

付録2 近年の地震に対する地震動予測式の評価結果

1. はじめに

応答スペクトルに関する地震動予測式の選定にあたり、Morikawa and Fujiwara (2013) 及び Zhao et al. (2016a, b, c) の2種の地震動予測式について、これらの式構築に使用されていない2013年以降の地震に適用し、式の説明性を確認した。ここではその結果をまとめる。

2. 検討対象地震

検討対象とした地震は、地殻内地震13地震(M_w 5.5~7.1)、プレート間地震7地震(M_w 5.8~7.0)、プレート内地震3地震(M_w 6.3~7.1)の計23地震である。地震分布と防災科学技術研究所のF-netによるメカニズム解を付図2.2-1に示す。また震源パラメータを付表2.2-1、付表2.2-2、付表2.2-3に示す。地殻内地震は震源深さがすべて17km以浅である。プレート内地震の3地震のうち2地震が太平洋プレート、1地震がフィリピン海プレートの地震であり、震源深さはいずれも50km以深である。

防災科学技術研究所のK-NET及びKiK-netの地表観測記録のうち、以下の条件を満たす記録を使用した。

- ・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以内の記録
- ・波形のペーストアップよりS波主要動の確認が得られる記録

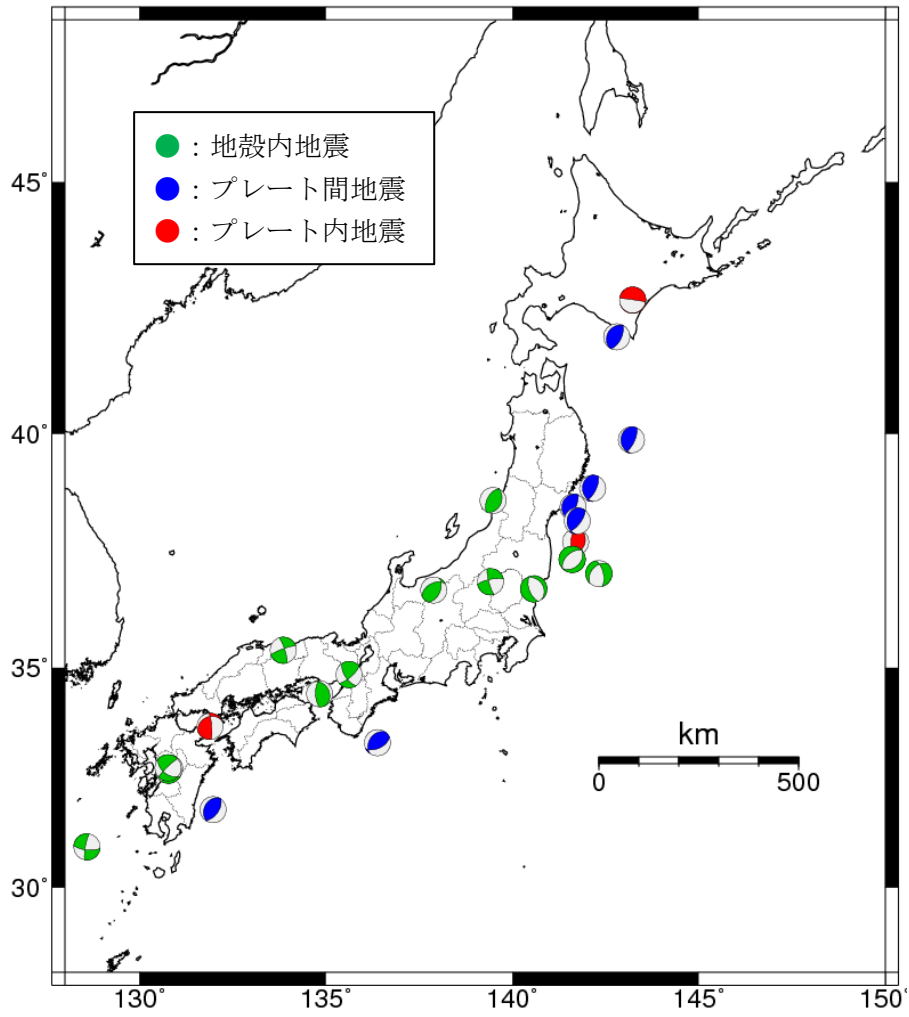
解析対象として使用可能な記録は、地殻内地震は2921記録、プレート間地震は1019記録、プレート内地震は548記録であった。

断層最短距離の計算に必要な断層モデルは以下の手順により設定した。

- ・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)に基づいて地震モーメントから断層面積を算出
- ・F-netのメカニズム解のうちプレート境界面や余震分布と調和的な面を採用
- ・震源位置(深さはF-netのセントロイド深さ)を中心とする正方形の断層面を設定

地殻内地震については、通常、地震発生層内に断層が収まることから、断層幅が地震発生層(ここでは簡便に原則2~15kmとした)を貫く場合は、断層幅を地震発生層内に収まる幅に固定して長さ方向を調整した。また、2016年熊本地震の本震については、断層面を1面でモデル化する方法を使用すると日奈久断層帯近傍の観測点で断層最短距離が実際から大きくはずれる設定になってしまうため、Asano and Iwata (2016)の断層モデルを採用した。

プレート間地震とプレート内地震については、地殻内地震のように断層幅方向の上限は設けなかった。なお、既往の震源インバージョン結果を別途参照し、断層面が正方形(アスペクト比1)から極端に乖離する地震は本検討の対象地震にないことを確認した。



付図 2.2-1 検討対象とした 23 地震 (メカニズム解は F-net による)

付表 2.2-1 本検討で対象とした地殻内地震

No.	気象庁の震源情報				F-net の CMT 解		断層モデル									検討対象
	発震時刻	震央地名	緯度 (deg.)	経度 (deg.)	深さ (km)	M_w	地震タイプ	断層タイプ*1	走向 (deg.)	傾斜 (deg.)	面積 (km ²)	上端深さ (km)*2	下端深さ (km)*2	幅 (km)	長さ (km)	記録数
1	2013/02/25-16:23	栃木県北部	36.874	139.413	8	5.8	地殻内	SS	165	80	70	4	12	8	8	267
2	2013/04/13-05:33	淡路島付近	34.419	134.829	11	5.8	地殻内	RV	179	65	69	7	15	8	8	300
3	2014/07/12-04:22	福島県沖	37.050	142.321	5	6.5	地殻内	NM	346	63	325	2	15	15	22	79
4	2014/11/22-22:08	長野県北部	36.693	137.891	5	6.3	地殻内	RV	25	50	204	2	13	14	14	327
5	2015/11/14-05:51	薩摩半島西方沖	30.943	128.590	17	6.8	地殻内	SS	190	80	546	2	15	13	41	37
6	2016/04/14-21:26	熊本地震 (前震)	32.742	130.809	17	6.1	地殻内	SS	212	89	150	3	15	12	12	224
7	2016/04/15-00:03	熊本地震 (余震)	32.701	130.778	8	6.0	地殻内	SS	211	86	108	3	13	10	10	211
8	2016/04/16-01:25	熊本地震 (本震) *3	32.755	130.763	11	7.1	地殻内	SS	205	72	252	2	19	18	14	245
									235	65	504	2	18	18	28	
9	2016/10/21-14:07	鳥取県中部	35.381	133.856	8	6.2	地殻内	SS	342	80	177	2	15	13	13	251
10	2016/11/22-05:59	福島県沖	37.355	141.604	11	7.0	地殻内	NM	47	38	790	2	15	21	37	195
11	2016/12/28-21:38	茨城県北部	36.720	140.574	5	5.9	地殻内	NM	160	62	96	2	11	10	10	269
12	2018/06/18-07:58	大阪府北部	34.844	135.622	11	5.5	地殻内	SS	49	73	39	8	14	6	6	308
13	2019/06/18-22:22	山形県沖	38.608	139.479	11	6.4	地殻内	RV	23	36	266	5	15	16	16	208

*1 SS:横ずれ断層、RV:逆断層、NM:正断層

*2 斜字体は地震発生層 (本検討では簡便に一律 2~15km とした) を考慮して調整をした

*3 Asano and Iwata(2016)による震源インバージョン解析に用いられた断層モデルを参照した

付表 2.2-2 本検討で対象としたプレート間地震

No.	気象庁の震源情報				F-net の CMT 解		断層モデル										検討対象 記録数
	発震時刻	震央地名	緯度 (deg.)	経度 (deg.)	深さ (km)	M_w	地震タイプ	プレート*1	断層タイプ*2	走向 (deg.)	傾斜 (deg.)	面積 (km ²)	上端深さ (km)	下端深さ (km)	幅 (km)	長さ (km)	
1	2015/02/17-08:06	三陸沖	39.872	143.193	17	6.7	プレート間	PAC	RV	181	22	485	13	21	22	22	78
2	2015/05/13-06:12	宮城県沖	38.863	142.150	44	6.8	プレート間	PAC	RV	178	25	982	37	51	31	31	162
3	2016/01/14-12:25	浦河沖	41.970	142.801	56	6.7	プレート間	PAC	RV	211	28	728	50	62	27	27	160
4	2016/04/01-11:39	三重県南東沖	33.323	136.383	14	5.8	プレート間	PHL	RV	215	38	92	11	17	10	10	110
5	2019/05/10-08:48	日向灘	31.801	131.975	26	6.2	プレート間	PHL	RV	208	33	247	22	30	16	16	157
6	2021/03/20-18:09	宮城県沖	38.468	141.628	62	7.0	プレート間	PAC	RV	192	17	1473	56	68	38	38	184
7	2021/05/01-10:27	宮城県沖	38.174	141.740	56	6.7	プレート間	PAC	RV	185	24	892	50	62	30	30	168

*1 PAC : 太平洋プレート、PHL フィリピン海プレート

*2 SS : 横ずれ断層、RV : 逆断層、NM : 正断層

付表 2.2-3 本検討で対象としたプレート内地震

No.	気象庁の震源情報				F-net の CMT 解		断層モデル										検討対象 記録数
	発震時刻	震央地名	緯度 (deg.)	経度 (deg.)	深さ (km)	M_w	地震タイプ	プレート*1	断層タイプ*2	走向 (deg.)	傾斜 (deg.)	面積 (km ²)	上端深さ (km)	下端深さ (km)	幅 (km)	長さ (km)	
1	2013/02/02-23:17	十勝地方南部	42.702	143.228	116	6.9	プレート内	PAC	NM	72	3	454	115	117	21	21	149
2	2014/03/14-02:06	伊予灘	33.692	131.891	83	6.3	プレート内	PHL	RV	355	79	105	78	88	10	10	230
3	2021/02/13-23:07	福島県沖	37.729	141.699	53	7.1	プレート内	PAC	RV	25	32	606	46	60	25	25	169

*1 PAC : 太平洋プレート、PHL フィリピン海プレート

*2 SS : 横ずれ断層、RV : 逆断層、NM : 正断層

3. 検討対象の地震動予測式

検討対象の Morikawa and Fujiwara (2013) (以下、【MF13】)、Zhao et al. (2016a, b, c) (以下、【ZZ16】) の概要と適用条件は以下の通りである (付表 2.3-1 参照)。なお、地震動予測式の対象は【MF13】が水平 2 成分の時刻歴応答のベクトル和、【ZZ16】が水平 2 成分の最大応答の幾何平均であり、比較のため、観測記録からも 2 種類の値を計算した。

付表 2.3-1 各地震動予測式の概要と本検討での適用条件

		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 ※付録 2 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 ※付録 2 では考慮しない	—
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	【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
	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 ※付録 2 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)	—

3.1 【MF13】式の概要と適用条件

【MF13】は、震源特性をモーメントマグニチュード M_w の2次関数でモデル化している Model1 とバイリニア型でモデル化している Model2 を提案している。ここでは(1)式に示される Model1 を使用した。

$$\begin{aligned} \log_{10} pre &= a \cdot (M_w' - 16.0)^2 + c + b \cdot \Delta - \log_{10}(\Delta + d \cdot 10^{0.5M_w'}) + AI + G_d + G_s \\ M_w' &= \min[M_w, 8.2] \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 pre は減衰定数 5%の加速度応答スペクトル(cm/s^2)であり、水平 2 成分の時刻歴応答のベクトル和により計算される。 M_w はモーメントマグニチュード、 Δ は断層最短距離(km)である。 a, b, c, d は回帰係数であり、 b, c は地震タイプ（地殻内、プレート間、プレート内）ごとに推定されている。なお、断層タイプによる区別は行われていない。 AI は異常震域の補正項、 G_d は深部地盤の補正項、 G_s は浅部地盤の補正項であり次式で表される。

$$AI = \gamma \cdot X_{vf} \cdot (\max[H, 30] - 30) \quad (2)$$

$$G_d = p_d \cdot \log_{10}(\max[D_{l_{min}}, D_{1400}]/D_0) \quad (3)$$

$$G_s = p_s \cdot \log_{10}(\min[V_{S_{max}}, AVS30]/V_0) \quad (4)$$

(2)式の X_{vf} は火山フロントからの距離(km)、 H は震源深さ(km)、 γ は回帰係数である。(3)式の D_{1400} はS波速度が1,400m/sとなる層の上面深度(m)、 $p_d, D_{l_{min}}$ は $D_0 = 250.0$ としたときの回帰係数である。また、(4)式の $AVS30$ は地表からの30mの平均S波速度(m/s)であり、 $p_s, V_{S_{max}}$ は $V_0 = 350.0$ としたときの回帰係数である。

森川・藤原（2015）は、フィリピン海プレート内地震について、地震動強さの震源深さ依存性やプレートによる違いを考慮するために補正項を提案している。ただし、使用した太平洋プレートの地震は50km以深が多いのに対してフィリピン海プレートの地震は50km以浅の地震が多いことから、森川・藤原（2015）は震源深さ依存性やプレートによる違いの影響を分離することは困難であると指摘している。本検討で対象のフィリピン海プレート内地震は2014年3月14日の伊予灘の地震のみであり、震源深さは83kmである。つまり、フィリピン海プレート内地震としてはやや深い地震である。また、藤原・他（2015）ではこのフィリピン海プレート内地震に対する補正項が適用されていない。さらに、実際に2014年3月14日の伊予灘の地震に補正項を適用すると、適用しない場合に比べて残差のRMSが0.1程度大きくなることが確認された。そのため、本検討ではフィリピン海プレート内地震の補正項は適用しないこととした。

【MF13】では、減衰特性のモデル化として近距離の頭打ちと異常震域の補正項が提案されている。文献にならい、火山フロント（藤原・他、2015）からの距離を用いて震源深さ30km以深の地震に異常震域補正項を適用した。異常震域補正項を適用した地震は、プレート間地震の一部の地震とプレート内地震である。今回検討した地殻内地震は全て30km以浅であるため、地殻内地震についてはこの補正項は適用していない（付表2.2-1参照）。

サイト特性については、 $AVS30$ と D_{1400} を用いたモデル化がされている。これらの影響について

は、深部地盤に関する補正項と浅部地盤に関する補正項(G_d, G_s)を同時に導出した森川・藤原(2014)の係数を適用した。また、 D_{1400} には防災科学技術研究所のJ-SHISv3.2の値を使用した。

3.2 【ZZ16】式の概要と適用条件

【ZZ16】は、地震タイプごとに別々の文献(Zhao et al, 2016a, b, c)になっており、式形が少しずつ異なる。地殻内地震、プレート間地震、プレート内地震に対する式はそれぞれ(5)、(6)、(7)式の通りである(サフィックスの”cr”、”int”、”sl”はそれぞれ、地殻内地震、プレート間地震、プレート内地震を表す)。

$$\begin{aligned} & \log_e pre_{cr} \\ & = f_{cr} + g_{cr} \cdot \log_e r_{cr} + g_{crL} \cdot \log_e(\Delta + 200) + g_N(\Delta) + e_{cr} \cdot \Delta + e_{cr}^{vz} \cdot x^{vz} + \gamma_{cr} + \log_e A_{cr} \\ f_{cr} & = b_{cr} \cdot h + F_{crN} + \begin{cases} c_{cr} \cdot M_w & (M_w \leq m_c) \\ c_{cr} \cdot m_c + d_{cr} \cdot (M_w - m_c) & (M_w > m_c) \end{cases} \quad (5) \\ g_N & = g_{crN} \cdot \log_e(\min[\Delta, 30.0] + \exp(c_1 + 6.5c_2)) \\ r_{cr} & = x_{cr0} + \Delta + \exp(c_1 + c_2 \cdot \min[M_w, C_{max}]) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \log_e pre_{int} \\ & = f_{int} + g_{int} \cdot \log_e r_{int} + g_{intL} \cdot \log_e(\Delta + 200) + e_{ints} \cdot \Delta + e_{int}^{vz} \cdot x^{vz} + \gamma_{int} + \log_e A_{int} \\ f_{int} & = b_{int} \cdot h + \gamma_{ints} + \begin{cases} c_{int} \cdot M_w & (M_w \leq m_c) \\ c_{int} \cdot m_c + d_{int} \cdot (M_w - m_c) & (M_w > m_c) \end{cases} \quad (6) \\ r_{int} & = x_{int0} + \Delta + \exp(c_1 + c_2 \cdot \min[M_w, C_{max}]) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \log_e pre_{sl} \\ & = f_{sl} + g_{sl} \cdot \log_e r_{sl} + g_{slL} \cdot \log_e(\Delta + 200) + e_{sl} \cdot \Delta + q_{sl} \cdot \Delta + e_{sl}^{vz} \cdot x^{vz} + \gamma_{sl} + \log_e A_{sl} \\ f_{sl} & = b_{sl} \cdot h + \begin{cases} c_{sl1} \cdot M_w + c_{sl2} \cdot (M_w - m_{sc})^2 & (M_w \leq m_c) \\ c_{sl1} \cdot m_c + c_{sl2} \cdot (m_c - m_{sc})^2 + d_{sl} \cdot (M_w - m_c) & (M_w > m_c) \end{cases} \quad (7) \\ q_{sl} & = e_{slh} \cdot \begin{cases} 0.0 & (h < 50) \\ 0.02h - 1.0 & (h \geq 50) \end{cases} \\ r_{sl} & = \Delta + \exp(c_1 + c_2 \cdot \min[M_w, C_{max}]) \end{aligned}$$

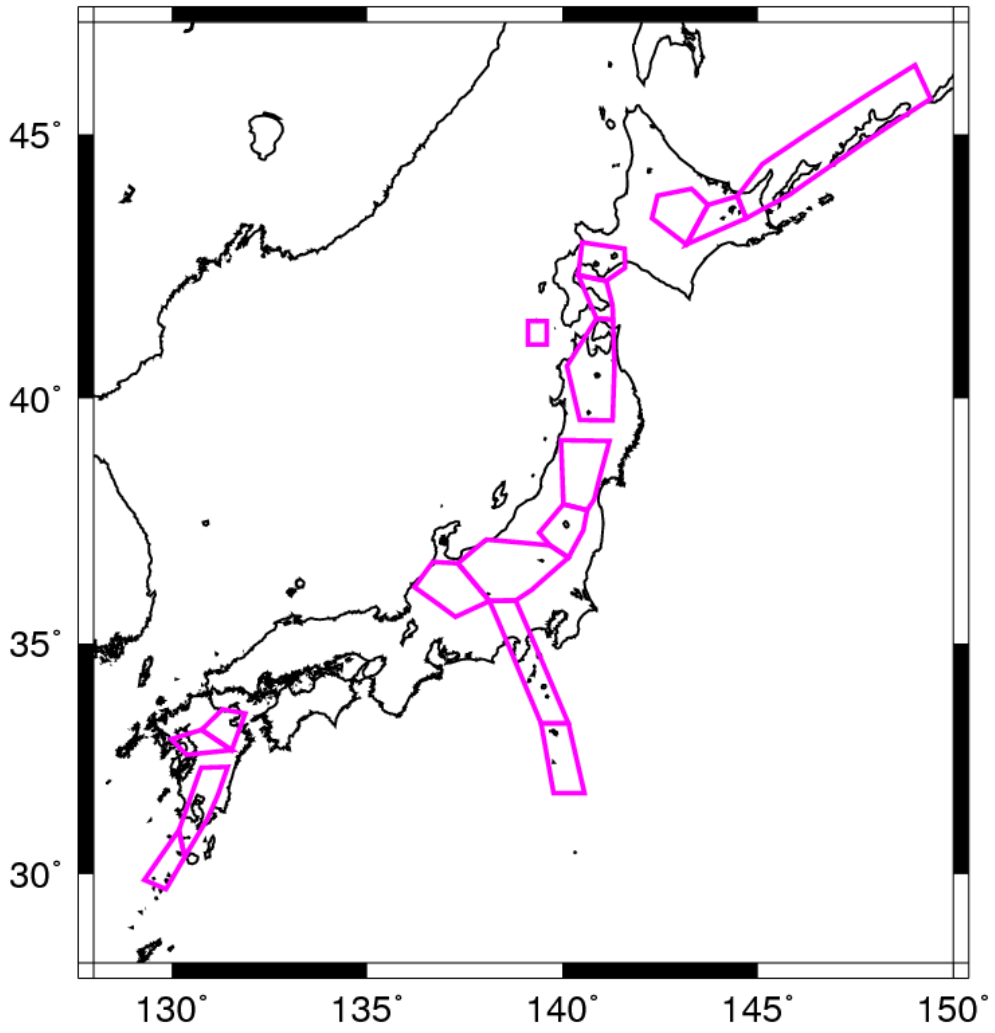
ここで、 pre は減衰定数 5%の加速度応答スペクトル(cm/s^2)であり、水平2成分の応答の最大値の幾何平均より算出される。 M_w はモーメントマグニチュード、 h は断層面の上端深さ(km)、 Δ は断層最短距離(km)、 x^{vz} は火山帯の通過距離(km)、 A は地盤種別サイト特性である。 $b, c, c_1, c_2, d, e, e^{vz}, g, g_L, \gamma$ は地震タイプごとに回帰もしくは設定される係数である。地殻内地震の(5)式では F_{crN}, g_{crN} 、プレート間地震の(6)式では e_{ints}, γ_{ints} 、プレート内地震の(7)式では e_{slh} も回帰係数である。なお、地殻内地震の(5)式の F_{crN} は正断層の場合に値を持つ。また、プレート間地震の(6)式では c_{int}, g_{intL} が震源深さ 25kmを境に値が異なり、 e_{ints}, γ_{ints} は震源深さが 25kmより浅い場合に値を持つ。論文にならい、 $x_{cr0} = 2.0, x_{int0} = 10.0, m_c = C_{max} = 7.1, m_{sc} = 6.3$ とした。

【ZZ16】で使われる「火山帯を通過する距離 x^{vz} 」に関する補正項は、震源深さに依らず、地殻内地震、プレート間地震、プレート内地震の全地震タイプに対して適用される。本検討では Zhao et al. (2016c) に掲載されている火山帯位置図に基づき、震央から観測点までの火山帯を通過する部分の距離を 1km 単位で求め、補正を行った（付図 2.3-1 参照）。文献にならい、 $x^{vz} < 12\text{km}$ では 12km、 $x^{vz} > 80\text{km}$ では 80km として補正項の計算をした。

サイト特性 A については、4種の地盤種に対する係数が与えられている。本検討では、S波速度から計算した AVS30 を基に付表 2.3-2 に対応する地盤種を設定し、それぞれの地盤種に対する係数を適用した。【ZZ16】では非線形応答の補正項も検討されているが、本検討では工学的基盤での応答スペクトルに関する地震動予測式を念頭に置いているため、非線形性については考慮しないこととした。

付表 2.3-2 Zhao et al. (2016b) による地盤種定義

Site class	Description	Natural period	AVS30 calculated from site period
SC I	Rock	$T < 0.2 \text{ s}$	$AVS30 > 600$
SC II	Hard soil	$0.2 \leq T < 0.4 \text{ s}$	$300 < AVS30 \leq 600$
SC III	Medium soil	$0.4 \leq T < 0.6 \text{ s}$	$200 < AVS30 \leq 300$
SC IV	Soft soil	$T \geq 0.6 \text{ s}$	$AVS30 \leq 200$



付図 2.3-1 Zhao et al. (2016c) による火山帯位置

4. 観測応答スペクトルと地震動予測式の残差と RMS

観測値 (*Obs*) と推定値 (*Pre*) との残差について周期ごとに RMS を算出し、補正項による残差の変化、地震動予測式による違いを確認した。計算対象周期は、【MF13】と【ZZ16】で共通して回帰係数が計算され、かつ、地震動予測地図で対象となっている 23 周期 (0.1, 0.12, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0 秒) とした。RMS は下の式により算出した。

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum \{\log_{10}(Obs/Pre)\}^2}{n}}$$

4.1 残差の周期依存性

算出により得られた全地震に対する RMS を、横軸を周期にして付図 2.4-1 に示す。(a)は全地震に対する結果、(b)、(c)、(d)はそれぞれ地殻内地震、プレート間地震、プレート内地震に対する結果である。各組の左図が観測値と【MF13】による推定値との残差の RMS であり、観測値に補正を行わなかった場合 (火山フロントからの距離 x_{vf} を 0km、 D_{1400} を 300m、AVS30 を 350m/s としして計算した推定値とオリジナルの観測値との残差) を黒線で、観測値に異常震域の補正を行った場合 (火山フロントからの距離は各観測点での値を用い、 D_{1400} を 300m、AVS30 を 350m/s としして計算した推定値と、オリジナルの観測値との残差) を緑線で、観測値に異常震域と深部地盤の補正を行った場合 (火山フロントからの距離と D_{1400} は各観測点での値を用い、AVS30 を 350m/s としして計算した推定値と、オリジナルの観測値との残差) を青線で、観測値に全ての補正を行った場合 (各観測点での火山フロントからの距離、 D_{1400} 、AVS30 の値を用いて計算した推定値と、オリジナルの観測値との残差) を赤線で示す。残差の RMS は、異常震域の補正項を考慮すると短周期でやや小さくなること、深部地盤の補正項を考慮すると長周期側で明瞭に小さくなること、浅部地盤の補正項を考慮すると中間の周期帯で小さくなることが確認できる。各組の中央図は観測値と【ZZ16】の推定値との残差の RMS であり、観測値に補正を行わなかった場合を黒線 (火山帯通過距離 x^{vz} を 0km¹、AVS30 を 350m/s としして計算した推定値とオリジナルの観測値との残差) で、火山帯通過距離の補正を行った場合 (火山帯通過距離は各観測点での値、AVS30 を 350m/s としして計算した推定値とオリジナルの観測値との残差) を緑線で、火山帯通過距離と浅部地盤の補正項を行った場合 (火山帯通過距離と AVS30 に各観測点での値を用いて計算した推定値とオリジナルの観測値との残差) を赤線で示す。残差の RMS は、火山帯通過距離の補正項を考慮すると短周期側で明瞭に小さくなり、浅部地盤の補正項を考慮すると 1.0 秒付近を中心に小さくなることが確認できる。

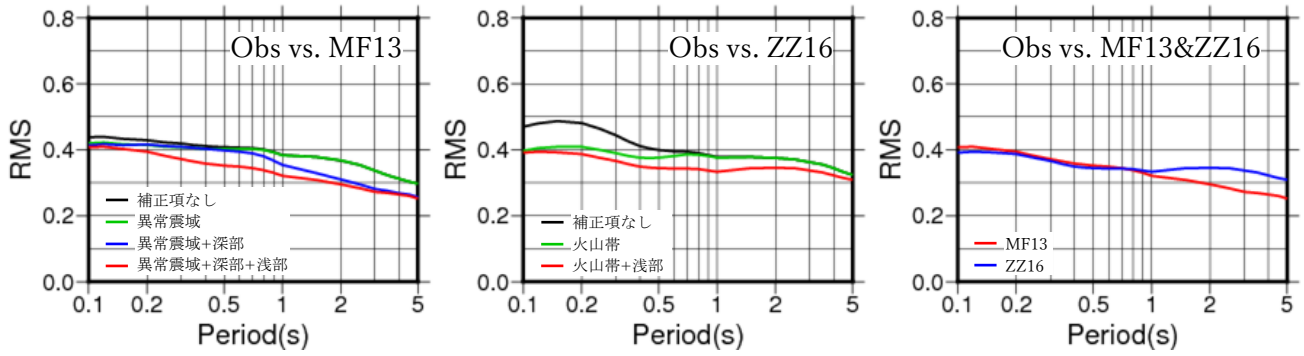
これらの二枚の図の赤線を一枚にまとめたものが各組の右図である。全地震の RMS ((a)の右図)で見ると、1.0 秒より短周期側では両者の残差は同程度であるが、1.0 秒より長周期側では【MF13】

¹ 【ZZ16】では、火山帯通過距離の最小値、最大値をそれぞれ 12km、80km と定めている。火山帯通過距離の補正を行わない場合は、計算上、 $x^{vz}=12\text{km}$ とし扱われる。

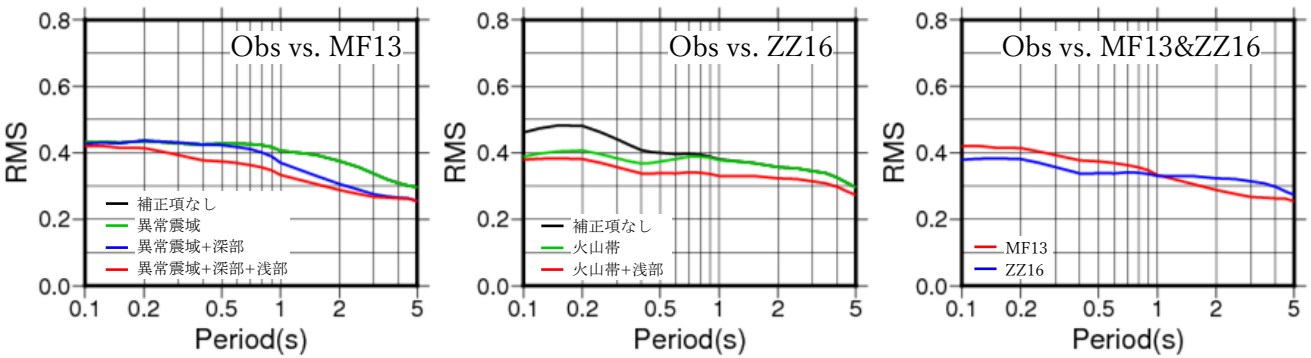
(赤線)の方が【ZZ16】(青線)に比べて残差が小さいことが確認できる。左図の補正項による変化から、【MF13】の深部地盤補正項による効果と考えられる。なお、【ZZ16】では深部地盤に関する補正項は提案されていない。

地震タイプ別に見てみると、以下の傾向が認められる。

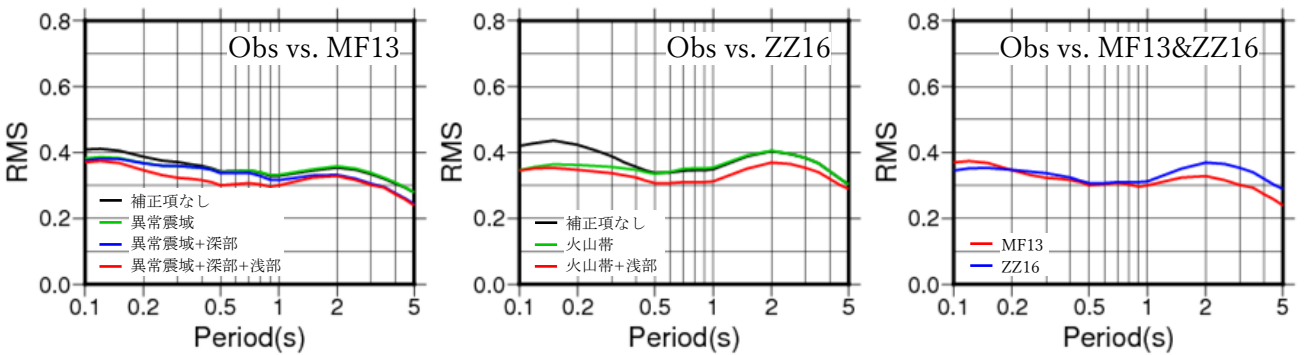
- ・地殻内地震：周期 1.0 秒より短周期側で火山帯の補正項により【ZZ16】の残差が小さく、長周期側で深部地盤の補正項により【MF13】の残差が小さい。
- ・プレート間地震：1.0 秒より短周期側で【MF13】と【ZZ16】で残差は同程度であり、周期 1.0 秒より長周期側で【ZZ16】に比べて【MF13】の方が残差が小さい。
- ・プレート内地震：全周期帯で【ZZ16】に比べて【MF13】の残差が小さい。



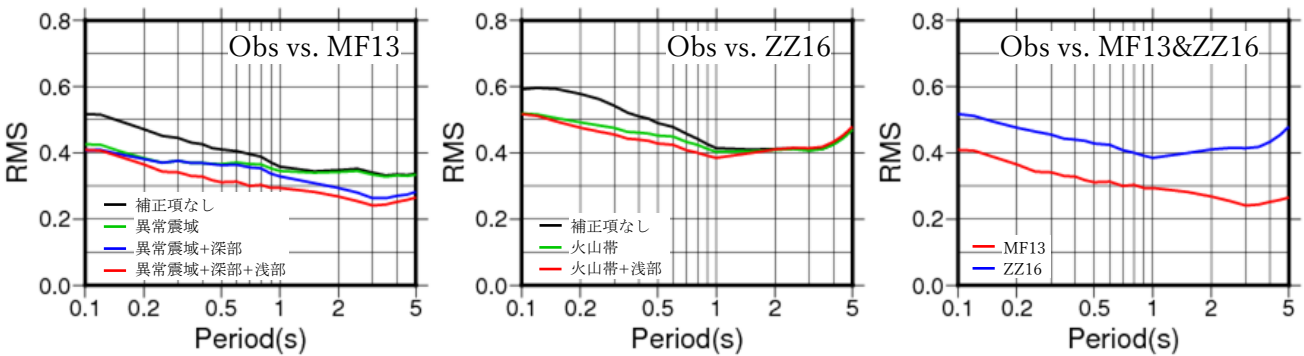
(a) 全 23 地震、4488 記録の RMS



(b) 地殻内 13 地震、2921 記録の RMS



(c) プレート間 7 地震、1019 記録の RMS



(d) プレート内 3 地震、548 記録の RMS

付図 2.4-1 観測値と各式の推定値の残差 RMS

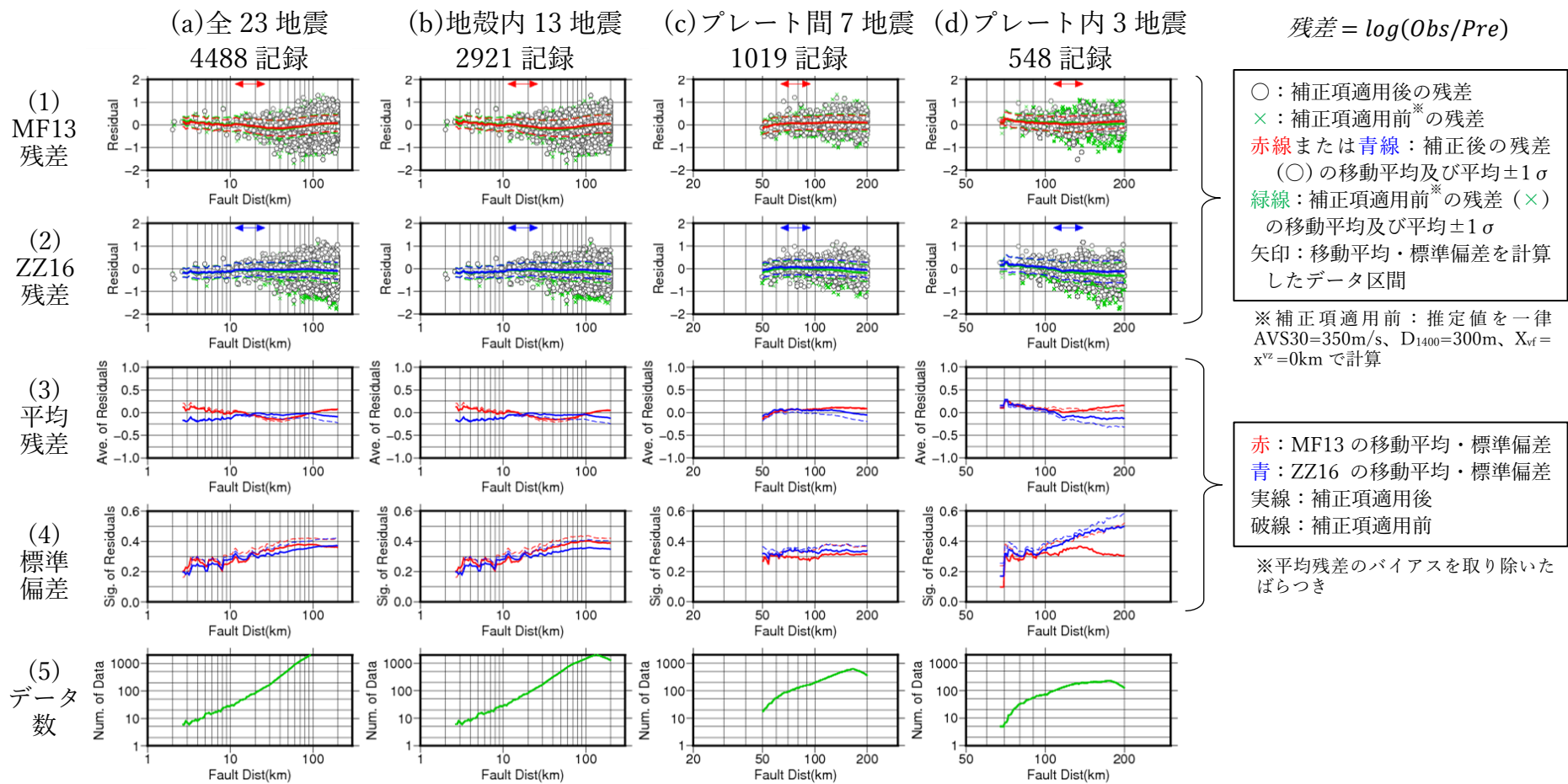
4.2 残差の断層最短距離依存性

周期ごとに残差と断層最短距離との関係も確認を行った。付図 2.4-2 は周期 0.3 秒、付図 2.4-3 は周期 4.0 秒での結果をまとめた図である。

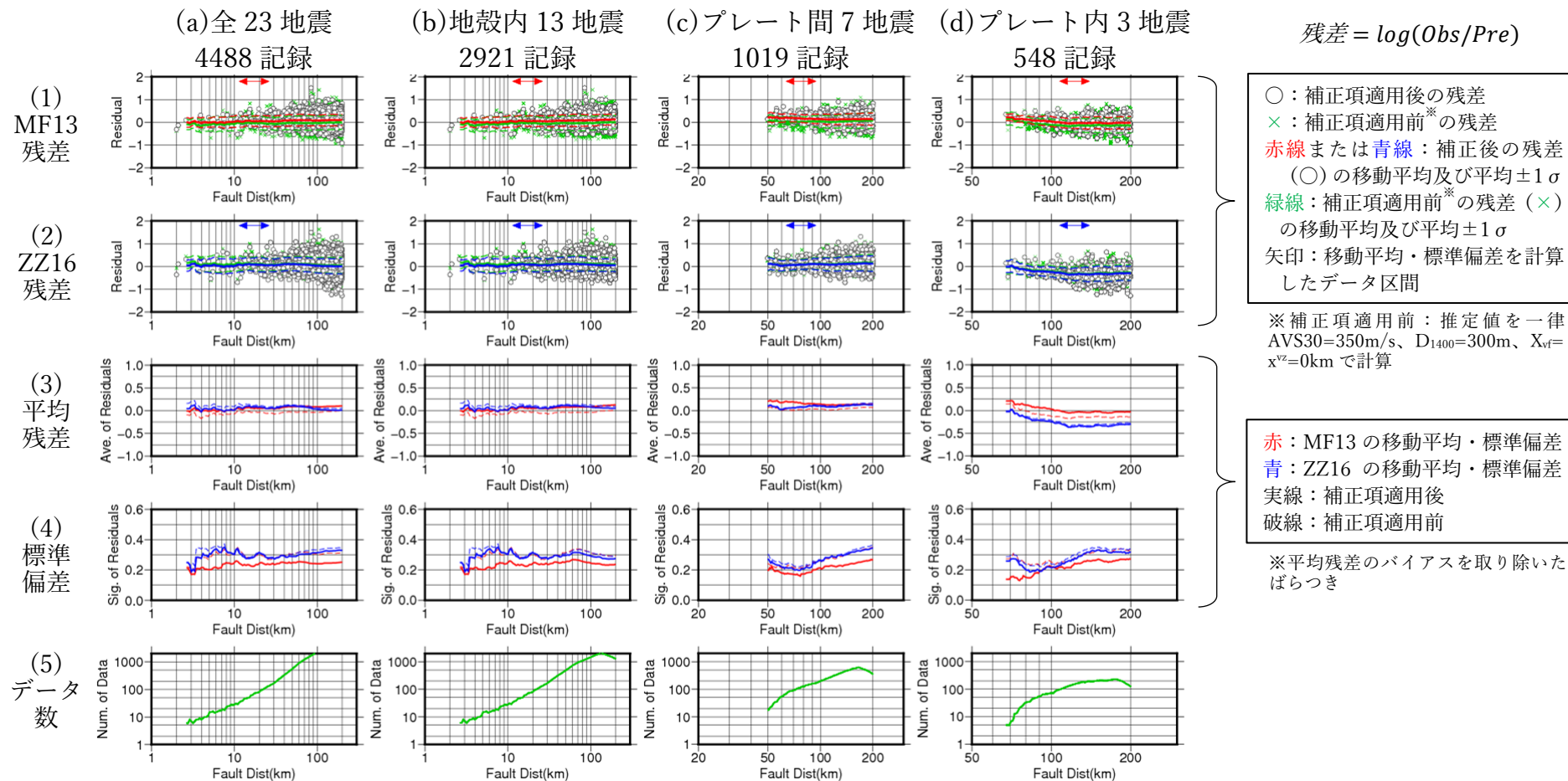
これらの図の上二段の(1)と(2)のグラフは、それぞれ【MF13】、【ZZ16】の残差について横軸を断層最短距離にして示したものであり、黒の○は補正後の残差、緑の×は補正前の残差を示す。赤（青）実線と赤（青）破線は補正後の残差の移動平均とその $\pm 1\sigma$ を示し、緑実線と緑破線は補正前の残差の移動平均とその $\pm 1\sigma$ を示す。矢印は移動平均及び標準偏差 σ の計算に使用した幅（地震タイプごとに対数軸上で幅を固定）であり、この幅に入るデータ数が最下段の(5)のグラフに示されている。(3)及び(4)のグラフは、(1)及び(2)のグラフのそれぞれ実線と破線をまとめて示したものであり、赤線が【MF13】、青線が【ZZ16】である。(3)及び(4)のグラフでは、実線は補正後の残差、破線は補正前の残差から算出した結果を示す。

付図 2.4-2 の周期 0.3 秒での残差と断層最短距離の関係について(a)の全地震を見ると、平均残差は、断層最短距離が 10km 程度以下の近距離になると【MF13】は過小評価（残差が正）、【ZZ16】は過大評価（残差が負）の傾向が確認できる。但し、極近距離のデータは数が少ないため、観測値の平均が一般的な値なのかどうかは別途確認が必要と思われる。標準偏差については、両者とも補正項を考慮することで標準偏差が小さくなる。近距離で 0.2 程度だった標準偏差は遠距離になるにつれ増加して 0.4 程度になり、遠くなるほど伝播経路特性のばらつきが大きくなることが要因として考えられる。

付図 2.4-3 の周期 4.0 秒では、平均残差は両者いずれも概ねゼロである。標準偏差は【ZZ16】に比べて【MF13】の方が小さく、【MF13】の深部地盤補正項の効果によると考えられる。短周期では遠距離になるにつれて標準偏差が増加していた（付図 2.4-2）が、長周期では増加の程度が小さい。これは、短周期側に比べて長周期側は Q 値による減衰の割合が小さいため、伝播経路特性によるばらつきが小さいことが要因ではないかと考えられる。



付図 2.4-2 周期 0.3 秒における(1)【MF13】の残差と断層最短距離の関係、(2)【ZZ16】の残差と断層最短距離の関係、(3)残差の平均と断層最短距離の関係、(4)標準偏差と断層最短距離の関係、及び、(5)残差の平均と標準偏差の算定に用いたデータ数



付図 2.4-3 周期 4.0 秒における(1)【MF13】の残差と断層最短距離の関係、(2)【ZZ16】の残差と断層最短距離の関係、(3)残差の平均と断層最短距離の関係、(4)標準偏差と断層最短距離の関係、及び、(5)残差の平均と標準偏差の算定に用いたデータ数

5. まとめ

2013年以降に発生した地殻内、プレート間、プレート内の計23地震を対象に、0.1～5.0秒の23周期の加速度応答スペクトルについて、【MF13】、【ZZ16】と比較し、要因分析を行った。その結果、主に以下の3つが認められた。

【MF13】は異常震域、深部地盤、浅部地盤の影響を補正することにより、残差のRMSが小さくなり、一方、【ZZ16】は火山帯通過距離と浅部地盤の影響を補正することにより、残差RMSが小さくなることが示された。

全ての補正項を適用した場合、周期1.0秒より短周期側では【MF13】と【ZZ16】で残差は同程度、長周期側では【MF13】の方が残差のRMSが小さいという結果が得られた。これは主に【MF13】の深部地盤の補正項による効果と考えられる。

断層最短距離に関しては、短周期側で距離が遠くなるほど標準偏差が大きくなる傾向が見られた。これは伝播経路特性のばらつきが大きくなることが要因として考えられる。

【MF13】及び【ZZ16】のデータセットに含まれてはいるが、地震規模の大きな2003年十勝沖地震及び2011年東北地方太平洋沖地震の残差を検討した結果を参考までに付録2の最後に添付した。

【参考文献】

- Asano, K. and T. Iwata (2016): Source rupture processes of the foreshock and mainshock in the 2016 Kumamoto earthquake sequence estimated from the kinematic waveform inversion of strong motion data, *Earth, Planets and Space*, Vol.68, No.147. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0519-9>
- 防災科学技術研究所 (2019) : 防災科研 F-net. <https://doi.org/10.17598/NIED.0005>
- 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>
- 防災科学技術研究所 (2019) : J-SHIS 地震ハザードステーション. <https://doi.org/10.17598/nied.0010>
- 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。
- 入倉孝次郎・三宅弘恵 (2001) : シナリオ地震の強震動予測、地学雑誌、110 巻、pp.849-875。
- 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」)。
- 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. 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 (2014) : 地震動予測式における地盤増幅補正項の再検討、日本地震学会秋季大会、B11-07。
- 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。
- Murotani, S., H. Miyake, and K. Koketsu (2008): Scaling of characterized slip models for plate-boundary earthquakes, *Earth, Planets and Space*, Vol.60, pp.987-991. <https://doi.org/10.1186/BF03352855>
- 笹谷努・森川信之・前田宜浩 (2006) : スラブ内地震の震源特性、北海道大学地球物理学研究報告、第 69 号、pp.123-134。
- Somerville, P. G., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith, and A. Kowada (1999): Characterizing Crustal Earthquake Slip Models for the Prediction of Strong Ground Motion, *Seismological Research Letters*, Vol.70, pp.59-80. <https://doi.org/10.1785/gssrl.70.1.59>
- 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>

【参考資料】 2003 年十勝沖地震と 2011 年東北地方太平洋沖地震の観測応答スペクトルと地震動予測式の残差の検討

2003 年十勝沖地震と 2011 年東北地方太平洋沖地震についても K-NET 及び KiK-net による地表観測記録から応答スペクトルを計算し、【MF13】及び【ZZ16】との比較を実施した。

記録の選択基準は、AVS30 が算出可能な点、S 波主要動が含まれている点に関しては付録 2 と同様であるが、断層最短距離を 200km 以内に限定すると解析対象記録数が少なくなってしまう（付図 2.参-1 参照）ことから、【MF13】については外挿となる断層最短距離 200~300km の記録も用いて検討を行った。

断層最短距離の計算に必要なモデルには、既往の研究結果を用いた。すなわち、2003 年十勝沖地震は Tanioka et al. (2004)、2011 年東北地方太平洋沖地震は Hashimoto et al. (2012) のすべり分布をもとに、Matsu'ura et al. (2020)が設定した断層面（付図 2.参-1）を用いて距離計算を行った。

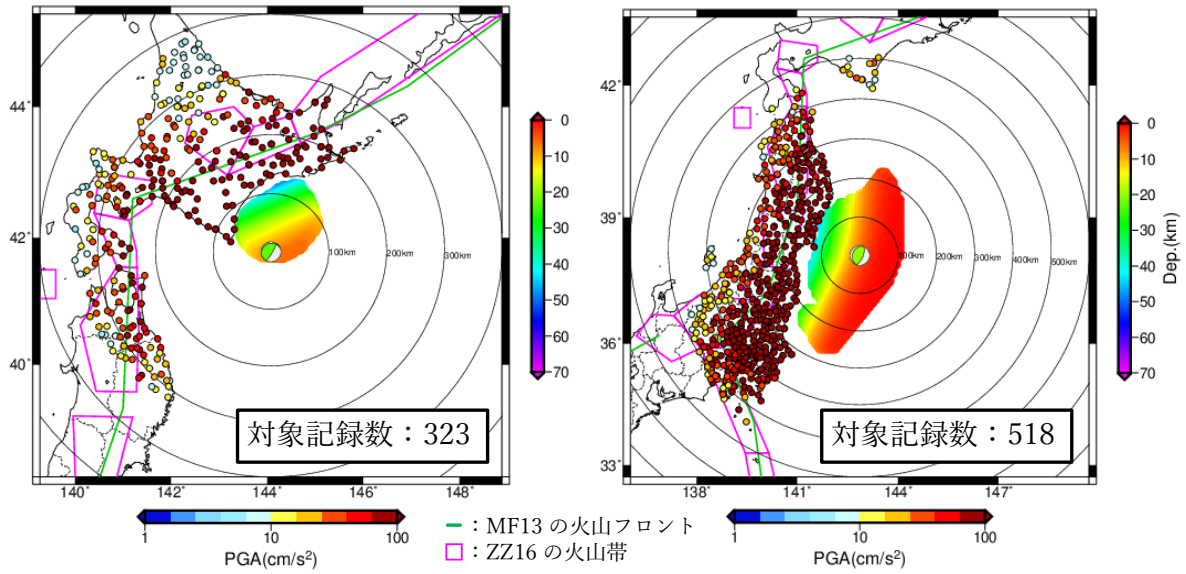
これら 2 地震は【MF13】及び【ZZ16】のデータセットに含まれている。式構築の際に使われたパラメータは付表 2.参-1 に示す通りであり、それぞれこれらの値を使って推定値を計算した。

推定値と観測値の残差の RMS を付図 2.参-2 に比較する。残差は、【MF13】については異常震域（2003 年十勝沖地震の場合）、深部地盤、浅部地盤の補正、【ZZ16】については火山帯と浅部地盤の補正を観測値に施し、求めた値である。十勝沖地震は全周期帯で【MF13】に比べて【ZZ16】の方が大きな RMS となっている。東北地方太平洋沖地震は周期 0.1~0.5 秒でほぼ同じ値であるが、0.5~3.0 秒では【ZZ16】が大きな値となった。

付表 2.参-1 【MF13】及び【ZZ16】のデータセットに用いられた 2 地震の諸元

		2003 年十勝沖地震			2011 年東北地方太平洋沖地震		
		Mw	震源深さ (km)	断層上端深さ(km)	Mw	震源深さ (km)	断層上端深さ(km)
式の構築に用いられた諸元	MF13	8.0	45.0	—	9.0	24.0*1	—
	ZZ16	8.3	25km 以浅	5.0	9.1	25km 以浅	14.0

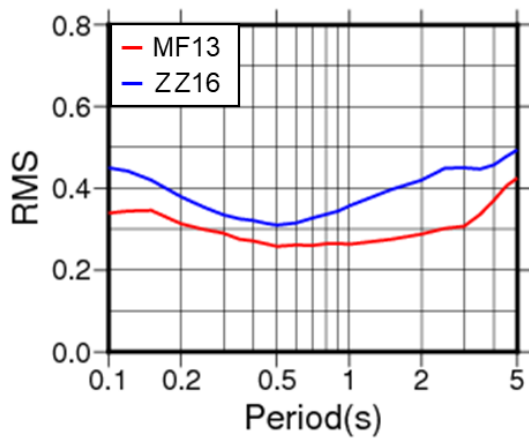
*1 【MF13】では震源深さ 25km 以深の地震に対して異常震域の補正項が適用されるため、2011 年東北地方太平洋沖地震については異常震域の補正項を適用していない。



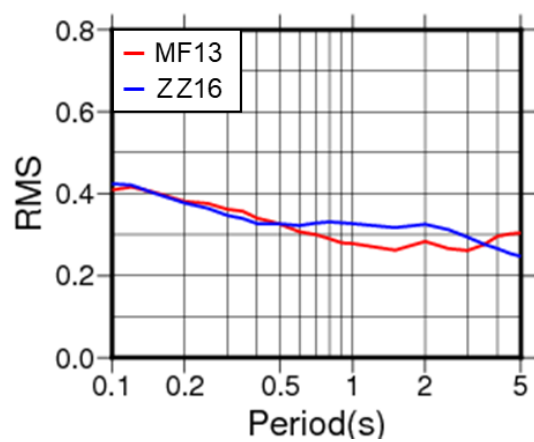
(a) 2003 年十勝沖地震

(b) 2011 年東北地方太平洋沖地震

付図 2.参-1 距離計算に用いた断層面と解析に用いた記録の最大加速度分布。震源メカニズム解は F-net による。震央を中心とする同心円は 100km 間隔。



(a) 2003 年十勝沖地震



(b) 2011 年東北地方太平洋沖地震

付図 2.参-2 観測値と推定値の残差 RMS

【参考文献】

- Hashimoto, C., A. Noda, and M. Matsu'ura (2012): The Mw 9.0 northeast Japan earthquake: total rupture of a basement asperity, *Geophysical Journal International*, Vol.189, pp.1-5. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05368.x>
- Matsu'ura, R. S., H. Tanaka, M. Furumura, T. Takahama, and A. Noda (2020): A New Ground-Motion Prediction Equation of Japanese Instrumental Seismic Intensities Reflecting Source Type Characteristics in Japan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.110, pp.2661-2692. <https://doi.org/10.1785/0120180337>
- Tanioka, Y., K. Hirata, R. Hino, and T. Kanazawa (2004): Slip distribution of the 2003 Tokachi-oki earthquake estimated from tsunami waveform inversion, *Earth, Planets and Space*, Vol.56, pp.373-376. <https://doi.org/10.1186/BF03353067>