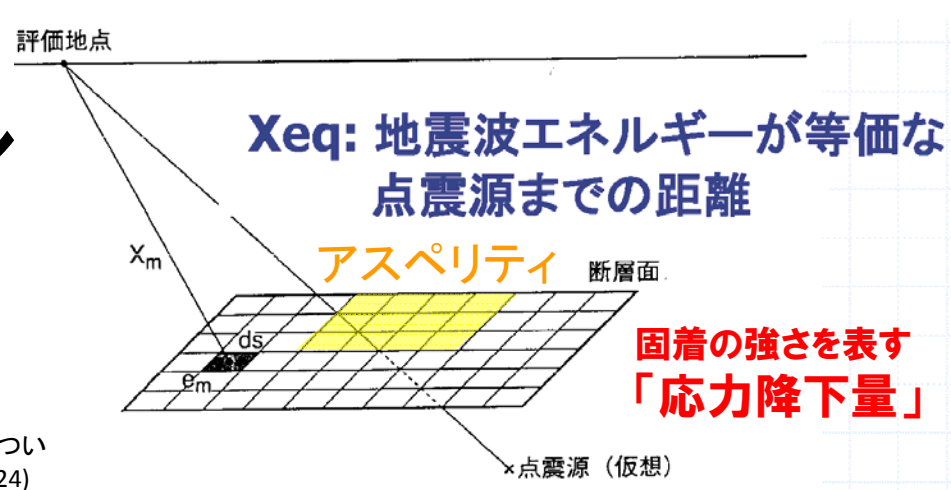


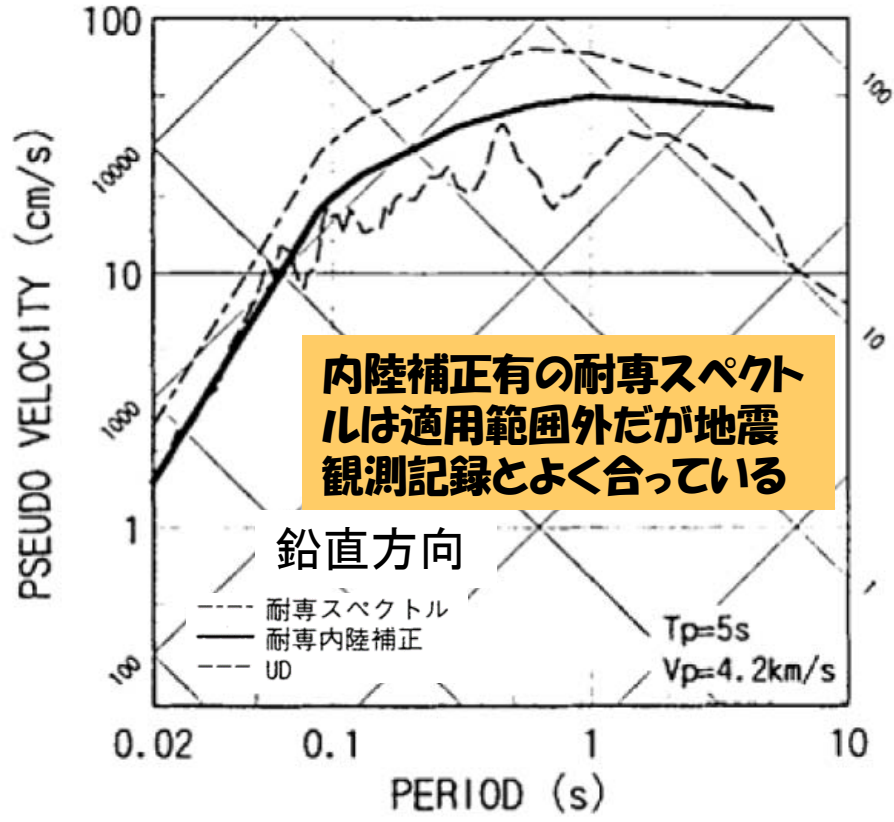
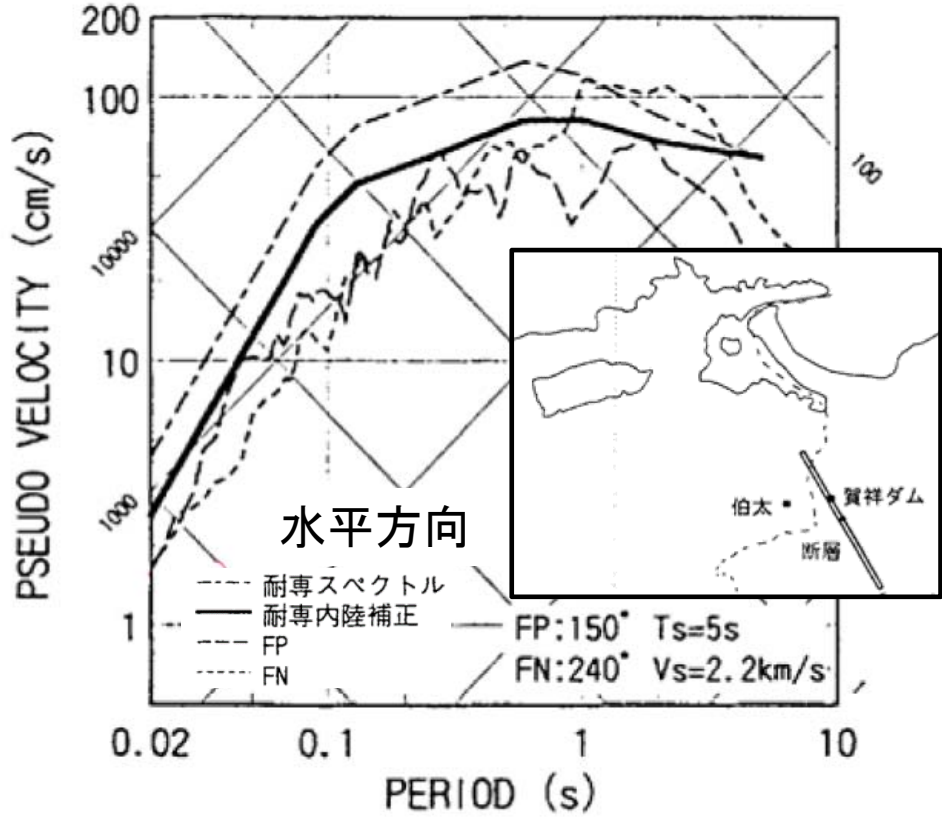
耐震設計での地震動評価法

① 経験式による応答スペクトル (耐専スペクトル)

② 断層モデル・シミュレーション

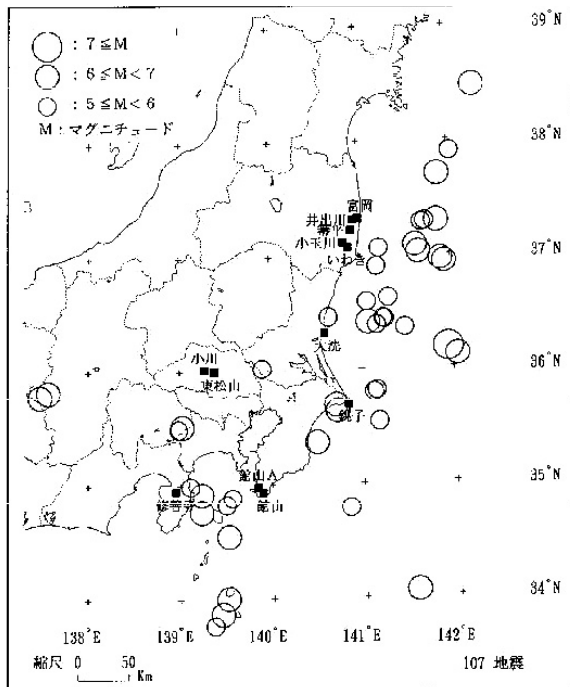


(独)原子力安全基盤機構「岩盤における設計用地震動評価手法(耐専スペクトル)について」, 耐震安全性に関する調査プロジェクトチーム第4回会合, 耐PT第4-6-1号(2007.8.24)

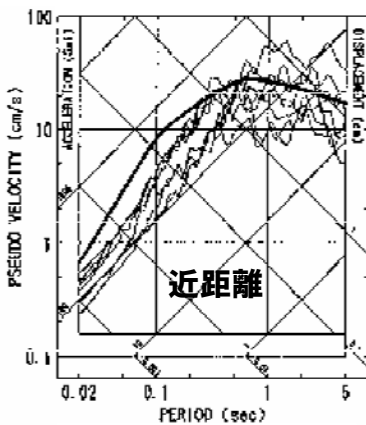


鳥取県西部地震M7.3(2000):賀祥ダム基礎部($X_{eq}=6km$)での観測記録と耐専スペクトル ①

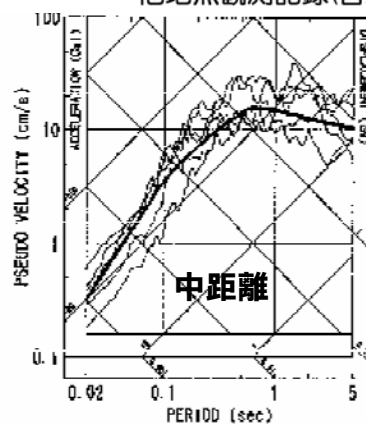
耐専スペクトル(地震規模と等価震源距離ごとにコントロールポイントを設定)



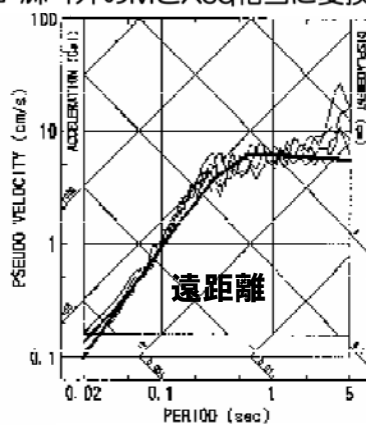
44地震・107地震観測記録
 プレート境界地震 32 (81記録)
 内陸地殻内地震 12 (26記録)



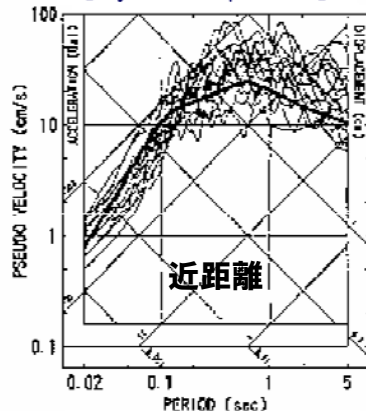
[Mj 8.0 Xeq 50km]



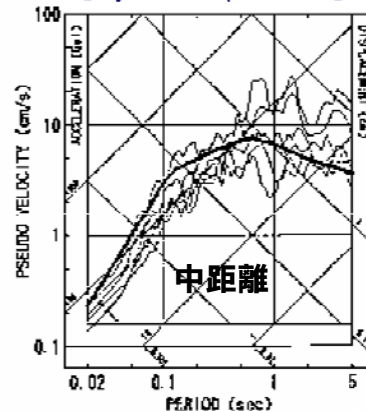
[Mj 8.0 Xeq 100km]



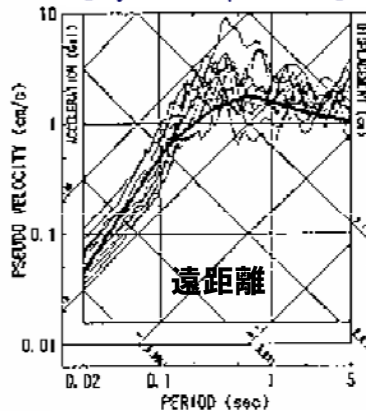
[Mj 8.0 Xeq 200km]



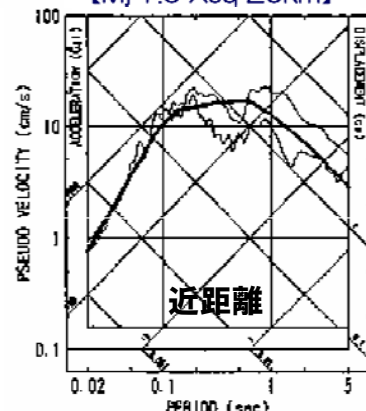
[Mj 7.0 Xeq 20km]



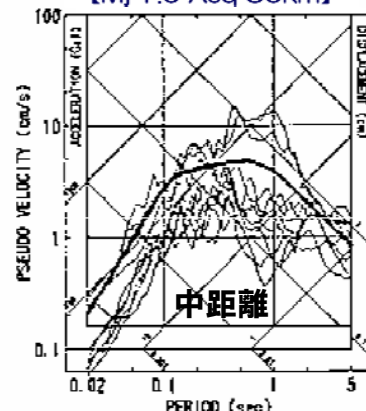
[Mj 7.0 Xeq 50km]



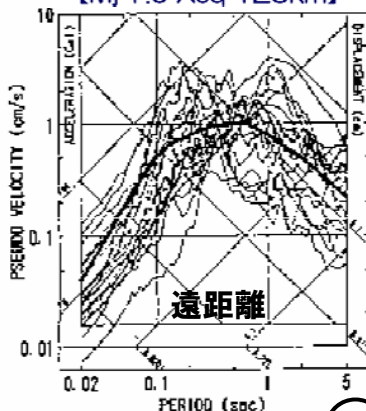
[Mj 7.0 Xeq 125km]



[Mj 6.0 Xeq 8km]

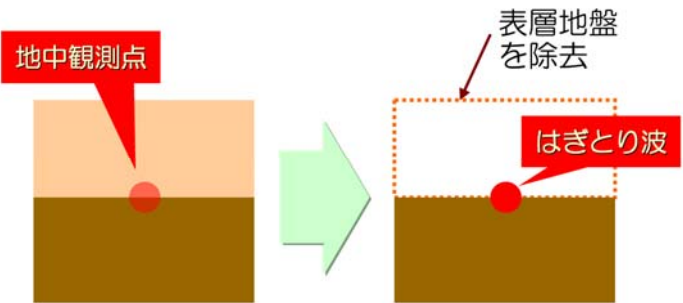


[Mj 6.0 Xeq 25km]



[Mj 6.0 Xeq 78km]

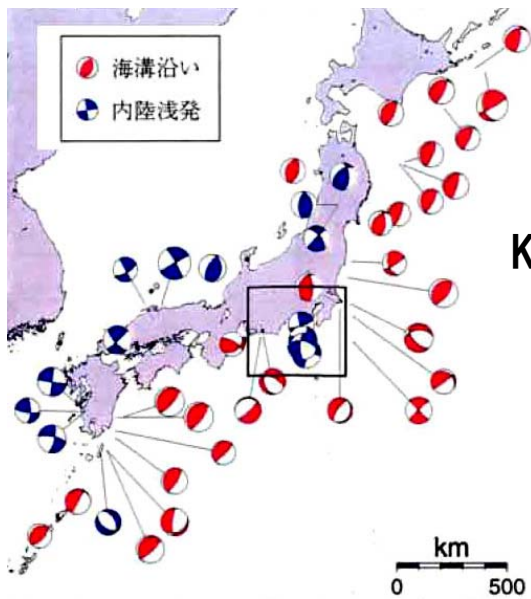
—— 水平動の耐専スペクトル(地震基盤相当)
 ——— 他地点観測記録(各コントロールポイントのMとXeq相当に変換)



東京電力「耐専スペクトルの概要(1999年時点での内容)」および「耐専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「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1-1号および1-2号(2009.5.22)

耐専スペクトルの問題点

■主にプレート境界地震のデータセットに基づいて策定
 内陸地殻内地震に適用する際には内陸補正が必要



⇒ 地震観測記録で補正
 または、
 内陸補正係数で補正

K-NET観測地震で適用性を検討

プレート境界地震29, 124記録
 : M5.5~7.0, Xeq 46~199km
 内陸地殻内地震15, 170記録
 : M5.5~7.3, Xeq 17~195km

2007年新潟県中越沖地震の教訓から、震源特性の不
 確実さとして「短周期の地震動レベル1.5倍化」を考慮

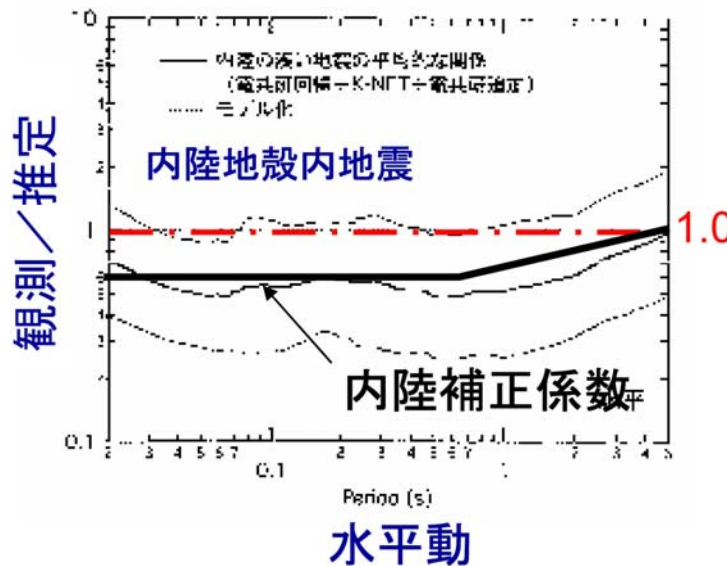
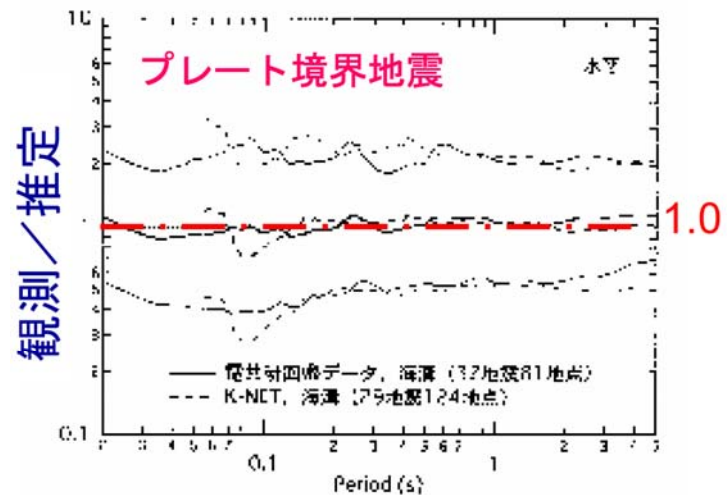
⇒ 「内陸補正後1.5倍化」または「内陸補正無」で適用

■震源近傍やM8クラスの巨大地震のデータが少ない
 最近20年間の地震観測記録で策定し直すべき

2000年鳥取県西部地震(M7.3)

2007年新潟県中越沖地震(M6.8)

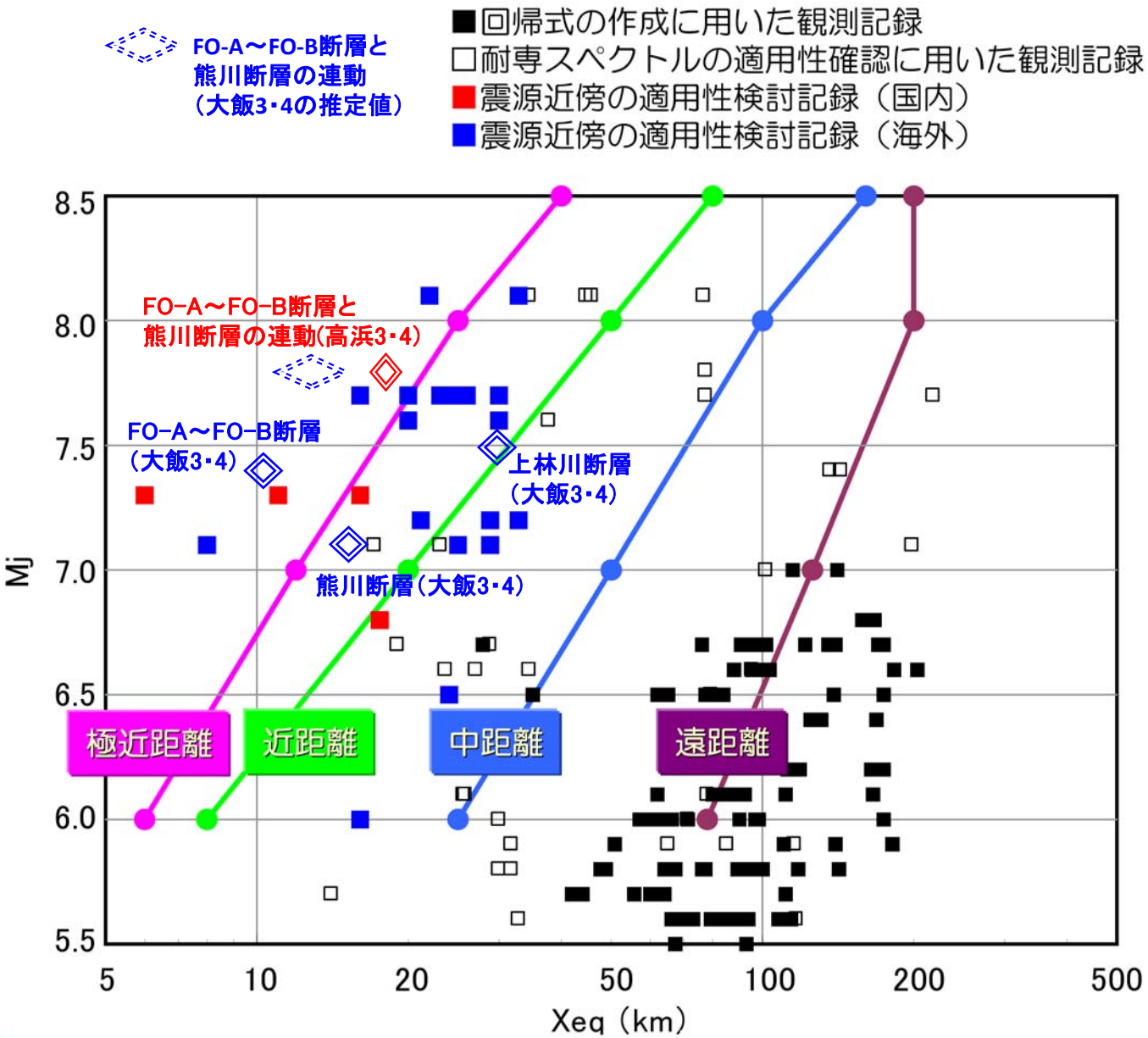
2008年岩手・宮城内陸地震(M7.2)など



地震観測記録と耐専スペクトルによる
 推定値との比の平均とバラツキ

東京電力「耐専スペクトルの概要(1999年時点での内容)」および「耐専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「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1-1号および1-2号(2009.5.22)

耐専スペクトルで回帰および適合性検討に用いられた地震データの 等価震源距離と気象庁マグニチュード



1995年阪神・淡路大震災以降のM7クラスの地震観測記録が反映されていない！

とくに、震源近傍の強震観測記録が反映されれば、耐専スペクトルはもっと大きくなり、適用範囲が広がる！

関西電力株式会社(2013): 高浜発電所基準地震動の評価について, 第63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3-2(2013.12.25)

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)

東京電力(2009): 耐専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)

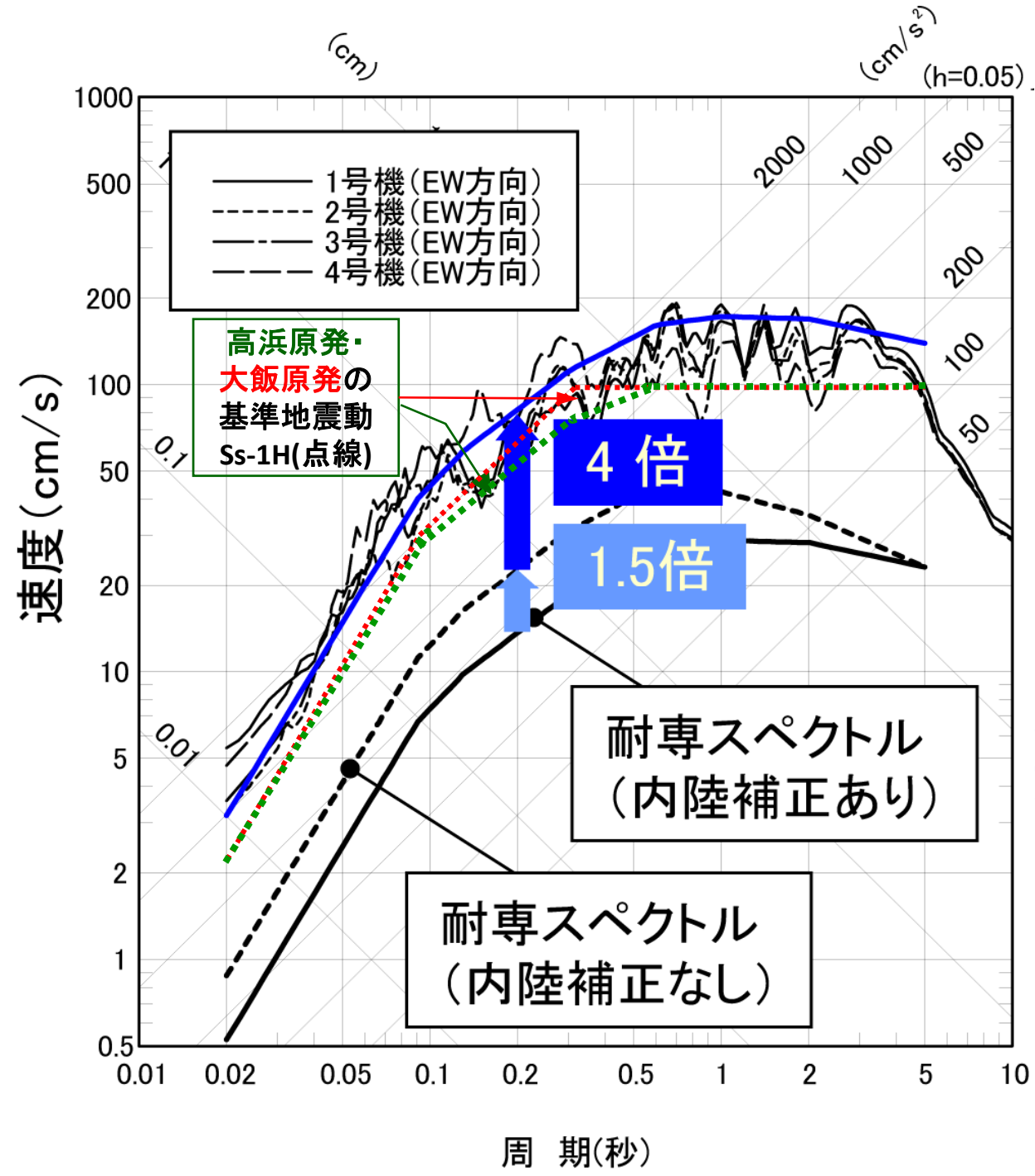
新潟県中越沖地震 M6.8(2007.7)による 柏崎刈羽1~4号での解放基盤表面 はざとい波は1011 ~1699ガル!

高浜・大飯原発の基準 地震動Ssを超えた!

(高浜原発は2013年12月末に
関電が提示した新基準地震動)

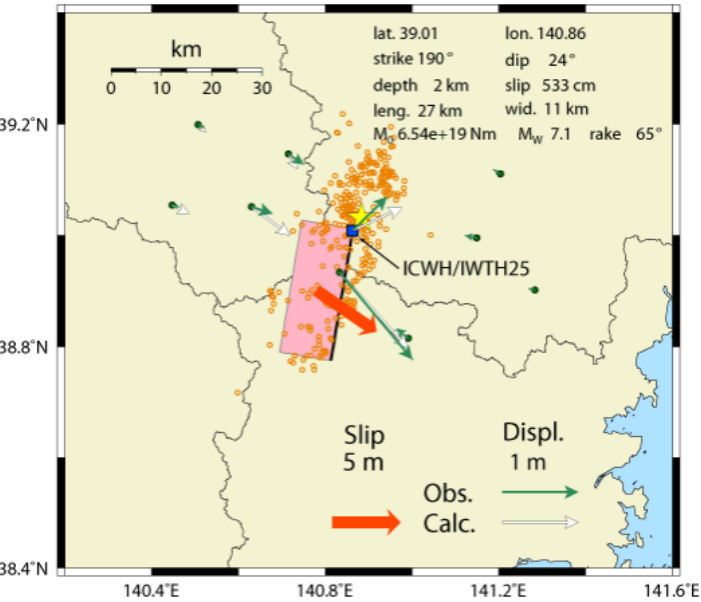
東電やJNESの解析によれば、
耐専スペクトル(内陸補正有)の
地震動が
震源特性の要因で 約1.5倍
深部地盤構造で 約2倍
敷地下の古い褶曲構造で 約2倍
合計約6倍に増幅された。

東京電力「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時に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(2008.5.22), 資料合同W9-1-2, p.37)

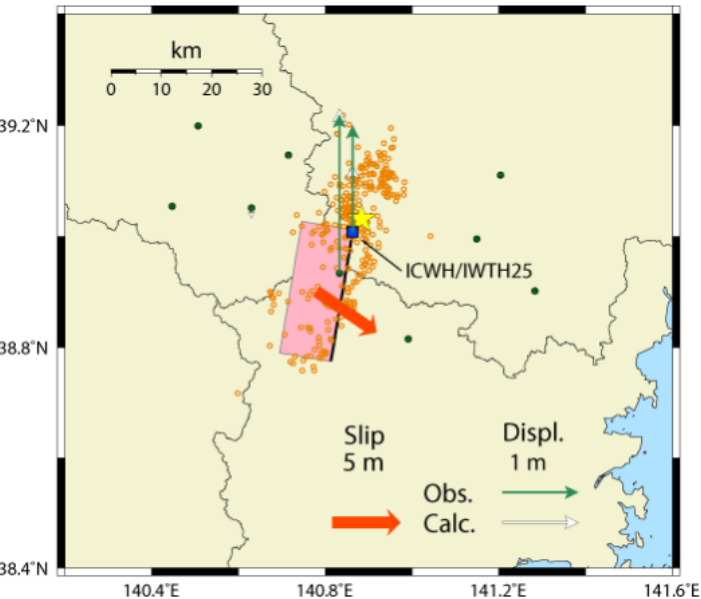


2008年岩手・宮城内陸地震 (M7.2, Mw6.9, 2008.6.14)

水平変動



上下変動

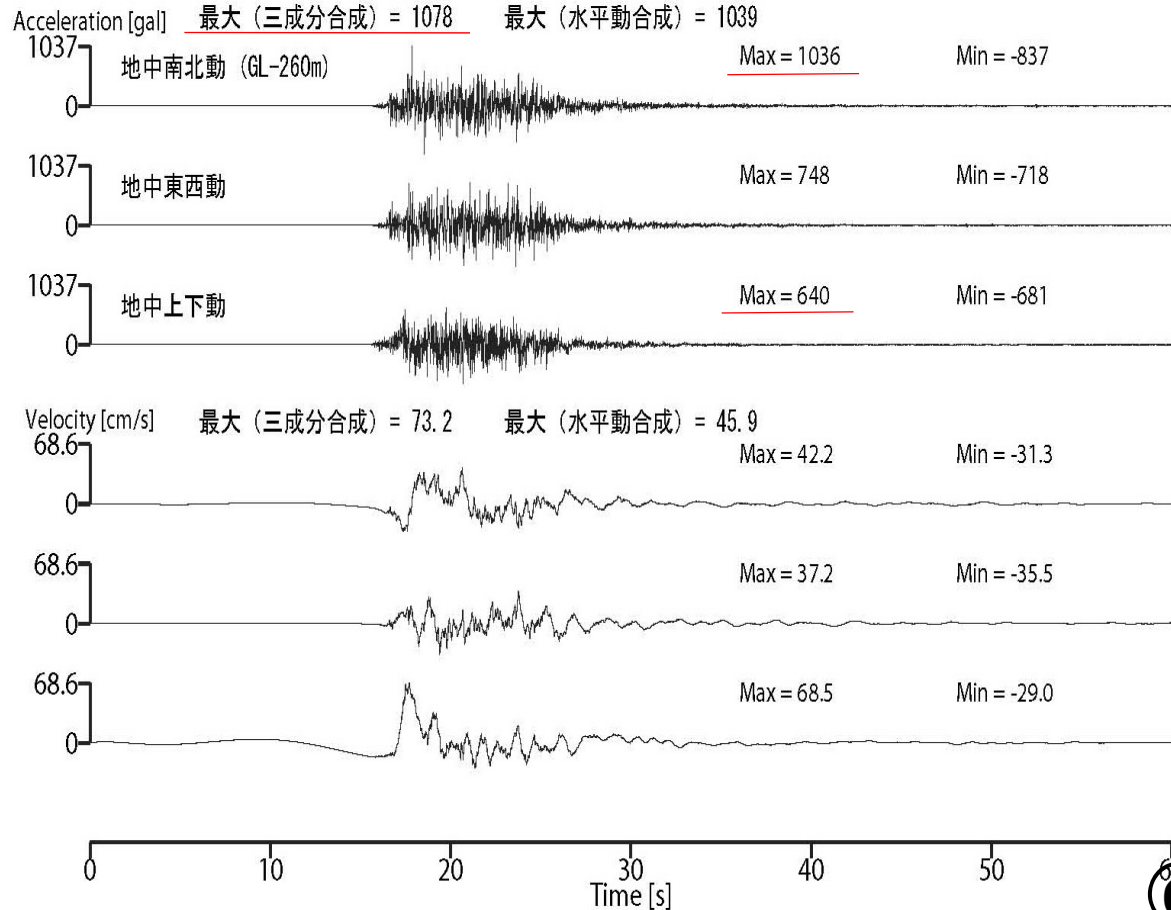


(いちのせきにし)

一関西・地下の強震動 垂直 640ガル 合成 1078ガル

地震計は、地下260m、
 $V_s=1810\text{m/s}$ の非常に固
い岩盤に設置されている。
原発耐震設計での解放
基盤表面は $V_s=700\text{m/s}$ 程
度の位置。

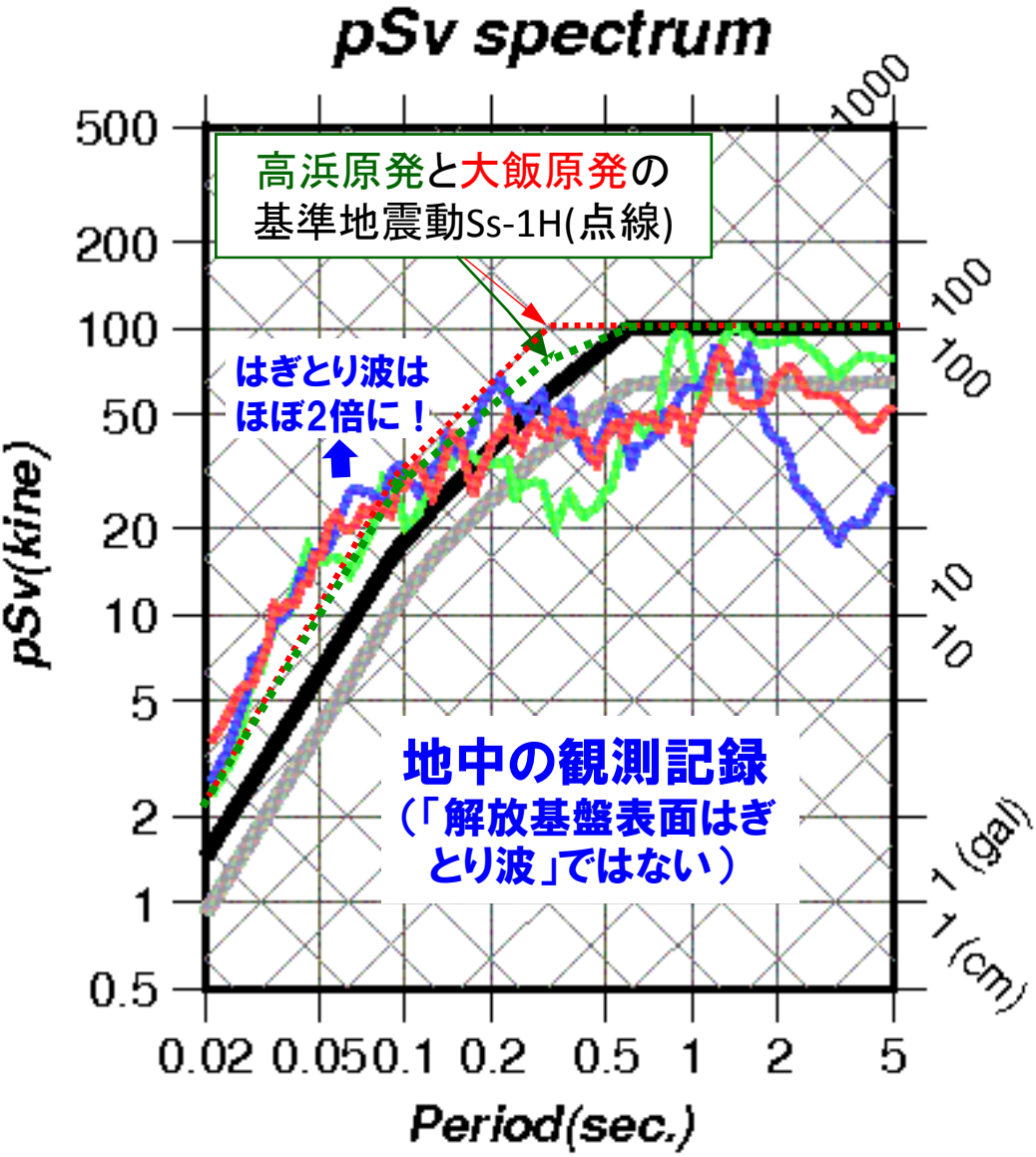
IWTH25 2008/06/14 08:43:46



2008年岩手・宮城内陸地震 (M7.2) 疑似速度応答スペクトルの重ね書き

— NS — JEAG Spec. (H, Vs=700m/s)
— EW — JEAG Spec. (V, Vp=2000m/s)
— UD

原子力規制庁:「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)



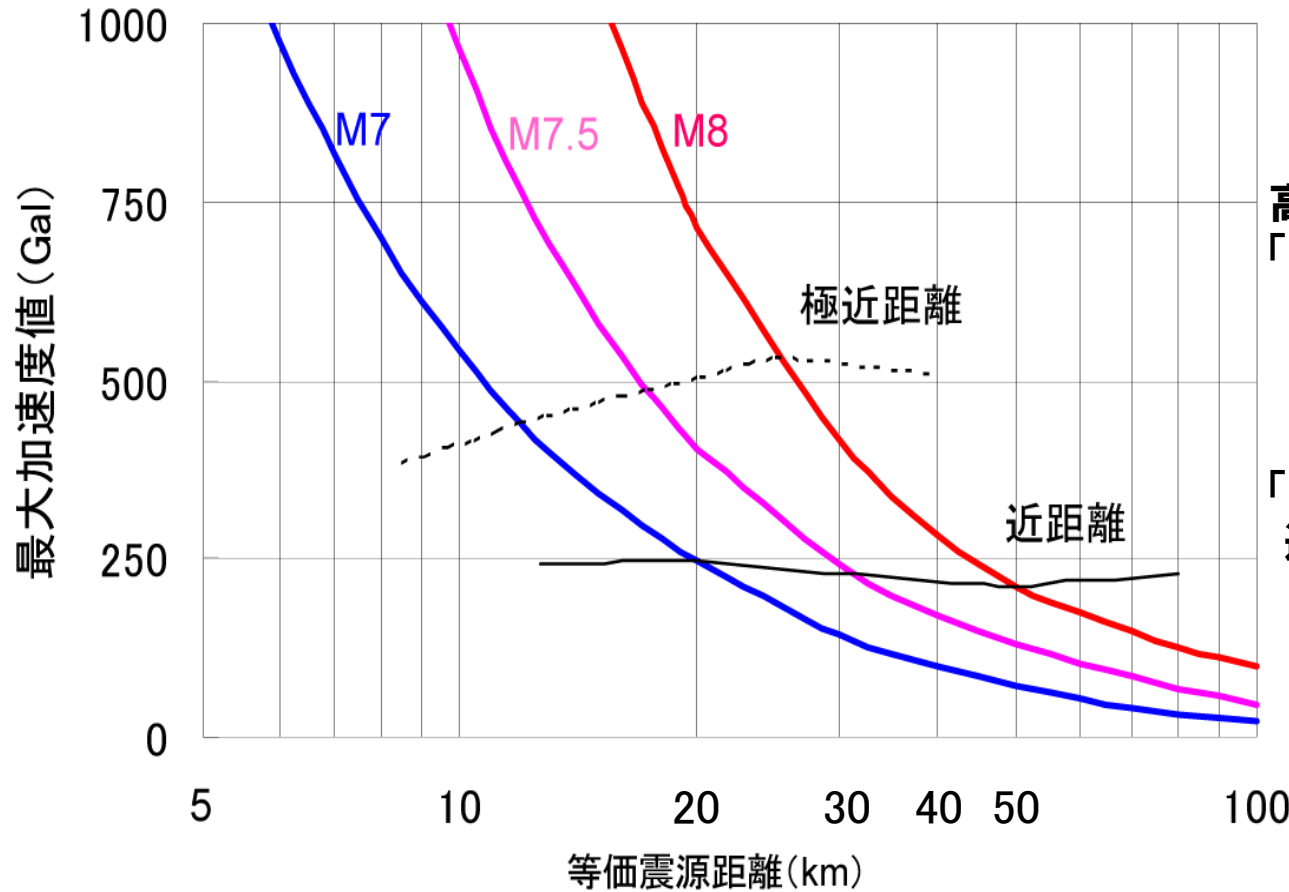
地中観測記録を「はぎとり波」に換算すれば、新潟中越沖地震をさらに超え、2000ガル近くになる!

鉛直地震動も短周期側では、水平地震動と同様に極めて大きい!

原発にとって危険な短周期領域で、はぎとり波は高浜・大飯原発の基準地震動Ssを遙かに超える!

耐専スペクトルでは、等価震源距離が小さいと最大加速度値(周期0.02秒での応答加速度に相当)が急激に大きくなる！

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)



高浜3・4号

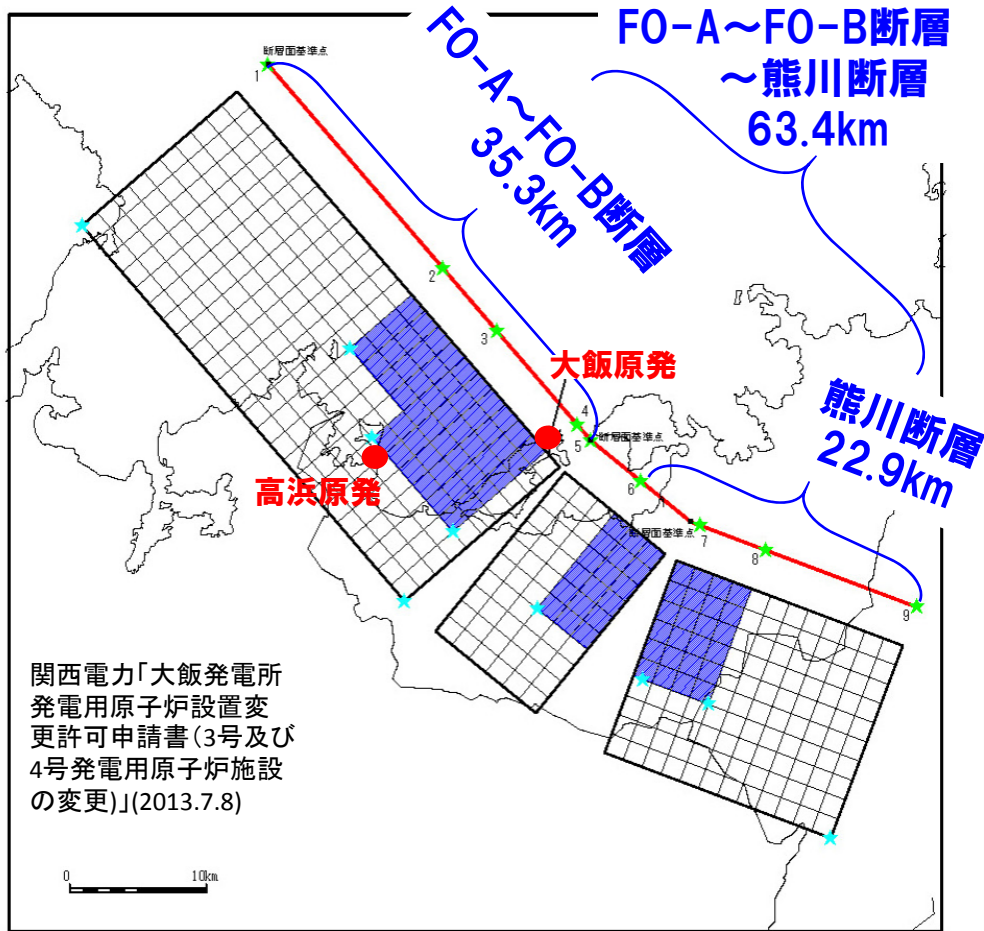
「FO-A~FO-B 断層(M7.4,
 $X_{eq}=18.3\text{km}$:基本,
17.9km:上端3km,
16.4km:傾斜角75度)」

「FO-A~FO-B断層と熊川断層の
連動(M7.8,
 $X_{eq}=18.0\text{km}$:基本,
16.1km程度:傾斜角75度)」

大飯3・4号では下記の地震動は耐専スペクトルの適用範囲外にされた！

「FO-A~FO-B断層 (M7.4, $X_{eq}=10.5\text{km}$)」

「FO-A~FO-B断層と熊川断層の連動(M7.8, $X_{eq}=12.6\text{km}$ 程度:基本)」

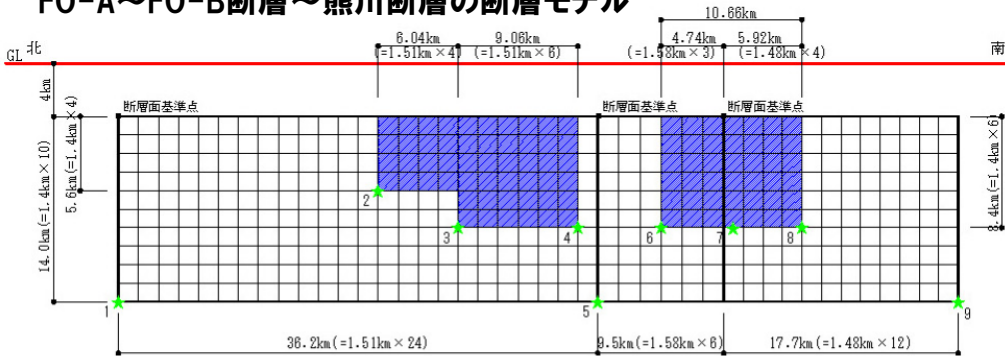


関西電力「大飯発電所
発電用原子炉設置変
更許可申請書(3号及び
4号発電用原子炉施設
の変更)」(2013.7.8)

※ 傾斜角90°の断層面は、傾斜角0°として図化している。

★: 破壊開始点

FO-A~FO-B断層~熊川断層の断層モデル



ii) 断面図

★: 破壊開始点

高浜3・4号では耐専スペクトルで評価

「FO-A~FO-B 断層(M7.4,
 $\chi_{eq}=18.3\text{km}$:基本,
17.9km:上端3km,
16.4km:傾斜角75度)」

「FO-A~FO-B断層と熊川断層の
連動(M7.8,
 $\chi_{eq}=18.0\text{km}$:基本,
16.1km程度:傾斜角75度)」

**FO-A断層の南東端は
大飯原発の3km沖と近い!**

**大飯3・4号では、下記の地震動は
耐専スペクトルの適用範囲外に!**

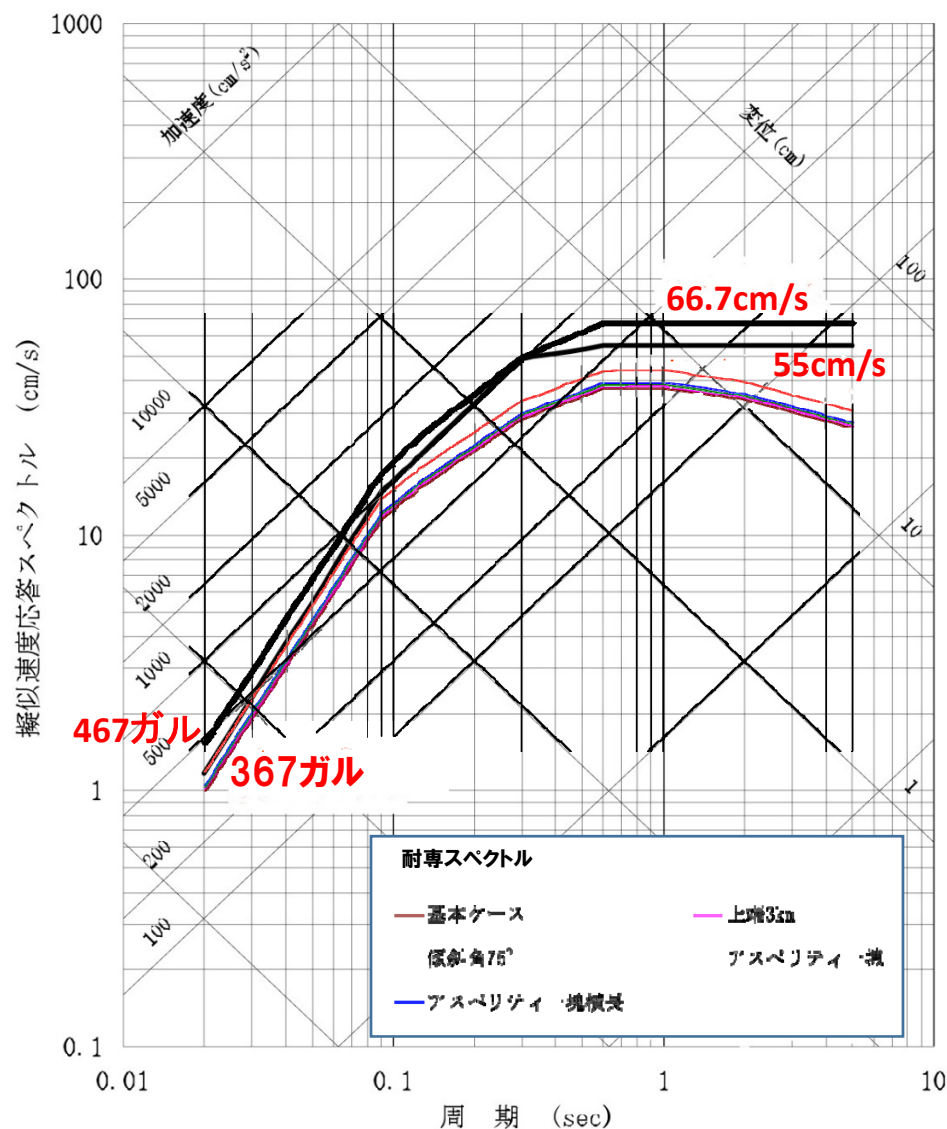
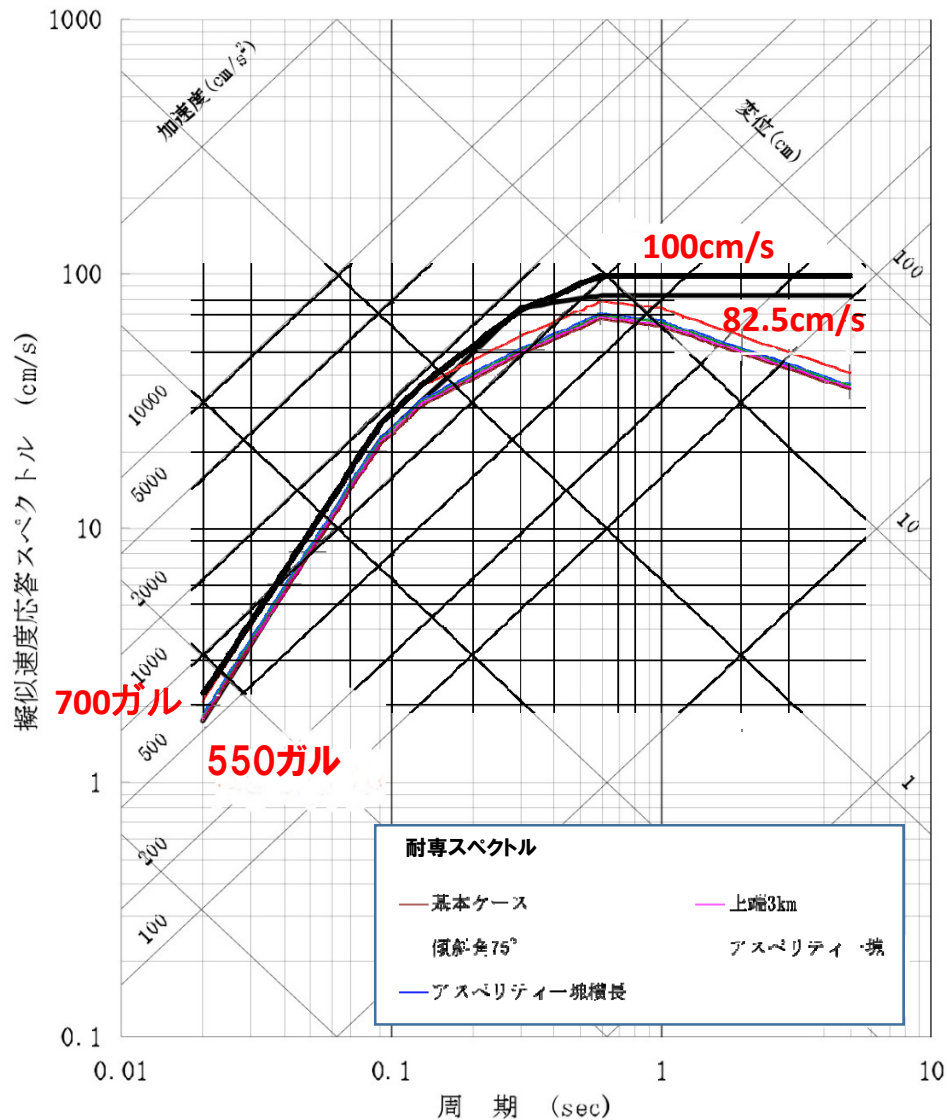
「FO-A~FO-B断層(M7.4,
 $\chi_{eq}=10.5\text{km}$:基本)」

「FO-A~FO-B断層と熊川断層の
連動(M7.8,
 $\chi_{eq}=12.6\text{km程度}$:基本)」

高浜3・4号での「F0-A~F0-B断層と熊川断層の連動」に対する耐専スペクトルによる地震動評価は現行の基準地震動を超えた！

h=0.05

h=0.05



⇒ **耐専スペクトルに沿って新基準地震動を策定！**

関西電力株式会社(2013):高浜発電所 基準地震動の評価について、第63回原子力発電所の新規規制基準適合性に係る審査会合、資料3-2(2013.12.25)

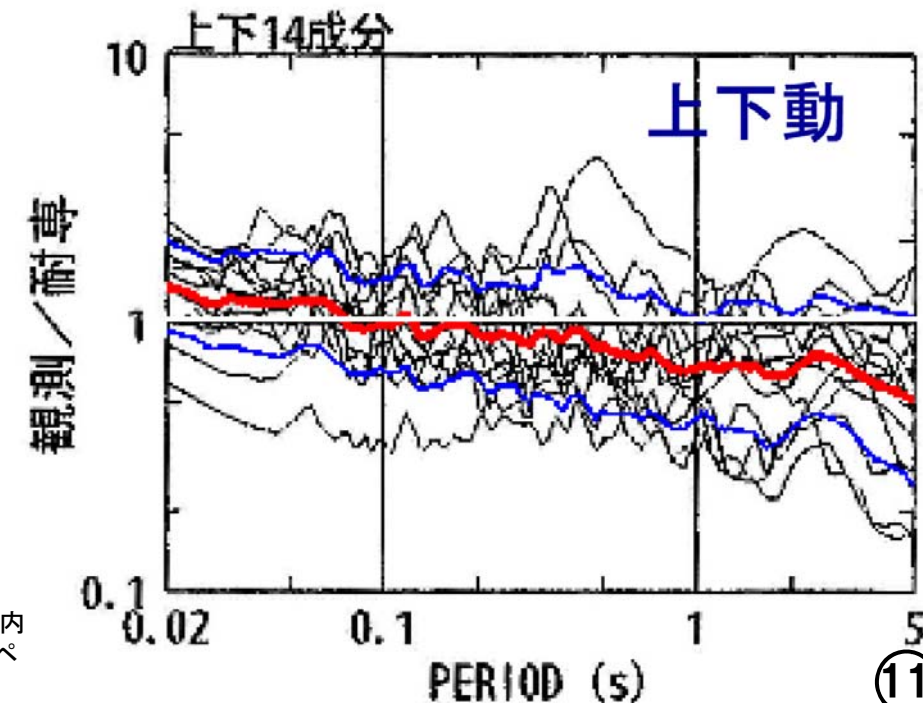
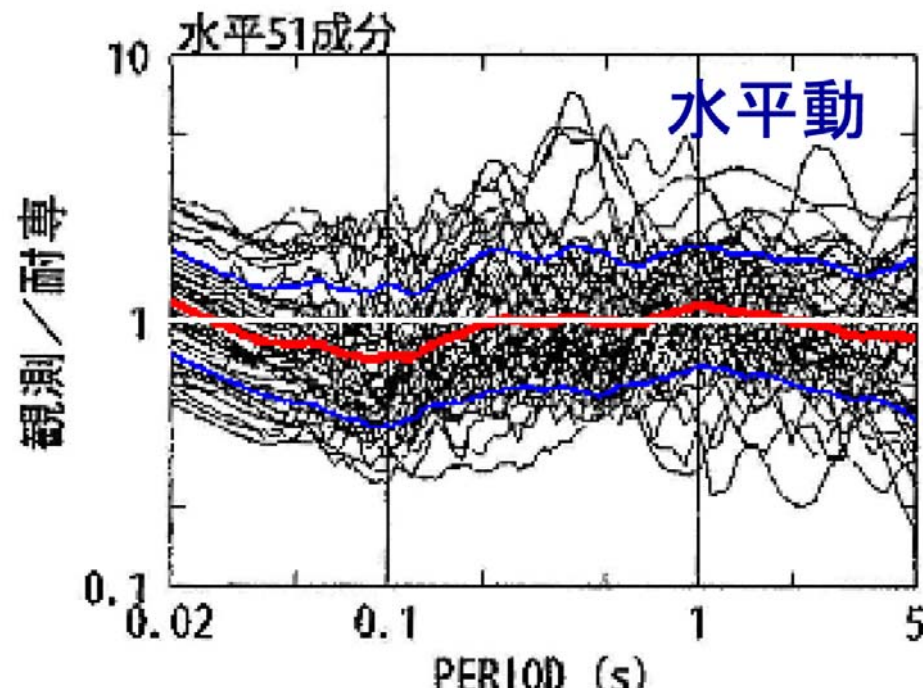
耐専スペクトルは国内地震による地震動評価の平均を表しており、**倍半分のバラツキを考慮しなければ耐震安全性を確保できない!**

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)

(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)



新潟中越沖地震や岩手宮城内陸地震では**1500ガル以上の地震動が観測されており、耐専スペクトルのバラツキをも考慮すれば、高浜3・4号の基準地震動は最大加速度(周期0.02秒の応答スペクトル)を700ガルではなく、1000ガル以上に引き上げるべき!**

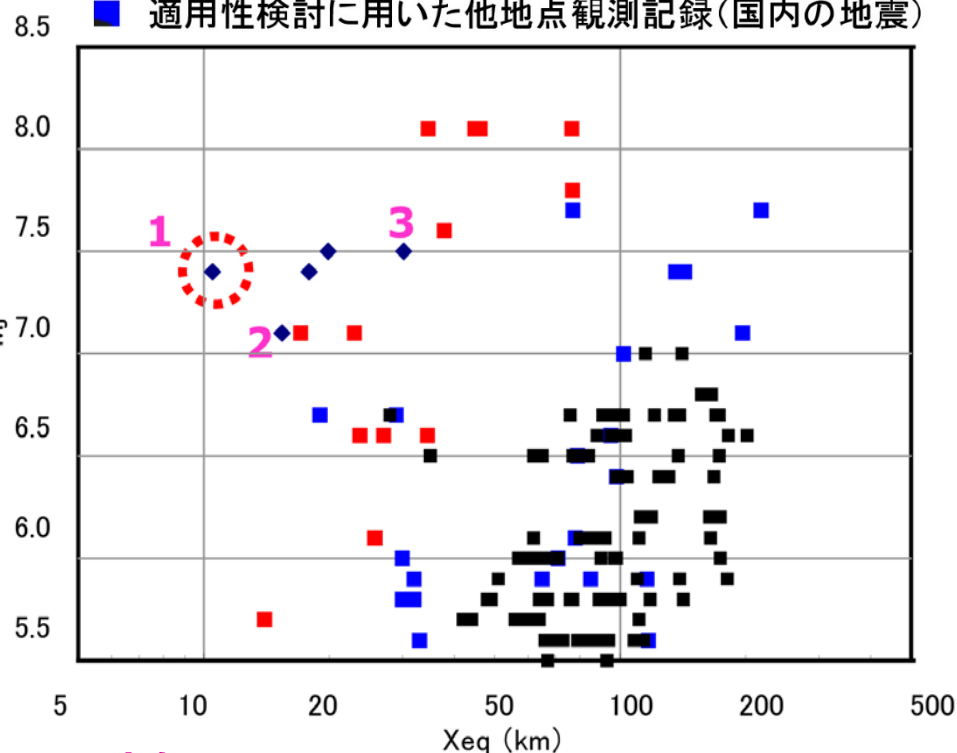
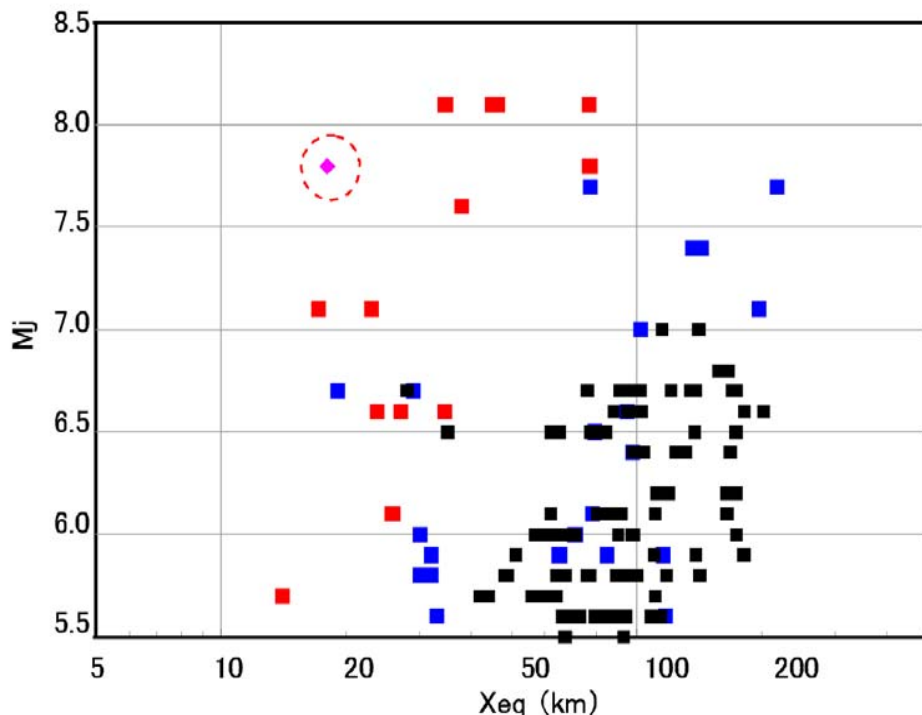


東京電力(2009):耐専スペクトルの適用性検討(内陸地殻内地震を対象とした追加検討内容), 原子力安全委員会耐震安全性評価特別委員会地震・地震動評価委員会「応答スペクトルに基づく地震動評価」に関する専門家との意見交換会, 資料第1-2号(2009.5.22)

F0-A~F0-B断層と熊川断層の連動評価で、 高浜3・4号(M7.8, Xeq=18.0km)では耐専スペクトルを適用し、 大飯3・4号(M7.8, Xeq=12.6km程度)では適用範囲外だとした 関西電力による説明図

震源近傍の観測記録が抜けている！

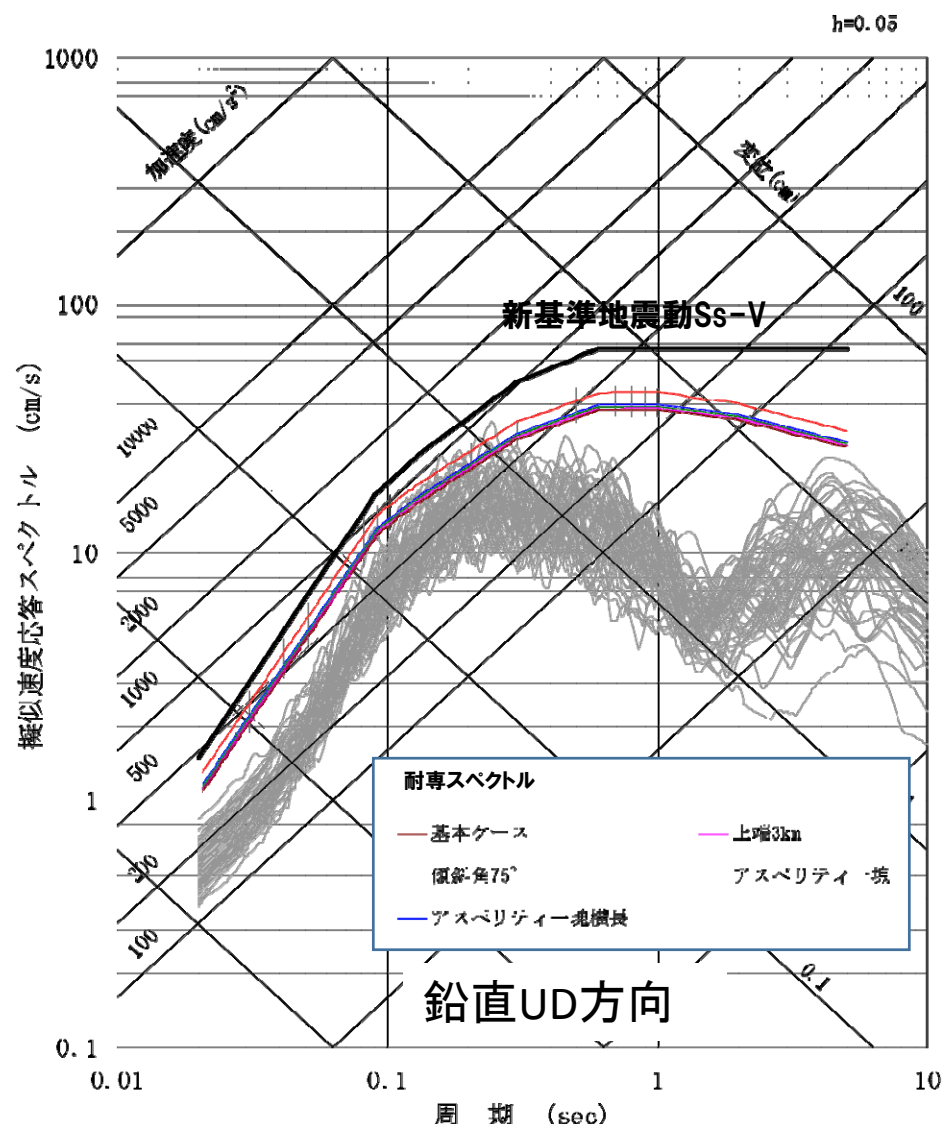
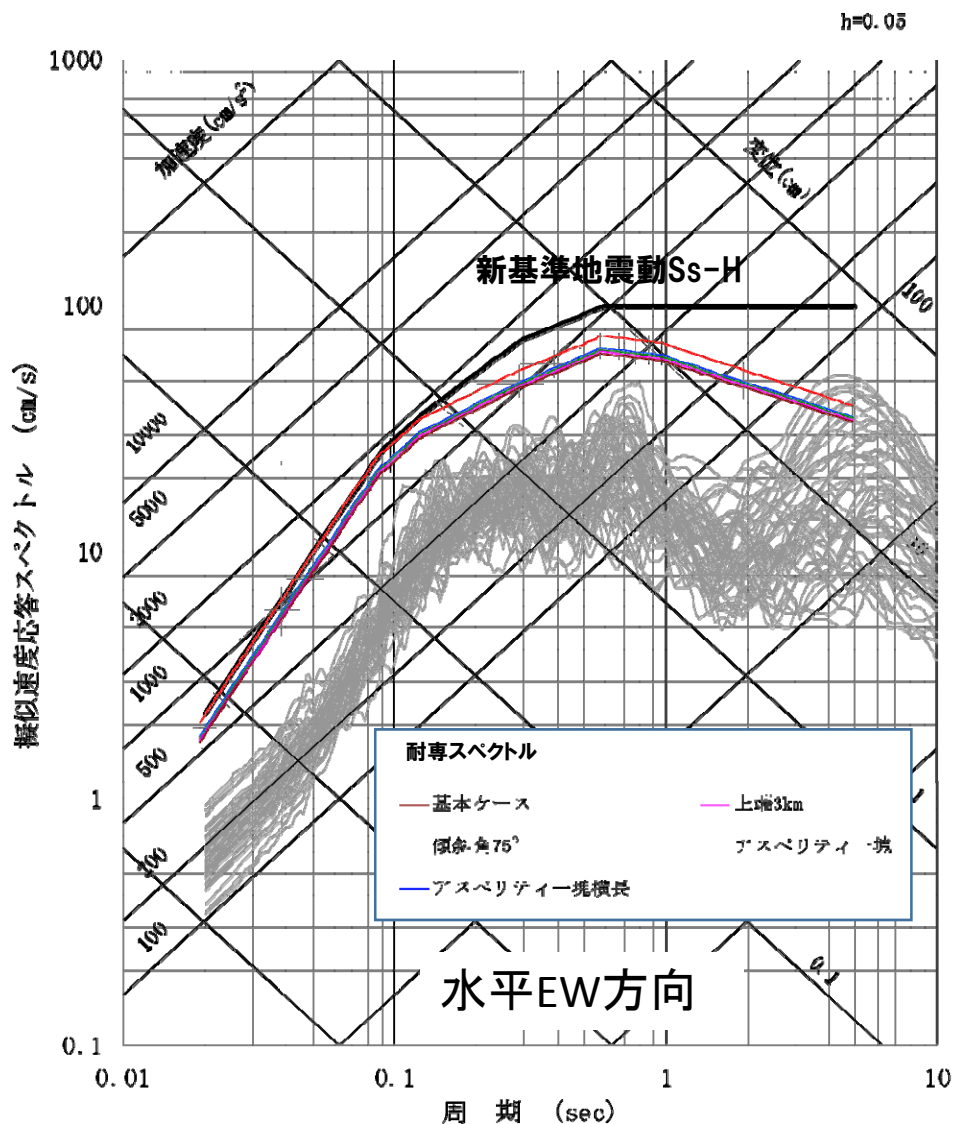
- 回帰式の作成に用いた観測記録
- 適用性検討に用いた他地点観測記録(海外の地震)
- 適用性検討に用いた他地点観測記録(国内の地震)



高浜3・4号:
F0-A~F0-B断層と熊川断層の連動
(M7.8, Xeq=18.0km)

大飯3・4号:
1 F0-A~F0-B断層(M7.4, Xeq=10.5km)
2 熊川断層 (M7.1, Xeq=15.4km)
3 上林川断層 (M7.5, Xeq=30.2km)

高浜3・4号での「F0-A~F0-B断層と熊川断層の連動」に対する断層モデルによる評価結果は耐専スペクトルの1/2~1/3!

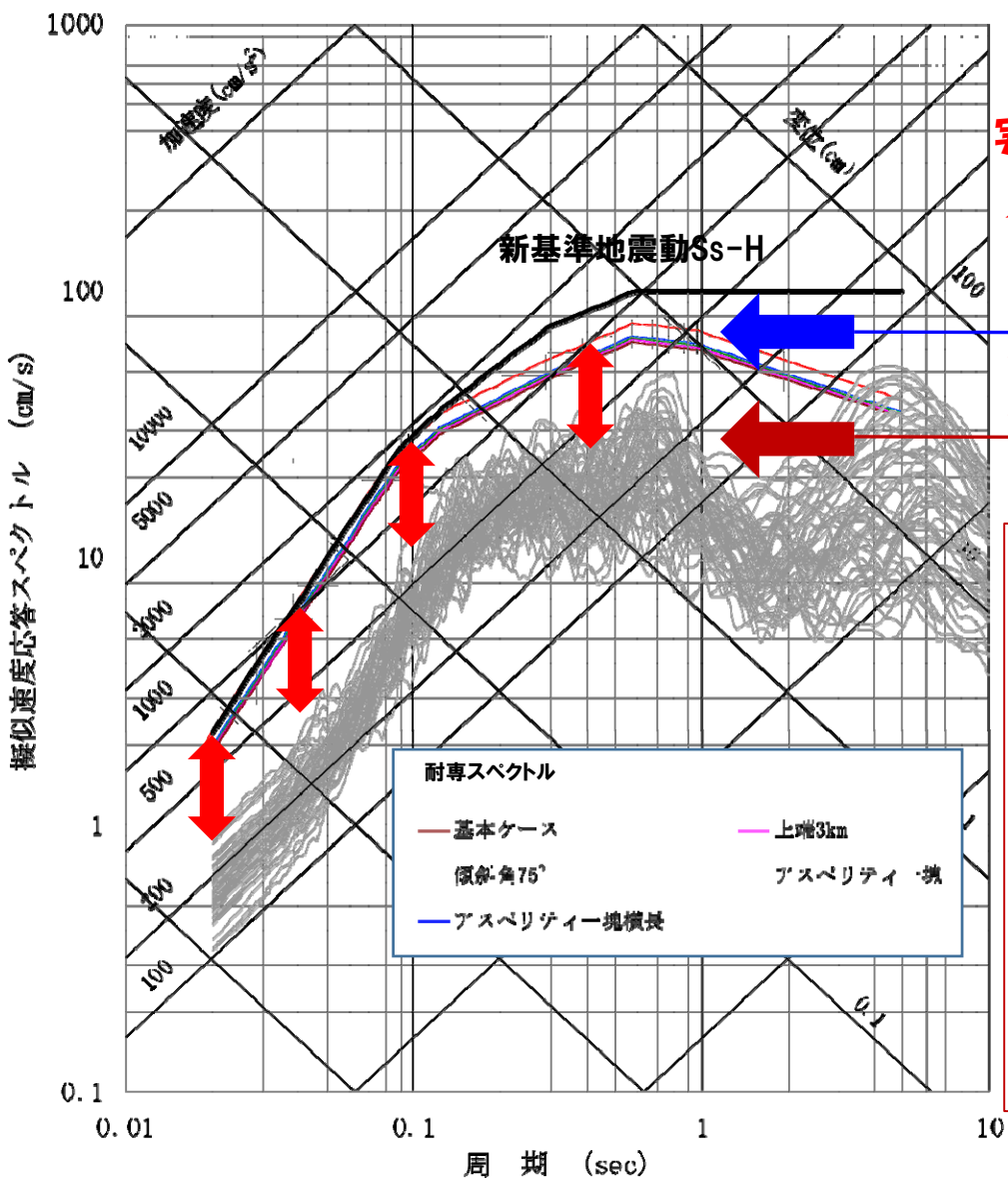


⇒ 断層モデルは地震動を1/2以下へ過小評価!

関西電力株式会社(2013):高浜発電所 基準地震動の評価について,第63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3-2(2013.12.25)

高浜3・4号での「F0-A~F0-B断層と熊川断層の連動」に対する耐専スペクトルと断層モデル(全ケース、EW方向)による地震動評価結果(関西電力)から言えることは・・・断層モデルによる地震動評価は1/2~1/3の過小評価になっている!

h=0.05



実際にはもっと大きい!

↑
耐専スペクトル

↑↓
2~3倍の差!

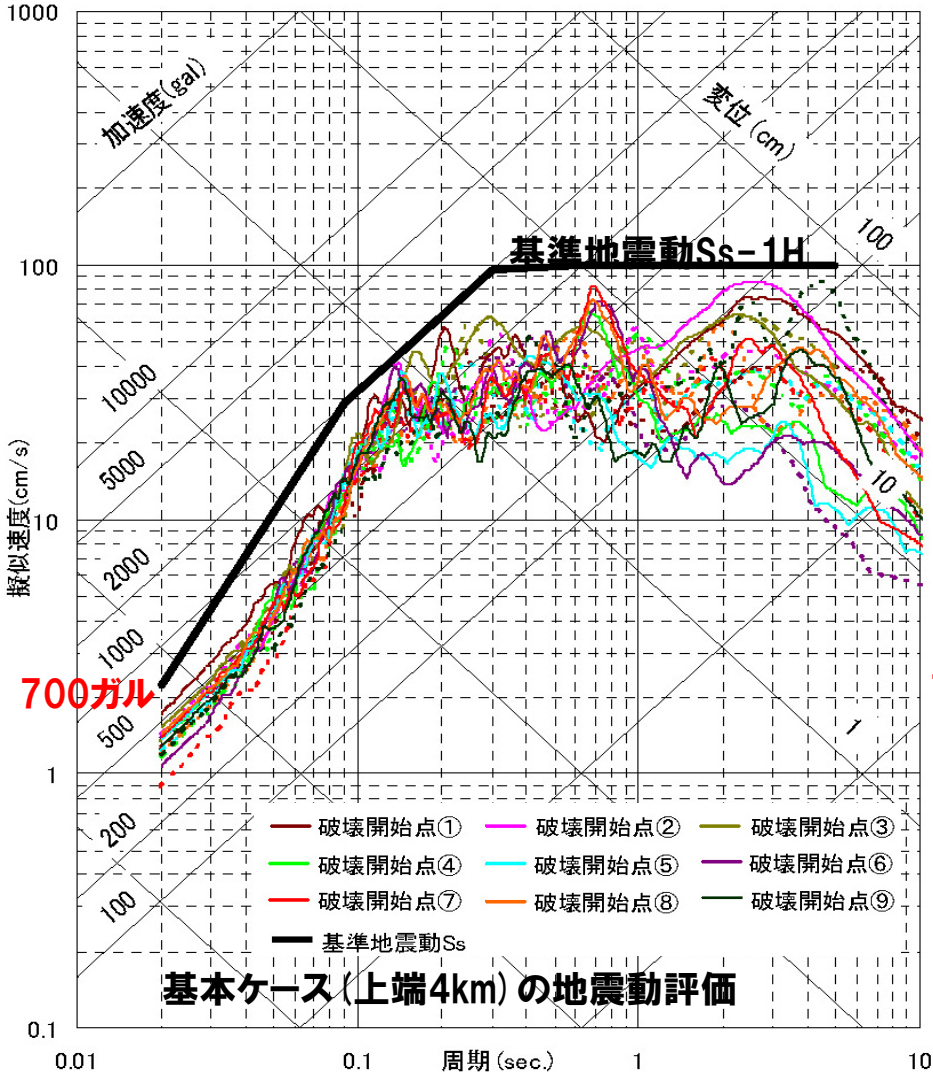
断層モデル

断層モデルは北米中心の地震データに基づいており、日本国内の活断層にそのまま適用すると地震規模が1/2以下へ過小評価され、地震動が非常に小さく評価される。このグラフは、関西電力自らそれを実証したもの!

耐専スペクトルは国内地震データに基づき、現実に近い。しかし、2007年新潟県中越沖地震や2008年岩手宮城内陸地震など地下で1000ガルを超える最近20年間の近距離地震観測記録は反映されていない。これを反映させれば、地震動はもっと大きくなり、適用範囲も広がる!

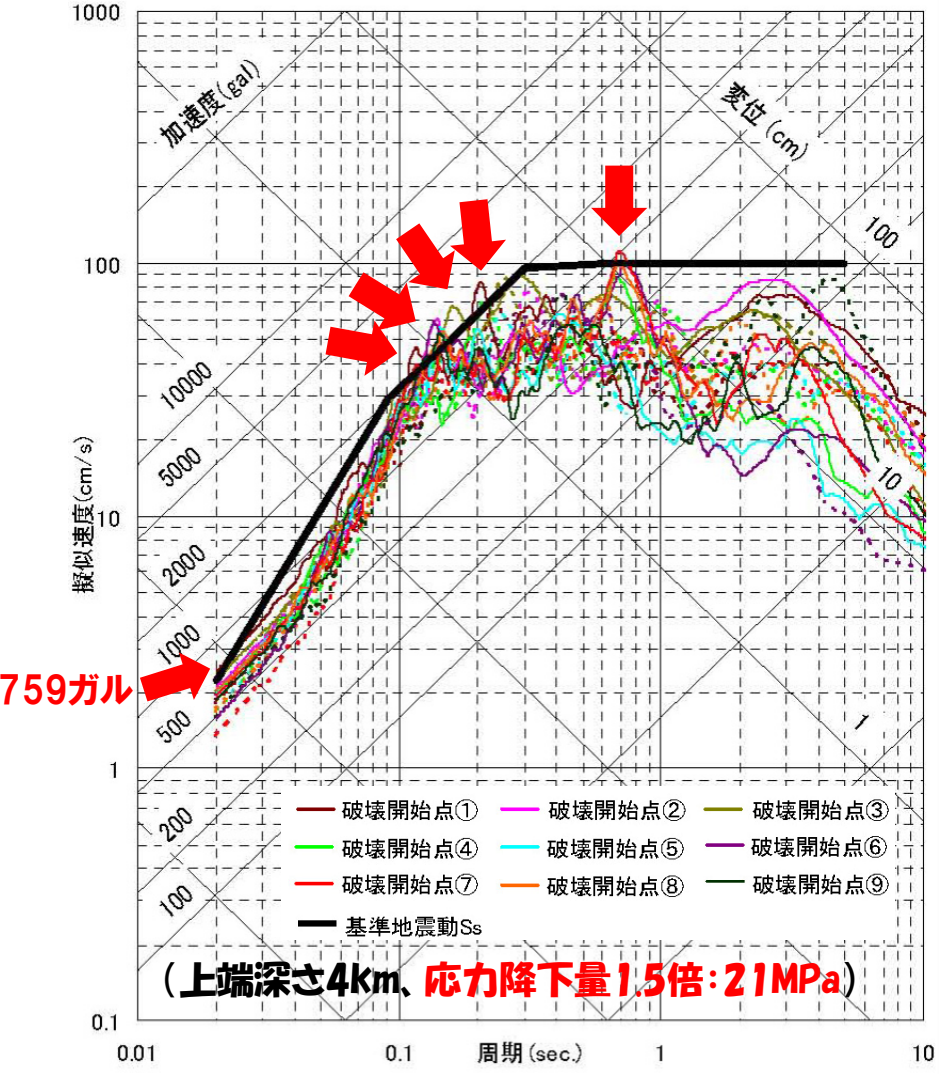
大飯3・4号では「F0-A~F0-B断層~熊川断層の連動」に対する断層モデルによる地震動評価(短周期の地震動レベル1.5倍ケース)が基準地震動を超えた!

➡ 高浜3・4号の評価結果に基づき、2~3倍すれば、1500ガルにもなる!

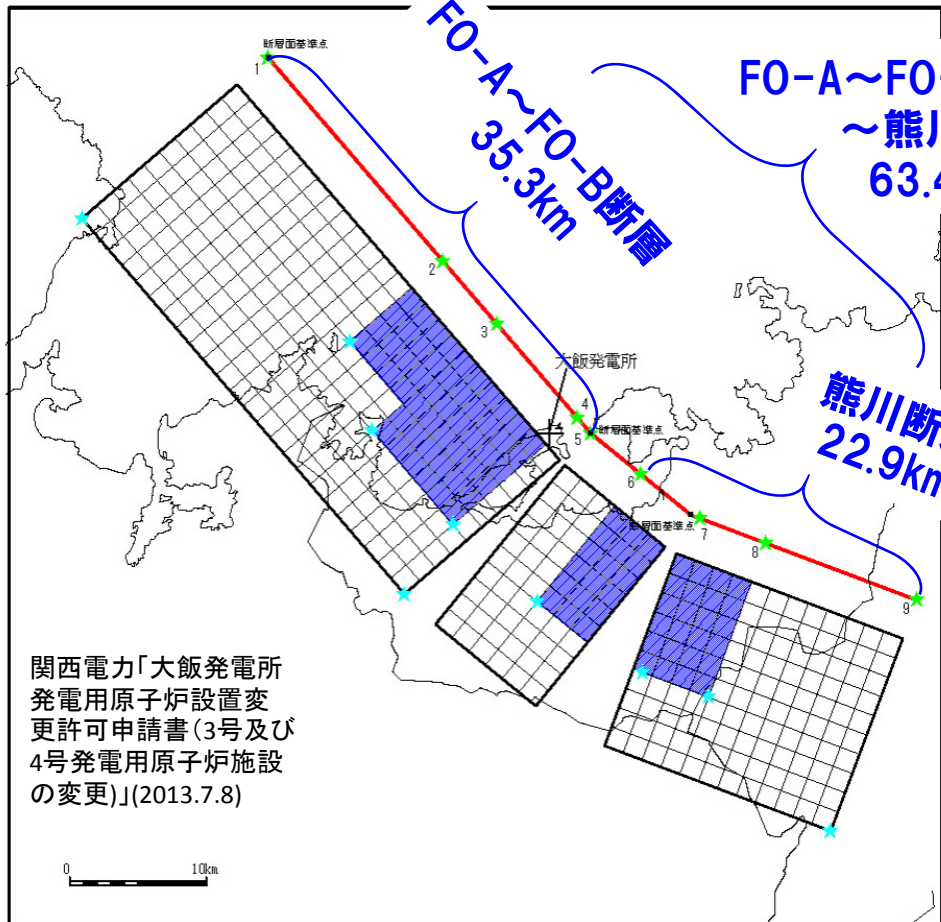


水平方向(実線: EW方向、破線: NS方向)

断層モデルの過小評価は理論的にも説明できる!



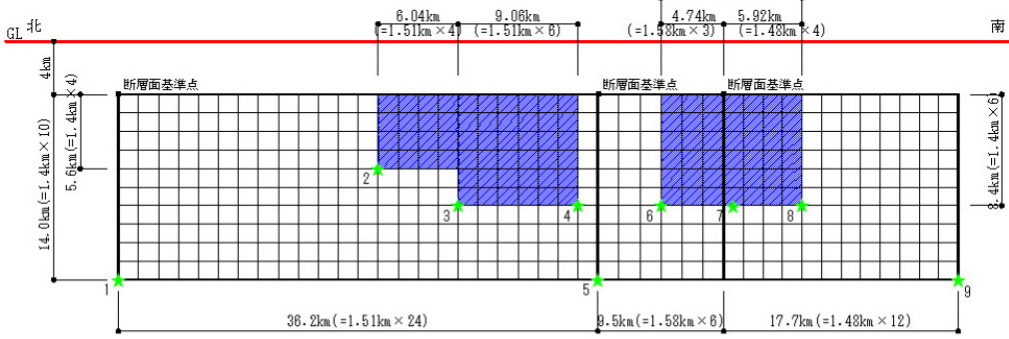
関西電力株式会社(2013):大飯発電所基準地震動の評価について, 第59回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合, 資料2-3(2013.12.18), 第1回地震津波意見聴取会(地震動関係), 資料1-4-5, 2012.4.23)



※ 傾斜角90°の断層面は、傾斜角0°として図化している。

★: 破壊開始点

F0-A~F0-B断層～熊川断層の断層モデル



ii) 断面図

★: 破壊開始点

F0-A断層の南東端は 大飯原発の3km沖!

F0-A~F0-B断層～熊川断層の ほぼ中央が大飯原発3km沖に来て、最も厳しいケースに!

↓ **しかし...**

耐専スペクトルは近すぎて適用外、断層モデル(入倉)で地震動が過小評価される!

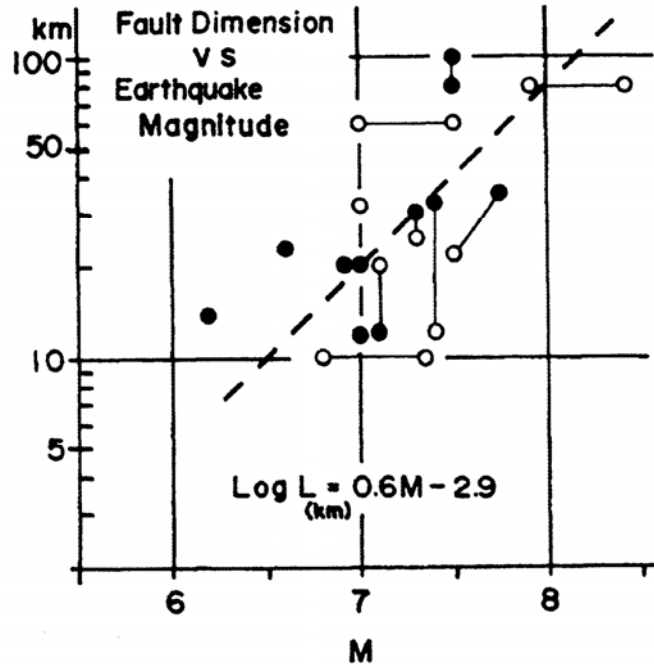
	入倉式	松田式
地震規模	M7.6	M7.8
(Mo[Nm])	(4.38×10^{19})	(7.01×10^{19})

応力降下量		
断層平均	3.1MPa	6.5MPa
アスペリティ	14.1MPa	29.4MPa
平均すべり量	1.4m	2.3m

しかも、大飯原発での地震観測記録がないため、統計的グリーン関数法(SGF)で平均的な特性を求めるに留まっている!

松田式で地震規模を求める際、発見者の意図とは異なり、「地震断層や活断層長さ」ではなく地下の「震源断層長さ」を用いる！

「M8の地震ではL=80km、M7ではL=20km」



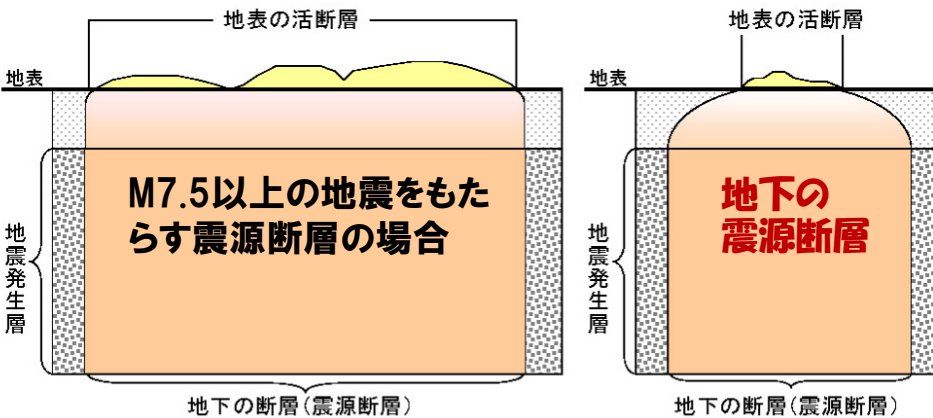
L: 断層のディメンジョン (断層線またはその集合体の長さ)
○: values observed on the surface (地表で観測される長さ)
●: values estimated from seismicological or geodetic data (地震学的に、または測地学的に推定される長さ)

出典: 松田時彦「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, pp.269-283(1975) および地震調査研究推進本部 地震調査委員会長期評価部会「活断層の長期評価手法」報告書(暫定版)(2010.11.25)

Table 1. Earthquake magnitude, fault length and fault displacement in historic earthquakes in Japan (Inland).

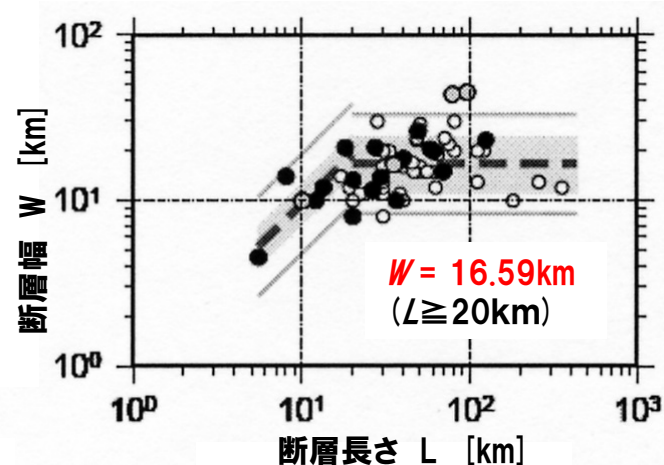
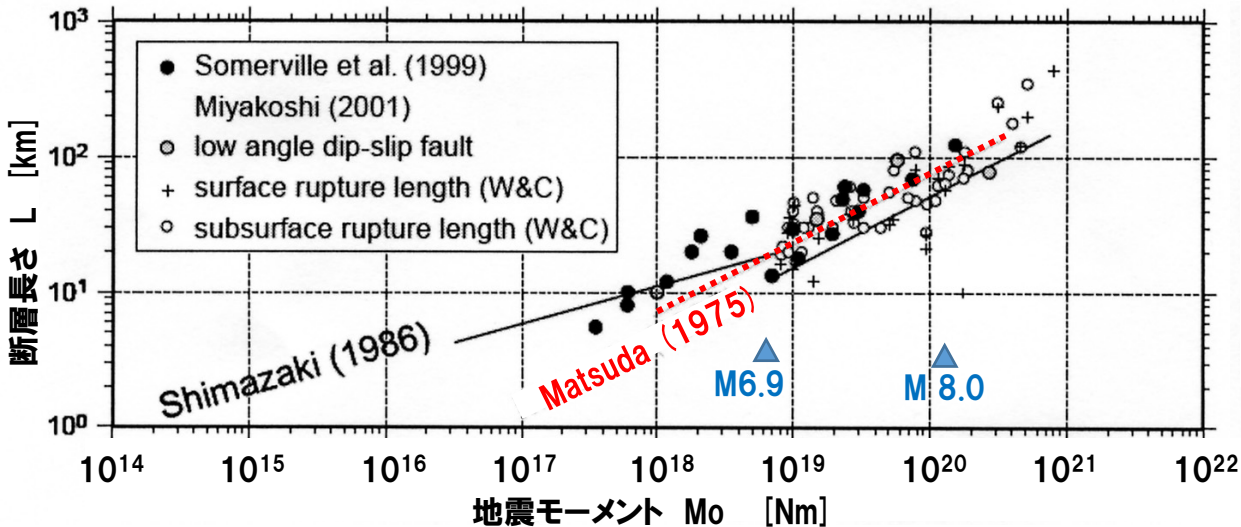
Earthquake			Fault				
Year	Location	M	Name	Length (km)	Displacement (m)	Ref*	**
1891	Nobi	8.4 (7.9)	Neodani, etc.	80	8	1)	○
1894	Shonai	7.3 (6.8)	Yadarezawa	10	1	2)	○
1896	Riku-U	7.5 (7.0)	Senya Kawafune	60 15	3 2	2)	○
1927	Tango	7.5	Gomura, etc. Yamada	18	2.5	2)	○
		7.75		7.5 L=22 35	0.8 3	3)	●
1930	N-Izu	7.0	Tanna, etc. Himenoyu	30	3.3	2)	○
				6 L=32	1.2		
1931	W-Saitama	7.0		20	1	4)	●
1943	Tottori	7.4	Shikano Yoshioka	8 4.5 L=12	1.5 0.9	2)	○
				33	2.5	3)	●
1945	Mikawa	7.1	Fukozu Yokosuka	9 7 L=20	2 0.6	2) 5)	○
				12	2.2	6)	●
1948	Fukui	7.3		25 30	2.3 2.5	2) 3)	○ ●
1961	N-Mino	7.0	Koike-Hatogayu	12	2.5	7)	●
1963	Echizen-misaki	6.9		20	0.6	4)	●
1964	Niigata	7.5 7.4			9 4	8) 9)	○ ●
1969	C-Gifu	6.6		23	0.7	10)	●
1970	S-Akita	6.2		14	0.65	11)	●

Gothic figures are used in Fig. 1.
* Reference: 1) MATSUDA (1974a), 2) YONEKURA (1972), 3) KANAMORI (1973), 4) ABE (1974), 5) INOUE (1960), 6) ANDO (1974), 7) KAWABARI (1975), 8) MOGI, et al. (1964), 9) AXI (1966), 10) MIKUMO (1973), 11) MIKUMO (1973).
** ○: values of surface faulting, ●: values obtained from seismicological or geodetic data.



短く見える活断層でも、地下の震源断層は、最低15km~18km(M6.8~M6.9に相当)であり、最長35km(M7.4に相当)になる！

➡ 地下の震源断層長さから松田式で地震規模Mを求めれば、よく合う！



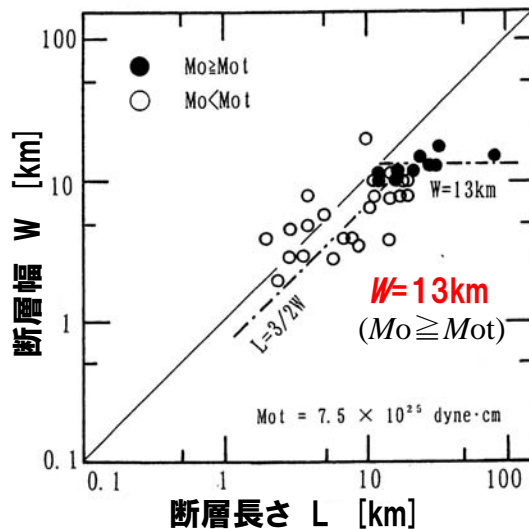
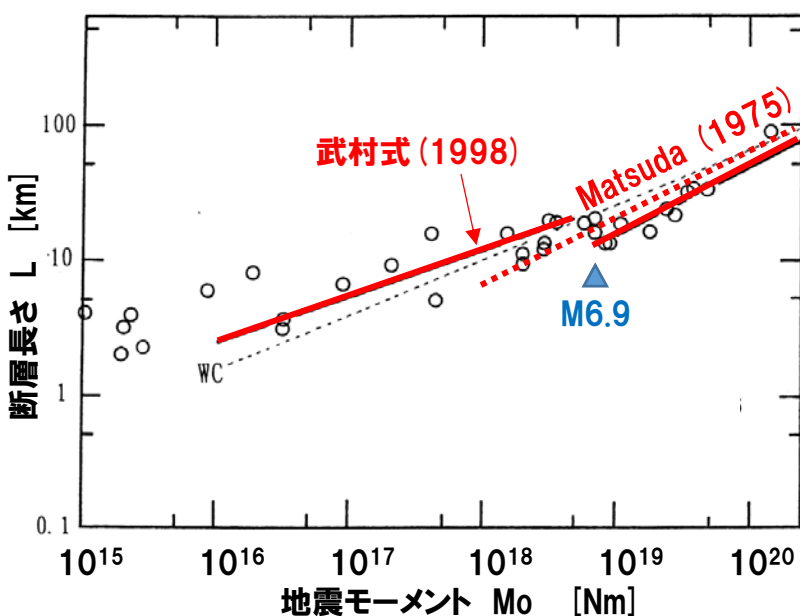
断層長さ と 断層幅 の関係

- (横ずれ, 高角逆断層)
- (低角逆断層)
- : 震源インバージョンによる, Somerville et al.(1999), Miyakoshi(2001)
- (伏在断層)
- + (地表地震断層)
- : 余震と地表観察による Wells and Coppersmith(1994)

松田式は、地下の震源断層長さ と 地震規模との関係を良く表す。しかし、米国中心データは断層幅が16.59km、国内データは13kmのため、断層面積との関係では食い違ってくる。

北米中心データによる断層長さ と 地震モーメント の関係

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



断層長さ と 断層幅 の関係

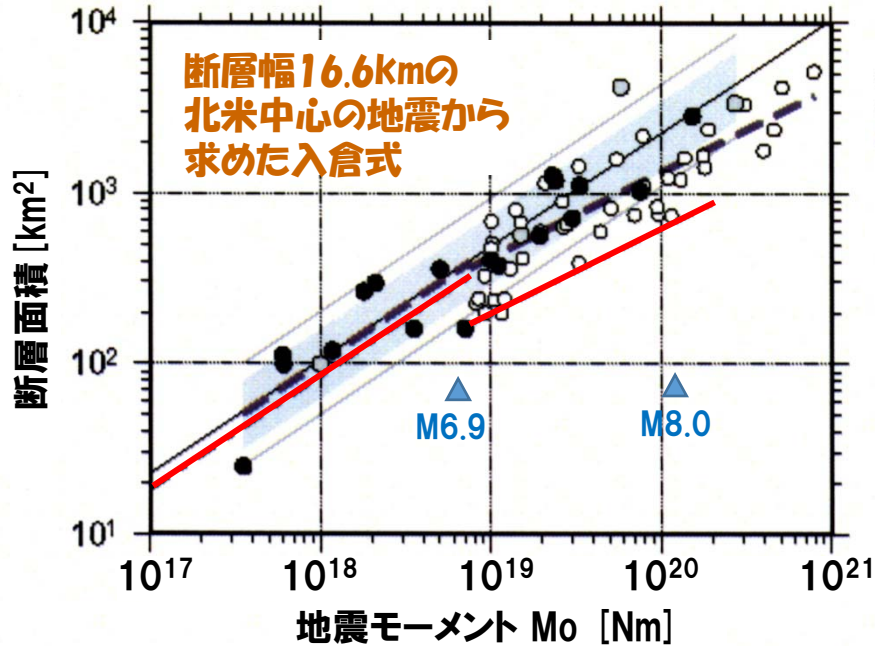
国内データによる断層長さ と 地震モーメント の関係

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.

入倉式(推本のレシピ)は断層面積と地震規模の関係を表しており、米国中心データ(左上図)から求めている!

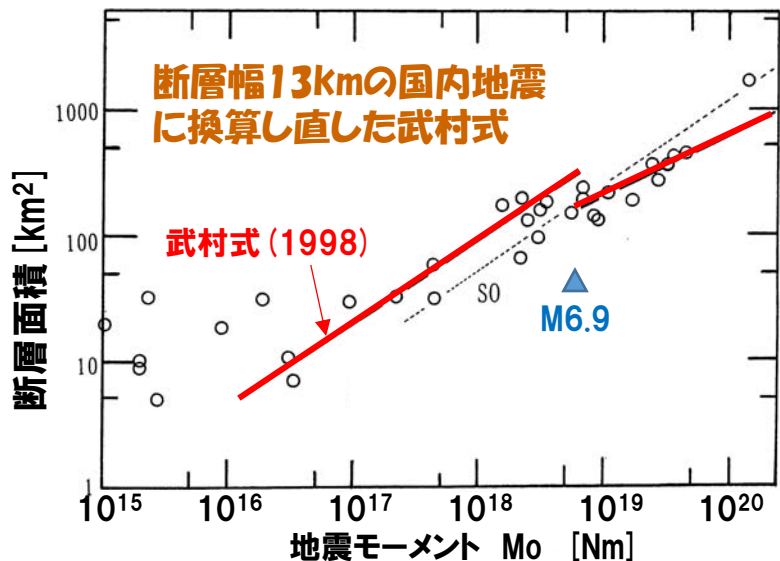


日本の地震では断層面積が小さいため、レシピでは、M7以上の地震規模が過小評価される!

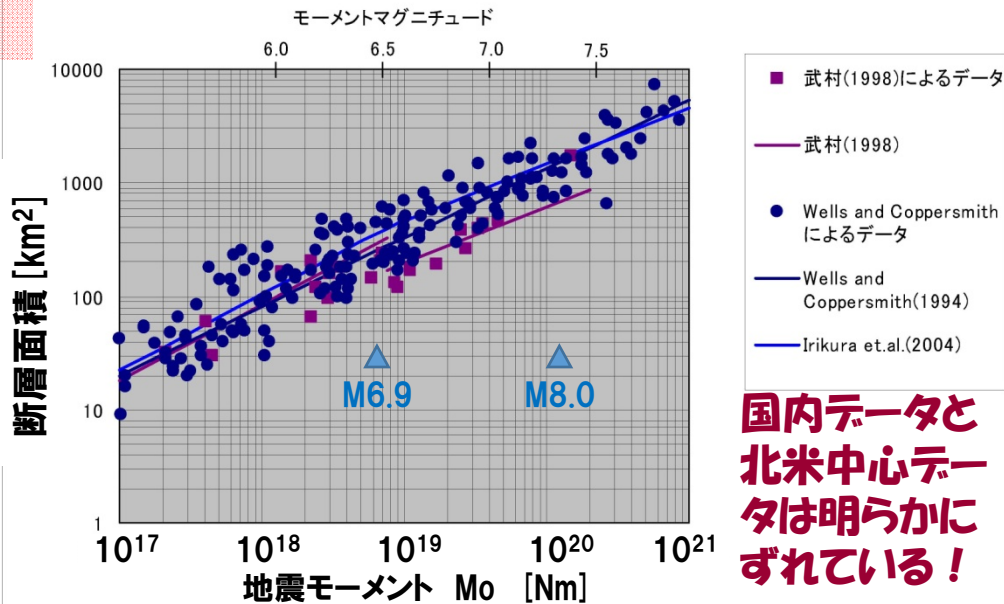


- Somerville et al. (1999)
- Takemura (1998)
- - - This study (入倉・三宅2001)
- Wells and Coppersmith (1994)
 $M_0 > 7.5 \times 10^{25}$ dyne-cm : $M_w > 6.52$
- Somerville et al. (1999)
- Miyakoshi (2001)
- low angle dip-slip fault

武村式(松田式)は北米中心のデータ(上図)には合わないが、日本国内データ(下図)には合う!

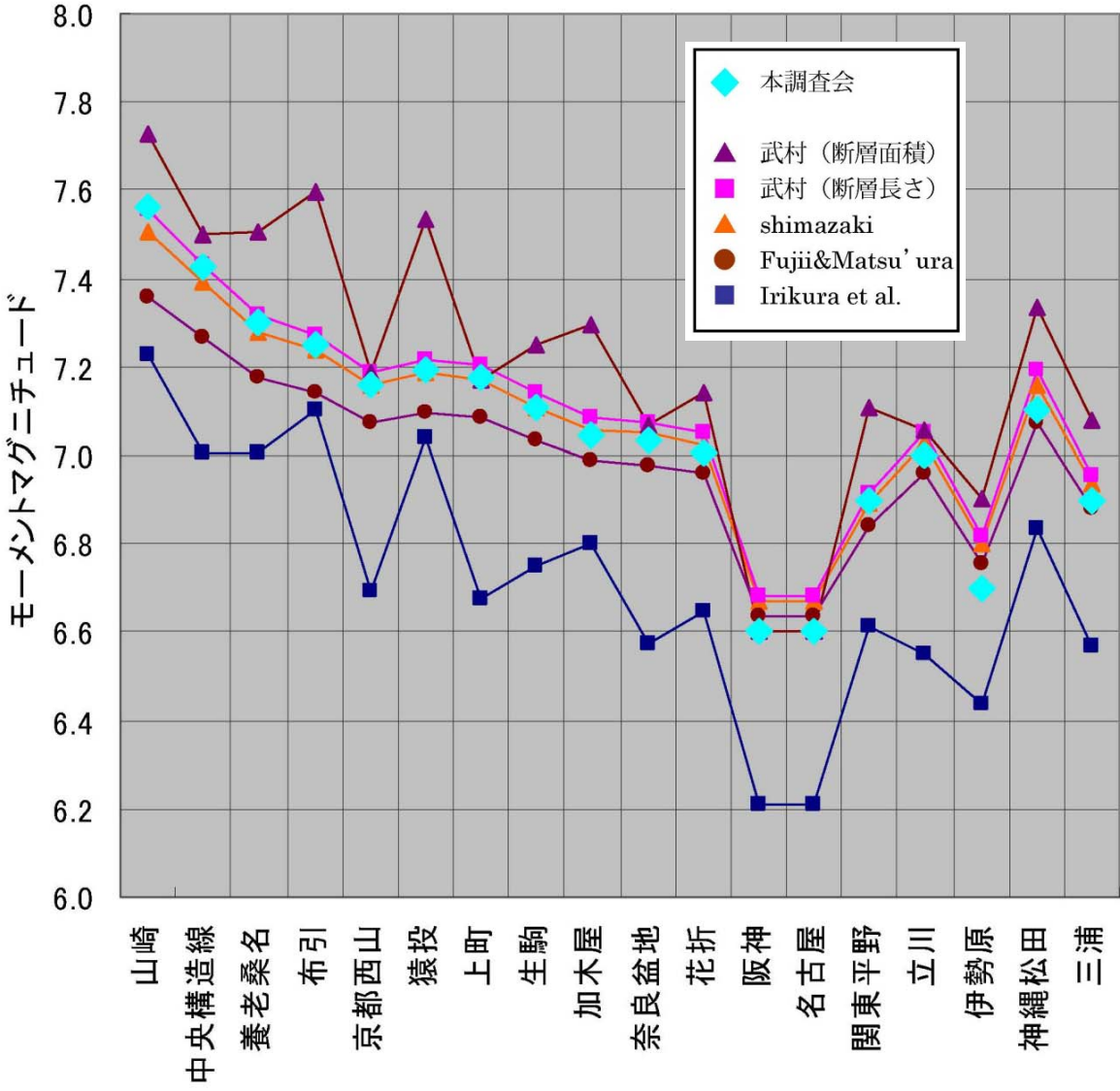


断層面積と地震モーメントの関係



国内データと北米中心データは明らかにずれている!

中央防災会議による地震規模の評価は Shimazaki式や武村式(断層長さ)に近い



**地震調査研究推進本部も
松田式(活断層の長さではなく
震源断層の長さで評価、武村
式(断層長さ)とほぼ同等)
で活断層による地震規模
を評価(長期評価)**

**耐震設計では地震
と津波で使い分け**

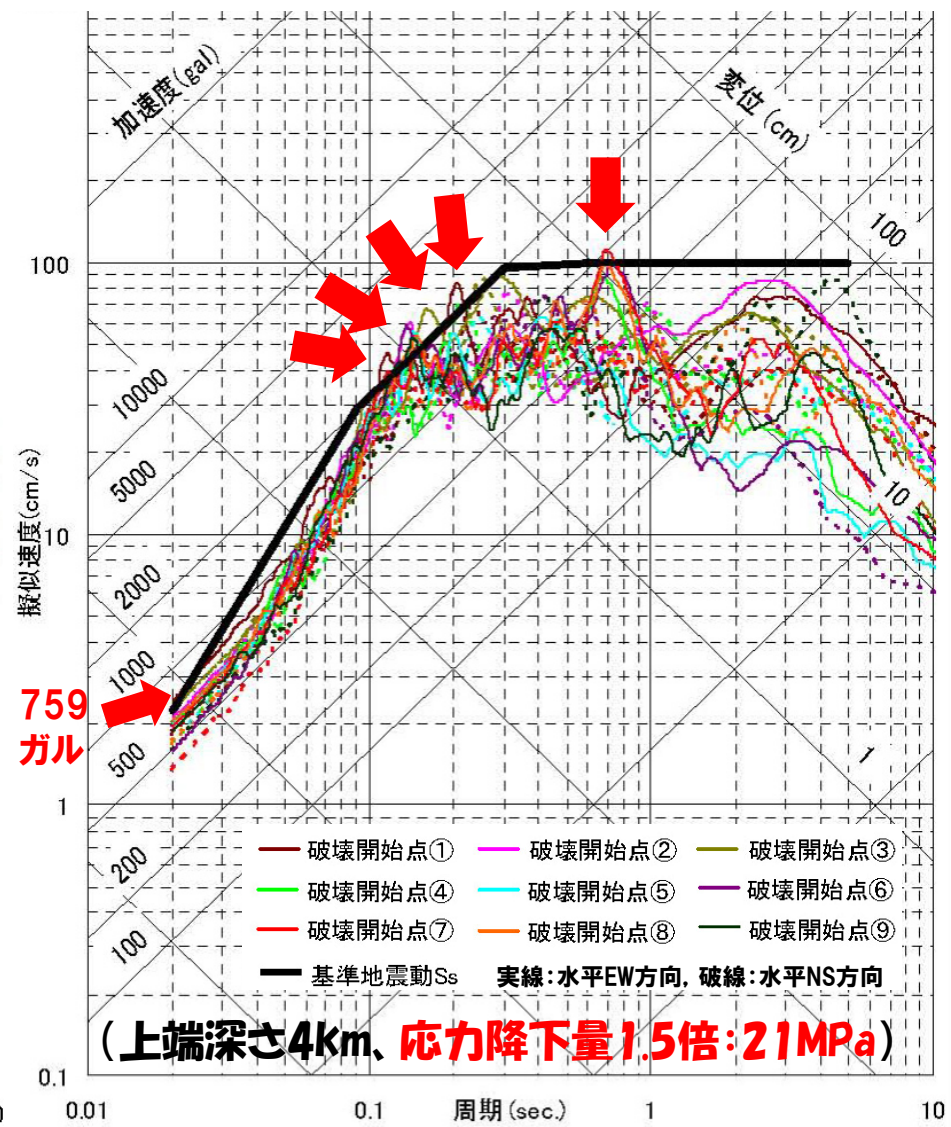
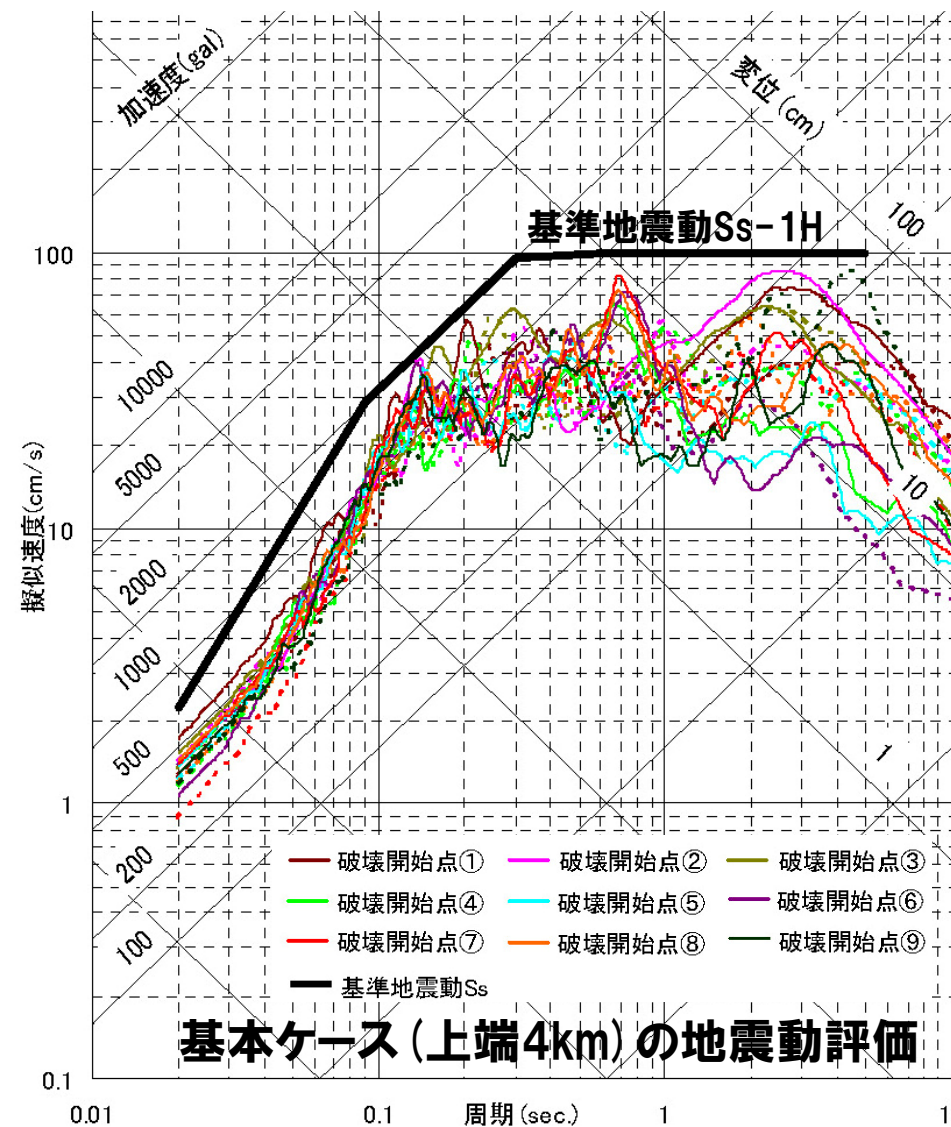
**津波高さの評価:
武村式(断層長さ)**

**地震動の評価
断層モデル:
入倉式**

**応答スペクトル:
松田式**

中央防災会議第26回「東南海、南海地震等に関する専門調査会」参考資料:
中部圏・近畿圏の内陸地震の震度分布の検討資料集, 図2.3.2(2006.12.7)

F0-A~F0-B断層~熊川断層の過小評価された断層モデルでも、 アスペリティの応力降下量を1.5倍にすると基準地震動を超える！ 地震規模を松田式に合わせれば、基準地震動をかない超えることに！



水平方向 (実線: EW方向、破線: NS方向)

(出典: 関西電力、第1回地震津波意見聴取会(地震動関係)、資料1-4-5、2012.4.23)

2. 基本モデルの設定と考慮すべき不確かさ

(2) 考慮すべき不確かさ

内陸地殻内地震の地震動を評価する際に、基本モデルのパラメータの値だけでは検討が不十分と考えられる場合は、次の

①～⑦のうち、必要と判断された不確かさについて考慮する。

①断層長さ(断層の連動も含む。)

②アスペリティの位置

③上端深さ

④断層傾斜角

⑤応力降下量について1.5倍又は20MPaの大きい方

⑥破壊開始点の位置(複数設定)

⑦モデル化に伴う不確かさ

実際に出た意見は「例えば、応力降下量1.5倍した場合及び25MPaのいずれか大きいほうをとって不確かさを見たことにするなどしたら良いのではないか。」

だったが・・・(原子力安全・保安院:「活断層による地震動評価の不確かさの考慮に係る考え方の整理(案)」に対する各委員からのコメントについて」, 第5回地震・津波に関する意見聴取会(地震動関係), 資料5-2, 2012.6.19)

《解説》 2. 考慮すべき不確かさ

➤⑤の応力降下量は、平成19年新潟県中越沖地震の知見を踏まえ、不確かさとして1.5倍を考慮することとしているが、今後は、断層のずれのタイプや地域特性等を考慮した検討も必要。また、特に応力降下量が20MPa以下のサイトは、適切性について再点検が必要。 ➡ 応答スペクトルでも「1.5倍」(または耐専スペクトルの内陸補正無)を考慮すべき!

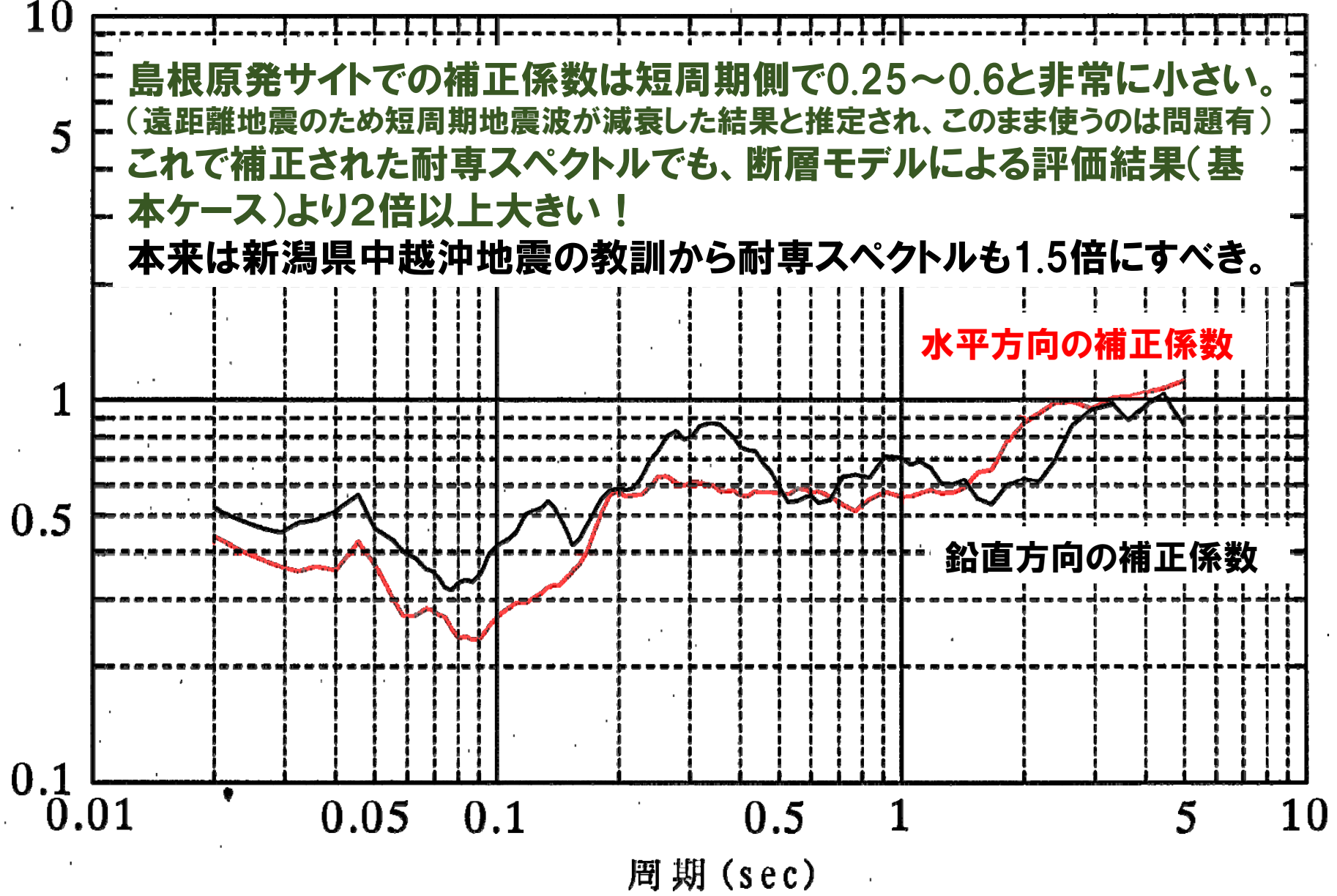
《解説》 4. 考慮すべき不確かさの組み合わせ

➤活断層が近距離にある場合を想定した断層モデルについては、中長期的な強震動評価の高度化に向けた取り組みの中で、今後検討されるべきである。 ➡ 耐専スペクトルも!

「震源特性の1.5倍」だけでなく、M7級の地震観測記録(通常「倍半分」のバラツキがある)がない場合には、伝播経路特性や地盤特性など考える最大のバラツキを考慮すべきである! (22)

島根原発サイトでの補正係数は短周期側で0.25~0.6と非常に小さい。
 (遠距離地震のため短周期地震波が減衰した結果と推定され、このまま使うのは問題有)
 これで補正された耐専スペクトルでも、断層モデルによる評価結果(基本ケース)より2倍以上大きい!
 本来は新潟県中越沖地震の教訓から耐専スペクトルも1.5倍にすべき。

比率

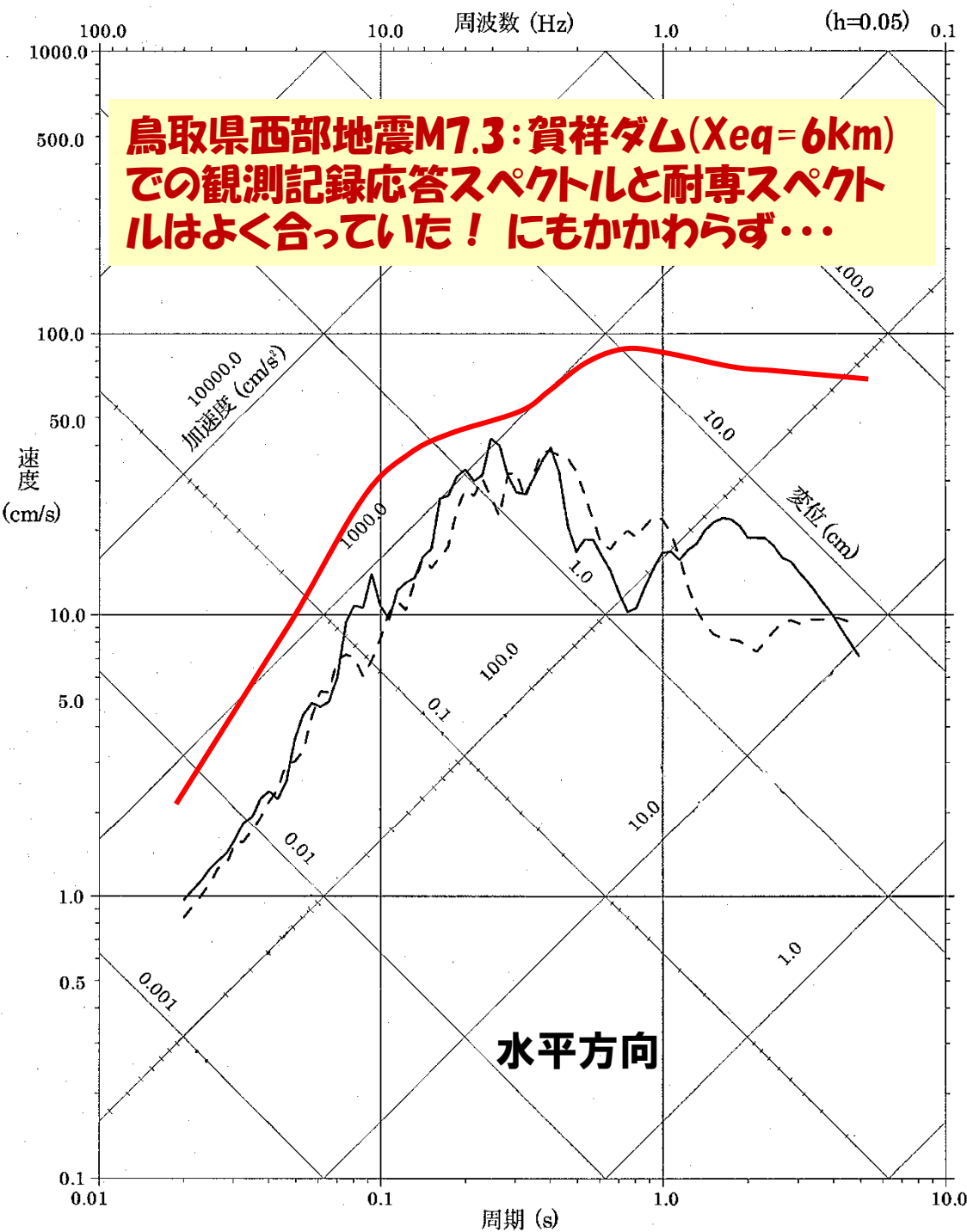


水平方向の補正係数

鉛直方向の補正係数

周期 (sec)

島根原発における4つの内陸地殻内地震の観測記録に基づく耐専スペクトル(Noda et al., 2002)の補正係数(2000年鳥取県西部地震(2000年10月6日, M7.3), 島根県東部の地震(2000.10.8, M5.6), 兵庫県北部の地震(2001.1.12, M5.6), 鳥取県中・西部の地震(2002.9.16, M5.5):中国電力「島根原子力発電所『発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針』の改訂に伴う耐震安全性評価結果中間報告書」(2008年3月), p.IV-9, p.IV-59の第2.3-8図)



突道断層の「断層モデルによる地震動評価結果(基本ケース: NS 実線, EW破線, M6.8)」は、
「【参考】耐専スペクトル(M7.1, Xeq=9.0km)」より、1/2以下に過小評価されている(短周期側)!

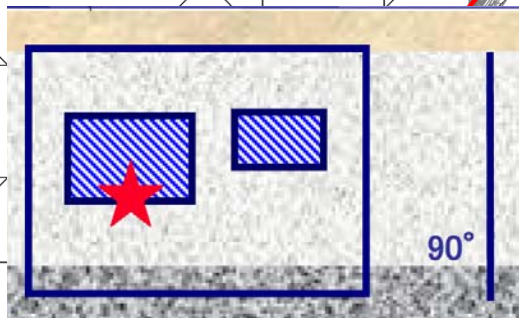
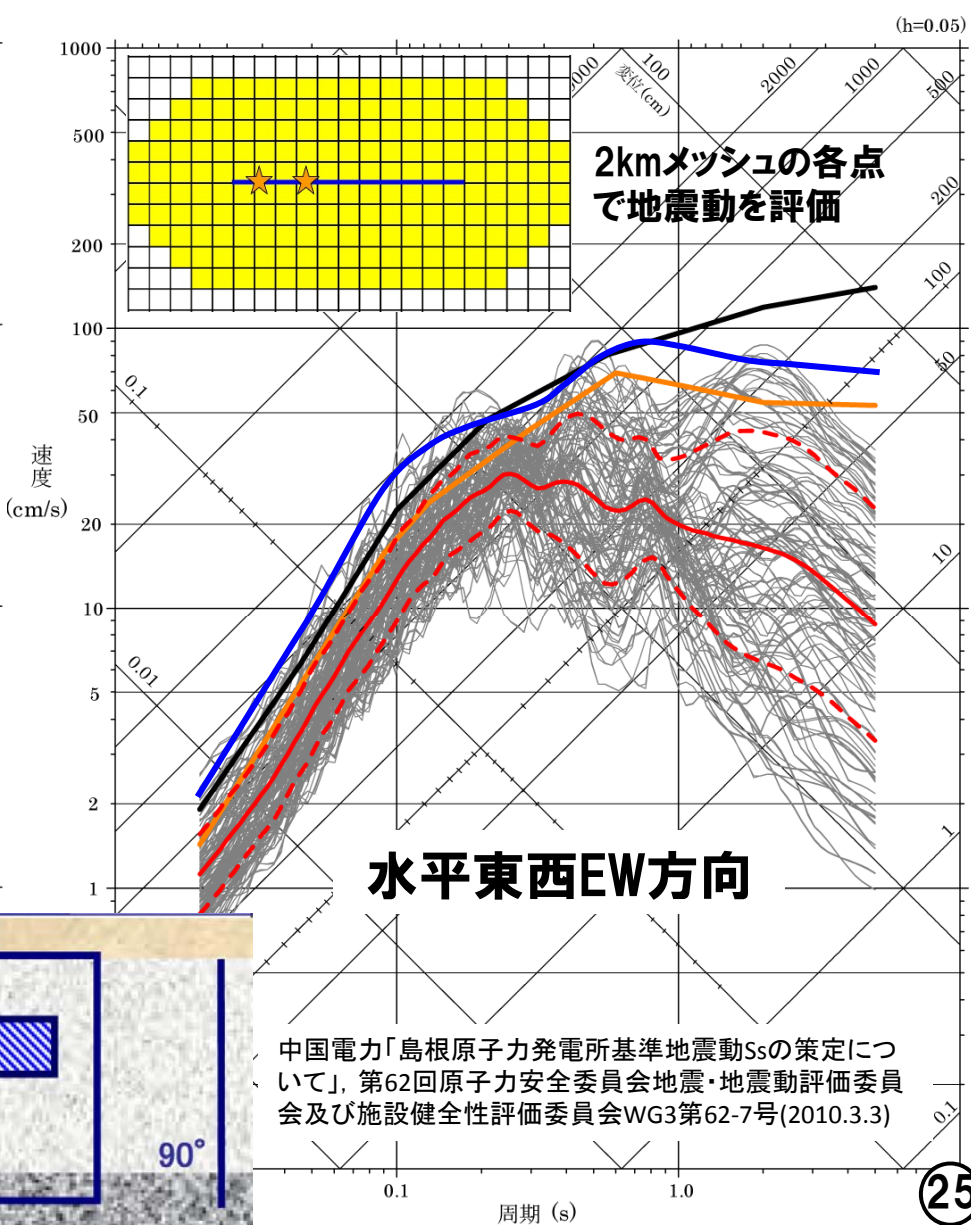
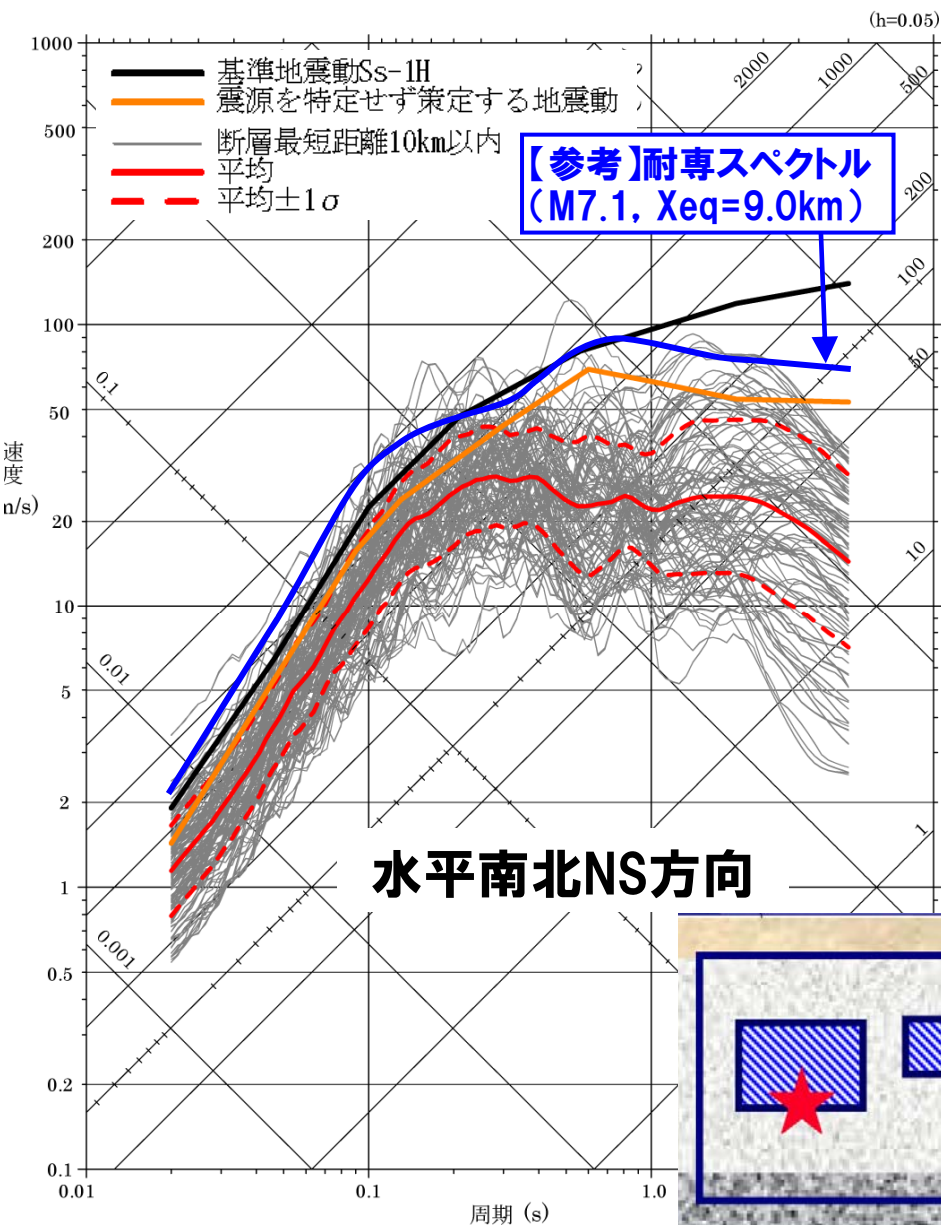
耐専スペクトル
断層長さ22km(松田式)
 ⇨ **M7.1(10.6 × 10¹⁸Nm)**

断層モデル
断層面積286km²(22km × 13km)
 ⇨ **M6.8(4.5 × 10¹⁸Nm)**

修正断層モデルでは、22km × 15km = 330km²でM7.1(10.6 × 10¹⁹Nm)

中国電力「島根原子力発電所」発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針の改訂に伴う耐震安全性評価結果中間報告書(2008年3月), p.IV-60, 第2.4-1図(耐専スペクトル)およびp.IV-70, 第3.1-8図(断層モデル)

突道断層(M7.1)の修正断層モデルに相当する「震源を特定せず策定する地震動」
(ケース2:M7.1, 長22km, 幅15km)は、耐専スペクトルに重なり、極近傍では基準地
震動を越えている:M6.8→M7.1, $\Delta\sigma=2.3\rightarrow4.32\text{MPa}$, $\Delta\sigma a=14.8\rightarrow19.7\text{MPa}$



地震調査研究推進本部による断層モデルのレシピの改訂

従来レシピ:

断層面積から地震モーメントを算出

$$S = \begin{cases} 2.23 \cdot 10^{-15} M_0^{2/3}, & S < 291\text{km}^2 \\ \text{(または } L < W_{\text{max}} \text{) の場合;} \\ 4.24 \cdot 10^{-11} M_0^{1/2}, & S \geq 291\text{km}^2 \\ \text{(または } L \geq W_{\text{max}} \text{) の場合} \end{cases}$$

修正レシピ:

断層長さから松田式でMを算出

$$\log_{10} L[\text{km}] = 0.6M - 2.9$$

換算式で地震モーメントを算出

$$M = \frac{1}{1.17} (\log_{10} M_0[\text{Nm}] - 10.72)$$

断層面積を断層モデルの式で逆算
震源断層の幅と長さを
幅+2km, 長さ+5km以内で調整



警固断層への適用例

震源断層: $L=27\text{km}$

$W=14\text{km}$, $S=378\text{km}^2$
(M7.0に留まる)

$L=27\text{km}$ より M7.2

これより

$M_0 = 1.47 \times 10^{19}\text{Nm}$

これより

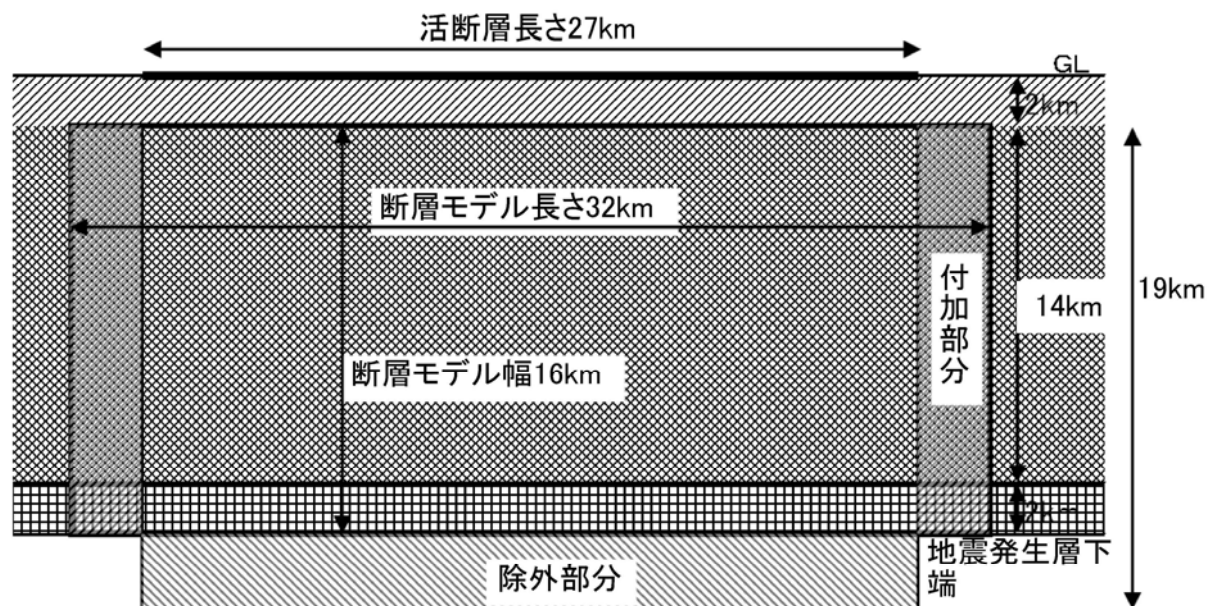
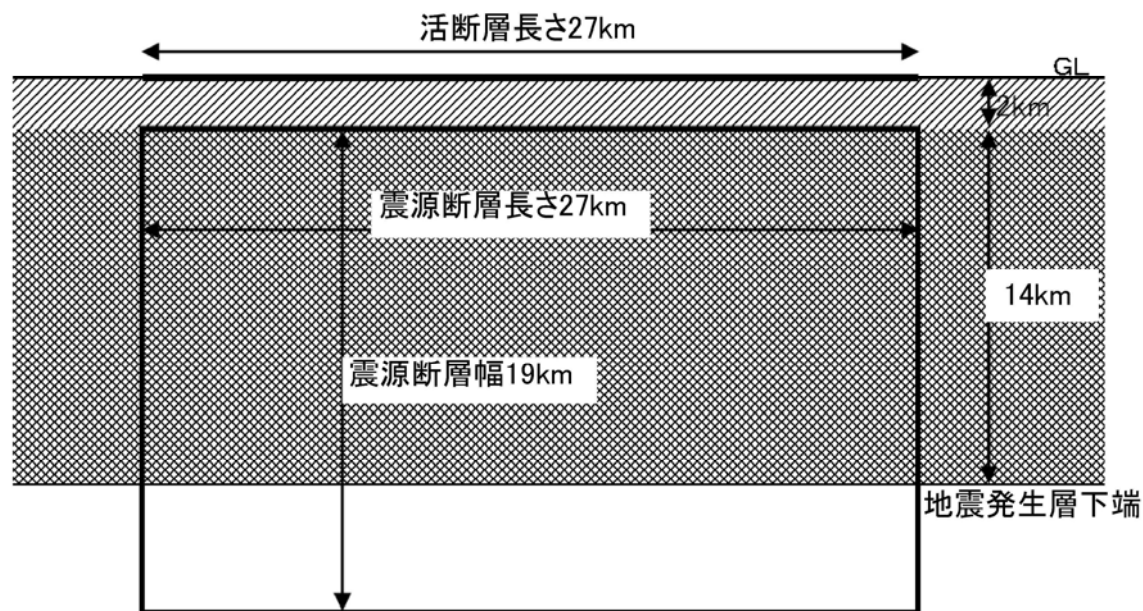
$S=513\text{km}^2$

これより

$W_{\text{model}}=14+2=16\text{km}$

$L_{\text{model}}=27+5=32\text{km}$

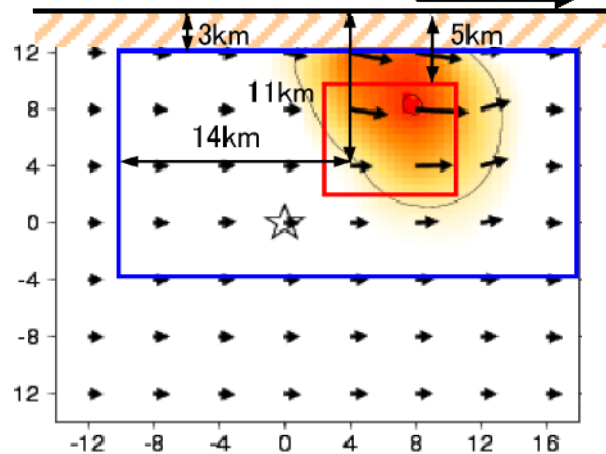
$S_{\text{model}}=512\text{km}^2$



断層モデル長さおよび幅の概念図
(上) 初期モデル、(下) 修正モデル

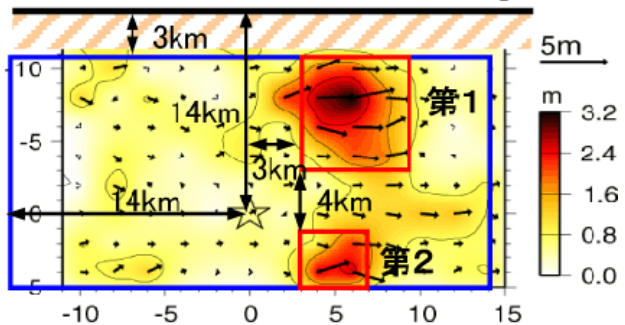
2005年福岡県西方沖の地震 (M7.0) に関する観測波形インバージョンと断層モデル

ケース1 Kobayashi et al. より N123° →126° E



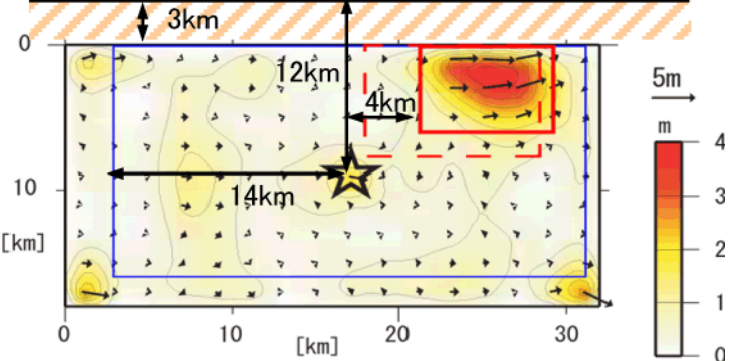
断層面積 32km × 28km → 28km × 16km
 アスペリティ 8km × 8km Da=1.60m

ケース2 Aaano and Iwata より N122° →126° E



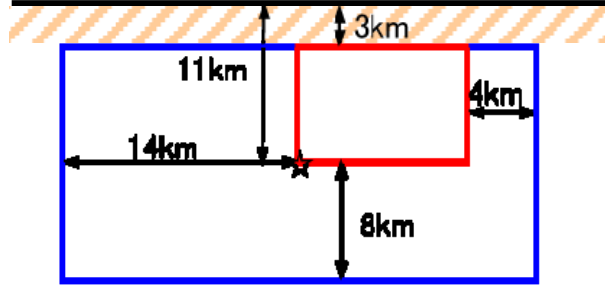
断層面積 26km × 18km → 28km × 16km
 第1アスペリティ 14km × 14km Da1=1.79m
 第2アスペリティ 4km × 4km Da2=1.03m

ケース3 Sekiguchi et al. より N126° E



断層面積 32km × 18km → 28km × 16km
 アスペリティ 8km × 8km Da=1.60m

ケース4 「レシピ」より N126° E



断層面積 28km × 16km
 アスペリティ 10km × 8km Da=1.60m

- 震源断層をすべて 28km × 16kmへ修正 (断層面積448km²)
- 地震モーメントを断層モデルで1.12 × 10¹⁹Nm (M7.1, Mw6.63)と算出
- 短周期レベルも断層モデルで1.18 × 10¹⁹Nm/s²と算出

- アスペリティ総面積はケース1~3では各インバージョン結果による
 ケース1: 64km² (14.3%)
 ケース2: 64km² (14.3%)
 ケース3: 48km² (10.7%)
 ケース4: 80km² (17.9%)

- 断層平均応力降下量は断層モデルより、すべて 2.87MPa

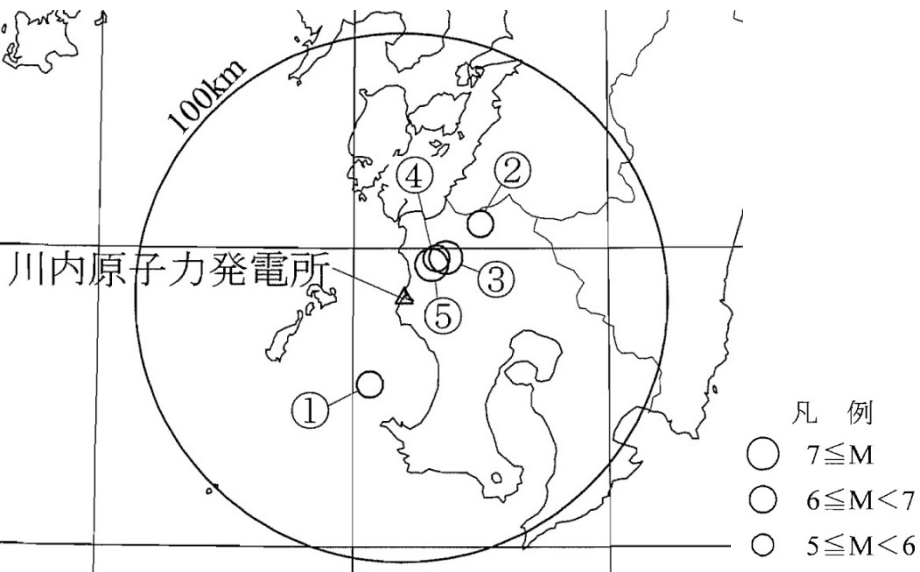
- アスペリティ平均応力降下量はアスペリティ面積ごとに断層モデルで算出

- 破壊伝播速度は
 ケース1: 3.0km/s
 ケース2: 2.1km/s
 ケース3: 2.1km/s
 ケース4: 2.4km/s

波形インバージョンではアスペリティの面積が小さく、応力降下量が大きい!

地震調査研究推進本部地震調査委員会強震動評価部会「2005年福岡県西方沖の地震の観測記録に基づく強震動評価手法の検証について」(2008.4.11), 同中間報告(2007.3.19)

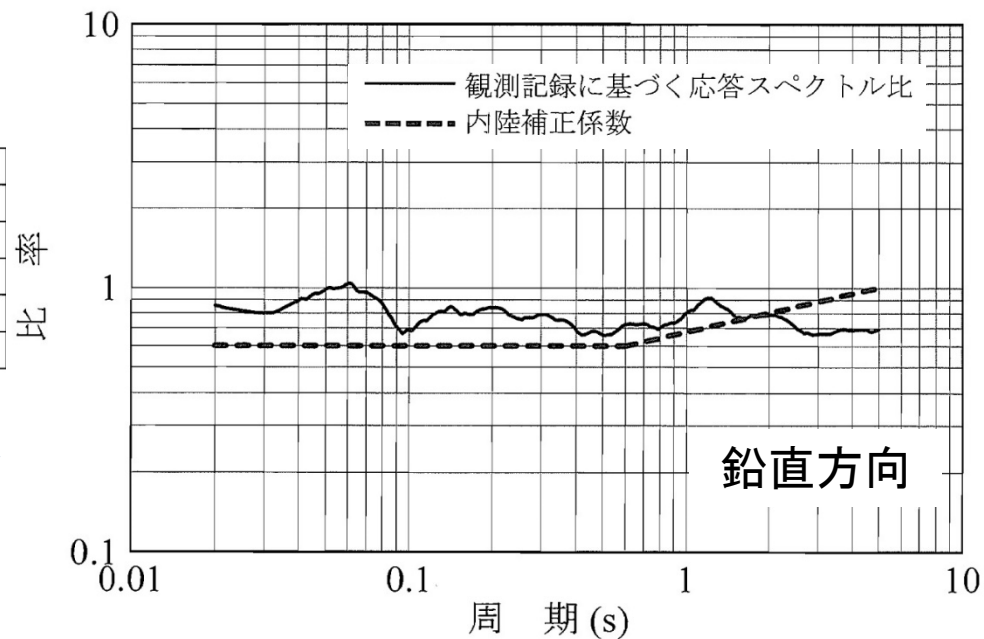
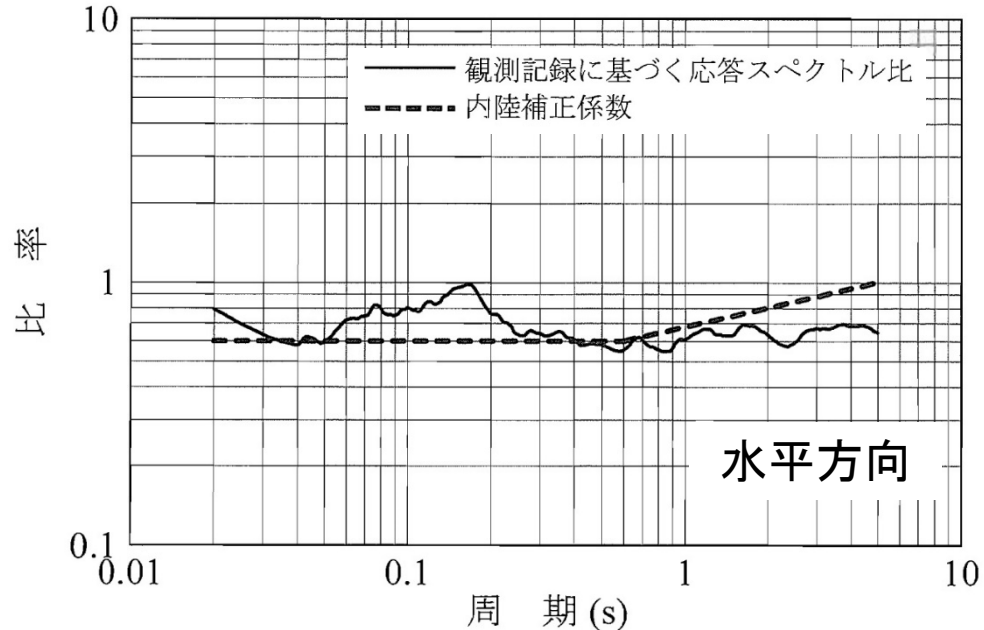
川内原発における内陸地殻内地震の観測記録は海洋プレート間地震に近い



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

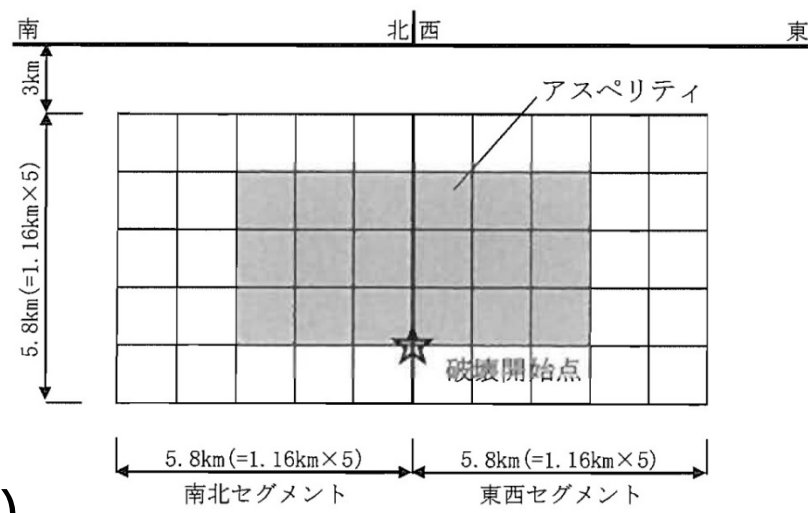
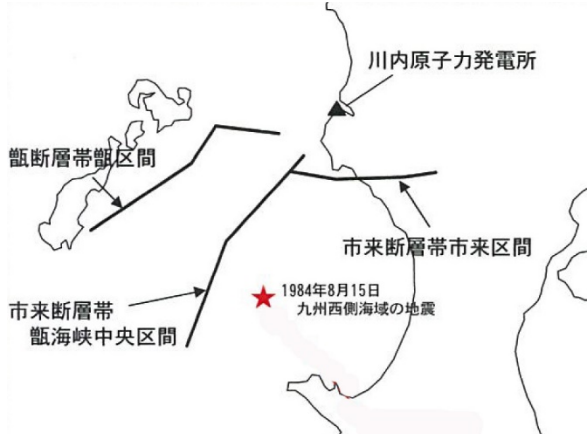
主な観測地震の震央分布

応力降下量が通常より大きい可能性があると見える



川内原発における内陸地殻内地震の観測記録に基づく補正係数(1に近く、補正係数は用いない) ②9

1997年5月13日鹿児島県北西部地震M6.4の特性化震源モデル



断層平均応力降下量がレシピの2.5倍

→ **断層面積が異常に小さい(Mを合わせるため)**

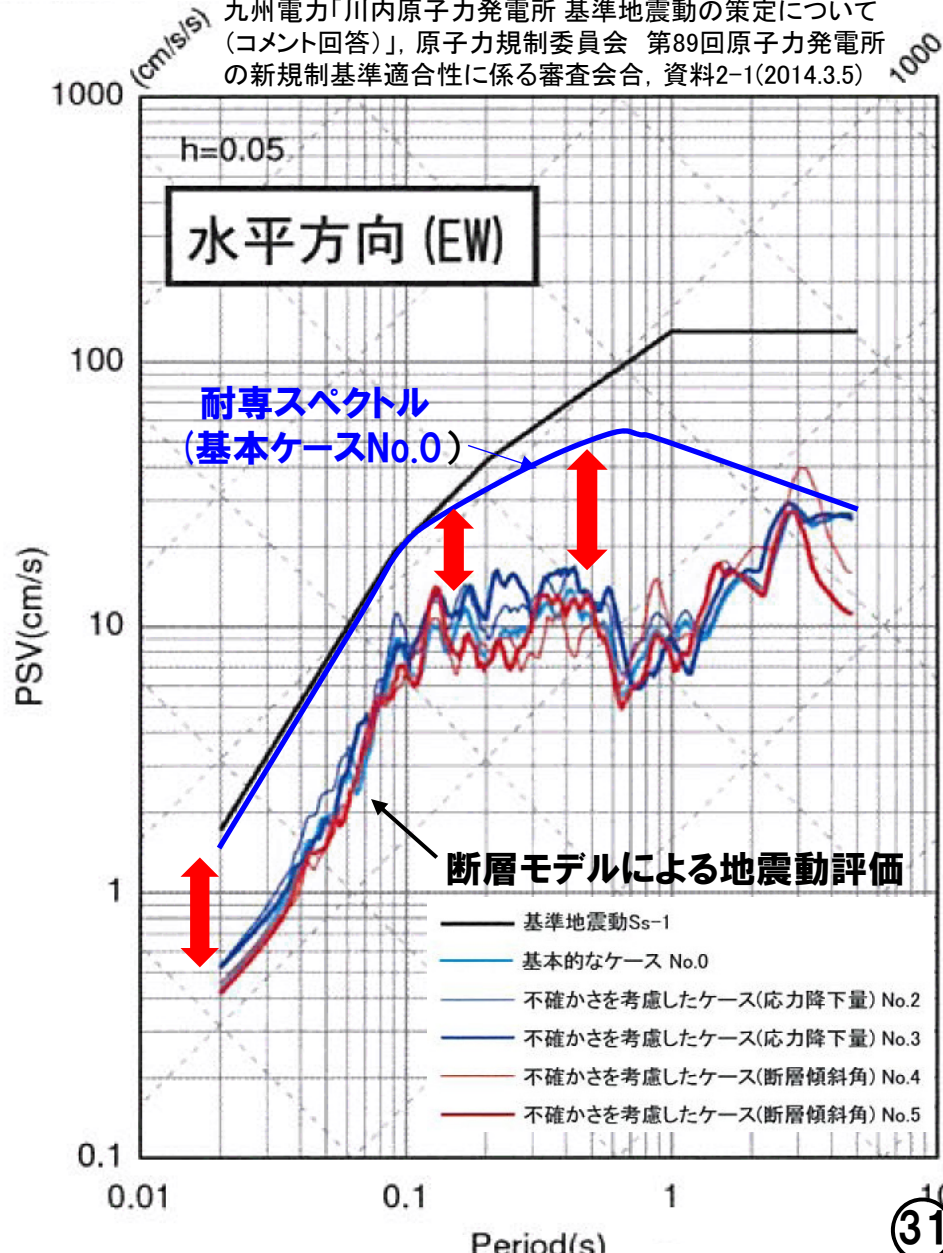
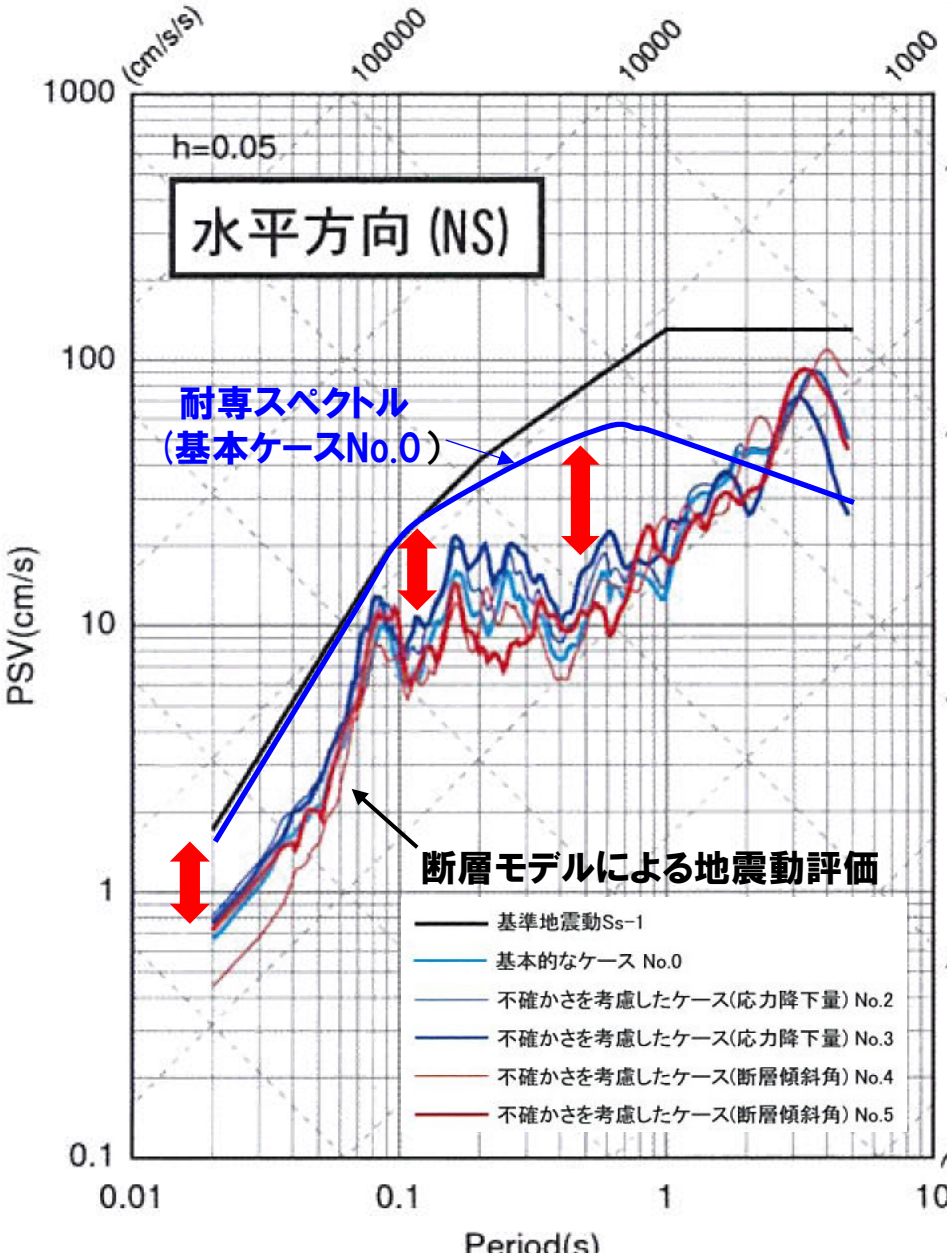
→ **アスペリティ面積が異常に大きい($\Delta\sigma$ と比べて $\Delta\sigma a$ が小さいため)**

	九州電力設置変更 許可申請書	九州電力による 断層モデル設定法	断層モデルレシピ (未飽和断層)
断層面積 S	66.2km ²	66.2km ²	66.2km ²
地震モーメント M_0	9.0 × 10 ¹⁷ Nm (M6.2相当)	1.3 × 10 ¹⁸ Nm (M6.3相当)	5.1 × 10¹⁷Nm (M6.0相当)
平均応力降下量 $\Delta\sigma$	5.8MPa	5.8MPa	2.31MPa
アスペリティ面積 S_a	24.0km ² (36.3%)	24.0km ² (36.3%)	9.85km² (14.9%)
アスペリティ実効応力 $\Delta\sigma a$	15.9MPa	15.9MPa	15.6MPa
短周期レベル A	5.42 × 10 ¹⁸ Nm/s ²	6.9 × 10 ¹⁸ Nm/s ²	4.24 × 10 ¹⁸ Nm/s ²

市来(いちき)断層帯市来区間(24.9km×13km, M7.2)の九州電力による地震動評価

断層モデルは、耐専スペクトルの1/2~1/3に地震動を過小評価!

九州電力「川内原子力発電所 基準地震動の策定について (コメント回答)」, 原子力規制委員会 第89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(2014.3.5)



市来(いちき)断層帯市来区間(24.9km×13km, M7.2)に対する断層モデルのパラメータ

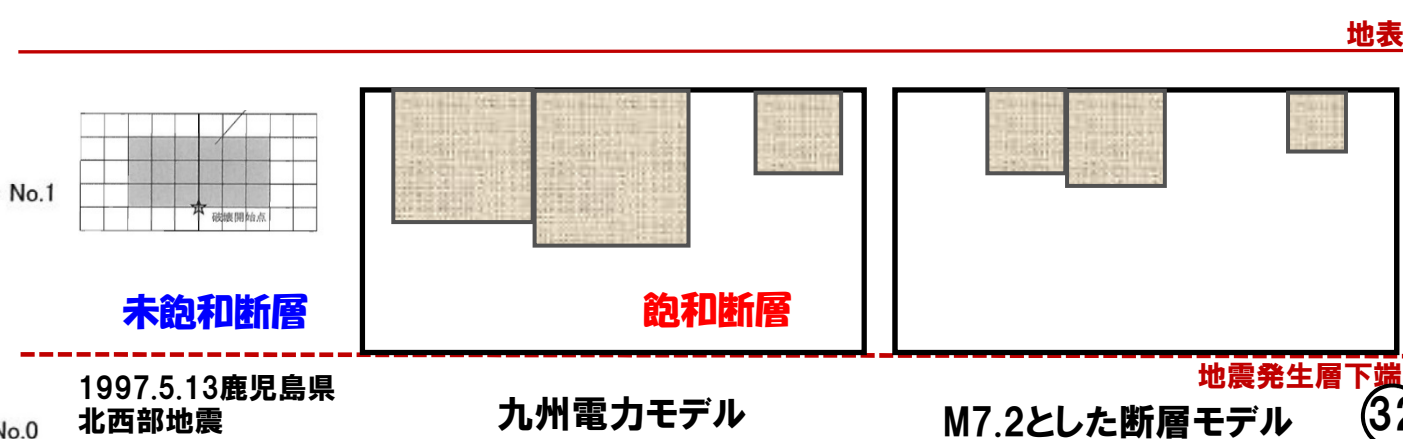
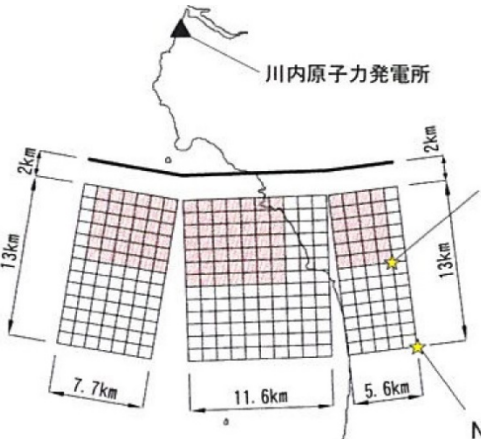
九州電力は、**M6クラス(未飽和断層)の応力降下量をM7クラスの飽和断層に**

そのまま適用し、地震モーメントと短周期レベルを逆算

--- 飽和断層と未飽和断層でのスケーリング則の違いを無視！

九州電力「川内原子力発電所 基準地震動の策定について(コメント回答)」, 原子力規制委員会 第89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(2014.3.5)

	九州電力による断層モデル設定法	断層モデルレシピ(短周期レベル法)	松田式でM7.2とした場合(Sa/S=0.22)
断層面積 S	323.7km ²	323.7km ²	323.7km ²
地震モーメント Mo	1.39 × 10 ¹⁹ Nm (M7.2相当)	5.83 × 10 ¹⁸ Nm (M6.9相当)	1.39 × 10¹⁹Nm (M7.2相当)
平均応力降下量 Δσ	5.8MPa	2.44MPa	5.83MPa
アスペリティ面積 Sa	118.08km ² (36.5%)	51.64km ² (16.0%)	71.21km² (22.0%)
アスペリティ実効応力 Δσα	15.9MPa	15.3MPa	26.5MPa
短周期レベル A	1.53 × 10 ¹⁹ Nm/s ²	9.54 × 10 ¹⁸ Nm/s ²	1.28 × 10 ¹⁹ Nm/s ²



1997.5.13鹿児島県北西部地震

九州電力モデル

M7.2とした断層モデル