

別冊

図一覧

- 図 1 : 2013 年設置変更許可申請書で四国電力が考慮した中央構造線断層帯 [26, 24]
図 2 : 2013 年再稼働申請時の基準地震動 S_s (水平方向)[24]
図 3 : 伊方 3 号の 2015 年再稼働許可時の基準地震動 S_s (水平方向) [27]
図 4 : 2004 年北海道留萌支庁南部地震の震源モデルによる震源近傍の地震動解析結果 [2]
図 5 : 2004 年北海道留萌支庁南部地震の震源モデルでアスペリティ下端中央から破壊が始まった場合の地震動解析結果 [2]
図 6 : JNES による対象計算領域 (地震基盤上の評価点: 縦 11× 横 21 の格子点 231) と横ずれ断層の例 [6]
図 7 : 横ずれ断層モデルによる地震動評価結果 (M6.5)[6]
図 8 : 横ずれ断層 (M6.5) の地震動評価結果 [6]
図 9 : 横ずれ断層モデル (M6.5) による地震動評価結果 [6]
図 10: 伊方 3 号の基準地震動 S_s -1 および S_s -3, クリフエッジ (黒点線) および JNES による 1340 ガルの地震動 (赤波線)[6, 27, 28, 7]
図 11 : 伊方 3 号における敷地前面海域断層群 (中央構造線断層帯) の耐専スペクトルと基準地震動 S_s -1H(水平方向)[27]
図 12 : 伊方 3 号における敷地前面海域断層群 (中央構造線断層帯) の耐専スペクトルと基準地震動 S_s -1V(鉛直方向)[27]
図 13 : 伊方 3 号における敷地前面海域断層群 (中央構造線断層帯) 69km 鉛直の耐専スペクトルとクリフエッジ (黒点線) [27]
図 14 : 伊方 3 号における敷地前面海域断層群 (中央構造線断層帯) 69km 北傾斜の耐専スペクトルとクリフエッジ (黒点線) [27]
図 15 : 耐専スペクトルの作成・適用性確認に用いられた地震データの等価震源距離 X_{eq} と気象庁マグニチュード M [27]
図 16 : 耐専スペクトルにおける等価震源距離と地震動の最大加速度 [17]
図 17 : 2000 年鳥取県西部地震 M7.3 の賀祥ダム ($X_{eq} = 6\text{km}$) での地震観測記録と耐専スペクトルの比較 [33]
図 18 : 耐専スペクトル作成の元になった地震観測記録の応答スペクトル (地震基盤表面はぎとり波) と耐専スペクトルの関係 [33]
図 19 : 国内外の内陸地殻内地震による震源近傍の観測記録 (M6.0~8.1, $X_{eq} = 6 \sim 33\text{km}$, 水平 51 記録, 上下 14 記録) の耐専スペクトル (内陸補正有) との残差 (バラツキ)[33]
図 20 : 正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ ($\mu = 0, \sigma^2 = 3$) に従う確率変数 Y のバラツキ (標準偏差 $\sigma = \sqrt{3}$) を $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 1$ の 3 つの確率変数 $Y_1 \sim N(-1, 1^2)$, $Y_2 \sim N(0, 1^2)$, $Y_3 \sim N(1, 1^2)$ に分けて説明できる場合 (b) とそうでない場合 (a) の比較
図 21 : 川内原発で観測された活断層による地震 [18]
図 22 : 川内原発での内陸地殻内地震観測記録に基づく耐専スペクトルの補正係数 [18]
図 23 : 川内原発の敷地地盤で得られた観測記録の応答スペクトルと Noda et al.(2002) の方法により求められた応答スペクトルの比
図 24 : 伊方 3 号の基準地震動 S_s , クリフエッジ (黒点線), JNES による 1340 ガルの地震動 (赤波線), 敷地前面海域断層群 69km 鉛直の耐専スペクトルとその 2 倍の応答スペクトル (青波線)[6, 27, 28, 7]
図 25 : 伊方 3 号における敷地前面海域の断層群 (中央構造線断層帯) 480km 基本震源モデル [27]
図 26 : 伊方 3 号における敷地前面海域断層群 (中央構造線断層帯) の断層モデルによる地震動評価結果 (EW 方向: 全ケース重ね書き) と 69km 鉛直耐専スペクトルの比較
図 27 : 壇ら (2011)[4] および Fujii-Matsu'ura (2000)[5] と他の $S - M_o$ 関係式との関係
図 28 : 四国電力による設定したパラメータの検証 [27]
図 29 : 柏崎刈羽原発 1~4 号での新潟県中越地震時の解放基盤表面地震動はぎとり波の応答スペクトル (東西 EW 方向) [32]
図 30 : 岩手・宮城内陸地震 M7.2 で観測された地中地震観測記録の応答スペクトル [9] を 2 倍にした「はぎとり波」相当の応答スペクトル [10]

表一覧

- 表 1 : 伊方 3 号の基準地震動とその最大加速度 [gal] (cm/s^2 と同じ) [27, 28]
表 2 : 伊方 3 号における敷地前面海域断層群 54km 基本ケース (鉛直) の震源パラメータ *1[27]
表 3 : 壇ら (2011)[4] が用いた地震データと $W_{\max} = W$ としたときの $\Delta\sigma^\#$ の変動量 $\Delta\sigma^\dagger/\Delta\sigma^\#$ *1
表 4 : 壇ら (2011)[4] の方法に基づく震源断層モデルの面積 S_{model} , 断層長さ L_{model} , アスペリティ平均動的応力降下量 $\Delta\sigma_a^\#$ および $(L_{\text{model}}, W_{\max}) = (L, W)$ としたときの $\Delta\sigma_a^\#$ の変動量 $\Delta\sigma_a^\dagger/\Delta\sigma_a^\#$
表 5 : 2008 年岩手・宮城内陸地震 M7.2 による強震 観測値 (加速度 [gal], 速度 [cm/s]) [1]
表 6 : 主な原子力発電所における原子炉建屋の固有周期 (水平南北 NS 方向, 東西 EW 方向) [sec]
表 7 : 原子力発電所の主要な建屋・構築物および機器・配管類の固有周期の典型例 [sec]
表 8 : 伊方原子力発電所 1~3 号機の主要な建屋・構築物および機器・配管の固有周期 [sec][23]

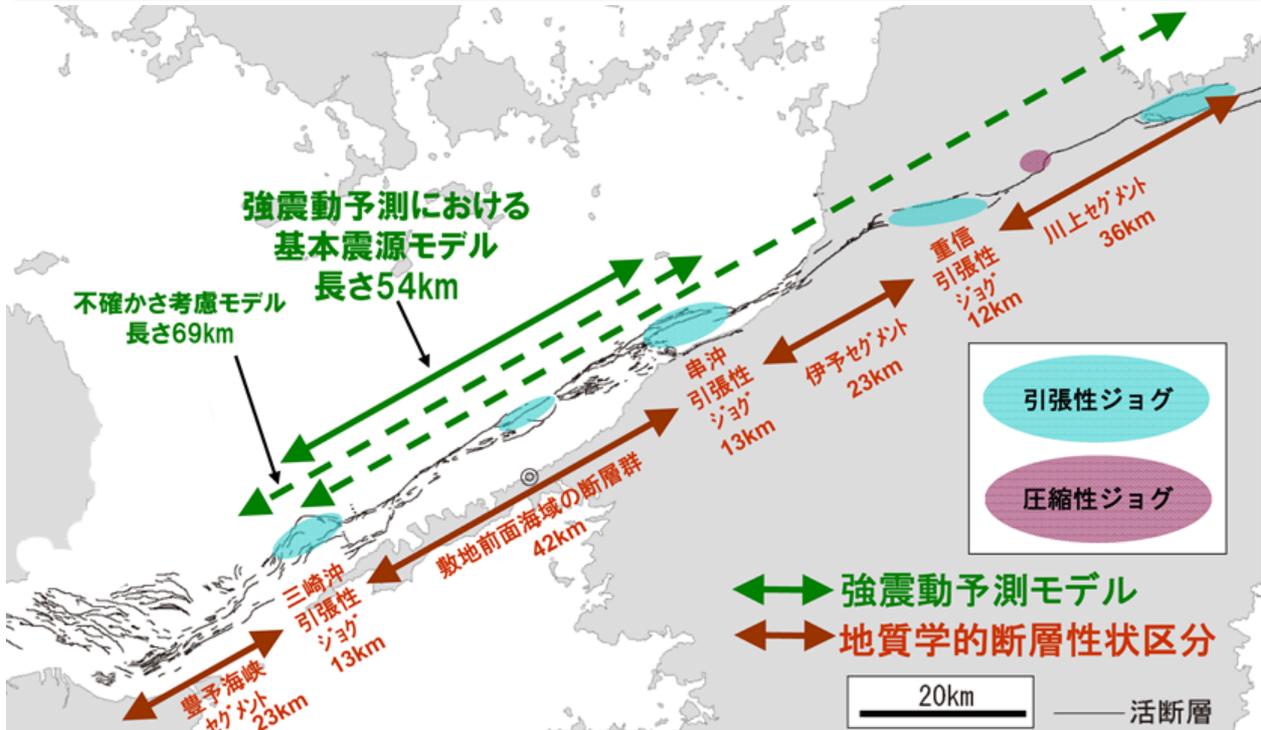
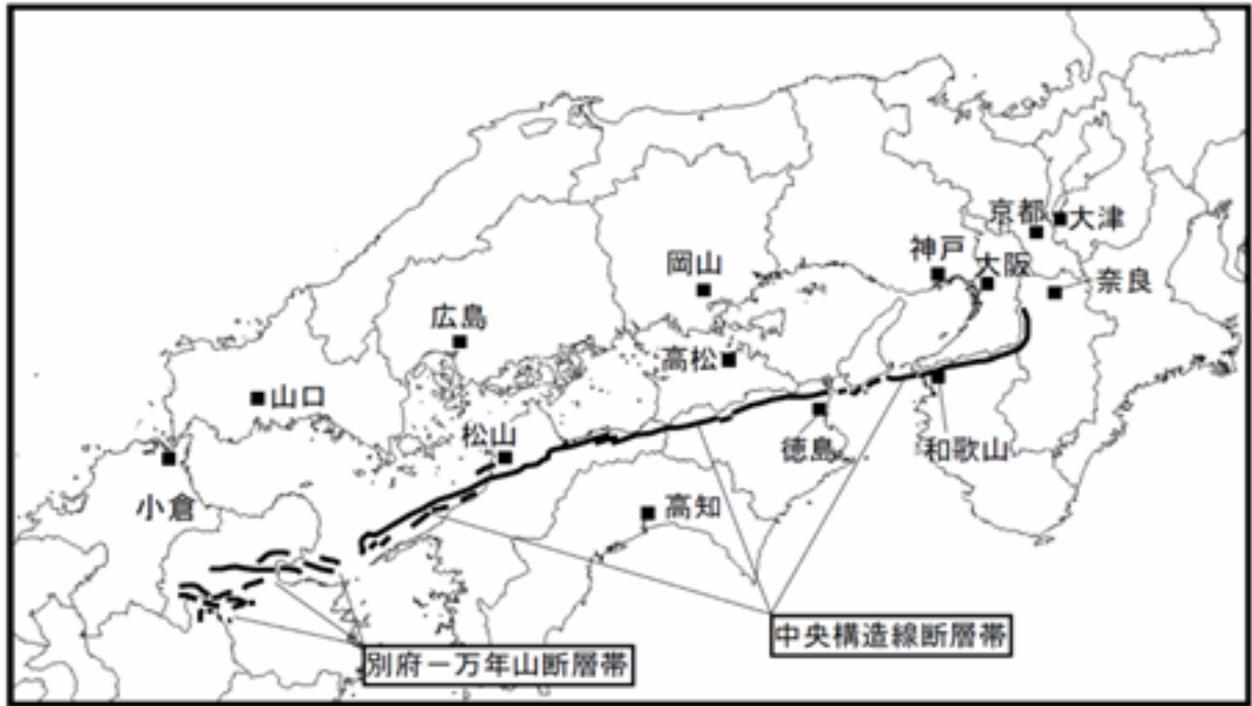


図 1: 2013 年設置変更許可申請書で四国電力が考慮した中央構造線断層帯 [26, 24]

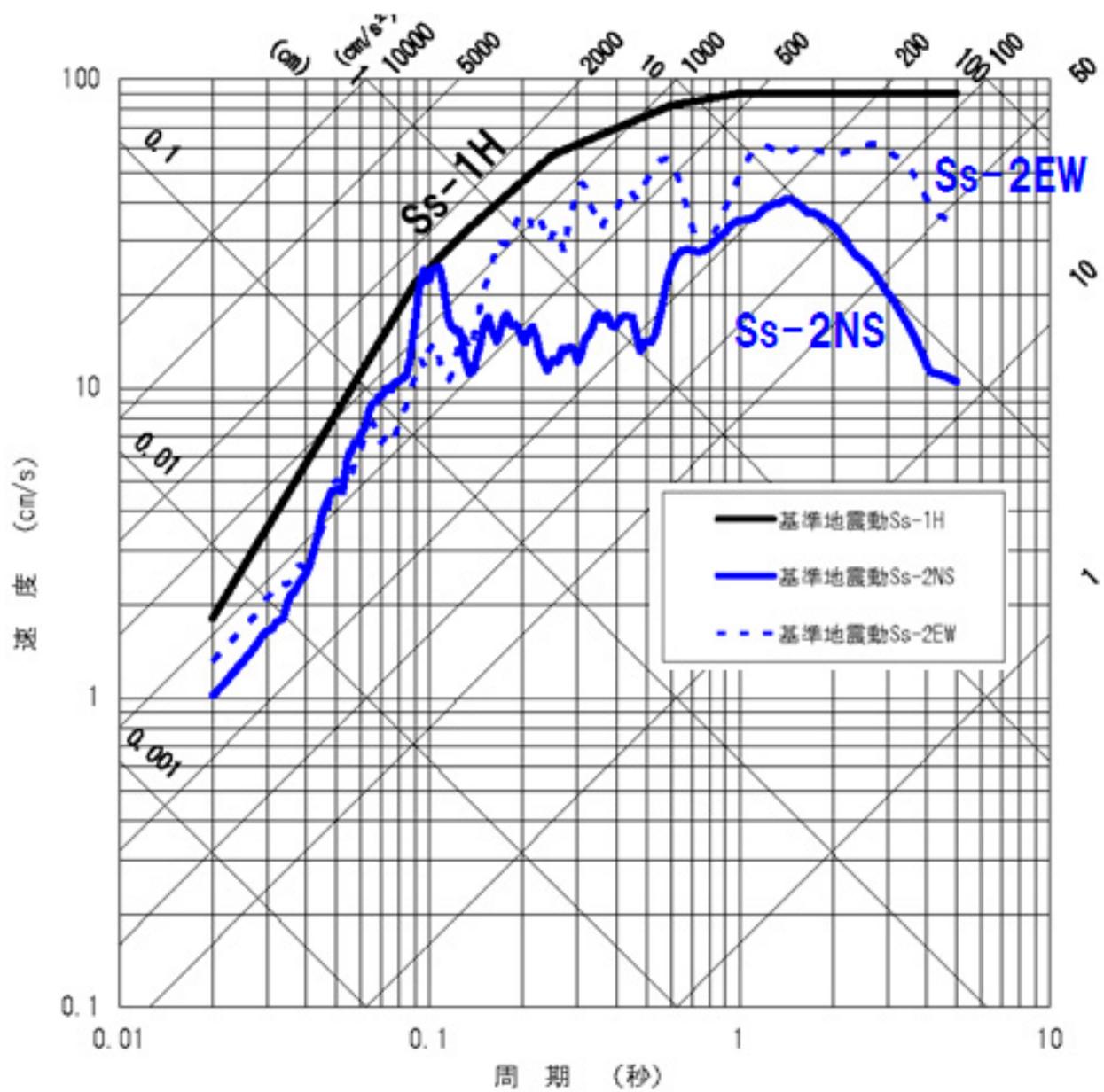


図 2: 2013 年再稼働申請時の基準地震動 Ss(水平方向)[24] (Ss-1H:570 ガル, Ss-2EW:413 ガル, Ss-2NS:318 ガル)

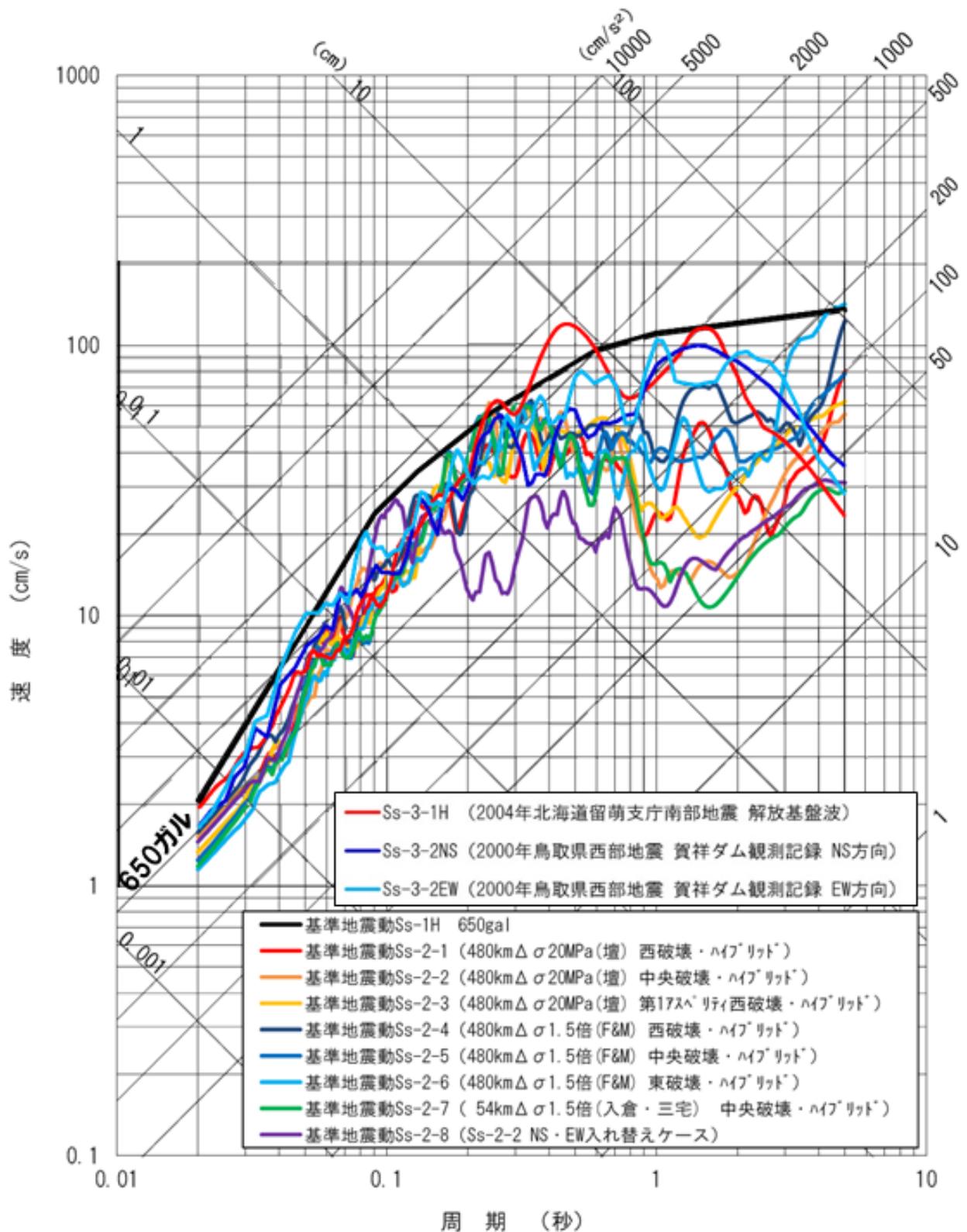


図3: 伊方3号の2015年再稼働許可時の基準地震動Ss(水平方向)[27](震源を特定して策定する地震動:Ss-1H, Ss-2-1~Ss-2-8, 震源を特定せず策定する地震動:Ss-3-1H, Ss-3-2NS, Ss-3-2EW)

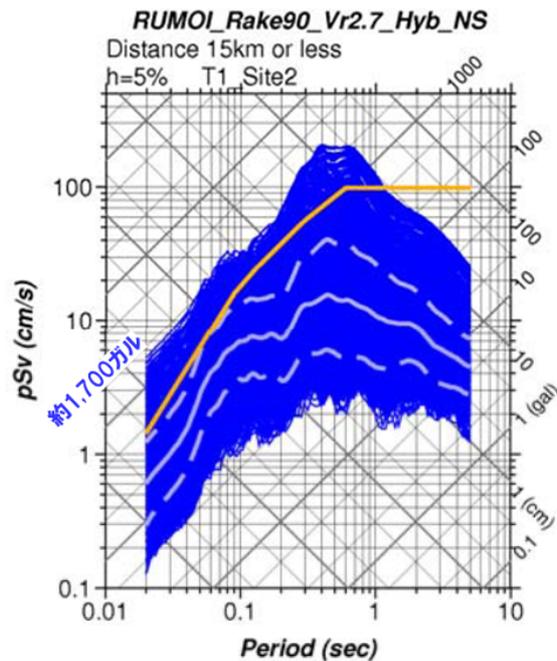
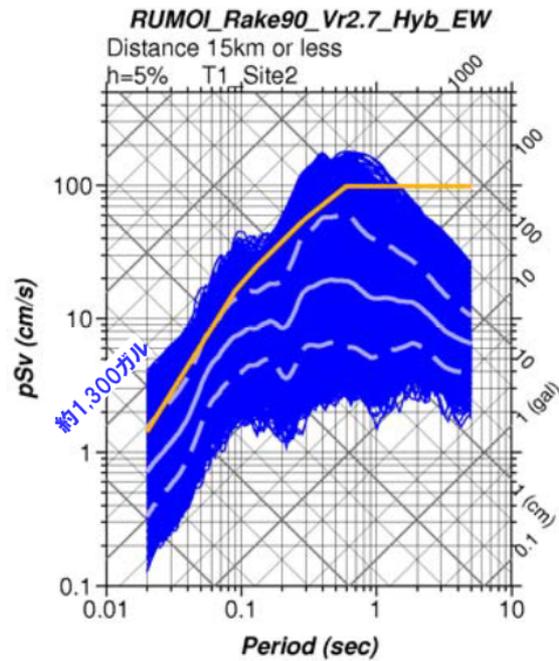
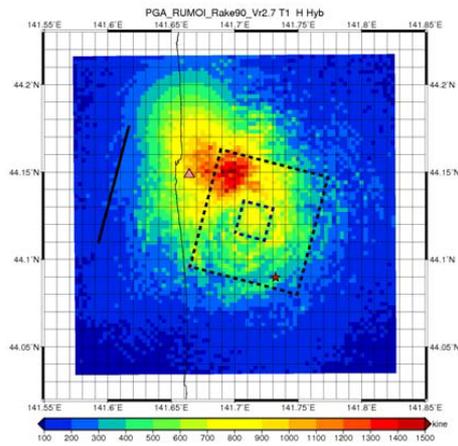


図 4: 2004 年北海道留萌支庁南部地震の震源モデルによる震源近傍の地震動解析結果 [2] (上: 応答加速度分布, △: HKD020 地点, ☆: 破壊開始点; 中: 断層最短距離 15km 以内の応答スペクトルの重ね書きで EW 方向, 白線: 平均, 白破線: ± 標準偏差; 下: NS 方向,)

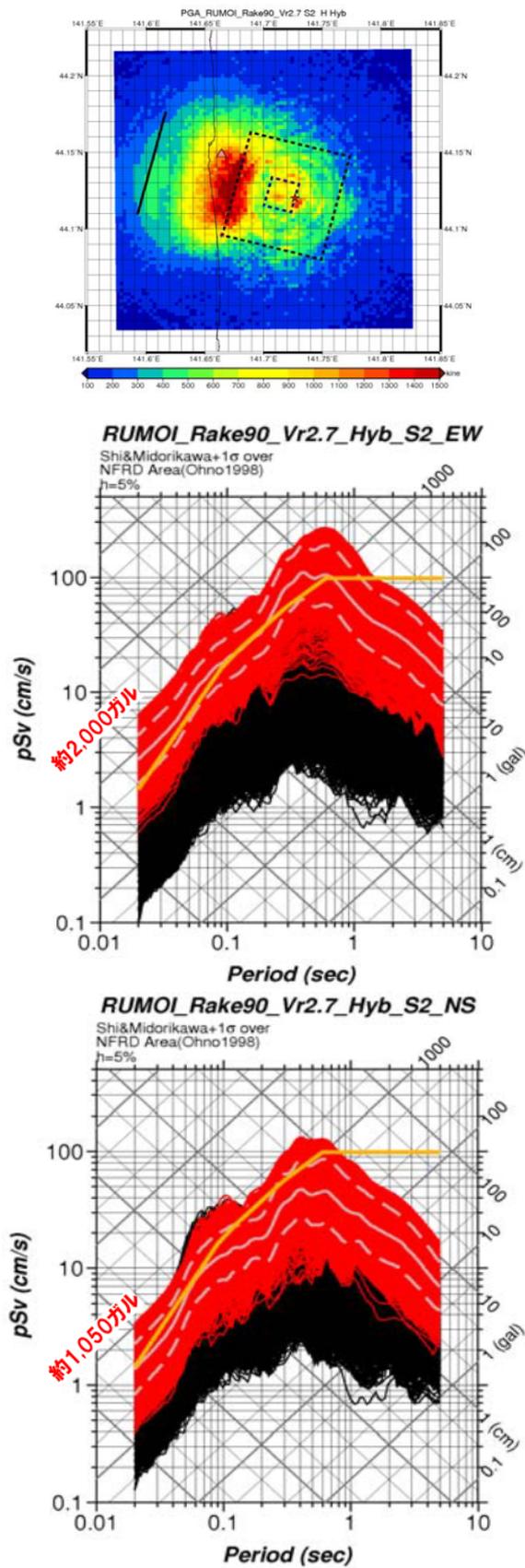


図 5: 2004 年北海道留萌支庁南部地震の震源モデルでアスペリティ下端中央から破壊が始まった場合の地震動解析結果 [2] (上: 応答加速度分布, Δ : HKD020 地点, \star : 破壊開始点; 中: 断層最短距離 15km 以内の応答スペクトルの重ね書きで EW 方向, 赤実線: NFRD 効果を含む領域内の重ね書き, 白線: 赤実線領域内の平均, 白破線: 同土標準偏差; 下: NS 方向,)

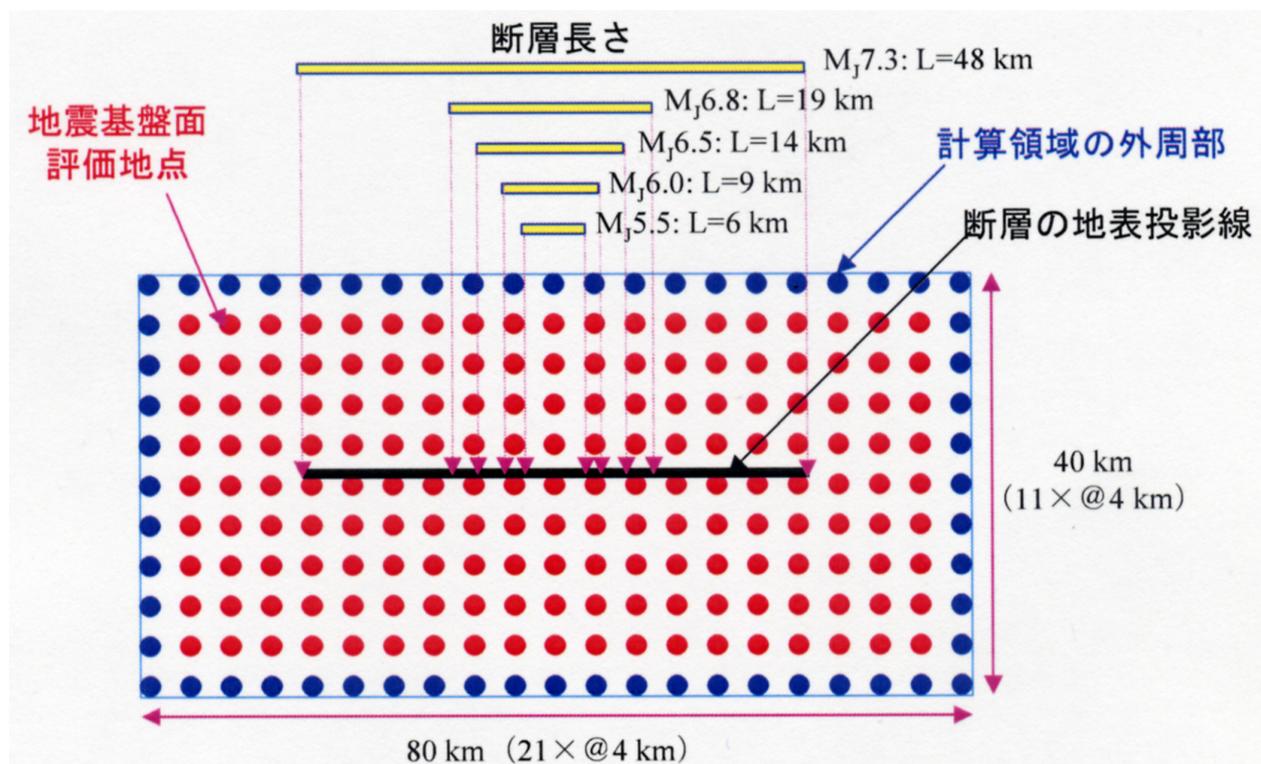
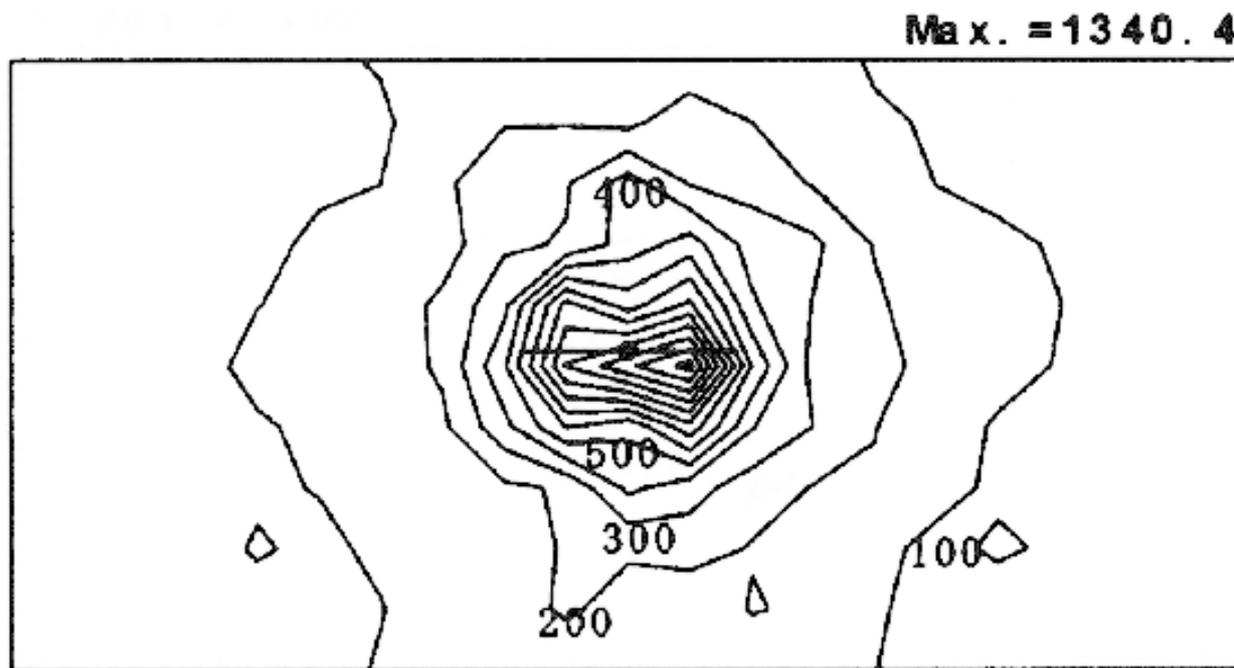
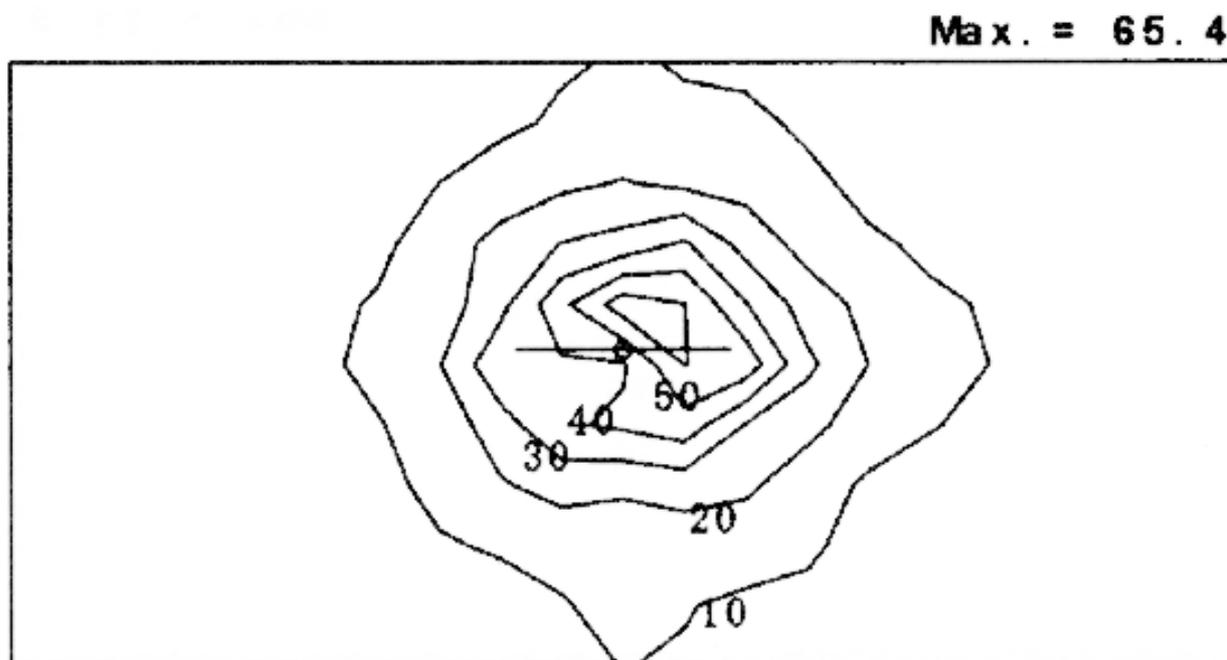


図 6: JNES による対象計算領域（地震基盤上の評価点：縦 11 × 横 21 の格子点 231）と横ずれ断層の例 [6]



(a) 加速度分布図 (最大値 1340.4cm/s²)



(b) 速度分布図 (最大値 65.4cm/s)

図7: 横ずれ断層モデルによる地震動評価結果 (M6.5)[6] (地震発生層 2~20km, 断層・アスペリティ上端 2km, 実効応力大, 高周波遮断特性平均 + σ)

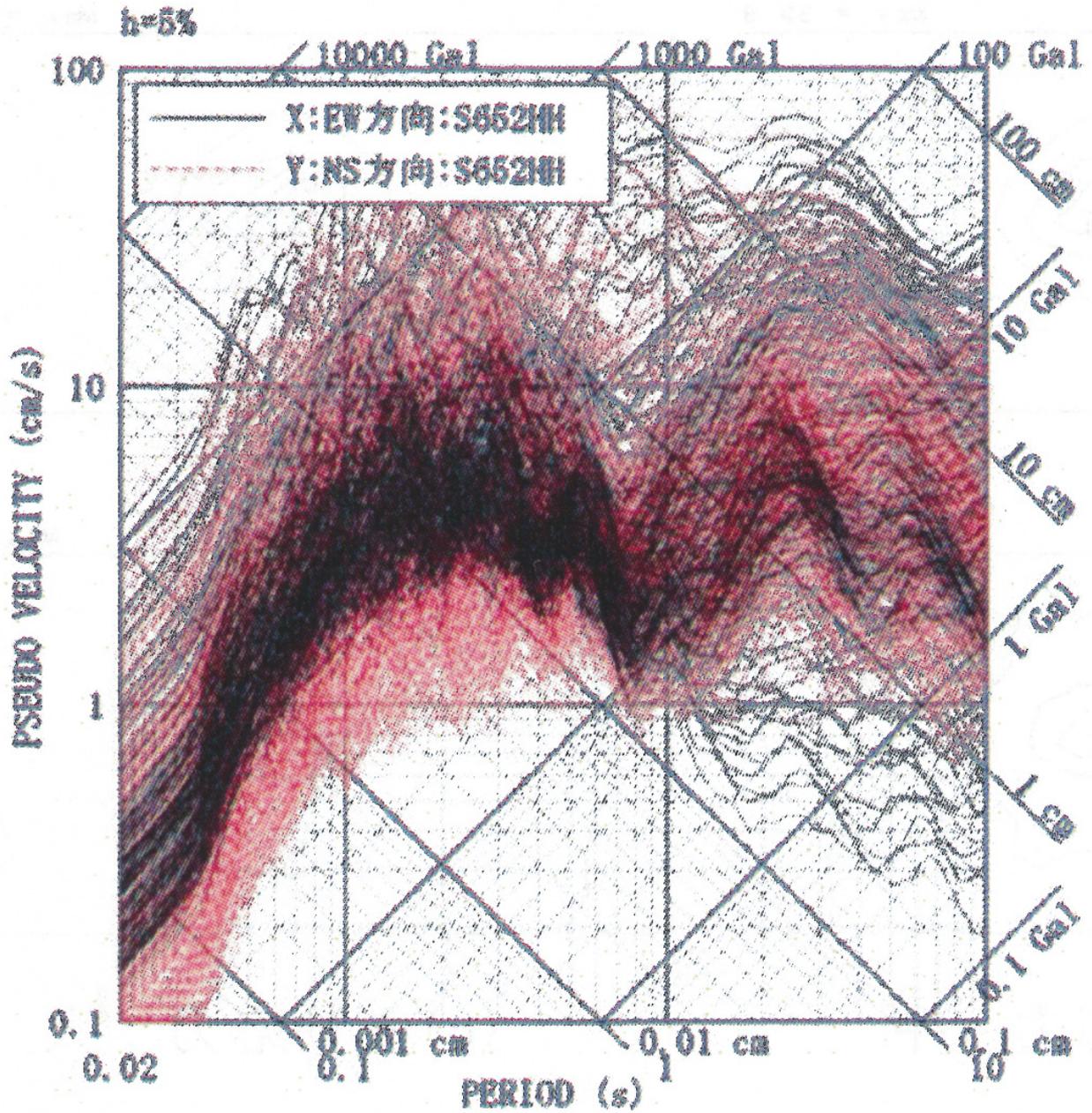


図 8: 横ずれ断層 (M6.5) の地震動評価結果 [6] (断層上端 2km, アスペリティの上端 2km, 実効応力大 (19.1MPa), 高周波遮断特性平均 $+\sigma$ ($f_{\max} = 11.9\text{Hz}$) のケース)

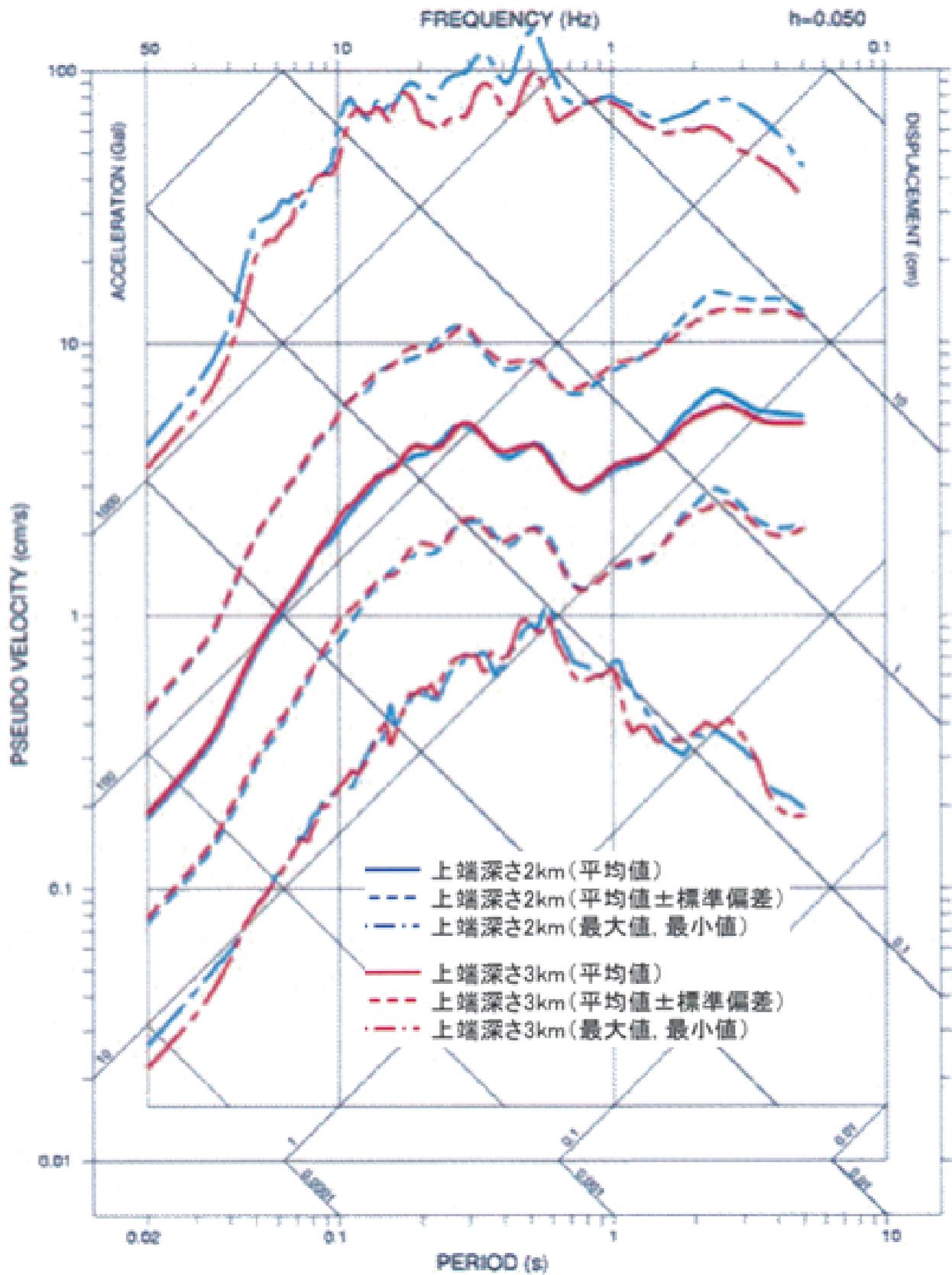


図 9: 横ずれ断層モデル (M6.5) による地震動評価結果 [6] (断層上端 2km(3km), アスペリティの上端 2km(3km), 実効応力大 (19.1MPa), 高周波遮断特性平均 + σ ($f_{max} = 11.9\text{Hz}$) のケース)

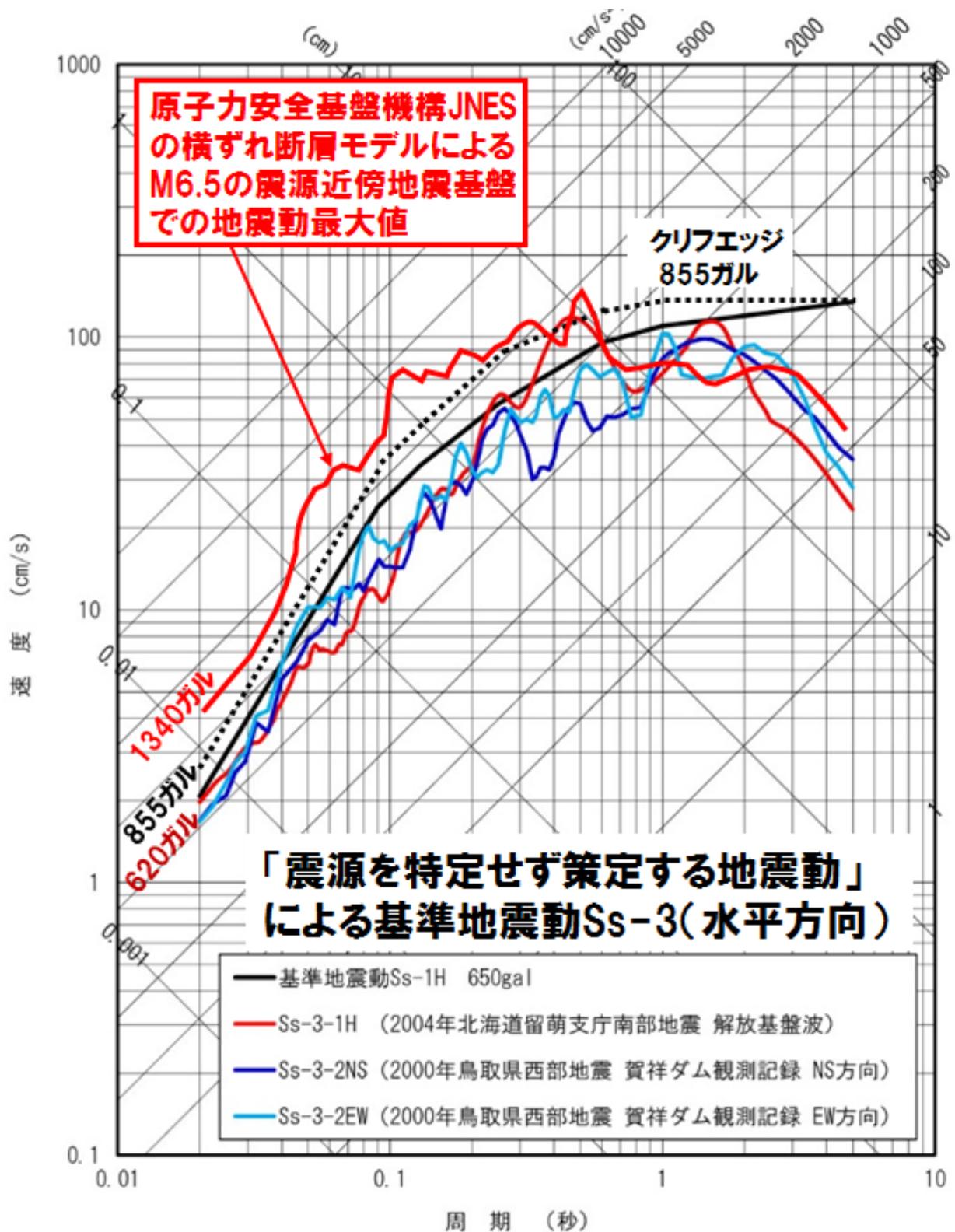


図 10: 伊方 3 号の基準地震動 Ss-1 および Ss-3, クリフエッジ (黒点線) および JNES による 1340 ガルの地震動 (赤波線)[6, 27, 28, 7]

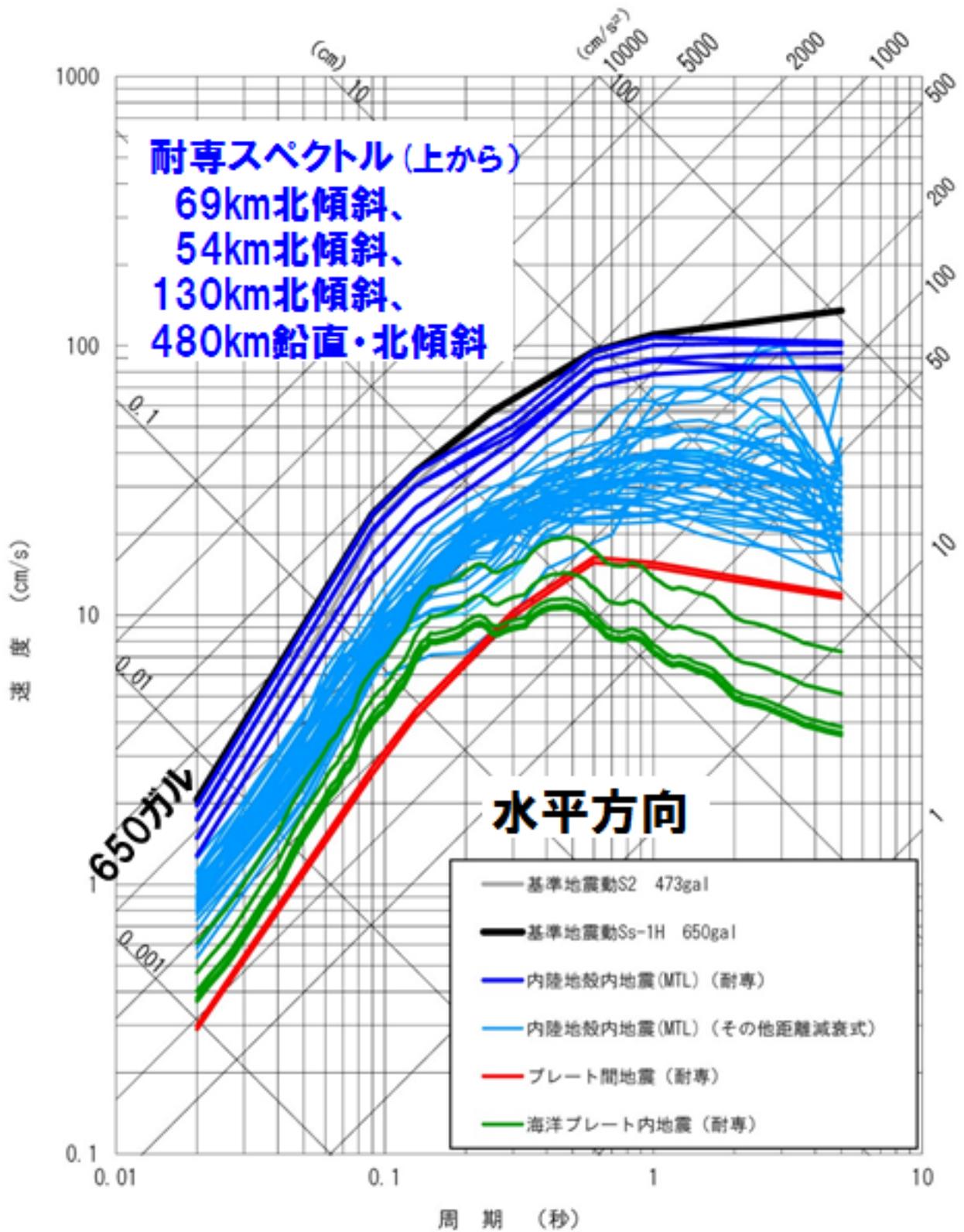


図 11: 伊方3号における敷地前面海域断層群 (中央構造線断層帯) の耐専スペクトルと基準地震動 Ss-1H(水平方向)[27]

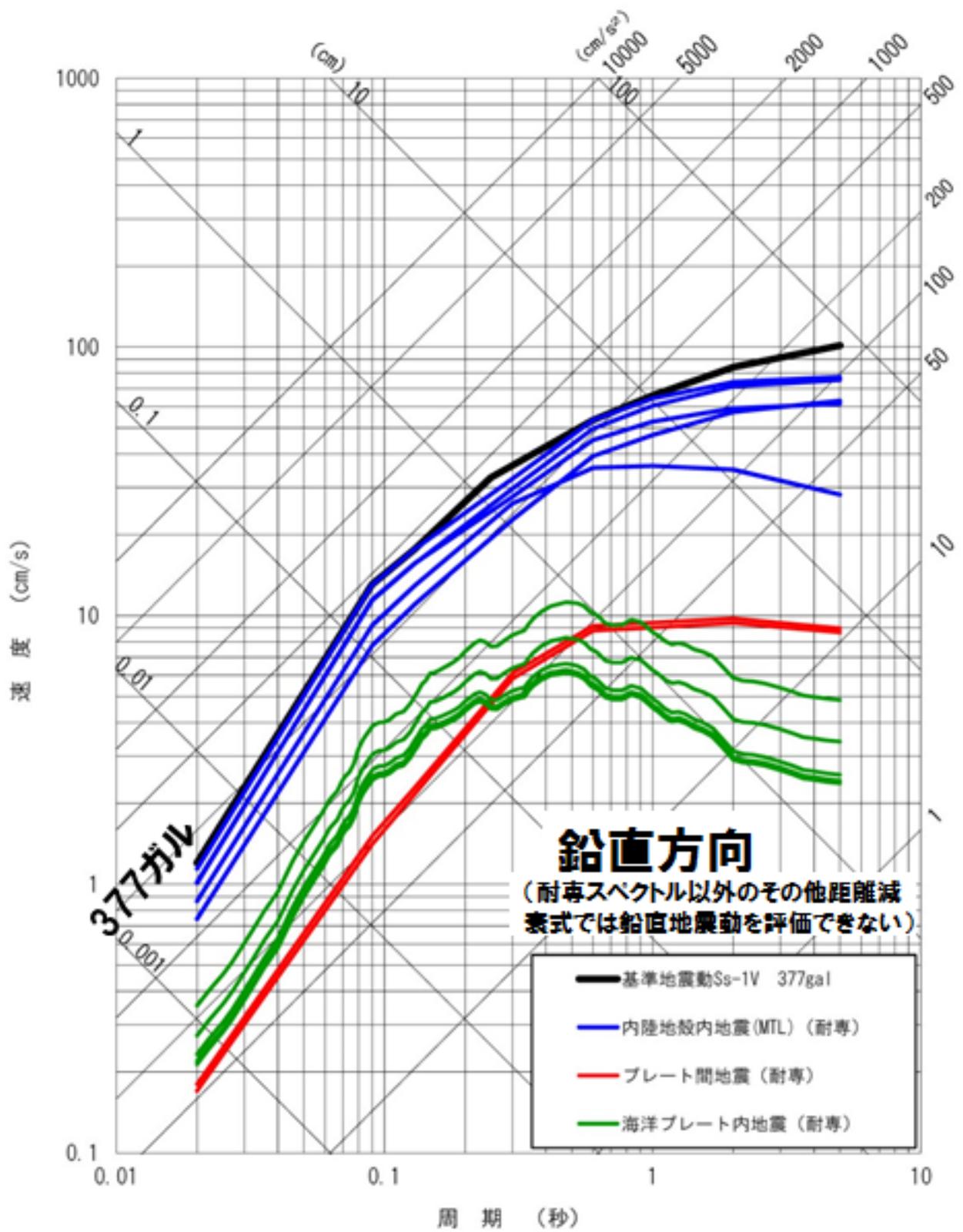


図 12: 伊方3号における敷地前面海域断層群 (中央構造線断層帯) の耐専スペクトルと基準地震動 Ss-1V(鉛直方向)[27]

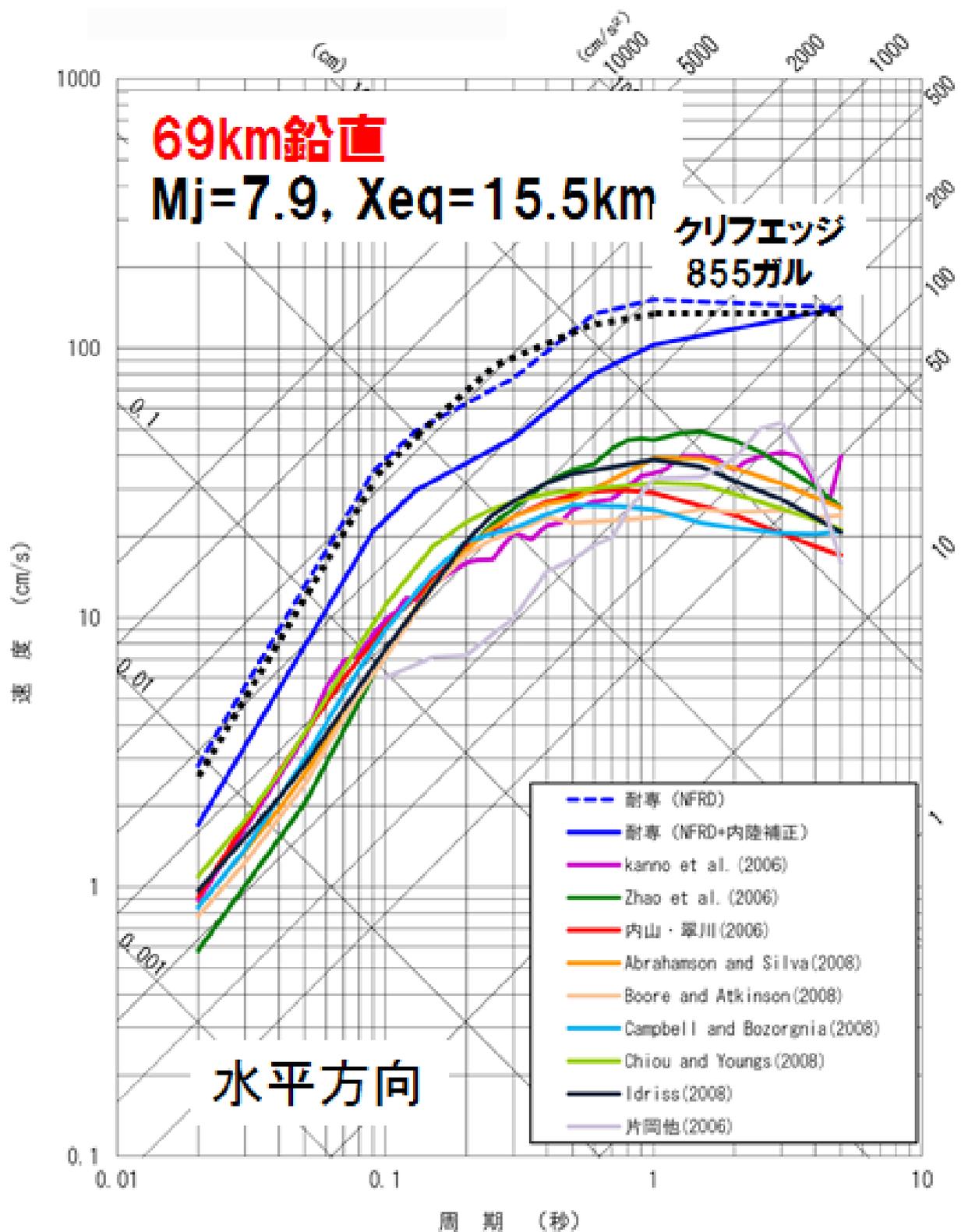


図 13: 伊方 3 号における敷地前面海域断層群 (中央構造線断層帯) 69km 鉛直の耐専スペクトルとクリフエッジ (黒点線) [27]

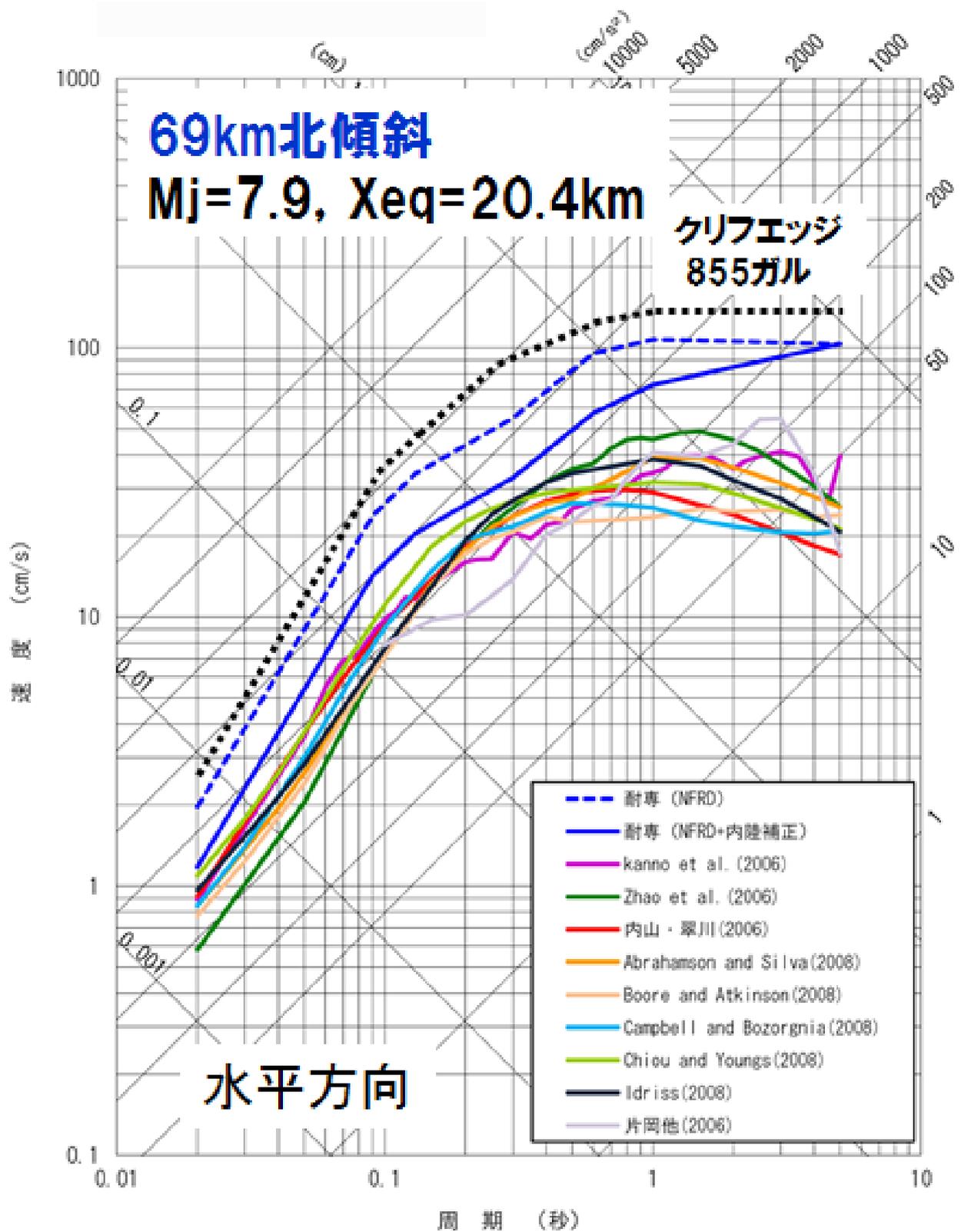


図 14: 伊方 3 号における敷地前面海域断層群 (中央構造線断層帯) 69km 北傾斜の耐専スペクトルとクリフエッジ (黒点線) [27]

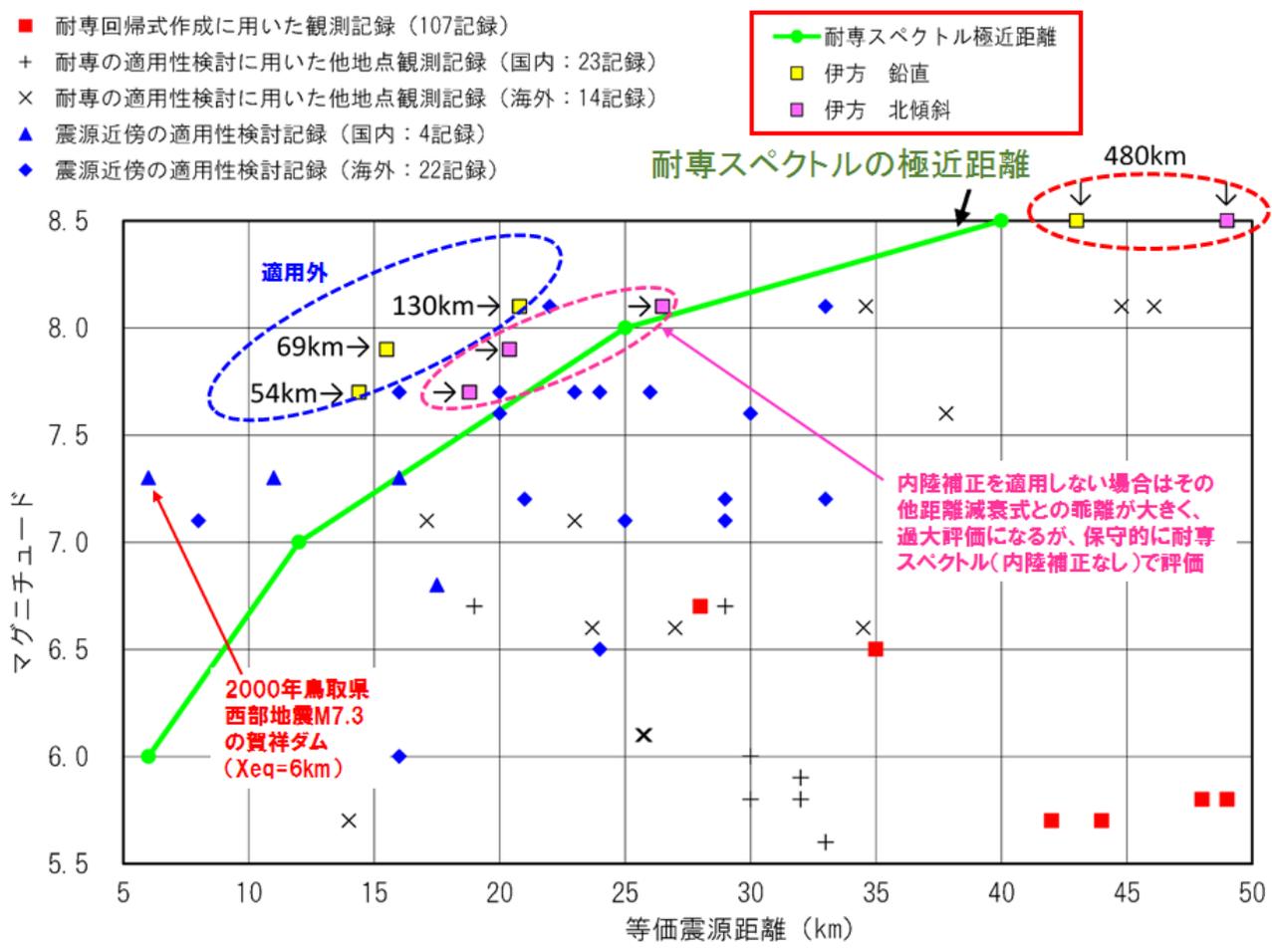


図 15: 耐専スペクトルの作成・適用性確認に用いられた地震データの等価震源距離 X_{eq} と気象庁マグニチュード M [27]

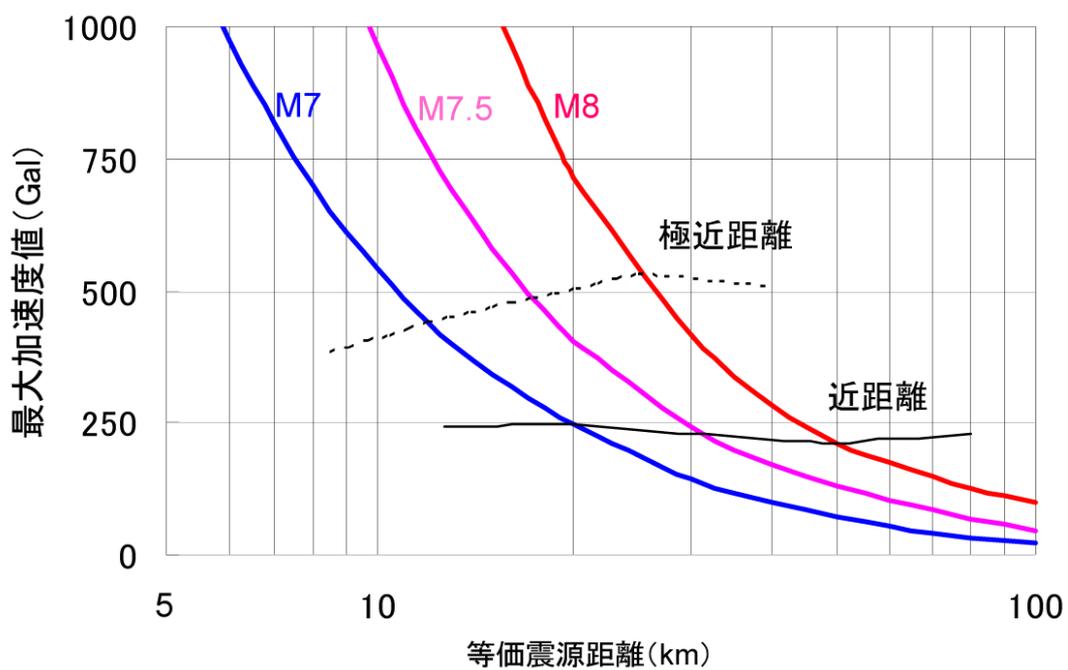


図 16: 耐専スペクトルにおける等価震源距離と地震動の最大加速度 [17] (この図から, 伊方 3 号における「敷地前面海域断層帯 (中央構造線断層帯) 69km」の「北傾斜 (M7.9, $X_{eq} = 20.4\text{km}$)」は 650 ガル弱, 適用外とされた「鉛直 (M7.9, $X_{eq} = 15.5\text{km}$)」は 900 ガル程度になると読み取れる.)

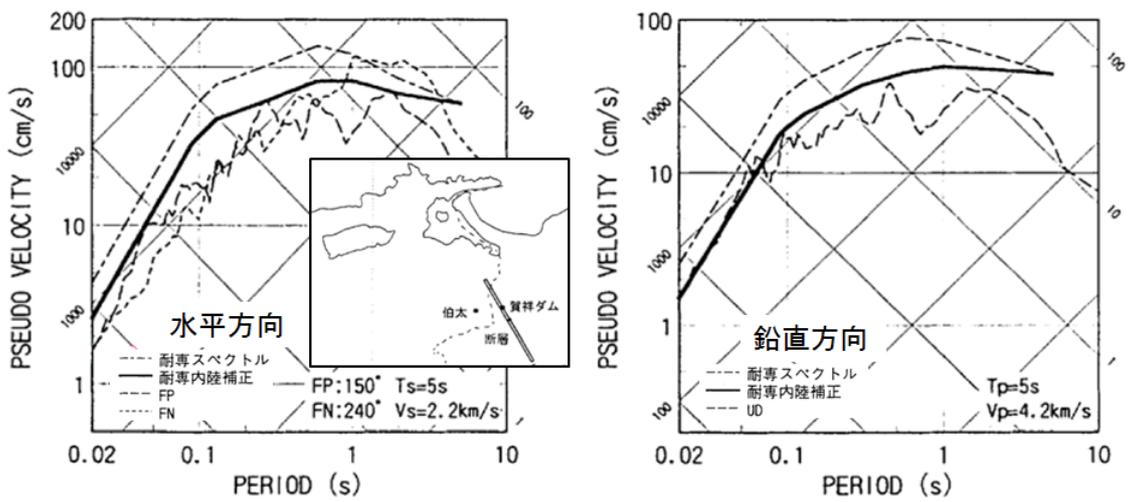


図 17: 2000 年鳥取県西部地震 M7.3 の賀祥ダム ($X_{eq} = 6\text{km}$) での地震観測記録と耐専スペクトルの比較 [33]

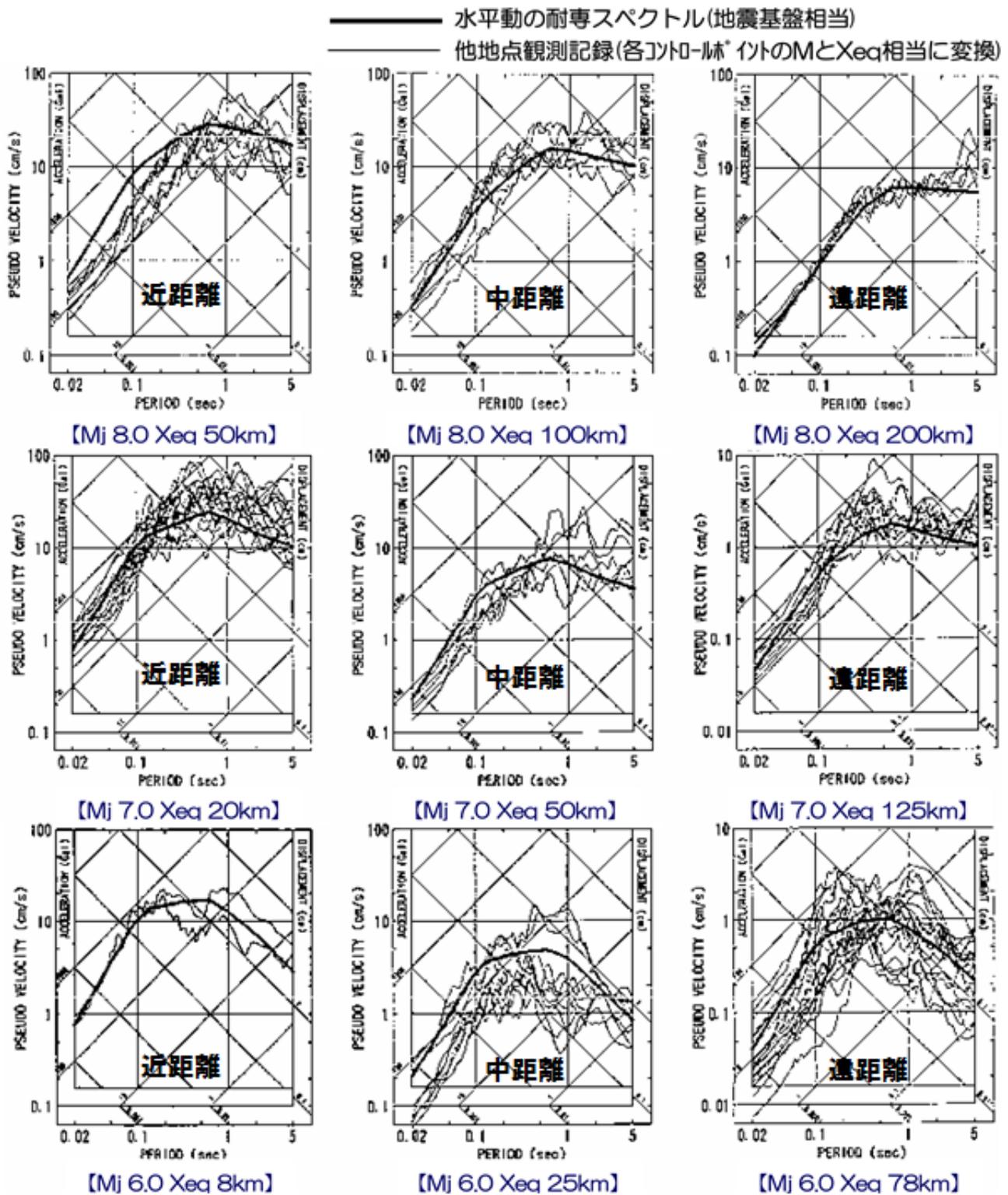


図 18: 耐専スペクトル作成の元になった地震観測記録の応答スペクトル(地震基盤表面はざり波)と耐専スペクトルの関係(気象庁マグニチュード M_j と等価震源距離 X_{eq} の組合せでデータを分類し、その平均像として耐専スペクトルを求めている。震源特性や伝播経路特性などの地域性や偶然変動などによるバラツキの大きいことがわかる。) [33]

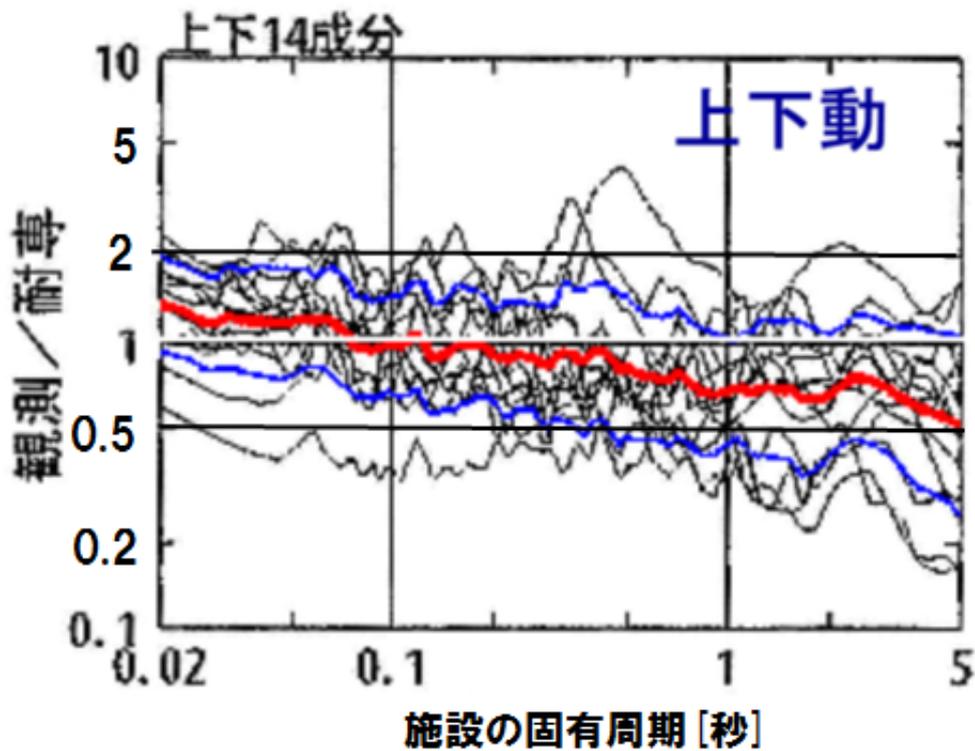
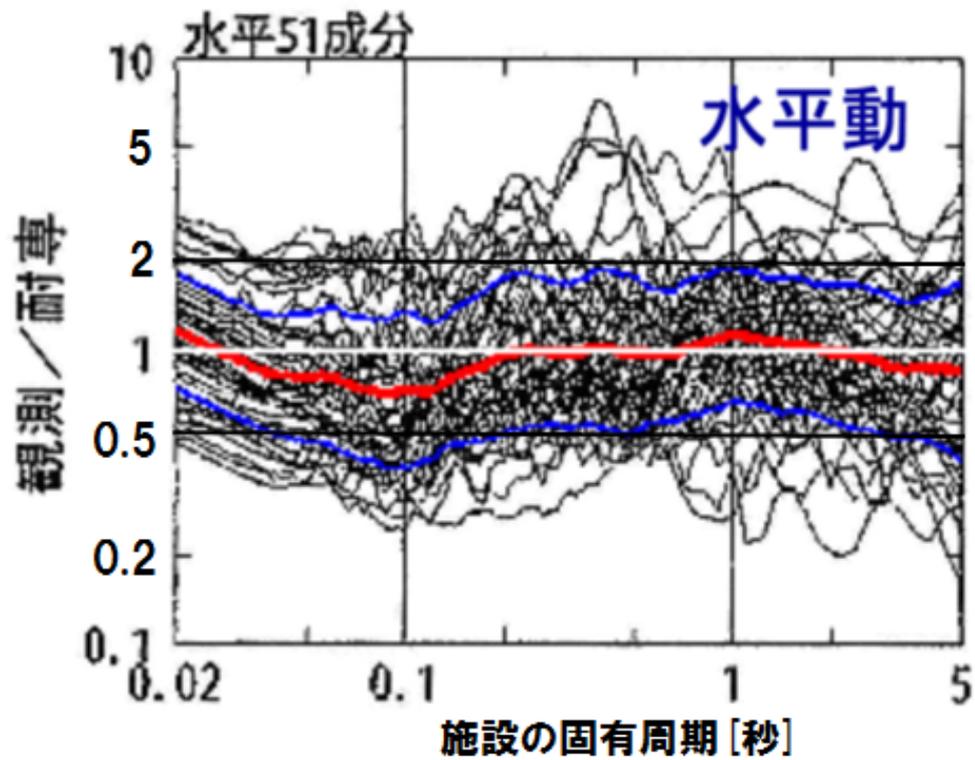
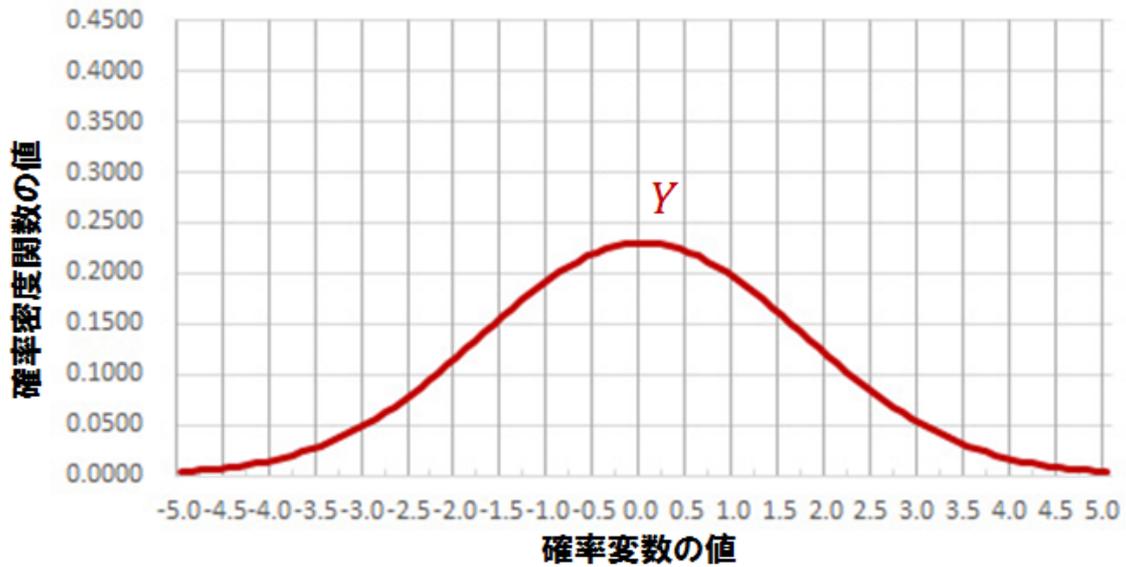
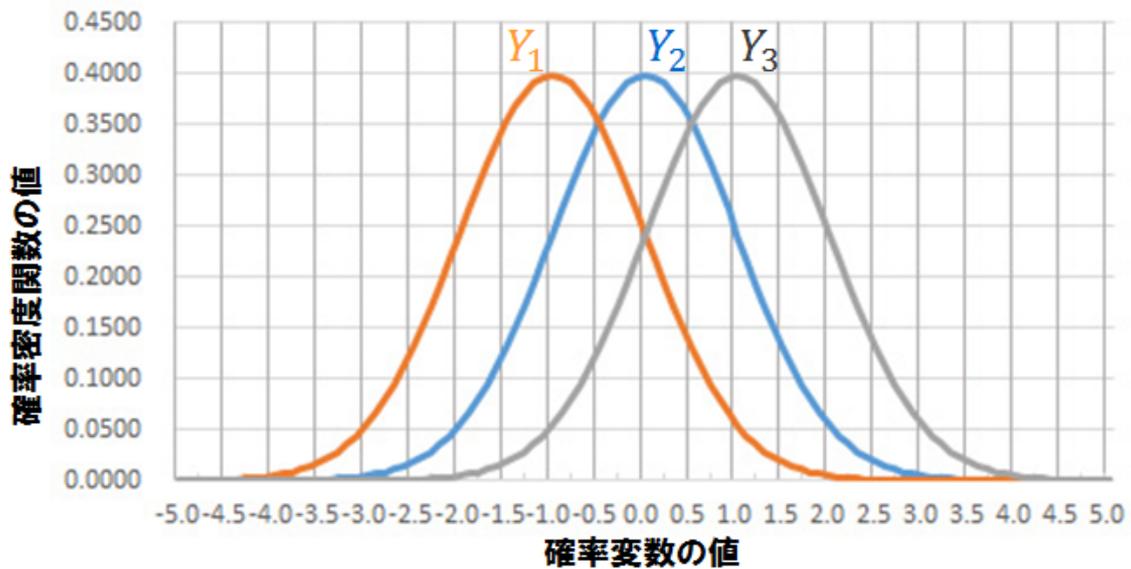


図 19: 国内外の内陸地殻内地震による震源近傍の観測記録 ($M_{6.0} \sim 8.1$, $X_{eq} = 6 \sim 33\text{km}$, 水平 51 記録, 上下 14 記録) の耐専スペクトル (内陸補正有) との残差 (バラツキ)[33] (細線: 各地震観測記録に対する残渣, 太い赤実線: 残差の平均, やや太い青実線: 平均からの「倍半分」の差, 0.5 秒付近では水平動で 6 倍程度, 上下動で 4 倍程度の残差がある)

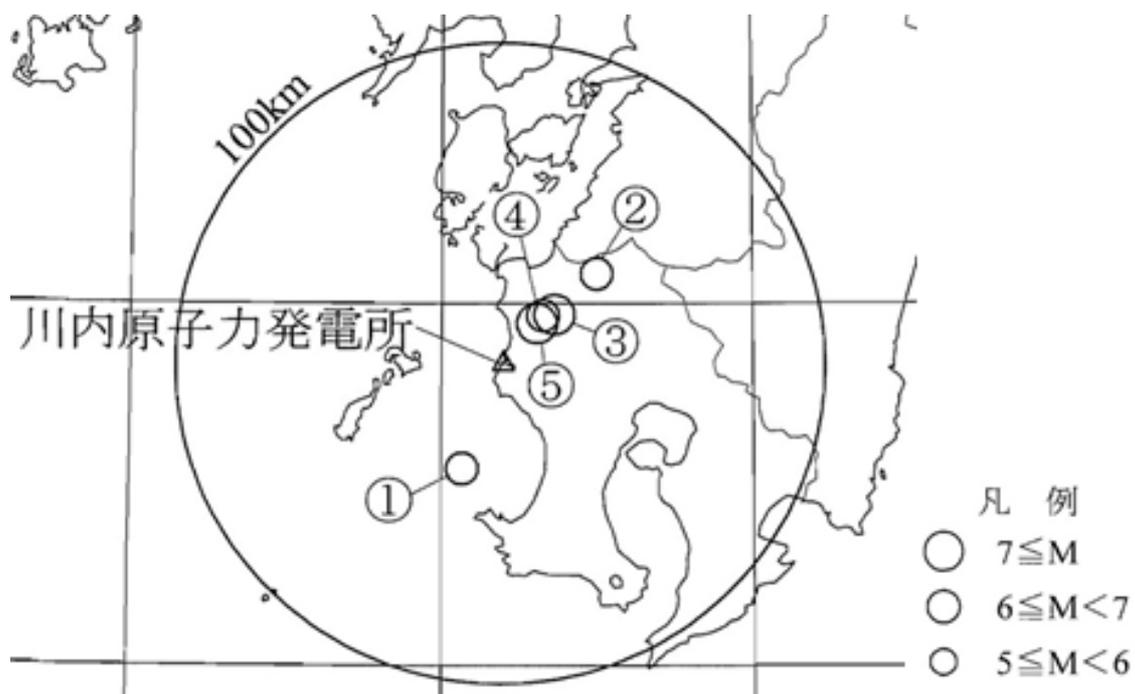


(a) 全平均のバラツキ



(b) 3つの確率変数でバラツキを説明できる場合

図 20: 正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ ($\mu = 0, \sigma^2 = 3$) に従う確率変数 Y のバラツキ (標準偏差 $\sigma = \sqrt{3}$) を $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 1$ の 3 つの確率変数 $Y_1 \sim N(-1, 1^2)$, $Y_2 \sim N(0, 1^2)$, $Y_3 \sim N(1, 1^2)$ に分けて説明できる場合 (b) とそうでない場合 (a) の比較



番号	地震名	発生日時
①	九州西側海域の地震	1984年8月15日 3時30分頃
②	鹿児島県北西部の地震	1994年2月13日 2時6分頃
③	鹿児島県北西部地震：本震	1997年3月26日 17時31分頃
④	鹿児島県北西部地震：余震	1997年4月3日 4時33分頃
⑤	鹿児島県北西部地震：本震	1997年5月13日 14時38分頃

図 21: 川内原発で観測された活断層による地震 [18]

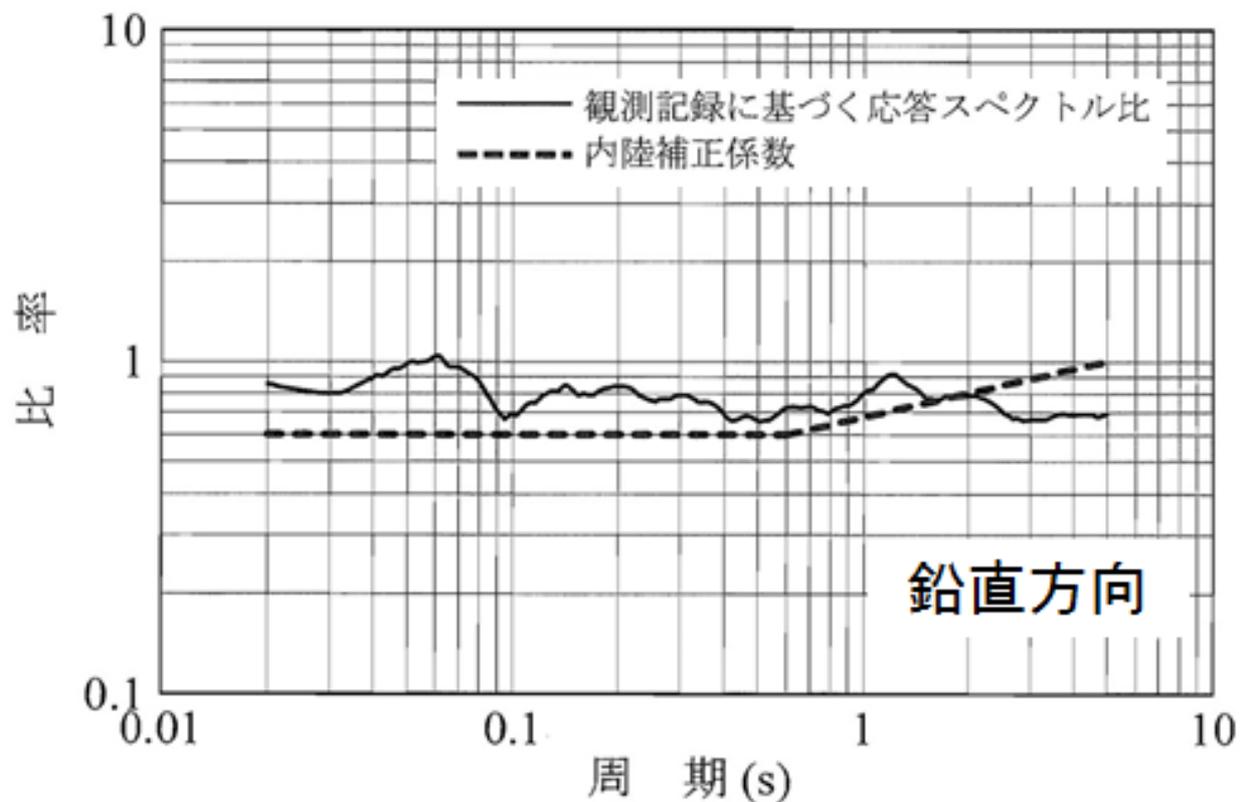
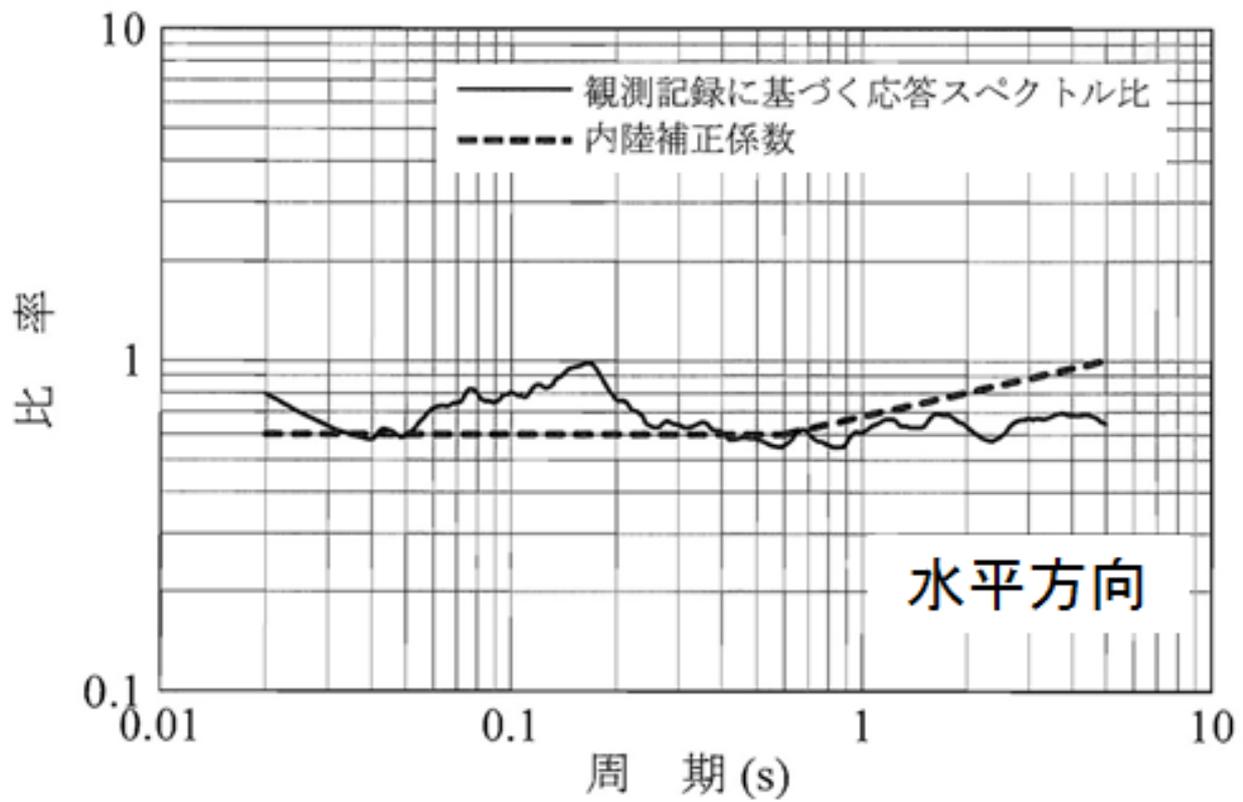


図 22: 川内原発での内陸地殻内地震観測記録に基づく耐震スペクトルの補正係数 [18] (破線は Noda et al.(2002)[21] の示した国内の内陸地殻内地震に対する平均的な補正係数, 実線が川内原発での観測記録に基づく補正係数)

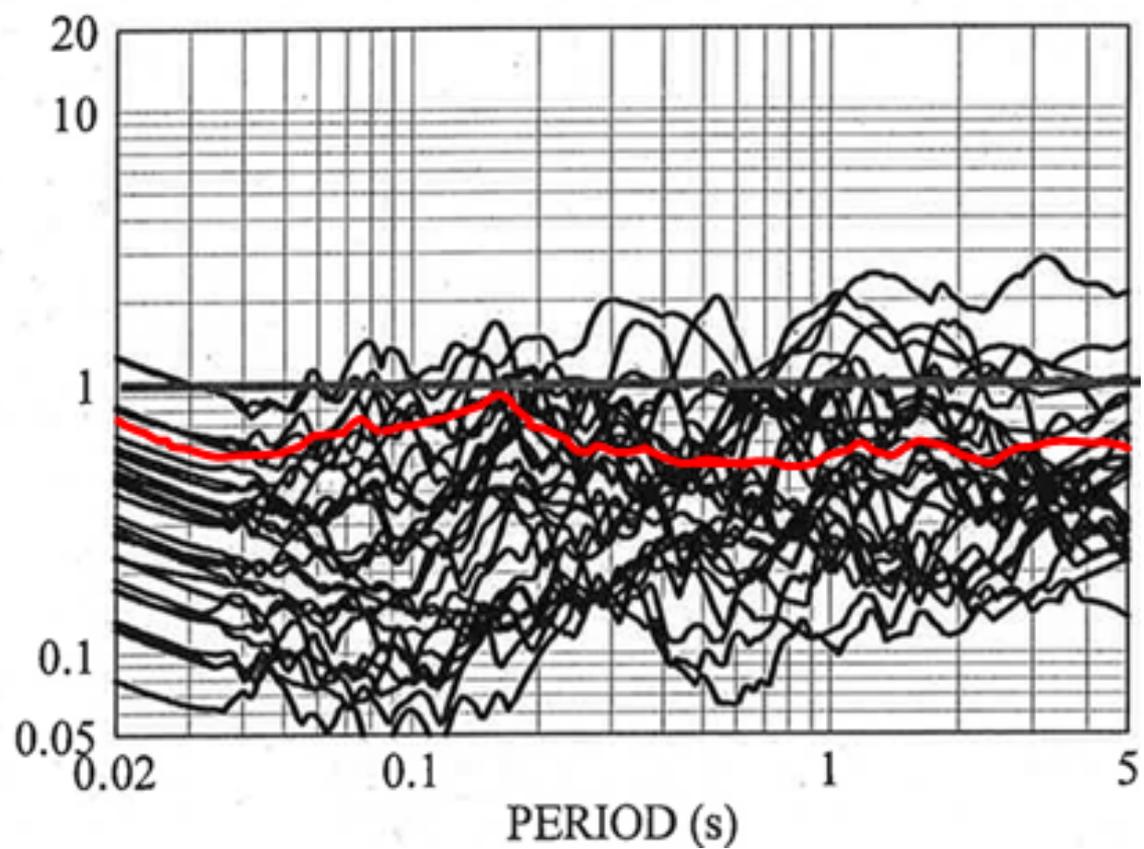


図 23: 川内原発の敷地地盤で得られた観測記録の応答スペクトルと Noda et al.(2002) の方法により求められた応答スペクトルの比 (決定 [35] 別紙図④p.294 : 図 22 水平方向の応答スペクトル比を赤線で追記)

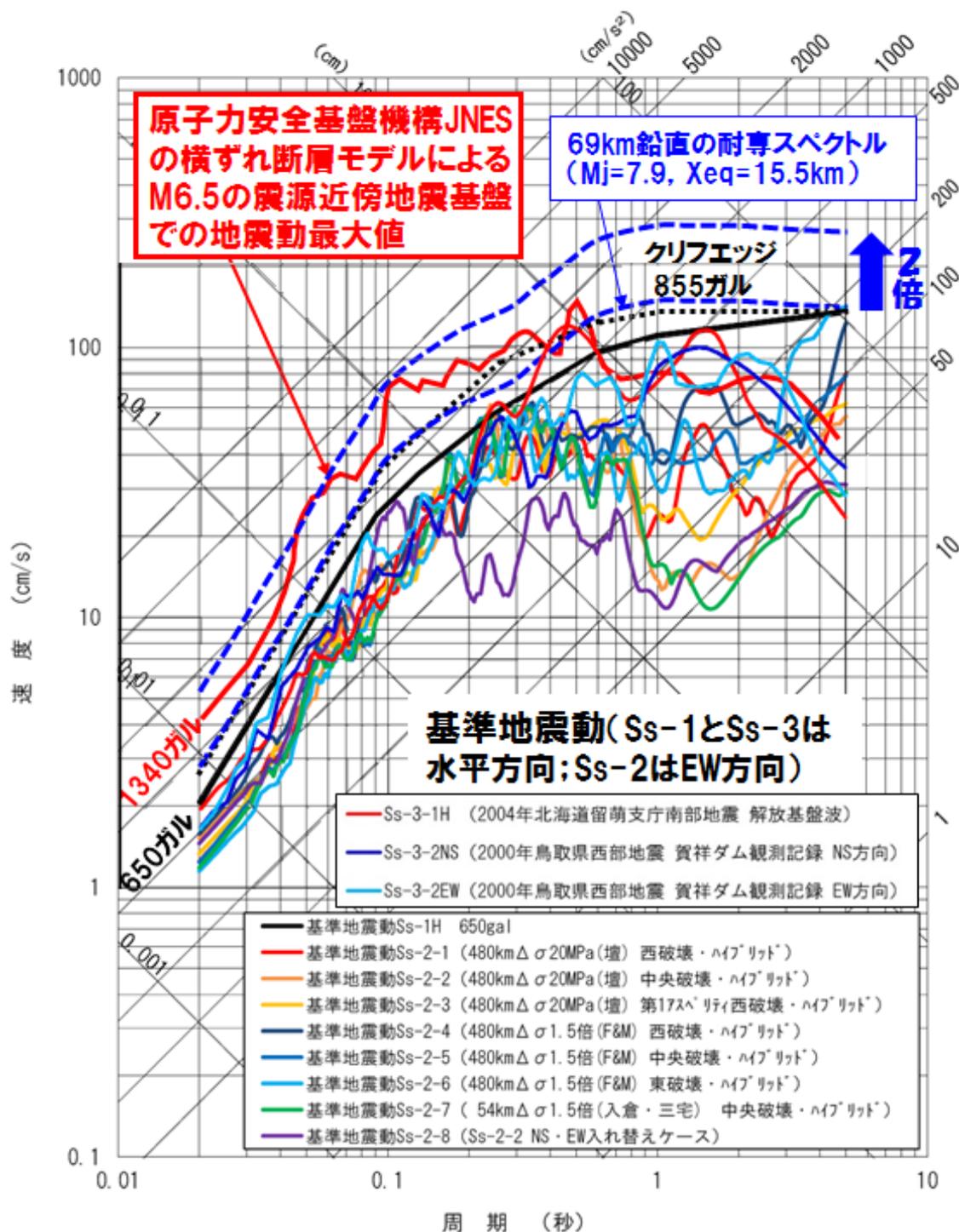


図 24: 伊方 3 号の基準地震動 Ss, クリフエッジ (黒点線), JNES による 1340 ガルの地震動 (赤波線), 敷地前面海域断層群 69km 鉛直の耐専スペクトルとその 2 倍の応答スペクトル (青波線)[6, 27, 28, 7]

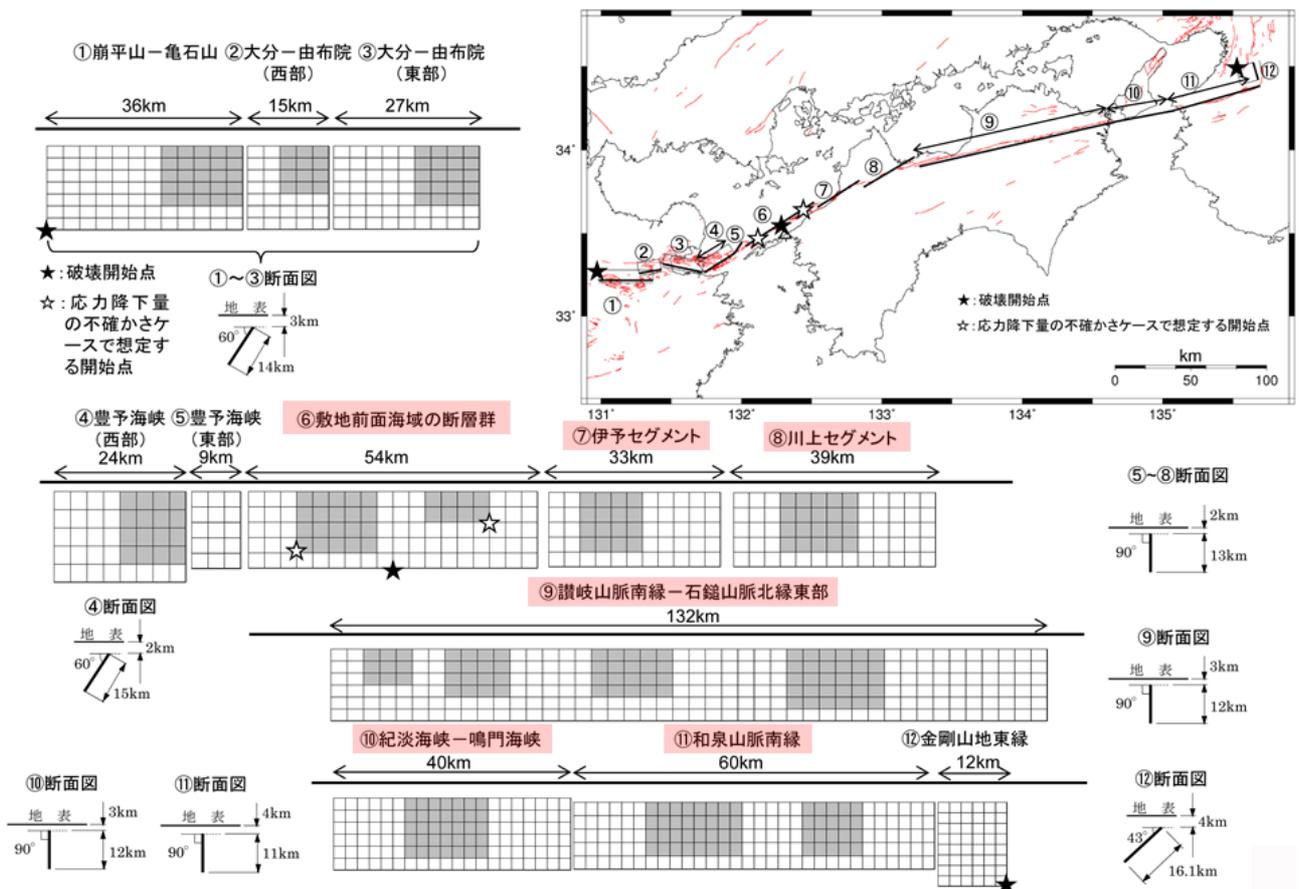


図 25: 伊方 3 号における敷地前面海域の断層群 (中央構造線断層帯) 480km 基本震源モデル [27]

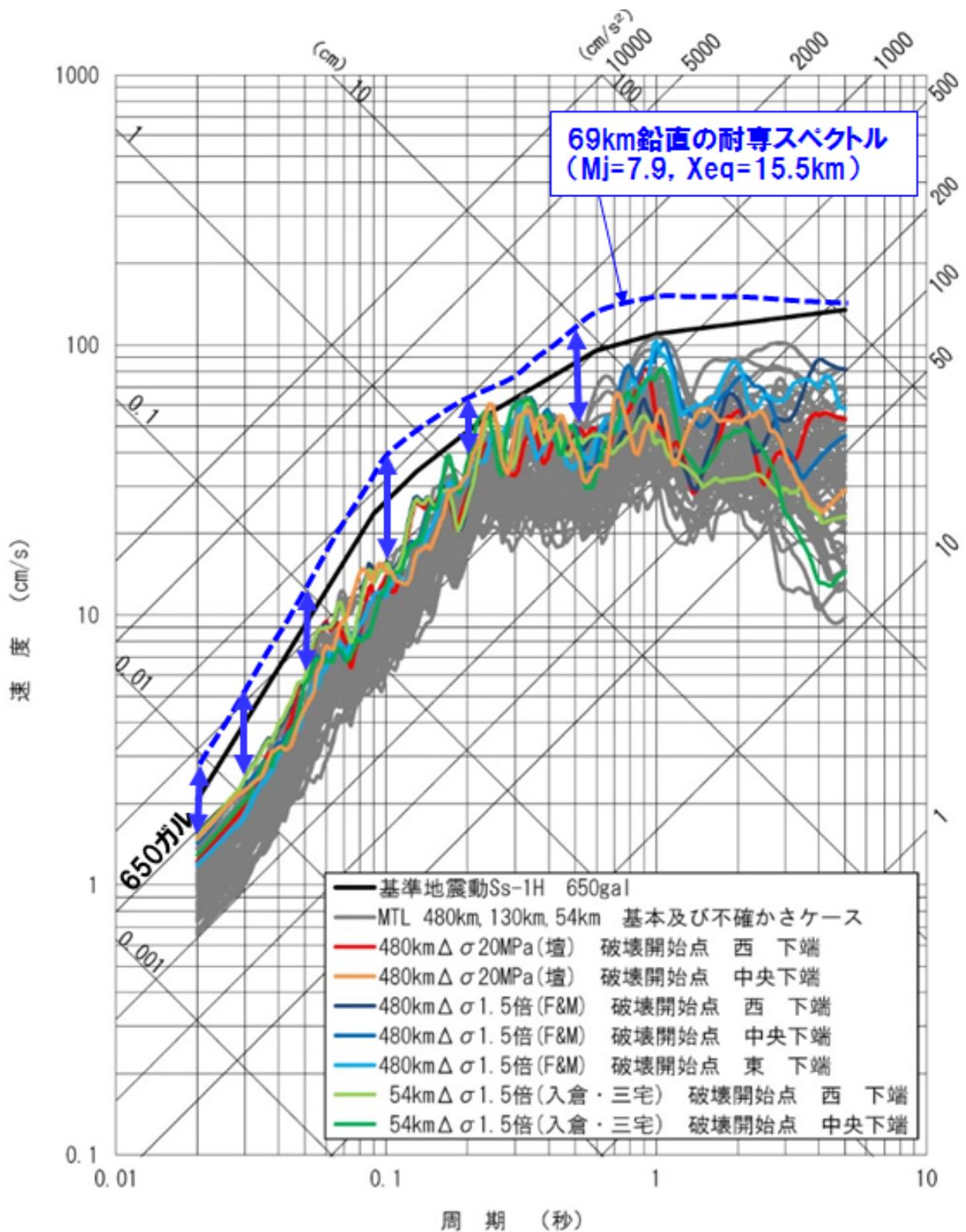


図 26: 伊方 3 号における敷地前面海域断層群 (中央構造線断層帯) の断層デルによる地震動評価結果 (EW 方向: 全ケース重ね書き) と 69km 鉛直耐専スペクトルの比較

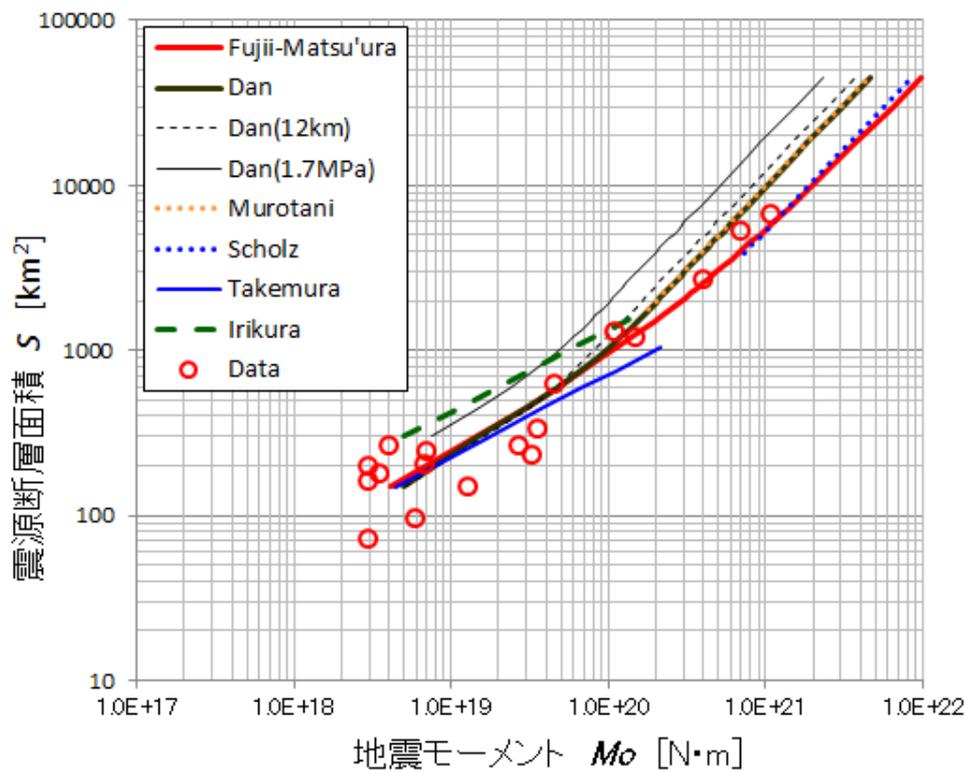


図 27: 壇ら (2011)[4] および Fujii-Matsu'ura (2000)[5] と他の $S - M_o$ 関係式との関係 (赤丸の Data は Fujii-Matsu'ura(2000) の用いた地震データで、右上のカナダ 3 地震と米 2 地震以外はすべて武村 (1998) の用いた国内地震データに含まれる。壇ら (2011) もこれらの国内データを用いている。入倉ら (2001) は国内データを一部含むが大半が北米中心のデータである。壇らの関係式を使って武村式ではなく入倉式に回帰させると、「Dan(1.7MPa)」の細線のようにになってしまう。)

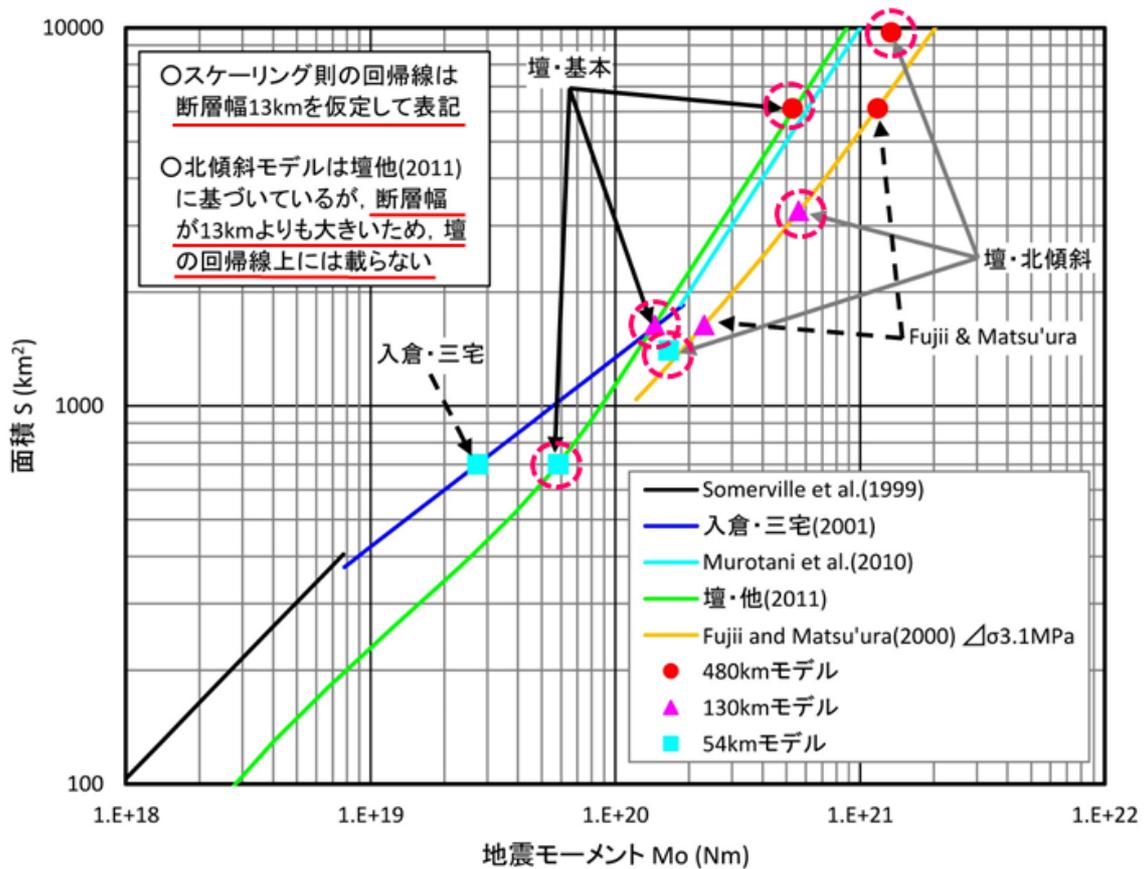


図 28: 四国電力による設定したパラメータの検証 [27] (赤丸破線で囲われた 6 点 (地震観測データではなく壇らの式を誤用して得た計算値) は本来、壇らの回帰線 (図 27 の黒太線) 上に来なければならないが、かなりずれている。この図の断層幅 13km の回帰線そのものが図 27 の「断層幅 12km の回帰線 (黒破線)」と同様に壇らの回帰線 (図 27 の黒太線) から左へずれている)

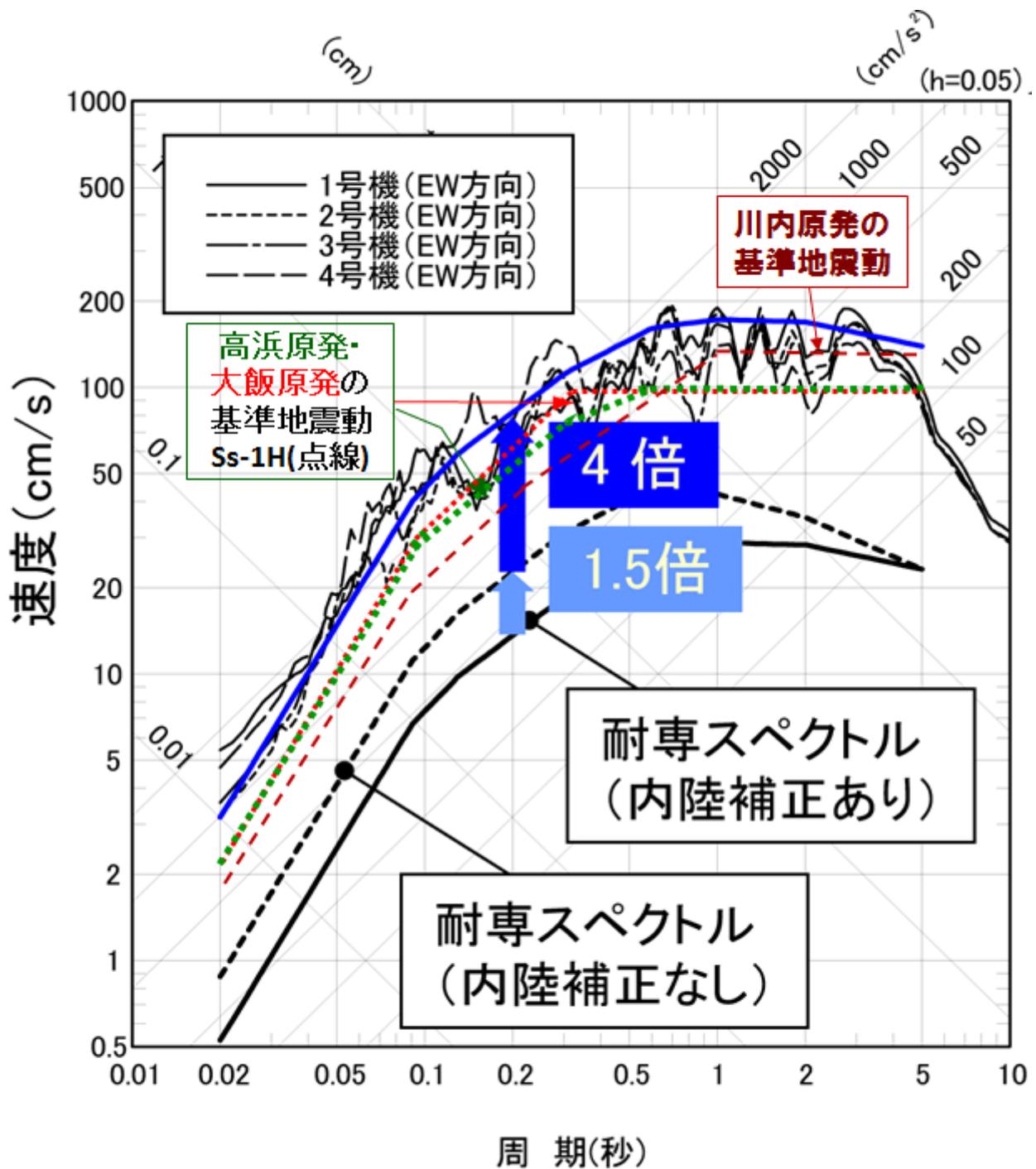


図 29: 柏崎刈羽原発 1~4 号での新潟県中越地震時の解放基盤表面地震動はざとり波の応答スペクトル (東西 EW 方向) [32] (東電が推定した解放基盤表面はざとり波の最大加速度は 1699gal(1 号), 1011(2 号), 1113(3 号), 1478(4 号), 766(5 号), 539(6 号), 613(7 号) である)

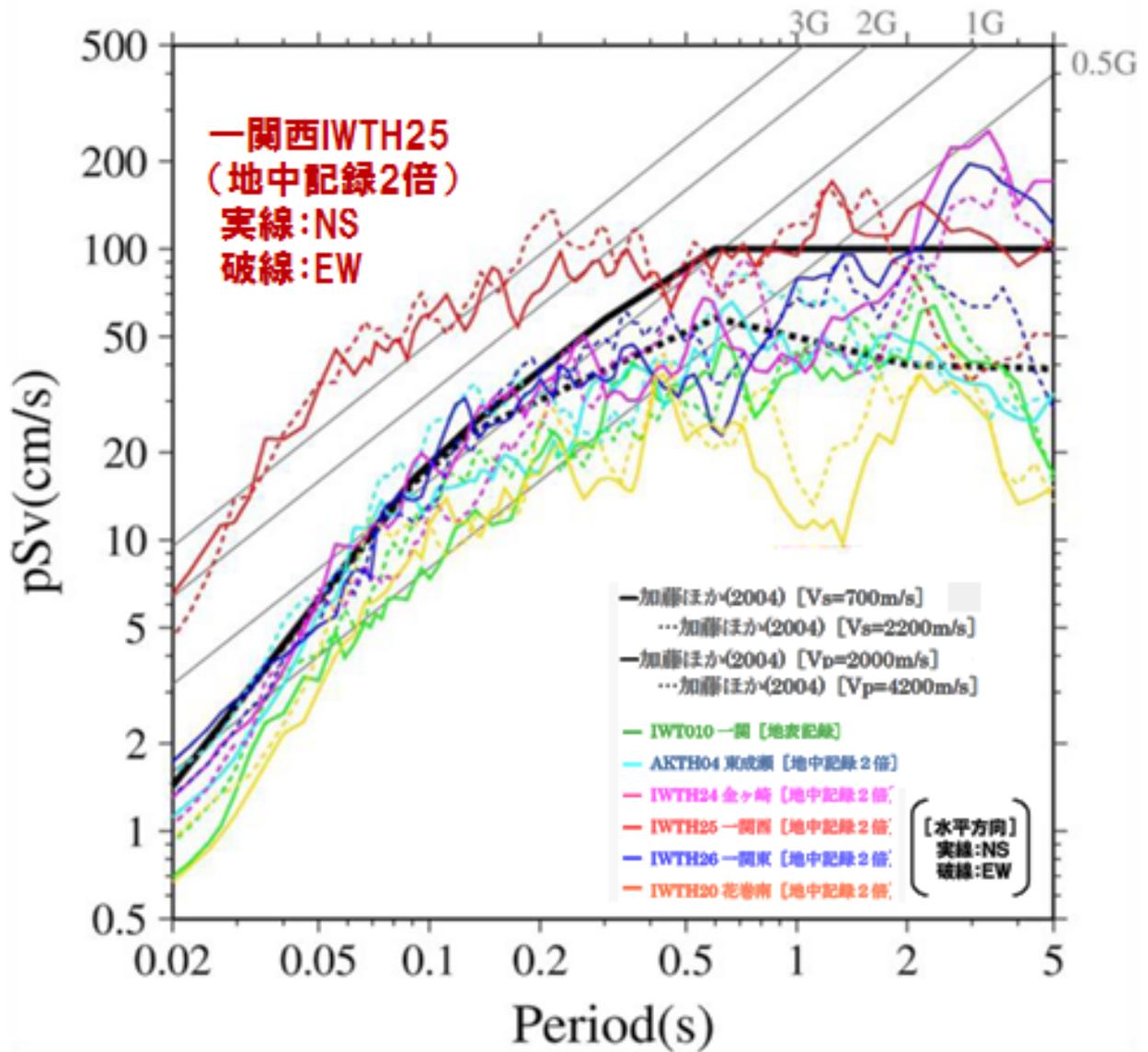


図 30: 岩手・宮城内陸地震 M7.2 で観測された地中地震観測記録の応答スペクトル [9] を 2 倍にした「はぎとり波」相当の応答スペクトル [10] (一関西 IWTH25 観測点の「はぎとり波」は NS 方向で 2,000 ガルになり、短周期側で大きく盛り上がっている)

表 1: 伊方 3 号の基準地震動とその最大加速度 [gal] (cm/s^2 と同じ) [27, 28]

基準地震動		NS方向	EW方向	UD方向
震源を特定して策定する地震動 (耐専スペクトルなど「応答スペクトルによる方法」で作成)				
Ss-1	設計用模擬地震波 (敷地前面海域の断層群 69km(傾斜角 30 度ケース)の耐専スペクトルによる)	650		377
震源を特定して策定する地震動 (「断層モデルによる方法」で作成)				
Ss-2-1	敷地前面海域の断層群 (中央構造線断層帯) 480km 連動・ 壇の手法・ $\Delta\sigma$ 20MPa・西破壊	579	390	210
Ss-2-2	敷地前面海域の断層群 (中央構造線断層帯) 480km 連動・ 壇の手法・ $\Delta\sigma$ 20MPa・中央破壊	456	478	195
Ss-2-3	敷地前面海域の断層群 (中央構造線断層帯) 480km 連動・ 壇の手法・ $\Delta\sigma$ 20MPa・第一アスペリティ西破壊	371	418	263
Ss-2-4	敷地前面海域の断層群 (中央構造線断層帯) 480km 連動・ Fujii-Matsu'ura の手法・ $\Delta\sigma$ 1.5 倍・西破壊	452	494	280
Ss-2-5	敷地前面海域の断層群 (中央構造線断層帯) 480km 連動・ Fujii-Matsu'ura の手法・ $\Delta\sigma$ 1.5 倍・中央破壊	452	388	199
Ss-2-6	敷地前面海域の断層群 (中央構造線断層帯) 480km 連動・ Fujii-Matsu'ura の手法・ $\Delta\sigma$ 1.5 倍・東破壊	291	360	201
Ss-2-7	敷地前面海域の断層群 (中央構造線断層帯) 54km・ 入倉・三宅の手法・ $\Delta\sigma$ 1.5 倍・中央破壊	458	371	178
Ss-2-8	Ss-2-2 の NS と EW の入れ替え	478	456	195
震源を特定せず策定する地震動 (地震観測記録等に基づいて作成)				
Ss-3-1	2004 年北海道留萌支庁南部地震 M6.1 の解放基盤波	620		320
Ss-3-2	2000 年鳥取県西部地震 M7.3 の賀祥ダム (監査廊) の観測記録	528	531	485

表 2: 伊方 3 号における敷地前面海域断層群 54km 基本ケース (鉛直) の震源パラメータ *1[27]

	地震モーメント M_o [Nm] (比)	短周期レベル A [Nm/s ²]	応力降下量 ($\Delta\sigma, \Delta\sigma_a, 1.5\Delta\sigma_a$ or 20MPa)	S_a/S ($=\Delta\sigma/\Delta\sigma_a$)
壇ら (2011) の手法に基づく (四国電力) *2				
480km モデル	6.08×10^{19} (2.22)	1.56×10^{19}	(3.4MPa, 12.2MPa, 20MPa)	0.279
130km モデル	6.20×10^{19} (2.26)			
54km モデル	5.84×10^{19} (2.13)			
断層幅 12km で壇ら (2011) の回帰線にあわせたモデル (引用者が算出) *2				
480km モデル	7.69×10^{19} (2.81)	2.49×10^{19}	(4.3MPa, 19.5MPa, 29.3MPa)	0.22
130km モデル	7.85×10^{19} (2.86)			
54km モデル	7.38×10^{19} (2.69)			
Fujii-Matsu'ura(2000) の手法に基づく (四国電力: ただし, 54km モデルは引用者が算出) *3				
480km モデル	1.35×10^{20} (4.93)	1.65×10^{19}	(3.1MPa, 14.4MPa, 21.6MPa)	0.215
130km モデル	9.92×10^{19} (3.62)			
54km モデル	6.69×10^{19} (2.44)			
入倉・三宅 (2001)+Fujii-Matsu'ura の手法に基づく (四国電力) *4				
54km モデル	2.74×10^{19} (1.00)	1.65×10^{19}	(3.1MPa, 14.4MPa, 21.6MPa)	0.215
入倉・三宅 (2001)+断層モデルのレシピから引用者が算出 (上段: A 法, 下段: $S_a/S = 0.22$ 法) *5				
54km モデル	2.74×10^{19} (1.00)	1.60×10^{19}	(3.6MPa, 13.4MPa, 20.1MPa)	0.267
	2.74×10^{19} (1.00)	1.60×10^{19}	(3.6MPa, 16.3MPa, 24.5MPa)	0.22
松田式で地震規模を求め断層面積を広げる修正レシピから引用者が算出 ($S_a/S = 0.22$ 法) *6				
54km モデル	5.36×10^{19} (1.96)	2.00×10^{19}	(5.0MPa, 22.5MPa, 33.7MPa)	0.22

*1: 敷地前面海域断層群 54km 基本ケースの震源断層は、傾斜角 90 度 (鉛直) の右横ずれ断層で、上端深さ 2km, 断層長さ $L = 54.0$ km, 断層幅 $W = 13.0$ km, 断層面積 $S = 702.0$ km², 剛性率 $\mu = 3.31 \times 10^{10}$ N/m², S 波速度 $\beta = 3.5$ km/s, 密度 $\rho = 2.7$ g/cm³, 破壊伝播速度 $V_r = 2.5$ km/s である。480km と 130km のモデルにおいては、カスケード方式 (断層面積に比例して地震モーメントを配分) で、全体の一部をなすものとして 54km 断層群の震源パラメータが算出されている。

*2: 壇ら (2011)[4] は、Irie et al.(2010)[11] の動力学的断層破壊シミュレーション結果から導かれた関係式 $\Delta\sigma = M_o(0.5 + 2 \exp(-L/W_{\max})) / (SW_{\max})$ を国内 9 地震, 海外 13 地震のデータに当てはめて平均動的応力降下量を求め、その幾何平均として $\Delta\sigma = 3.4$ MPa を導いている。その際、断層面積 S と断層長さ L は各地震データの値を用いているが、断層幅は $W = S/L$ ではなく、すべて $W_{\max} = 15$ km としている。つまり、 $\Delta\sigma = 3.4$ MPa と $W_{\max} = 15$ km はペアになっている。壇らの回帰式を用いて地震モーメント M_o の平均像を求めるのであれば、 $W_{\max} = 15$ km とすべきところ、四国電力は全体の断層帯の平均断層幅 (480km モデルで 12.7km, 130km モデルと 54km モデルで 13.0km) を用いている。その結果、壇らの回帰線からずれる結果になっている。こうして得た全体の地震モーメントを断層面積に比例して配分している。たとえば、480km モデルでは、全体の断層面積が 6124.2km², 地震モーメントが 5.30×10^{20} Nm になるため、54km モデルの地震モーメントは $M_o = 5.30 \times 10^{20} \times (702.0/6124.2) = 6.08 \times 10^{19}$ Nm となっている。壇らの用いた国内 9 地震の平均断層幅は 12.0km なので、 $W_{\max} = 12.0$ km として、壇らの回帰線に合うように調整すると $\Delta\sigma = 4.3$ MPa になり、「壇ら (2011) の回帰線にあわせたモデル」のように、地震モーメントは壇らの回帰線上に載り、短周期レベルや応力降下量も大きくなる (アスペリティ面積比は 0.279 では大きすぎるため、断層モデルのレシピに従い $S_a/S = 0.22$ とした)。

*3: Fujii-Matsu'ura(2000) は、2次元のトランスフォーム・プレート境界での準静的なテクトニックローディングによる有限長断層運動シミュレーションから経験式 $M_o = WL^2\Delta\sigma / (aL + b)$ を導き、これを国内外の地震データに回帰させて、断層平均応力降下量を $\Delta\sigma = 3.1$ MPa と求めている。ただし、リソスフェアの厚さは 30km, 剛性率 $\mu = 4.0 \times 10^{10}$ N/m², $a = 1.4 \times 10^{-2}$, $b = 1.0$, $W = 15$ km としている。ここでも、断層幅は 15km であり、12~13km の震源断層に適用する際にはこの違いを考慮する必要がある。しかし、四国電力にも原子力規制委員会にも、この違いを考慮した形跡は見られない。こうして得た全体の断層帯に対する地震モーメントを断層面積に応じて 54km モデルに比例配分している。

*4: 四国電力は入倉・三宅の手法を用いる際、短周期レベルや応力降下量を通常のレシピに従って求めているのではなく、レシピでは 100km 以上の「長大な断層」に適用すべきとされている Fujii-Matsu'ura の手法を用いている。

*5: 通常の断層モデルのレシピに従い、入倉・三宅の手法で地震規模を求め、短周期レベルや応力降下量についても通常のレシピに従って求めた。上段の「A 法」とは短周期レベルからアスペリティ総面積を求める方法で、下段の「 $S_a/S = 0.22$ 法」とはアスペリティ総面積を断層面積の 22% に固定する方法である。A 法では、断層面積が大きくなるほどアスペリティ面積の全断層面積との比 S_a/S が大きくなり、応力降下量が小さくなる。そのため、地震調査研究推進本部のレシピでは、長大な断層に関しては $S_a/S = 0.22$ 法を用いるように推奨し、「内陸地震によるアスペリティ総面積の占める割合は、断層総面積の平均 22% (Somerville et al., 1999), 15%~27% (宮腰・他, 2001) であり、拘束条件にはならないが、こうした値も参照しておく必要がある」としている。壇らの $S_a/S = 0.279$ は平均像からかなり離れ、27% の上限も超えている。

*6: 松田式 $\log_{10} L = 0.6M - 2.9$ で断層長さ L [km] から気象庁マグニチュードを求め、換算式 $\log_{10} M_o$ [Nm] = $1.17M + 10.72$ で地震モーメントを求め、修正レシピに従い、断層長さを $L = 54.0 + 5.0 = 59.0$ km, 断層幅を $W = 13.0 + 2.0 = 15.0$ km, したがって、断層面積を $S = 885.0$ km² として通常の断層モデルのレシピを用いた。この場合、A 法では $S_a/S = 0.411$ と過大になるため、 $S_a/S = 0.22$ 法の結果だけを示した。この場合の地震モーメントは壇らの 54km モデルや Fujii-Matsu'ura の 54km モデルにおける地震モーメントの値にほぼ等しい。こうなるのは、この規模の断層長さに対応する地震データには、壇らも Fujii-Matsu'ura も国内地震データを用いて回帰式を導いているからであり、入倉・三宅の手法による地震モーメントがこれらの半分程度に小さくなっているのは、彼らの回帰式が北米中心の地震データに基づいているからである。

表 3: 壇ら (2011)[4] が用いた地震データと $W_{\max} = W$ としたときの $\Delta\sigma^{\dagger}$ の変動量 $\Delta\sigma^{\dagger}/\Delta\sigma^{\#}$ *1

地震発生年 地震名	M, M_W	L km	W_{rup} km	S_{rup} km ²	S km ²	W km	M_o 10 ²⁰ N·m	$\Delta\sigma^{\#}$ *2 bar	$\frac{\Delta\sigma^{\dagger}}{\Delta\sigma^{\#}}$
1891 濃尾	M8.0	80, 34	15, 13	1642	1368	12	1.5	37	1.3
1927 北丹後	M7.3	35	13	455	379	11	0.46	70	1.7
1930 北伊豆	M7.3	22	12	264	220	10	0.27	102	2.0
1943 鳥取	M7.2	33	13	429	358	11	0.36	61	1.7
1948 福井	M7.1	30	13	390	325	11	0.33	66	1.7
1978 伊豆大島	M7.0	17	10	170	142	8	0.11	81	2.7
1995 兵庫県南部	M7.3	60	20	1200	1000	17	0.18	6	0.87
2000 鳥取県西部	M7.3	26	14	364	303	12	0.0862	19	1.5
2005 福岡県西方沖	M7.0	24	20	480	400	17	0.115	16	0.84
国内算術平均 (括弧内は幾何平均)		40.1	14.4	599	499	12.0		51 (38)	(1.5)
1906 San Francisco	Mw 7.9	432	12	5148	4290	10	8.32	64	1.5
1976 Motagua	Mw 7.5	257	13	3341	2784	11	2.04	24	1.4
1976 Tangshan	Mw 7.6	70	24	1680	1400	20	2.77	66	0.69
1988 Langcang-Gengma	Mw 7.0	80	20	1600	1333	17	0.366	9	0.89
1990 Luzon Island	Mw 7.7	120	20	2400	2000	17	4.07	68	0.90
1992 Landers	Mw 7.3	69	15	1035	863	13	1.06	45	1.2
1997 Ardakul	Mw 7.2	100	15	1500	1250	13	0.735	20	1.2
1997 Manyi	Mw 7.5	175	15	2625	2188	13	2.23	34	1.2
1999 Kocaeli	Mw 7.6	141	23.3	3285.3	2738	19	2.88	35	0.77
1999 Hector Mine	Mw 7.1	74.27	20	1485.4	1238	17	0.598	16	0.88
1999 Duzce	Mw 7.1	49	24.5	1200.5	1000	20	0.665	23	0.62
2001 Kunlun	Mw 7.8	400	30	12000	10000	25	5.9	20	0.60
2002 Denali	Mw 7.8	292.5	18	5265	4388	15	7.48	57	1.0
海外算術平均 (括弧内は幾何平均)		174	19.2	3274	2729	16.0		37 (31)	(0.95)
全体算術平均 (括弧内は幾何平均)		119	17.2	2180	1817	14.4		43 (34)	(1.1)

*1: 壇ら (2011)[4] は、国内平均、海外平均、全体平均を表記していないが、ここでは算術平均を記載した。壇らは応力降下量については幾何平均をとって「平均的な値」としているようなので、その値も括弧内に示した。また、壇らは、震源断層の長さ L 以外は、断層面積 S と破壊面積 S_{rup} 、断層幅 W と破壊幅 W_{rup} を区別している。震源断層は地下 3km から地下 18km の間に広がると見なし、震源断層幅を一律に $W_{\max} = 15\text{km}$ と設定して地震データに回帰させている。壇らは震源断層の S と W の値を表記していないが、 $S = (15/18)S_{rup}$ 、 $S_{rup} = LW_{rup}$ としていることから、 $S = LW$ と置いて $W = (15/18)W_{rup}$ を求め、表記した。

*2: 壇らは応力降下量として、静的応力降下量 $\Delta\sigma$ ではなく、Irie et al.(2010)[11] の動力的断層破壊シミュレーション結果を用いる関係上、動的平均応力降下量 $\Delta\sigma^{\#}$ を用いている。前者は断層破壊の前後でのせん断応力の差になるが、後者は断層破壊活動中のせん断応力の差であるため、後者のほうが大きい。せん断応力のシミュレーションモデル上は両者に差がないため、同じ値と見なしてよい。また、1bar=0.1MPa である。

$\Delta\sigma^{\#}$ を求める際、壇らの式 (??) の S には $S = (15/18)S_{rup} = LW$ の値を用い、 LW_{\max} の値を用いてはいない。そこで、これに合わせて、 $W_{\max} = 15\text{km}$ を $W_{\max} = W$ としたときの $\Delta\sigma^{\#}$ の変動量 $\Delta\sigma^{\dagger}/\Delta\sigma^{\#}$ を求め、右端の列に示した。

$\Delta\sigma_a^{\#}$ を求める際には式 (??) の L と S を L_{model} と $S_{\text{model}} = L_{\text{model}}W_{\max}$ に置き換えて、 $\Delta\sigma^{\#} = 3.4\text{MPa}$ となるように L_{model} と S_{model} の値を求め、 L_{model} の値を式 (??) の L に代入している。ここでも、 $W_{\max} = 15\text{km}$ としている。壇らは短周期レベル A の値が得られている 5 地震にこれを適用し、表 4 のように $\Delta\sigma_a^{\#}$ の値を求めている。そこで、 $(L_{\text{model}}, W_{\max}) = (L, W)$ としたときの $\Delta\sigma_a^{\#}$ の変動量 $\Delta\sigma_a^{\dagger}/\Delta\sigma_a^{\#}$ を求め、表 4 の右端列に示した。

表 4: 壇ら (2011)[4] の方法に基づく震源断層モデルの面積 S_{model} , 断層長さ L_{model} , アスペリティ平均動的応力降下量 $\Delta\sigma_a^{\#}$ および $(L_{\text{model}}, W_{\text{max}}) = (L, W)$ としたときの $\Delta\sigma_a^{\#}$ の変動量 $\Delta\sigma_a^{\dagger}/\Delta\sigma_a^{\#}$

発生年 地震名	A $10^{19}\text{N}\cdot\text{m}/\text{s}^2$	S_{model} km^2	$\frac{S_{\text{model}}}{S}$	L_{model} km	$\frac{L_{\text{model}}}{L}$	$\frac{L_{\text{model}}}{W_{\text{max}}}$	$\frac{L}{W}$	W km	$\Delta\sigma_a^{\#}$ bar	$\frac{\Delta\sigma_a^{\dagger}}{\Delta\sigma_a^{\#}}$
1995 兵庫県南部	1.62	335	0.34	22.3	0.37	1.5	3.6	17	320	1.9
2000 鳥取県西部	0.593	215	0.71	14.3	0.55	1.0	2.2	12	67	1.4
2005 福岡県西方沖	1.09	257	0.64	17.1	0.71	1.1	1.4	17	190	1.3
1992 Landers	1.15	1070	1.2	71.3	1.0	4.8	5.5	13	50	0.85
1999 Kocaeli	3.05	2820	1.0	188	1.3	13	7.3	19	130	1.3
算術平均 (幾何平均)		939		62.6				15.4 (15.1)	15.2 (12.2)	1.34 (1.30)

表 5: 2008 年岩手・宮城内陸地震 M7.2 による強震観測値（加速度 [gal], 速度 [cm/s]） [1]

観測点	3 成分合成	東西	南北	上下
一関西 (地表)	4022 gal	1143	1433	3866
(地中)	1078 gal	1036	748	640
一関西 (地表)	100.1cm/s	71.0	61.5	84.7
(地中)	73.2cm/s	42.2	37.2	68.5

表 6: 主な原子力発電所における原子炉建屋の固有周期（水平南北 NS 方向，東西 EW 方向）[sec]

PWR 原発	NS	EW	BWR 原発	NS	EW
泊 1	0.191	0.226	女川 1	0.244	0.234
泊 2	0.191	0.226	女川 2	0.207	0.203
美浜 1	0.250	0.250	福島第二 1	0.424	0.423
美浜 2	0.240	0.240	福島第二 2	0.458	0.460
美浜 3	0.278	0.280	福島第二 3	0.468	0.473
高浜 1	0.293	0.293	福島第二 4	0.469	0.472
高浜 2	0.293	0.293	柏崎刈羽 1	0.441	0.441
高浜 3	0.226	0.223	柏崎刈羽 2	0.431	0.431
大飯 1	0.185	0.185	柏崎刈羽 3	0.433	0.434
大飯 2	0.185	0.185	柏崎刈羽 4	0.467	0.467
大飯 3	0.212	0.214	柏崎刈羽 5	0.402	0.402
大飯 4	0.214	0.214	柏崎刈羽 6	0.444	0.433
伊方 1	0.236	0.236	柏崎刈羽 7	0.443	0.432
伊方 2	0.184	0.184	浜岡 1	0.250	0.247
伊方 3	0.211	0.193	浜岡 2	0.257	0.256
玄海 1	0.234	0.234	浜岡 3	0.278	0.276
玄海 2	0.265	0.265	浜岡 4	0.279	0.278
玄海 3	0.221	0.230	志賀 1	0.201	0.203
玄海 4	0.214	0.216	島根 1	0.250	0.240
川内 1	0.304	0.304	島根 2	0.229	0.211
川内 2	0.298	0.298	東海第二	0.451	0.452
敦賀 2	0.215	0.216	敦賀 1	0.213	0.213

表 7: 原子力発電所の主要な建屋・構築物および機器・配管類の固有周期の典型例 [sec]

PWR(例) の代表機器名	固有周期
原子炉容器	0.055
使用済燃料ラック	0.042
制御棒駆動装置	0.063
ほう酸タンク	0.078
余熱除去冷却器	0.037
海水ポンプ	0.050
原子炉補機冷却水冷却器	0.041
格納容器スプレイ冷却器	0.037
原子炉格納容器 (PCCV)	0.214
BWR(例) の代表機器名	固有周期
原子炉圧力容器	0.085
使用済燃料貯蔵ラック	0.092
制御棒駆動系水圧制御ユニット	0.043
高圧炉心注水系ポンプ	0.036
残留熱除去系熱交換器	0.032
残留熱除去系ポンプ	0.035
原子炉補機冷却水系熱交換器	0.036
原子炉補機冷却海水ポンプ	0.144
主蒸気逃がし安全弁自動	0.031
減圧機能用アキュムレータ	
可燃性ガス濃度制御系再結合装置	0.049
原子炉格納容器	0.444

表 8: 伊方原子力発電所 1~3 号機の主要な建屋・構築物および機器・配管の固有周期 [sec][23]

対象設備（項目）	1 号機	2 号機	3 号機
原子炉容器（支持構造物）	0.065	0.063	0.053
蒸気発生器（支持構造物）	0.127	0.066	0.112
炉内構造物（炉心そう）	0.065	0.063	0.053
一次冷却材管（本体）	0.127	0.066	0.112
余熱除去ポンプ （基礎ボルト）	≤0.05	≤0.05	≤0.05
余熱除去設備配管（本体）	0.043	0.083	0.085
原子炉格納容器（本体）	0.137	0.153	0.163
原子炉建屋（外周壁）	0.239	0.188	0.193
制御棒クラスタ駆動装置	0.061	0.061	0.063
制御棒クラスタ案内管	0.041	0.040	0.035
燃料集合体	0.357	0.333	0.270

参考文献

- [1] 防災科学技術研究所 (2008): 「平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震において記録されたきわめて大きな強震動について」, 「加速度応答スペクトル & 速度応答スペクトル ($h=5\%$)」
- [2] (財) 地域地盤環境研究所 (2011): 震源を特定せず策定する地震動に関する計算業務報告書 (2011.3)
http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/taishinkojo/pdf/ukeoi_1.pdf
- [3] 中国電力 (2010): 島根原子力発電所基準地震動 S_s の策定について, 第 62 回原子力安全委員会地震・地震動評価委員会及び施設健全性評価委員会 WG3 第 62-7 号および速記録 (2010.3.3)
- [4] 壇一男・具典淑・入江紀嘉・アルズペイマサマン・石井やよい (2011): 長大横ずれ断層による内陸地震の平均動的応力降下量の推定と強震動予測のためのアスペリティモデルの設定方法への応用, 日本建築学会構造系論文集, 第 670 号, 2041-2050.
- [5] Fujii Y. and Matsu'ura M. (2000): Regional Difference in Scaling Laws for Large Earthquakes and its Tectonic Implication, *Pure appl. Geophys.* 157, 2283-2302
- [6] 独立行政法人原子力安全基盤機構 (2005): 震源を特定しにくい地震による地震動の検討に関する報告書 (平成 16 年度), JNES/SAE05-00405 解部報-0004(2005.6)
<https://www.nsr.go.jp/archive/jnes/atom-library/seika/000005757.pdf>
- [7] 原子力安全・保安院 (2012): 四国電力伊方発電所 3 号機の安全性に関する総合的評価 (一次評価) に関する審査書 (2012 年 3 月 26 日)
- [8] 原子力安全・保安院耐震安全審査室 (2012): 活断層による地震動評価の不確かさの考慮について (考え方の整理案), 第 7 回地震・津波に関する意見聴取会 (地震動関係) (2012 年 8 月 17 日)
- [9] 原子力規制委員会 (2013): 震源を特定せず策定する地震動について, 原子力規制委員会 発電用軽水型原子炉施設の地震・津波に関わる新安全設計基準に関する検討チーム第 10 回会合, 震基 10-3(2013.3.22)
- [10] 北海道電力 (2015): 泊発電所 震源を特定せず策定する地震動について (コメント回答), 第 210 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合, 資料 1 (2015.3.20)
- [11] Irie, K., Dan, K., Ikutama, S., Irikura, K. (2010): Improvement of kinetic fault models for predicting strong motions by dynamic rupturing simulation - Evaluation of proportionality constant between stress drop and seismic moment in strike-slip inland earthquakes -, First Kashiwazaki International Symposium on Seismic Safety of Nuclear Installations and Embedded Topical Meetings, 1-16.
- [12] 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, 849-875
- [13] 入倉孝次郎・倉橋奨 (2008): 「2008 年岩手・宮城内陸地震の震源モデルと強震動一なぜ 4000 ガルの強震動が生じたのか」, 日本活断層学会 2008 年度秋季学術大会
- [14] 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2008): 「全国を概観した地震動予測地図」2008 年版, 付録 3. 震源断層を特定した地震の強震動予測手法 (「レシピ」) (平成 20 年 4 月 11 日改訂), 46-74
- [15] 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2009): 震源断層を特定した地震の強震動予測手法 (「レシピ」) (平成 21 年 12 月 21 日改訂)
- [16] 加藤研一・宮腰勝義・武村雅之・井上大榮・上田圭一・壇一男 (2004): 震源を事前に特定できない内陸地殻内地震による地震動レベル-地質学的調査による地震の分類と強震観測記録に基づく上限レベルの検討-, 日本地震工学会論文集, 第 4 巻, 第 4 号, 46-86
- [17] 関西電力株式会社 (2013): 大飯発電所基準地震動の評価について, 第 59 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合, 資料 2-3(2013.12.18)
- [18] 九州電力 (2013): 川内原子力発電所第 1・2 号機の設置変更許可申請書, 添付書類六 (2013.7.8)
- [19] 松田時彦 (1975): 活断層から発生する地震の規模と周期について, *地震第 2 輯*, 第 28 巻, 269-283.
- [20] Murotani, S., Matsushima, S., Azuma, T., Irikura, K., Kitagawa, S. (2010): Scaling Relations of Earthquakes on Inland Active Mega-Fault Systems, *American Geophysical Union, Fall Meeting 2010.S51A-1911*(2010.12).
- [21] Noda, S., Yashiro, K., Takahashi, K., Takemura, M., Ohno, S., Tohdo, M., Watanabe, T. (2002): Response spectra for design purpose of stiff structures on rock sites, *OECD Workshop on the Relations Between Seismological DATA and Seismic Engineering, Istanbul*, 399-408(October, 2002)
- [22] Scholz, C. H. (2002): *The Mechanics of earthquakes and faulting*, second edition, Cambridge University Press
- [23] 四国電力株式会社 (2007): 柏崎刈羽原子力発電所で観測されたデータを基に行う伊方発電所における概略影響検討結果報告書 (2007 年 9 月 20 日)
- [24] 四国電力株式会社 (2013): 伊方発電所の発電用原子炉設置変更許可申請書 (3 号原子炉施設の変更), 添付書類六, 7.5 地震 (2013.7.8)
- [25] 四国電力株式会社 (2013): 伊方発電所地震動評価 中央構造線断層帯の連動 (コメント回答), 原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合 (第 39 回), 資料 1-1(2013 年 10 月 30 日)
- [26] 四国電力株式会社 (2013): 伊方発電所地震動評価, 原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合 (第 14 回), 資料 1-1(2013 年 8 月 28 日)
- [27] 四国電力株式会社 (2014): 伊方発電所 地震動評価 震源を特定して策定する地震動 (中央構造線断層帯地震動評価) と基準地震動の策定 (コメント回答), 第 156 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合, 資料 1-1(2014.11.7)
- [28] 四国電力株式会社 (2014): 伊方発電所 地震動評価 震源を特定せず策定する地震動と基準地震動の策定 (コメント回答), 第 173 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合, 資料 2-1(2014.12.12)
- [29] 島崎邦彦 (2015): 活断層の長さから推定する地震モーメント, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, SSS28-07(2015.5.28)
<http://www2.jpgu.org/meeting/2015/session/PDF/SS28/SSS28-07.pdf>
- [30] 島崎邦彦 (2015): 活断層の長さから推定される地震モーメント: 日本海「最大」クラスの津波断層モデルについて, 日本活断層学会 2015 年度秋季学術大会予稿集 O-13(2015.11.28)
http://jsaf.info/pdf/meeting/2015/2015fall_o1.pdf
- [31] 武村雅之 (1998): 日本列島における地殻内地震のスケールリング則——地震断層の影響および地震被害との関連——, *地震第 2 輯*, 51, 211-228.
- [32] 東京電力 (2008): 柏崎刈羽原子力発電所における平成 19 年新潟県中越沖地震にて取得された地震観測データの分析及び基準地震動について, 耐震・構造設計小委員会 第 9 回地震・津波, 地質・地盤合同ワーキンググループ, 資料合同 W 9-1-2, 37(2008.5.22)
- [33] 東京電力 (2009): 耐震スペクトルの適用性検討 (内陸地殻内地震を対象とした追加検討内容), 原子力安全委員会 耐震安全性評価特別委員会 地震・地震動評価委員会「応答スペクトルに基づく地震動評価」に関する専門家との意見交換会, 資料第 1-2 号 (2009.5.22)
- [34] 福井地方裁判所民事第 2 部 (樋口英明裁判長) 「平成 26 年 (ヨ) 第 31 号大飯原発 3, 4 号機及び高浜原発 3, 4 号機運転差止仮処分命令申立事件」決定, 主文および要旨 (2015.4.14)
- [35] 鹿児島地方裁判所民事第 3 部 (前田郁勝裁判長) 「平成 26 年 (ヨ) 第 36 号川内原発稼働等差止仮処分申立事件」決定, 主文および要旨 (2015.4.22)
- [36] 福井地方裁判所民事第 2 部 (樋口英明裁判長) 「平成 24 年 (ワ) 第 394 号, 平成 25 年 (ワ) 第 63 号大飯原発 3, 4 号機運転差止請求事件」判決, 主文および要旨 (2014.5.21)
- [37] 長沢啓行 (2006): 新しい「耐震設計審査指針 (案)」は, 「自然の摂理」に耐えられるか?, 若狭ネット第 98 号, 8-23(2006.5.24)
<http://wakasa-net.sakura.ne.jp/pre/news/98/98-3.pdf>
<http://wakasa-net.sakura.ne.jp/pre/news/98/98-4.pdf>
<http://wakasa-net.sakura.ne.jp/pre/news/98/98-5.pdf>
- [38] 長沢啓行 (2013): 伊方原子力発電所の耐震安全性は保証されていない, 「四国電力株式会社に対する伊方原発運転差止請求事件」に関する松山地方裁判所民事第 2 部への意見書 (甲 107)(2013/12/26)
- [39] 若狭ネット編集局 (2014): 「川内 1-2 号の審査書案を受けた地震動評価等に関する 2014 年 7 月 29 日原子力規制委員会・原子力規制庁との交渉」関連資料
<http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/nrc20140801.pdf>
<http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/record20140729.pdf>
<http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/summary20140729.pdf>
- [40] 若狭ネット編集局 (2015): 「川内・高浜・大飯原発の基準地震動と川内原発の火山に関する 2015 年 1 月 16 日原子力規制委員会・原子力規制庁との交渉」関連資料
<http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/nrc20150123.pdf>
<http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/nrc20150116rec.pdf>
<http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/nrc20150116summary.pdf>