

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】

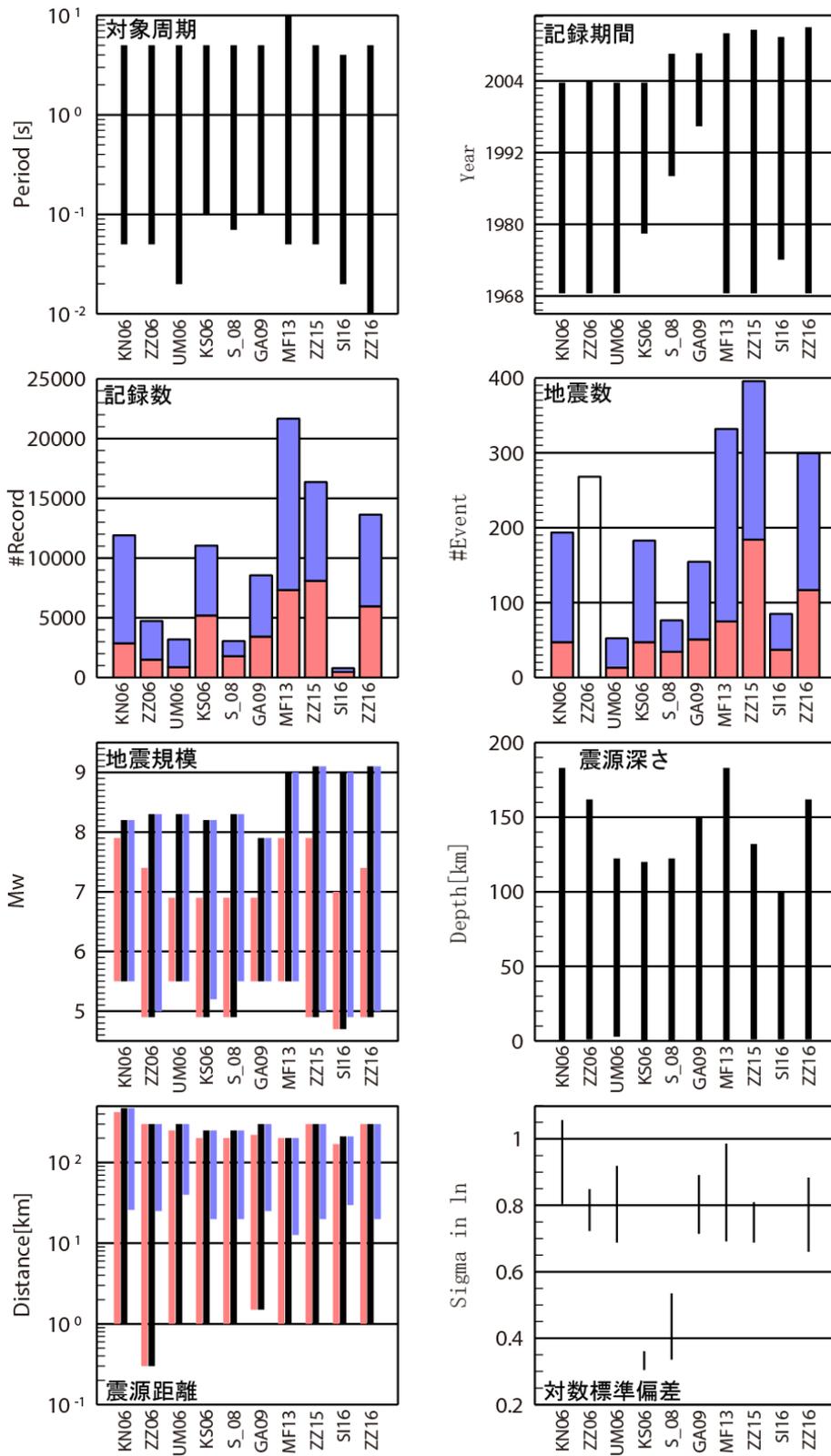
- ・主に日本の観測記録を用いている。
- ・K-NET 設置後に初めて発生した海溝型巨大地震である、2003 年十勝沖地震による強震動記録を含む。
- ・少なくとも周期 0.1～1.0 秒が含まれる。
- ・特定の地震あるいは観測点のみを対象としていない。
- ・査読付き論文として発表されている（期間は当該部分を調査した 2016 年末までとする）。

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。

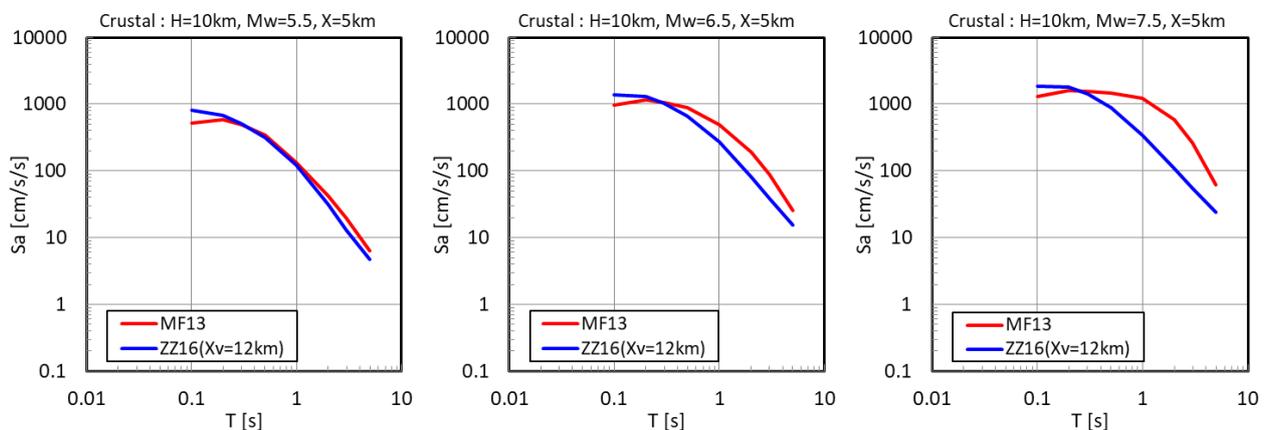


図 3.2-1 地震動予測式による加速度応答スペクトルの比較。地殻内地震を対象。左列は Mw5.5、中列は Mw6.5、右列は Mw7.5 を示す。

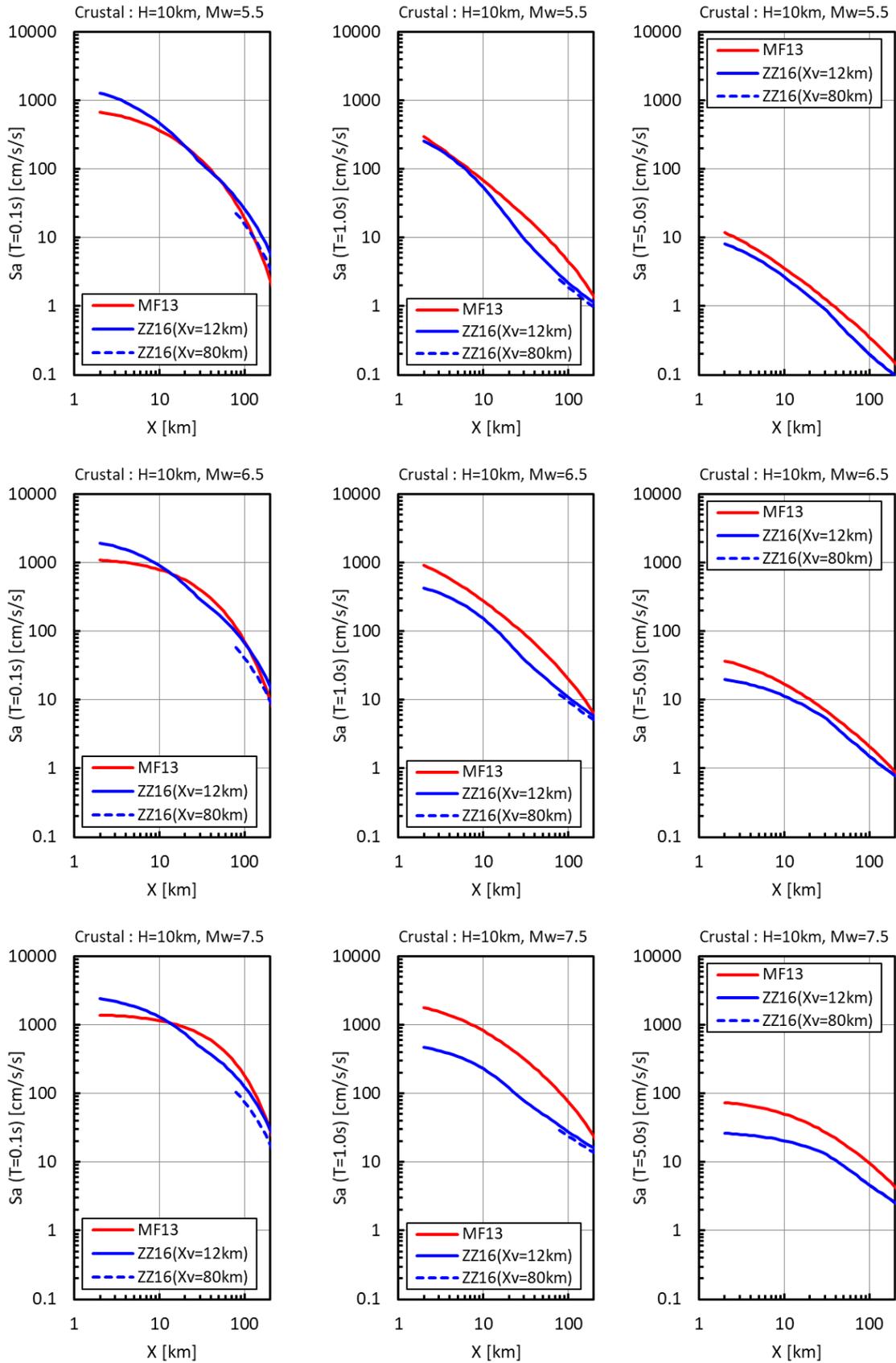


図 3.2-2 地震動予測式の距離減衰特性の比較。地殻内地震を対象。上段は Mw5.5、中段は Mw6.5、下段は Mw7.5 を示す。また、左列は周期 0.1 秒、中列は周期 1.0 秒、右列は周期 5.0 秒を示す。

(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。

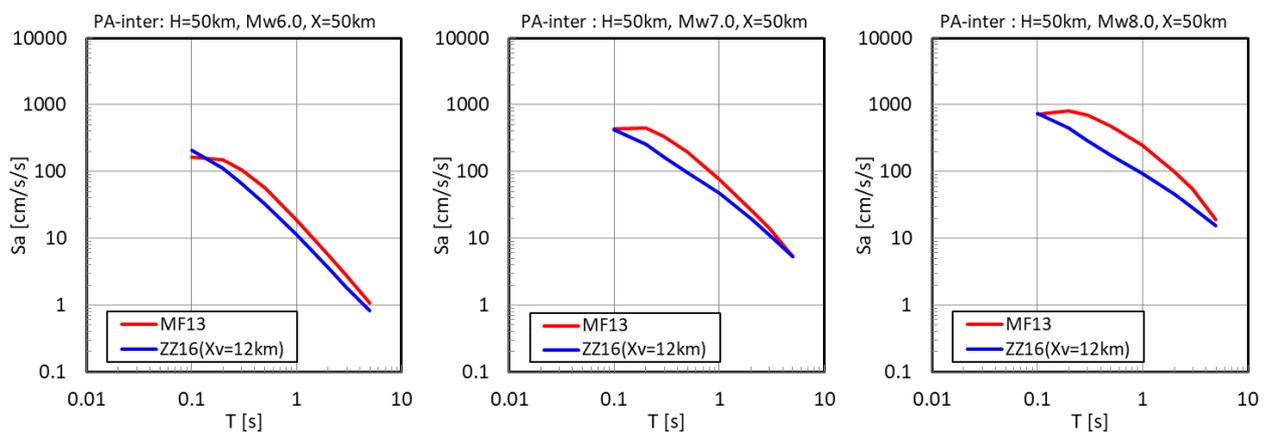


図 3.2-3 地震動予測式による加速度応答スペクトルの比較。太平洋プレートのプレート間地震を想定。左列は Mw6.0、中列は Mw7.0、右列は Mw8.0 を示す。

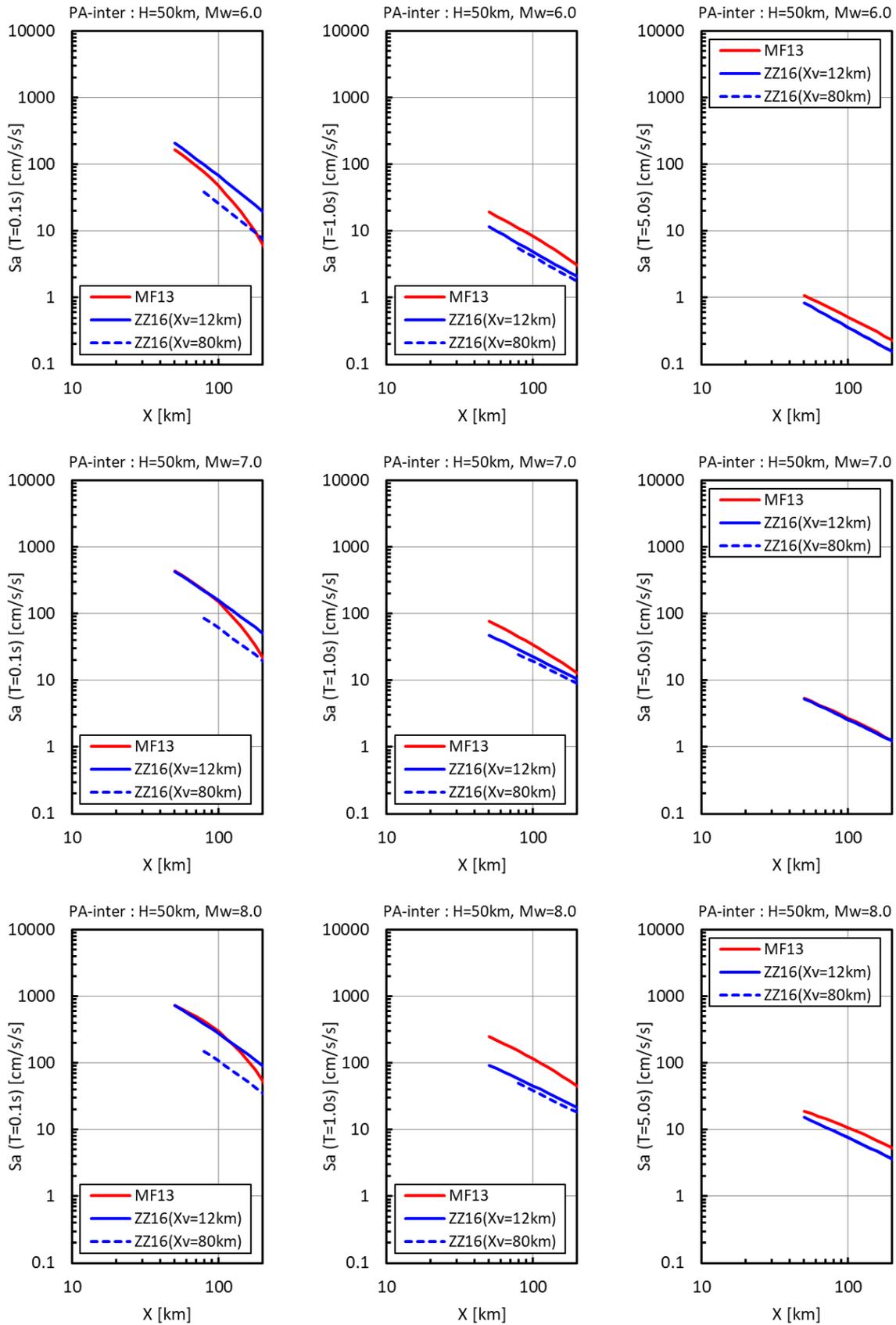


図 3.2-4 地震動予測式の距離減衰特性の比較。太平洋プレートのプレート間地震を想定。上段は Mw6.0、中段は Mw7.0、下段は Mw8.0 を示す。また、左列は周期 0.1 秒、中列は周期 1.0 秒、右列は周期 5.0 秒を示す。

(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。

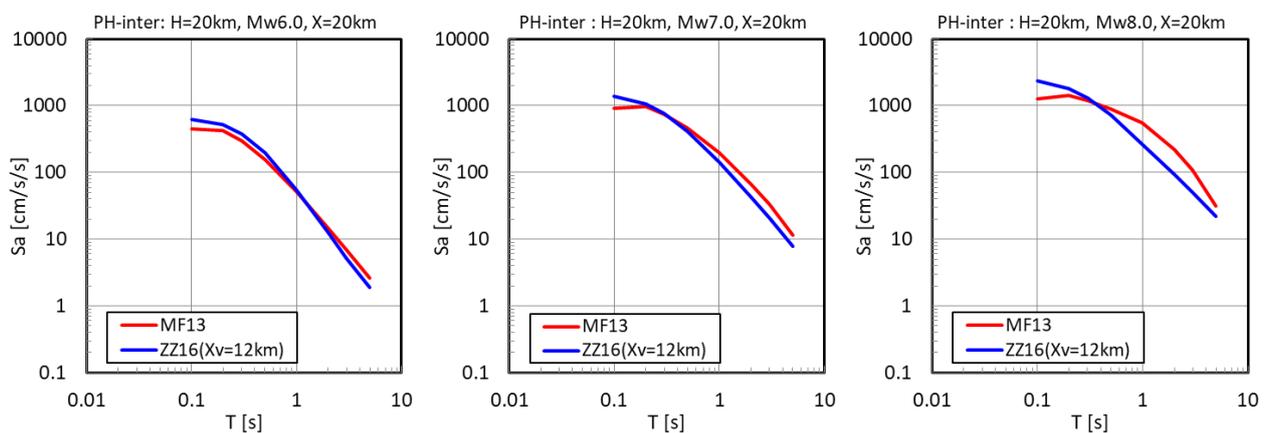


図 3.2-5 地震動予測式による加速度応答スペクトルの比較。フィリピン海プレートのプレート間地震を想定。左列は Mw6.0、中列は Mw7.0、右列は Mw8.0 を示す。

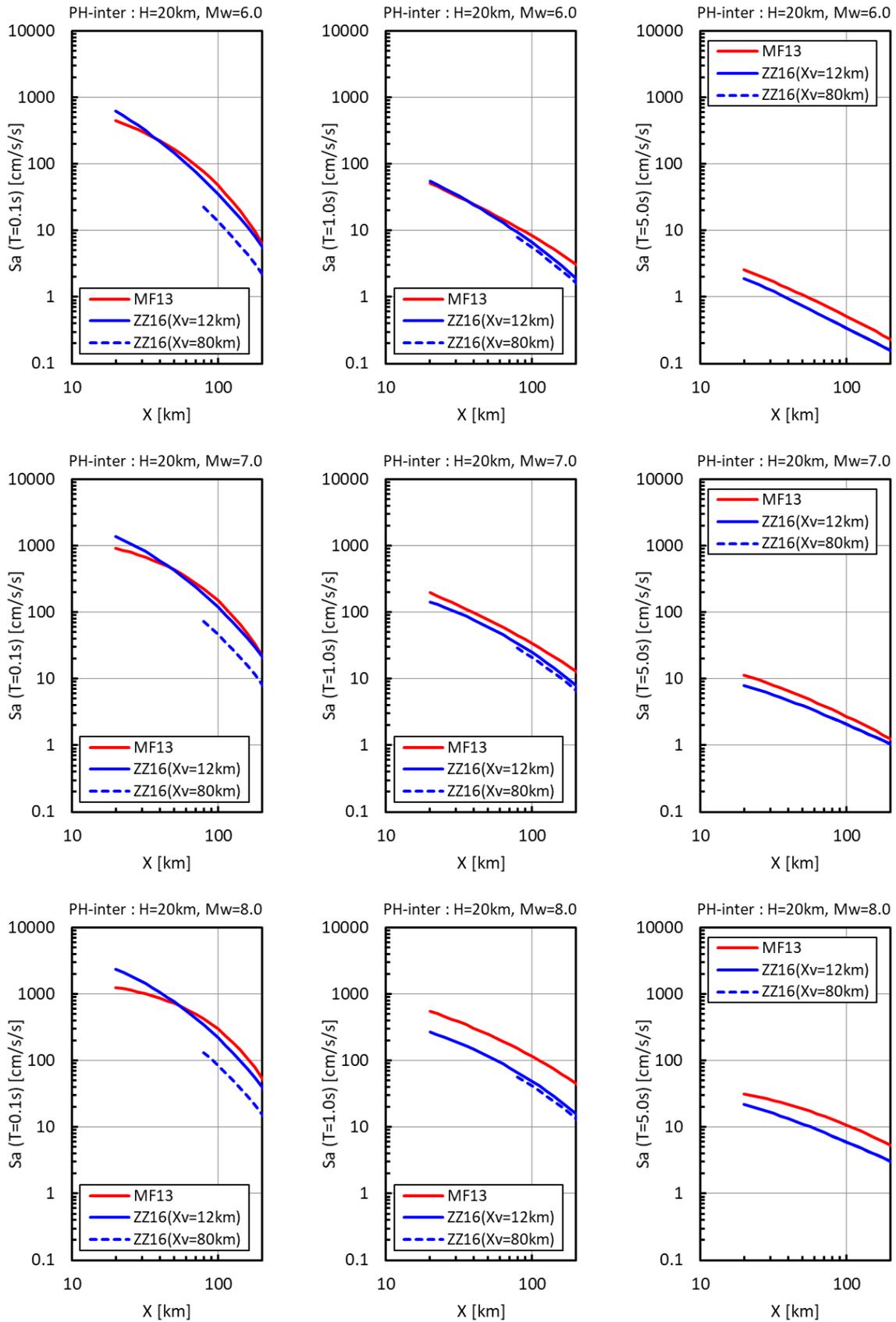


図 3.2-6 地震動予測式の距離減衰特性の比較。フィリピン海プレートのプレート間地震を想定。上段は Mw6.0、中段は Mw7.0、下段は Mw8.0 を示す。また、左列は周期 0.1 秒、中列は周期 1.0 秒、右列は周期 5.0 秒を示す。

(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。

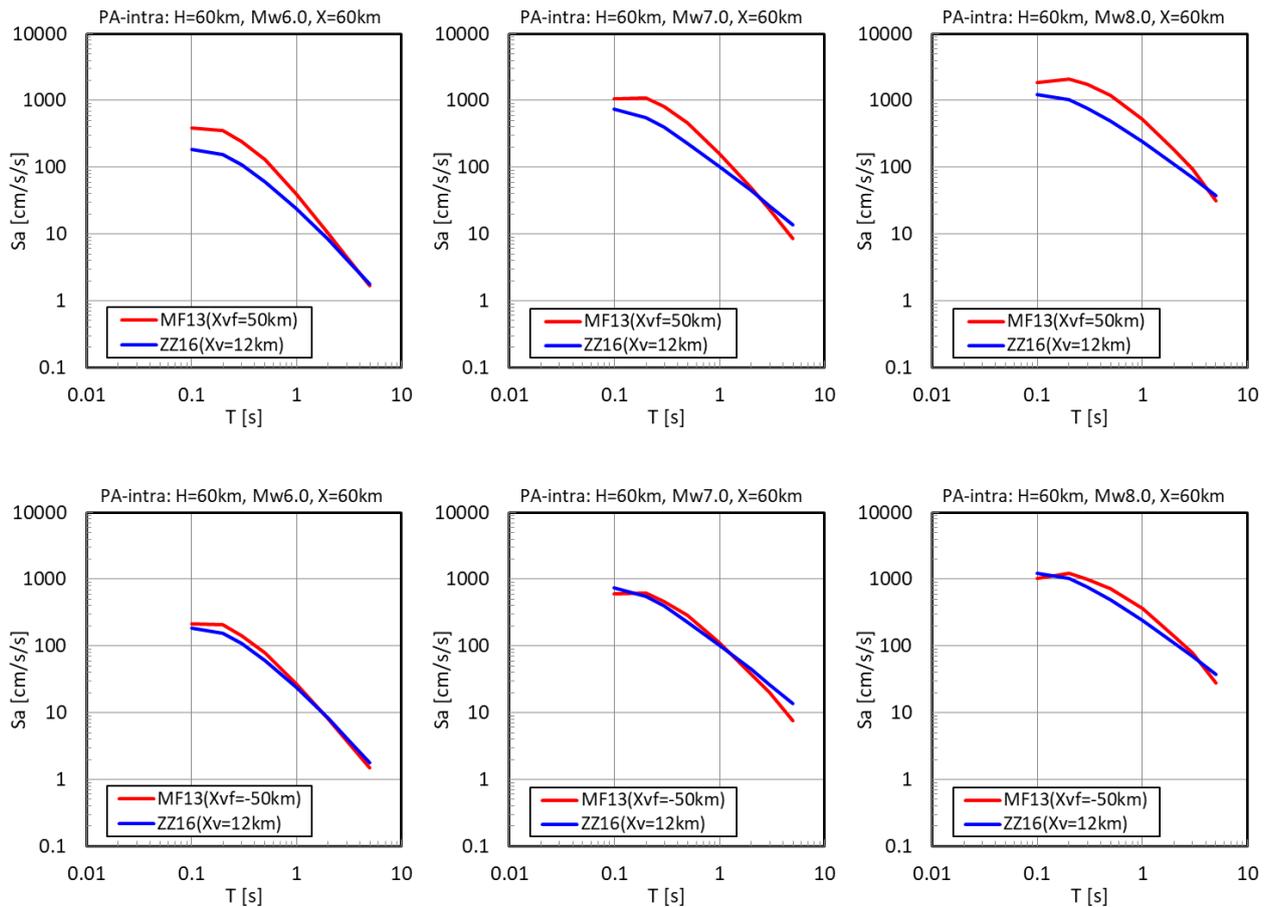


図 3.2-7 地震動予測式による加速度応答スペクトルの比較。太平洋プレートのプレート内地震を想定。【MF13】について、上段は前弧側 ($X_{vf}=50\text{km}$)、下段は背弧側 ($X_{vf}=-50\text{km}$) を示す。また、左列は $M_w6.0$ 、中列は $M_w7.0$ 、右列は $M_w8.0$ を示す。

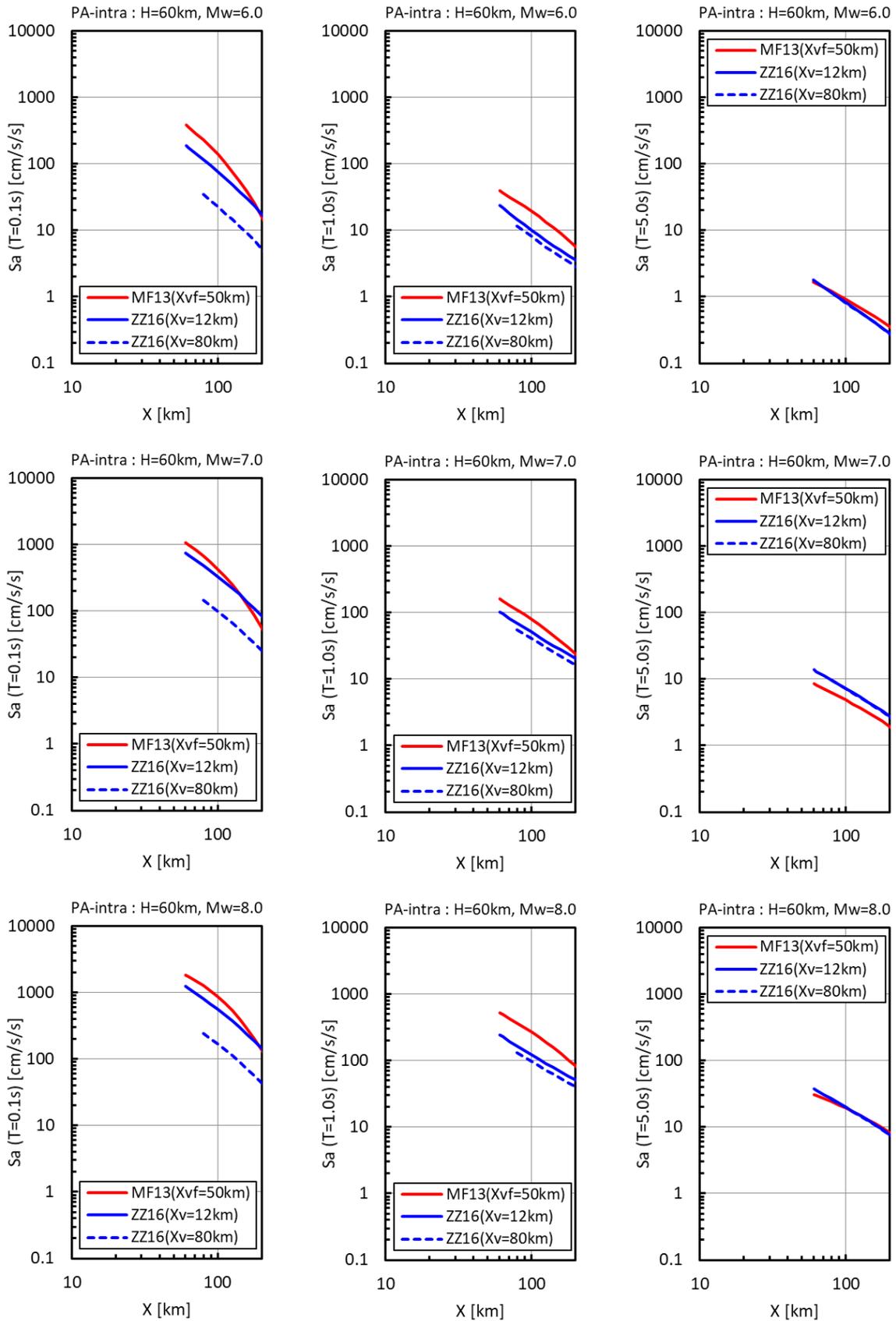


図 3.2-8 地震動予測式の距離減衰特性の比較。太平洋プレートのプレート内地震を想定。【MF13】は前弧側 ($X_{vf}=50\text{km}$)。上段は $M_w=6.0$ 、中段は $M_w=7.0$ 、下段は $M_w=8.0$ を示す。また、左列は周期 0.1 秒、中列は周期 1.0 秒、右列は周期 5.0 秒を示す。

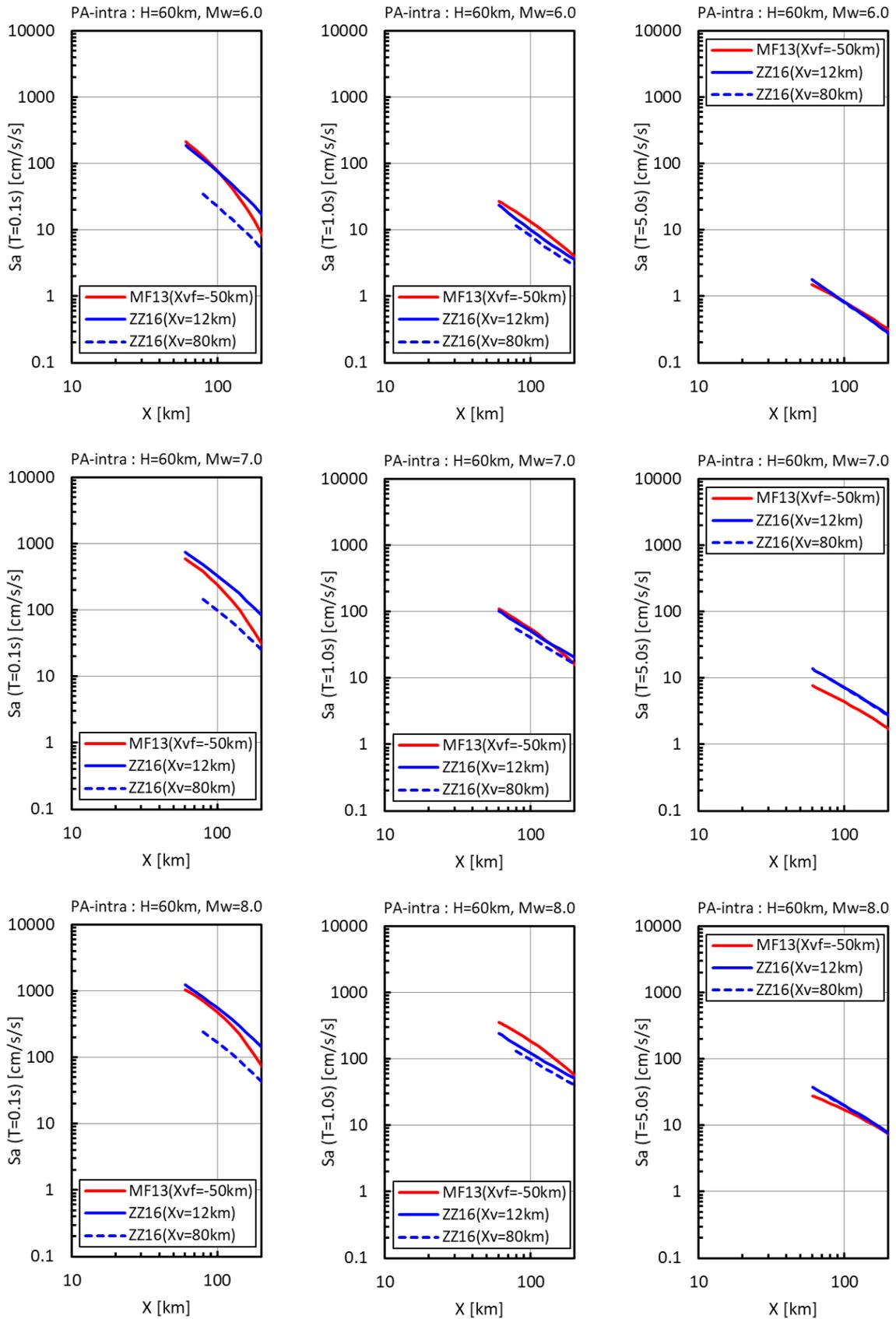


図 3.2-9 地震動予測式の距離減衰特性の比較。太平洋プレートのプレート内地震を想定。【MF13】は背弧側 ($X_{vf}=-50\text{km}$)。上段は Mw6.0、中段は Mw7.0、下段は Mw8.0 を示す。また、左列は周期 0.1 秒、中列は周期 1.0 秒、右列は周期 5.0 秒を示す。

(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 of 地震を想定)

南関東のフィリピン海プレート of 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 of プレート間地震の図 3.2-4 と同様の傾向である。

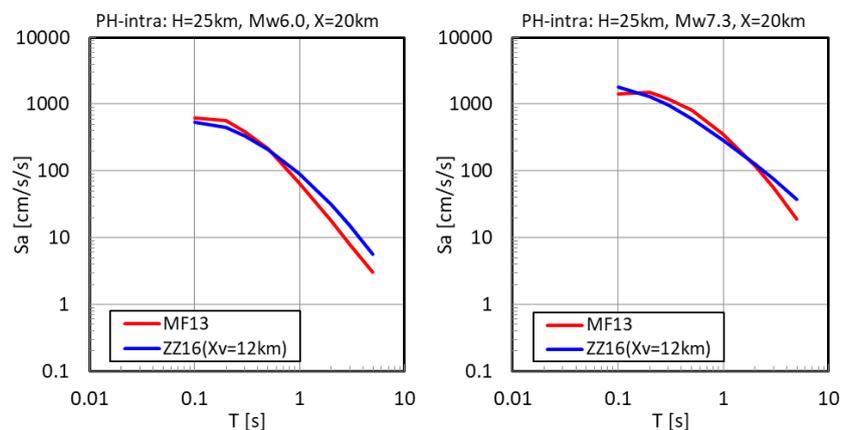


図 3.2-10 地震動予測式による加速度応答スペクトルの比較。南関東のフィリピン海プレート of プレート内地震を想定。左列は Mw6.0、右列は Mw7.3 を示す。

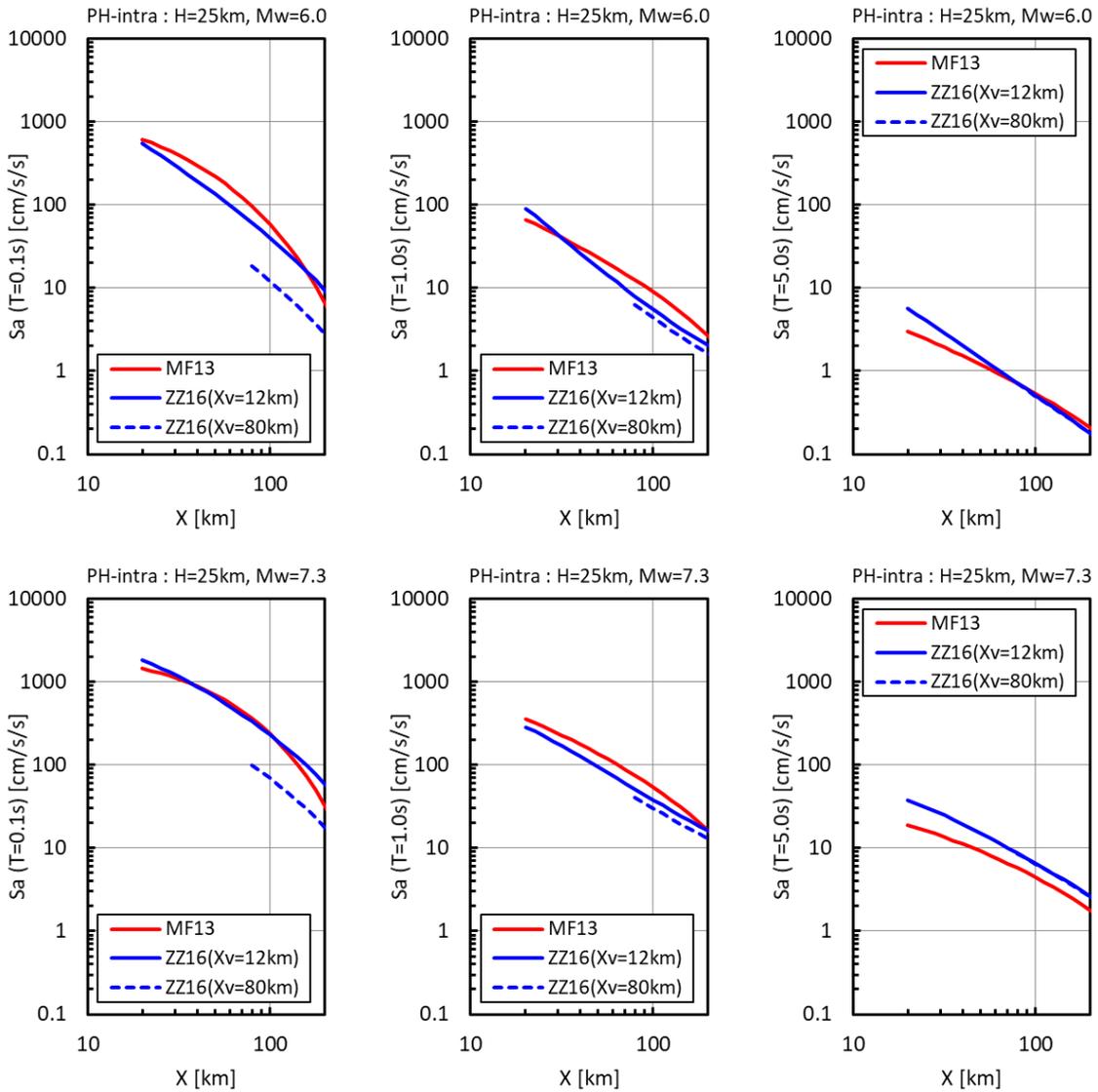


図 3.2-11 地震動予測式の距離減衰特性の比較。南関東のフィリピン海プレートのプレート内地震を想定。上段は $M_w6.0$ 、下段は $M_w7.3$ を示す。また、左列は周期 0.1 秒、中列は周期 1.0 秒、右列は周期 5.0 秒を示す。

(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。

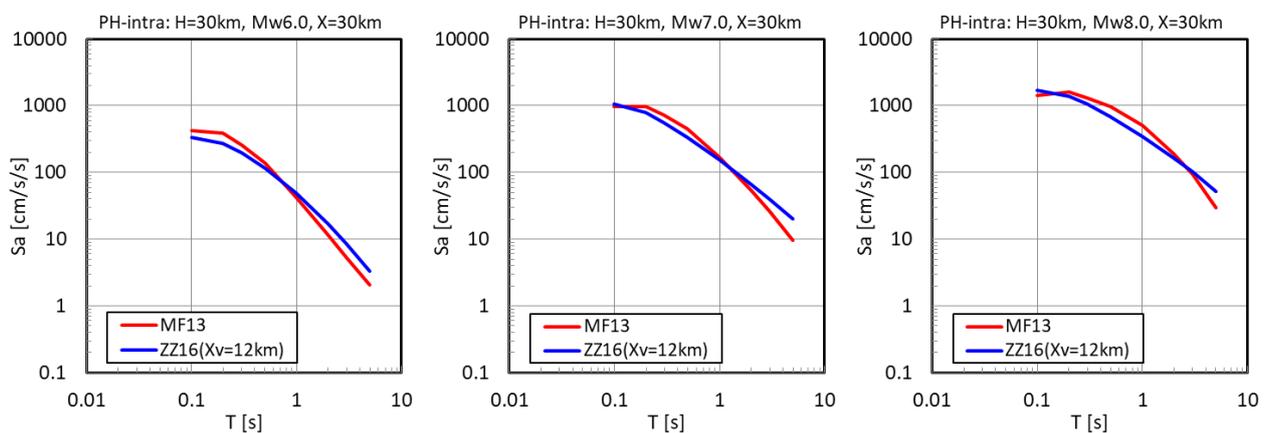


図 3.2-12 地震動予測式による加速度応答スペクトルの比較。南海トラフから南西諸島にかけてのフィリピン海プレートのプレート内地震を想定。左列は $M_w6.0$ 、中列は $M_w7.0$ 、右列は $M_w8.0$ を示す。

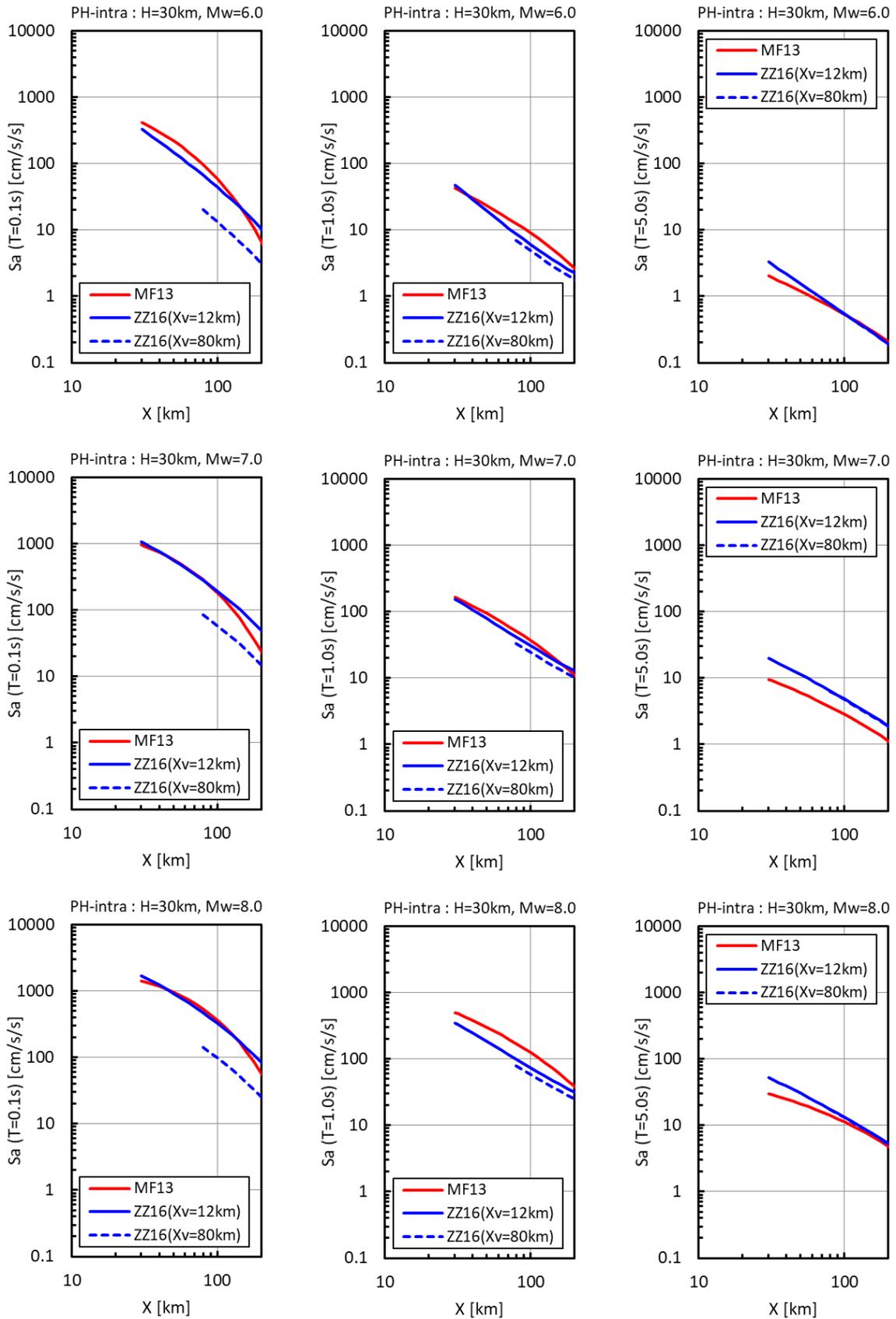


図 3.2-13 地震動予測式の距離減衰特性の比較。南海トラフから南西諸島にかけてのフィリピン海プレートのプレート内地震を想定。上段は M_w 6.0、中段は M_w 7.0、下段は M_w 8.0 を示す。また、左列は周期 0.1 秒、中列は周期 1.0 秒、右列は周期 5.0 秒を示す。

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。

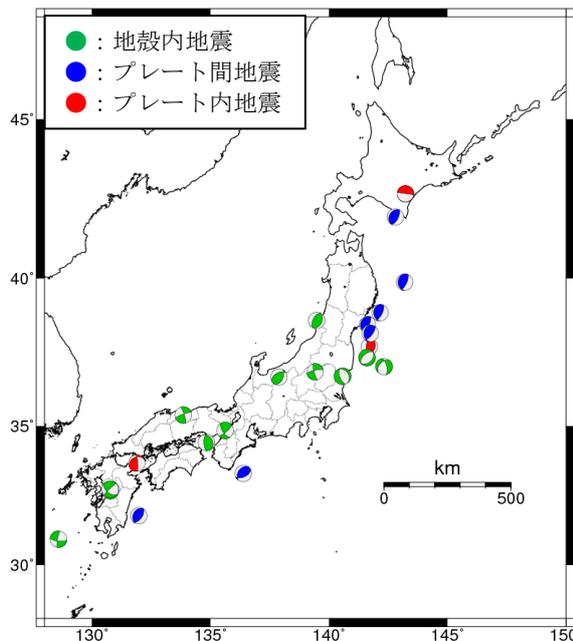


図 3.2-14 残差の検討に用いた地震の震央位置

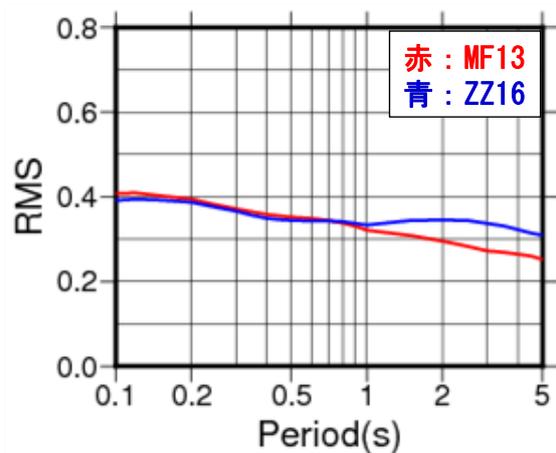


図 3.2-15 予測値と観測値の残差の比較

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。