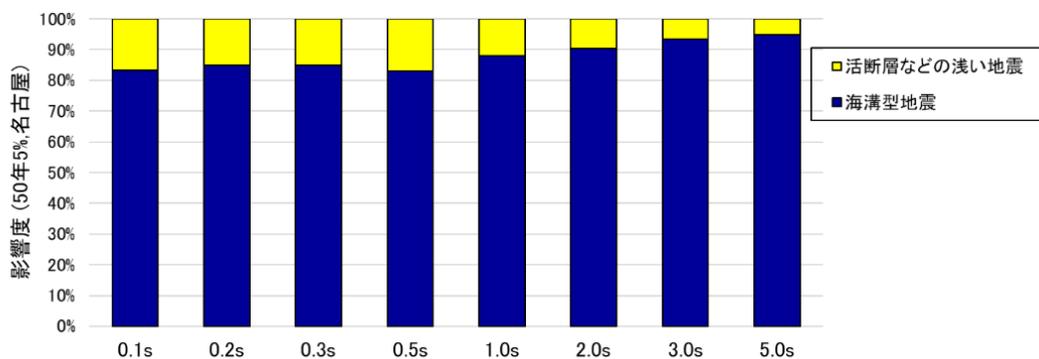
図 5.2-2 名古屋市役所位置の一様ハザードスペクトルの評価結果



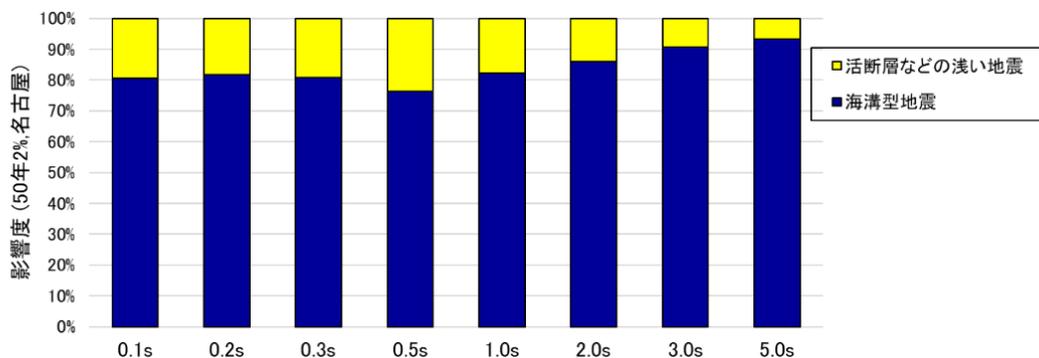
(a) 50年超過確率 39%



(b) 50年超過確率 10%

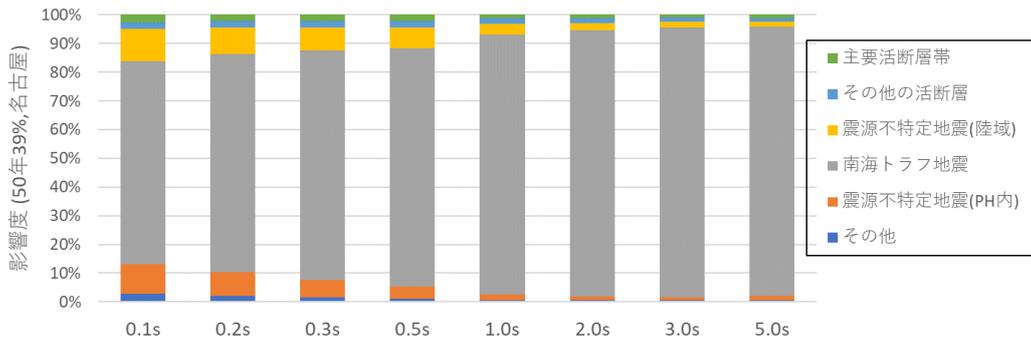


(c) 50年超過確率 5%

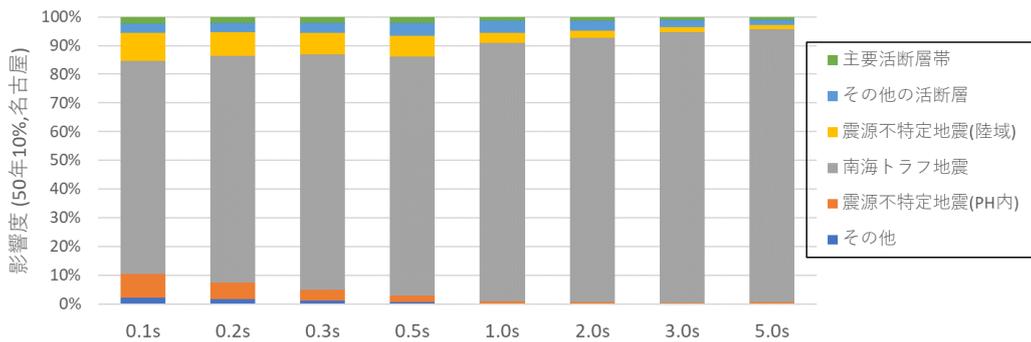


(d) 50年超過確率 2%

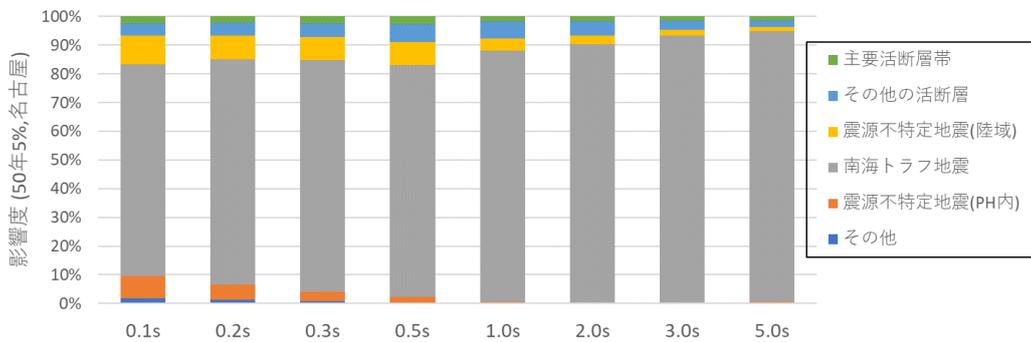
図 5.2-3 名古屋市役所位置の再分解による影響度評価



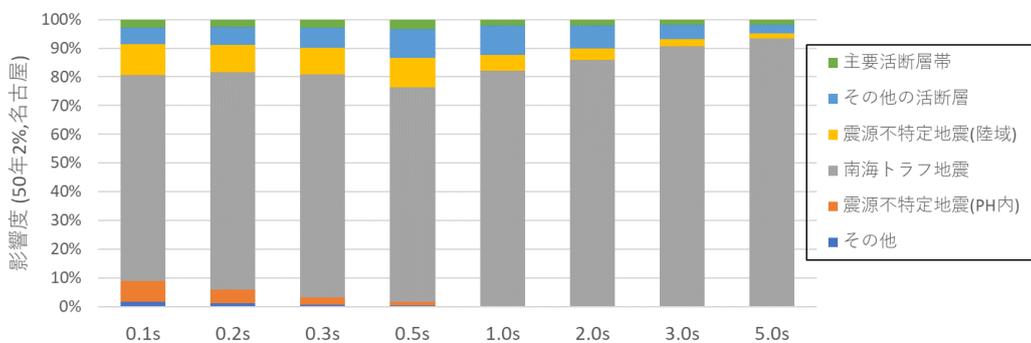
(a) 50年超過確率 39%



(b) 50年超過確率 10%



(c) 50年超過確率 5%



(d) 50年超過確率 2%

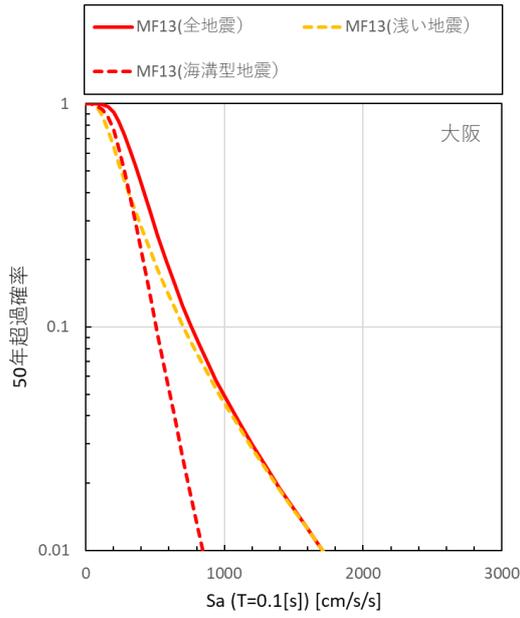
図 5.2-4 名古屋市役所位置の詳細な再分解による影響度評価 (PH: フィリピン海プレート)

5.3 大阪市役所位置

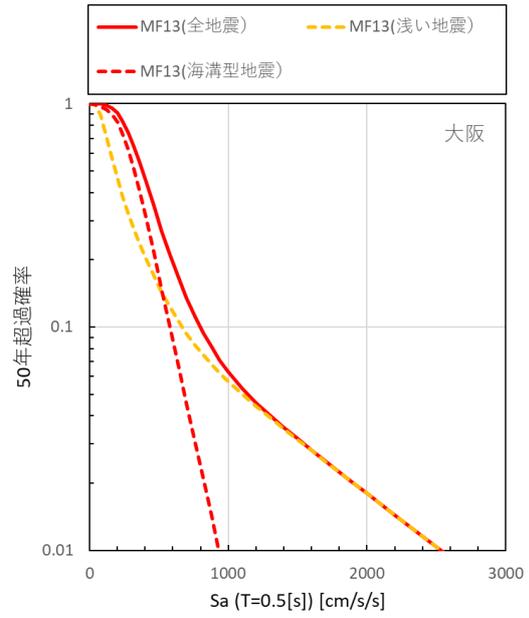
大阪市役所位置における周期 0.1 秒、0.5 秒、1.0 秒、5.0 秒の加速度応答スペクトル（減衰定数 5%）のハザードカーブを図 5.3-1 に示す。縦軸は 50 年超過確率としている。図 5.3-1(a)の周期 0.1 秒を見ると、全地震と活断層などの浅い地震のハザードカーブが概ね重なっており、活断層などの浅い地震が支配的となっている。周期 0.5 秒、1.0 秒、5.0 秒のハザードカーブを見ると、50 年超過確率が高い領域では海溝型地震が支配的であるが、50 年超過確率が低くなるほど活断層などの浅い地震の影響が大きくなっている。

加速度応答スペクトル（減衰定数 5%）の一樣ハザードスペクトルを全地震、活断層などの浅い地震、海溝型地震に分けて図 5.3-2(a)～(c)に示す。図 5.3-2(a)に示した 50 年超過確率 39%や 10%（再現期間は約 100 年、500 年相当）と、図 5.3-2(c)の海溝型地震の一樣ハザードスペクトルのスペクトル形状と振幅はよく似ている。一方、図 5.3-2(a)の 50 年超過確率が 5%や 2%（再現期間は約 1,000 年、2,500 年相当）は図 5.3-2(b)と似ており、より低確率になると活断層などの浅い地震の影響が大きくなっている。

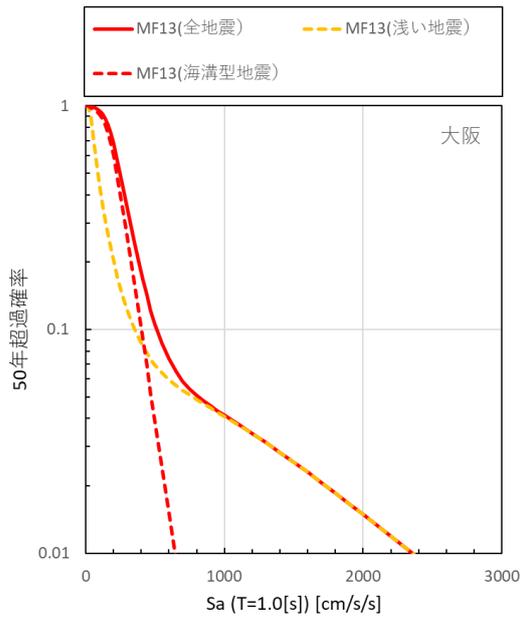
50 年超過確率 5%（再現期間は約 1,000 年）の一樣ハザードスペクトルを再分解した結果を図 5.3-2(d)に、他の超過確率について再分解した結果を図 5.3-3 に示す。50 年超過確率 39%では周期が長くなるほど、海溝型地震の影響度が大きくなっている。50 年超過確率が 39%より低くなるにつれ、活断層などの浅い地震が支配的となっている。50 年超過確率 5%の一樣ハザードスペクトルについて、地震の影響をより詳細に再分解した結果を図 5.3-2(e)に、他の超過確率について再分解した結果を図 5.3-4 に示す。50 年超過確率 39%を見ると、海溝型地震の中で影響度が大きいのは南海トラフの地震であり、特に周期 1.0 秒以上の長周期帯域では南海トラフの地震の影響が支配的である。一方、活断層などの浅い地震の中では、50 年超過確率が 39%より低くなるにつれて主要活断層帯の地震の影響度が大きくなり、特に 50 年超過確率 2%では主要活断層帯の地震が支配的になっている。大阪市役所の近傍には主要活断層帯に属する上町断層帯が位置しており、この断層帯による影響が大きくなっている。



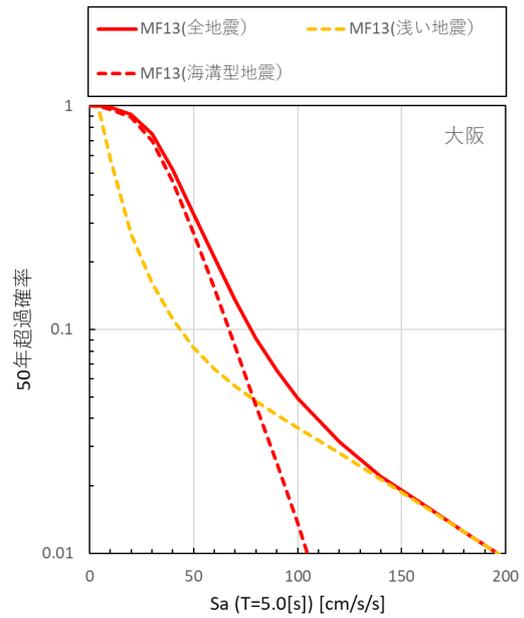
(a) 周期 0.1 秒



(b) 周期 0.5 秒



(c) 周期 1.0 秒



(d) 周期 5.0 秒

図 5.3-1 大阪市役所位置におけるハザードカーブの比較

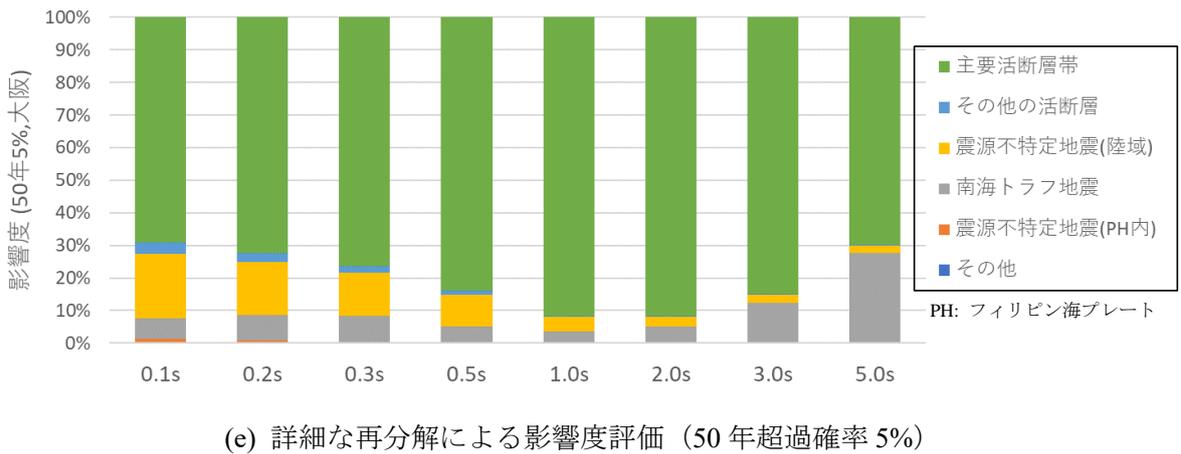
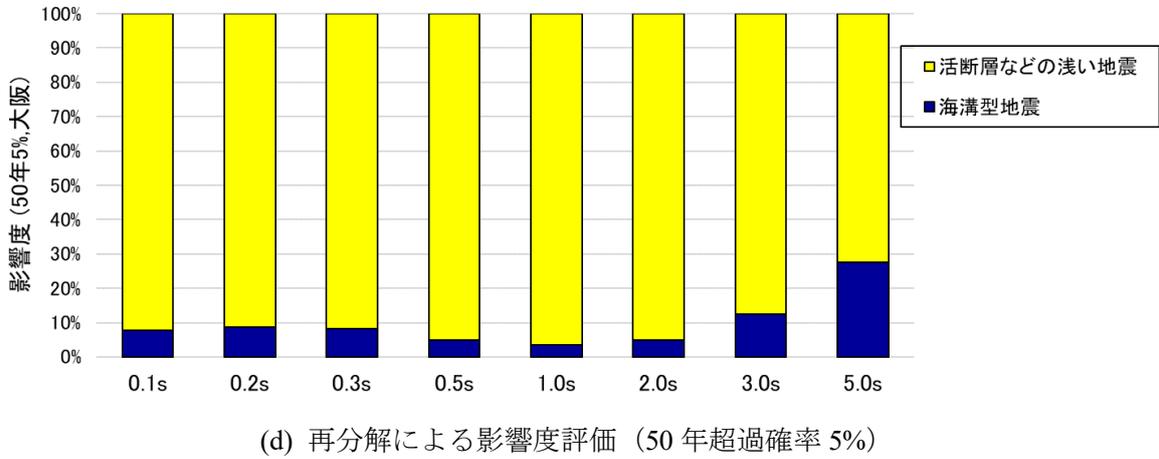
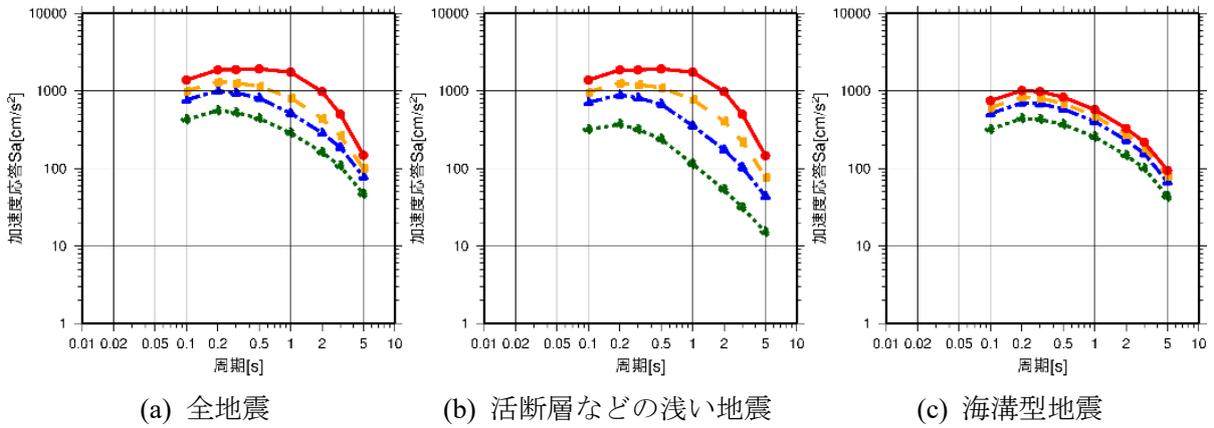
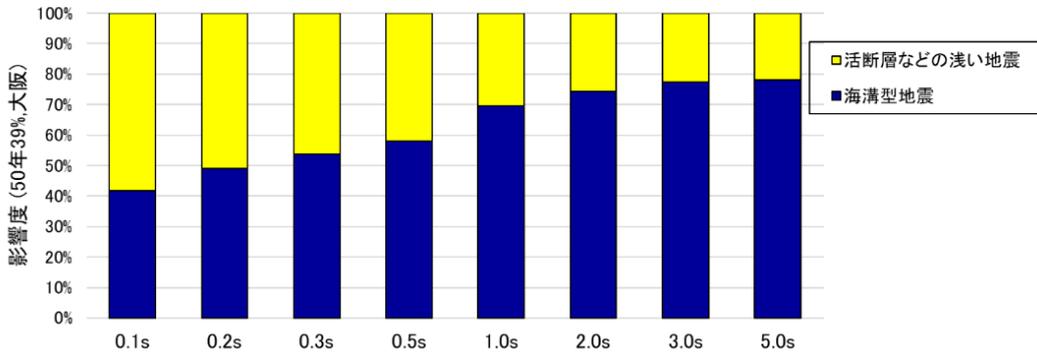
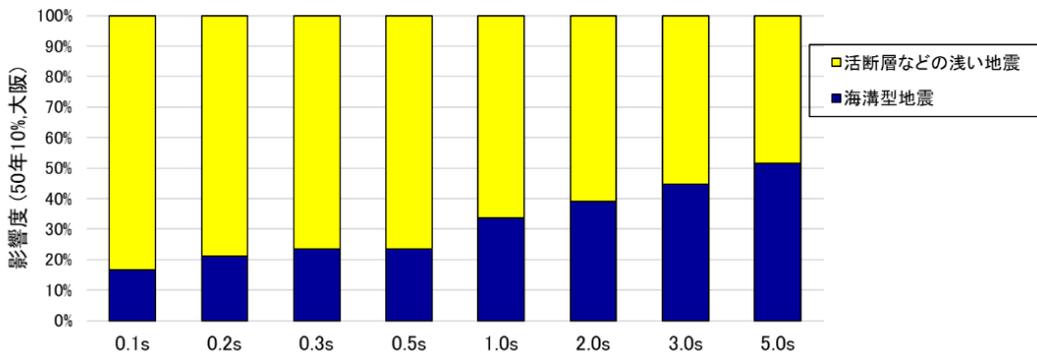


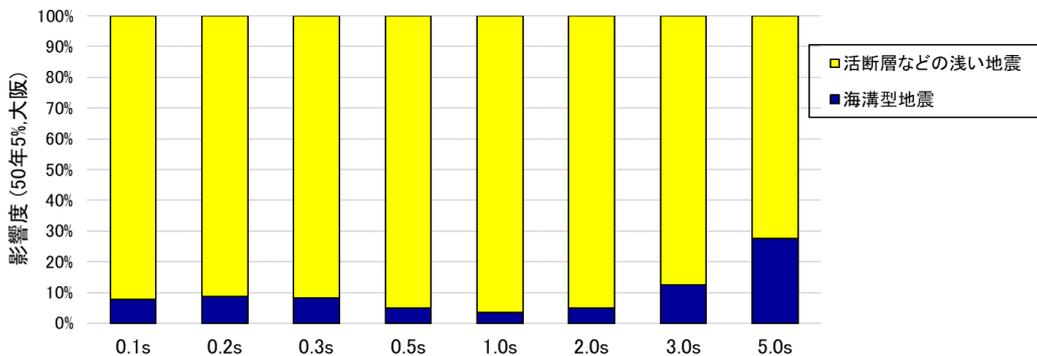
図 5.3-2 大阪市役所位置の一樣ハザードスペクトルの評価結果



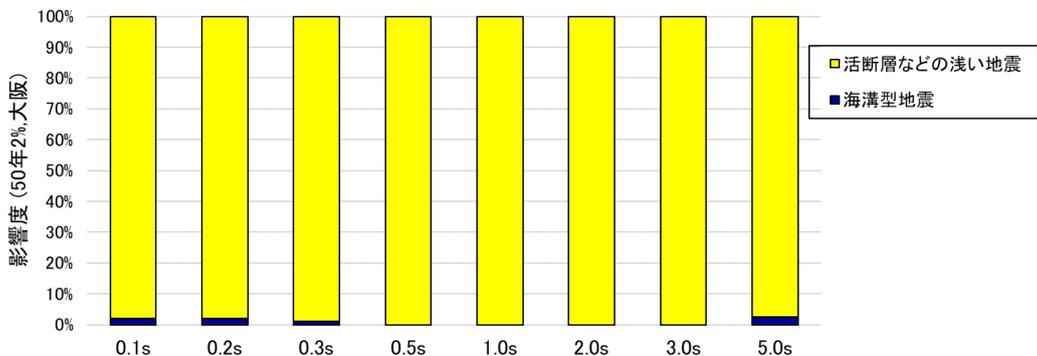
(a) 50年超過確率 39%



(b) 50年超過確率 10%

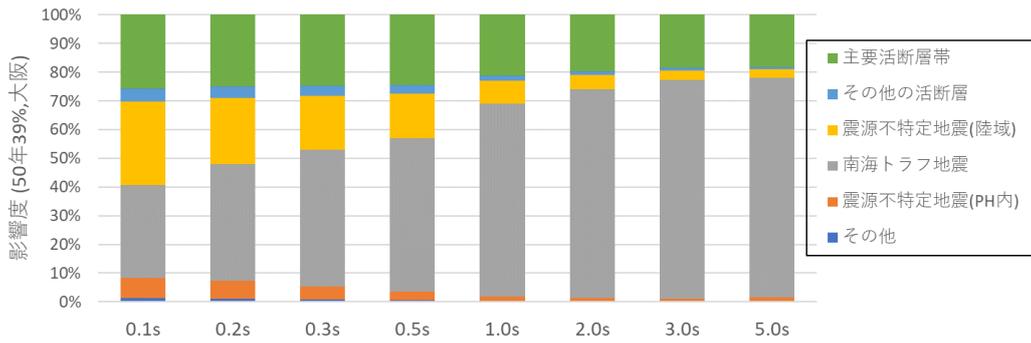


(c) 50年超過確率 5%

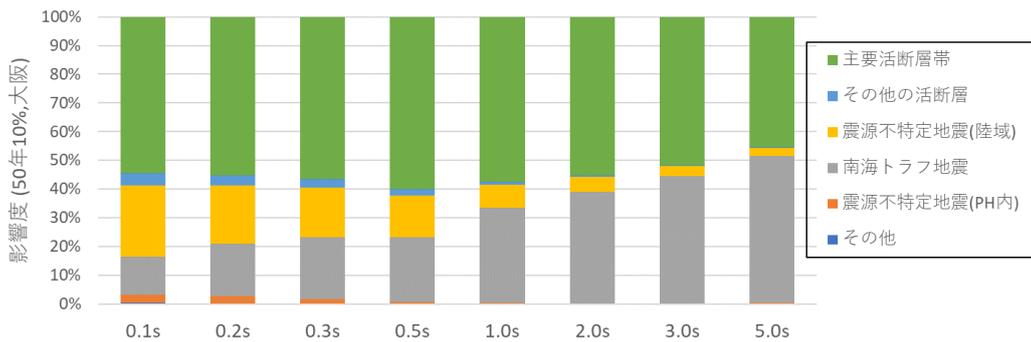


(d) 50年超過確率 2%

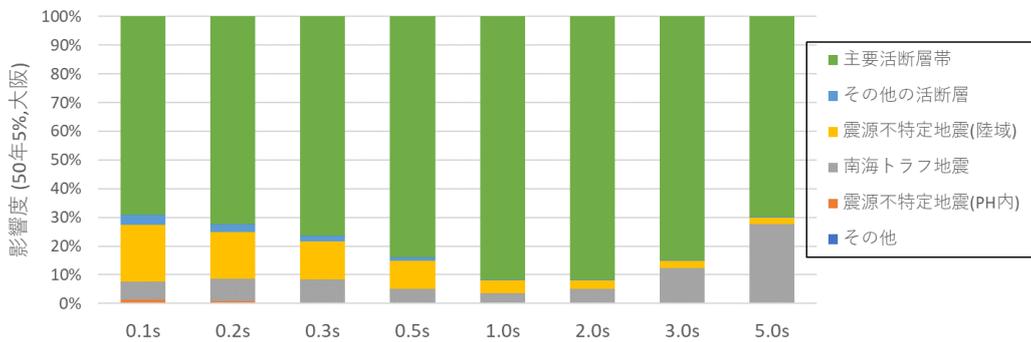
図 5.3-3 大阪市役所位置の再分解による影響度評価



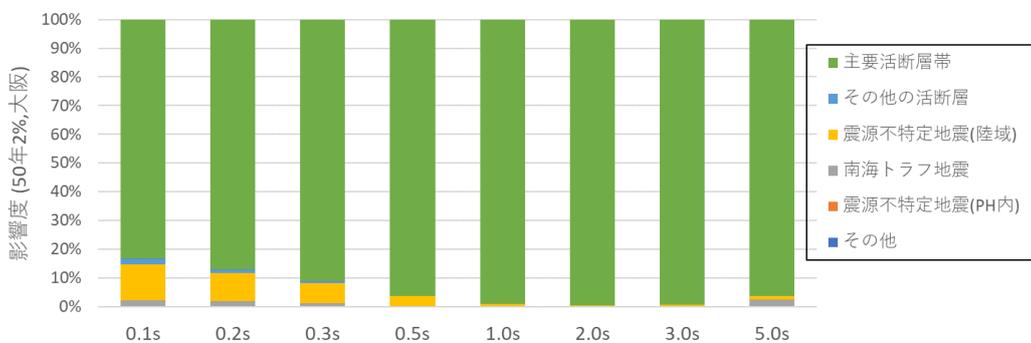
(a) 50年超過確率 39%



(b) 50年超過確率 10%



(c) 50年超過確率 5%



(d) 50年超過確率 2%

図 5.3-4 大阪市役所位置の詳細な再分解による影響度評価 (PH: フィリピン海プレート)

6. 今後に向けて

6.1 利活用に向けて

本報告書では、試作版としての応答スペクトルに関する地震動ハザード評価を取りまとめた。今後の利活用の一例として、建築分野では現行の設計実務において、以下のような観点で広く活用されることが期待される。

- ・ 建築物や地域の地震環境の特徴を考慮した建設地点選定や設計方針の決定
- ・ 高層建築物の耐震設計における想定地震の選定や地震荷重との比較検討
- ・ 中低層建築物の設計層せん断力との比較による地震荷重の検討
- ・ 構造安全性に加えて、非構造部材、設備などを含めた建築物の被害（被害額、機能停止期間）など事業継続性に関する評価

また、耐震設計（非構造部材、建築物の継続利用の評価を含む）やBCPに係る地震リスク評価などの検討を行う上では、地震動ハザードとして確率の低い部分のみならず、確率の高い部分についての評価結果も有用であると考えられる。例えば、試算結果で示した周期ごとのハザードカーブを用いることで、注目する周期、及び50年超過確率に対する加速度応答値が得られる。

6.2 今後の課題

本試作版の検討を踏まえ、地震動予測式の精度向上、地震動ハザード評価の予測精度向上、利活用の促進の観点から中長期的な視点で抽出した課題の例を以下にまとめる。

6.2.1 地震動予測式の精度向上の課題

- ・ 地震動予測式の精度を向上させるには、データセットを充実させる必要がある。そのためにはK-NETやKiK-netに加え、気象庁や大学、地方公共団体における震度計をはじめ、各機関で行っている強震観測網の継続的な維持整備が重要となる。
- ・ 米国のNGA-WEST2プロジェクト⁴など、海外の地震動予測式は統一的なデータベースに基づいて作成されている。一方、日本の地震動予測式は基となるデータベースが異なることから地震動予測式間のばらつきが大きく、認識論的不確定性として処理することが難しい。地震動予測式の改良とその検証、さらには確率論的地震動ハザード評価において認識論的不確定性を考慮できるようにするためには、震源・観測点・地震動記録に関する情報が統一的・網羅的に整備された強震動データベースの構築が必要である。
- ・ 地震動予測式の精度を上げるには、表層地盤による増幅効果を取り除いた基盤波を用いることが望まれる。そのためにも、強震観測網を用いて、地表から工学的基盤に至る強震観

⁴ 太平洋地震工学研究センター（Pacific Earthquake Engineering Research Center; PEER）が主導する学際的研究プログラムの一つである。地殻内地震の地震動の次世代予測モデルなど、地震動ハザードに関する問題が研究されている。

測点直下の地盤構造を取得し、地表の観測波形を基盤波に変換することが必要である。

- ・ 周期数秒以上の長周期帯域に適用可能な精度の高い地震動予測式の構築が望まれる。

6.2.2 地震動ハザード評価の予測精度向上の課題

- ・ 近年の地震動データの蓄積にともない、地震動ハザード評価で用いる上で適切なばらつきに関する研究が国内外で行われるようになってきている。応答スペクトルに関するばらつきの地震規模依存性、距離依存性や、それらの周期依存性に関し、研究事例の蓄積が望まれる。
- ・ 観測記録がきわめて少ない、あるいは得られていない超巨大地震や震源断層ごく近傍を対象とした地震動ハザード評価において、認識論的不確定性を考慮できるように複数の地震動予測式を考慮できる枠組みの構築が必要である。

6.2.3 利活用に関する課題

- ・ 本試作版では、評価期間を50年とした地震動ハザードの試算結果を示した。一方、建築物の供用期間に関する社会的な要請や、土木構造物ではさらに長期間の評価を前提としている場合もあると考えられる。
- ・ 地図と紐づけられたアクセス可能なデジタルデータとして、応答スペクトルに関する面的な地震動ハザード情報が提供されることで、利活用の促進に資することが考えられる。
- ・ 耐震設計への適用を目指した一様ハザードスペクトルを設定するには、木造や中低層建物を対象とした短周期帯域から、超高層や免震建物を対象とした長周期帯域までをカバーするように、算定周期の数を増やす必要がある。
- ・ 一様ハザードスペクトルから時刻歴波形の地震動を作成する場合、周期0.1秒よりも短い周期帯の応答スペクトルの振幅も必要となる。
- ・ 建築物の3次元地震応答を実施する場合は上下動の地震動ハザードも必要となる。例えば、米国のNGA-WEST2プロジェクトでは水平動 H と上下動 V の比(V/H)を地震規模や震源距離によりモデル化し、水平動から上下動を推定する方法が提案されている。この考え方は上下動の地震動ハザード設定の参考となる。
- ・ 将来的に地表での応答スペクトルに関する地震動ハザードを評価する場合、工学的基盤から地表への周期別の地盤増幅率が必要となる。工学的基盤の地震動ハザードの地震動レベルが大きい場合、地盤の非線形性を考慮した地盤増幅率が必要となる。

今後、応答スペクトルに関する地震動ハザード評価が進むことによって、確率レベルに応じた建物の揺れの評価やそれを考慮した地震荷重の検討、地震に対する防災計画などの基礎資料として利活用されることが考えられる。また、試作版の公表後、防災関係者や研究者のみならず、建設産業関係者なども含めて広く利活用の方法について議論されることが期待される。その議論等も踏まえて異なる切り口のデータ分析や、防災科学技術研究所のJ-SHIS等の活用も視野に入れながら、今後、評価結果の表現方法や提供方法などの検討を進める予定である。

【参考文献】

- 防災科学技術研究所 (2019) : 防災科研 K-NET, KiK-net. <https://doi.org/10.17598/NIED.0004>
- Douglas, J. (2019): Ground motion prediction equations 1964-2019, <https://www.strath.ac.uk/staff/douglasjohndr/>
- 藤原広行・森川信之・河合伸一・青井真・先名重樹・前田宜浩・東宏樹・はお憲生・岩城麻子・若松加寿江・井元政二郎・長谷川信介・奥村俊彦・早川俊彦・高橋真理 (2015) : 東日本大震災を踏まえた地震動ハザード評価の改良、防災科学技術研究所研究資料、第 399 号.
- Goda, K. and G. M. Atkinson (2009): Probabilistic Characterization of Spatially Correlated Response Spectra for Earthquakes in Japan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.99, pp.3003-3020. <https://doi.org/10.1785/0120090007>
- 引田智樹・友澤裕介 (2013) : 地震規模と震源距離が同じ 2 地震による同一地点の観測記録に基づく応答スペクトル振幅のばらつき、日本建築学会構造系論文集、第 78 巻、第 686 号、pp.723-732.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2014) : 全国地震動予測地図 2014 年版.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2016) : 長周期地震動評価 2016 年試作版.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2020) : 震源断層を特定した地震の強震動予測手法 (「レシピ」).
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2021) : 全国地震動予測地図 2020 年版.
- Kanno, T., A. Narita, N. Morikawa, H. Fujiwara, and Y. Fukushima (2006): A New Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.96, No.3, pp.879-897. <https://doi.org/10.1785/0120050138>
- 片岡正次郎・佐藤智美・松本俊輔・日下部毅明 (2006) : 短周期レベルをパラメータとした地震動強さの距離減衰式、土木学会論文集 A、第 62 巻、第 4 号、pp.740-757.
- Lin, P. S., B. Chiou, N. Abrahamson, M. Walling, C. T. Lee, and C. T. Cheng (2011): Repeatable Source, Site, and Path Effects on the Standard Deviation for Empirical Ground-Motion Prediction Models, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.101, No.5, pp.2281-2295. <https://doi.org/10.1785/0120090312>
- 翠川三郎・野木淑裕 (2015) : 深さ 30m までの地盤の平均 S 波速度を深さの浅いデータから推定する方法について、日本地震工学会論文集、第 15 巻、第 2 号、pp.91-96.
- Morikawa, N., T. Kanno, A. Narita, H. Fujiwara, T. Okumura, Y. Fukushima, and A. Guerpinar (2008): Strong motion uncertainty determined from observed records by dense network in Japan, *Journal of Seismology*, Vol.12, No.4, pp.529-546. <https://doi.org/10.1007/s10950-008-9106-2>
- Morikawa, N. and H. Fujiwara (2013): A New Ground Motion Prediction Equation for Japan Applicable up to M9 Mega-Earthquake, *Journal of Disaster Research*, Vol.8, pp.878-888. <https://doi.org/10.20965/jdr.2013.p0878>
- 森川信之・藤原広行 (2015) : 海溝型プレート内地震のための地震動予測式の補正項に関する検討、日本地球惑星科学連合 2015 年大会、SSS25-14.
- Rodriguez-Mark, A., G. A. Montalva, F. Cotton, and F. Bonilla (2011): Analysis of Single-Station Standard Deviation Using the KiK-net Data, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.101, No.3,

pp.1242-1258. <https://doi.org/10.1785/0120100252>

佐々木隆・伊藤壮志 (2016) : 東北地方太平洋沖地震を踏まえたダム基礎岩盤における地震動距離減衰式、日本地震工学会論文集、第 16 巻、第 4 号 (特集号)、pp.80-92.

佐藤智美 (2008) : 地殻内地震に対する P 波部・S 波部・全継続時間の水平・上下動の距離減衰式、日本建築学会構造系論文集、第 632 号、pp.1745-1754.

佐藤智美 (2010) : 日本のスラブ内地震とプレート境界地震の水平・上下動の距離減衰式、日本建築学会構造系論文集、第 647 号、pp.67-76.

司宏俊・翠川三郎 (1999) : 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式、日本建築学会構造系論文集、第 523 号、pp.63-70.

内山泰生・翠川三郎 (2006) : 震源深さの影響を考慮した工学的基盤における応答スペクトルの距離減衰式、日本建築学会構造系論文集、第 606 号、pp.81-88.

Villani, M. and N. A. Abrahamson (2015): Repeatable Site and Path Effects on the Ground-Motion Sigma Based on Empirical Data from Southern California and Simulated Waveforms from the Cybershake Platform, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.105, No.5, pp.2681-2695. <https://doi.org/10.1785/0120140359>

Zhao, J. X., K. Irikura, J. Zhang, Y. Fukushima, P. G. Somerville, A. Asano, Y. Ohno, T. Oouchi, T. Takahashi, and H. Ogawa (2006): An Empirical Site-Classification Method for Strong-Motion Stations in Japan Using H/V Response Spectral Ratio, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.96, pp.914-925. <https://doi.org/10.1785/0120050124>

Zhao, J. X., S. Zhou, P. Gao, T. Long, Y. Zhang, H. K. Thio, M. Lu, and D. A. Rhoades (2015): An Earthquake Classification Scheme Adapted for Japan Determined by the Goodness of Fit for Ground-Motion Prediction Equations, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.105, pp.2750-2763. <https://doi.org/10.1785/0120150013>

Zhao, J. X., X. Liang, F. Jiang, H. Xing, M. Zhu, R. Hou, Y. Zhang, X. Lan, D. A. Rhoades, K. Irikura, Y. Fukushima, and P. G. Somerville (2016a): Ground-Motion Prediction Equations for Subduction Interface Earthquakes in Japan Using Site Class and Simple Geometric Attenuation Functions, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.106, pp.1518-1534. <https://doi.org/10.1785/0120150034>

Zhao, J. X., F. Jiang, P. Shi, H. Xing, H. Huang, R. Hou, Y. Zhang, P. Yu, X. Lan, D. A. Rhoades, P. G. Somerville, K. Irikura, and Y. Fukushima (2016b): Ground-Motion Prediction Equations for Subduction Slab Earthquakes in Japan Using Site Class and Simple Geometric Attenuation Functions, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.106, pp.1535-1551. <https://doi.org/10.1785/0120150056>

Zhao, J. X., S. Zhou, J. Zhou, C. Zhao, H. Zhang, Y. Zhang, P. Gao, X. Lan, D. A. Rhoades, Y. Fukushima, P. G. Somerville, and K. Irikura (2016c): Ground-Motion Prediction Equations for Shallow Crustal and Upper-Mantle Earthquakes in Japan Using Site Class and Simple Geometric Attenuation Functions, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.106, pp.1552-1569. <https://doi.org/10.1785/0120150063>

一部の図の作成において GMT (Generic Mapping Tools) を使用した。