浦底断層等の連動を考慮した
地震動評価について

平成２４年５月８日

原子力安全・保安院

敦賀発電所

「甲楽城沖断層」,「浦底断層」,「池河内断層」,「柳ヶ瀬山断層」の連動を考慮した地震動評価

平成24年4月23日

日本原子力発電株式会社

◆評価する断層

「甲楽城沖断層」,「浦底断層」,「池河内断層」,「柳ヶ瀬山断層」を一連の断層(約35km)として，地震動評価を実施する。

◆評価方法

○応答スペクトルに基づく地震動評価

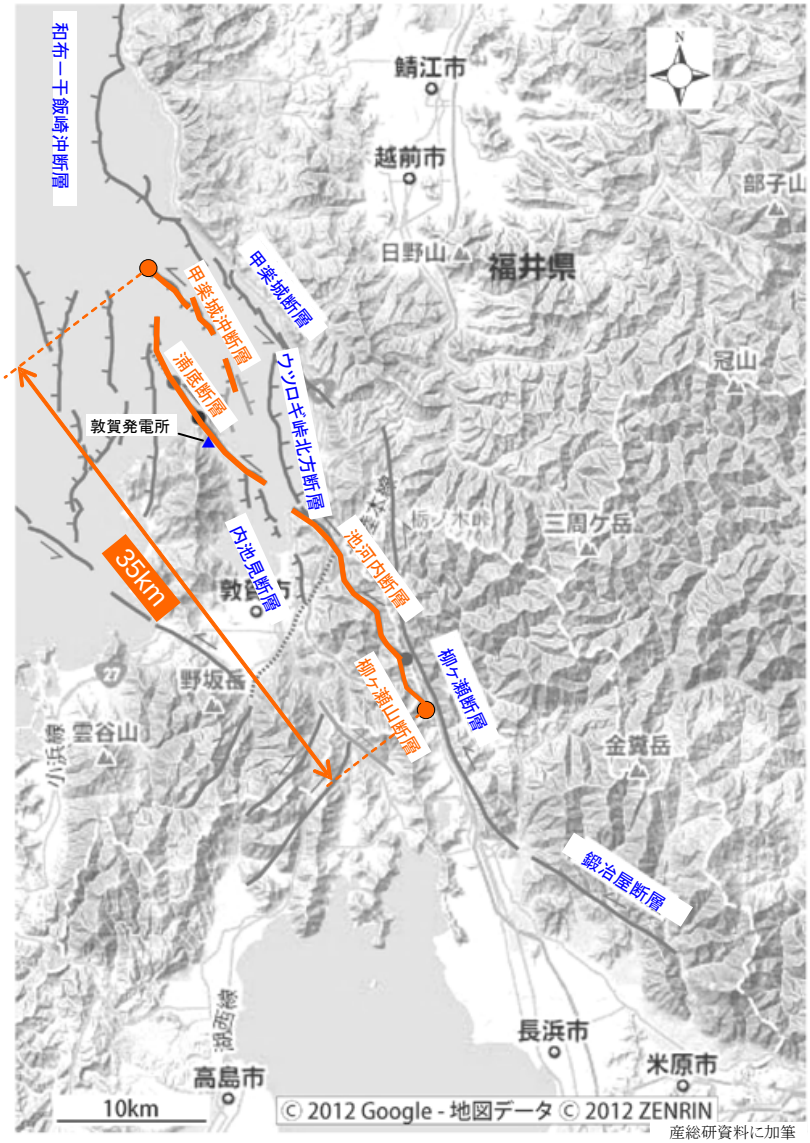
耐専式の適用性を検討し，適用が難しいと判断した場合は，断層モデルを用いた地震動評価結果を重視し，断層最短距離を用いた距離減衰式による評価を実施する。

○断層モデルを用いた地震動評価

評価する震源の近傍で発生した地震の適切な観測記録が得られていないため，短周期側に統計的グリーン関数法，長周期側に理論的方法を適用したハイブリッド合成法により評価する。

○地震動評価に考慮する不確かさ

地震動評価に考慮する不確かさは，上端深さを浅くしたケースと短周期の地震動レベルを1.5倍したケース(断層モデルのみ)とする。



産総研資料に加筆

若狭周辺地域は，震源分布のデータが少ないため，各種地下構造調査結果から地震発生層を推定し，それを基に断層上端・下端深さを設定した。

① 地盤速度構造による検討

(1)各種調査，探査

ボーリング調査，PS検層，微動アレー探査，地震計水平アレー観測，等の結果より地盤速度構造を検討した。

その結果，Vp≧6km/s（Vs≧3.6km/s）の深さは4kmであった。

(2)地震波速度トモグラフィ

対象地点を取り囲むような震源と観測点の観測記録を用いて，地震波の伝播をインバージョン解析し，速度層構造を求めた。

その結果，P波速度分布は，敦賀半島周辺でVp=6km/s層が深さ 4～5kmに分布している。またP波速度分布に震源分布を重ねると，Vp=6km/s層と地震発生の上限深さが概ね対応して見られる。

② 地震発生深さによる検討

(1)周辺地域における地震発生状況の調査

若狭地域の微小地震の発生分布について調査すると，地震の発生分布は深さ 5～20kmに見られた。

(2)地震発生状況の統計的評価

伊藤・中村（1998）を参考に，若狭地域の地震の10%発生頻度深さ（D10）は約7km，地震の90%発生頻度深さ（D90）は約15kmであった。

→ 若狭地域における断層上端・下端深さ　上端 4km　下端 18km

③ 他機関による検討

地震調査委員会が実施した強震動予測について整理すると，若狭周辺における断層上端・下端深さは 3～18kmであった。

→ 不確かさとして考慮する断層上端・下端深さ　上端 3km　下端 18km

◆断層モデルを用いた地震動評価に用いる地盤モデルは，以下の方針で設定した。

〇浅部地盤構造

・速度構造：敷地内のPS検層結果より設定

・減衰定数：佐藤（浩）他（2007,2009）の考え方を参考にして，敷地内のPS検層結果より得られた速度構造の不均質性データ等をもとに設定

〇深部地盤構造

・速度構造：敷地内及び敷地周辺で実施した屈折法探査，微動アレー探査，地震計水平アレー観測及び地震波速度トモグラフィ解析結果に基づき設定

・減衰定数：上記調査結果は，若狭地域の深部地盤構造を表したものであることや，これまでの審議を踏まえ，敷地及び敷地周辺サイトの経験的サイト増幅特性やそれに対応する地盤モデルを参照して，減衰定数0.5%（Q値100）を設定

EL(m)	層	層厚 (m)	密度 ρ (t/m^3)	S波速度 Vs(m/s)	P波速度 Vp(m/s)	Q値	減衰定数 (%)
−10	1	34	2.6	1450	3700	16.7	3.0
−44	2	86	2.6	1760	4300	16.7	3.0
−130	3	70	2.6	2200	4600	16.7	3.0
−200	3’	430	2.6	2200	4600	100.0	0.5
−630	4	770	2.6	2800	5130	100.0	0.5
−1400	5	2600	2.6	3100	5310	100.0	0.5
−4000	6	−	2.7	3600	6270	100.0	0.5

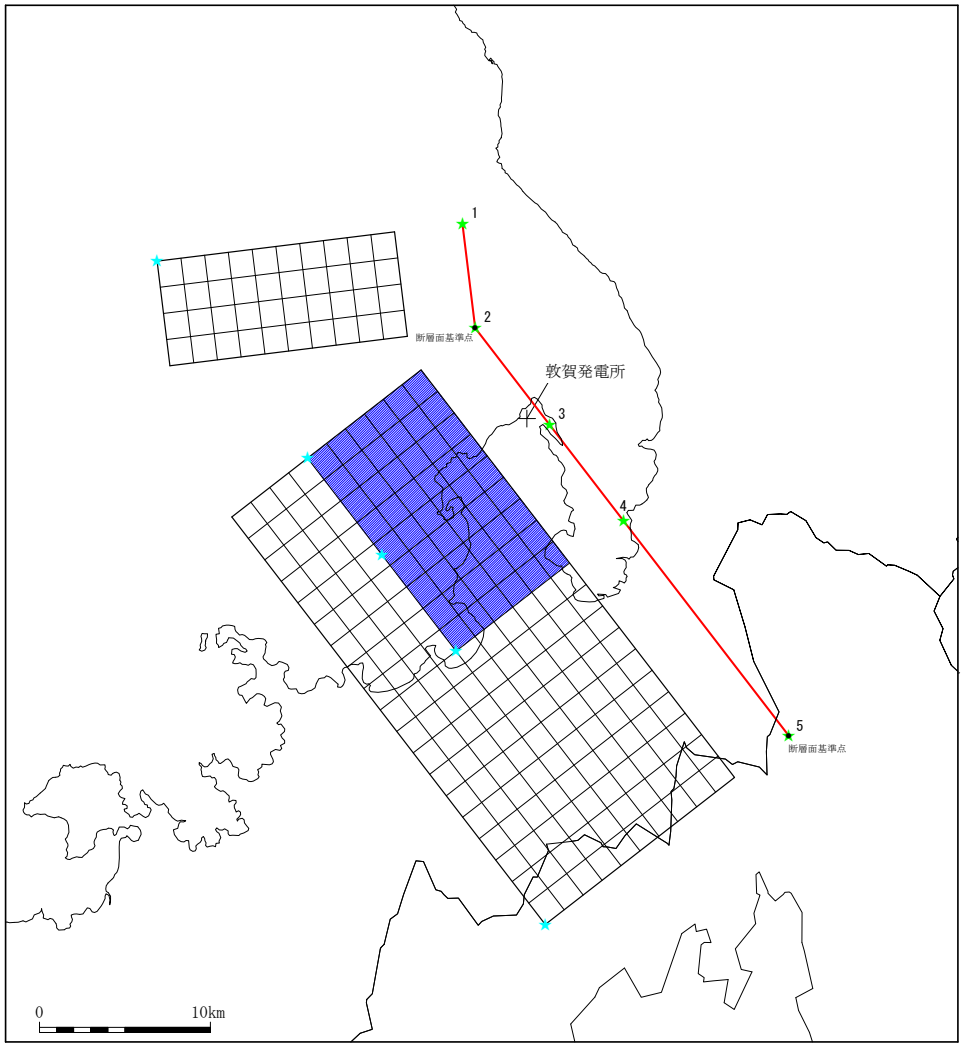
※断層上端深さの不確かさ（3km）を考慮する場合は，第5層の層厚を1600mとする。

※Qp=2/3×Qs

■ 地震動評価において考慮する不確かさ

	断層上端深さ	断層傾斜角	アスペリティ	破壊開始点	短周期レベル	備考
基本ケース	4km	90°	敷地近傍に配置	複数設定	レシピ平均	
断層上端深さの不確かさを考慮	3km	90°	敷地近傍に配置	複数設定	レシピ平均	
短周期レベル	4km	90°	敷地近傍に配置	複数設定	レシピ平均 ×1.5倍	中越沖地震 知見反映

■ 甲楽城沖～柳ヶ瀬山のモデル化



※ 傾斜角90°の断層面は、傾斜角0°として図化している。

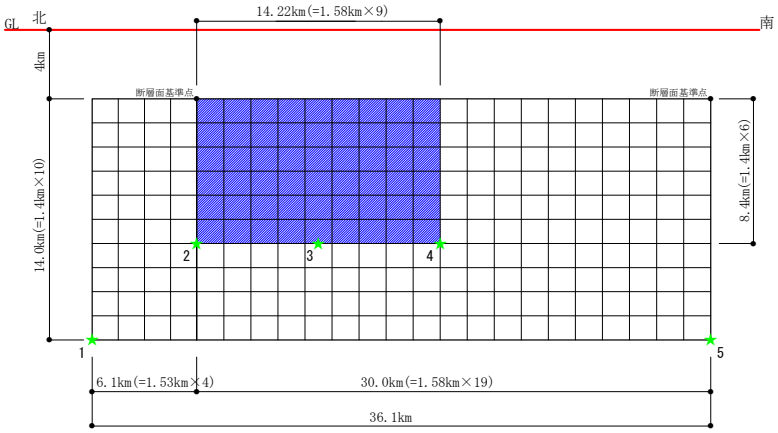
★：破壊開始点

i）断層配置図

◆モデル化の考え方

- 甲楽城沖～柳ヶ瀬山（35km）※を1つのセグメントとして評価する。
- 地震モーメントについては，地震調査研究推進本部の強震動予測レシピに基づき，面積から算出する。
- アスペリティについては，敷地への影響が大きいと考えられる位置に配置する。
- 破壊開始点については，破壊の進行による敷地への影響を考慮し，断層下端，アスペリティ下端及び中央に配置する。

※断層モデルの地表トレース長さは36km



★：破壊開始点

ii）断面図

断層モデル図：基本ケース(断層上端深さ4km)

■ 甲楽城沖～柳ヶ瀬山の断層パラメータ

◆ 基本ケース

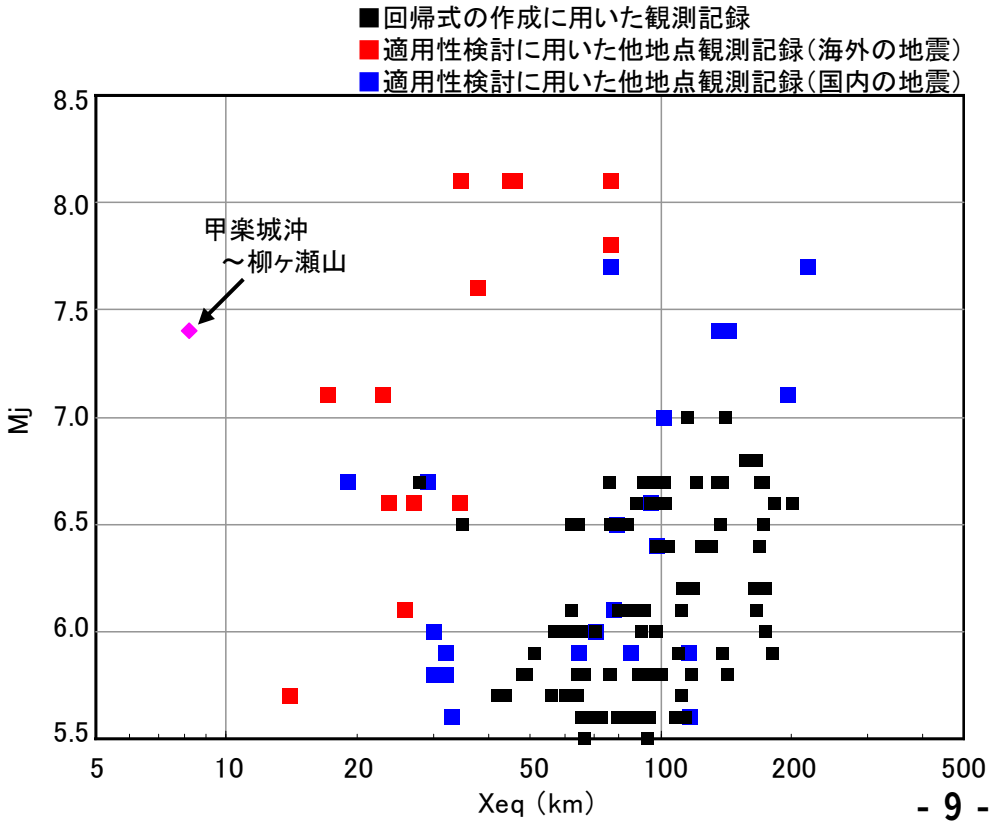
断層パラメータ	パラメータ	設定方法
断層長さL(km)	36.1	断層位置から計算
断層傾斜角(°)	90	調査結果に基づき設定
断層上端深さ(km) 断層下端深さ(km)	4 18	微小地震の発生及び地下構造を参考に設定
断層幅W(km)	14	地震発生層と傾斜角から設定
断層面積S(km^2)	505.4	断層面より算定
破壊伝播様式	同心円状	ー
地震モーメントM_0(Nm)	1.42×10^{19}	$M_0=[S/(4.24\times10^{-11})]^{2.0}$
剛性率(N/m^2)	3.50×10^{10}	$\mu=\rho\beta^2$, ρ=2.7g/cm^3, β=3.6km/s
平均すべり量D(cm)	80.3	$D=M_0/(\mu S)$
平均応力降下量$\Delta\sigma$(MPa)	3.1	$\Delta\sigma=(7\pi^{1.5}/16)(M_0/S^{1.5})$
破壊伝播速度Vr(km/s)	2.59	$Vr=0.72\beta$
立ち上がり時間Tr(sec)	1.06	$Tr=2.03\times10^{-9}M_0^{1/3}$
高周波限界遮断周波数fmax(Hz)	8.3	香川他(2003)
短周期レベルA(Nm/s^2)	1.28×10^{19}	$A=2.46\times10^{17}\times M_0^{1/3}$
Q値	$50f^{1.1}$	佐藤他(2007)

断層パラメータ		パラメータ	設定方法
全アスペリティ	面積S_a(km^2)	121.5	$Sa=\pi r^2$ $r=(7\pi M_0\beta^2)/(4AaR)$,$R=(S/\pi)^{0.5}$
	平均すべり量D_a(cm)	161.5	$D_a=\gamma_D D$, γ_D=2.01
	地震モーメントM_{0a}(Nm)	6.86×10^{18}	$M_{0a}=\mu S_a D_a$
	応力降下量$\Delta\sigma_a$(MPa)	12.7	$\Delta\sigma_a=(S/S_a)\Delta\sigma$
背景領域	面積S_b(km^2)	383.9	$S_b=S-S_a$
	平均すべり量D_b(cm)	54.7	$D_b=M_{0b}/(\mu S_b)$
	地震モーメントM_{0b}(Nm)	7.34×10^{18}	$M_{0b}=M_0-M_{0a}$
	実効応力$\Delta\sigma_b$(MPa)	2.5	$\sigma_b=0.2\Delta\sigma_a$

■ 応答スペクトルに基づく地震動評価

◆ 評価対象地震の等価震源距離と耐専式での地震の諸元との比較

1. 回帰分析に用いた地震の諸元
   5.5≦Mj≦7.0（Mj：気象庁マグニチュード）
   h≦60km（h：震源深さ）
   28km≦Xeq≦202km（Xeq：等価震源距離）
2. 観測記録を用いて距離減衰式の適用性について検討した際に用いた地震の諸元
   5.4≦Mj≦8.1（Mj：気象庁マグニチュード）
   h≦60km（h：震源深さ）
   14km≦Xeq≦218km（Xeq：等価震源距離）

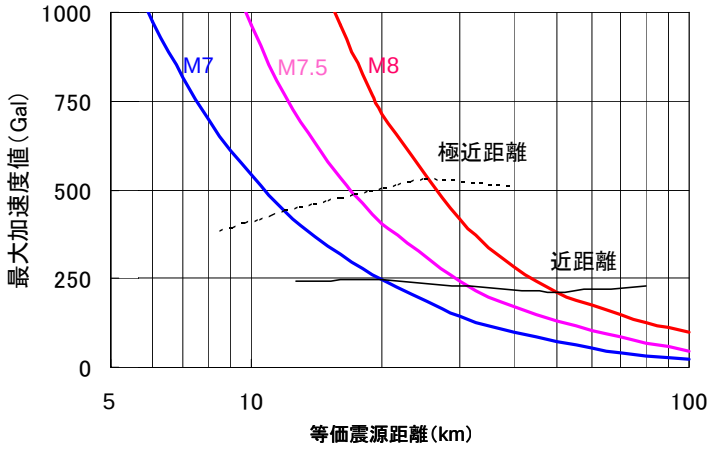


評価対象地震	Mj	Xeq (km)
甲楽城沖～柳ヶ瀬山（36km）	7.4	8.2

※Mjは，断層モデルの地表トレース長さ36kmにより松田式で算定

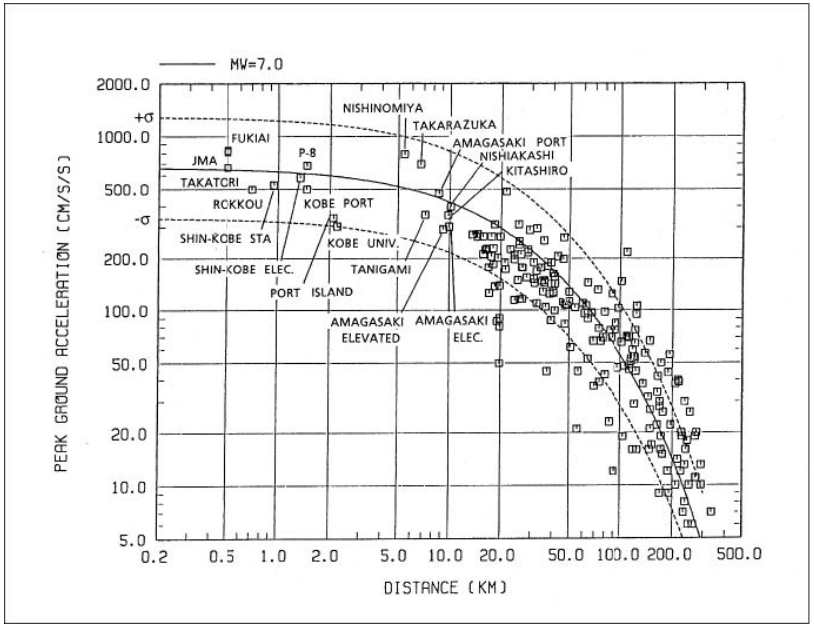
■ 各種距離減衰式を用いた検討

- ◆ 等価震源距離と極近距離との乖離が大きく，回帰式を策定する上で用いた等価震源距離の最小値との差が大きい断層の評価については，大きく外挿をして評価することになる。
- ◆ 甲楽城沖～柳ヶ瀬山については，等価震源距離と極近距離の乖離が大きいため，適用範囲外とする。
- ◆ 適用範囲外とした断層による地震動評価については，断層モデルを重視することとし，耐専式以外の距離減衰式を用いて，応答スペクトルに基づく地震動評価を行う。



耐専式における等価震源距離と最大加速度値の関係

極近距離とは
近距離（約200～250Galの加速度となる点）の1/2程度



兵庫県南部地震で観測された最大加速度値と既往の距離減衰式（福島・田中（1992））との比較（Fukushima & Irikura,1999）

■ 耐専式以外の距離減衰式

国内の地震を含むデータベースにより作成された距離減衰式のうち，甲楽城沖～柳ヶ瀬山の地震動評価に用いた距離減衰式は以下のとおり

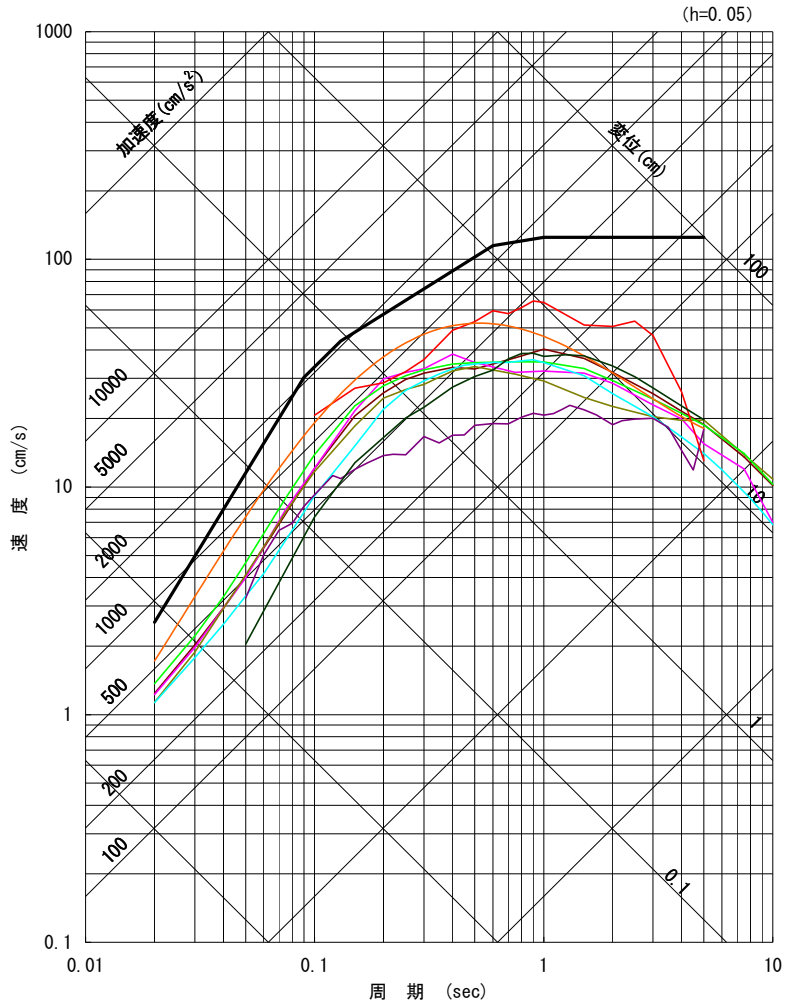
各種距離減衰式のデータベース諸元

距離減衰式	データベース諸元					サイト補正の考え方
	対象地震	地震種別	Mの範囲	断層最短距離の範囲	地盤種別	
Kanno et al.(2006)	主に国内	内陸 プレート間 プレート内	5.5～8.2	1～500km	100≦Vs30≦1400m/s （原論文の図から読取）	原論文の評価式を用いて補正
Zhao et al.(2006)	主に国内	内陸 プレート間 プレート内	5.0～8.3	0.3～300km	・Vs30>1100m/s ・Vs30>600m/s 等で整理	原論文の評価式を用いて補正
内山・翠川(2006)	日本周辺	内陸 プレート間 プレート内	5.5～8.3	300km以内	Vs30=500m/s程度の工学的基盤	－
片岡・他(2006)	日本周辺	内陸 海溝性	4.9～8.2	250km以内	工学的基盤（31測点）のVs30の平均値は720m/s	－
Abrahamson and Silva(2008)	国内外	内陸	4.27～7.9	200km以内	100≦Vs30≦2000m/s	原論文の評価式を用いて補正
Boore and Atkinson(2008)			4.27～7.9	400km以内	NEHRP分類A～E	原論文の評価式を用いて補正
Campbell and Bozorgnia(2008)			4.27～7.9	200km以内	150≦Vs30≦1500m/s	原論文の評価式を用いて補正
Chiou and Youngs(2008)			4.27～7.9	70km以内	100≦Vs30≦2000m/s	原論文の評価式を用いて補正
Idriss(2008)			4.5～7.7	200km以内	450≦Vs30≦900m/s	原論文の評価式を用いて補正

※Vs30：地表から深さ30mまでの平均S波速度（敦賀発電所はVs30=1600m/s）

■ 甲楽城沖～柳ヶ瀬山の各種距離減衰式を用いた検討

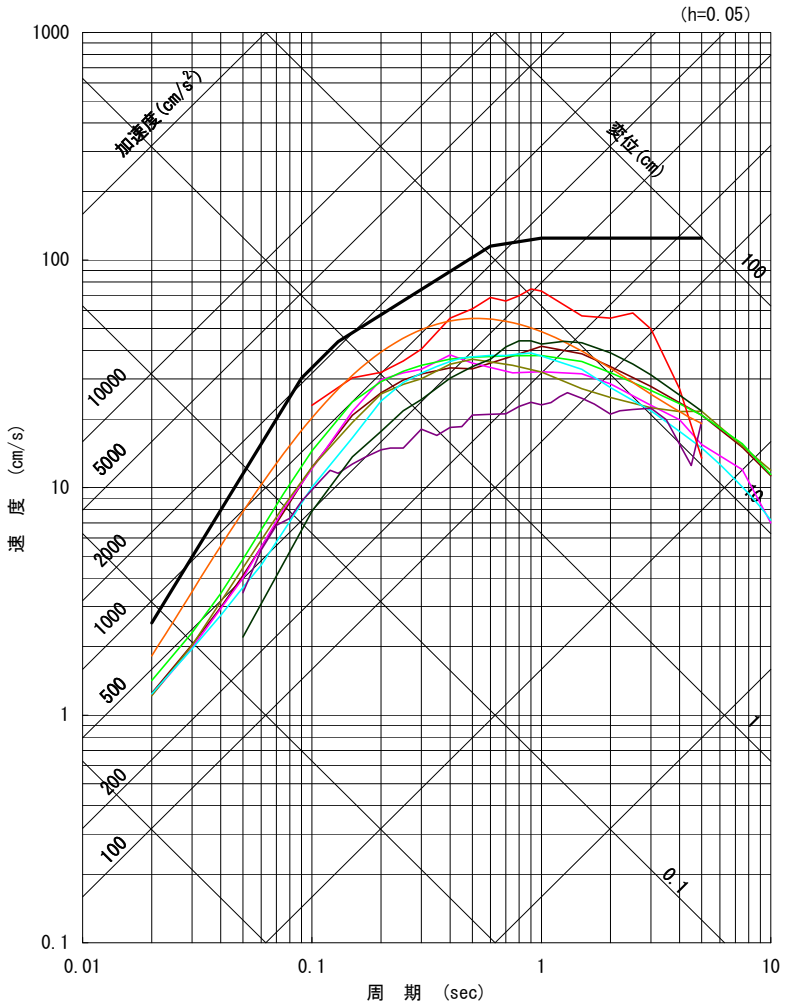
◆ 基本ケース



基準地震動S_S-D_H
Abrahamson and Silva(2008)
Boore and Atkinson(2008)
Campbell and Bozorgnia(2008)
Chiou and Youngs(2008)
Idriss(2008)
Kanno et al.(2006)
片岡他(2006)
内山・翠川(2006)
Zhao et al.(2006)

水平方向

◆ 断層上端深さの不確かさを考慮

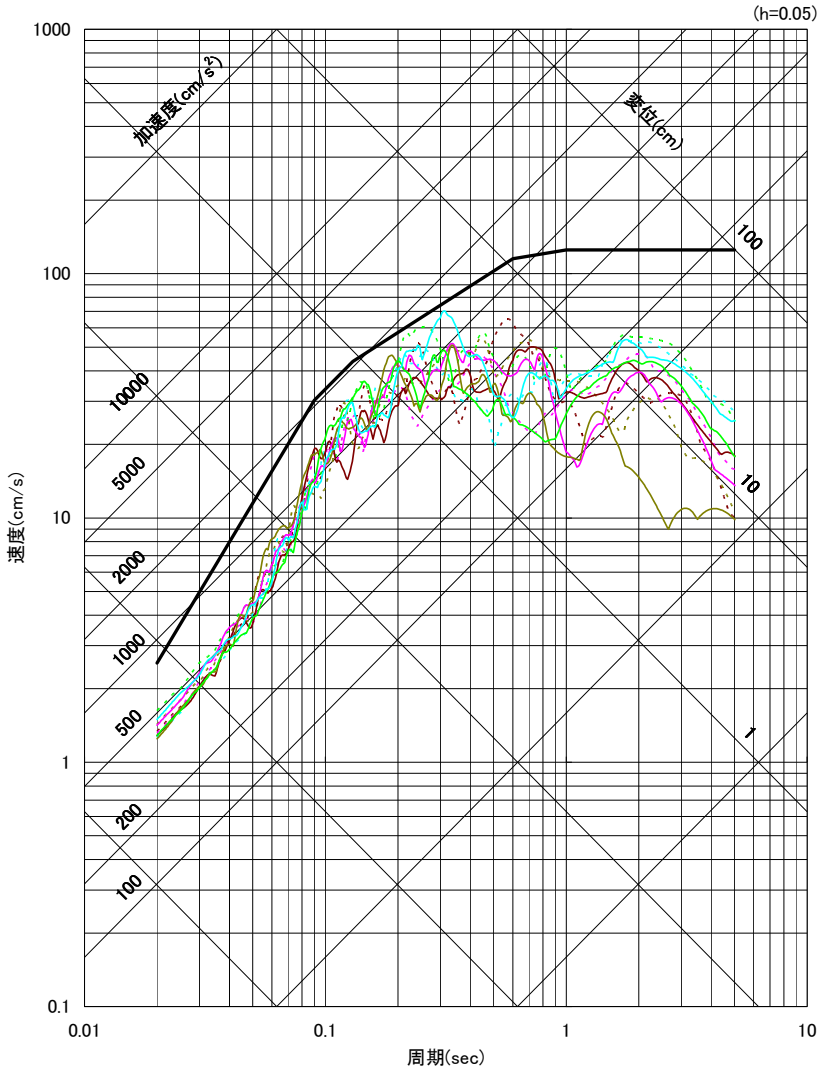


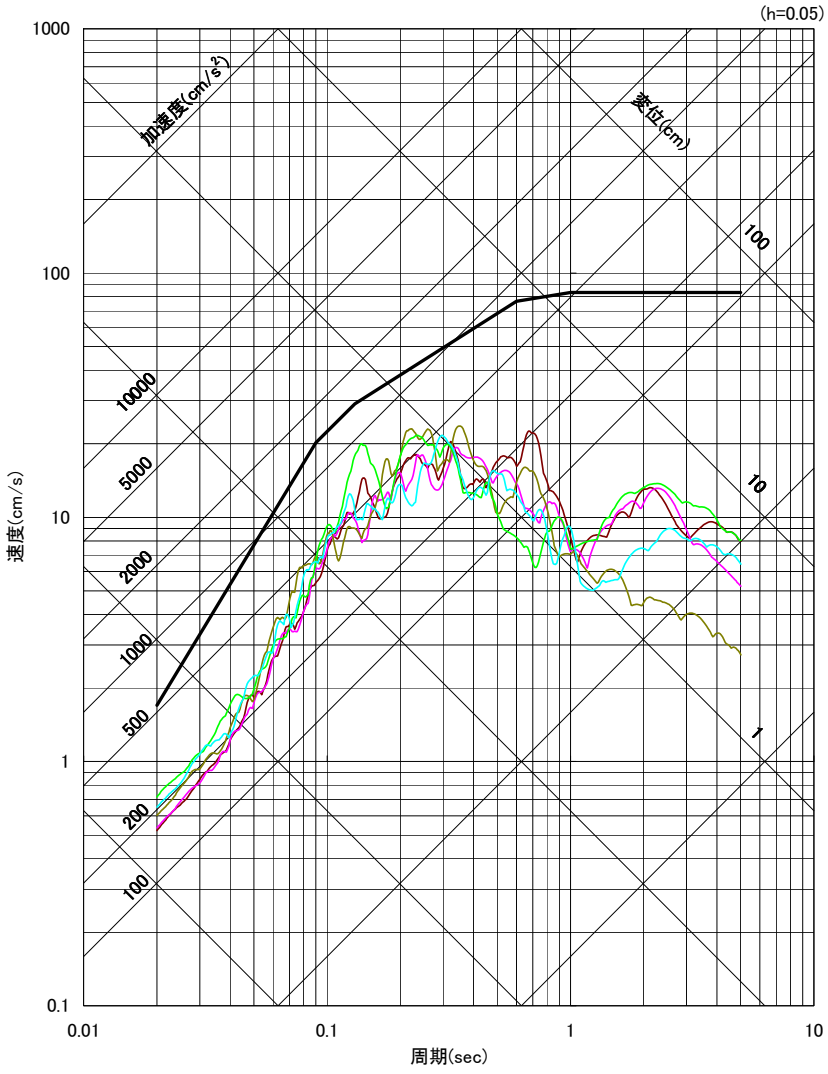
基準地震動S_S-D_H
Abrahamson and Silva(2008)
Boore and Atkinson(2008)
Campbell and Bozorgnia(2008)
Chiou and Youngs(2008)
Idriss(2008)
Kanno et al.(2006)
片岡他(2006)
内山・翠川(2006)
Zhao et al.(2006)

水平方向

■ 甲楽城沖～柳ヶ瀬山の断層モデルによる地震動評価結果

◆ 基本ケース





基準地震動S_S-D_H
破壊開始点1　破壊開始点2　破壊開始点3
破壊開始点4　破壊開始点5
※実線はNS方向，破線はEW方向

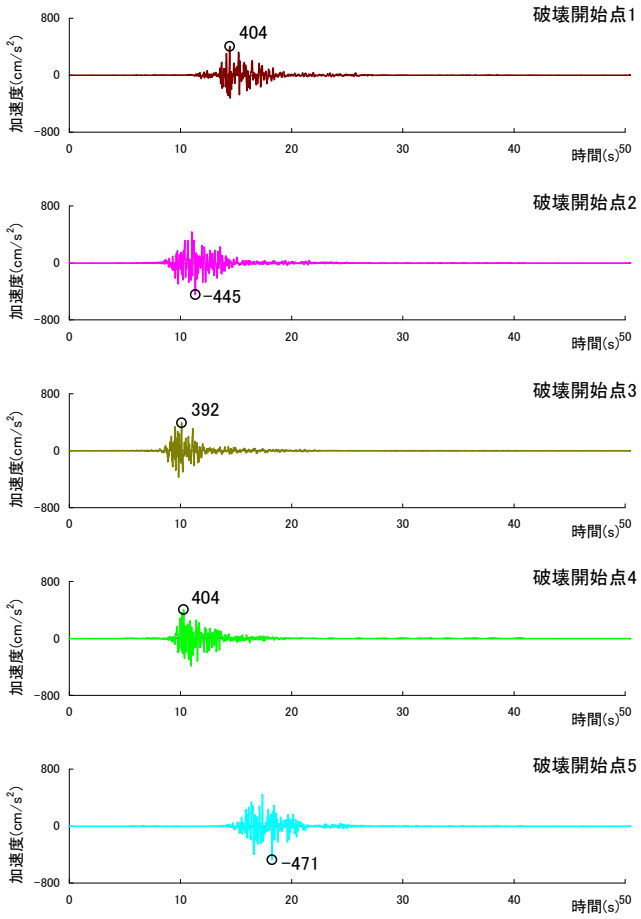
水平方向

基準地震動S_S-D_V
破壊開始点1　破壊開始点2　破壊開始点3
破壊開始点4　破壊開始点5

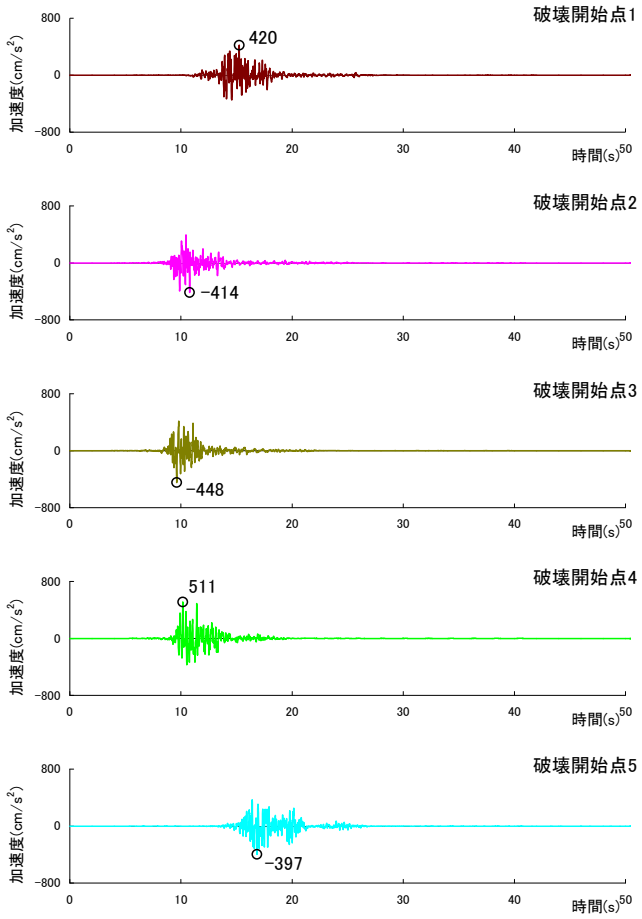
鉛直方向

■ 甲楽城沖～柳ヶ瀬山の断層モデルによる地震動評価結果

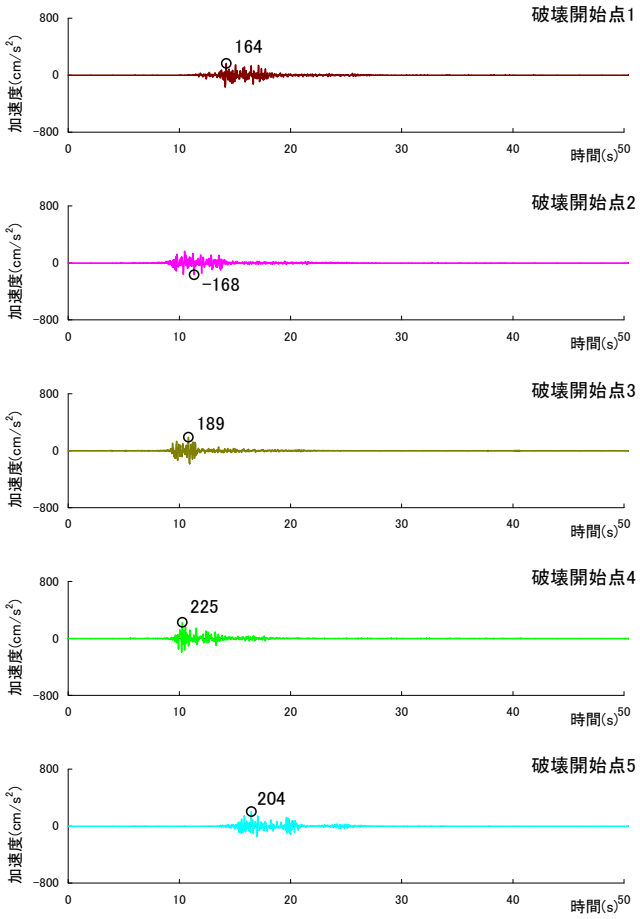
◆ 基本ケース



NS方向



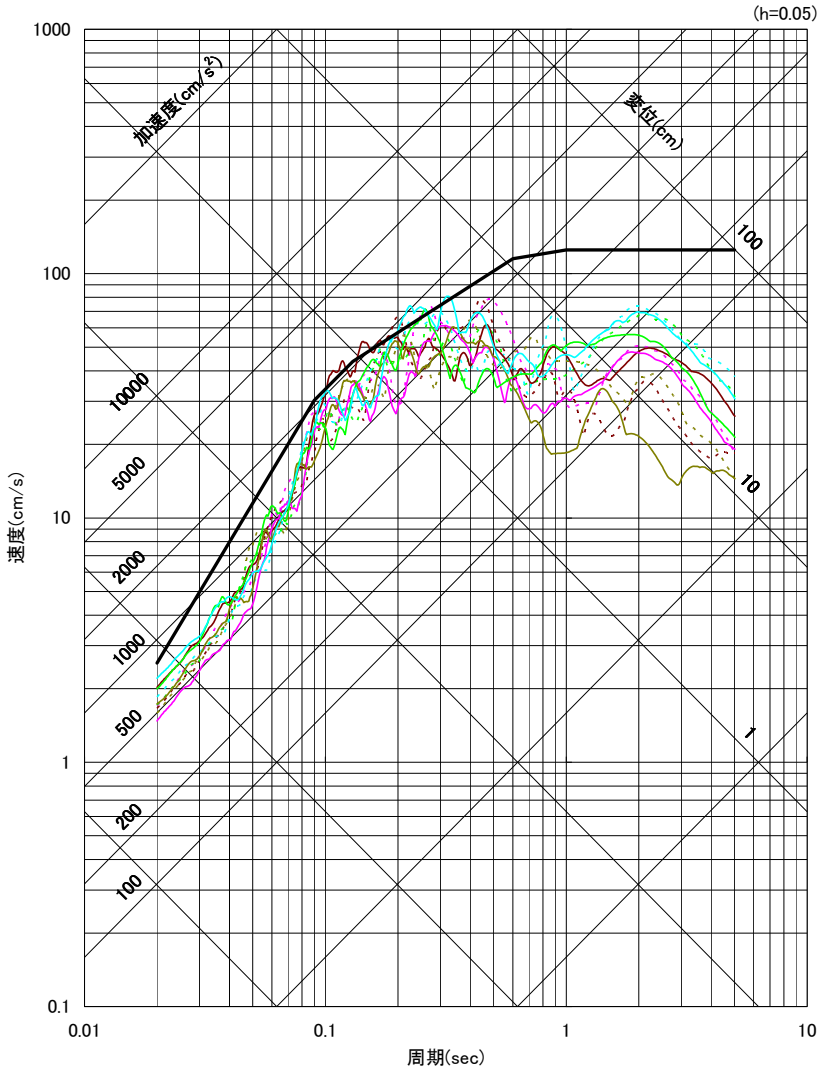
EW方向



鉛直方向

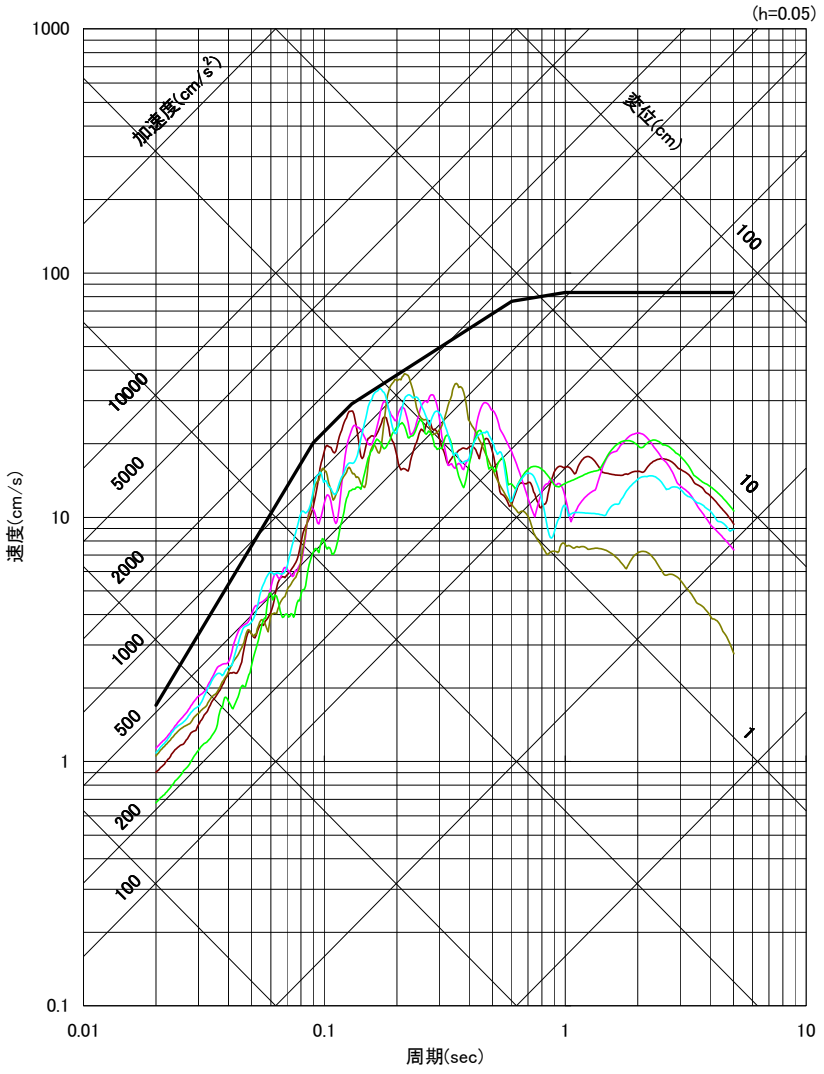
■ 甲楽城沖～柳ヶ瀬山の断層モデルによる地震動評価結果

◆ 断層上端深さの不確かさを考慮



基準地震動S_S-D_H
破壊開始点1　破壊開始点2　破壊開始点3
破壊開始点4　破壊開始点5
※実線はNS方向，破線はEW方向

水平方向

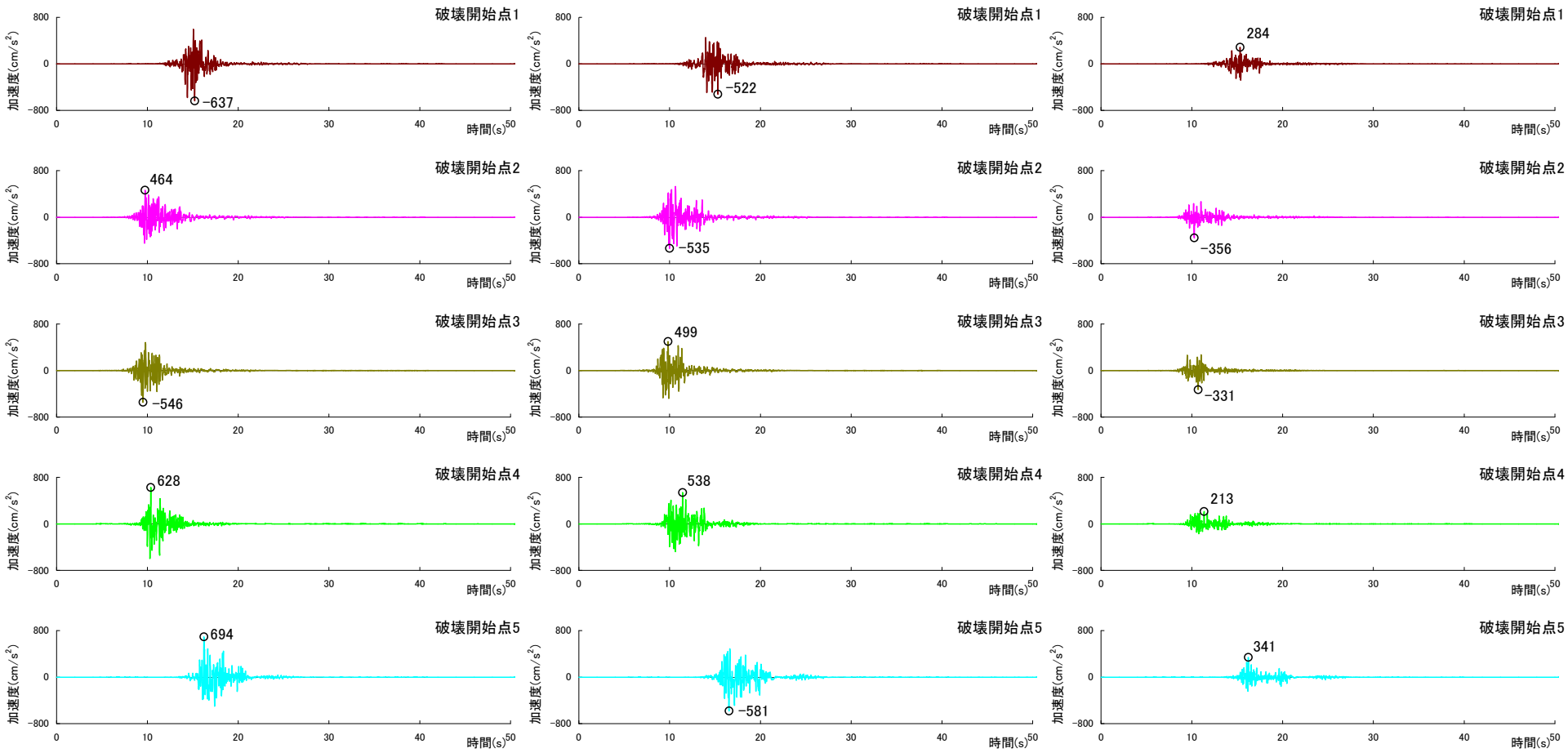


基準地震動S_S-D_V
破壊開始点1　破壊開始点2　破壊開始点3
破壊開始点4　破壊開始点5

鉛直方向

■ 甲楽城沖～柳ヶ瀬山の断層モデルによる地震動評価結果

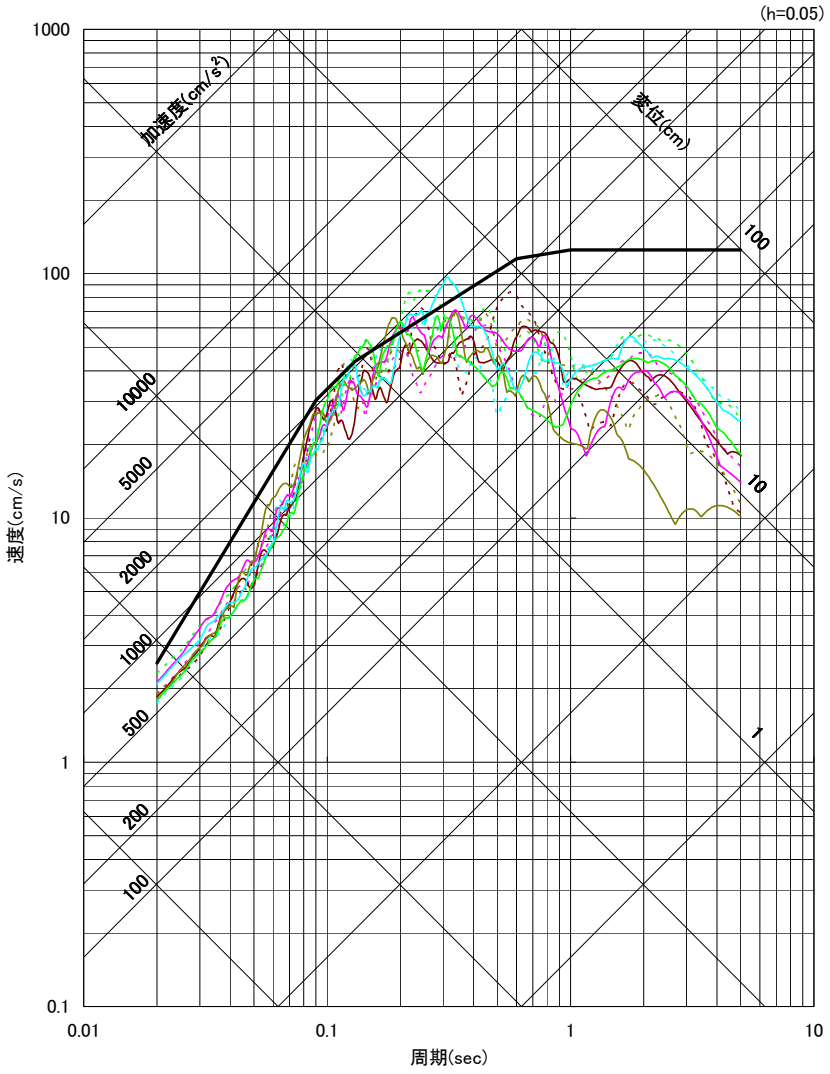
◆ 断層上端深さの不確かさを考慮

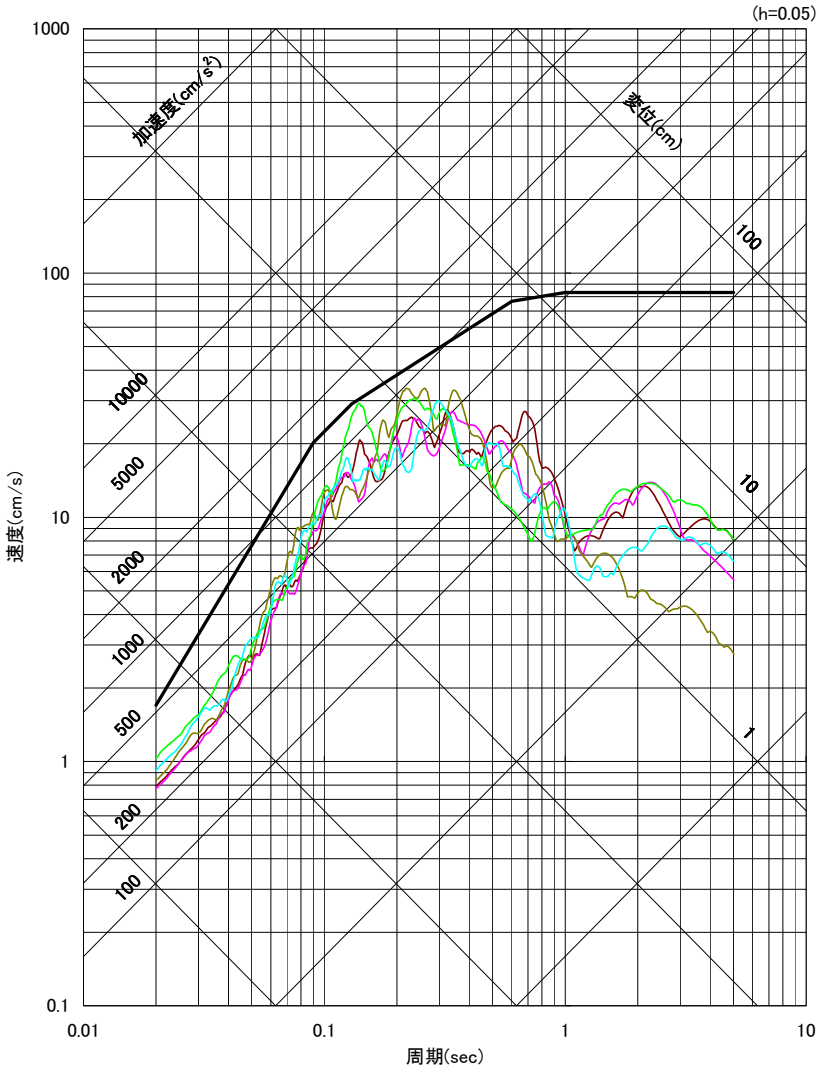


NS方向　　EW方向　　鉛直方向

■ 甲楽城沖～柳ヶ瀬山の断層モデルによる地震動評価結果

◆ 短周期レベル1.5倍





基準地震動S_S-D_H
破壊開始点1　破壊開始点2　破壊開始点3
破壊開始点4　破壊開始点5
※実線はNS方向，破線はEW方向

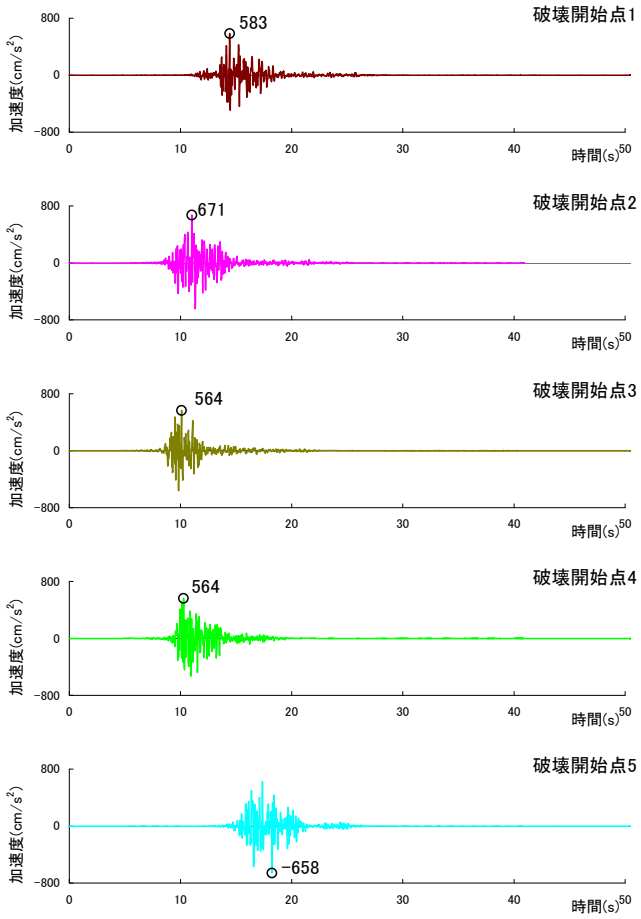
水平方向

基準地震動S_S-D_V
破壊開始点1　破壊開始点2　破壊開始点3
破壊開始点4　破壊開始点5

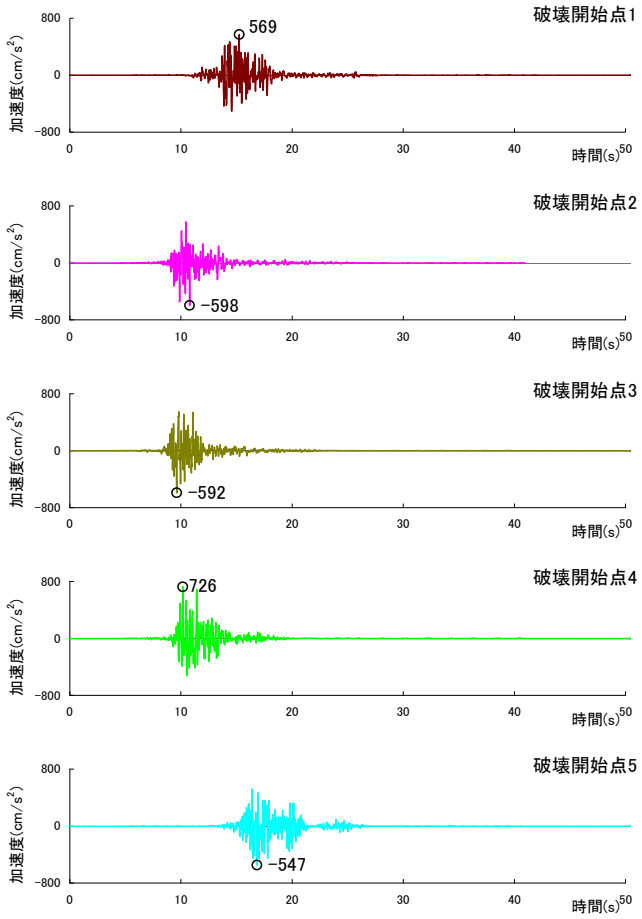
鉛直方向

■ 甲楽城沖～柳ヶ瀬山の断層モデルによる地震動評価結果

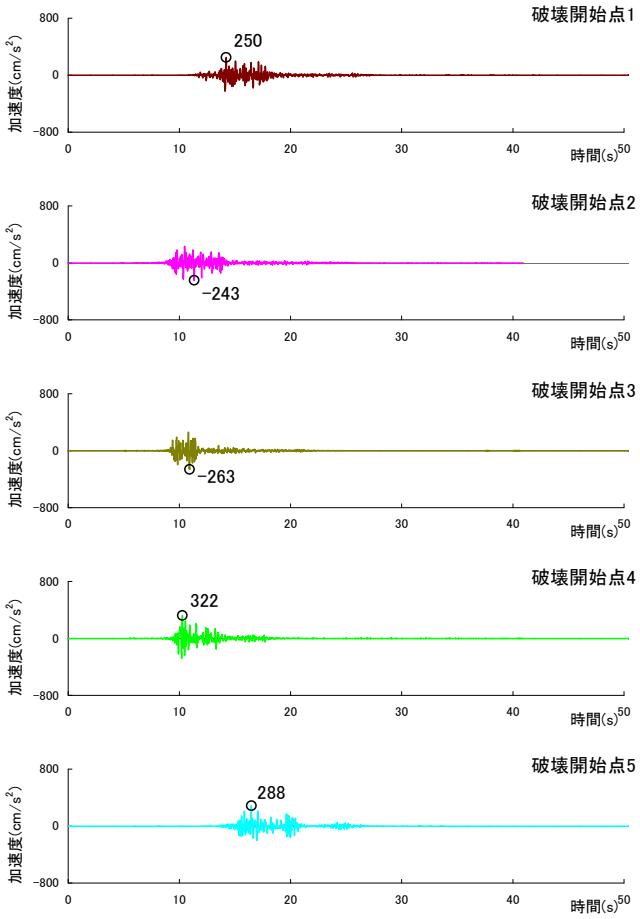
◆ 短周期レベル1.5倍



NS方向



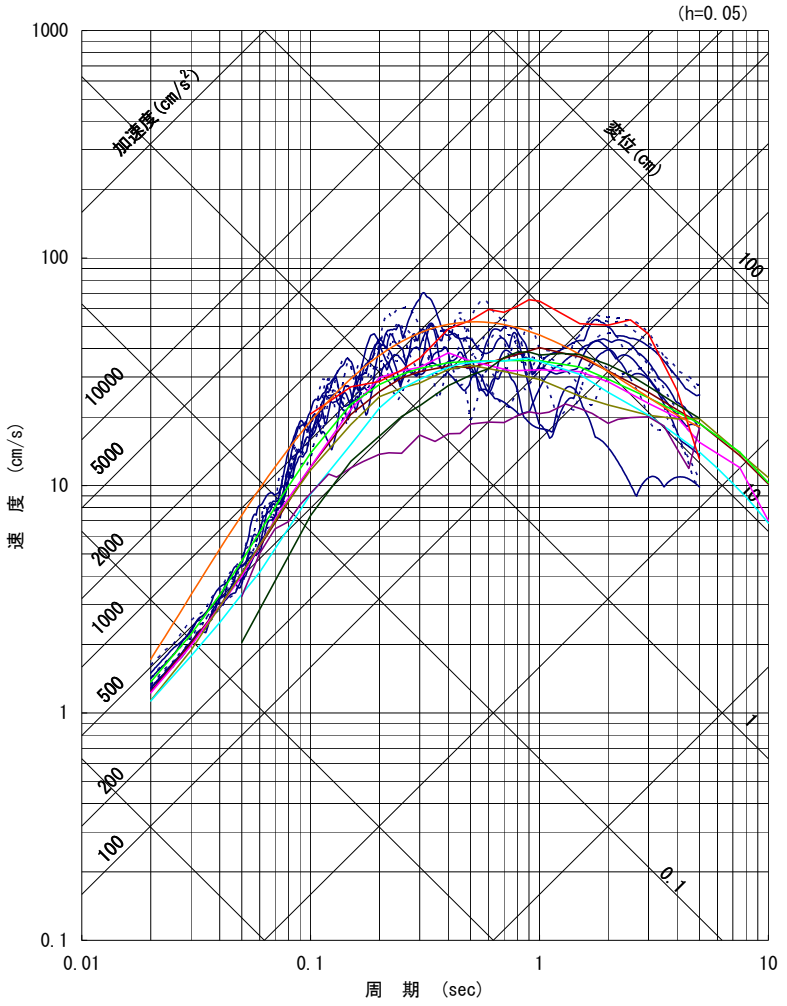
EW方向



鉛直方向

■ 甲楽城沖～柳ヶ瀬山の応答スペクトルに基づく地震動評価結果との比較

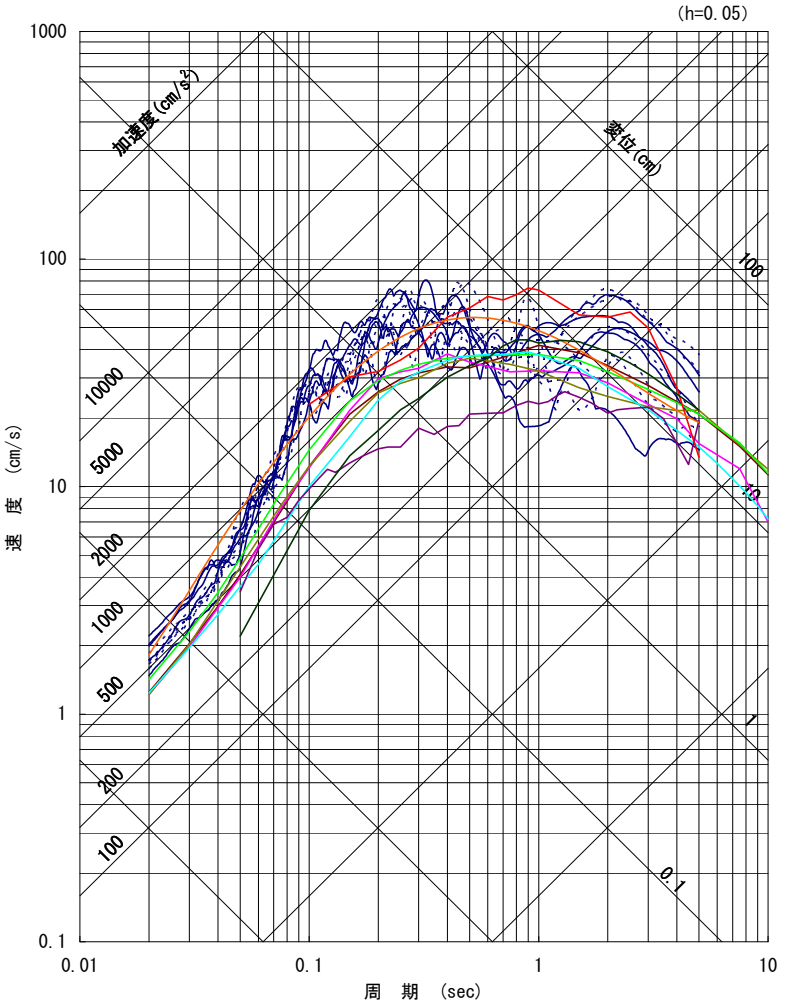
◆ 基本ケース



断層モデルを用いた手法による地震動評価結果(実線:NS方向，破線:EW方向)
Abrahamson and Silva(2008)
Boore and Atkinson(2008)
Campbell and Bozorgnia(2008)
Chiou and Youngs(2008)
Idriss(2008)
Kanno et al.(2006)
片岡他(2006)
内山・翠川(2006)
Zhao et al.(2006)

水平方向

◆ 断層上端深さの不確かさを考慮

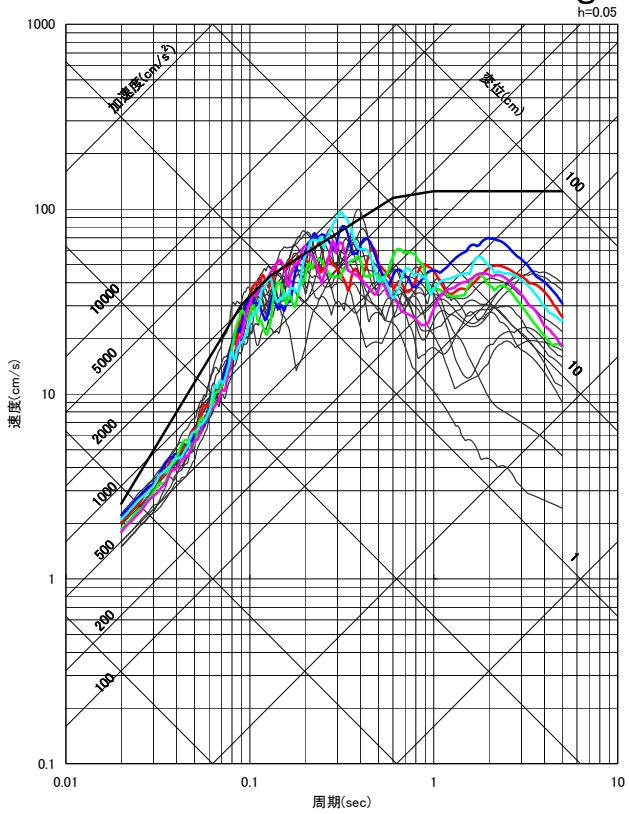


断層モデルを用いた手法による地震動評価結果(実線:NS方向，破線:EW方向)
Abrahamson and Silva(2008)
Boore and Atkinson(2008)
Campbell and Bozorgnia(2008)
Chiou and Youngs(2008)
Idriss(2008)
Kanno et al.(2006)
片岡他(2006)
内山・翠川(2006)
Zhao et al.(2006)

水平方向

■ 甲楽城沖～柳ヶ瀬山の断層モデルによる地震動評価結果と基準地震動S_Sとの比較

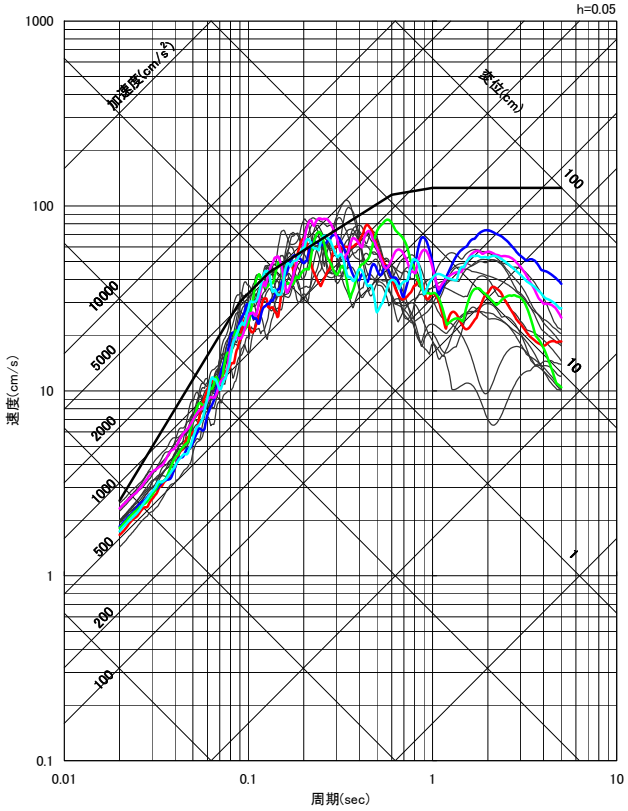
◆ 甲楽城沖～柳ヶ瀬山の地震動評価結果と既往の基準地震動S_S（S_S－D及びS_S－1～S_S－10）を比較したところ，断層上端深さの不確かさを考慮したケースと短周期レベル1.5倍のケースにおいて既往の基準地震動S_Sを超過するものが5ケースあった。



基準地震動S_S－D_H
基準地震動S_S－1_{NS}～S_S－10_{NS}

甲楽城沖～柳ヶ瀬山
断層上端深さの不確かさを考慮，破壊開始点1
断層上端深さの不確かさを考慮，破壊開始点5
短周期レベル1.5倍，破壊開始点1
短周期レベル1.5倍，破壊開始点4
短周期レベル1.5倍，破壊開始点5

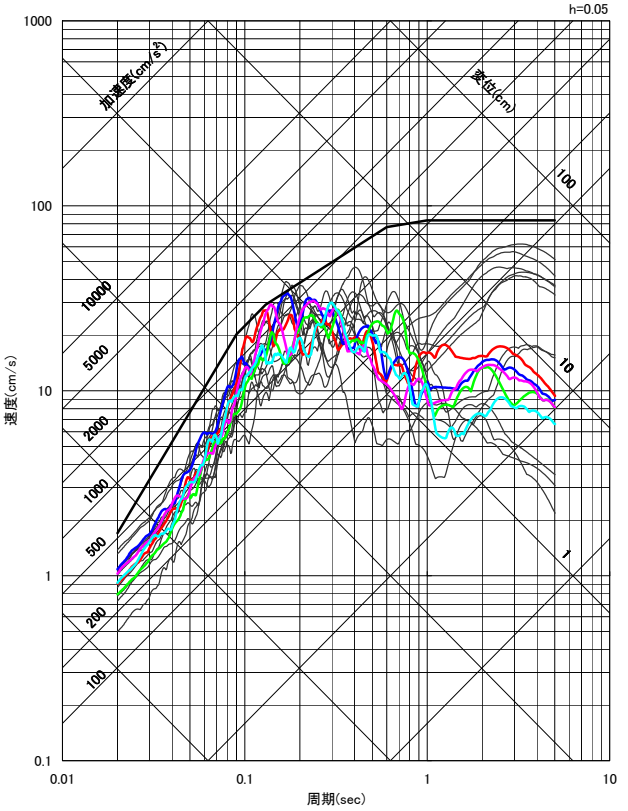
NS方向



基準地震動S_S－D_H
基準地震動S_S－1_{EW}～S_S－10_{EW}

甲楽城沖～柳ヶ瀬山
断層上端深さの不確かさを考慮，破壊開始点1
断層上端深さの不確かさを考慮，破壊開始点5
短周期レベル1.5倍，破壊開始点1
短周期レベル1.5倍，破壊開始点4
短周期レベル1.5倍，破壊開始点5

EW方向



基準地震動S_S－D_V
基準地震動S_S－1_{UD}～S_S－10_{UD}

甲楽城沖～柳ヶ瀬山
断層上端深さの不確かさを考慮，破壊開始点1
断層上端深さの不確かさを考慮，破壊開始点5
短周期レベル1.5倍，破壊開始点1
短周期レベル1.5倍，破壊開始点4
短周期レベル1.5倍，破壊開始点5

鉛直方向

◆「甲楽城沖断層」,「浦底断層」,「池河内断層」,「柳ヶ瀬山断層」を一連の断層として地震動評価を実施し，基準地震動S_Sとの比較を行った。

◆ 応答スペクトルによる地震動評価は，耐専式の適用が難しいと判断されたため，断層最短距離を指標とした距離減衰式を用いて評価し，基準地震動S_S以下であることを確認した。

◆断層モデルによる地震動評価結果は，既往の基準地震動S_Sと概ね同程度のレベルであったが，不確かさを考慮したケースにおいて既往の基準地震動S_Sを一部超過するものが5ケースあった。

高速増殖原型炉もんじゅ

「甲楽城沖断層」、「浦底断層」、「池河内断層」、「柳ヶ瀬山断層」の連動を考慮した地震動評価

平成24年4月23日

独立行政法人日本原子力研究開発機構

◆評価する断層

「甲楽城沖断層」、「浦底断層」、「池河内断層」、「柳ヶ瀬山断層」を一連の断層（約35km）として、地震動評価を実施する。

◆評価方法

○応答スペクトルに基づく地震動評価

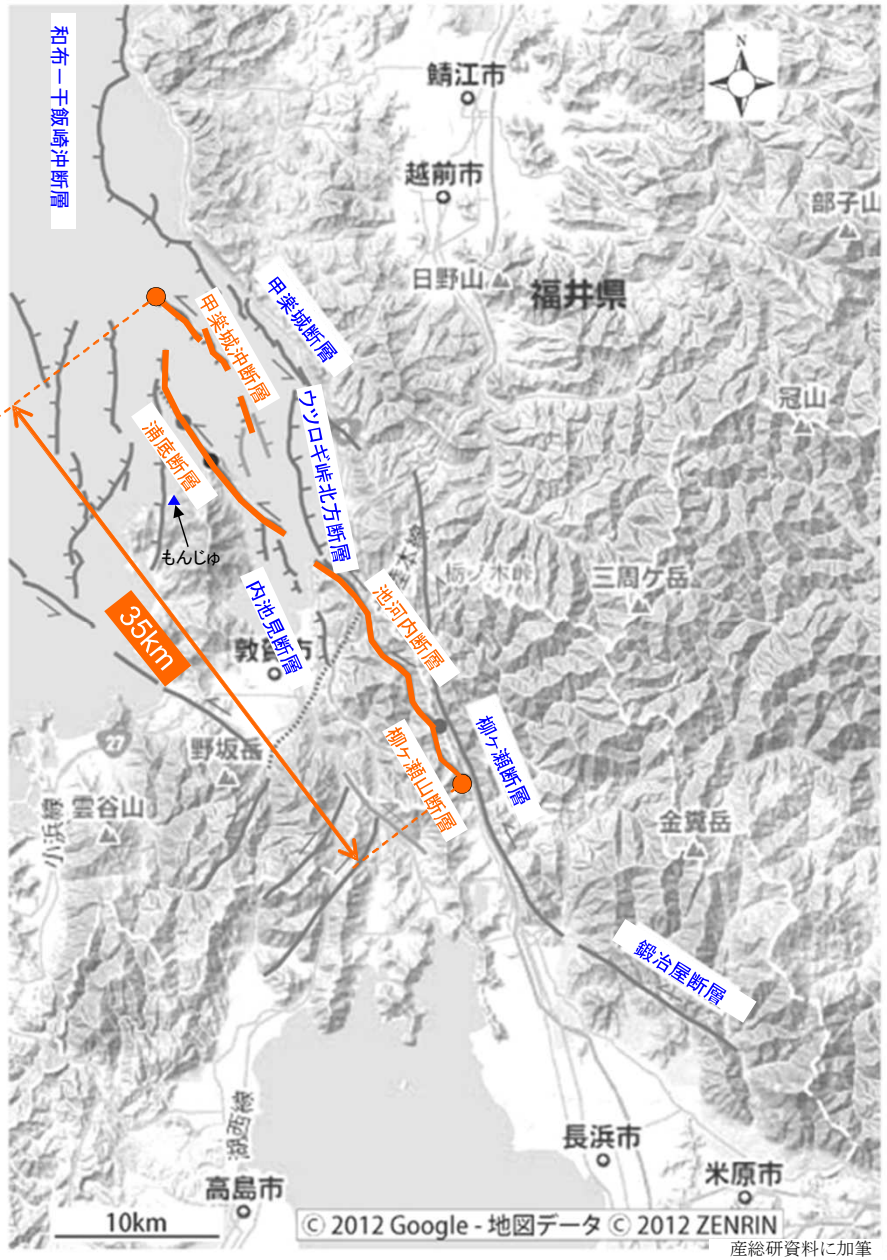
耐専式の適用性を検討し、適用が難しいと判断した場合は、断層モデルを用いた地震動評価結果を重視し、断層最短距離を用いた距離減衰式による評価を実施する。

○断層モデルを用いた地震動評価

評価地点の震源近傍で発生した地震の適切な観測記録が得られていないため、短周期側に統計的グリーン関数法、長周期側に理論的方法を適用したハイブリッド合成法により評価する。

○地震動評価に考慮する不確かさ

地震動評価に考慮する不確かさは、上端深さを浅くしたケースと短周期の地震動レベルを1.5倍したケース（断層モデルのみ）とする。



産総研資料に加筆

若狭周辺地域は、震源分布のデータが少ないため、各種地下構造調査結果から地震発生層を推定し、それを基に断層上端・下端深さを推定した。

① 地盤速度構造による検討

(1)各種調査、探査

ボーリング調査、PS検層、微動アレー探査、地震計水平アレー観測、等の結果より地盤速度構造を検討した。

その結果、Vp≧6km/s(Vs≧3.6km/s)の深さは4kmであった。

(2)地震波速度トモグラフィ

対象地点を取り囲むような震源と観測点の観測記録を用いて、地震波の伝播をインバージョン解析し、速度層構造を求めた。

P波速度分布は、敦賀半島周辺でVp=6km/s層が深さ4～5kmに分布している。またP波速度分布に震源分布を重ねると、Vp=6km/s層と地震発生の上限深さが概ね対応して見られる。

② 地震発生深さによる検討

(1)周辺地域における地震発生状況の調査

若狭地域の微小地震の発生分布について調査すると、地震の発生は深さ 5～20kmに見られた。

(2)地震発生状況の統計的評価

伊藤・中村(1998)を参考に、若狭地域の地震の10%発生頻度深さ(D10)は約7km、地震の90%発生頻度深さ(D90)は約15kmであった。

③ 他機関による検討

地震調査委員会が実施した強震動予測について整理すると、若狭周辺における断層上端・下端深さは 3～18kmであった。

若狭地域における断層上端・下端深さ　上端 4km　下端 18km

不確かさとして考慮する断層上端・下端深さ　上端 3km　下端 18km

■断層モデルを用いた地震動評価に用いる地盤モデルは、以下の方針で設定した。

○浅部地盤構造

・速度構造：敷地内のPS検層結果より設定

・減衰定数：佐藤（浩）他（2007,2009）の考え方を参考にして、敷地内のPS検層結果より得られた速度構造の不均質性データ等をもとに設定

○深部地盤構造

・速度構造：敷地内及び敷地周辺で実施した屈折法探査、微動アレー探査、地震計水平アレー観測及び地震波速度トモグラフィ解析結果に基づき設定

・減衰定数：上記調査結果は、若狭地域の深部地盤構造を表したものであることや、これまでの耐震バックチェック審議を踏まえ敷地の経験的サイト増幅特性やそれに対応する地盤モデルを参照して、減衰定数0.5%（Q値100）を設定

深さ（m）	EL（m）	層	層厚（m）	密度 ρ（t/m3）	S波速度 Vs（m/s）	P波速度 Vp（m/s）	Qs	減衰定数（%）
0	5	1	33	2.5	1900	4300	16.7	3.0
33	−28	2	167	2.6	2200	4600	16.7	3.0
200	−195	2’	430	2.6	2200	4600	100.0	0.5
630	−625	3	770	2.6	2800	5130	100.0	0.5
1400	−1395	4	2600	2.6	3100	5310	100.0	0.5
4000	−3995	5	−	2.7	3600	6270	100.0	0.5

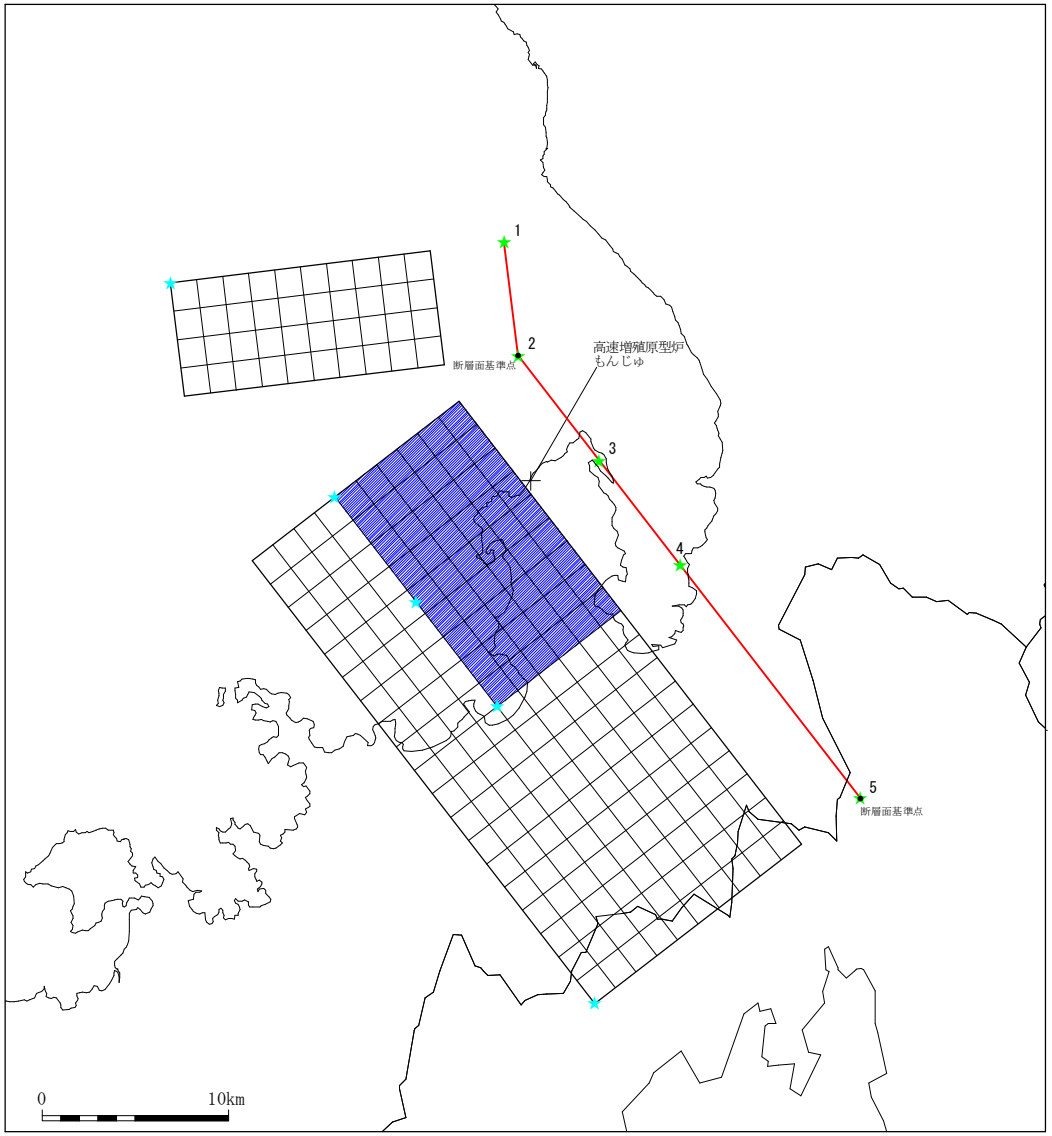
※断層上端深さの不確かさ（3km）を考慮する場合は、第4層の層厚を1600mとする。

※Qp=2/3×Qs

■ 地震動評価において考慮する不確かさ

	断層上端深さ	断層傾斜角	アスペリティ	破壊開始点	短周期レベル	備考
基本ケース	4km	90°	敷地近傍に配置	複数設定	レシピ平均	
断層上端深さの不確かさを考慮	3km	90°	敷地近傍に配置	複数設定	レシピ平均	
短周期レベル	4km	90°	敷地近傍に配置	複数設定	レシピ平均×1.5倍	中越沖地震知見反映

■ 甲楽城沖～柳ヶ瀬山のモデル化



※ 傾斜角90°の断層面は、傾斜角0°として図化している。

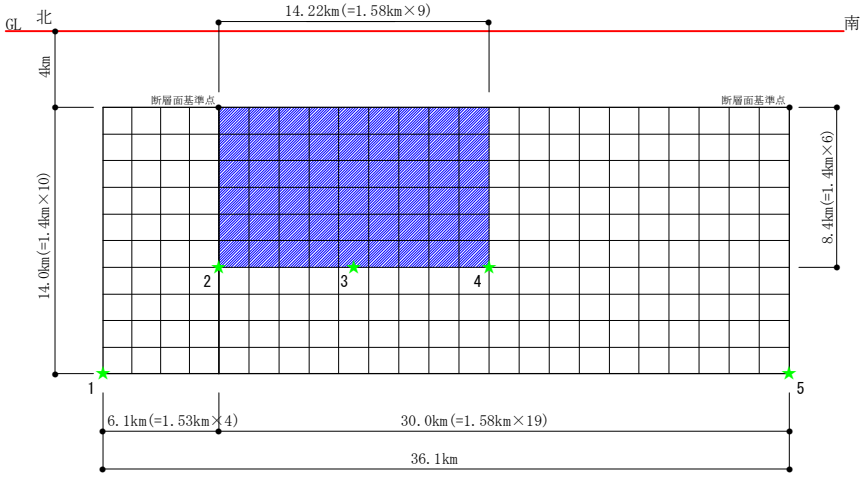
★：破壊開始点

i ）断層配置図

◆モデル化の考え方

- 甲楽城沖～柳ヶ瀬山（35km）※を1つのセグメントとして評価する。
- 地震モーメントについては、地震調査研究推進本部の強震動予測レシピに基づき、面積から算出する。
- アスペリティについては、敷地への影響が大きいと考えられる位置に配置する。
- 破壊開始点については、破壊の進行による敷地への影響を考慮し、断層下端、アスペリティ下端及び中央に配置する。

※断層モデルの地表トレース長さは、36km。



★：破壊開始点

ii ）断面図

断層モデル図：基本ケース(上端深さ4km)

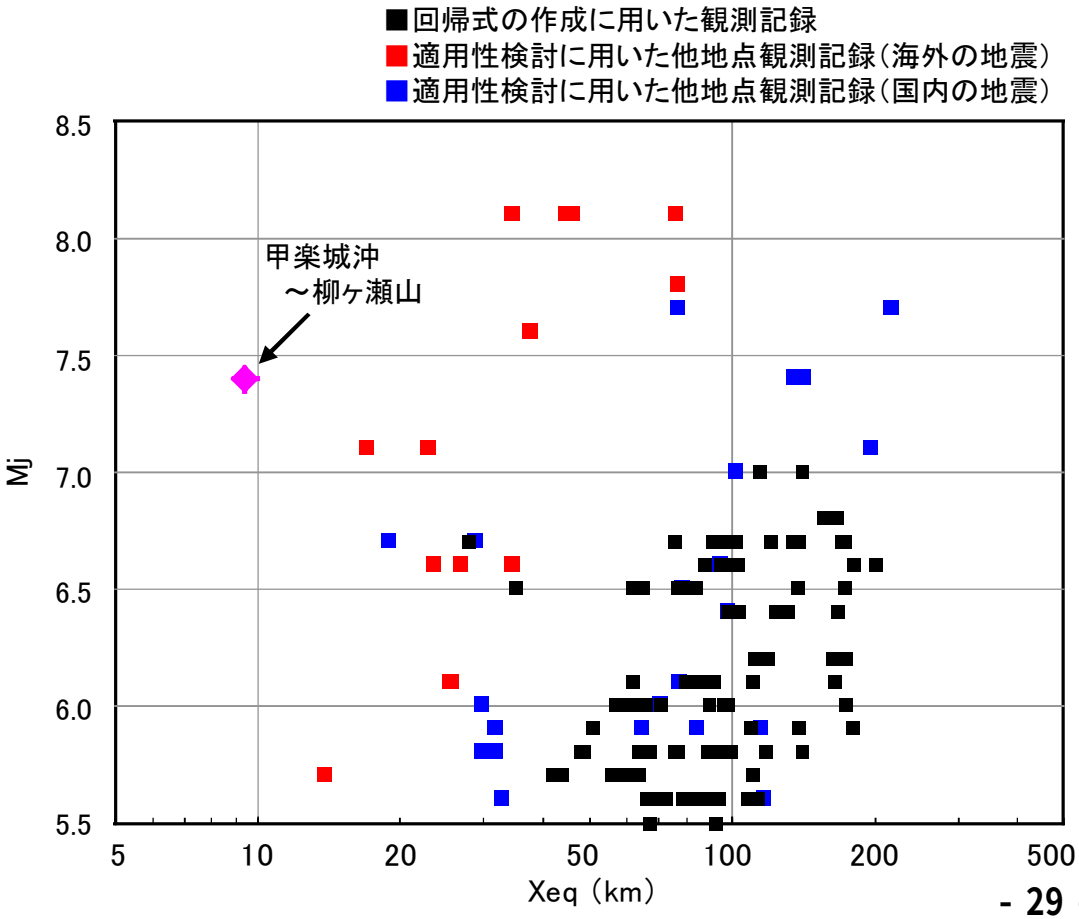
◆ 基本ケース

断層パラメータ	パラメータ	設定方法
断層長さL(km)	36.1	断層位置から計算
断層傾斜角(°)	90	調査結果に基づき設定
断層上端深さ(km) 断層下端深さ(km)	4 18	微小地震の発生及び地下構造を参考に設定
断層幅W(km)	14	地震発生層と傾斜角から設定
断層面積S(km^2)	505.4	断層面より算定
破壊伝播様式	同心円状	ー
地震モーメントM_0(Nm)	1.42×10^{19}	$M_0=\{S/(4.24\times10^{-11})\}^{2.0}$
剛性率(N/m^2)	3.50×10^{10}	$\mu=\rho\beta^2$, ρ=2.7g/cm^3, β=3.6km/s
平均すべり量D(cm)	80.3	$D=M_0/(\mu S)$
平均応力降下量$\Delta\sigma$(MPa)	3.1	$\Delta\sigma=(7\pi^{1.5}/16)(M_0/S^{1.5})$
破壊伝播速度Vr(km/s)	2.59	$Vr=0.72\beta$
立ち上がり時間Tr(sec)	1.06	$Tr=2.03\times10^{-9}M_0^{1/3}$
高周波限界遮断周波数fmax(Hz)	8.3	香川他(2003)
短周期レベルA(Nm/s^2)	1.28×10^{19}	$A=2.46\times10^{17}\times M_0^{1/3}$
Q値	$50f^{1.1}$	佐藤他(2007)

断層パラメータ		パラメータ	設定方法
全アスペリティ	面積S_a(km^2)	121.5	$Sa=\pi r^2$ $r=(7\pi M_0\beta^2)/(4AaR)$,$R=(S/\pi)^{0.5}$
	平均すべり量D_a(cm)	161.5	$D_a=\gamma_D D$, γ_D=2.01
	地震モーメントM_{0a}(Nm)	6.86×10^{18}	$M_{0a}=\mu S_a D_a$
	応力降下量$\Delta\sigma_a$(MPa)	12.7	$\Delta\sigma_a=(S/S_a)\Delta\sigma$
背景領域	面積S_b(km^2)	383.9	$S_b=S-S_a$
	平均すべり量D_b(cm)	54.7	$D_b=M_{0b}/(\mu S_b)$
	地震モーメントM_{0b}(Nm)	7.34×10^{18}	$M_{0b}=M_0-M_{0a}$
	実効応力$\Delta\sigma_b$(MPa)	2.5	$\sigma_b=0.2\Delta\sigma_a$

◆ 評価対象地震の等価震源距離と耐専式での地震の諸元との比較

1. 回帰分析に用いた地震の諸元
   5.5≦Mj≦7.0（Mj：気象庁マグニチュード）
   h≦60km（h：震源深さ）
   28km≦Xeq≦202km（Xeq：等価震源距離）
2. 観測記録を用いて距離減衰式の適用性について検討した際に用いた地震の諸元
   5.4≦Mj≦8.1（Mj：気象庁マグニチュード）
   h≦60km（h：震源深さ）
   14km≦Xeq≦218km（Xeq：等価震源距離）



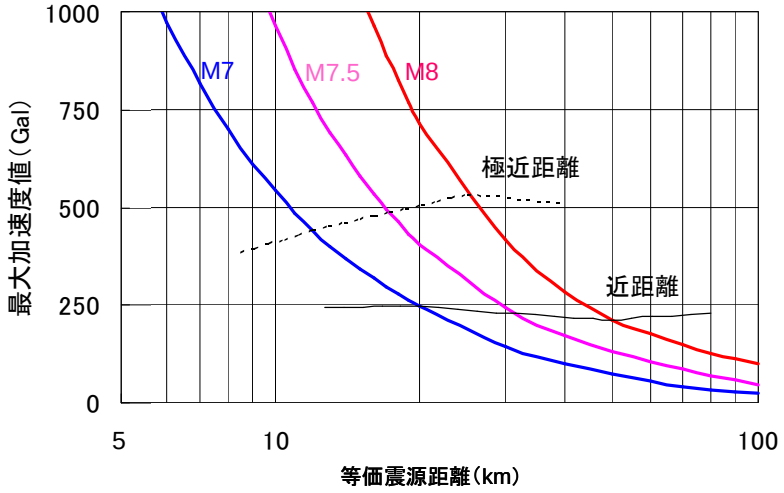
評価対象地震	Mj	Xeq（km）
甲楽城沖～柳ヶ瀬山（36km）	7.4	9.4

※Mjは、断層モデルの地表トレース長さ36kmにより松田式で算定

◆ 等価震源距離と極近距離との乖離が大きく、回帰式を策定する上で用いた等価震源距離の最小値との差が大きい断層の評価については、大きく外挿をして評価することになる。

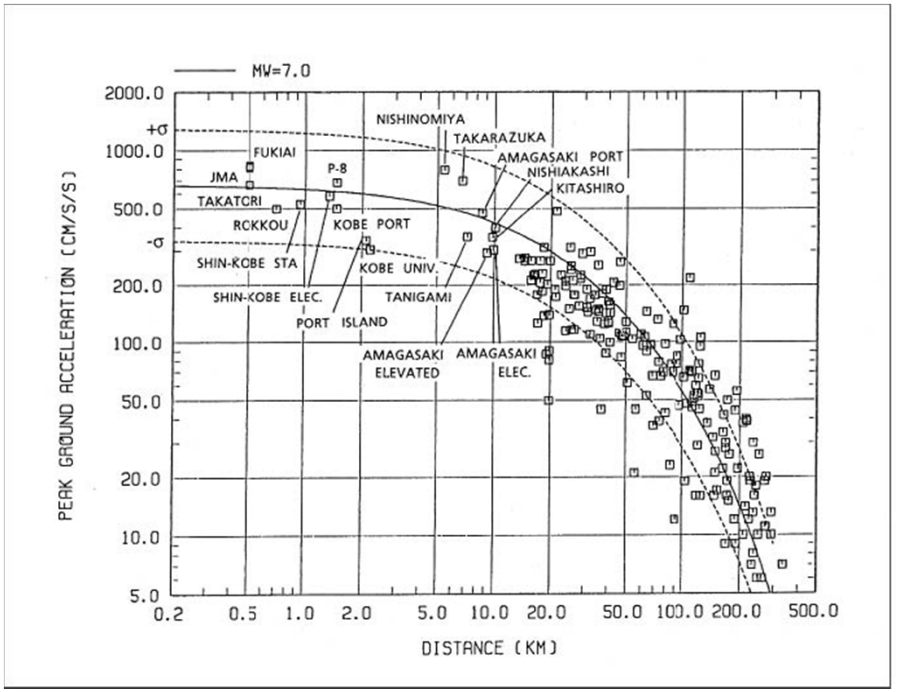
◆ 甲楽城沖～柳ヶ瀬山については、等価震源距離と極近距離の乖離が大きいため、適用範囲外とする。

◆ 適用範囲外とした断層による地震動評価については、断層モデルを重視することとし、耐専式以外の距離減衰式を用いて、応答スペクトルに基づく地震動評価を行う。



耐専式における等価震源距離と最大加速度値の関係

極近距離とは
近距離（約200～250Galの加速度となる点）の1/2程度



兵庫県南部地震で観測された最大加速度値と既往の距離減衰式（福島・田中（1992））との比較（Fukushima & Irikura,1999）

国内の地震を含むデータベースにより作成された距離減衰式のうち、甲楽城沖～柳ヶ瀬山の地震動評価に用いた距離減衰式は以下のとおり

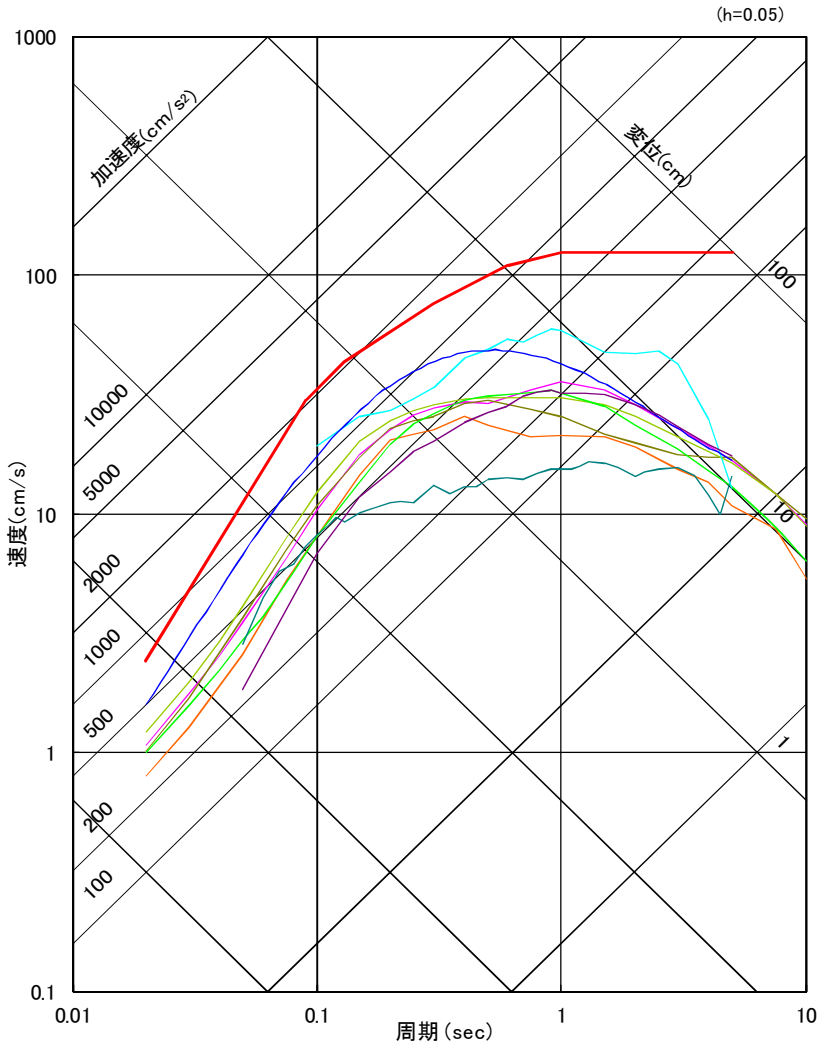
各種距離減衰式のデータベース諸元

距離減衰式	データベース諸元					サイト補正の考え方
	対象地震	地震種別	Mの範囲	断層最短距離の範囲	地盤種別	
Kanno et al.(2006)	主に国内	内陸 プレート間 プレート内	5.5～8.2	1～500km	100≦Vs30≦1400m/s （原論文の図から読取）	原論文の評価式を用いて補正
Zhao et al.(2006)	主に国内	内陸 プレート間 プレート内	5.0～8.3	0.3～300km	・Vs30>1100m/s ・Vs30>600m/s 等で整理	原論文の評価式を用いて補正
内山・翠川(2006)	日本周辺	内陸 プレート間 プレート内	5.5～8.3	300km以内	Vs30=500m/s程度の工学的基盤	－
片岡・他(2006)	日本周辺	内陸 海溝性	4.9～8.2	250km以内	工学的基盤（31測点）のVs30の平均値は720m/s	－
Abrahamson and Silva(2008)	国内外	内陸	4.27～7.9	200km以内	100≦Vs30≦2000m/s	原論文の評価式を用いて補正
Boore and Atkinson(2008)			4.27～7.9	400km以内	NEHRP分類A～E	原論文の評価式を用いて補正
Campbell and Bozorgnia(2008)			4.27～7.9	200km以内	150≦Vs30≦1500m/s	原論文の評価式を用いて補正
Chiou and Youngs(2008)			4.27～7.9	70km以内	100≦Vs30≦2000m/s	原論文の評価式を用いて補正
Idriss(2008)			4.5～7.7	200km以内	450≦Vs30≦900m/s	原論文の評価式を用いて補正

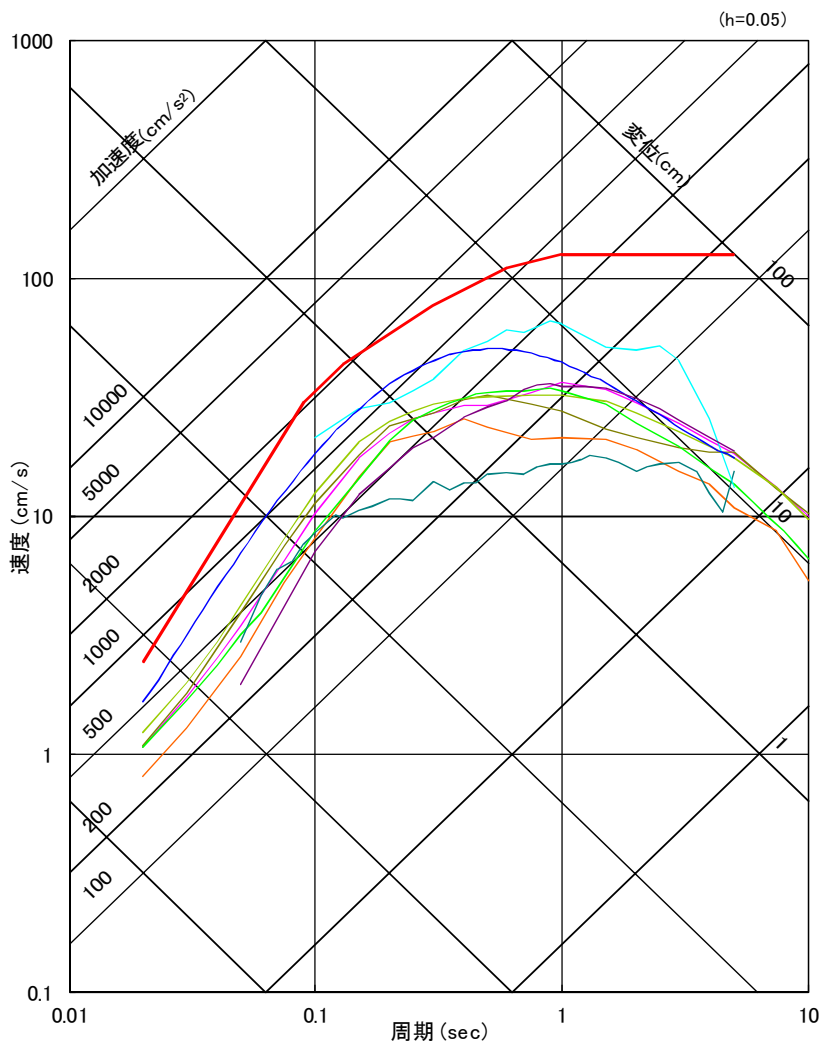
※Vs30：地表から深さ30mまでの平均S波速度（もんじゅはVs30=1900m/s）

■ 応答スペクトルに基づく地震動評価

◆ 基本ケース



◆ 断層上端深さの不確かさを考慮



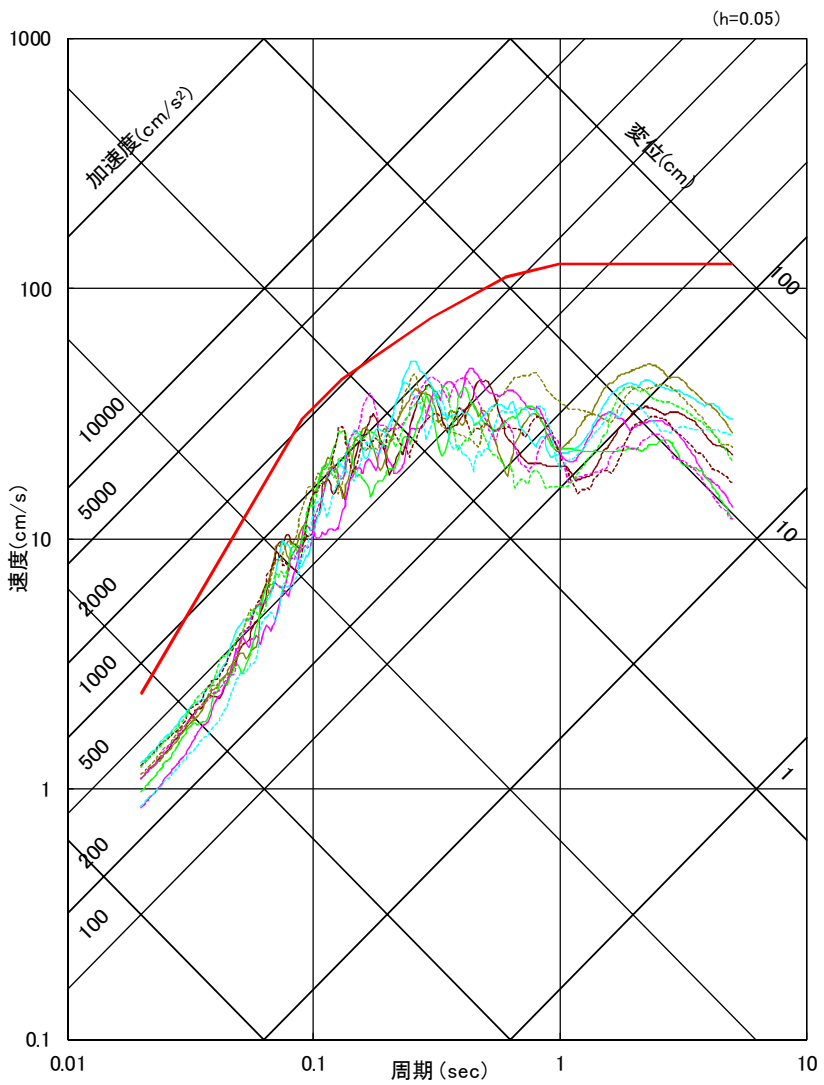
基準地震動Ss-DH
Abrahamson and Silva (2008)
Boore and Atkinson (2008)
Campbell and Bozorgnia (2008)
Chiou and Youngs(2008)
Idriss (2008)
Kanno et al. (2006)
Kataoka et al. (2006)
Uchiyama & Midorikawa (2006)
Zhao et al. (2006)

水平方向

水平方向

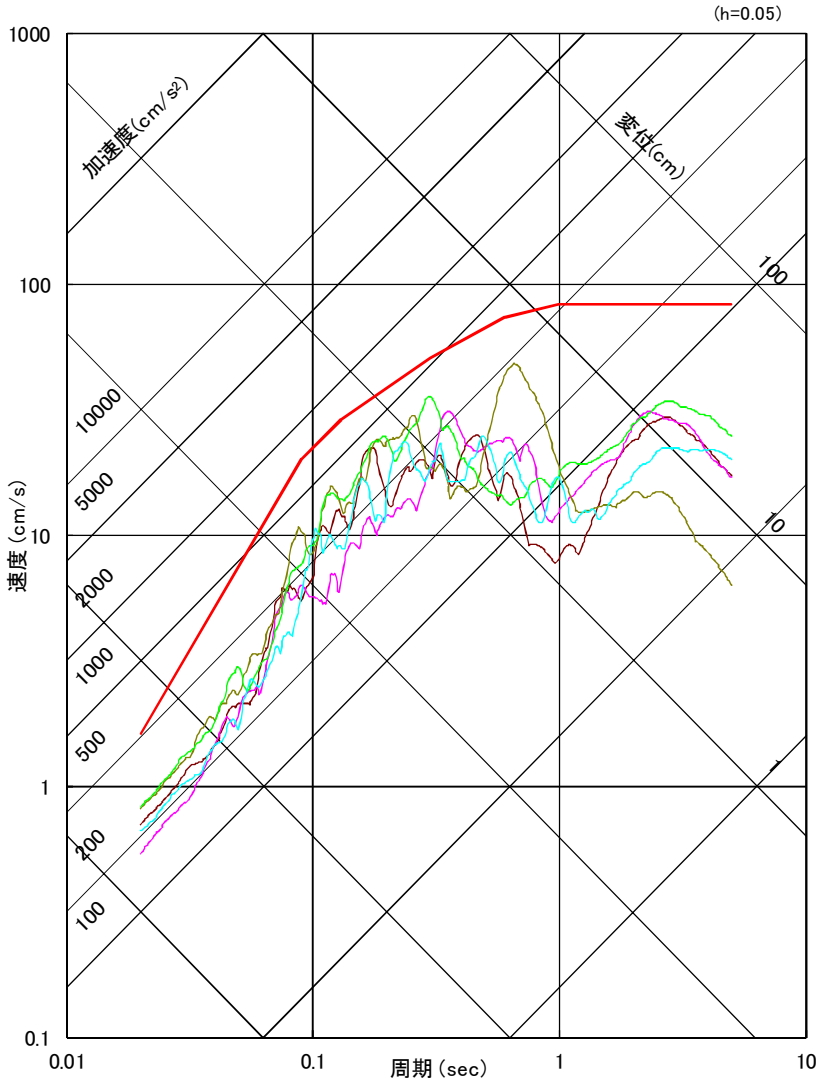
■ 甲楽城沖～柳ヶ瀬山の断層モデルによる地震動評価結果

◆ 基本ケース



基準地震動Ss-DH
破壊開始点1　破壊開始点2　破壊開始点3
破壊開始点4　破壊開始点5
※実線はNS方向，破線はEW方向

水平方向

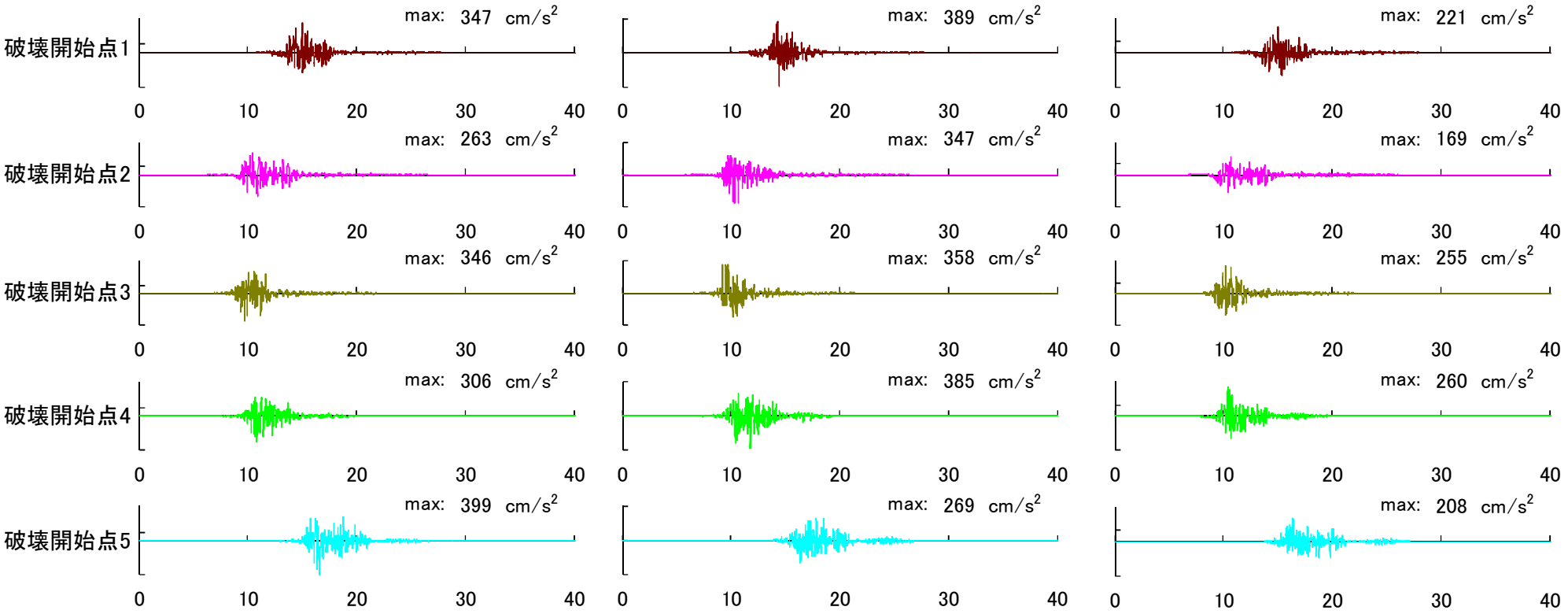


基準地震動Ss-DV
破壊開始点1　破壊開始点2　破壊開始点3
破壊開始点4　破壊開始点5

鉛直方向

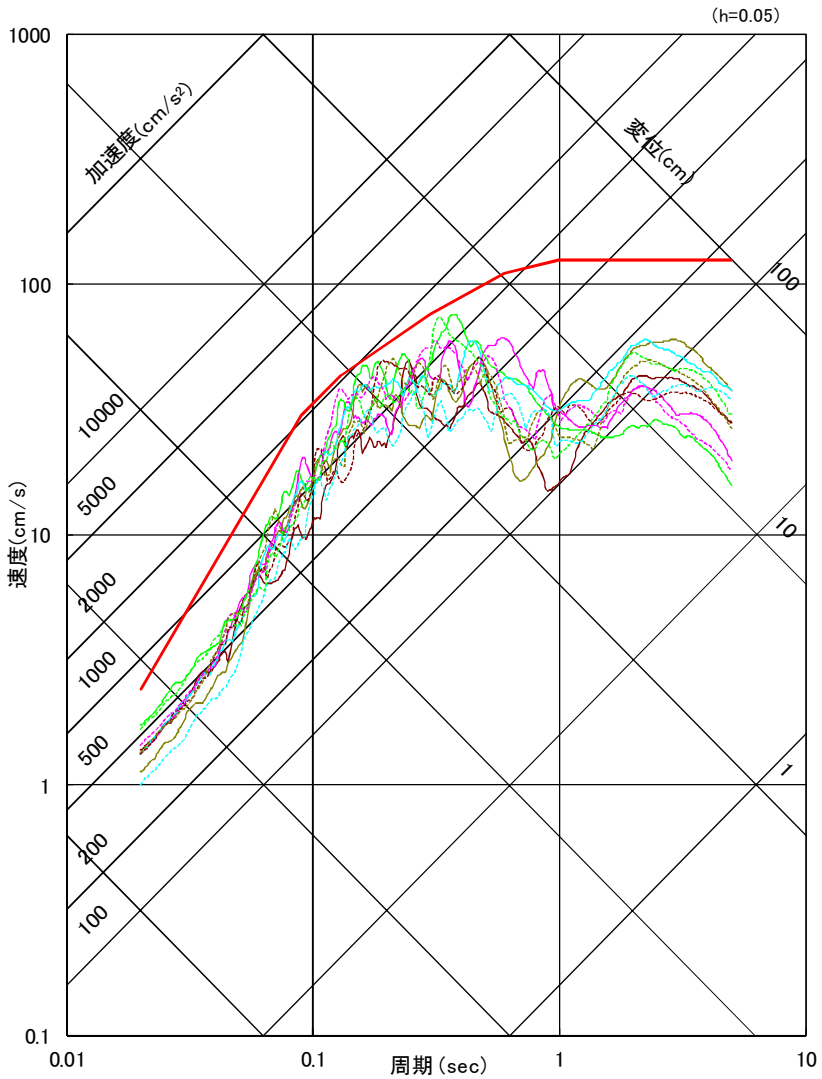
■ 甲楽城沖～柳ヶ瀬山の断層モデルによる地震動評価結果

◆ 基本ケース



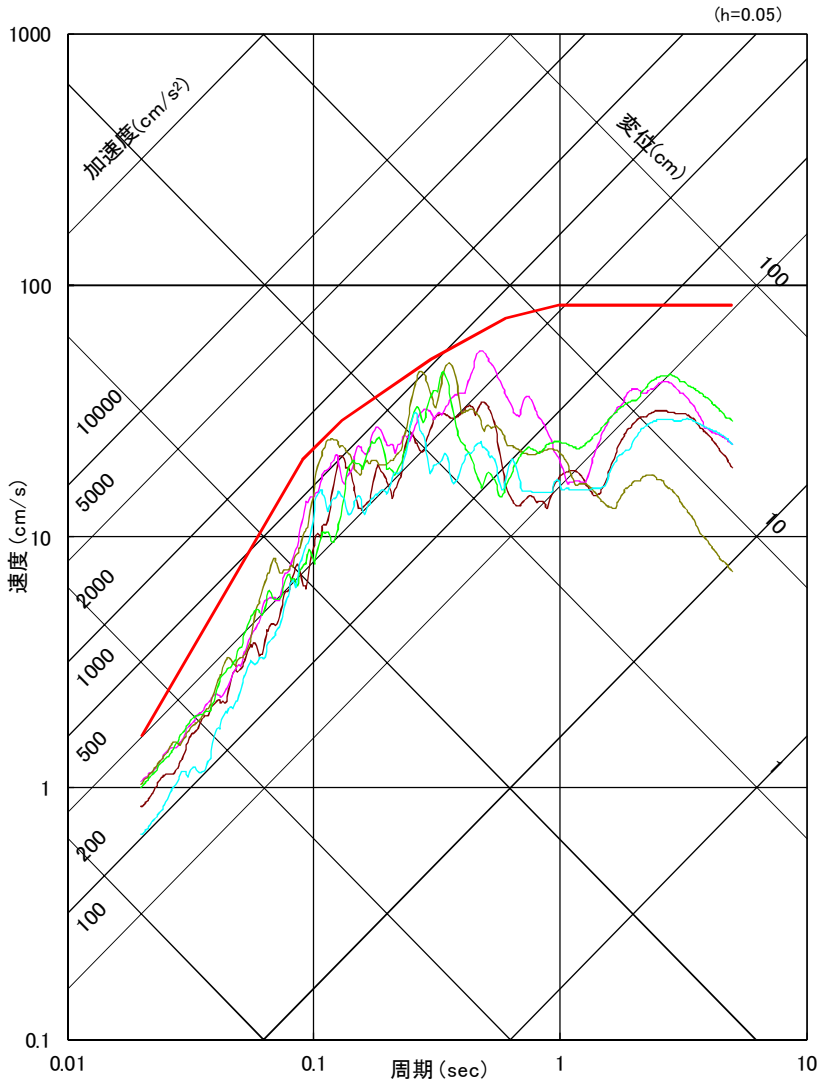
■ 甲楽城沖～柳ヶ瀬山の断層モデルによる地震動評価結果

◆ 断層上端深さの不確かさを考慮



基準地震動Ss-DH
破壊開始点1　破壊開始点2　破壊開始点3
破壊開始点4　破壊開始点5
※実線はNS方向，破線はEW方向

水平方向

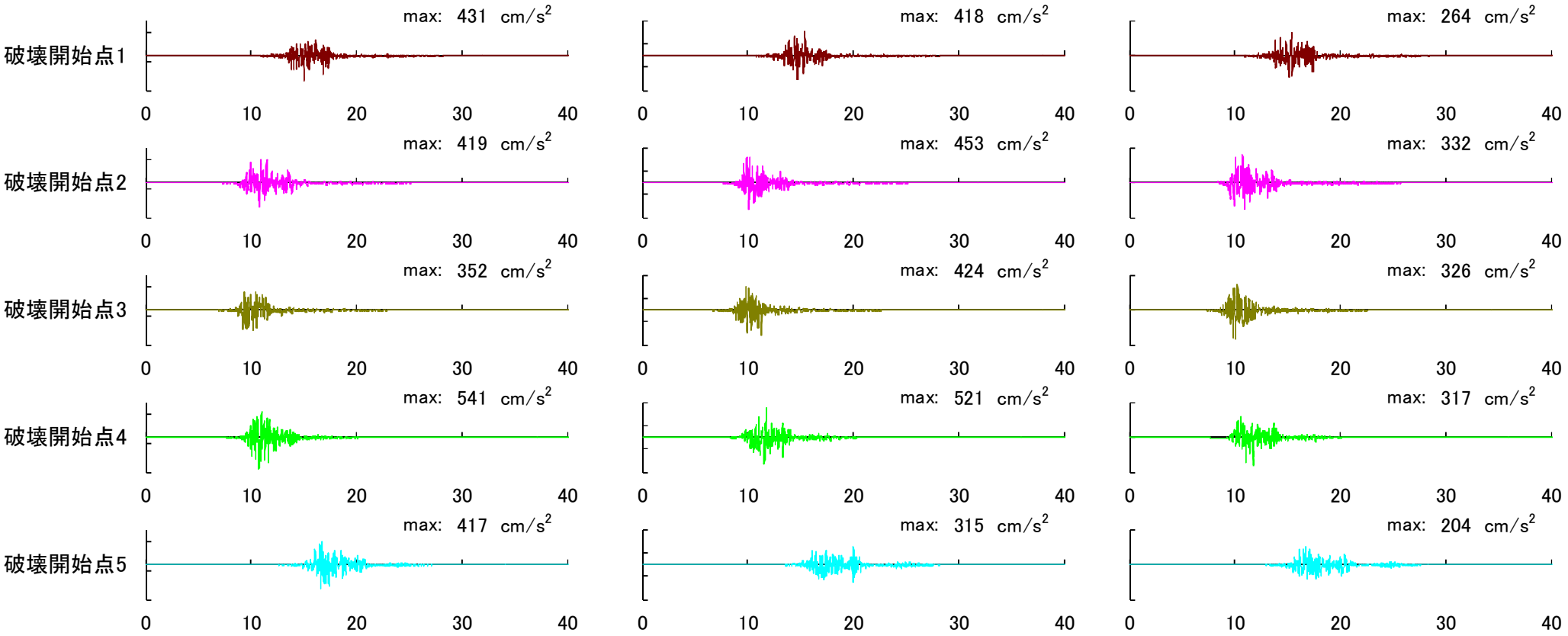


基準地震動Ss-DV
破壊開始点1　破壊開始点2　破壊開始点3
破壊開始点4　破壊開始点5

鉛直方向

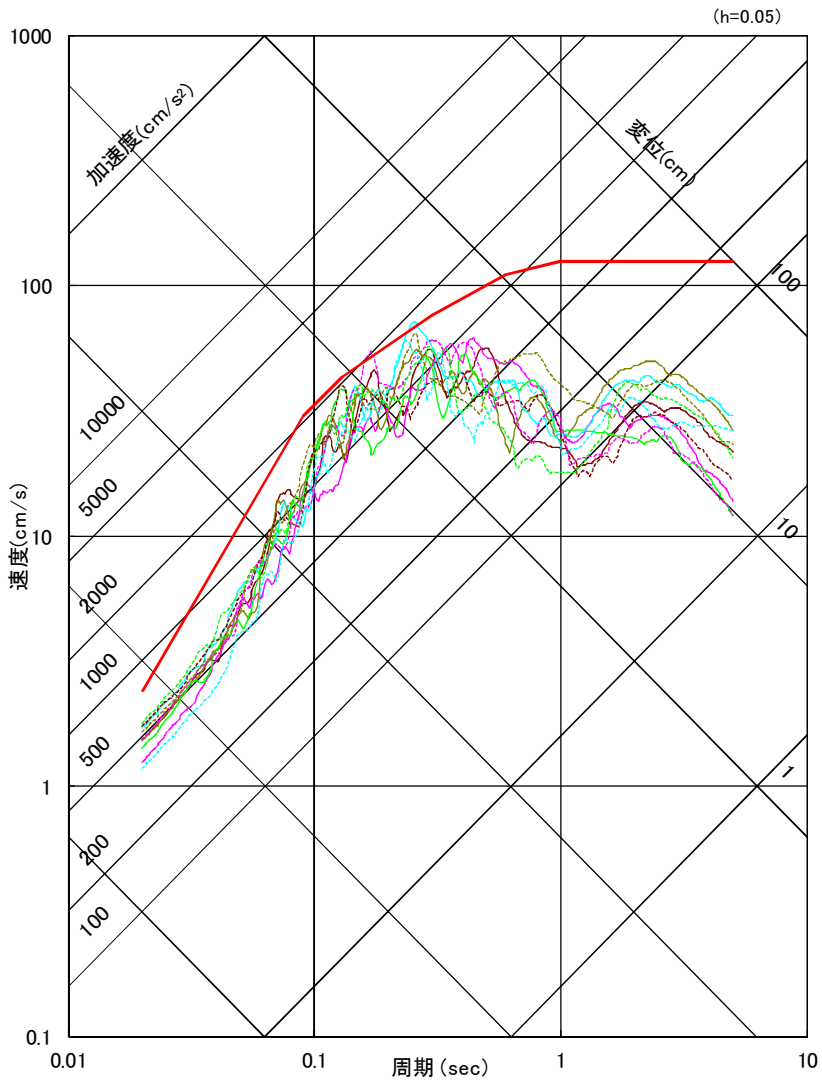
■ 甲楽城沖～柳ヶ瀬山の断層モデルによる地震動評価結果

◆ 断層上端深さの不確かさを考慮

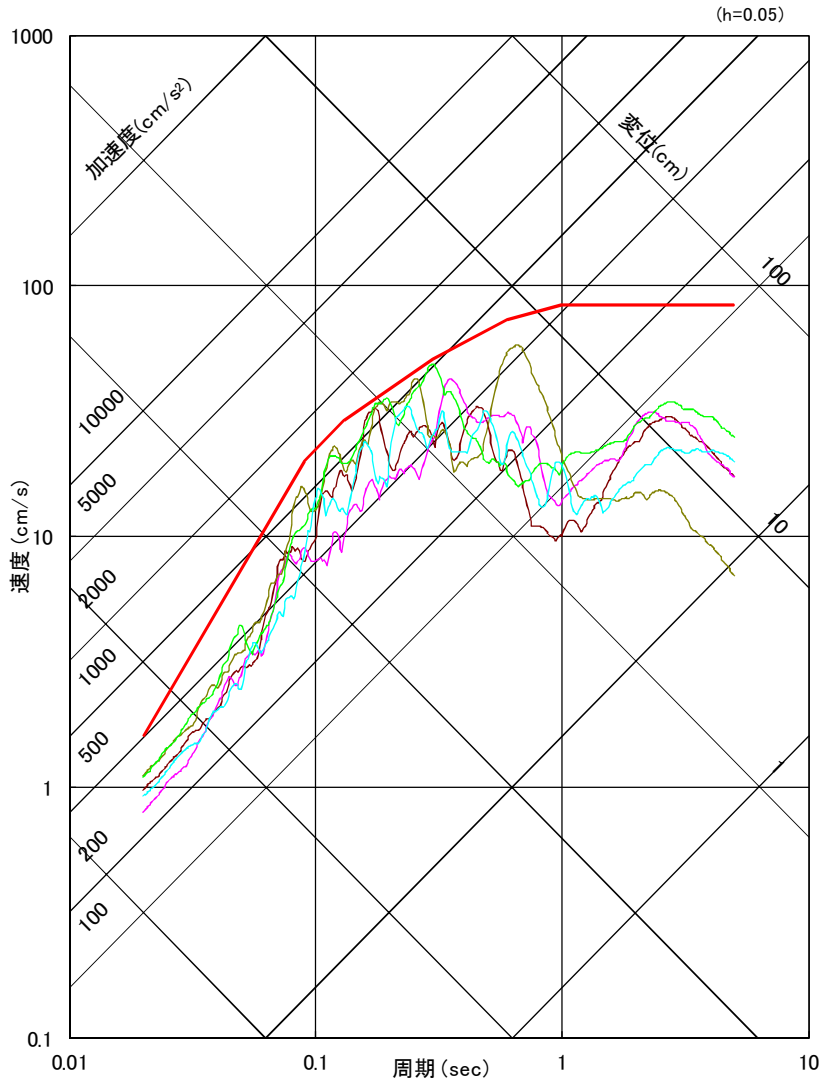


■ 甲楽城沖～柳ヶ瀬山の断層モデルによる地震動評価結果

◆ 短周期レベル1.5倍



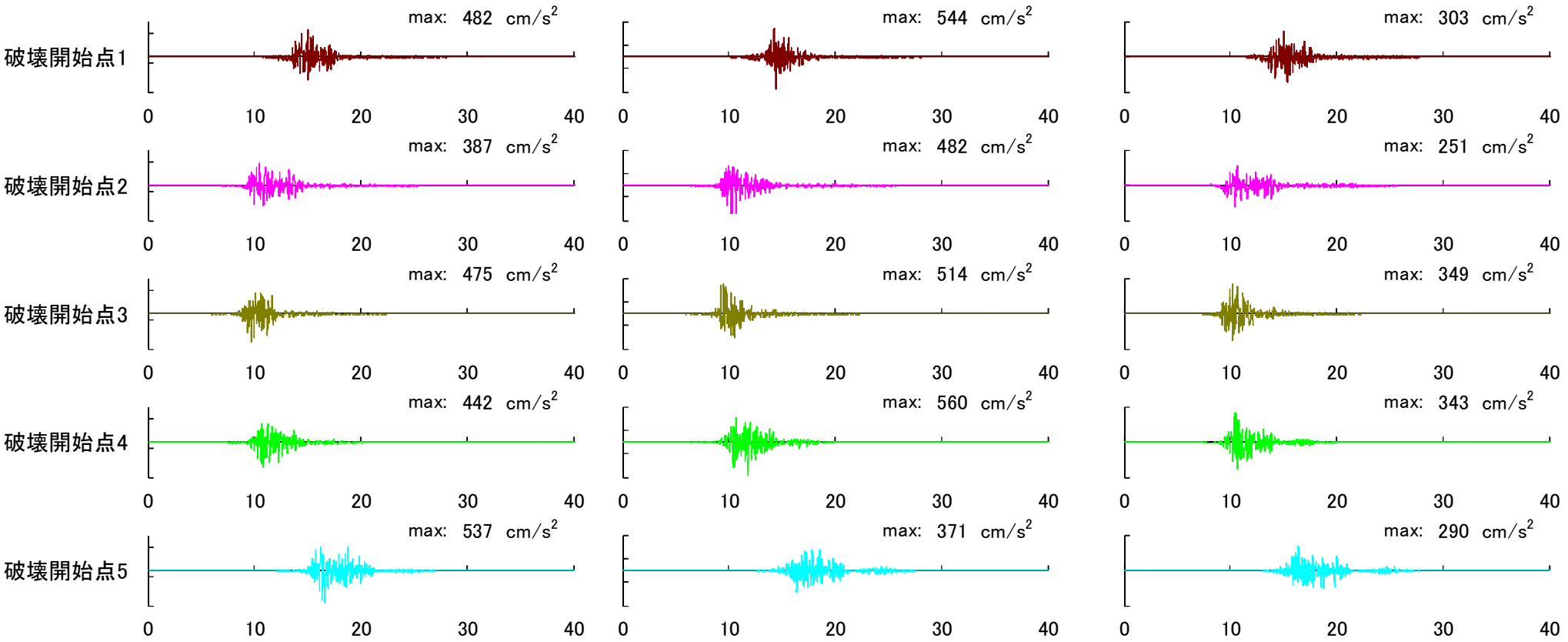
水平方向



鉛直方向

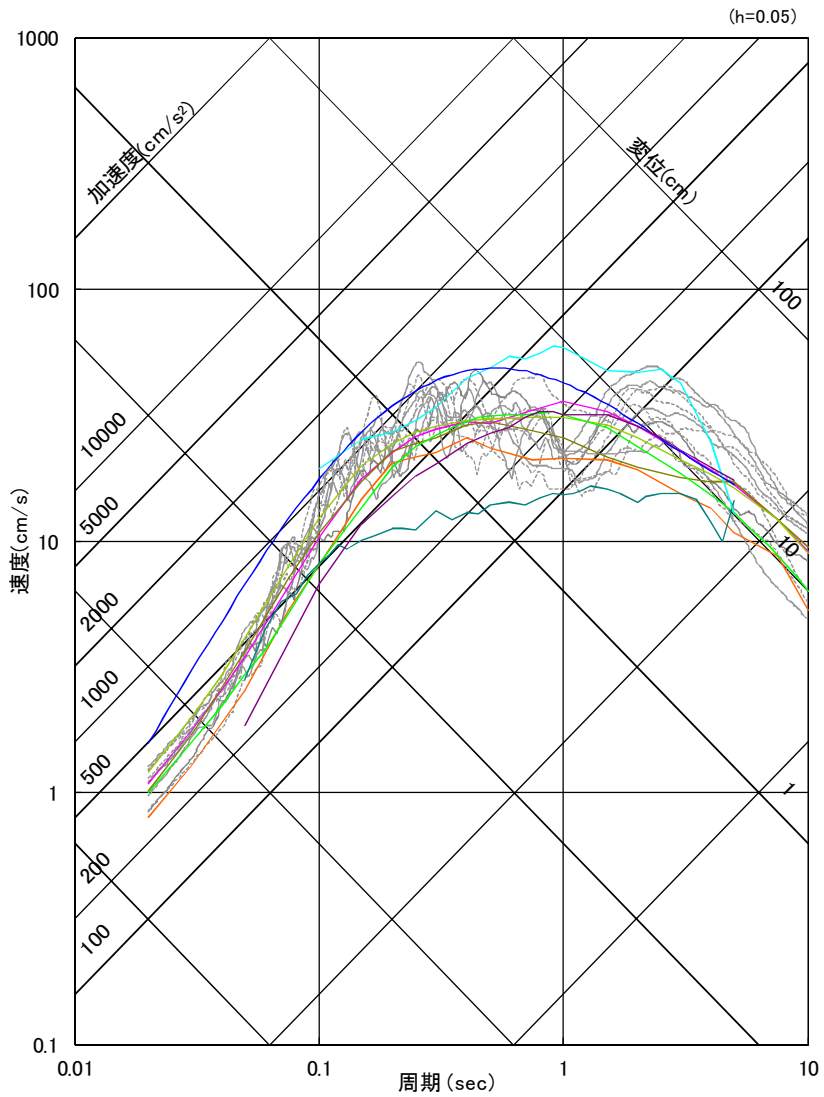
■ 甲楽城沖～柳ヶ瀬山の断層モデルによる地震動評価結果

◆ 短周期レベル1.5倍



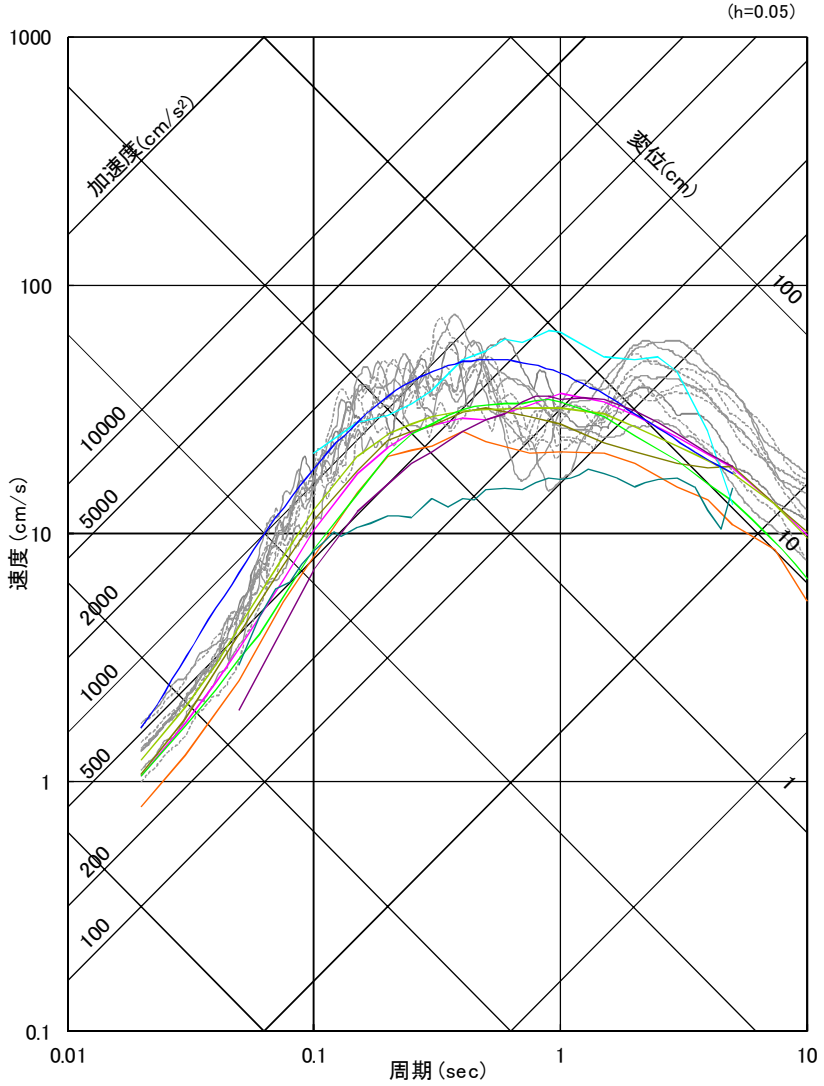
■甲楽城沖～柳ヶ瀬山の応答スペクトルに基づく地震動評価結果との比較

◆ 基本ケース



水平方向

◆ 断層上端深さの不確かさを考慮



水平方向

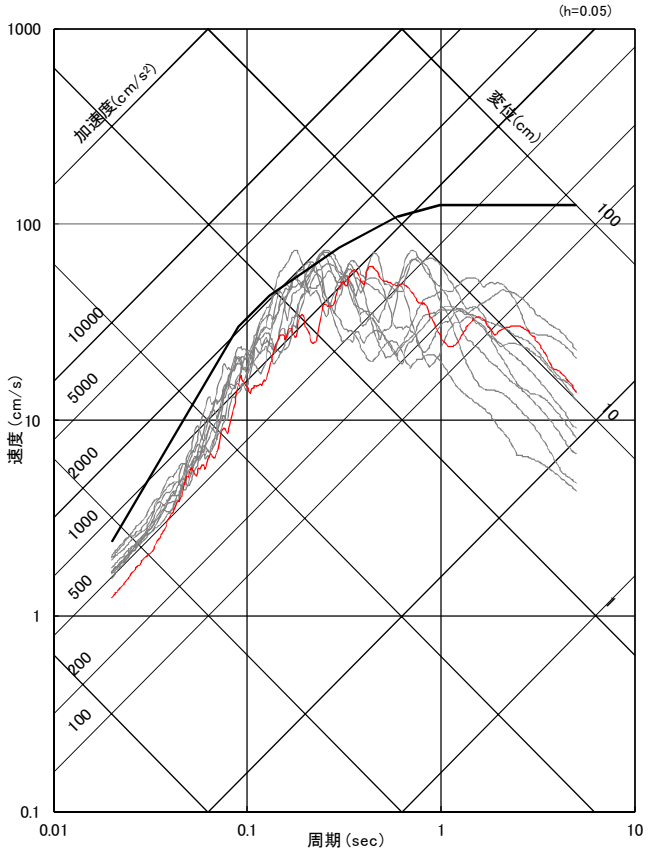
――断層モデルを用いた手法による地震動評価結果
（実線：NS方向、破線：EW方向）

- Abrahamson and Silva (2008)
- Boore and Atkinson (2008)
- Campbell and Bozorgnia (2008)
- Chiou and Youngs(2008)
- Idriss (2008)
- Kanno et al. (2006)
- Kataoka et al. (2006)
- Uchiyama & Midorikawa (2006)
- Zhao et al. (2006)

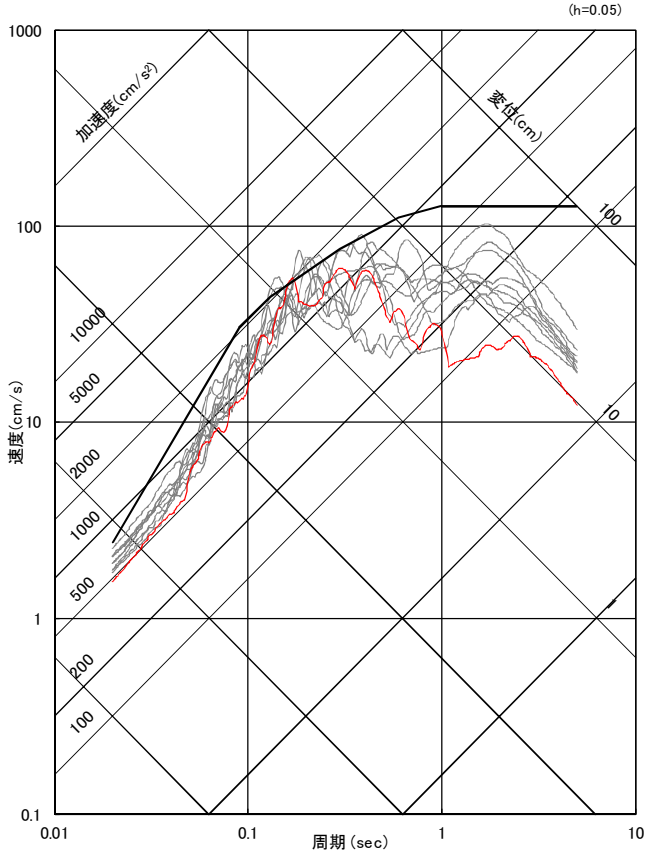
■ 甲楽城沖～柳ヶ瀬山の断層モデルによる地震動評価結果と基準地震動Ssとの比較

◆ 甲楽城沖～柳ヶ瀬山の地震動評価結果と既往の基準地震動Ss（Ss-D及びSs-1～Ss-9）を比較したところ、極一部の周期でわずかに超過している1ケース※を除き、既往の基準地震動Ssに包絡されている。

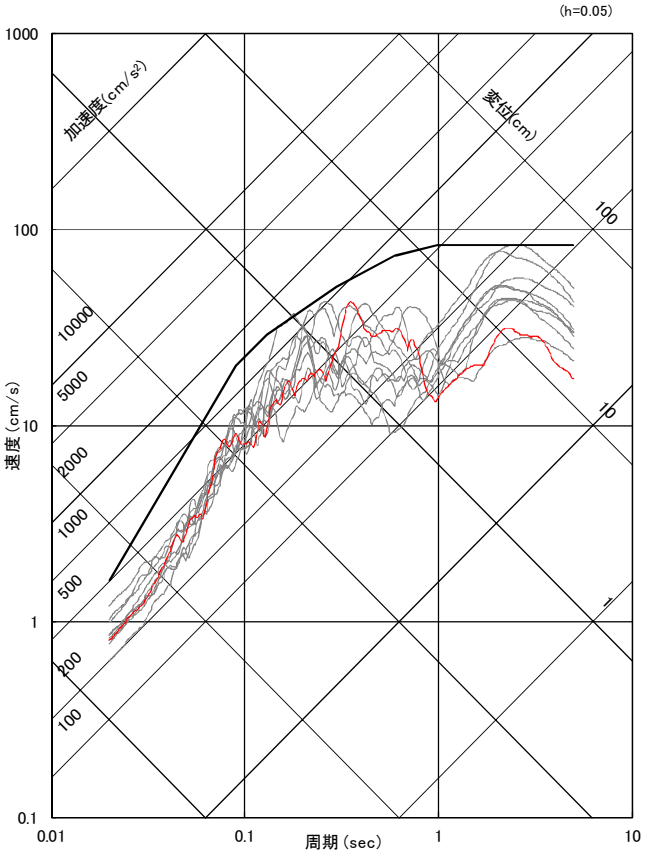
※：短周期レベル1.5倍、破壊開始点2のケース



NS方向



EW方向



鉛直方向

■検討のまとめ

◆「甲楽城沖断層」、「浦底断層」、「池河内断層」、「柳ヶ瀬山断層」を一連の断層として地震動評価を実施し、基準地震動Ssとの比較を行った。

◆ 応答スペクトルによる地震動評価は、耐専式の適用が難しいと判断されたため、断層最短距離を指標とした距離減衰式を用いて評価し、基準地震動Ss以下であることを確認した。

◆ 断層モデルによる地震動評価結果は、概ね基準地震動Ss以下であることを確認した。

美浜発電所
「甲楽城沖断層」、「浦底断層」、「池河内断層」、「柳ヶ瀬山断層」の連動を考慮した地震動評価

平成24年４月２３日

関西電力株式会社

■評価方法

〇応答スペクトルに基づく地震動評価

・解放基盤表面の地震動として評価できること、震源の拡がりが考慮できること、敷地における地震観測記録等を用いて諸特性が考慮できること、更に水平方向及び鉛直方向の地震動が評価できることから、Noda et al.(2002)（以下、耐専式という。）を基本的に採用

〇断層モデルを用いた地震動評価

・評価する震源の近傍で発生した地震の適切な観測記録が得られていないため、短周期側を統計的グリーン関数法、長周期側を理論的方法を適用したハイブリッド合成法により評価

・これまでの合同Cサブグループ会合における審議を踏まえ再評価した地盤モデルを用いて評価

・新潟県中越沖地震の反映事項及び「耐震バックチェックにおいて地震動評価を行う際の応力降下量の取扱いについて（平成21年4月24日：原子力安全・保安院）」を踏まえて、短周期の地震動レベルを1.5倍したケースを考慮

地震発生層の設定

若狭周辺地域は、震源分布のデータが少ないため、各種地下構造調査結果から地震発生層を推定した。

① 地盤速度構造による検討

(1)各種調査、探査

ボーリング調査、PS検層、微動アレー探査、地震計水平アレー観測、等の結果より地盤速度構造を検討した。

その結果、Vp≧6km/s(Vs≧3.6km/s)の深さは4kmであった。

(2)地震波速度トモグラフィ

対象地点を取り囲むような震源と観測点の観測記録を用いて、地震波の伝播をインバージョンし、速度層構造を求める。

P波速度分布は、敦賀半島周辺でVp=6km/s層が深さ4～5kmに分布している。またP波速度分布に震源分布を重ねると、Vp=6km/s層と地震発生の上限深さが概ね対応して見られる。

② 地震発生深さによる検討

(1)周辺地域における地震発生状況の調査

若狭地域の微小地震の発生分布について調査すると、地震の発生は深さ 5～20kmに見られた。

(2)地震発生状況の統計的評価

伊藤・中村(1998)を参考に、若狭地域の地震の10%発生頻度深さ(D10)は約7km、地震の90%発生頻度深さ(D90)は約15kmであった。

③ 他機関による検討

地震調査委員会が実施した強震動予測について整理すると、若狭周辺における断層上端・下端深さは 3～18kmであった。

	上端	下端
若狭地域における断層上端・下端深さ	4km	18km
不確かさとして考慮する断層上端・下端深さ	3km	18km

地震動評価に用いる地盤モデルの設定

■断層モデルを用いた地震動評価に用いる地盤モデルは、以下の方針で設定した。

〇浅部地盤構造

・速度構造：敷地内のPS検層結果より設定

・減衰定数：佐藤（浩）他（2007,2009）の考え方を参考にして、敷地内のPS検層結果より得られた速度構造の不均質性データをもとに設定

〇深部地盤構造

・速度構造：敷地内及び敷地周辺で実施した屈折法探査、微動アレー探査、地震計水平アレー観測及び地震波速度トモグラフィ解析結果に基づき設定

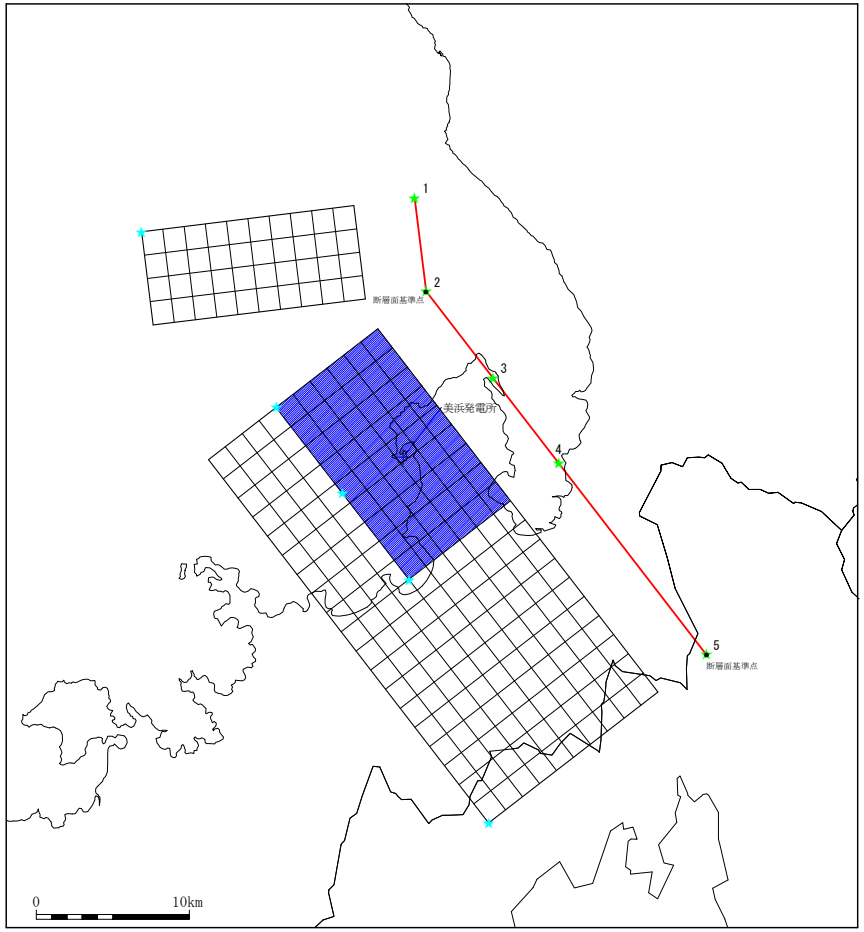
・減衰定数：上記調査結果は、若狭地域の深部地盤構造を表したものであることや、これまでの耐震バックチェック審議を踏まえ、もんじゅサイトの経験的サイト増幅特性やそれに対応する地盤モデルを参照して、減衰定数0.5%（Q値100）を設定

EL (m)	層	層厚 (m)	密度 ρ (t/m^3)	S波速度 Vs (m/s)	P波速度 Vp (m/s)	Qs	減衰定数 (%)
0	1	65	2.6	1,650	4,040	16.67	3.0
−65	2	135	2.6	2,530	4,880	16.67	3.0
−200	2’	430	2.6	2,530	4,880	100.00	0.5
−630	3	770	2.6	2,800	5,130	100.00	0.5
−1400	4	2600	2.6	3,100	5,310	100.00	0.5
−4000	5	−	2.7	3,600	6,270	100.00	0.5

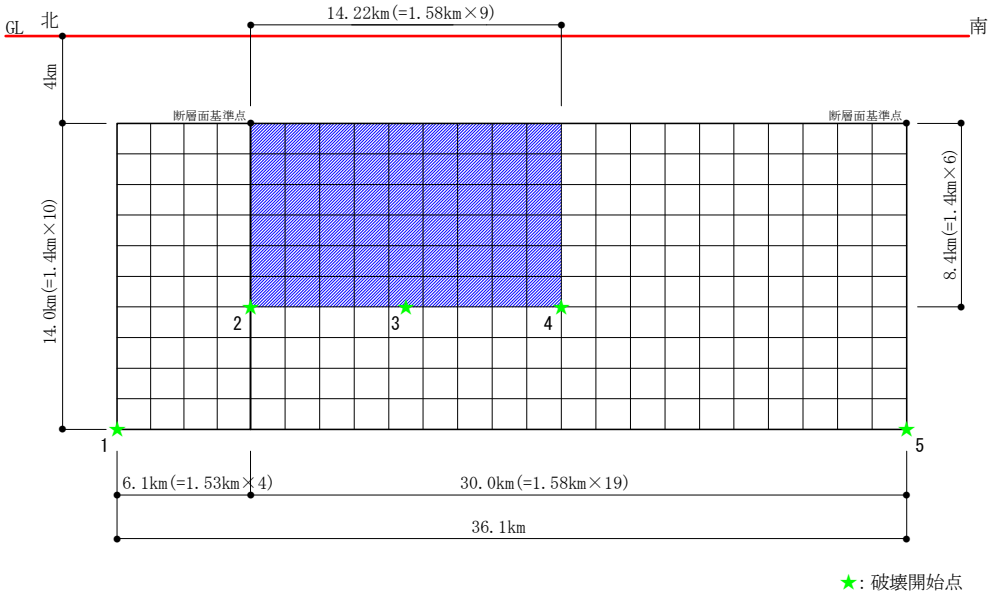
地震動評価において考慮する不確かさケース

	断層上端深さ	断層傾斜角	アスペリティ	破壊開始点	短周期レベル	備考
基本ケース	4km	90°	敷地近傍に配置	複数設定	レシピ平均	
断層上端深さの不確かさを考慮	3km	90°	敷地近傍に配置	複数設定	レシピ平均	
短周期レベル	4km	90°	敷地近傍に配置	複数設定	レシピ平均×1.5倍	中越沖地震知見反映

断層モデル図



断層配置図



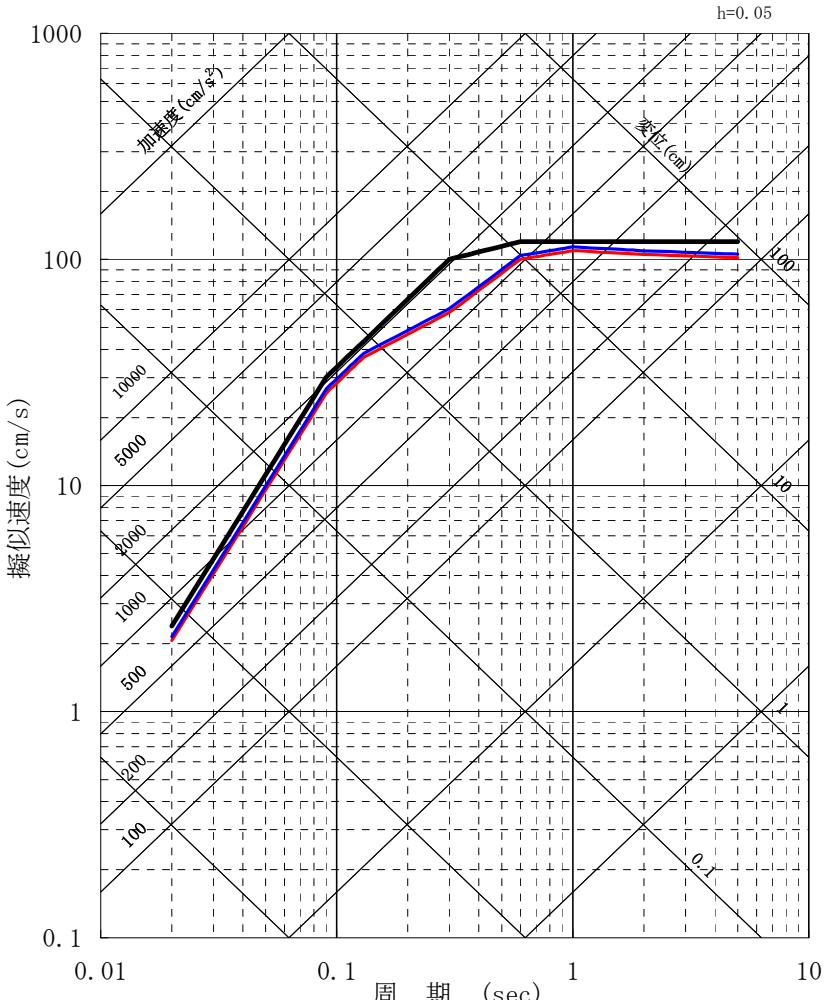
断面図

断層パラメータ

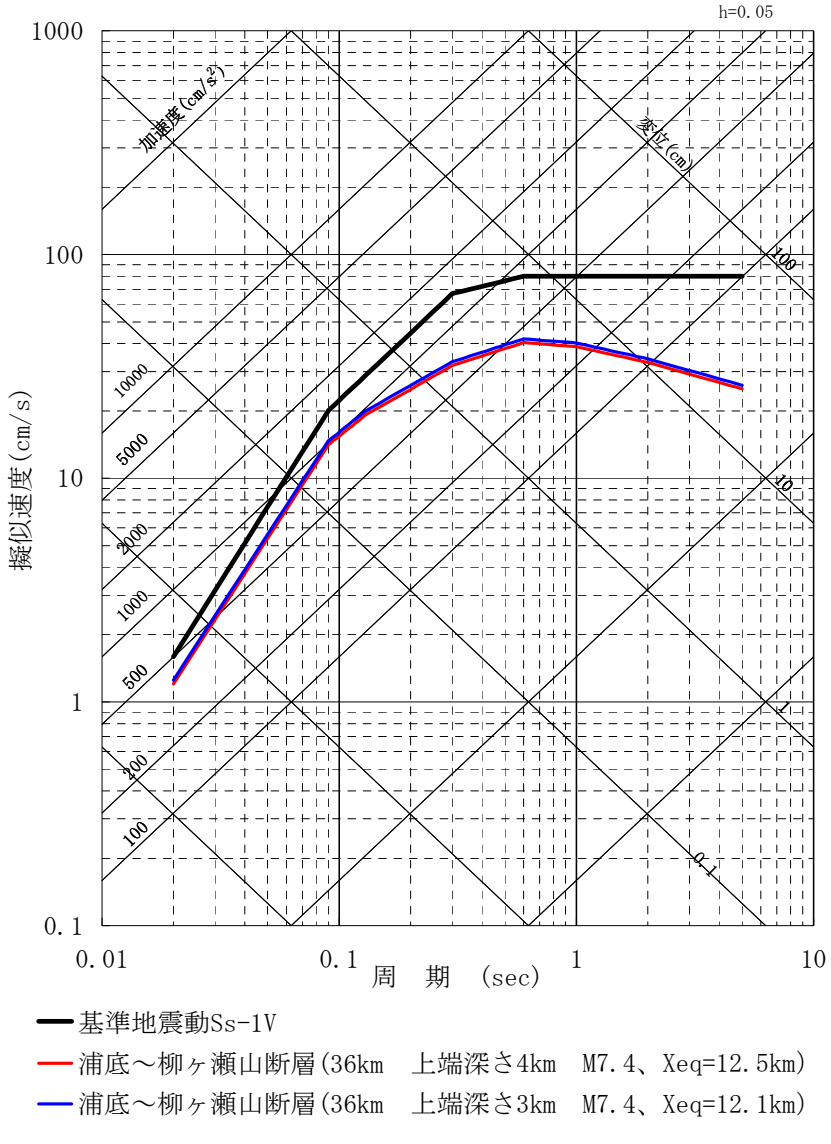
断層パラメータ	パラメータ	設定方法
断層長さL（km）	36.1	断層位置から計算
断層傾斜角（°）	90	調査結果に基づき設定
断層上端深さ（km） 断層下端深さ（km）	4 18	微小地震の発生及び地下構造を参考に設定
断層幅W（km）	14	地震発生層と傾斜角から設定
断層面積S（km^2）	505.4	断層面より算定
破壊伝播様式	同心円状	－
地震モーメントM_0（Nm）	1.42×10^{19}	$M_0=\{S/(4.24\times10^{-11})\}^{2.0}$
剛性率(N/m^2)	3.50×10^{10}	$\mu=\rho\ \beta^2$，ρ=2.7g/cm^3，β=3.6km/s
平均すべり量D（cm）	80.3	$D=M_0/(\mu S)$
平均応力降下量$\Delta\sigma$（MPa）	3.1	$\Delta\sigma=(7\pi^{1.5}/16)(M_0/S^{1.5})$
破壊伝播速度Vr（km/s）	2.59	$Vr=0.72\beta$
立ち上がり時間Tr(sec)	1.06	$Tr=2.03\times10^{-9}M_0^{1/3}$
高周波限界遮断周波数fmax（Hz）	8.3	香川他(2003)
短周期レベルA（Nm/s^2）	1.28×10^{19}	$A=2.46\times10^{17}\times M_0^{1/3}$
Q値	$50f^{1.1}$	佐藤他(2007)

断層パラメータ		パラメータ	設定方法
全アスペリティ	面積S_a（km^2）	121.5	$Sa=\pi r^2$ $r=(7\pi M_0\beta^2)/(4AaR)$,$R=(S/\pi)^{0.5}$
	平均すべり量D_a（cm）	161.5	$D_a=\gamma_D D$，γ_D=2.01
	地震モーメントM_{0a}（Nm）	6.86×10^{18}	$M_{0a}=\mu S_a D_a$
	応力降下量$\Delta\sigma_a$（MPa）	12.7	$\Delta\sigma_a=(S/S_a)\Delta\sigma$
背景領域	面積S_b（km^2）	383.9	$S_b=S-S_a$
	平均すべり量D_b（cm）	54.7	$D_b=M_{0b}/(\mu S_b)$
	地震モーメントM_{0b}（Nm）	7.34×10^{18}	$M_{0b}=M_0-M_{0a}$
	実効応力$\Delta\sigma_b$（MPa）	2.5	$\sigma_b=0.2\Delta\sigma_a$

応答スペクトルに基づく地震動評価



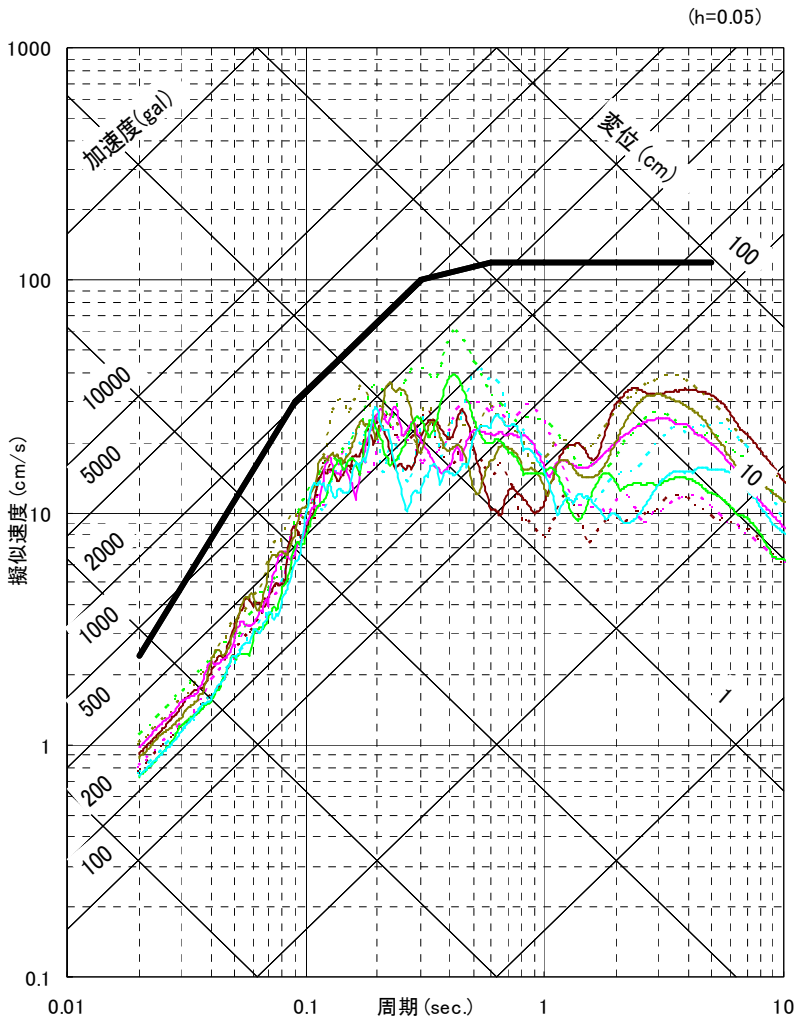
水平方向



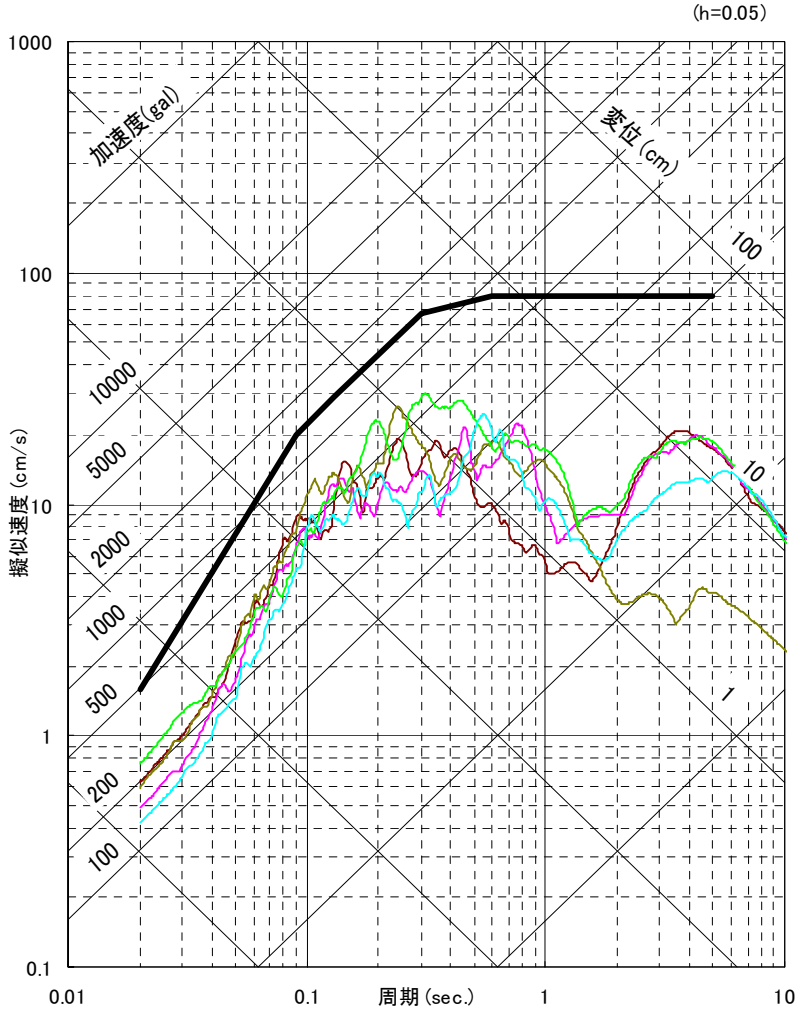
鉛直方向

断層モデルを用いた地震動評価結果

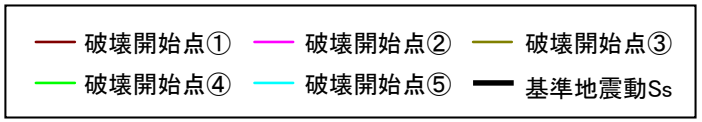
基本ケース（上端4km）の擬似速度応答スペクトル



水平方向（実線: EW方向、破線: NS方向）

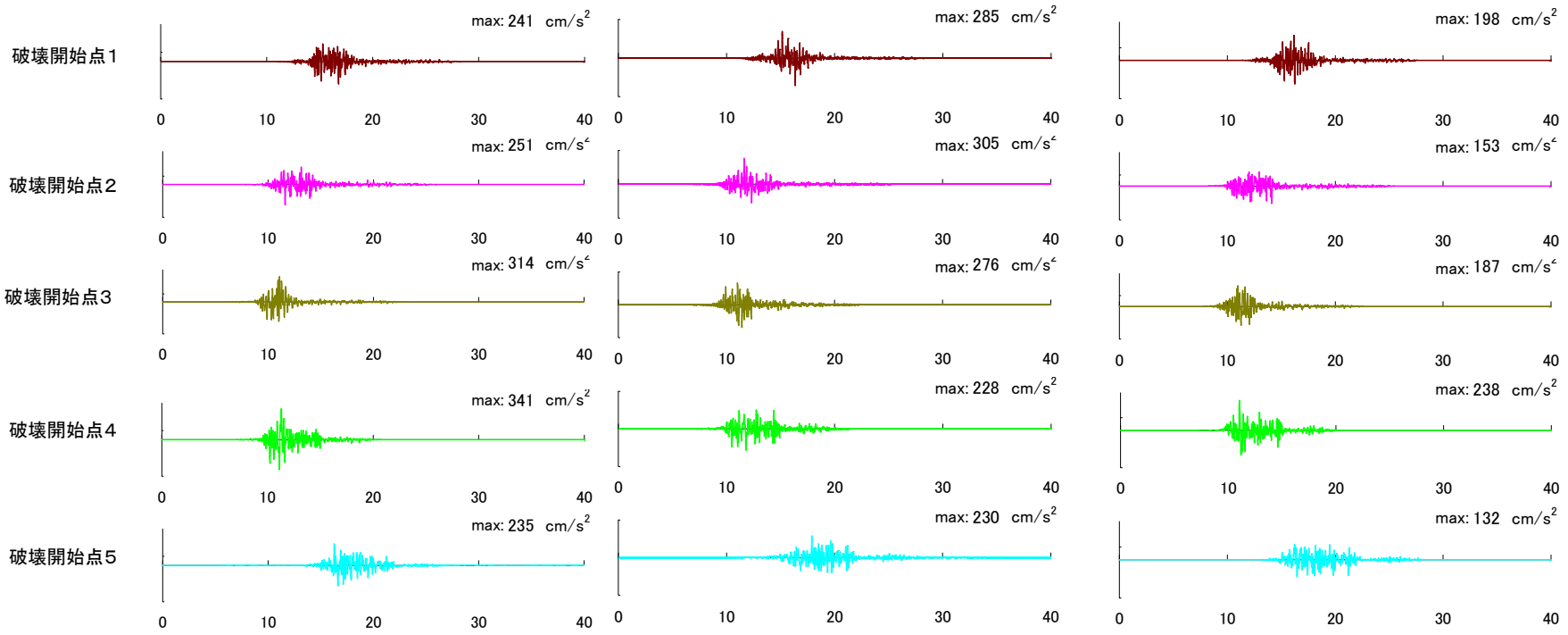


鉛直方向



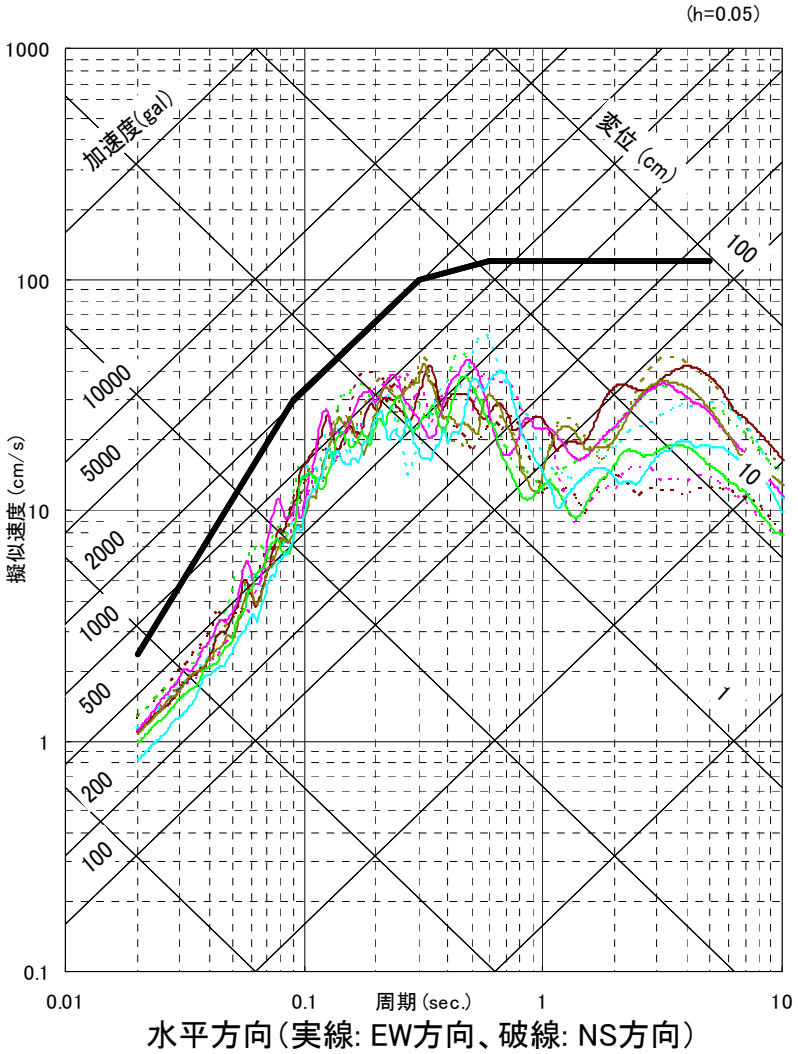
断層モデルを用いた地震動評価結果

基本ケース（上端4km）の加速度時刻歴波形

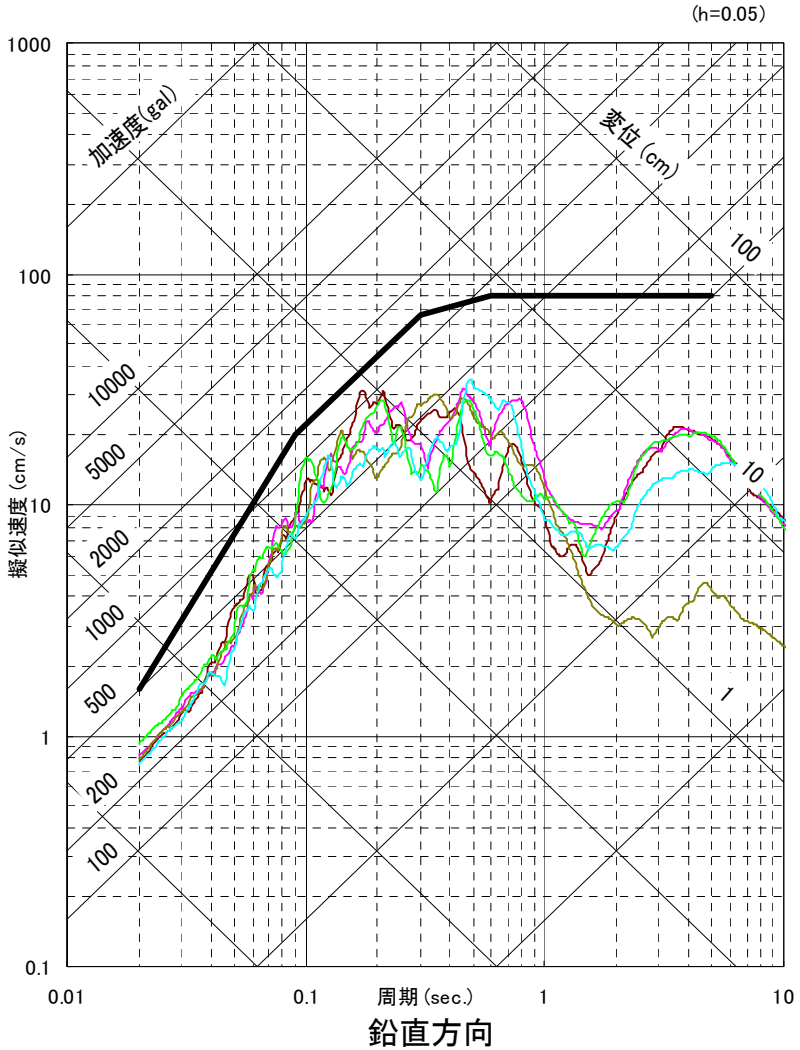


断層モデルを用いた地震動評価結果

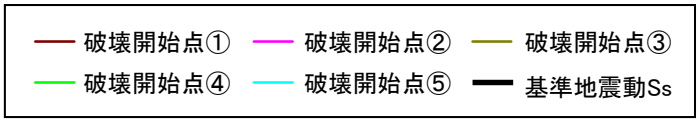
不確かさケース（上端3km）の擬似速度応答スペクトル



水平方向（実線: EW方向、破線: NS方向）

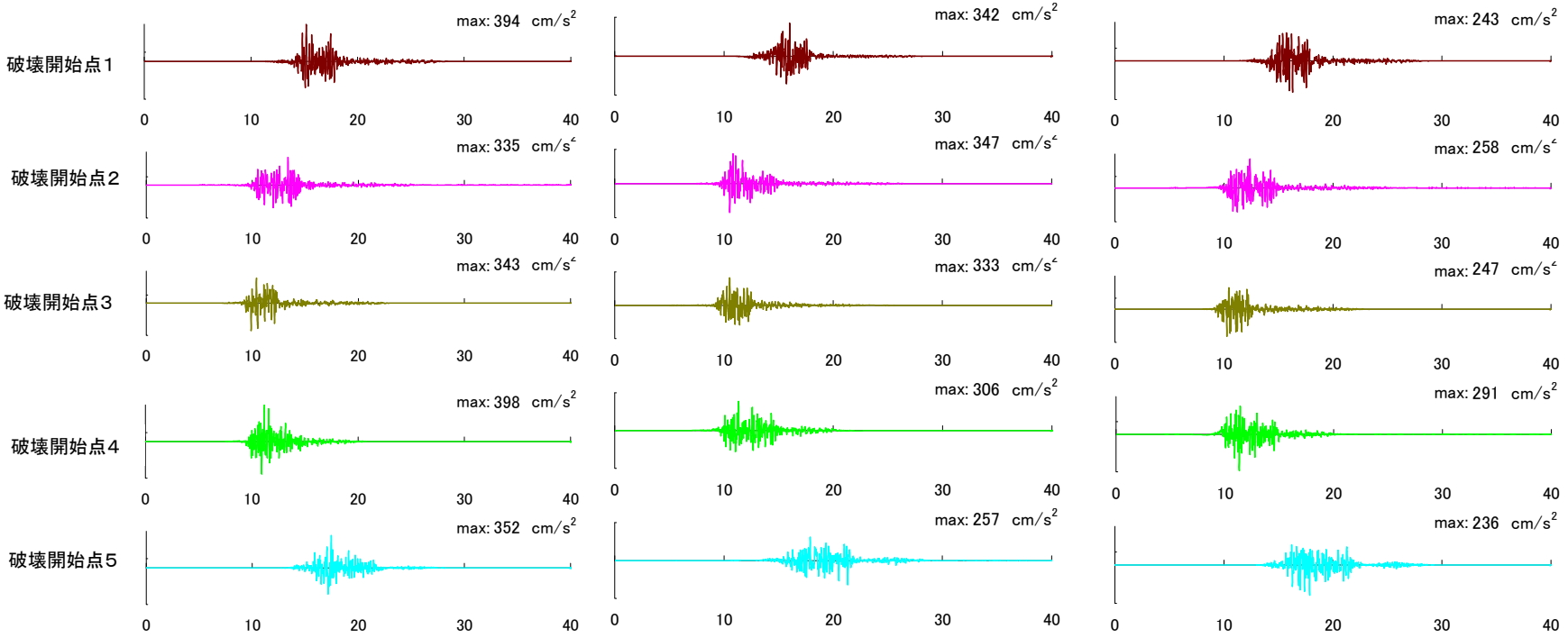


鉛直方向



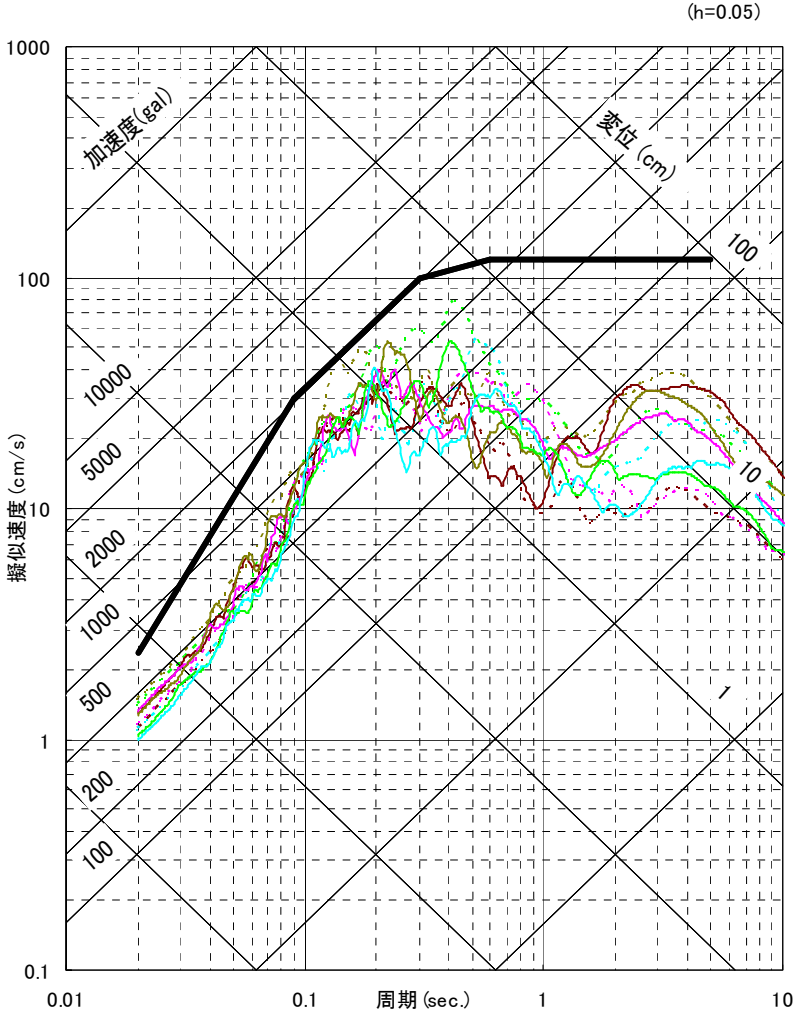
断層モデルを用いた地震動評価結果

不確かさケース（上端3km）の加速度時刻歴波形

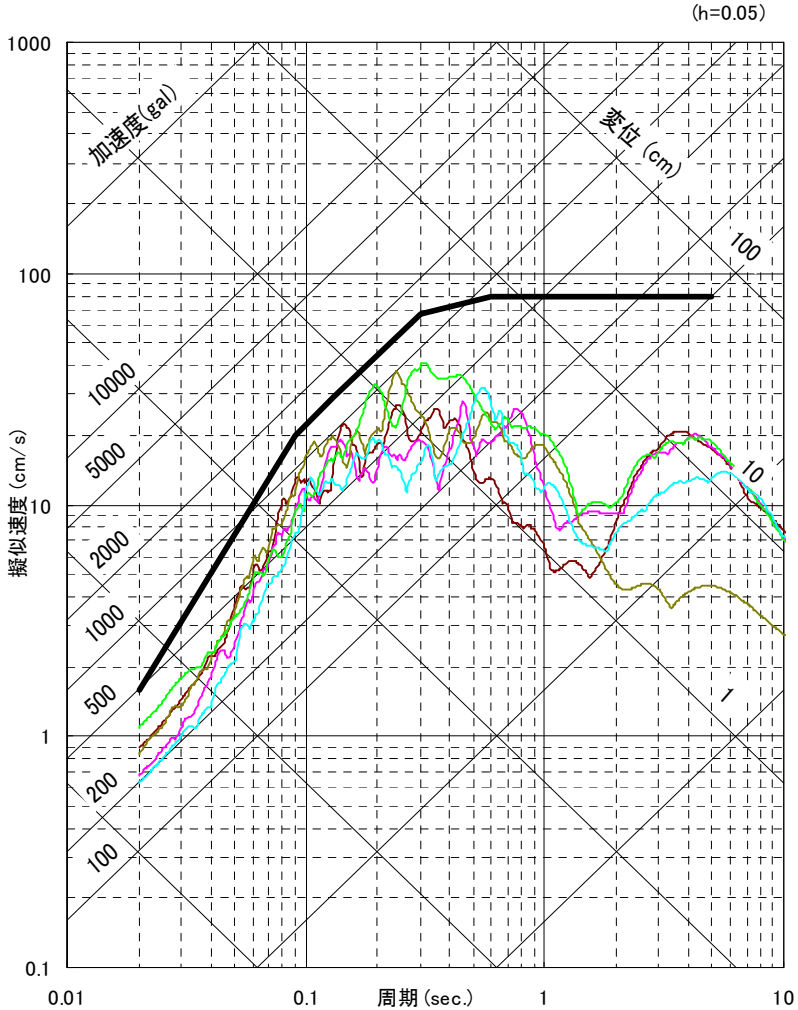


断層モデルを用いた地震動評価結果

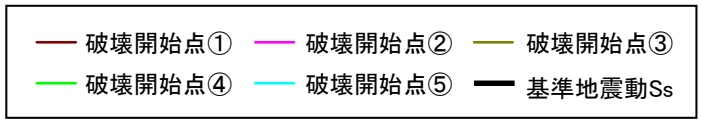
不確かさケース（短周期1.5倍）の擬似速度応答スペクトル



水平方向（実線: EW方向、破線: NS方向）

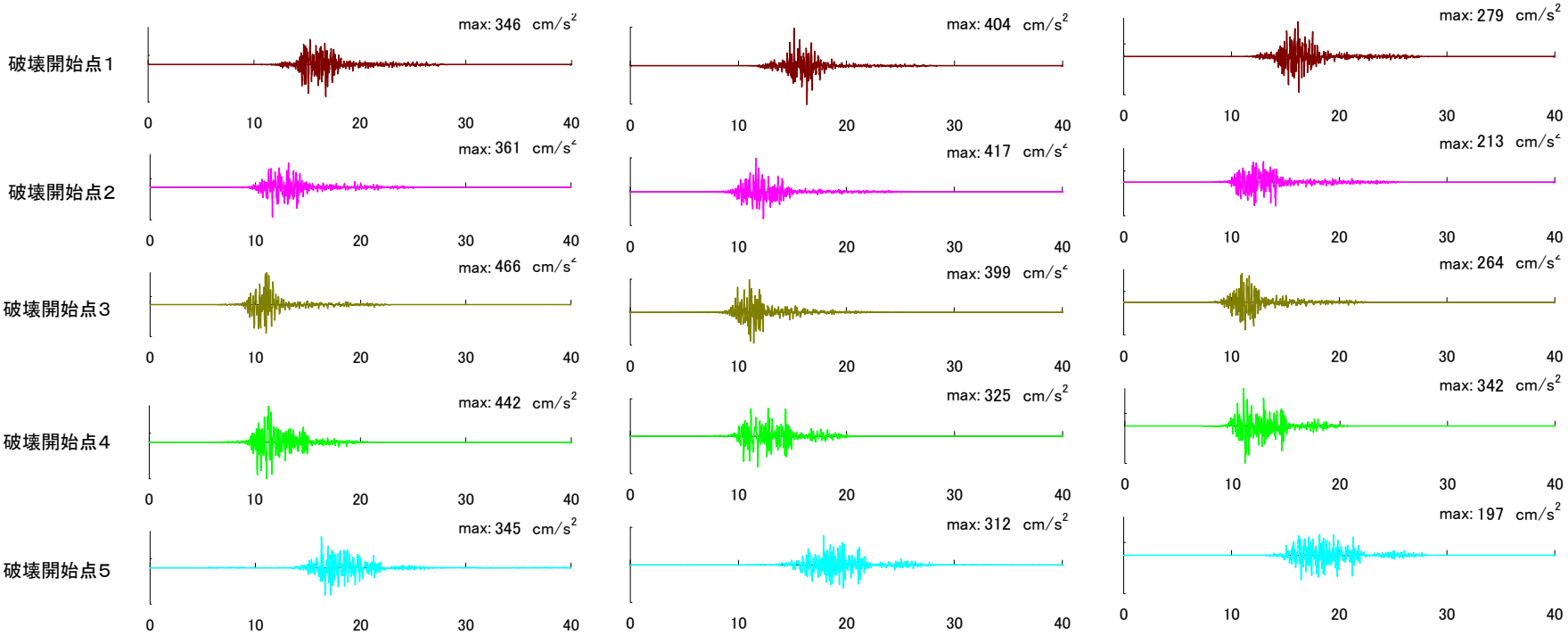


鉛直方向



断層モデルを用いた地震動評価結果

不確かさケース（短周期1.5倍）の加速度時刻歴波形



・甲楽城沖～柳ヶ瀬山断層の連動を考慮した地震動評価を実施した。

・その結果、応答スペクトルに基づく地震動評価、断層モデルを用いた手法による地震動評価のいずれのケースについても、基準地震動Ss-1を下回った。