

2章 基準地震動 S_s の策定

目次

2章 基準地震動 S_s の策定

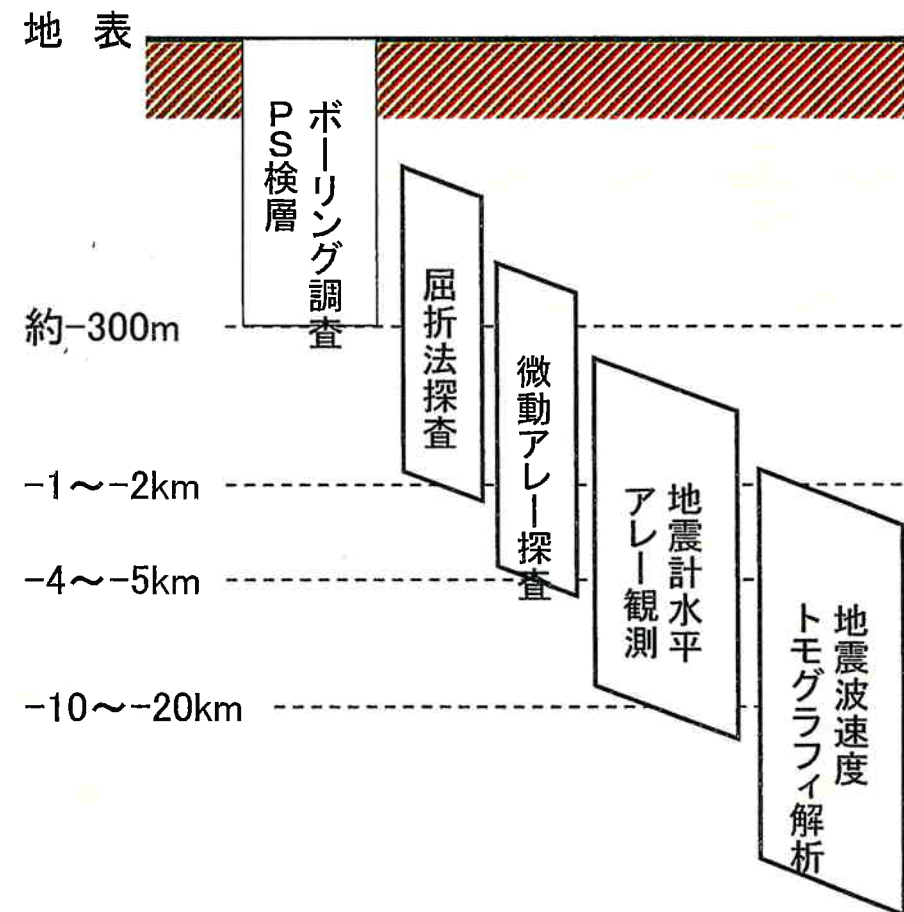
1.地盤速度構造及び地震発生層の評価	2-2
2.地盤減衰構造の評価	2-18
3.地震動評価に用いる地盤モデルの設定	2-53
4.震源を特定して策定する地震動	2-60
4-1 検討用地震の選定	2-61
4-2 地震動評価手法	2-67
4-3 地震動評価結果	2-73
4-4 基準地震動 S_s の策定	2-107
5.震源を特定せず策定する地震動	2-112
6.年超過確率の参照	2-118
参考1 模擬地震波の作成に関する検討	2-123
参考2 地震発生層に関する追加検討	2-130

1. 地盤速度構造及び地震発生層の評価

■地盤速度構造の設定方針

各種調査、探査結果を組み合わせ、地下深部までの地盤速度構造を設定

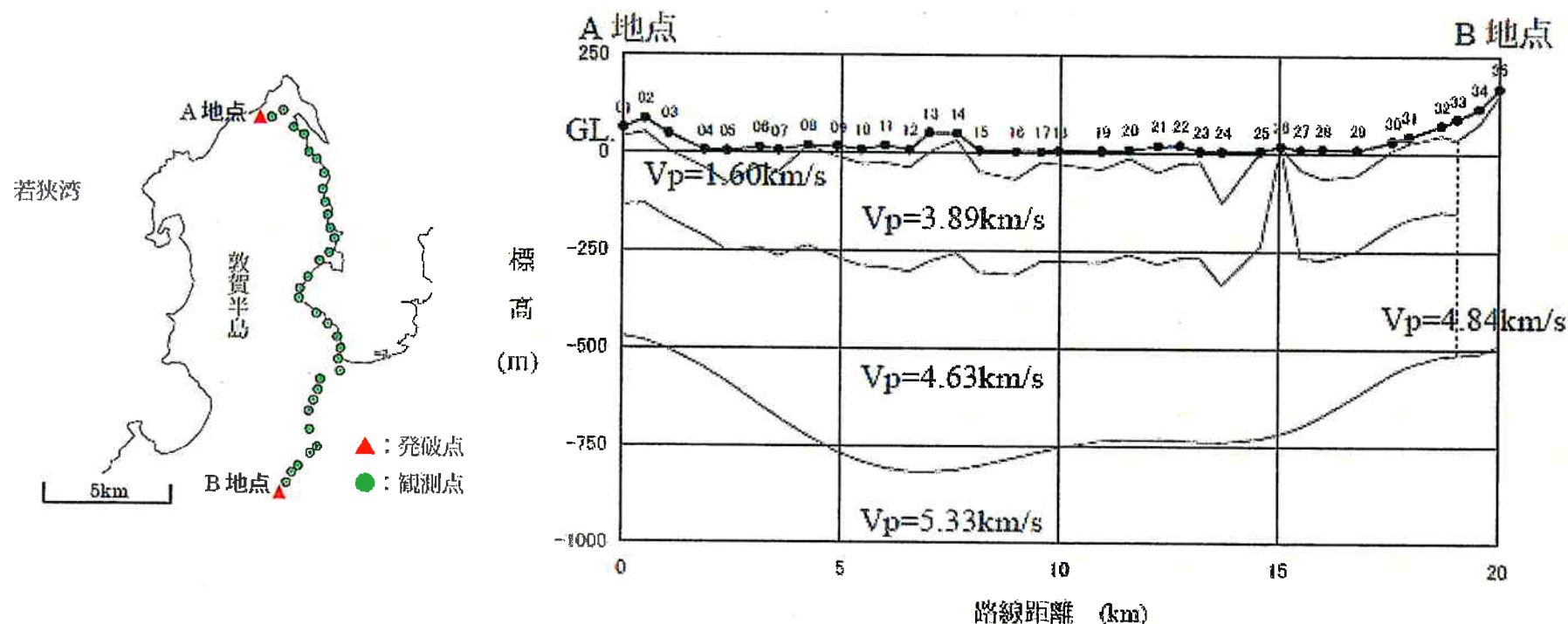
項 目	規 模
ボーリング調査 PS検層	深 さ 約300m
屈折法探査	測線長 約20km
微動アレー探査	アレーサイズ 一辺 125m～約5km
地震計水平アレー観測	アレーサイズ 一辺 約5km
地震波速度 トモグラフィ解析	解析範囲 南北 約300km 東西 約200km 深さ 0～80km



1. 地盤速度構造及び地震発生層の評価

■ 屈折法探査

敦賀半島を縦断する道路沿いに100～500m間隔で合計57観測点を設け、敦賀半島の北端と敦賀市南方の山間部の2箇所でそれぞれ発破を実施した。

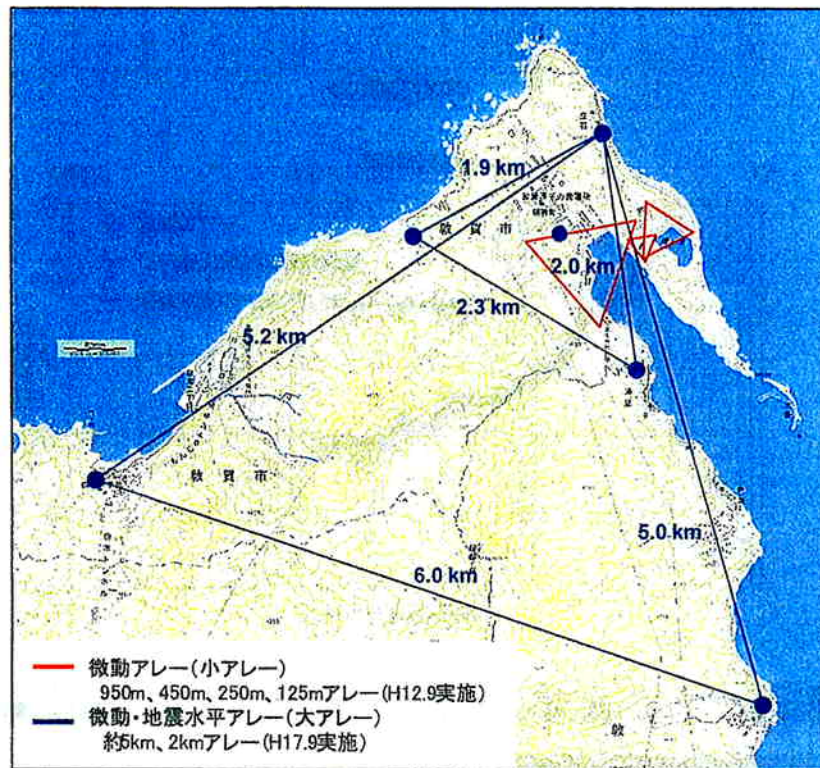


屈折法探査により得られたP波速度構造

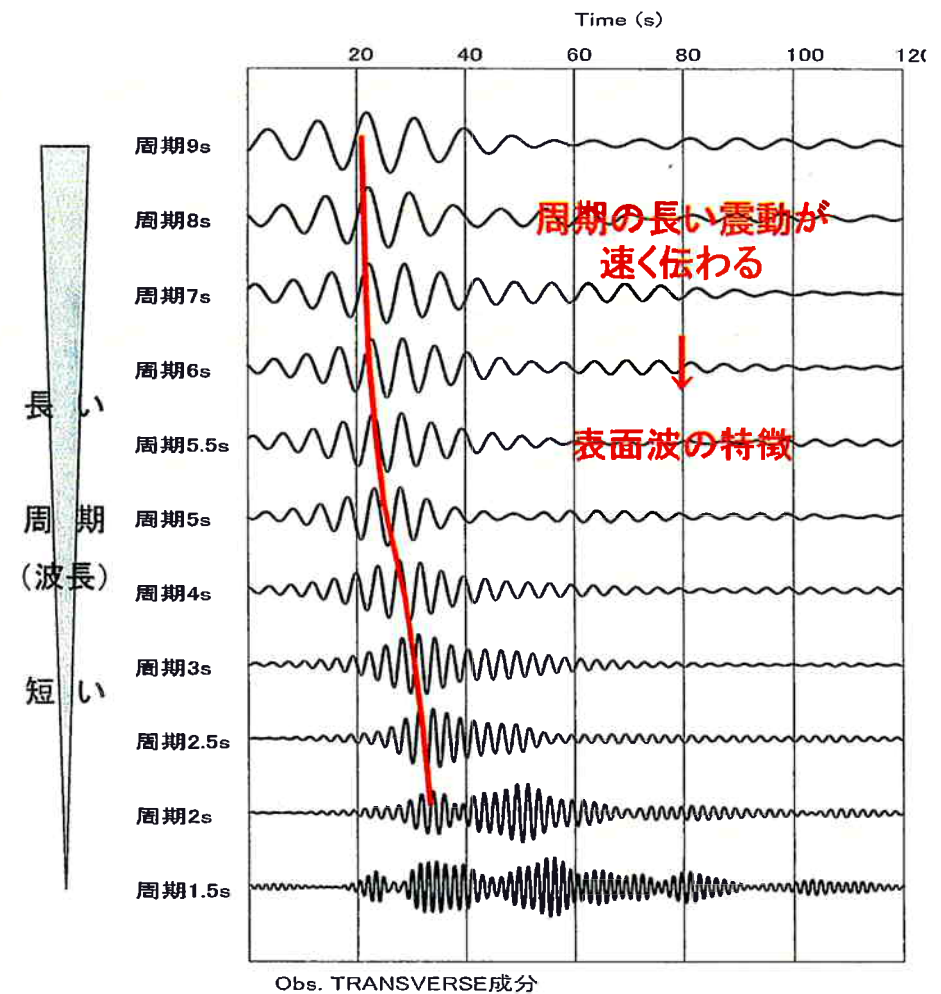
1. 地盤速度構造及び地震発生層の評価

■ 微動アレー探査、地震計水平アレー観測

常時微動や自然地震による表面波を観測、分析することにより、表面波が伝播した地盤の速度構造を同定した。



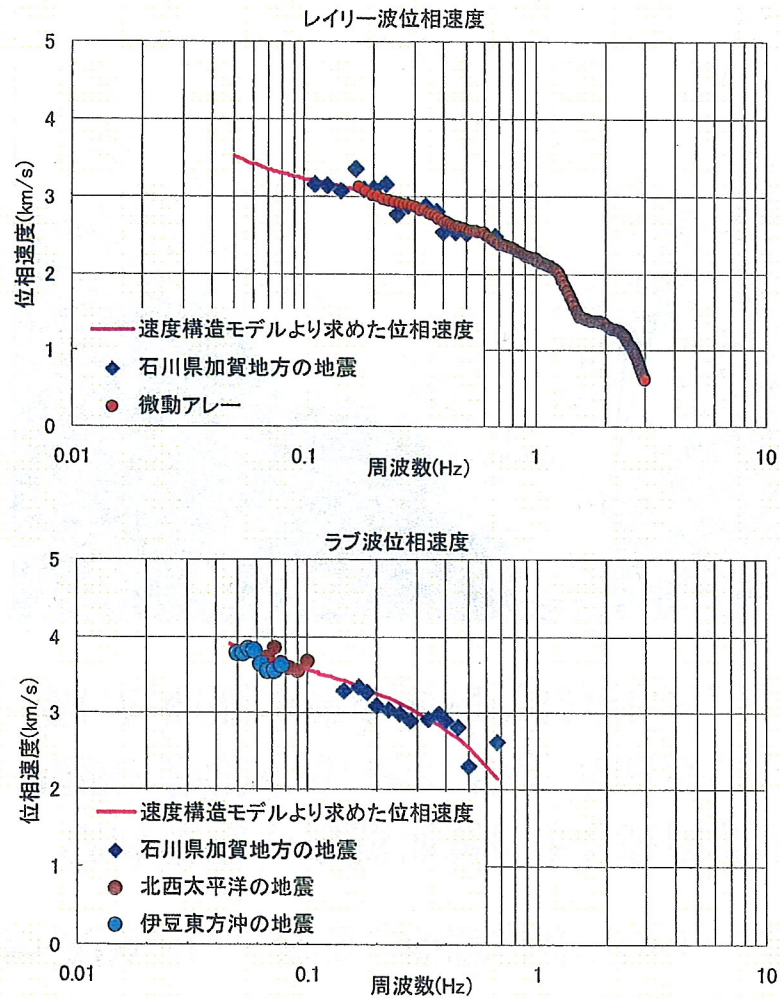
微動アレー及び地震計水平アレーの観測点



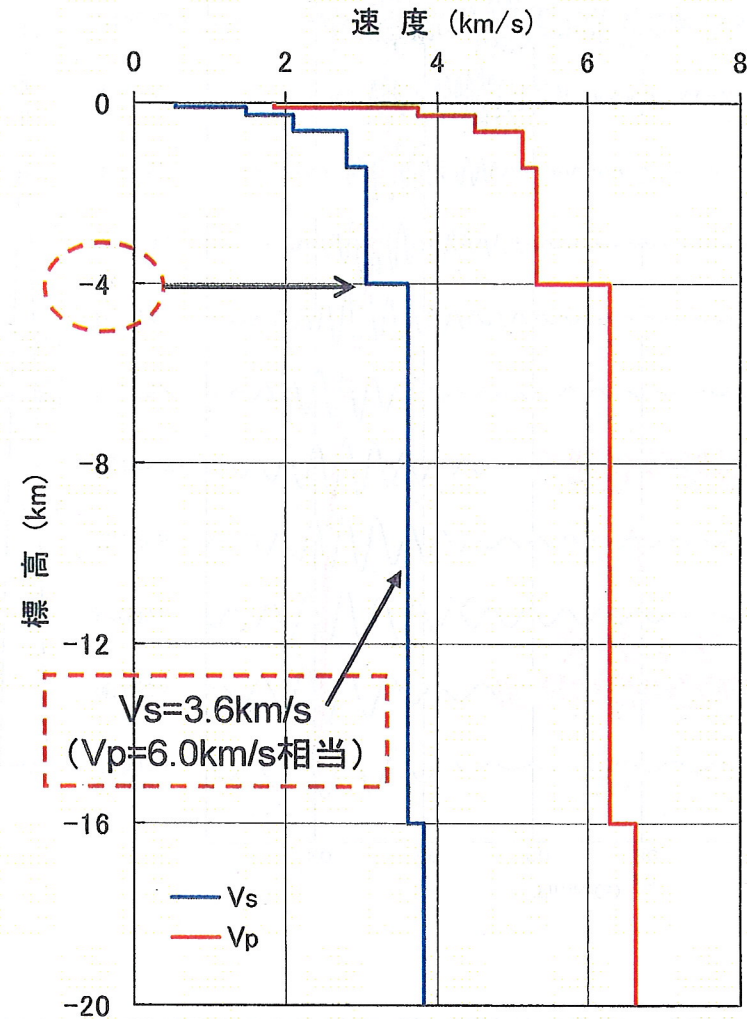
地震観測例 石川県加賀地方の地震

1. 地盤速度構造及び地震発生層の評価

■ 微動アレー探査、地震計水平アレー観測



速度構造モデル及び観測から求めた位相速度

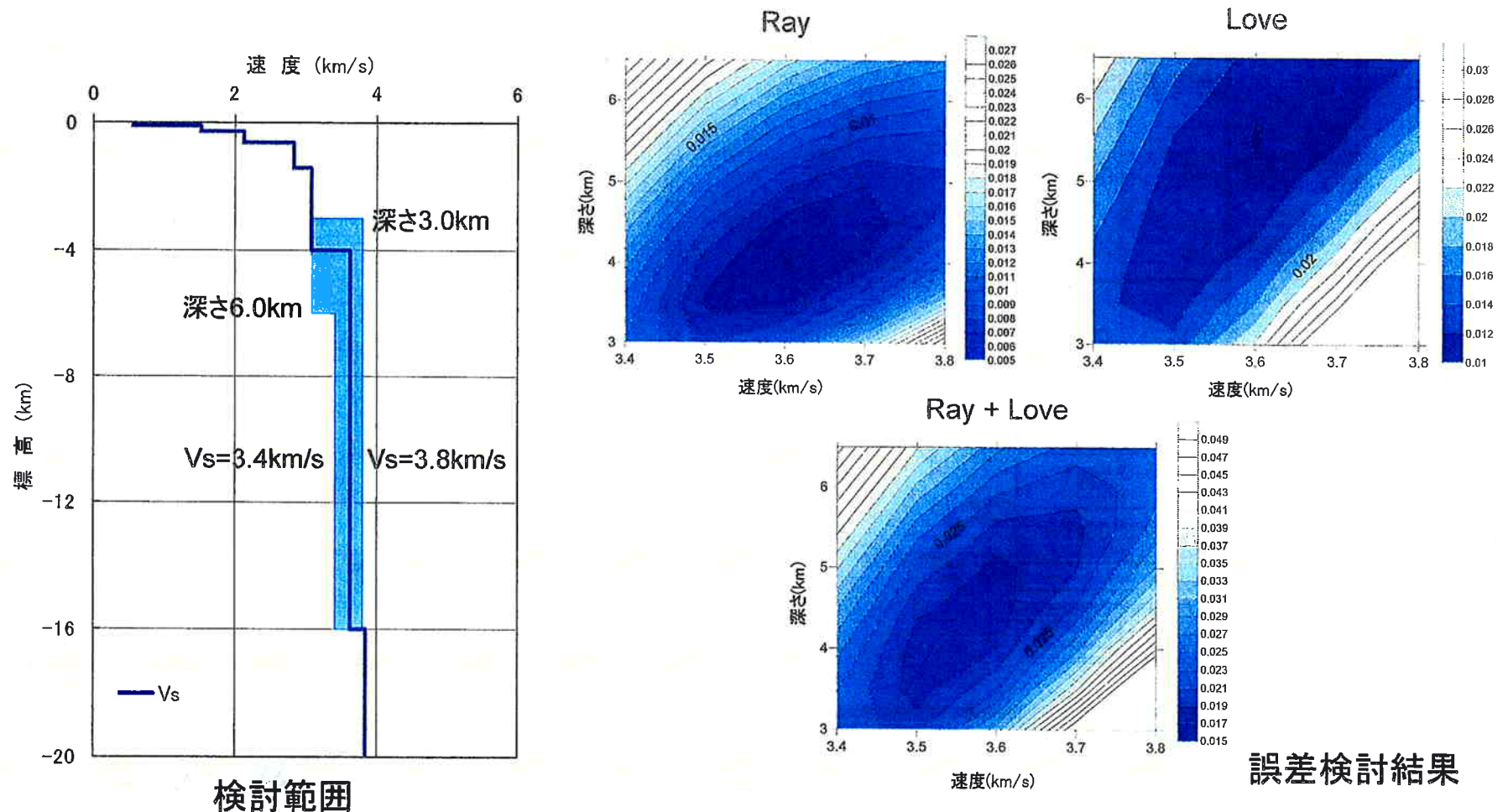


表面波の位相速度で同定したS波速度構造

1. 地盤速度構造及び地震発生層の評価

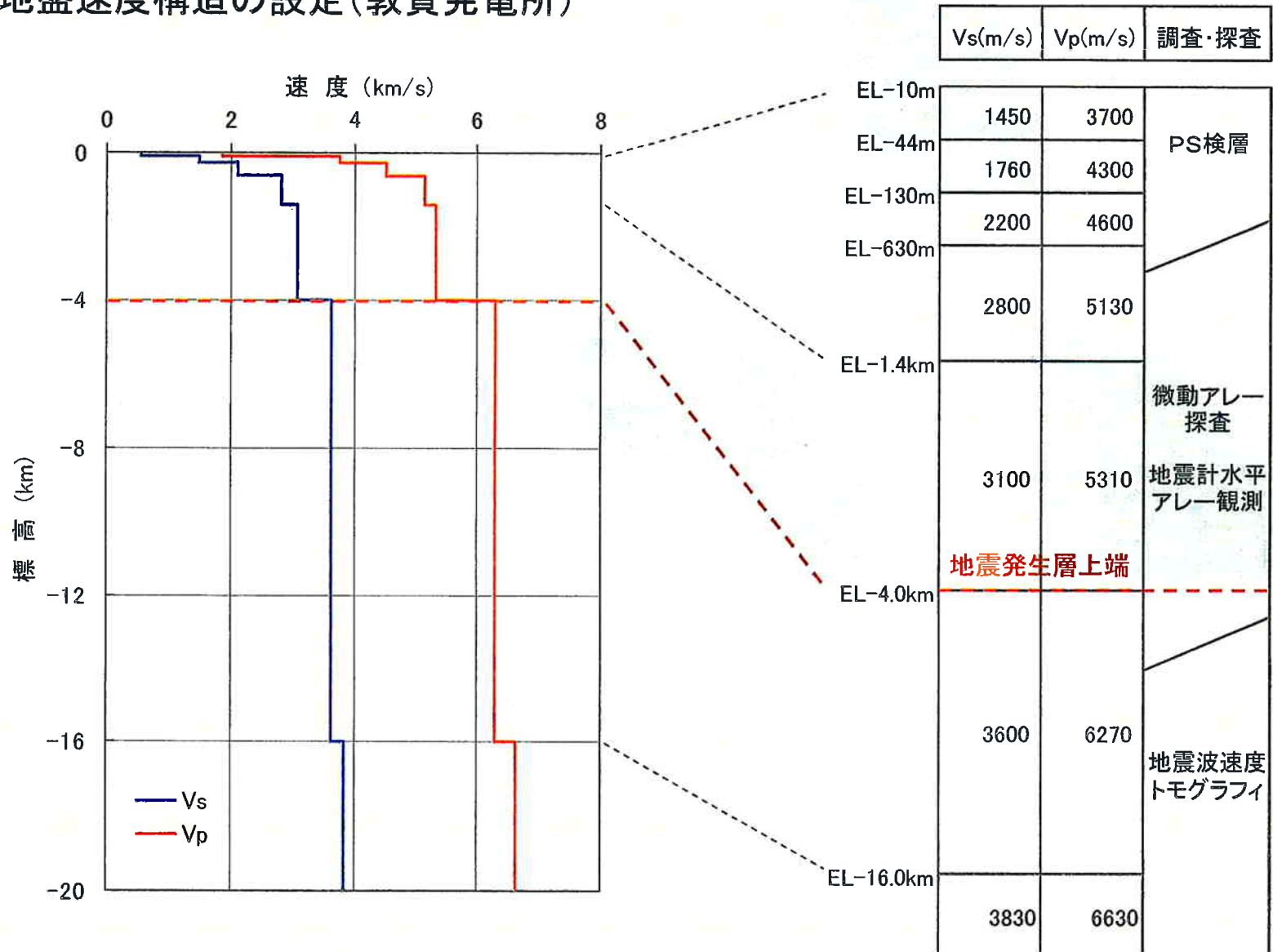
■微動アレー探査、地震計水平アレー観測

$V_s=3.6\text{km/s}$ 、深さ4kmに求まった速度層境界の確からしさについて、 $V_s=3.4\sim 3.8\text{km/s}$ 、深さ3~6kmの範囲で位相速度を算定し、観測記録の位相速度との誤差について検討した。
結果は、 $V_s=3.6\text{km/s}$ 、深さ4kmのケースがよく適合していた。



1. 地盤速度構造及び地震発生層の評価

■地盤速度構造の設定(敦賀発電所)



1. 地盤速度構造及び地震発生層の評価

シナリオ地震の強震動予測

入倉孝次郎・三宅弘恵, 2001, 地学雑誌, 110(6)

微小地震の浅さ限界 H_s はP波速度 $5.8\sim 5.9\text{km/s}$ の層の上限と良い相関がある。

近畿地方北部の地震波速度構造と地震発生層

吉井弘治・伊藤潔, 2001, 地球惑星科学連合学会2001年合同大会

1989年に実施された岐阜県藤橋村から兵庫県上郡町における人工地震探査データをもとに、波線追跡法によって地殻の詳細な速度構造を求め、得られた速度構造モデルと、地震活動の深さ断面とを比較し、地震発生層の上限は速度構造が 6km/s となるところにおおむね一致していることが分かった。

広角反射法および屈折法解析による近畿地方の地殻構造の推定

廣瀬一聖・伊藤潔, 2006, 京都大学防災研究所年報, 第49号B, pp275—288

浅い地殻内で発生する微小地震は、P波速度が $5.8\sim 6.4\text{km/s}$ の層に集中しており、その上下には地震波速度境界が存在する。

1. 地盤速度構造及び地震発生層の評価

■地盤速度構造による地震発生層の検討

若狭周辺地域において、大都市大震災軽減化特別プロジェクト(大大特)による大規模な地下構造探査が実施されており、内陸地殻内地震が発生する上部地殻に相当する $V_p=6.0\sim 6.2\text{ km/s}$ 層は、深さ約6~16kmであった。また、速度構造断面図に気象庁一元化カタログによる測線に沿う幅20kmの範囲内の震源分布は、 $V_p=6.0\sim 6.2\text{ km/s}$ 層に対応している。

○新宮—舞鶴測線(2004)の探査結果

敦賀発電所

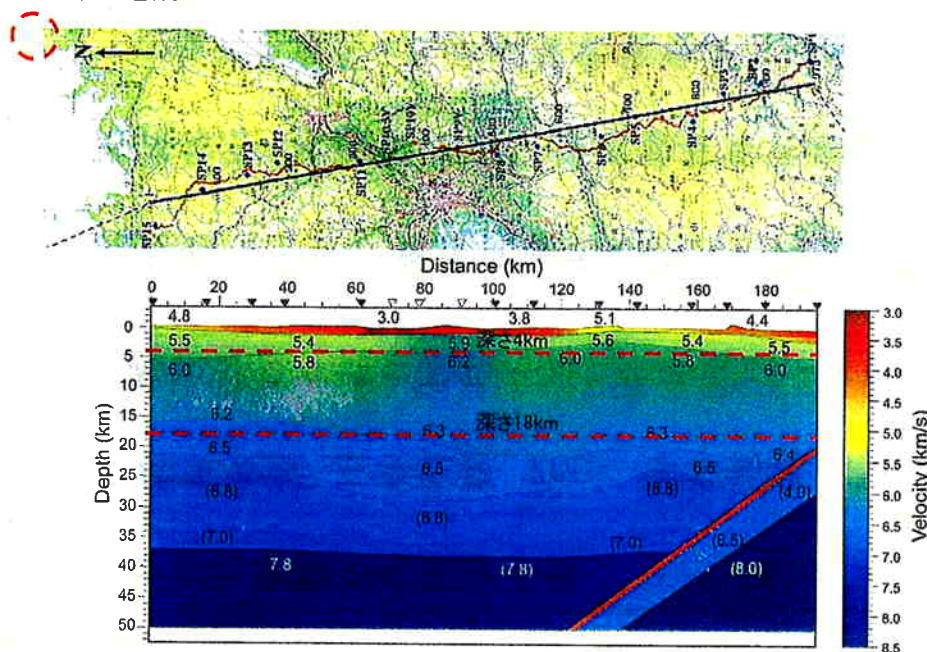


Fig. 9 P-wave velocity structure for the. Numerals show P-wave velocities in km/s. Parentheses show assumed velocity value. Small black and red dots (about 35-40km deep) show earthquakes and low-frequency earthquakes, respectively after Hirose and Ito (2007).

伊藤、他(2007)に一部加筆

○藤橋—上郡測線(1989)の再解析結果

敦賀発電所

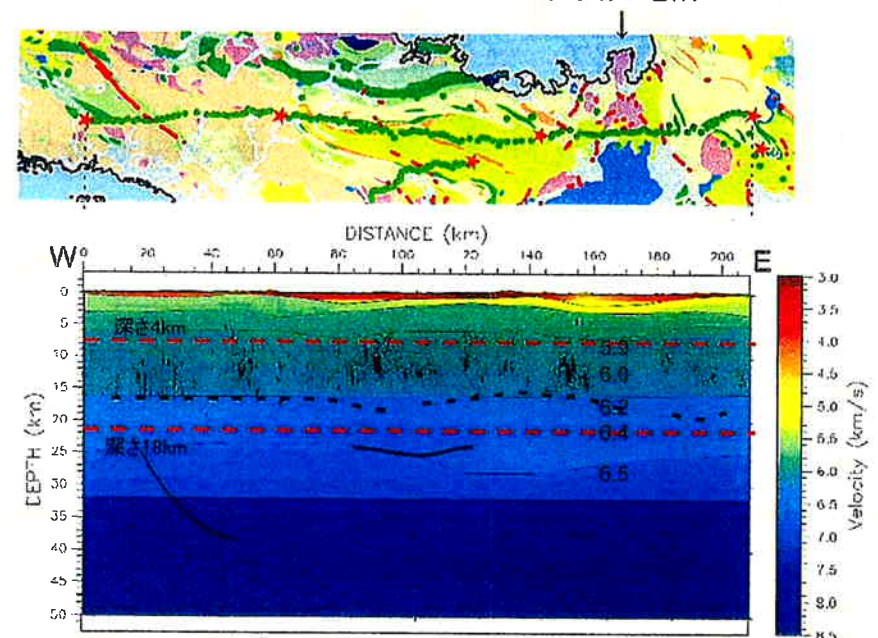
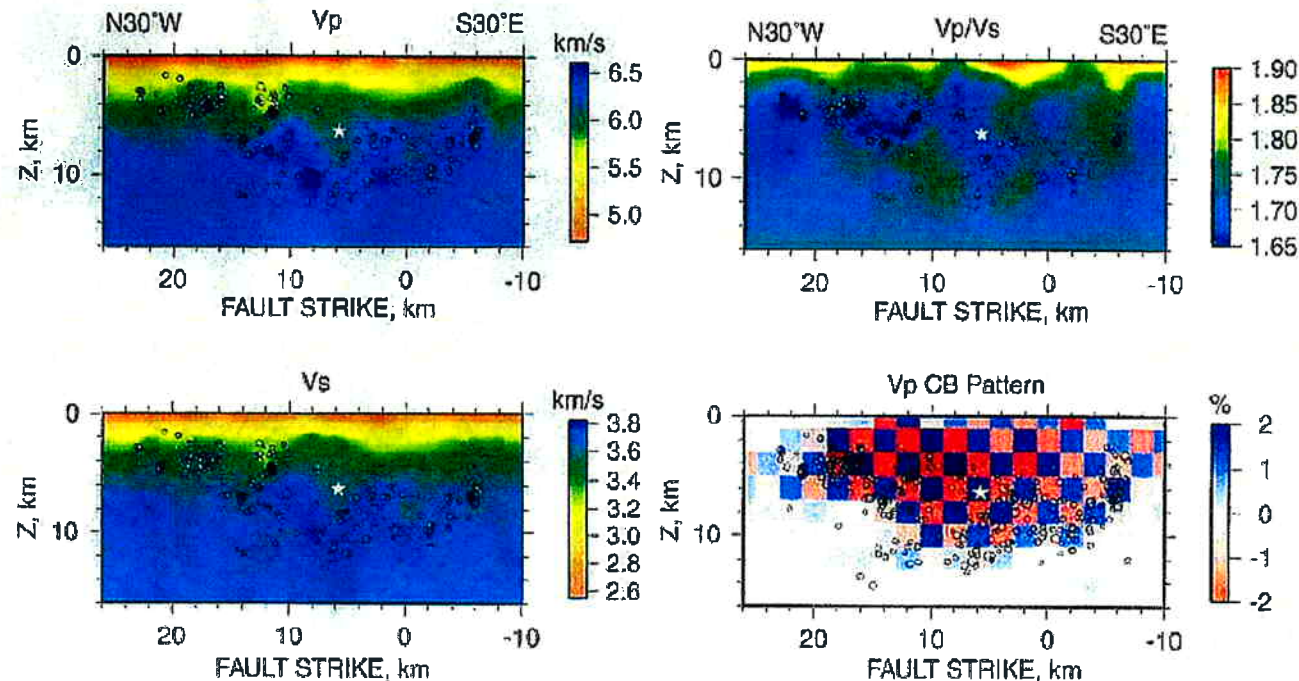


図 16 藤橋—上郡測線の地震波速度構造に、測線周辺の震源分布と反射法解析によって見出された反射面を重ねた。

伊藤、他(2006)に一部加筆

1. 地盤速度構造及び地震発生層の評価

■ 地震波速度トモグラフィによる検討



第3図 断層面に平行な近傍の断面での V_p (左上), V_s (左下), および V_p/V_s (右上)の深さ分布。右下は V_p についてのチェッカーボードテストの結果。余震は、この断面をはさんで ± 1 km 内のものをプロットした。星印は本震の破壊開始点を示す。

Fig.3 Depth distribution of V_p (upper left), V_s (lower left) and V_p/V_s (upper right) on the cross section parallel and the nearest to the fault plane of the mainshock. The lower right figure shows a result of checker board resolution tests on V_p . Aftershocks within the region of ± 1 km from the cross section are plotted. The star indicates the rupture starting point of the mainshock.

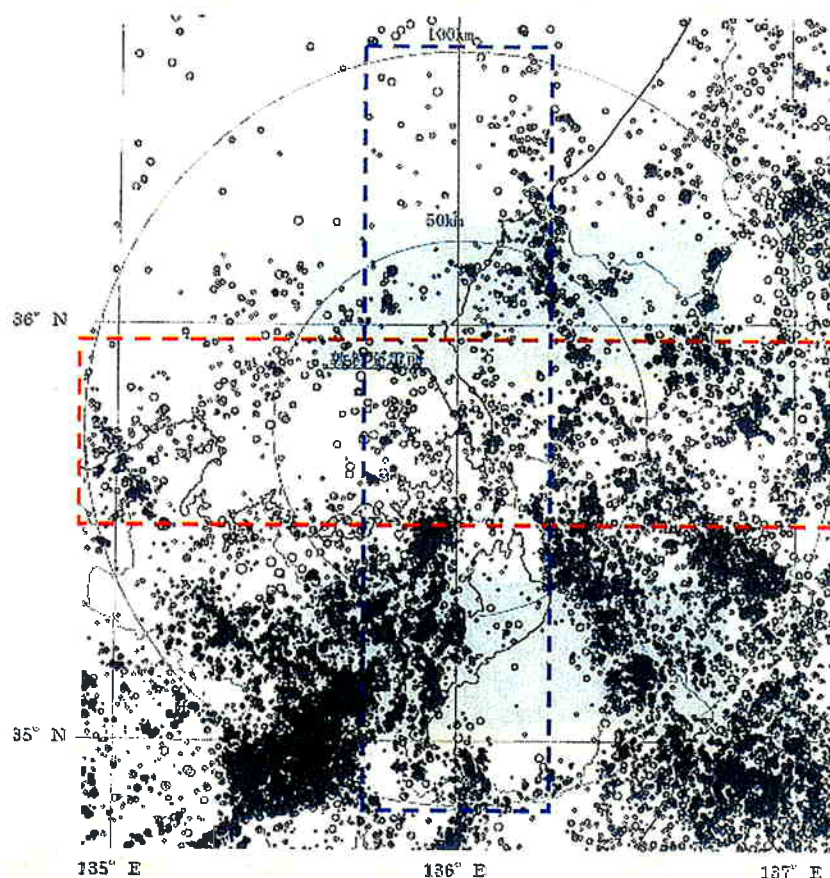
京都大学防災研究所地震予知研究センター, 地震予知連絡会会報, 第69巻, 11-8

地震の発生は、S波速度3.4km/s程度以上、P波速度6km/s程度以上の速度層との対応が見られる。

1. 地盤速度構造及び地震発生層の評価

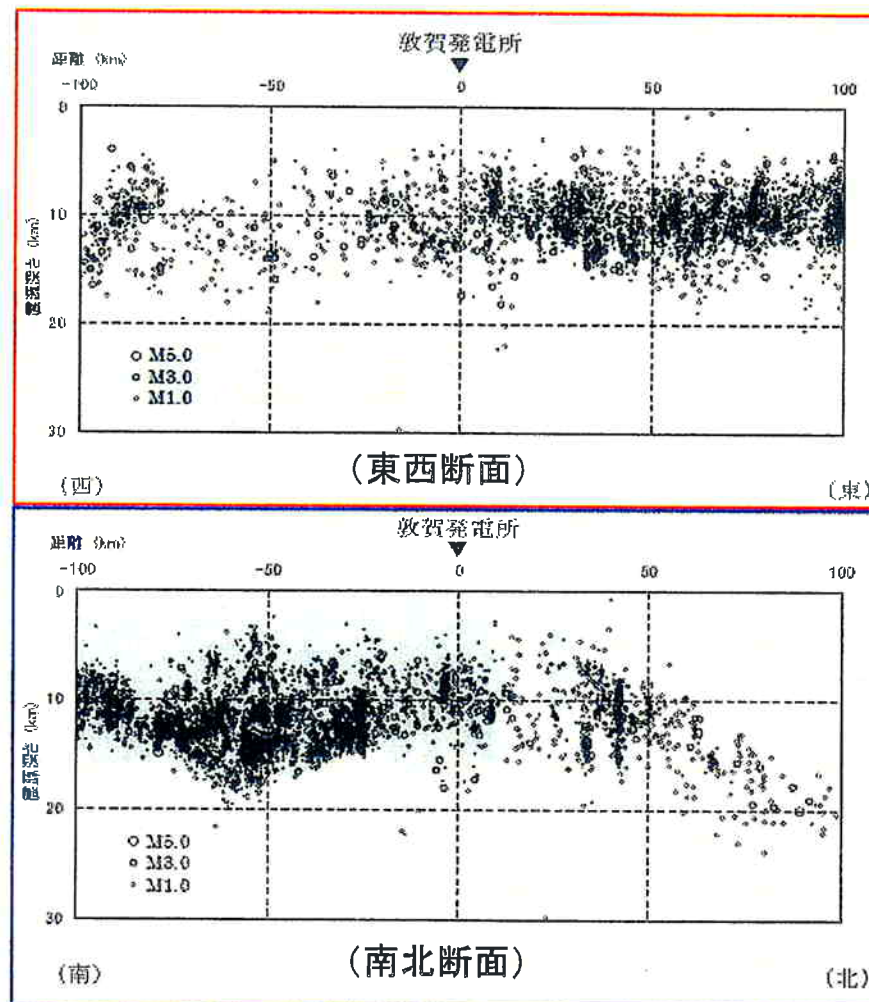
■微小地震に関する検討

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程度の間に見られた。



敷地周辺の微小地震分布図

(気象庁、1997年10月~2005年12月、M>0.0)

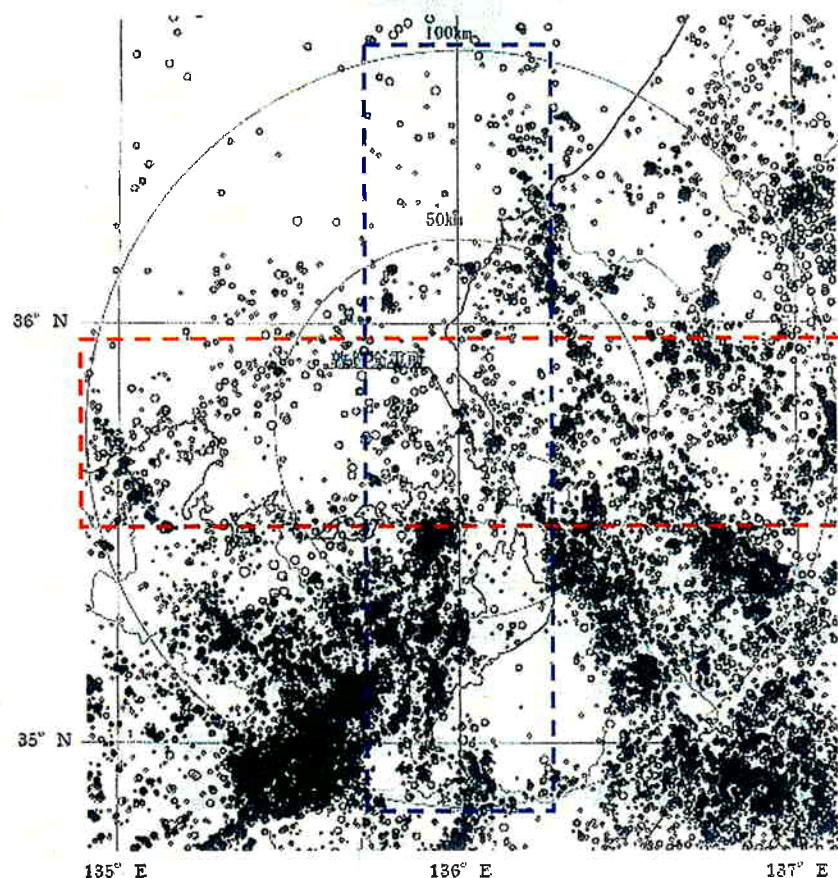


1. 地盤速度構造及び地震発生層の評価

■微小地震に関する検討

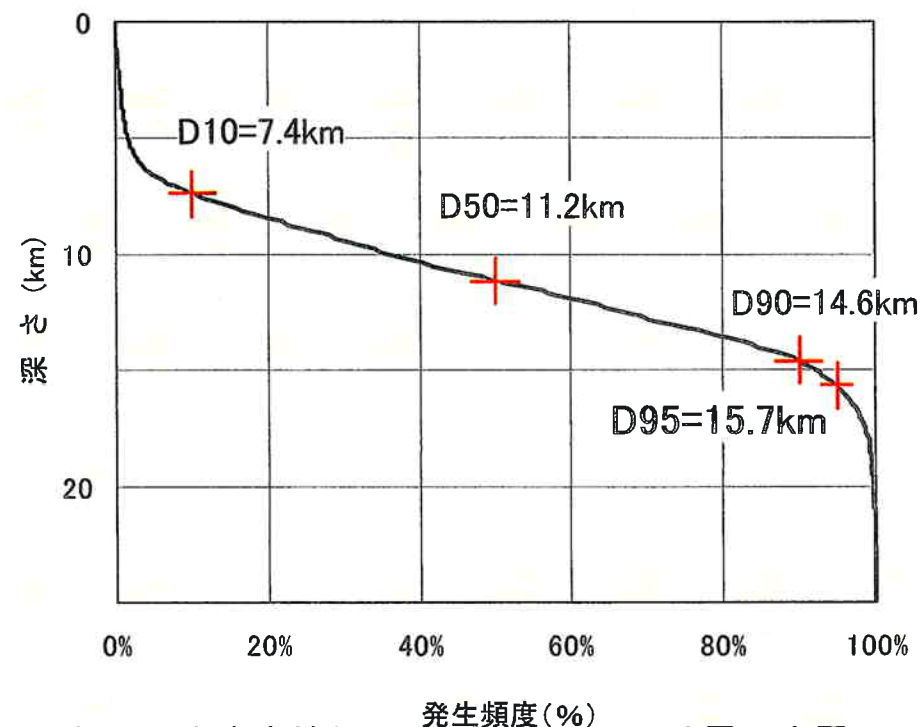
伊藤・中村(1998)を参考に、敦賀半島を中心とする半径100km以内の地震発生状況を統計的に評価すると、地震の10%発生頻度深さ(D10%)は約7km、地震の90%発生頻度深さ(D90%)は約15kmであった。

伊藤・中村(1998)によれば、D90は地震発生層の下限より2～3km浅いとされている。



敦地周辺の微小地震分布図

(気象庁、1997年10月～2005年12月、M>0.0)



(財)原子力安全技術センター(2009)は、地震発生層の下限をD95とすることを妥当とし、若狭地域のD95を14.79～16.66kmとしている。

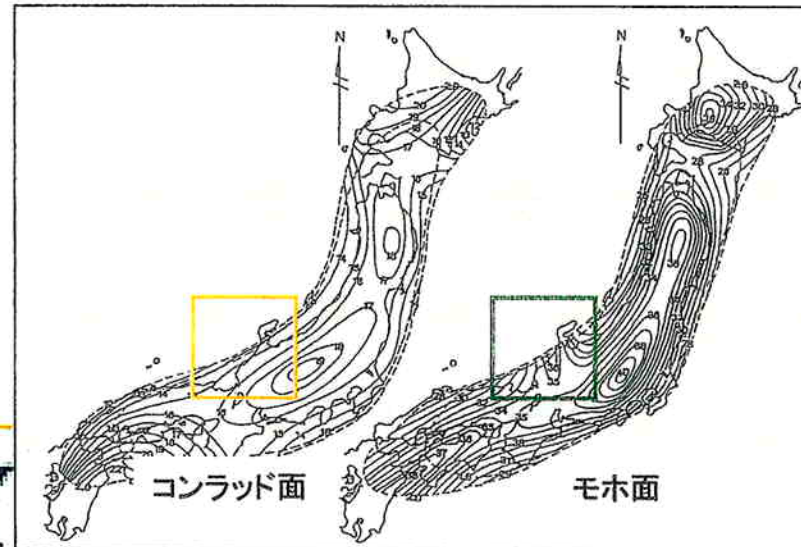
一方、気象庁一元化カタログを用いて若狭周辺地域の微小地震の発生状況を検討すると、D95は15.7kmであり、(財)原子力安全技術センター(2009)による検討結果と比較しても同等であった。

1. 地盤速度構造及び地震発生層の評価

■ 既往文献による検討

モホ面、コンラッド面の等深線図 [Zhao, et al.(1992)]

Zhao, D., S. Horiuchi, and
A. Hasegawa (1992): Seismic velocity
structure of the crust beneath the Japan
Islands, Tectonophysics, 212, 289-301



コンラッド面

【若狭地域は深さ約16km】



【若狭地域は深さ約34km】

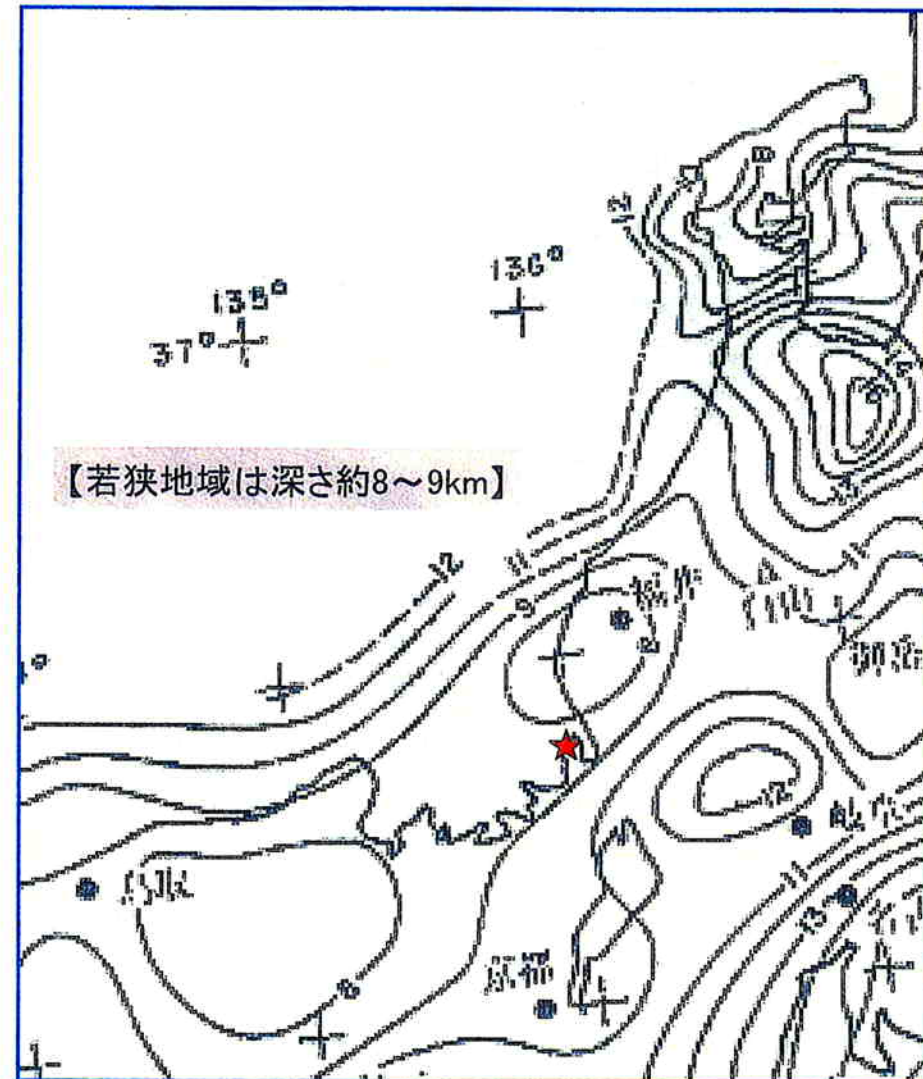
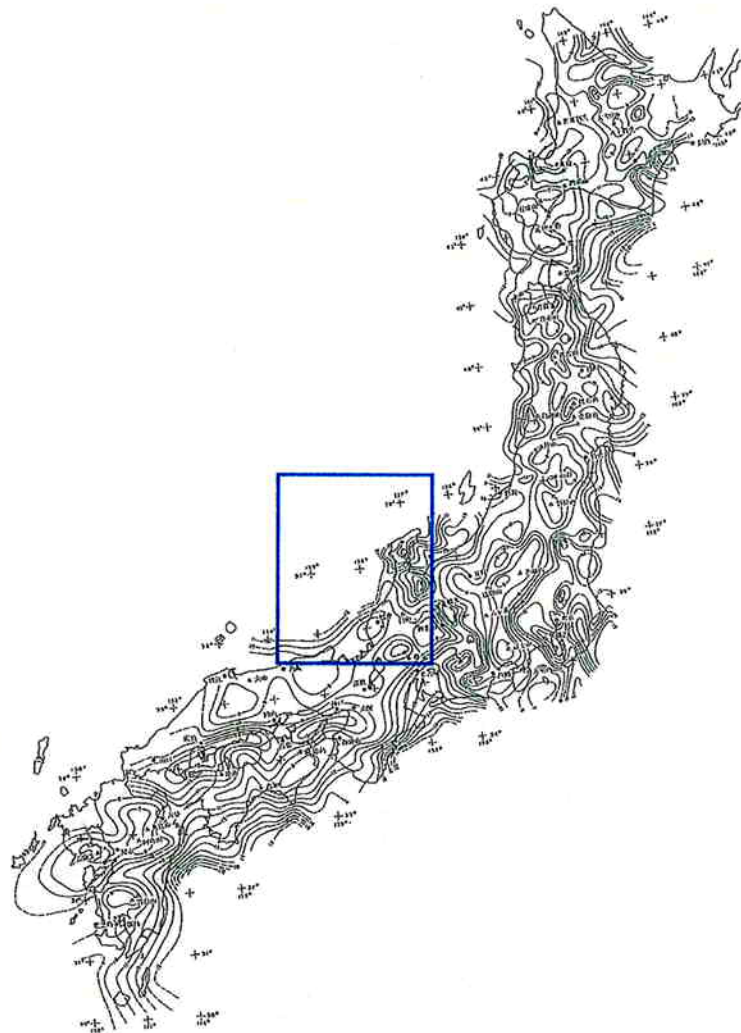


1. 地盤速度構造及び地震発生層の評価

■ 既往文献による検討

キュリー一点深度分布 [大久保(1984)]

大久保泰邦(1984): 全国のキュリー一点解析結果, 地質ニュース 362号



1. 地盤速度構造及び地震発生層の評価

■ 既往文献による検討

地殻熱構造による地震発生層の検討

Tanaka and Ishikawa(2005)⁽¹⁰⁾によると、D90深度とキュリー一点深度(Z_b)の間には相関があるとしている。(Fig.8)

同資料によると、若狭地域のキュリー一点深度は14~16km程度であり、D90深度とキュリー一点深度の関係からすると、D90深度は概ね18km以浅であると考えられる。

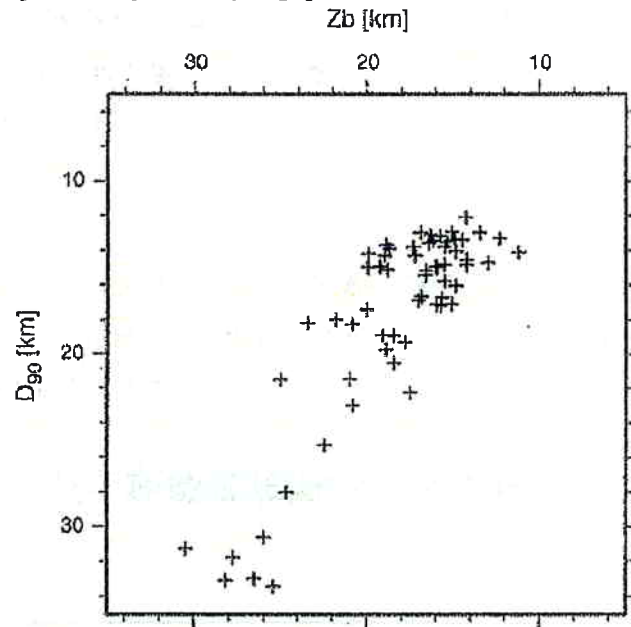


Fig. 8. Plot of the depth to the basal depth of magnetic sources (Z_b) against the seismogenic layer thickness (D_{90}) beneath the Japanese islands.

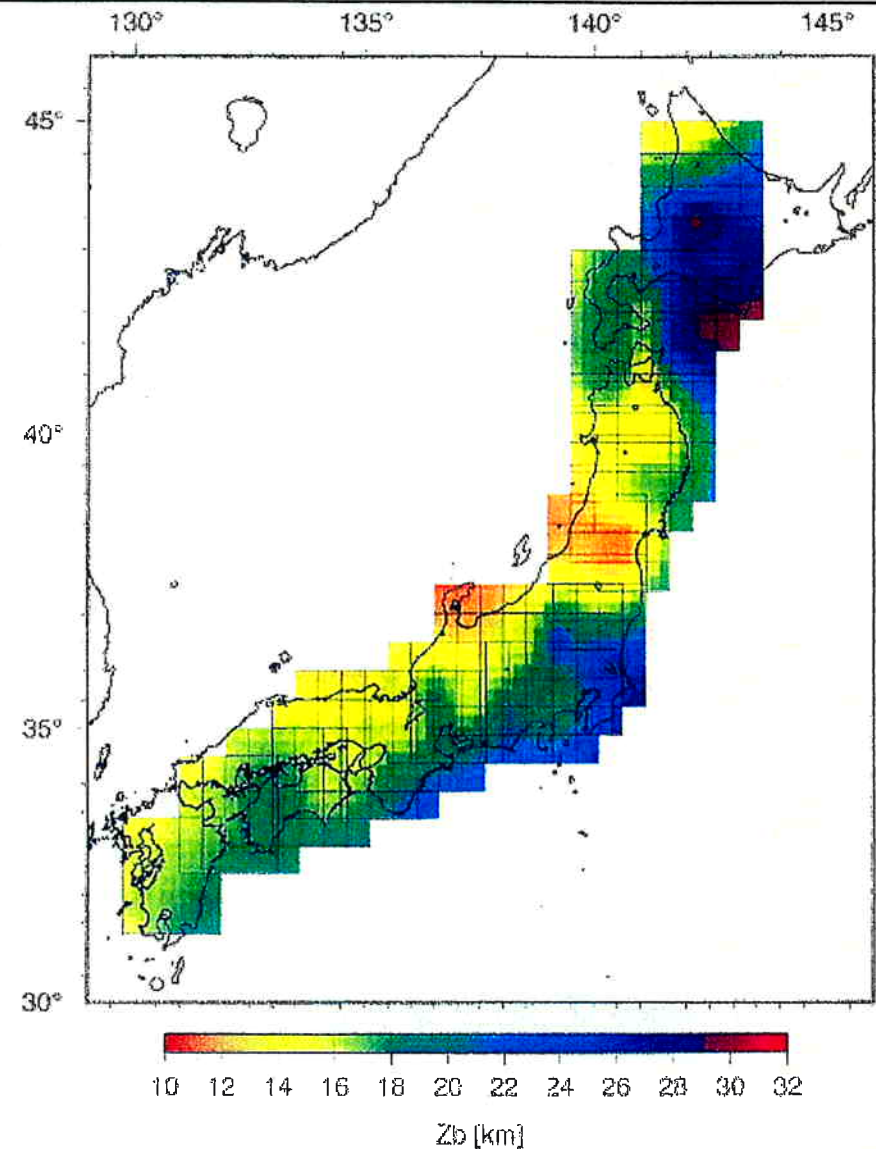


Fig. 6. Map of the basal depth of magnetic sources, Z_b . Each square represents the area used to calculate Z_b .

1. 地盤速度構造及び地震発生層の評価

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、 $V_p \geq 6\text{km/s}$ ($V_s \geq 3.6\text{km/s}$) 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 $V_p=6\text{km/s}$ 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、 $V_p=6\text{km/s}$ 層と地震発生の上限深さが概ね対応して見られる。

③ 他機関・既往文献による検討

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。

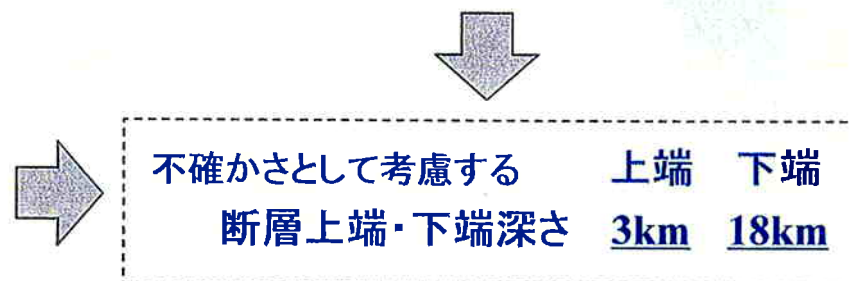
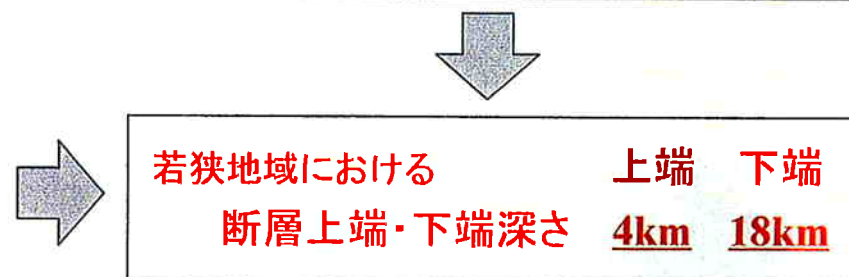
② 地震発生深さによる検討

(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。



2. 地盤減衰構造の評価

■ 当初の地盤モデル設定(平成20年3月報告時)

モデル化の考え方

○ 浅部地盤構造

速度構造:

地震計設置位置のPS検層結果及び基礎岩盤の試掘坑内弾性波試験結果に基づき設定。

減衰定数:

若狭湾周辺の硬質岩盤観測点で同定された $V_s 2500 \text{ m/s}$ 層での減衰定数を参照。

○ 深部地盤構造

速度構造:

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く。

減衰定数:

若狭湾周辺の地震観測記録を用いて地域的に推定されたQ値(佐藤・他,2007)を参照。

設定した地盤モデル

深さ (m)	EL (m)	層	層厚 (m)	密度 ρ (t/m^3)	S波速度 V_s (m/s)	P波速度 V_p (m/s)	Q_s	減衰定数 (%)
0	5							
33	-28	1	33	2.5	1900	4300	16.7	3.0
630	-625	2	597	2.6	2200	4600	16.7	3.0
1400	-1395	3	770	2.6	2800	5130	50.0	1.0
4000	-3995	4	2600	2.6	3100	5310	50.0	1.0
		5	-	2.7	3600	6270	50.0	1.0

※もんじゅサイトにおける地盤モデルを示す

2. 地盤減衰構造の評価

これまでの合同Cサブ会合における説明と頂いたコメント(1)

■浅部($V_s \leq 2500 \text{ m/s}$)

①浅部($V_s \leq 2500 \text{ m/s}$)の減衰定数は3%とする。

佐藤他(2007)より、若狭湾付近のK-NET、KiK-net観測点[図1]の中で、地中に $V_s=2500 \text{ m/s}$ の岩盤が存在するFKIH01(永平寺)観測点での地盤同定結果[表1]から、若狭湾周辺の $V_s=2500 \text{ m/s}$ 層での減衰定数は3%(Q値では16.7)と考えられる。

表1 FKIH01 において同定された地盤構造

層番号	層厚* (m)	密度** (g/cm^3)	S波速度 (m/s)	減衰定数	P波速度* (m/s)
1	4.0	1.47	68.3	0.0067	500.0
2	2.0	2.19	600.1	0.1522	2500.0
3	14.0	2.61	990.0	0.0920	5000.0
4	44.0	2.61	1864.0	0.0490	5000.0
5	36.0	2.61	2500.0	0.0365	5000.0
6	—	2.61	2500.0	0.0365	5000.0

* 防災科学技術研究所

** P波速度からGardner et al. (1974)に基づき換算

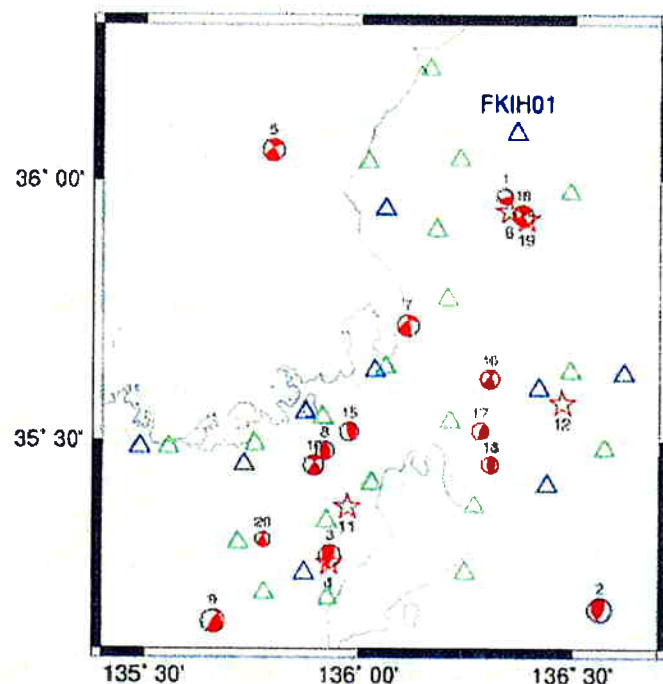


図1 解析に用いた地震の震央位置(気象庁)と強震観測点位置(Δ)。震央位置には、F-netのメカニズム解がある地震はそれを、ない地震は☆で表示した。

委員コメント(1)

Q値が小さく設定される一番の根拠は永平寺の地盤モデルであるが、これをそのまま採用することは問題である。(4/9 第14回合同Cサブ会合)

2. 地盤減衰構造の評価

これまでの合同Cサブ会合における説明と頂いたコメント(2)

■設定した地盤モデルと、経験的サイト増幅特性との比較

○鶴来・他(1997)に基づく評価手順

【手順①】もんじゅサイトで観測された地震について、観測記録からフーリエスペクトルを求める(これを「観測スペクトル」という)。

【手順②】対象とする地震の ω^{-2} 則に基づくスペクトル特性に距離減衰とQ値による減衰及び自由地表面の影響による増幅を考慮した地震基盤におけるスペクトルを算出する(これを「基盤スペクトル」という)。ここで、基盤スペクトルのパラメータは下記により

M_0	F-net(防災科学技術研究所)による
$\Delta \sigma$	既往検討において経験的グリーン関数法に用いられた要素地震の応力降下量を調査した上で平均応力降下量5MPaと設定
f_c	$f_c = 4.9e6 \times \beta \times (\Delta \sigma / M_0)^{1/3}$ により算定
Q値	$Q = 50f^{1.1}$ (佐藤・他(2007)による)
地震基盤の物性値	$\beta = 3.6 \text{ km/s}$

委員コメント(2)

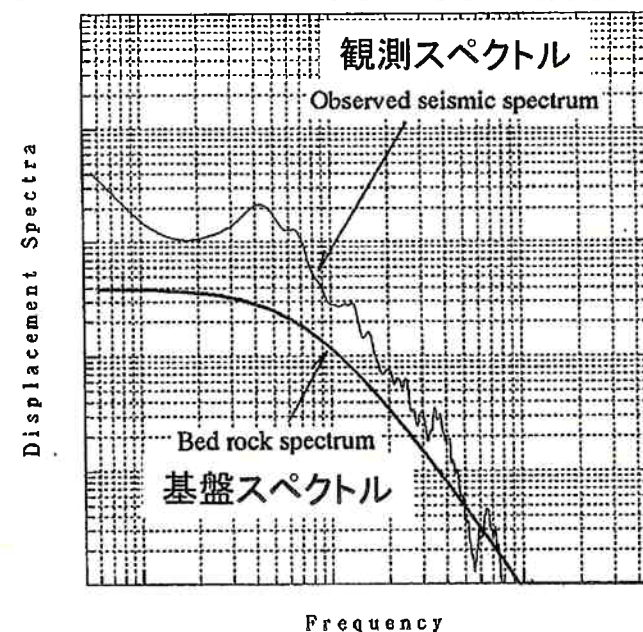
(基盤スペクトルを決めるコーナー周波数 f_c を経験式から応力降下量により定めたとの説明で)応力降下量の5MPaが非常に大きすぎる。(4/9第14回合同Cサブ会合)

【手順③】観測スペクトルと基盤スペクトルの比を求める。

これが対象とした地震での地盤増幅特性である。

【手順④】別の観測地震について手順①～③を実施。各地震での地盤増幅特性を求める。

【手順⑤】手順④で算出した各地震での地盤増幅特性の平均をとり、もんじゅサイトにおける平均的な地盤増幅特性を算出する。



鶴来・他(1997)の手法の概念図に加筆

2. 地盤減衰構造の評価

これまでの合同Cサブ会合における説明と頂いたコメント(3)

■ 検討の結果

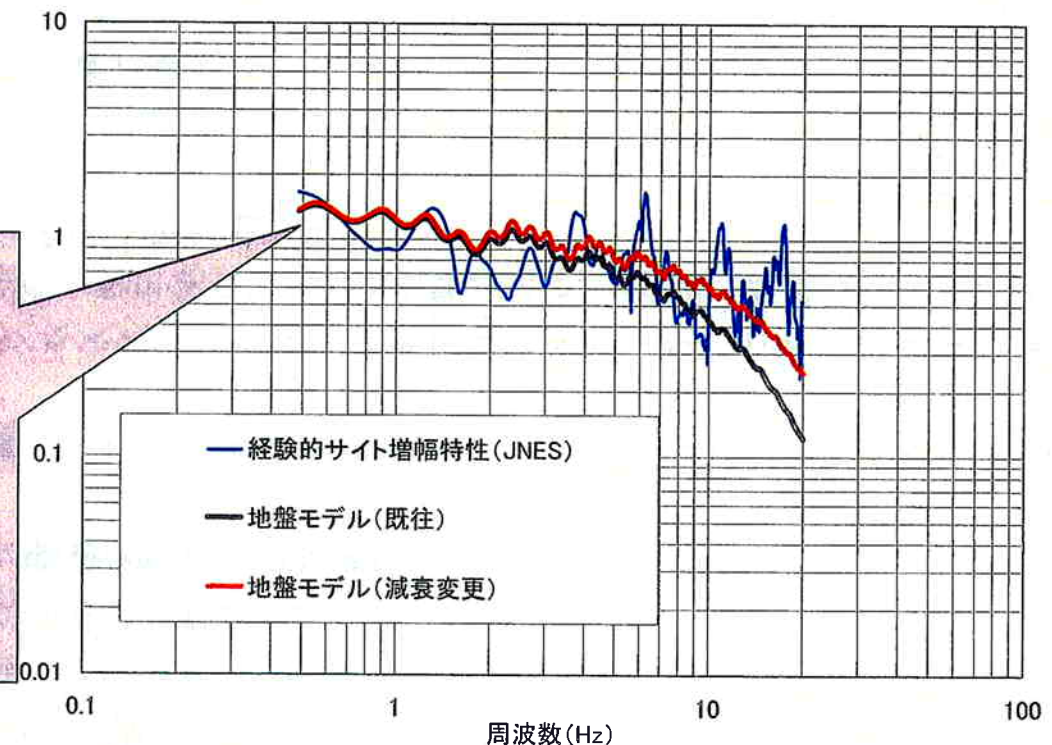
深さ630m以深の Q_s 値を100
(0.5%)とすることにより、JNES
によるもんじゅサイトの経験的
サイト増幅特性と、特に1～
10Hzの周波数領域において地
盤増幅率の傾向が整合するこ
とを確認した。

浅部は3%で変更せず、深さ630m以深の Q 値を
50→100にすることで、JNESの求めたもんじゅ
の経験的サイト増幅特性と概ね整合することを
説明(4/28)。

委員コメント(3)

JNESの求めた経験的サイト増幅特性と適合さ
せたというが、10Hz以上が合っているとは言え
ない。(4/28第15回合同Cサブ会合)

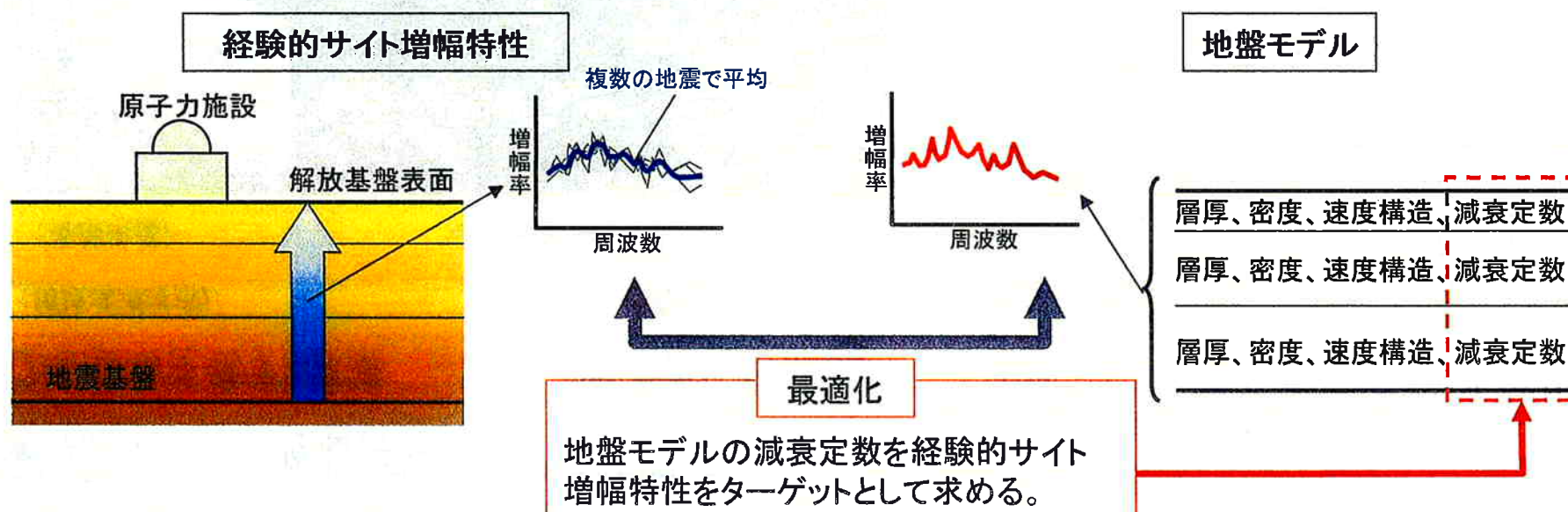
深さ (m)	EL (m)	層	層厚 (m)	密度 ρ (t/m^3)	S波速度 V_s (m/s)	P波速度 V_p (m/s)	Q_s	減衰定数 (%)
0	5							
33	-28	1	33	2.5	1900	4300	16.7	3.0
630	-625	2	597	2.6	2200	4600	16.7	3.0
1400	-1395	3	770	2.6	2800	5130	100.0	0.5
4000	-3995	4	2600	2.6	3100	5310	100.0	0.5
		5	-	2.7	3600	6270	100.0	0.5



2. 地盤減衰構造の評価

■ 地盤モデルの設定方法について

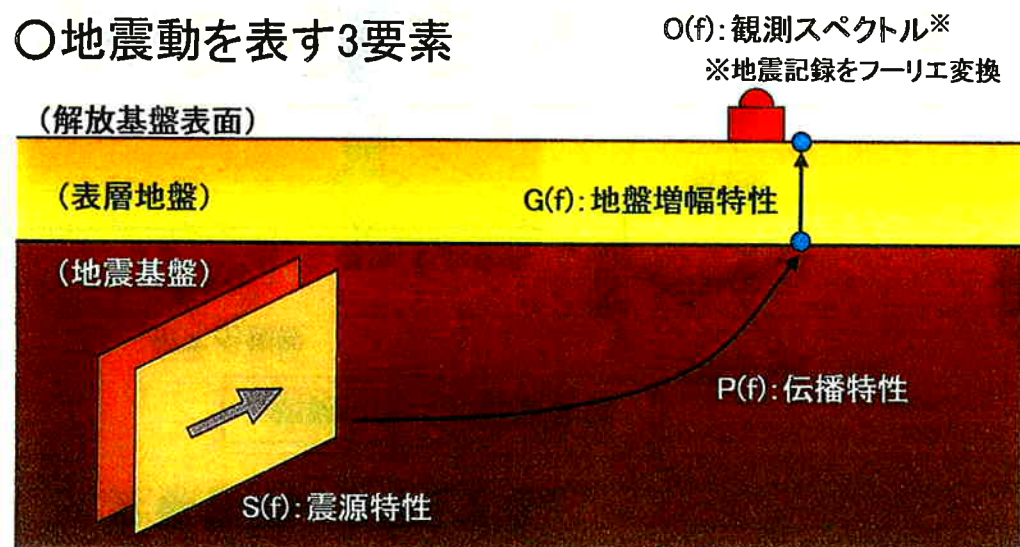
- 地盤モデル再設定のために、目標とする経験的サイト増幅特性を、もんじゅサイトの観測記録及び防災科学技術研究所KiK-netの地中観測記録を用いて再評価する。
- 速度構造は、敷地内外で実施された調査結果により得られたものを基本として、減衰定数を再評価した経験的サイト増幅特性に対して幅広い周波数帯域において適合するように設定する。
- 浅部地盤の減衰定数については、これまでの佐藤・他(2007)によるFKIH01(永平寺)の最適地盤解析結果によるのではなく、経験的サイト増幅特性に適合する減衰定数を用いる事とする。



2. 地盤減衰構造の評価

■ 経験的サイト増幅特性

○ 地震動を表す3要素



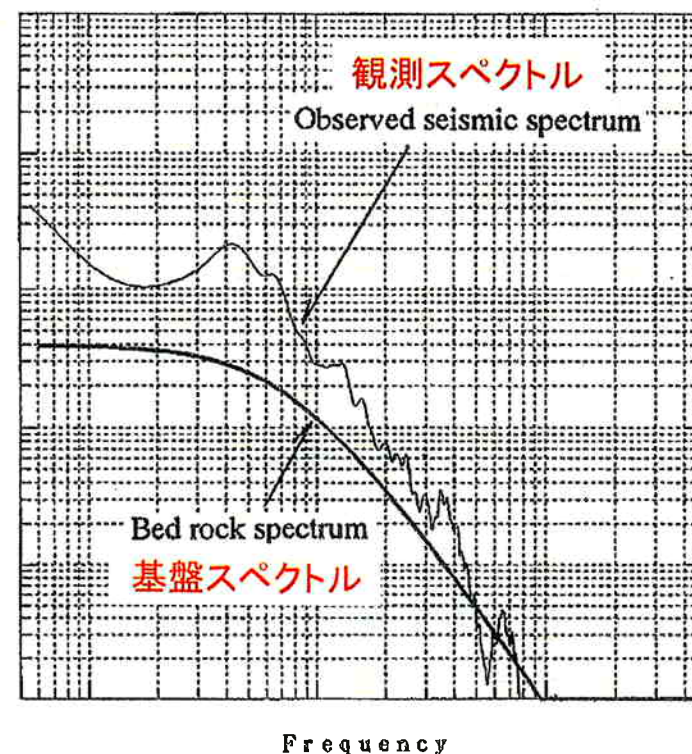
$$\text{観測スペクトル } O(f) = \text{震源特性 } S(f) \times \text{伝播特性 } P(f) \times \text{地盤増幅特性 } G(f)$$

○ 経験的サイト増幅特性の評価手法

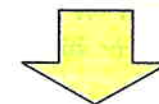
鶴来・他(1997)に基づき地盤増幅特性を、地震観測記録から震源特性及び伝播特性を取り除くことによって評価。

$$\frac{\text{観測スペクトル } O(f)}{\text{基盤スペクトル } B(f)} = \frac{\text{震源特性 } S(f) \times \text{伝播特性 } P(f) \times \text{地盤増幅特性 } G(f)}{\text{震源特性 } S(f) \times \text{伝播特性 } P(f)}$$

$$= \text{地盤増幅特性 } G(f)$$



鶴来・他(1997)の手法の概念図に加筆



対象地震毎に地盤増幅特性 $G(f)$ (観測スペクトル $O(f)$ と基盤スペクトル $B(f)$ の比) の平均を、求める経験的サイト増幅特性とする。

2. 地盤減衰構造の評価

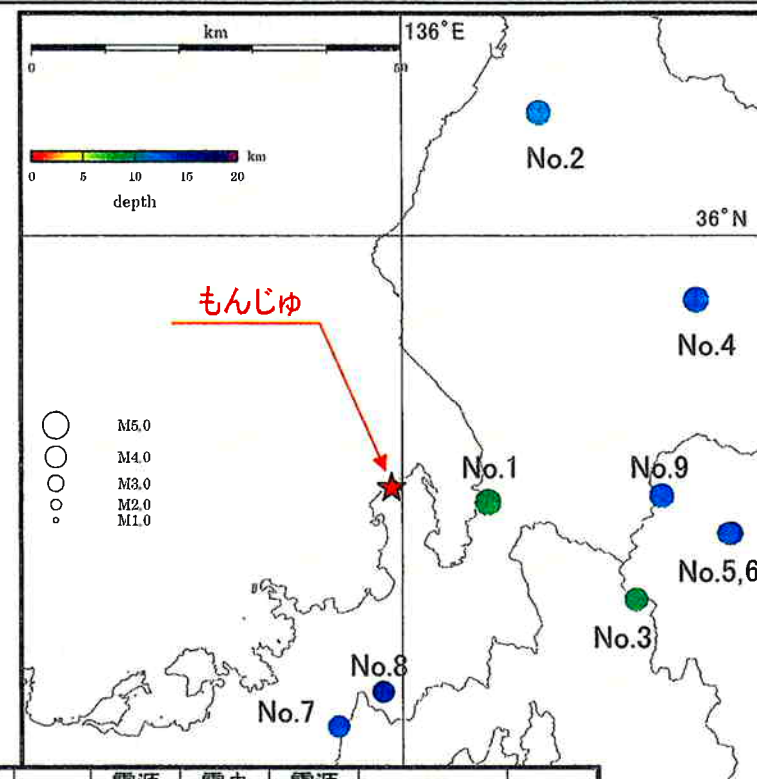
■ 検討対象とする地震観測記録

敷地近傍の内陸地殻内地震の中小地震とする。
検討対象とする地震観測記録の選定条件は以下の通り。

- ① M_J 4以上5以下
- ② 震源深さ30km以浅
- ③ 震央距離50km以内
- ④ F-netメカニズム解及びKiK-net観測記録が得られていること

選定した地震観測記録の諸元と震央位置

No.	発生年月日	発生時刻	震央地名	緯度	経度	M_J	震源深さ(km)	震央距離(km)	震源距離(km)	M_0 (Nm)	F-net品質
1	2000年06月05日	09時54分	福井県嶺南地方	35° 43.23'	136° 06.62'	4.9	8.9	11.3	14.4	7.99E+15	95.53
2	2002年08月18日	09時01分	福井県嶺北地方	36° 07.73'	136° 10.63'	4.7	11.5	46.4	47.8	2.35E+15	97.13
3	2003年12月23日	14時34分	滋賀県北部	35° 37.11'	136° 18.08'	4.4	9.3	31.4	32.8	1.44E+15	95.80
4	2004年10月05日	08時33分	福井県嶺北地方	35° 56.00'	136° 22.69'	4.8	12.4	41.3	43.1	4.86E+15	96.68
5	2006年02月16日	23時10分	岐阜県美濃中西部	35° 41.31'	136° 25.36'	4.4	13.7	39.8	42.0	2.39E+15	96.04
6	2006年02月18日	16時21分	岐阜県美濃中西部	35° 41.30'	136° 25.12'	4.1	13.1	39.4	41.5	7.60E+14	95.88
7	2001年04月16日	19時05分	福井県嶺南地方	35° 28.87'	135° 55.04'	4.2	13.6	29.4	32.4	1.06E+15	88.59
8	2003年03月13日	21時04分	福井県嶺南地方	35° 31.10'	135° 58.47'	4.2	14.2	24.6	28.5	9.16E+14	89.30
9	2007年01月22日	02時16分	福井県嶺北地方	35° 44.02'	136° 20.23'	4.5	12.6	31.6	34.0	2.82E+15	83.26



2. 地盤減衰構造の評価

■震源スペクトルのパラメータ推定

検討対象の9地震に対し、若狭湾周辺の複数のKiK-net観測点の地中記録を用いて ω^{-2} 則に基づく震源特性 $S_i(f)$ のパラメータ(コーナー周波数 f_c 、高周波遮断周波数 f_{max} 、べき乗数 s)を推定する。

$$S_i(f) = \frac{R_{\theta\phi} \cdot F_s \cdot PRTITN}{4\pi\rho\beta^3} \cdot M_{0i} \cdot \frac{(2\pi f)^2}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{max}}\right)^{2s}}} \quad i: \text{地震番号 (No.1} \sim 9)$$

震源スペクトルを求める際に与えるパラメータ

地震モーメント	M_{0i}	F-net(防災科学技術研究所)による
ラディエーションパターン係数	$R_{\theta\phi}$	0.63
自由地表面の影響による増幅	F_s	2
エネルギー分配の係数	PRTITN	1
地震基盤の密度	ρ	2.7t/m ³
地震基盤のせん断波速度	β	3.6km/s

伝播特性 $P_i(f)$ は以下により求める。

$$P_i(f) = \frac{1}{R_i} \cdot \exp\left(\frac{-\pi f R_i}{Q\beta}\right) \quad i: \text{地震番号 (No.1} \sim 9)$$

震源距離	R_i	震源から各KiK-net観測点までの距離
地震基盤における減衰特性	Q	$Q=50f^{1.1}$ (佐藤・他(2007)による)
地震基盤のせん断波速度	β	3.6km/s

2. 地盤減衰構造の評価

■ 波形処理の方法と推定方法

1. 対象とする観測点と地震観測記録

- 対象とする観測点は、より硬質の岩盤であるS波速度が2,000m/s以上の観測点とする。
- 震源距離は80km以下の観測点とする。

2. 波形の抽出方法

- 地震観測記録のS波到達時刻を読み取り、波形を切り出す。
- 利用波形は、S波到達の1秒前から10.24秒間とする。
- 波形の前後1秒間に、それぞれコサインテーパーを施す。

3. コーナー周波数 f_c の抽出方法

- 震源パラメータの推定方法は、多数のKiK-netの地中観測点の地震観測記録から求められる震源スペクトルに補正係数を乗じたものと、理論式とフィッティングさせる方法(赤澤・Petuhkin,2008)を用いる。
- 観測記録の信頼区間を確認した上で0.8Hzから10Hzの間で理論式に整合するように、推定する。

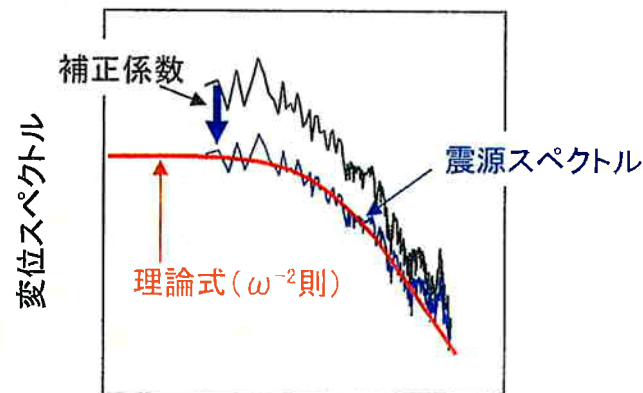
4. 高周波遮断周波数 f_{max} の抽出方法

- 「震源スペクトル」の平均に対して、F-netによる地震モーメント M_0 及び前項にて求めたコーナー周波数 f_c を既知として与えた上で、高周波遮断周波数 f_{max} 、べき乗数 s を焼きなまし法により求める。

2. 地盤減衰構造の評価

■ 震源パラメータの推定方法

- ① 多数のKiK-net観測点の地中地震観測記録から「震源スペクトル」(記録から得られるフーリエスペクトルを伝播経路特性で除する)を算出。
- ② 震源と地中地震計設置位置付近における媒質のインピーダンス比の平方根で近似される係数を補正係数として、①の震源スペクトルを補正
- ③ 補正係数は、赤澤・Petuhkin(2008)で提案されている地震観測点の設置付近と震源付近の媒質のインピーダンス比の平均値を採用する
- ④ 上記の補正した震源スペクトルと、理論式をフィッティングさせることで震源パラメータを推定



震源スペクトルの補正係数

■ インピーダンス比から得られる補正係数

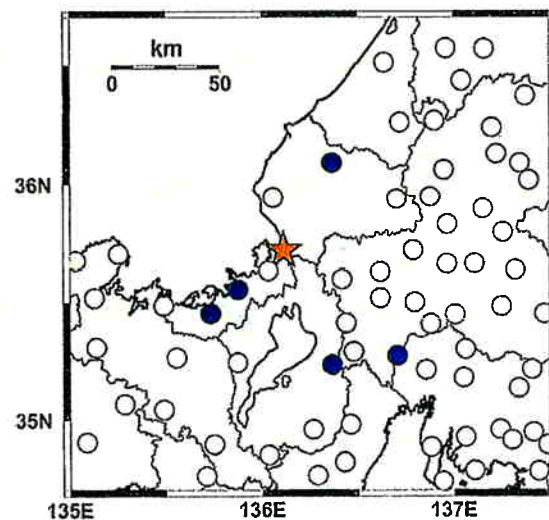
インピーダンス比の算出方法

$$R = \sqrt{\frac{\rho_{\alpha} V_{s_{\alpha}}}{\rho_{\beta} V_{s_{\beta}}}} = \sqrt{\frac{\rho_{\alpha} V_{s_{\alpha}}}{2.7 \times 3600}}$$

観測点名	インピーダンス比
FKIH01 (永平寺)	0.819
FKIH04 (三方)	0.795
FKIH07 (小浜)	0.744
GIFH09 (羽島)	0.898
GIFH21 (美並)	0.766
GIFH22 (金山)	0.925
GIFH25 (谷汲)	0.747
SIGH01 (多賀)	0.749
SIGH04 (日野)	0.826
平均値	0.808

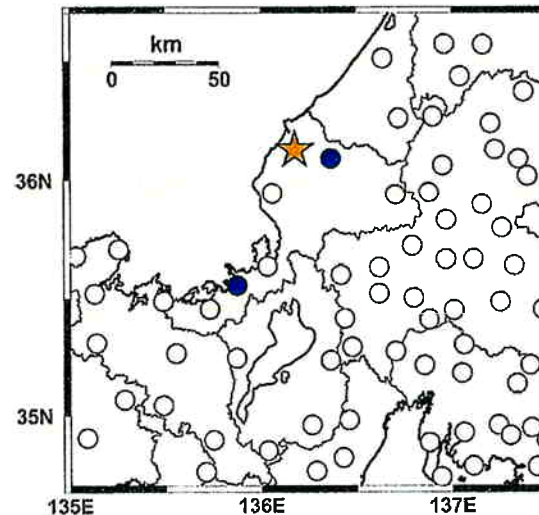
2. 地盤減衰構造の評価

■ 検討対象の地震と記録を用いたKiK-net観測点(地震No.1~3)



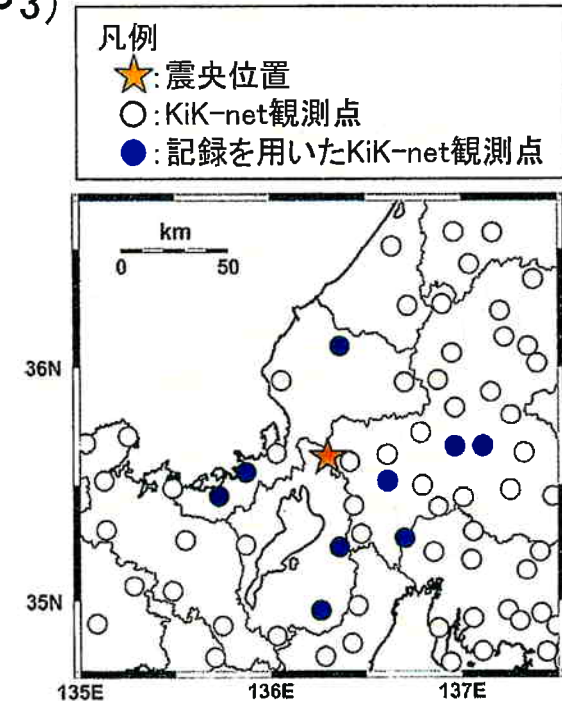
No.1

利用観測点
FKIH01(永平寺)
FKIH04(三方)
FKIH07(小浜)
GIFH09(羽島)
SIGH01(多賀)



No.2

利用観測点
FKIH01(永平寺)
FKIH04(三方)

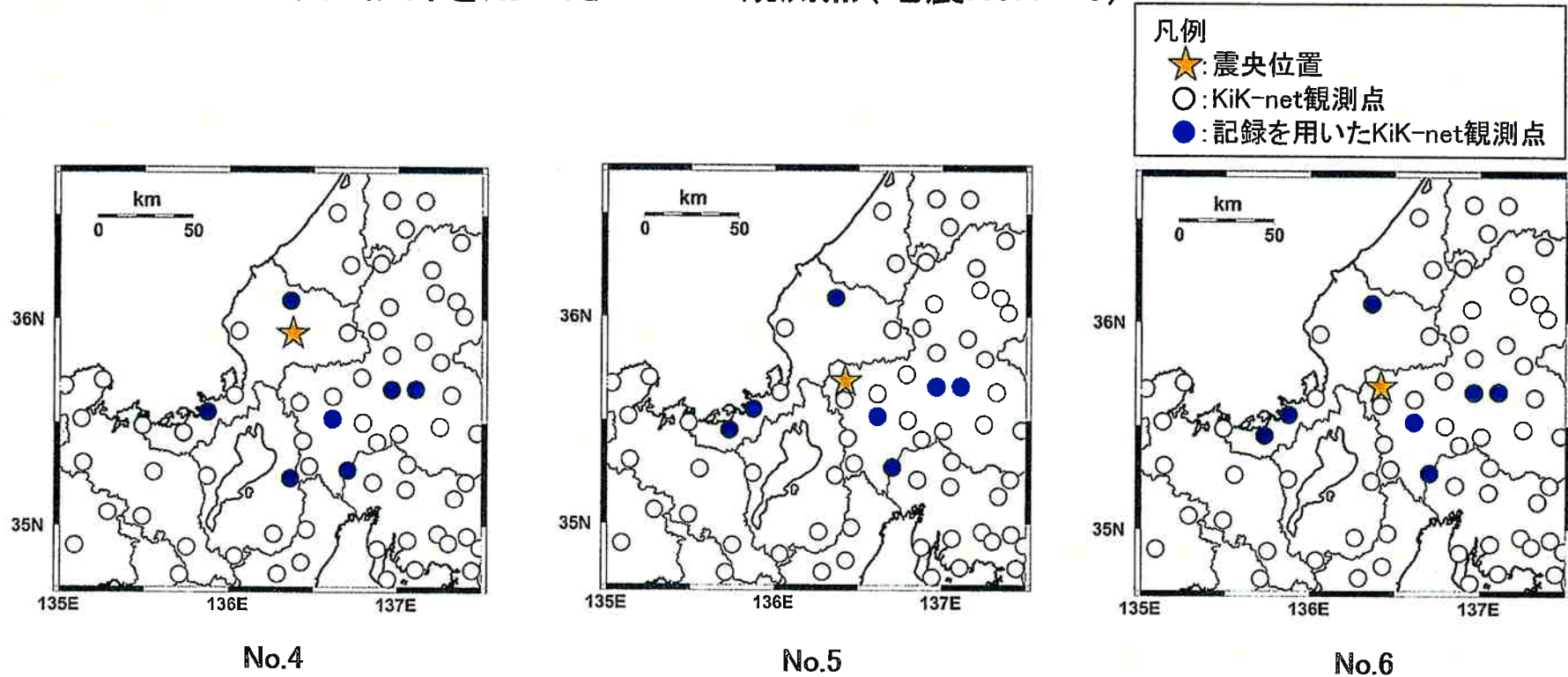


No.3

利用観測点
FKIH01(永平寺)
FKIH04(三方)
FKIH07(小浜)
GIFH09(羽島)
GIFH21(美並)
GIFH22(金山)
GIFH25(谷汲)
SIGH01(多賀)
SIGH04(日野)

2. 地盤減衰構造の評価

■ 検討対象の地震と記録を用いたKiK-net観測点 (地震No.4~6)



利用観測点
 FKI01(永平寺)
 FKI04(三方)
 GIF09(羽島)
 GIF21(美並)
 GIF22(金山)
 GIF25(谷汲)
 SIG01(多賀)

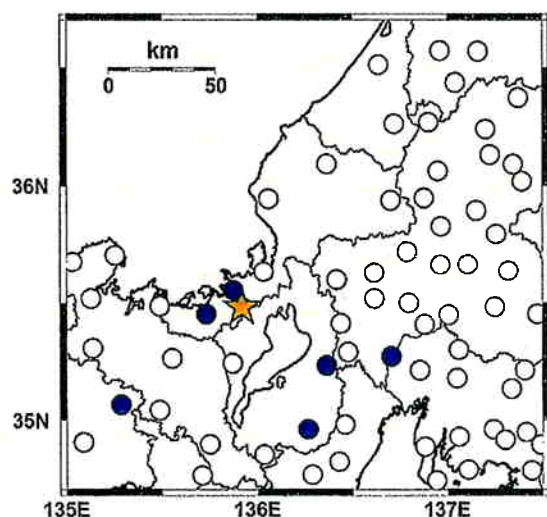
利用観測点
 FKI01(永平寺)
 FKI04(三方)
 FKI07(小浜)
 GIF09(羽島)
 GIF21(美並)
 GIF22(金山)
 GIF25(谷汲)

利用観測点
 FKI01(永平寺)
 FKI04(三方)
 FKI07(小浜)
 GIF09(羽島)
 GIF21(美並)
 GIF22(金山)
 GIF25(谷汲)

2. 地盤減衰構造の評価

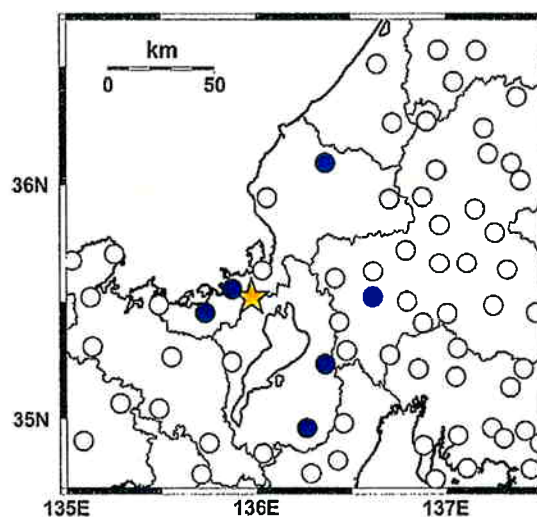
■ 検討対象の地震と記録を用いたKiK-net観測点(地震No.7~9)

凡例
 ★: 震央位置
 ○: KiK-net観測点
 ●: 記録を用いたKiK-net観測点



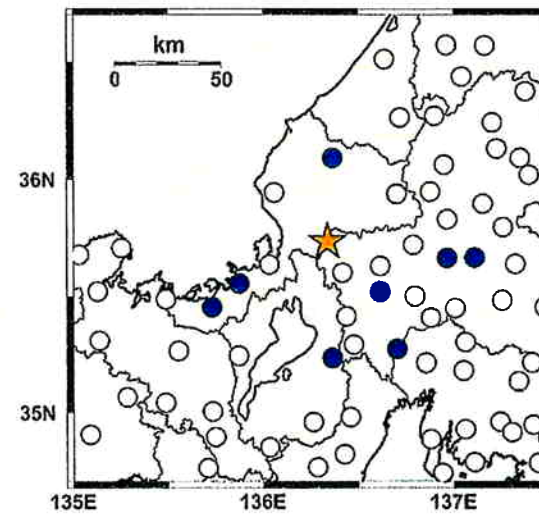
No.7

利用観測点
 FKI04(三方)
 FKI07(小浜)
 GIF09(羽島)
 SIGH01(多賀)
 SIGH04(日野)
 HYG04(篠山)



No.8

利用観測点
 FKI01(永平寺)
 FKI04(三方)
 FKI07(小浜)
 GIF25(谷汲)
 SIGH01(多賀)
 SIGH04(日野)



No.9

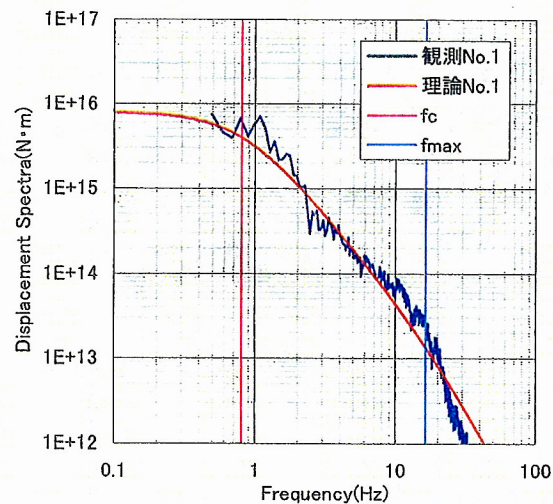
利用観測点
 FKI01(永平寺)
 FKI04(三方)
 FKI07(小浜)
 SIGH01(多賀)
 GIF09(羽島)
 GIF21(美並)
 GIF22(金山)
 GIF25(谷汲)

2. 地盤減衰構造の評価

■ 推定されたコーナ一周波数 f_c 及び高周波遮断周波数 f_{max} (地震No.1～3)

凡例

—: KiK-net地中観測記録による震源スペクトルの平均
—: 理論震源スペクトル
—: f_c —: f_{max}

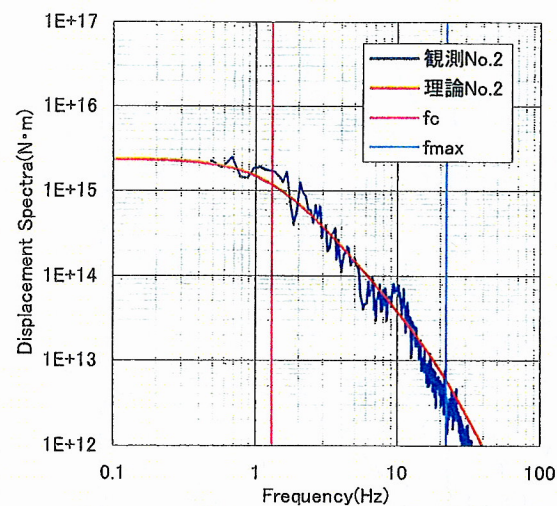


No.1

f_c : 0.8Hz

f_{max} : 16.3Hz

s : 1.00

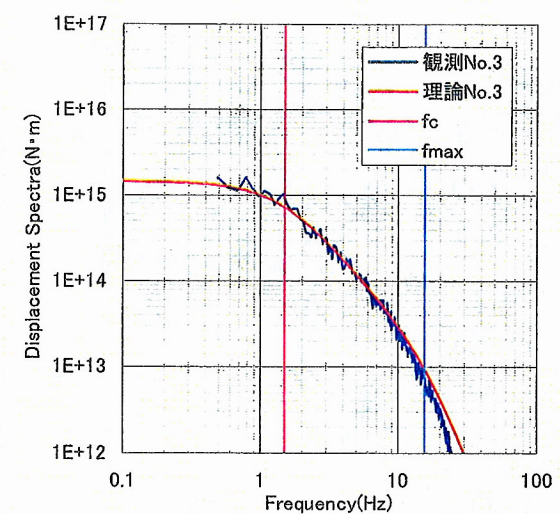


No.2

f_c : 1.3Hz

f_{max} : 21.8Hz

s : 1.48



No.3

f_c : 1.5Hz

f_{max} : 15.6Hz

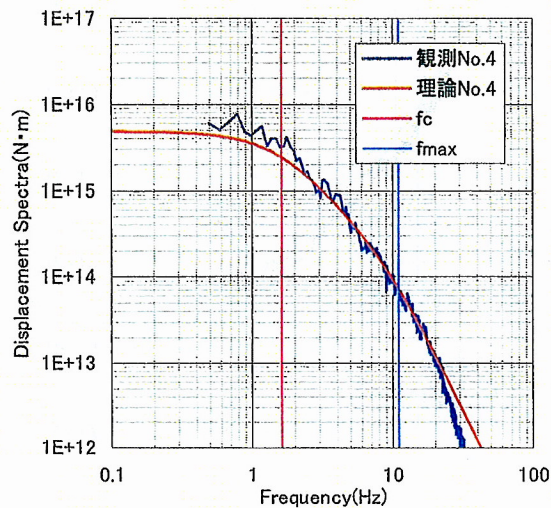
s : 1.93

2. 地盤減衰構造の評価

■ 推定されたコーナー周波数 f_c 及び高周波遮断周波数 f_{max} (地震No.4~6)

凡例

—: KiK-net地中観測記録による震源スペクトルの平均
—: 理論震源スペクトル
—: f_c —: f_{max}

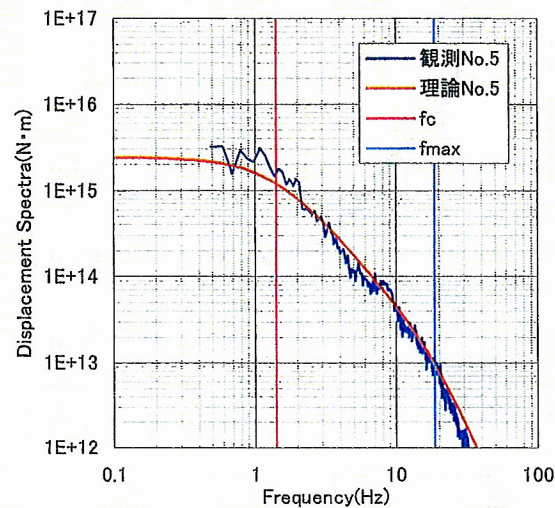


No.4

f_c : 1.6Hz

f_{max} : 10.9Hz

s : 1.45

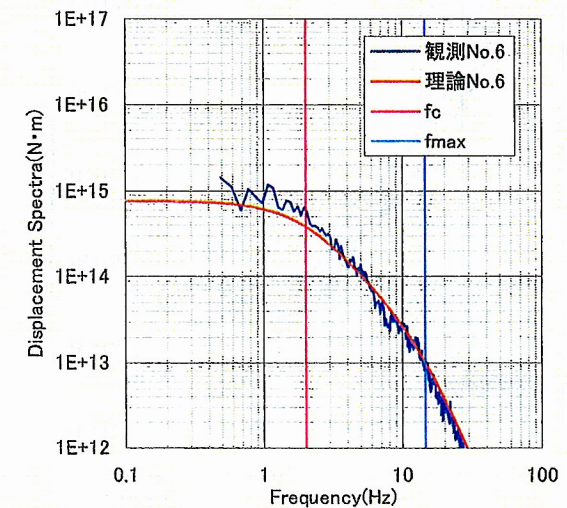


No.5

f_c : 1.4Hz

f_{max} : 18.4Hz

s : 1.78



No.6

f_c : 2.0Hz

f_{max} : 14.5Hz

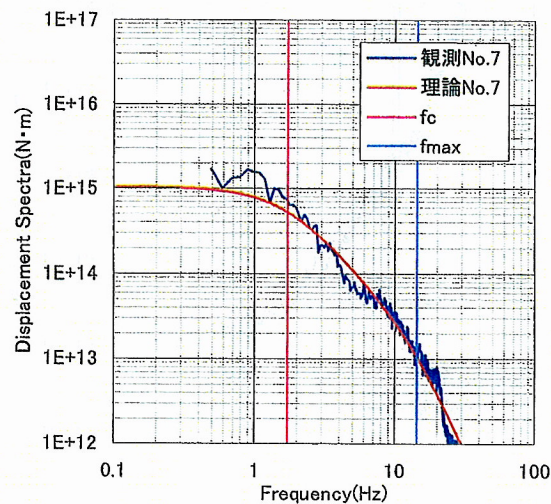
s : 1.82

2. 地盤減衰構造の評価

■ 推定されたコーナ一周波数 f_c 及び高周波遮断周波数 f_{max} (地震No.7~9)

凡例

—: KiK-net地中観測記録による震源スペクトルの平均
—: 理論震源スペクトル
—: f_c —: f_{max}

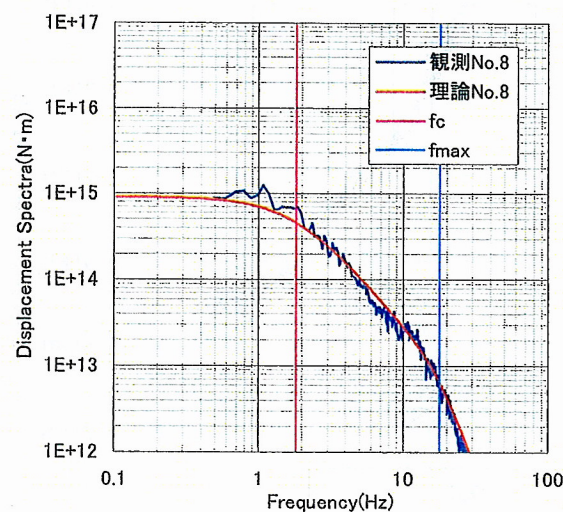


No.7

f_c : 1.7Hz

f_{max} : 14.2Hz

s : 1.65

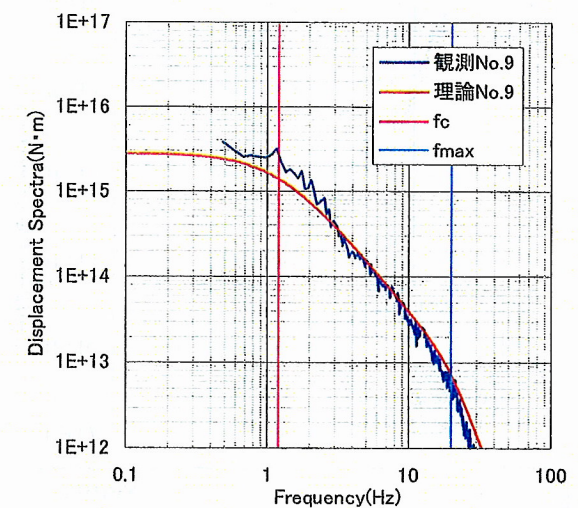


No.8

f_c : 1.8Hz

f_{max} : 17.7Hz

s : 2.61



No.9

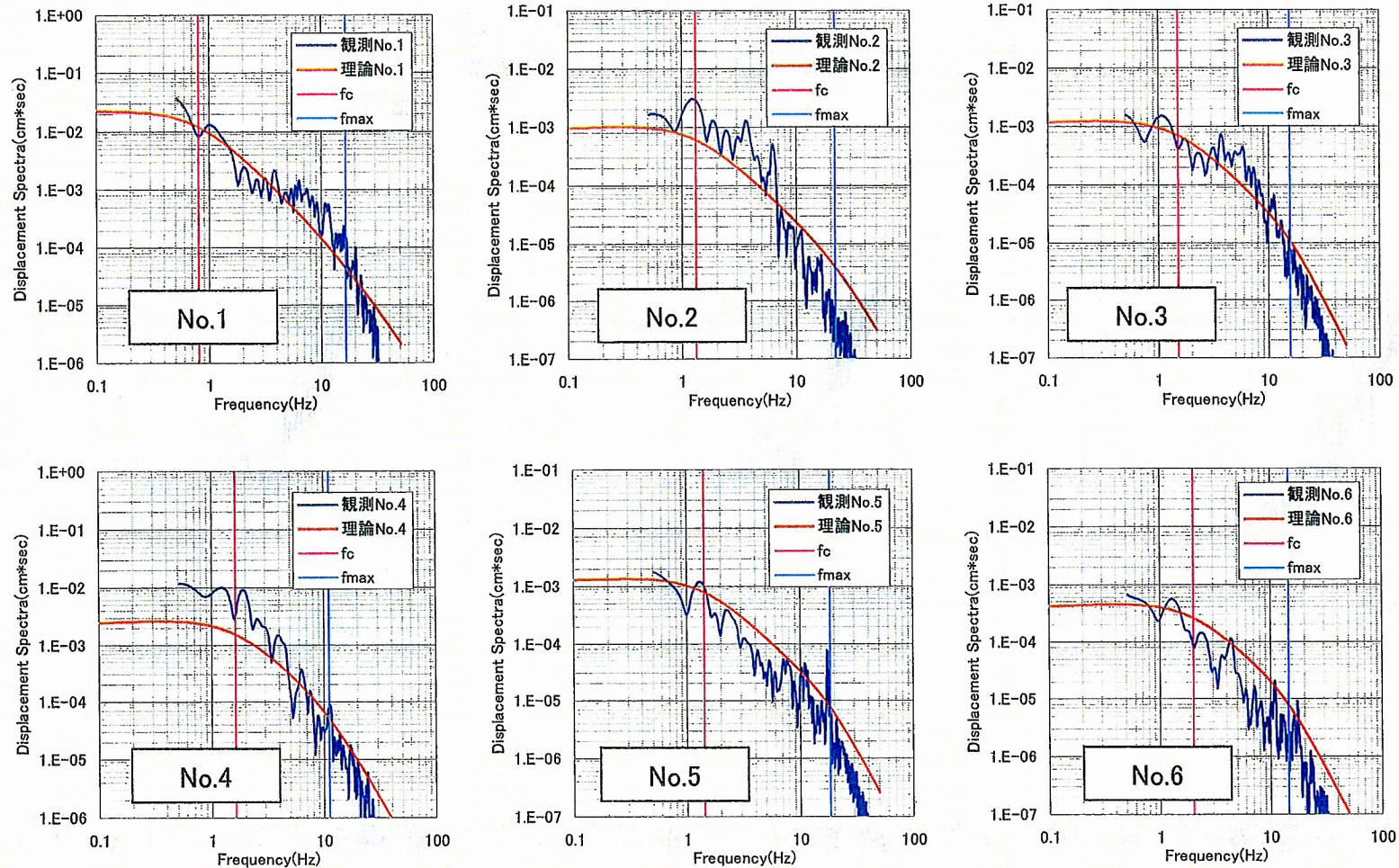
f_c : 1.2Hz

f_{max} : 20.0Hz

s : 2.68

2. 地盤減衰構造の評価

■ もんじゅサイトにおける観測スペクトルと推定した震源パラメータに基づく基盤スペクトル

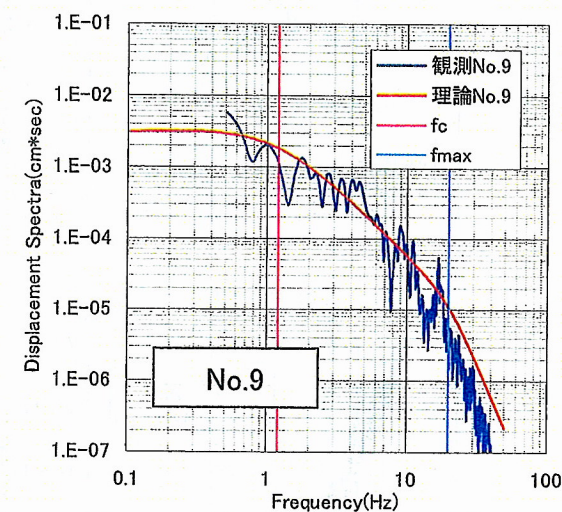
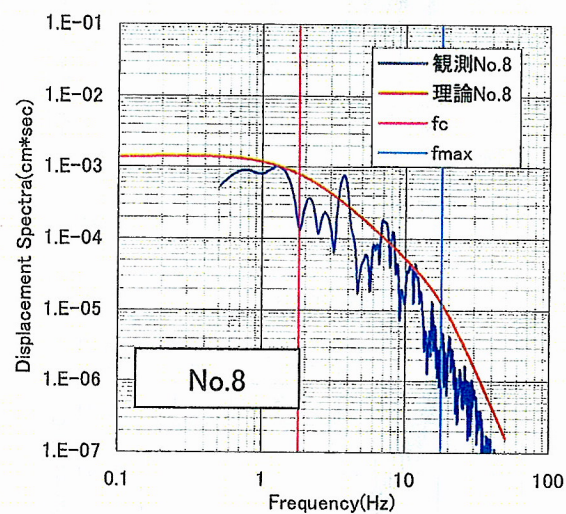
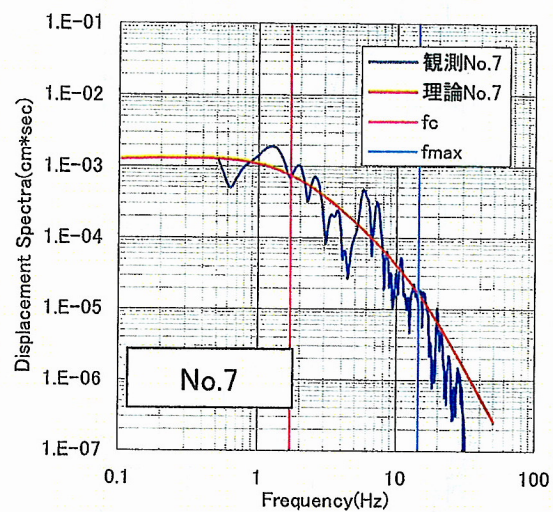


凡例:

- 基盤スペクトル (ω^{-2} 則に従う理論スペクトル)
- 観測スペクトル

2. 地盤減衰構造の評価

■もんじゅサイトにおける観測スペクトルと推定した震源パラメータに基づく基盤スペクトル

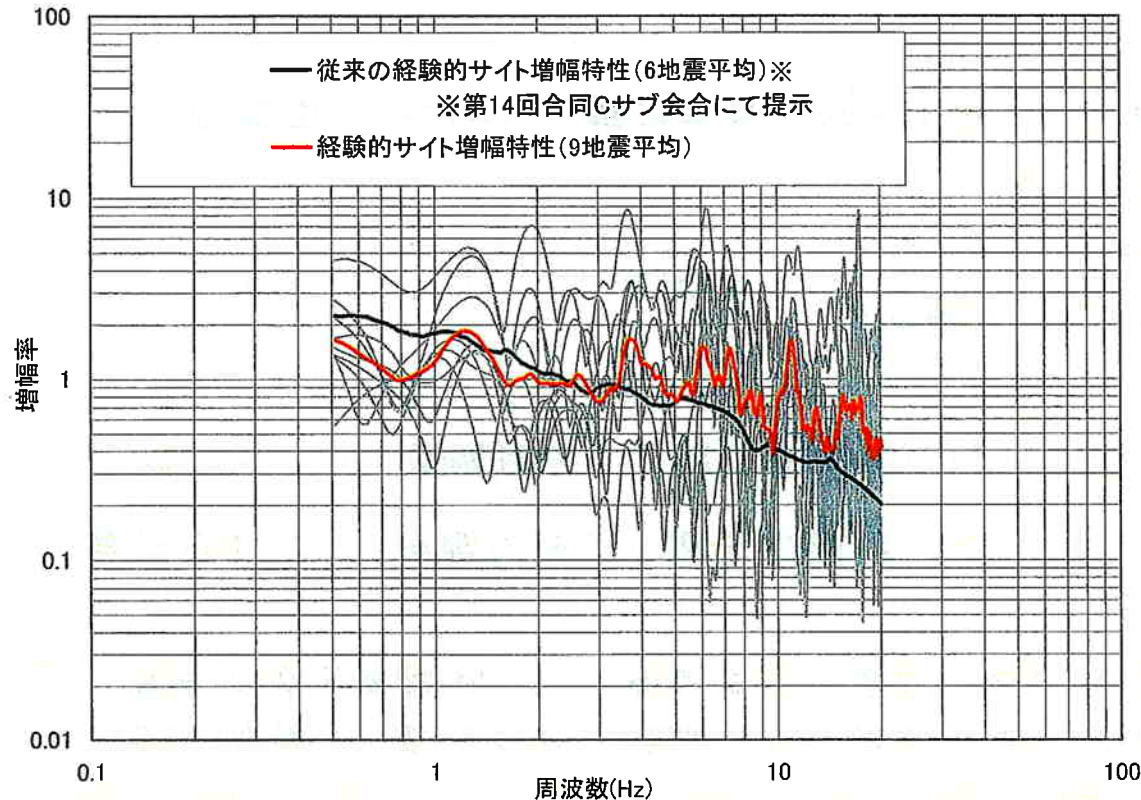


凡例:

- 基盤スペクトル (ω^{-2} 則に従う理論スペクトル)
- 観測スペクトル

2. 地盤減衰構造の評価

■ 求めた経験的サイト増幅特性



fc推定値の比較

(単位: Hz)

地震番号	再評価	従来評価
1	0.8	1.6
2	1.3	2.3
3	1.5	2.7
4	1.6	1.8
5	1.4	2.3
6	2.0	3.3
7	1.7	3.0
8	1.8	3.2
9	1.2	2.2

■ 再評価したもんじゅサイトの経験的サイト増幅特性は、従来の結果と比較して全体に大きくなった。これは複数のKiK-net地中観測記録からもとめた震源スペクトルを用いて震源パラメータ(コーナー周波数 f_c)を推定した結果、従来の推定値より低周波数側に推定されたことによる。

2. 地盤減衰構造の評価

■地盤モデルの検討

- 再評価したもんじゅサイトの経験的サイト増幅特性を基本とする。
- 速度構造は、敷地内外で実施された調査結果により得られたものを基本として、減衰定数を経験的サイト増幅特性に適合するように設定する。

■経験的サイト増幅特性との適合の確認について

- 経験的サイト増幅特性との適合の確認には、下式による残差による。

$$\text{残差} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\log(a) - \log(b) \right)^2$$

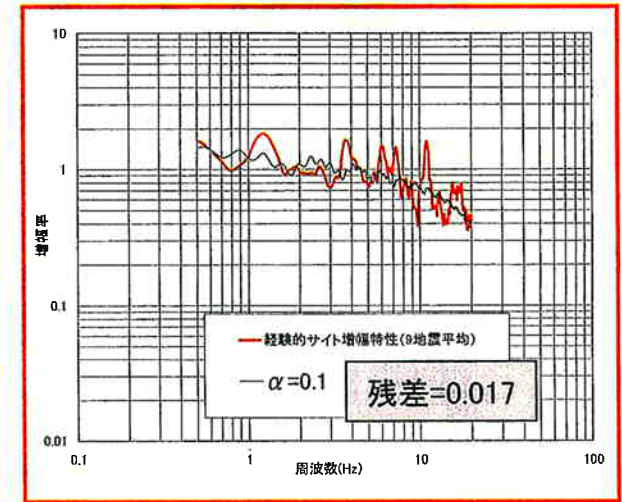
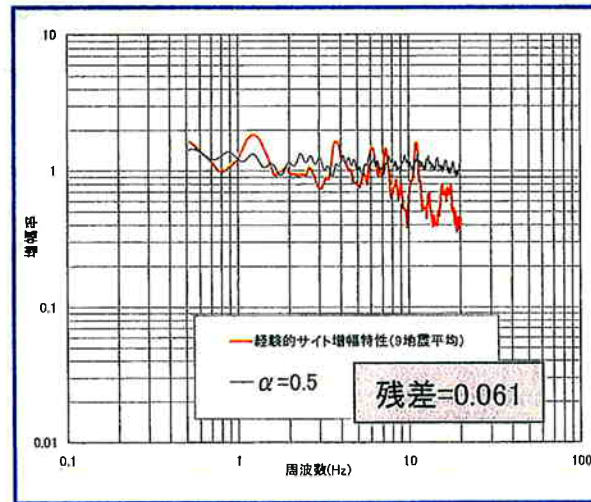
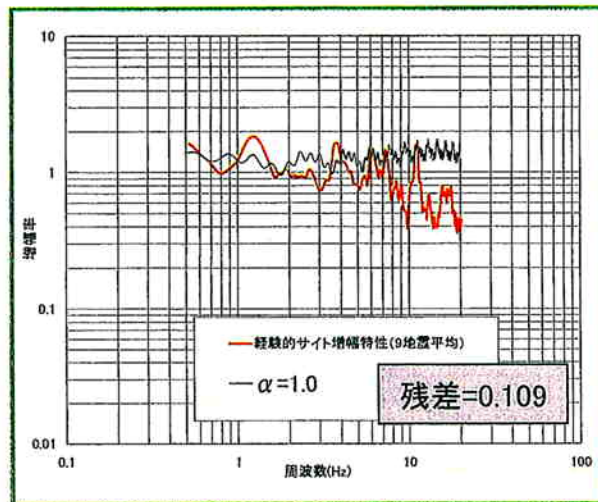
a: 経験的サイト増幅特性
b: 計算で求めた増幅特性

- 評価範囲については、観測記録の精度も勘案して評価範囲を2～20Hzとする。

2. 地盤減衰構造の評価

■ 減衰定数の周波数依存性について

- 再検討により求めた経験的サイト増幅特性に対して、地盤の各層の減衰定数を周波数依存性($h=h_0f^\alpha$)の関数モデルにて表されるものとする。
- 減衰定数の h_0 は後述の検討モデル①の値とし、周波数依存性を $\alpha=1.0$ 、 0.5 、 0.1 とモデル化した場合について、地震基盤から解放基盤への増幅率を求め、経験的サイト増幅特性と比較し周波数依存性の傾向について確認する。



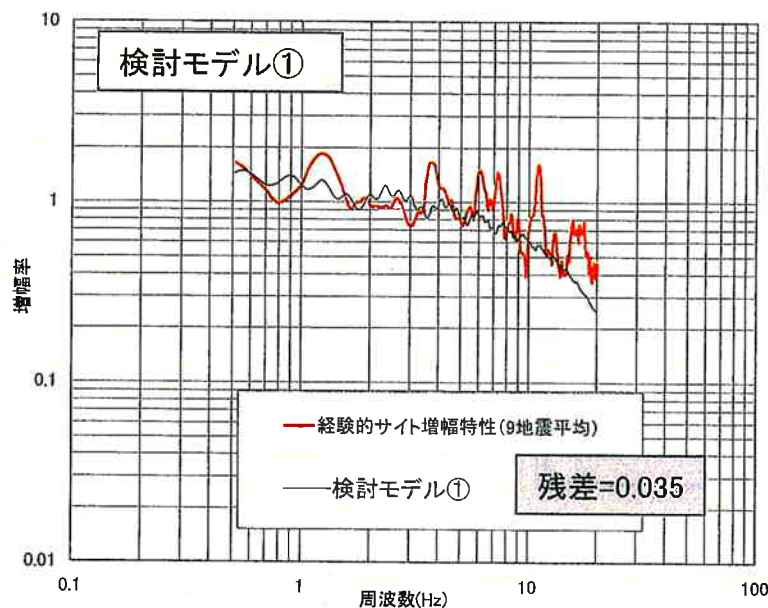
深さ (m)	EL (m)	層	層厚 (m)	密度 ρ (t/m ³)	S波速度 V_s (m/s)	h_0	$\alpha=1.0$	$\alpha=0.5$	$\alpha=0.1$
							α	α	α
0	5								
33	-28	1	33	2.5	1900	0.030	1.0	0.5	0.1
630	-625	2	597	2.6	2200	0.030			
1400	-1395	3	770	2.6	2800	0.005			
4000	-3995	4	2600	2.6	3100	0.005			
		5	—	2.7	3600	0.005			

- 再検討により求めた経験的サイト増幅特性に対して、減衰定数の周波数依存性は $\alpha=0.1$ の場合がより整合的であり、減衰定数の周波数依存性はほとんどないものと考えられる。

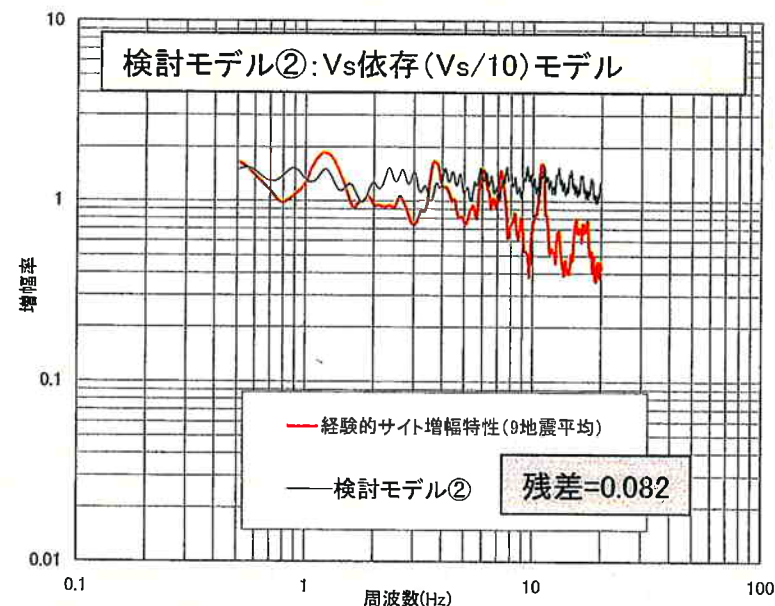
2. 地盤減衰構造の評価

■ 経験的サイト増幅特性に適合するように減衰定数を設定する。

- 経験的サイト増幅特性との適合性は、経験的サイト増幅特性(9地震による平均)と検討する地盤モデルの増幅特性との残差により確認する。
- 周波数依存性については、考慮しない。

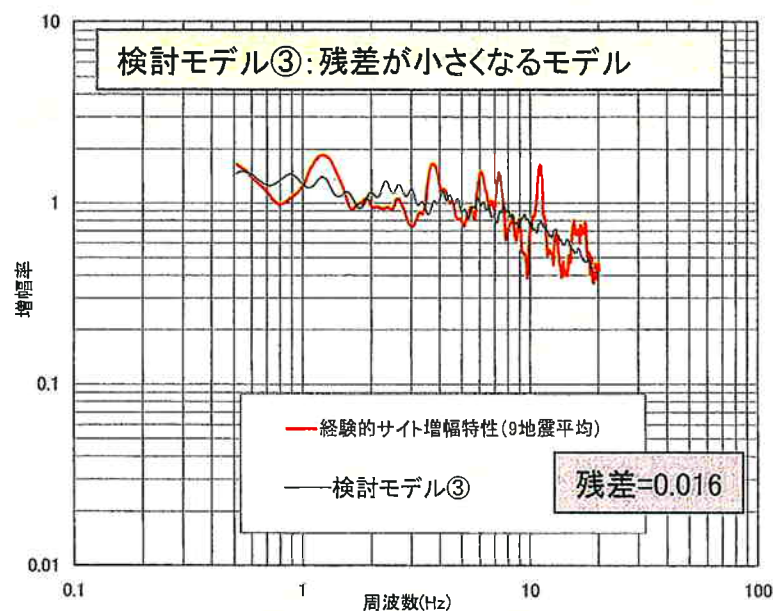


深さ (m)	EL (m)	層	層厚 (m)	密度 ρ (t/m^3)	S波速度 V_s (m/s)	P波速度 V_p (m/s)	Q_s	減衰定数 (%)
0	5							
33	-28	1	33	2.5	1900	4300	16.7	3.0
630	-625	2	597	2.6	2200	4600	16.7	3.0
1400	-1395	3	770	2.6	2800	5130	100.0	0.5
4000	-3995	4	2600	2.6	3100	5310	100.0	0.5
		5	-	2.7	3600	6270	100.0	0.5

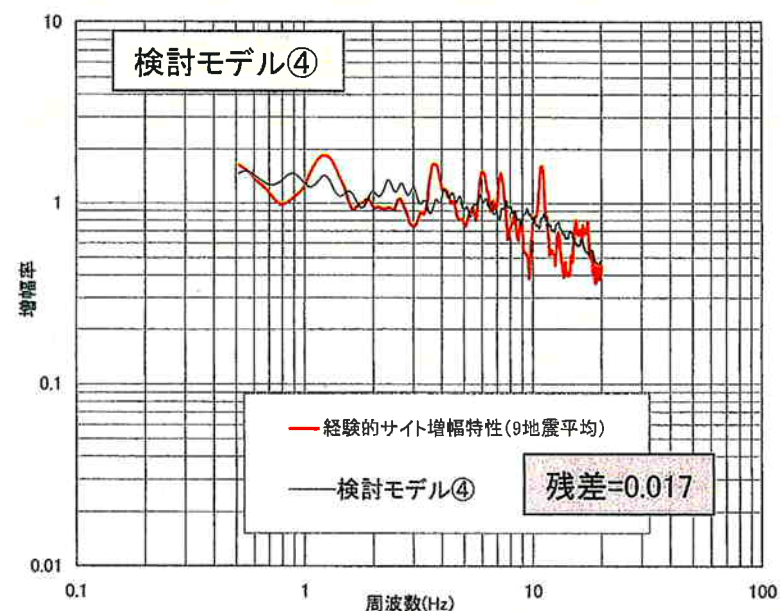


深さ (m)	EL (m)	層	層厚 (m)	密度 ρ (t/m^3)	S波速度 V_s (m/s)	P波速度 V_p (m/s)	Q_s	減衰定数 (%)
0	5							
33	-28	1	33	2.5	1900	4300	$V_s/10$	0.263
630	-625	2	597	2.6	2200	4600	$V_s/10$	0.227
1400	-1395	3	770	2.6	2800	5130	$V_s/10$	0.179
4000	-3995	4	2600	2.6	3100	5310	$V_s/10$	0.161
		5	-	2.7	3600	6270	$V_s/10$	0.139

2. 地盤減衰構造の評価

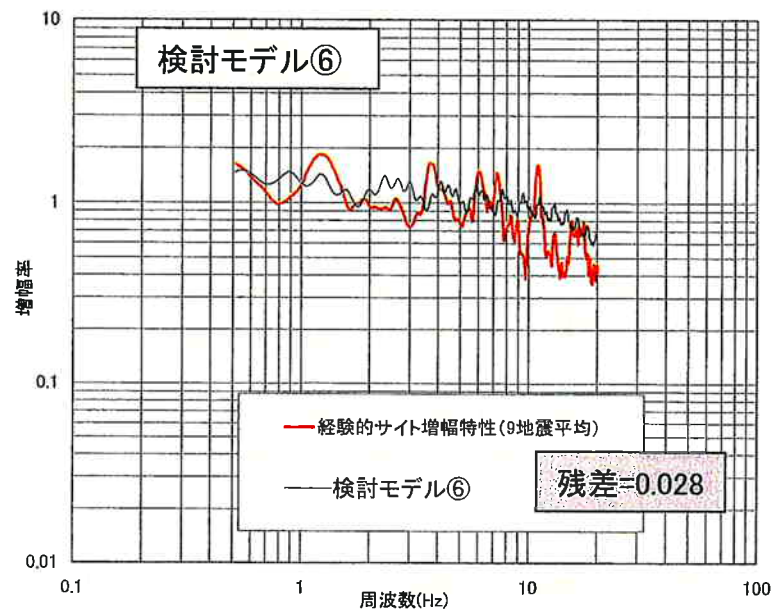
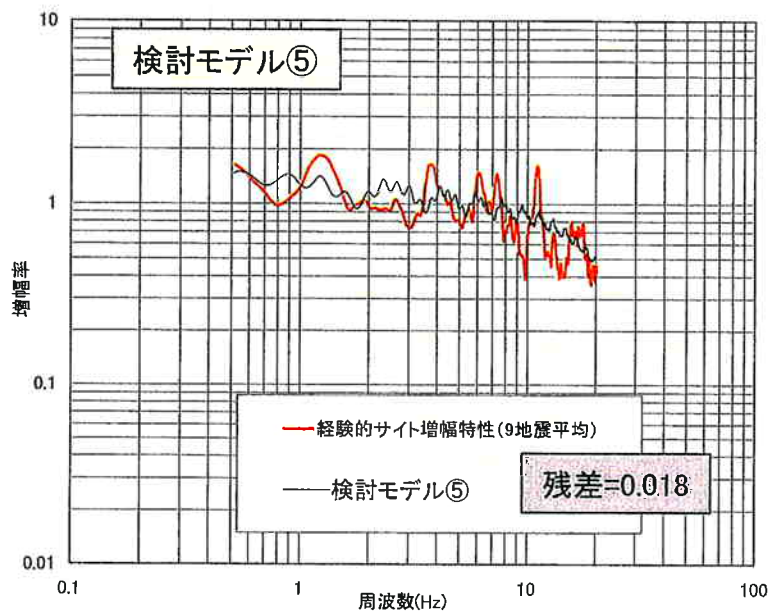


深さ (m)	EL (m)	層	層厚 (m)	密度 ρ (t/m ³)	S波速度 V_s (m/s)	P波速度 V_p (m/s)	Q_s	減衰定数 (%)
0	5							
33	-28	1	33	2.5	1900	4300	16.7	3.0
200	-195	2	167	2.6	2200	4600	16.7	3.0
630	-625	2'	430	2.6	2200	4600	50.0	1.0
1400	-1395	3	770	2.6	2800	5130	100.0	0.5
4000	-3995	4	2600	2.6	3100	5310	100.0	0.5
		5	-	2.7	3600	6270	100.0	0.5



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

2. 地盤減衰構造の評価



深さ (m)	EL (m)	層	層厚 (m)	密度 ρ (t/m ³)	S波速度 V_s (m/s)	P波速度 V_p (m/s)	Q_s	減衰定数 (%)
0	5							
33	-28	1	33	2.5	1900	4300	16.7	3.0
630	-625	2	597	2.6	2200	4600	50.0	1.0
1400	-1395	3	770	2.6	2800	5130	100.0	0.5
4000	-3995	4	2600	2.6	3100	5310	100.0	0.5
		5	-	2.7	3600	6270	100.0	0.5

深さ (m)	EL (m)	層	層厚 (m)	密度 ρ (t/m ³)	S波速度 V_s (m/s)	P波速度 V_p (m/s)	Q_s	減衰定数 (%)
0	5							
33	-28	1	33	2.5	1900	4300	100.0	0.5
630	-625	2	597	2.6	2200	4600	100.0	0.5
1400	-1395	3	770	2.6	2800	5130	100.0	0.5
4000	-3995	4	2600	2.6	3100	5310	100.0	0.5
		5	-	2.7	3600	6270	100.0	0.5

- 地盤モデルの検討ケースを複数検討したところ、表層の減衰定数を小さくするに従って、残差は大きくなった。
- 検討したモデルの中で、モデル③が最も残差が小さく評価された。

2. 地盤減衰構造の評価

■地盤モデルの表層の減衰定数が3%程度になることの物理的意味について、以下に沿って検討した。

1) 岩盤の減衰定数に関する既往文献の調査

岩盤の減衰定数に関する知見のレビュー

地盤の不均質性と減衰定数の関連に関する知見の整理

2) もんじゅサイトの不均質性に関する検討

もんじゅサイトのPS検層データに基づく不均質強度の推定

既往検討による不均質強度と減衰定数との比較による考察

2. 地盤減衰構造の評価

■ 岩盤の減衰定数に関する知見

- Abercrombie (1997)によれば、南カリフォルニアのCajon峠におけるボアホール地震観測の結果から地表付近の3km以浅の減衰の平均で $Q_p \sim 27 \pm 8$ 、この近傍の花崗岩サイトで ~ 50 であり、 Q_s は両地点とも $Q_s \sim 21 \pm 7$ で、周波数に依存しないQ値モデルでよく表現できる。
- 同文献によるボアホールを用いた既往研究のまとめ(下表)は、Q値は地表付近で非常に小さくなり、その傾向は岩種に依らないことを示している。
- 同文献は、地表に向かって急激に増加する減衰の主要な理由として、散乱や摩擦による減衰に寄与する岩石中の割れ目が地表付近の上載圧減少に伴って増加することや、この作用に伴う物性の不均質性の増加と推定している。

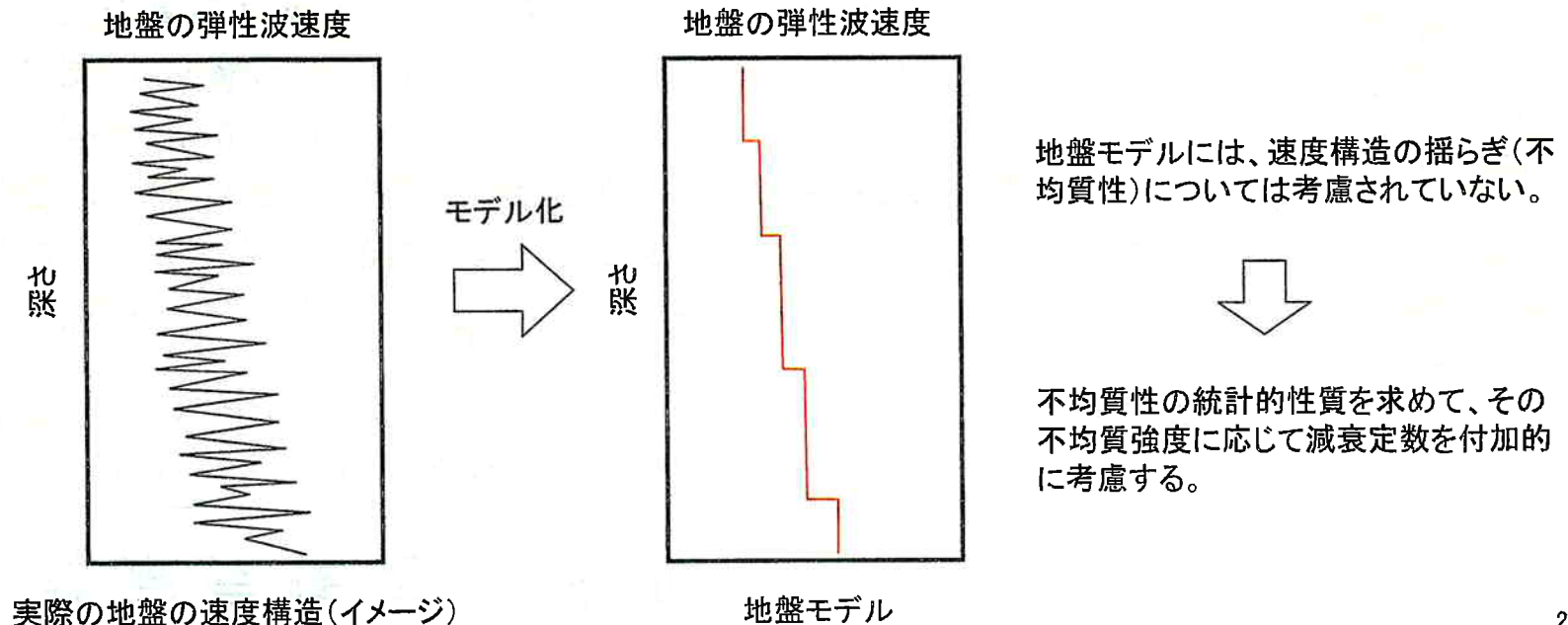
岩種	地点	Q値 深度範囲(m)	Qp	Qs	地震波速度深度範囲(m) / 速度(km/s)		出典
					Vp	Vs	
オフィオライト	Oroville	0-475	-	9	付近の代表値 / 5.8	付近の代表値 / 3.3	Malin et al. (1988)
		375-475	-	11			
花崗岩	Anza	0-150	6.5	9	0-5 / 0.3 5-15 / 0.9 15-25 / 2.1 25-70 / 3.8 70-160 / 4.8 160-∞ / 5.4	0-2.5 / 0.2 2.5-22.5 / 0.9 22.5-50 / 1.9 50-70 / 2.8 70-∞ / 2.8	Aster and Shearer (1991)
		150-300	27	26			
	Garner Valley	0-220	-	12	0-5 / 0.4 5-45 / 2.03 45-150 / 2.46 150-220 / 5.5 (深度図読)	0-18 / 0.22 18-45 / 0.58 45-150 / 1.31 150-220 / 2.5 (深度図読)	Archuleta et al. (1992)
第三系	Parkfield	0-200	6-11	8-19	1-233 / 2.03 1-198 / 1.32	1-233 / 0.9 1-198 / 0.64	Blakeslee and Malin (1991)
	Parkfield	0-300	-	10	0-300 / ~ 3.5 (速度図読、不均質)	-	Jongmans and Malin (1995)
		0-1000	-	37	0-1000 / ~ 3.7 (速度図読、不均質)	-	

Abercrombie (1997) Table 4と、出典論文の記載を踏まえ要約

2. 地盤減衰構造の評価

■速度構造の揺らぎと減衰定数との関連についての知見

- 鉛直アレイ観測記録から同定される地盤の減衰定数について、表層付近では、微小ひずみ域での履歴減衰(材料減衰)と比べて過大となる場合があることが知られている。
- これについて、佐藤(浩)・他(2007)、佐藤(浩)(2009)では、速度構造の不均質性が地震波の減衰の要因の一つであることが指摘されていることから、速度構造の揺らぎ(不均質性)に着目し、地盤の不均質性の統計的性質を求めて、物理的なメカニズムの検討を行っている。
- 不均質性を地盤モデルに導入することは、減衰定数を付加的に考慮することと等価であり、不均質性が大きい地点での地盤モデルでは、付加すべき減衰定数を大きく設定する必要がある。



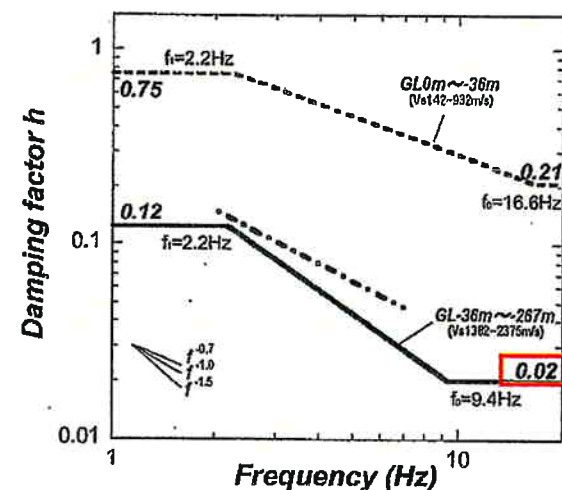
2. 地盤減衰構造の評価

■ Vs2000m/s程度の岩盤の減衰定数の下限値と速度構造の不均質性に関する知見

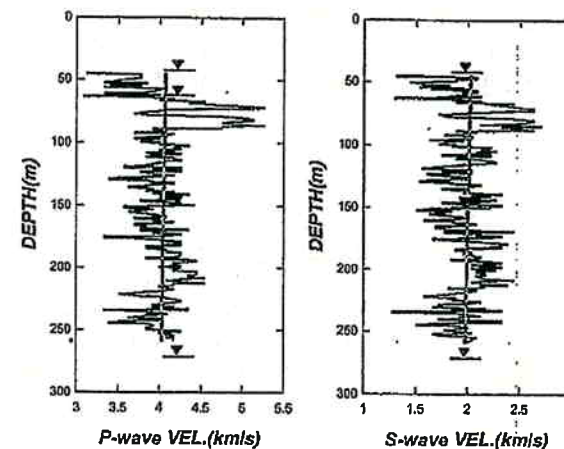
- 佐藤(浩)・他(2007)において、平均S波速度2000m/s程度の岩盤サイトにおける地盤の減衰定数を、鉛直アレイ観測記録を用いたスペクトル比の逆解析による同定結果から減衰定数の下限値を $h=0.02$ と求めている。
- また、同地盤のPS検層(約200m区間)による速度構造の解析から、不均質性の統計的性質を推定しており、統計的性質のうち不均質強度を支配しているとされている標準偏差 ε を、13.1%(0.131)と求めている。

検討地点のPS検層結果に基づく地盤のランダムな不均質性の統計的性質

	平均速度 (km/s)	深さトレンド (1/s)	スペクトル指数 α	ν	$a(m)$	ε (%)
P-wave VEL.	4.05	-0.19	1.34	0.17	8.5	8.8
S-wave VEL.	2.00	-0.22	1.11	0.06	14.3	13.1



同定された地盤の減衰定数



検討地点におけるサスペンション速度検層による速度構造(▼は地震計位置、直線は深さ方向のトレンド)

※図・表は佐藤(浩)・他(2007)から抜粋

2. 地盤減衰構造の評価

■ 佐藤(浩)・他(2007)による不均質性の統計的性質の推定方法

- a. 対象データとなる速度検層データ $V(z)$ に対して、(1)式をフィッティングすることにより深さ方向に増加する漸増(トレンド)成分($V_0 + V_1 \cdot z$)を推定する。

$$V(z) = V_0 + V_1 \cdot z + \xi_0(z) \quad (1)$$

- b. 検層データから漸増成分を除去して $\xi_0(z)$ を求め、平均速度で無次元化することにより、速度構造の不均質(揺らぎ)のデータ $\xi(z)$ を抽出する。

$$\xi(z) = \frac{\xi_0(z)}{(V_0 + V_1 \cdot z)} \quad (2)$$

- c. 不均質データ $\xi(z)$ のパワースペクトル $P(k)$ を求め、 $P(k) \propto k^{-\alpha}$ を仮定したフィッティングから傾き α を求め、更にHurst指数 ν を次式(3)から求める。

$$\nu = \frac{\alpha - 1}{2} \quad (3)$$

- d. 不均質データ $\xi(z)$ の自己相関関数を求め、(4)式で示すフォンカルマン型の自己相関関数 $N(r)$ を仮定してフィッティングすることにより、標準偏差 ε 、相関距離 a を求める。なお、Hurst指数 ν については、c.で求めた値を用いる。

$$N(r) = \frac{\varepsilon^2 2^{1-\nu}}{\Gamma(\nu)} \left(\frac{|r|}{a} \right)^\nu K_\nu \left(\frac{|r|}{a} \right) \quad (4)$$

ここに、 r は相対的な距離、 K_ν は ν 次修正ベッセル関数、 Γ はガンマ関数である。

2. 地盤減衰構造の評価

■速度構造の不均質性と付加減衰に関する検討(佐藤, 2009)

- 佐藤(浩)(2009)では、速度構造の不均質性が地震波の減衰の要因の一つであることが指摘されていることから、不均質強度(ε)を指標とした深部地盤モデルによる理論地盤増幅特性と経験的サイト増幅特性の比較を行い、特に高周波数側で調和的なモデルを検討している。

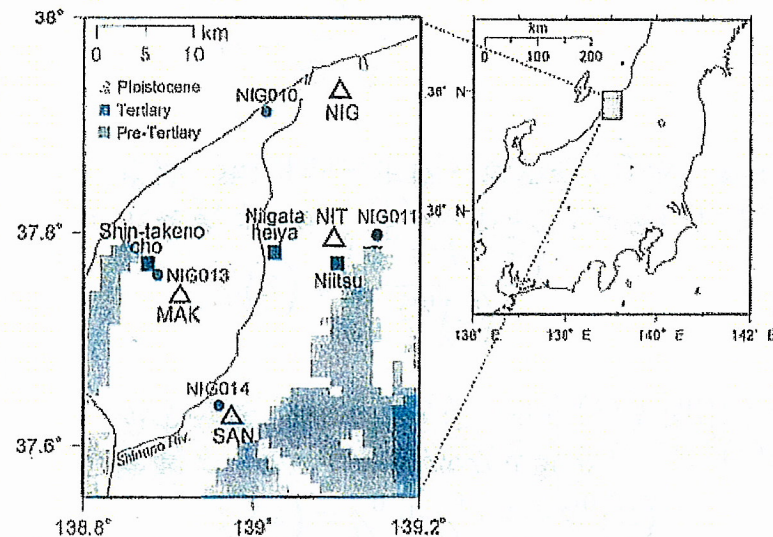


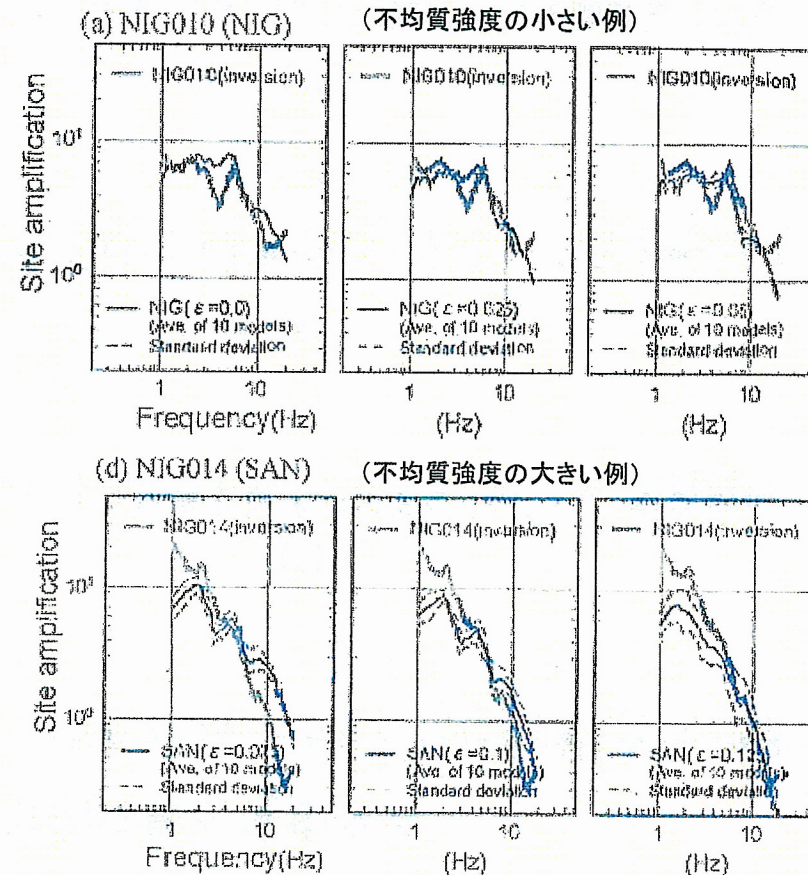
図6 新潟平野中央部における観測点位置と表層地質³¹⁾

(●地震観測点, △微動アレイ観測点, ■基礎試錐)

新潟平野の検討地点

広帯域のサイト増幅特性で考慮すべき
不均質性の標準偏差(強度)の目安

	NIG010 (NIG)	NIG011 (NIT)	NIG013 (MAK)	NIG014 (SAN)
Standard deviation	0 ~ 0.025	0.05	0.075 ~ 0.1	0.1 ~ 0.125



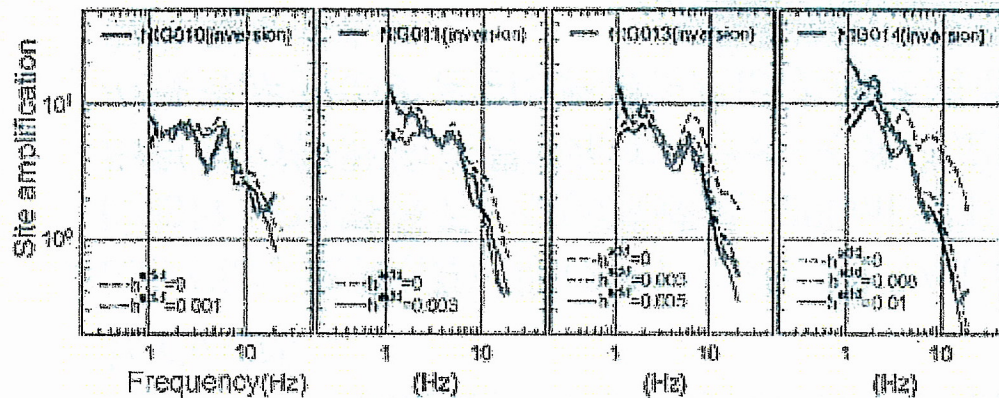
不均質強度(ε)を指標とした深部地盤モデルによる理論地盤増幅特性と経験的サイト増幅特性の比較の例

※図は佐藤・山中(2010)より抜粋

2. 地盤減衰構造の評価

■速度構造の不均質性と付加減衰に関する知見(続き)

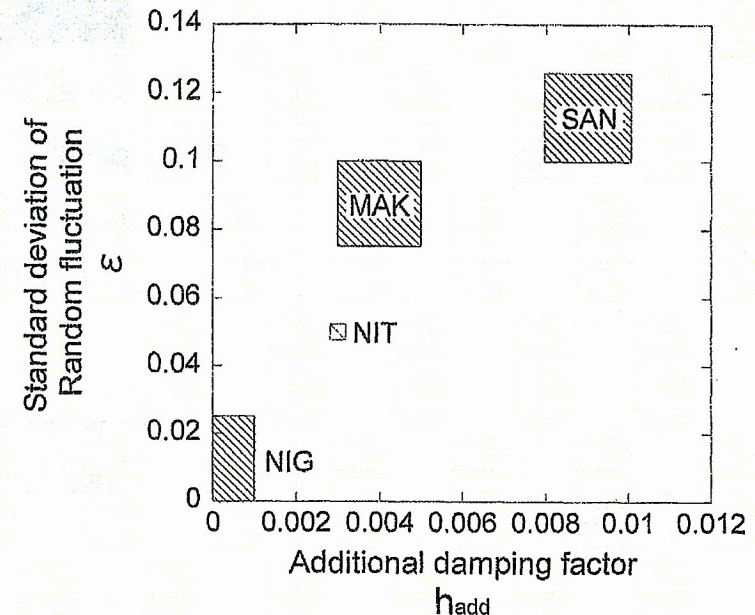
- 更に、不均質性の導入前の単純な深部地盤モデルに対して減衰定数のみを変化させた理論サイト増幅特性と経験的サイト増幅特性の比較を行い、高周波数側で調和的なモデル(付加減衰 h_{add})を検討している。
- 更に、各評価地点の付加減衰量 h_{add} と不均質強度 ε の関係を整理している。
- 以上の検討から、不均質強度 ε を指標として、設定すべき減衰定数の差異を予測できる可能性を示唆している。



深部地盤モデルに減衰定数を付加した場合の理論サイト増幅特性と経験的サイト増幅特性の比較

広帯域のサイト増幅特性で考慮すべき
減衰定数の付加量

	NIG010 (NIG)	NIG011 (NIT)	NIG013 (MAK)	NIG014 (SAN)
Additional damping factor h_{add}	0 ~ 0.001	0.003	0.003 ~ 0.005	0.008 ~ 0.01

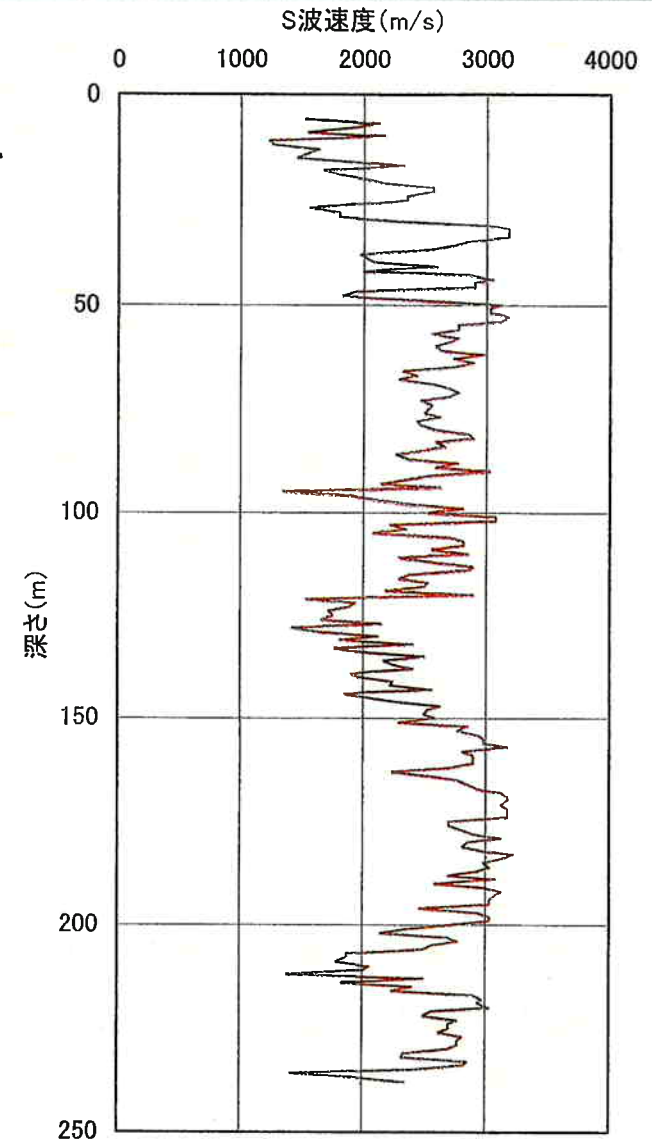
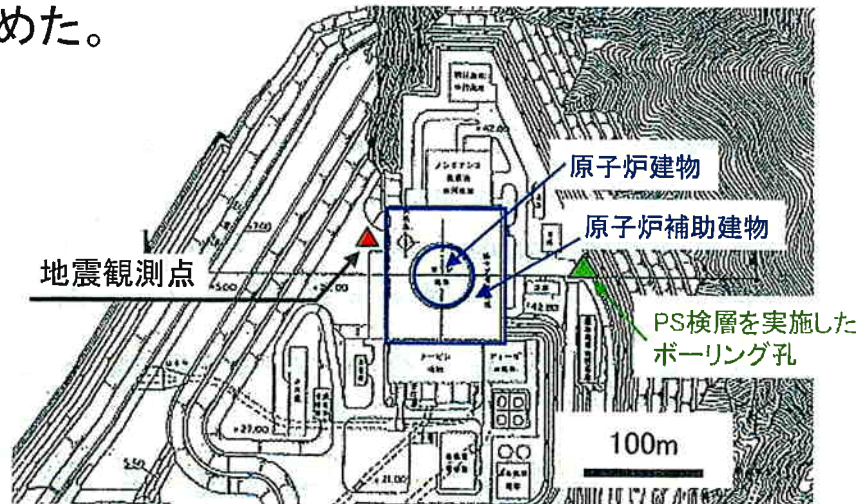


新潟平野地域での広帯域のサイト増幅特性評価において、考慮すべき深部地盤の不均質性強度(標準偏差 ε)とそれと等価な効果をもたらす減衰定数の付加量 h_{add} の関係

2. 地盤減衰構造の評価

■もんじゅサイトにおける比較的浅い部分の硬質岩盤の減衰定数について、地盤の速度構造の不均質性と減衰定数の関係について着目し、減衰定数の大きさに影響を及ぼす不均質強度の観点から検討した。

- 現状設定している地盤構造モデルにおいては、右図にみられるような速度構造の不均質性については考慮されていない。
- ここでは、佐藤(浩)・他(2007)に基づきもんじゅサイトにおけるPS検層データ(S波速度、200m区間)から、不均質性の統計的性質を示すパラメータを推定し、地盤の減衰定数の大きさに影響を及ぼす速度構造の不均質強度を求めた。



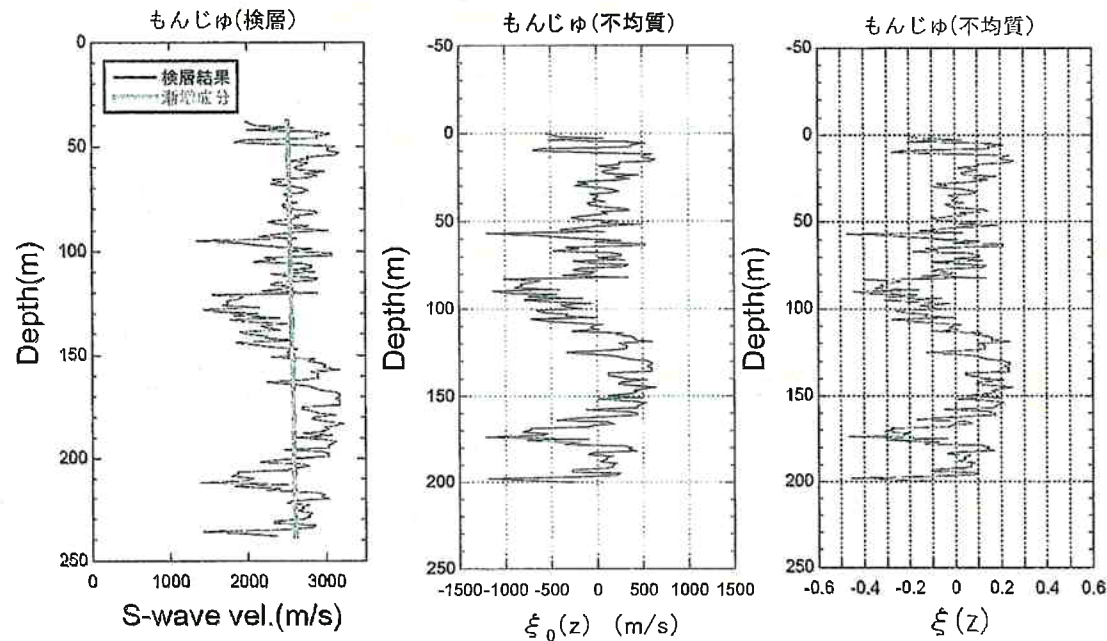
もんじゅサイトにおける
PS検層結果(S波速度)

2. 地盤減衰構造の評価

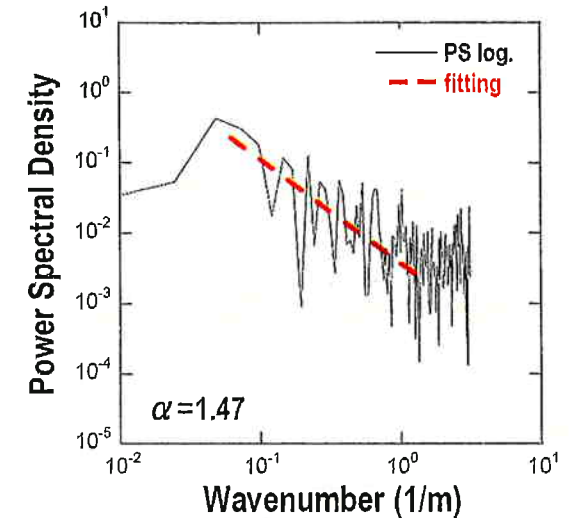
■不均質強度の解析結果

もんじゅのPS 検層(S 波速度)による不均質性の統計的性質の推定結果

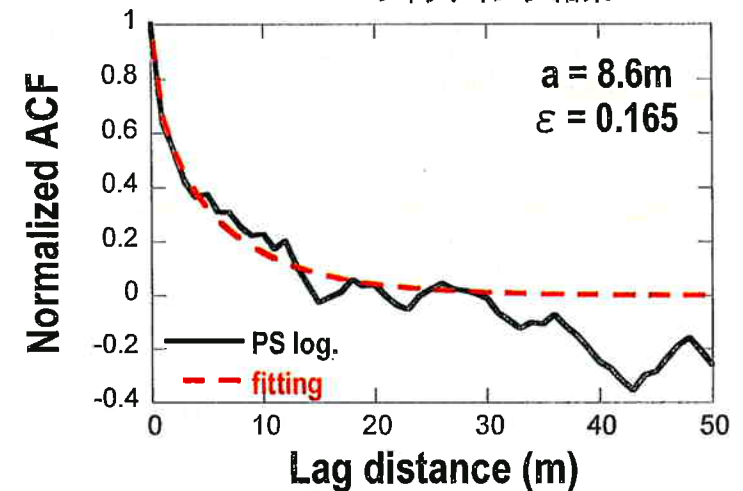
対象 データ 範囲(m)	平均S波 速度 (km/s)	漸増成分 の傾き (1/s)	相関 距離 a (m)	Hurst 指数 ν	標準 偏差 ε
GL-38 ~-238	2.56	0.43	8.6	0.24	0.165



検層データに対するフィッティング結果(左)と
抽出された不均質データ $\xi_0(z)$ (中)、 $\xi(z)$ (右)



不均質データのパワースペクトルと
フィッティング結果



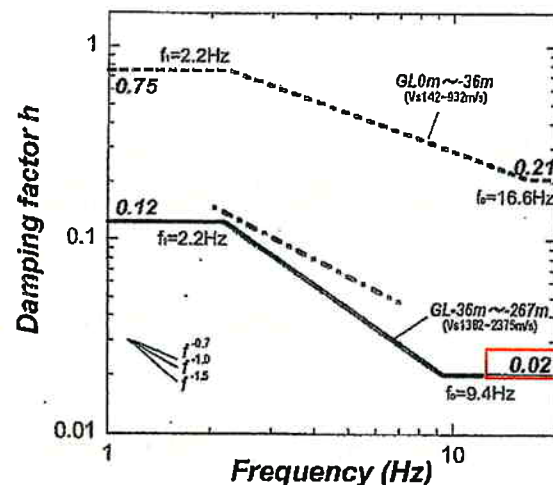
不均質データの自己相関関数とフィッティング結果

もんじゅサイトの不均質強度(標準偏差)は佐藤(浩)・他(2007)による平均S波速度2000m/s程度の岩盤サイトの値より大きい

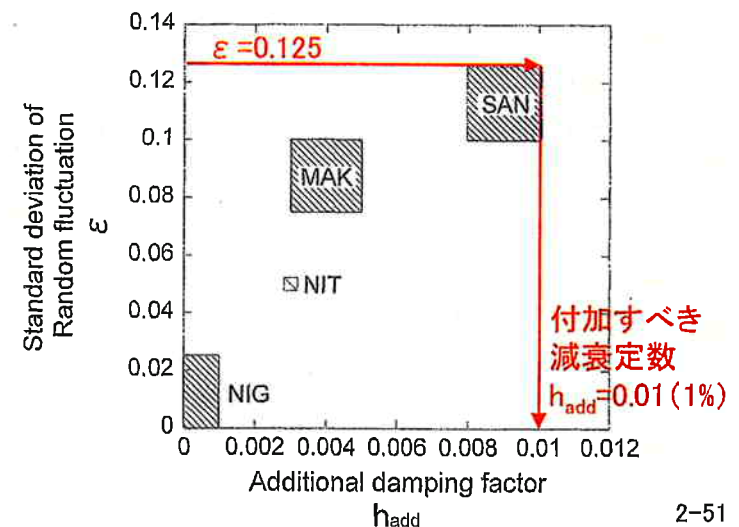
2. 地盤減衰構造の評価

■不均質強度に関する考察

- 佐藤(浩)・他(2007)による平均S波速度2000m/s程度の岩盤サイトでは、地盤同定の結果から、減衰定数の下限値は2%としている。
- もんじゅサイトで評価した不均質強度(標準偏差 ε)は0.165となった。この値は、佐藤(浩)・他(2007)による平均S波速度2000m/s程度の岩盤サイトの不均質強度0.131よりも大きい。
- また、佐藤(浩)(2009)において、速度構造の揺らぎから求めた不均質強度(標準偏差 ε)は付加すべき減衰定数と比例するとしており、不均質強度(標準偏差 ε)が0.125程度の地点では、付加すべき減衰定数を1%程度としている。
- 以上の知見及び検討結果を合わせて考察すると、もんじゅサイトの表層の減衰定数として少なくとも3%程度となりうる。



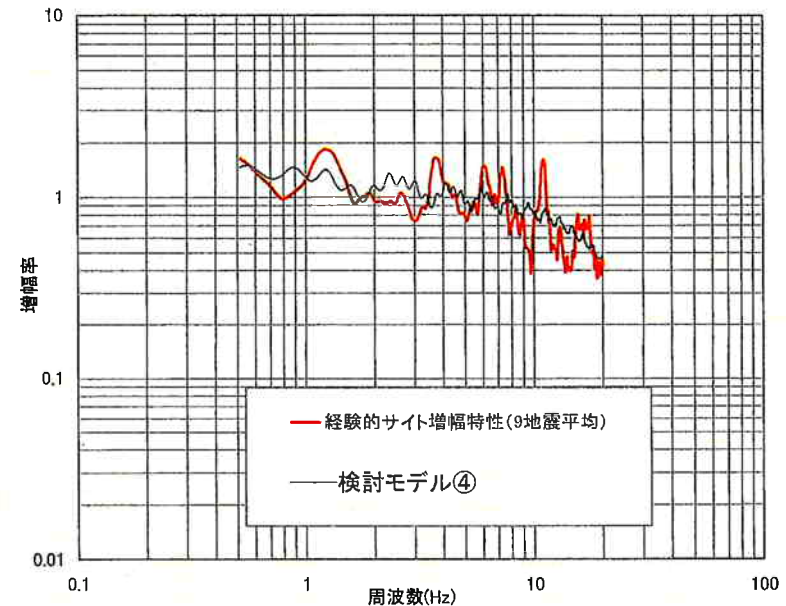
平均S波速度
2000m/s程度の
岩盤サイトにおける
減衰定数の下限値
 $h=0.02$ (2%)



2. 地盤減衰構造の評価

■ 検討結果

- 再評価した経験的サイト増幅特性に適合する地盤モデルについて、残差を指標とし減衰定数を変えて検討した結果、前述の検討モデル③が最もよく適合し、次いでモデル④、⑤であった。
- 表層部の減衰定数3%の物理的意味について、岩盤の減衰定数に関する既往文献の調査により表層部の不均質性と減衰定数の関係に着目し、もんじゅのPS検層データから不均質強度を求めたところ、不均質性による付加減衰を考慮すると3%程度の値となり得る結果が示された。
- 合同Cサブ会合においては、表層部についてPS検層データの検討から示される範囲はその値を用いて、不明なところは保守的な値を用いるべきではないかとのご意見を頂いた。
- 上記の検討結果及び国の委員会審議を踏まえ、もんじゅサイトの地震動評価に用いる地盤モデルとして右図に示すモデルを適用する。



深さ (m)	EL (m)	層	層厚 (m)	密度 ρ (t/m ³)	S波速度 V_s (m/s)	P波速度 V_p (m/s)	Q_s	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

3. 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、以下の方針で設定する。

○浅部地盤構造

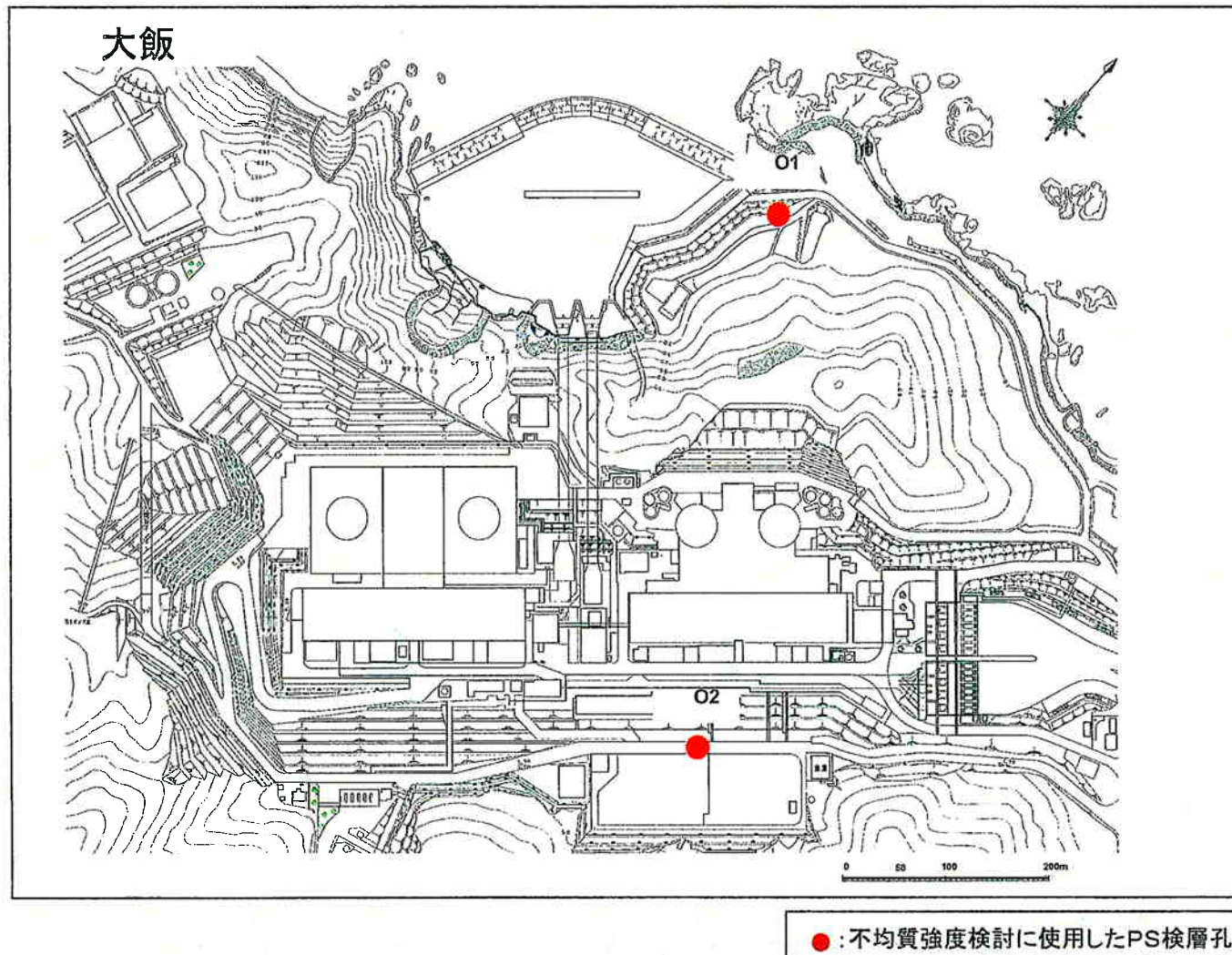
- ・速度構造：敷地内のPS検層結果等より設定
- ・減衰定数：佐藤(浩)他(2007,2009)の考え方を参考にして、敷地内のPS検層結果より得られた速度構造の不均質性データをもとに設定

○深部地盤構造

- ・速度構造：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、これまでの合同Cサブ会合における審議を踏まえ、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

3. 地震動評価に用いる地盤モデルの設定

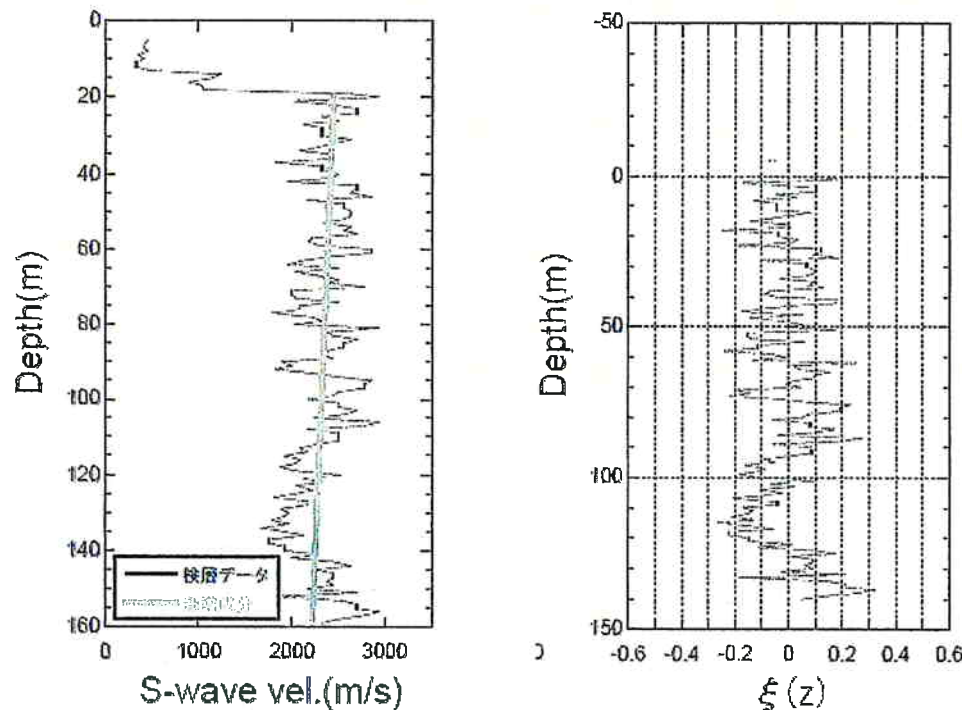
- もんじゅと同様に、地盤の速度構造の不均質性と減衰定数の関係について着目し、不均質強度を評価する。



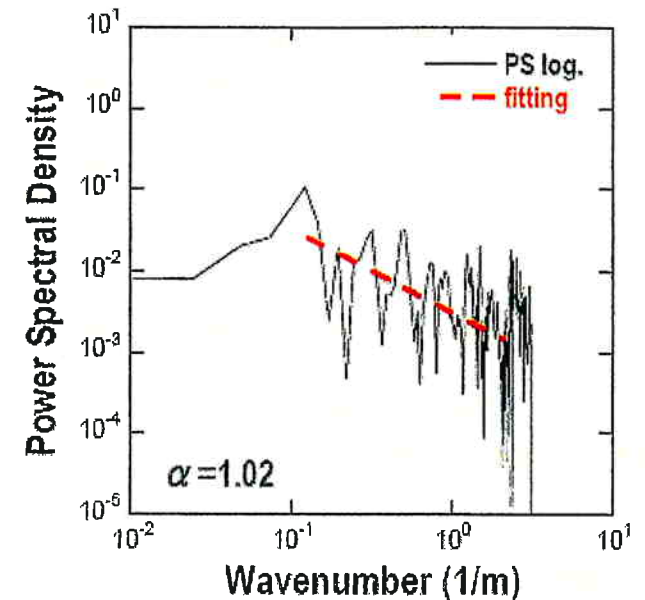
3. 地震動評価に用いる地盤モデルの設定

大飯発電所(○1孔)のPS 検層(S 波速度)による不均質性の統計的性質の推定結果

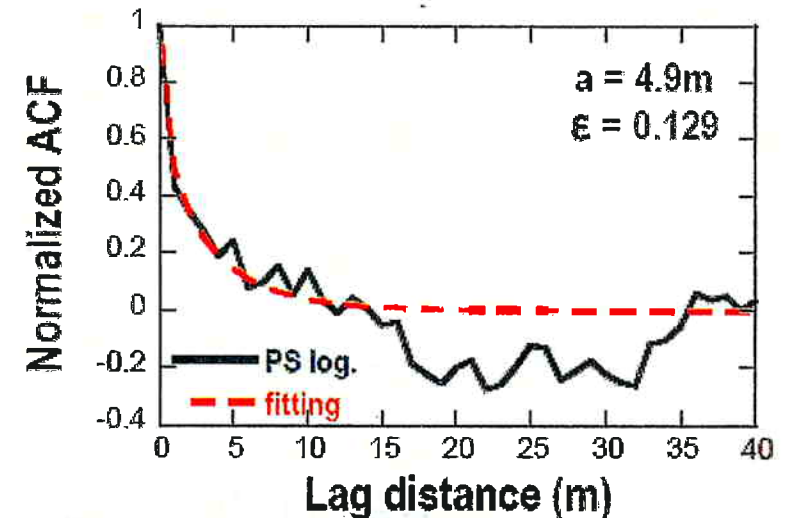
対象 データ 範囲(m)	平均S波 速度 (km/s)	漸増成分 の傾き (1/s)	相関 距離a (m)	Hurst 指数 ν	標準 偏差 ε
GL-19 ~-159	2.34	-1.67	4.9	0.21	0.129



検層データに対するフィッティング結果(左)と
抽出された不均質データ $\xi(z)$ (右)



不均質データのパワースペクトルと
フィッティング結果

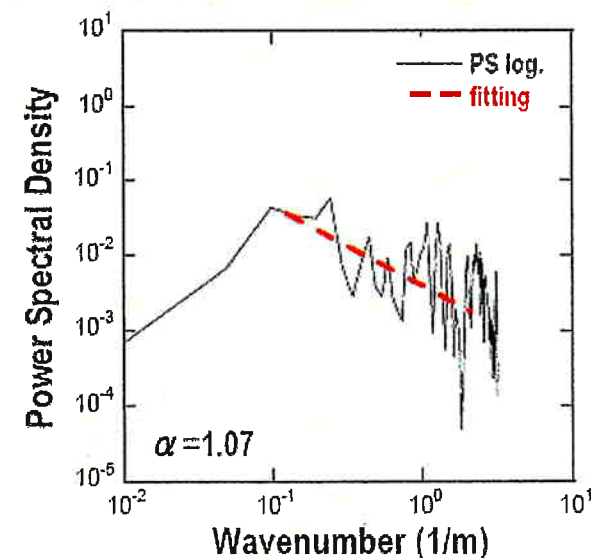


不均質データの自己相関関数とフィッティング結果

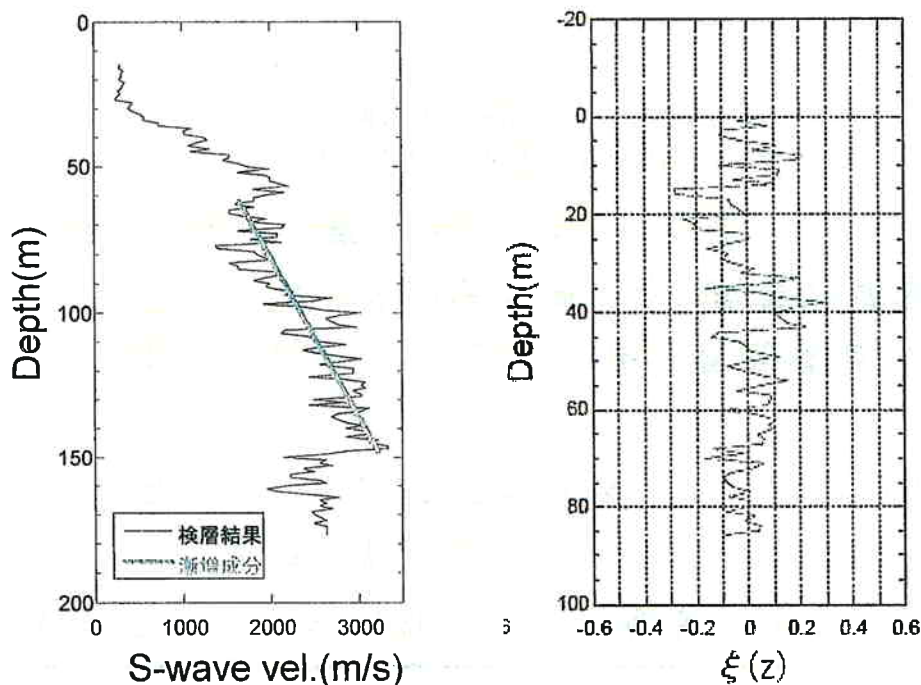
3. 地震動評価に用いる地盤モデルの設定

大飯発電所(O2孔)のPS 検層(S 波速度)による不均質性の統計的性質の推定結果

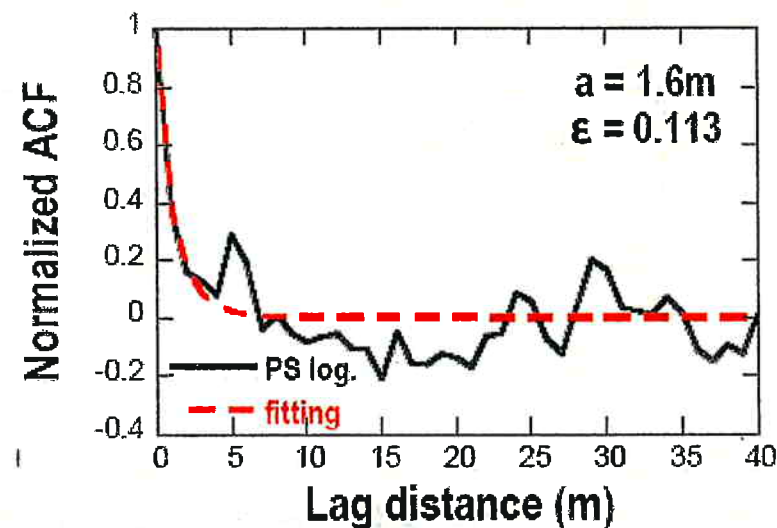
対象 データ 範囲(m)	平均S波 速度 (km/s)	漸増成分 の傾き (1/s)	相関 距離 a (m)	Hurst 指数 ν	標準 偏差 ε
GL-62 ~-148	2.44	18.29	1.6	0.21	0.113



不均質データのパワースペクトルと
フィッティング結果



検層データに対するフィッティング結果(左)と
抽出された不均質データ $\xi(z)$ (右)



不均質データの自己相関関数とフィッティング結果

3. 地震動評価に用いる地盤モデルの設定

■速度構造の不均質性と付加減衰に関する考察

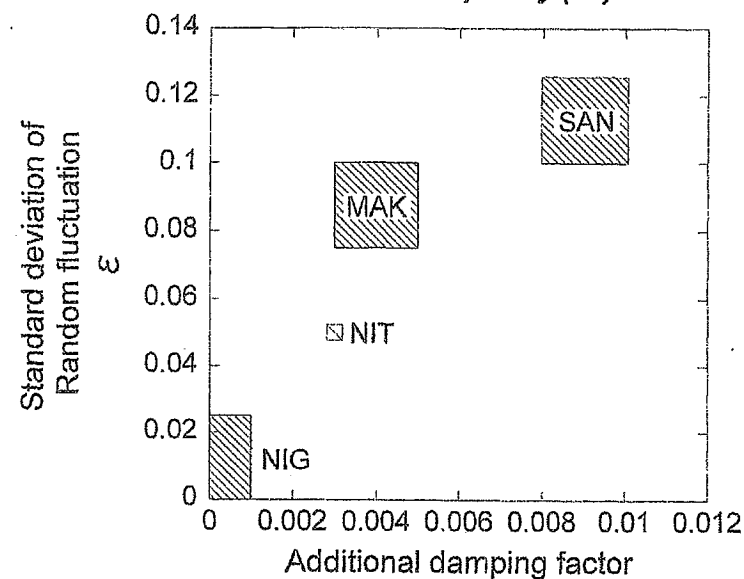
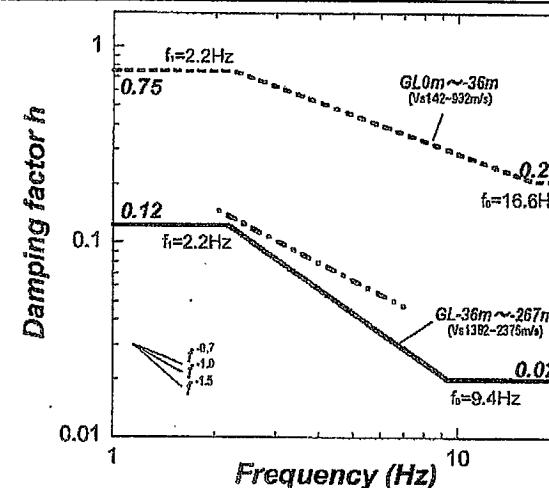
- 不均質強度(標準偏差)は0.11~0.13程度であり、佐藤(2009)の指標を参考にすると、大きめの数字である。
- 佐藤・他(2007)による同等の速度構造の減衰定数の下限値と合わせて考えると表層の減衰定数はもんじゅと同等(3%)と考えられる。

広帯域のサイト増幅特性で考慮すべき
不均質性の標準偏差(強度)の目安

	NIG (NIG010)	NIT (NIG011)	MAK (NIG013)	SAN (NIG014)
Standard deviation ε	0 ~ 0.025	0.05	0.075 ~ 0.1	0.1 ~ 0.125

広帯域のサイト増幅特性で考慮すべき
減衰定数の付加量

	NIG (NIG010)	NIT (NIG011)	MAK (NIG013)	SAN (NIG014)
Additional damping factor h_{add}	0 ~ 0.001	0.003	0.003 ~ 0.005	0.008 ~ 0.01

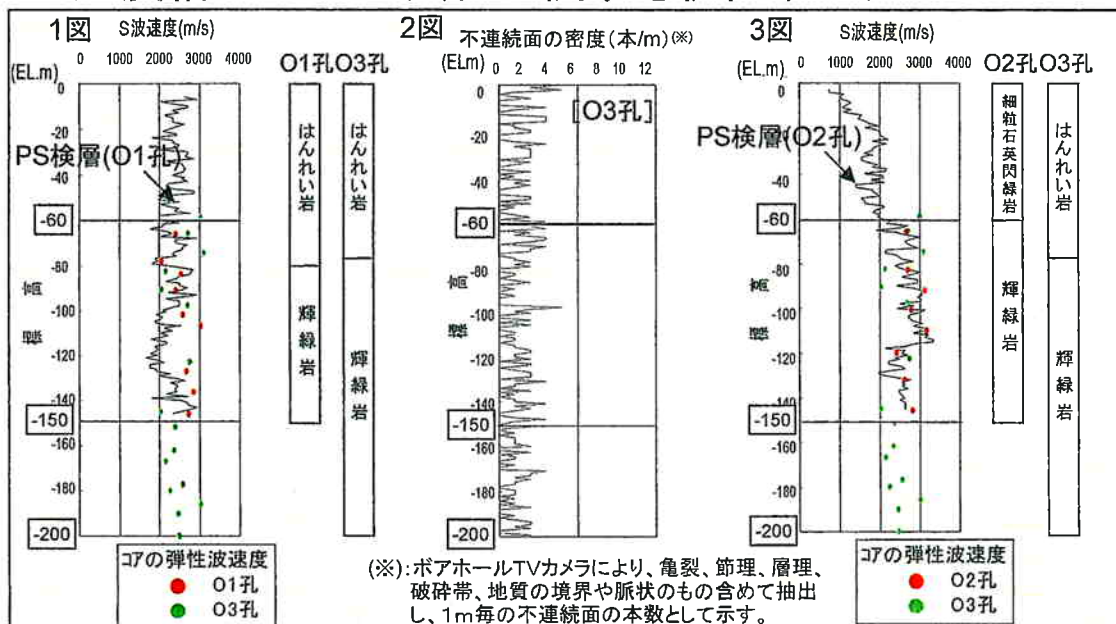


新潟平野地域での広帯域のサイト増幅特性評価において、
考慮すべき深部地盤の不均質性強度(標準偏差 ε)と
それと等価な効果をもたらす減衰定数の付加量 h_{add} の関係

※図・表は佐藤(浩)(2009)より抜粋

3. 地震動評価に用いる地盤モデルの設定

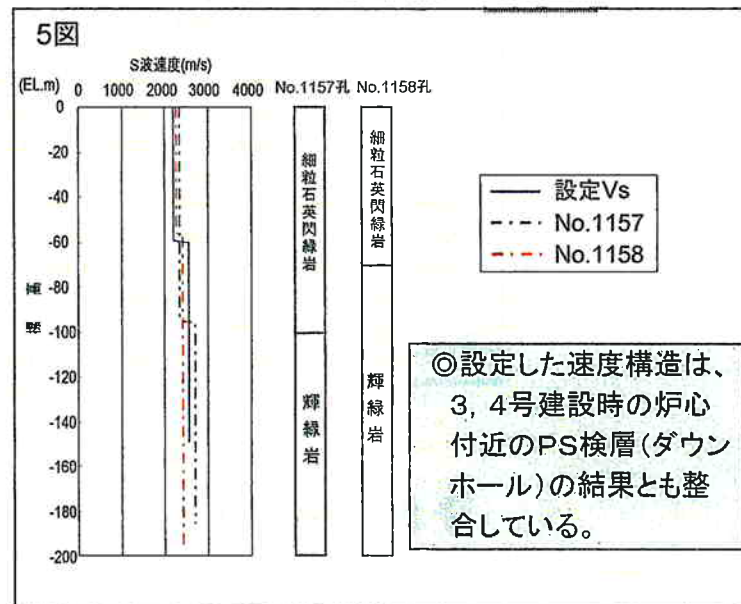
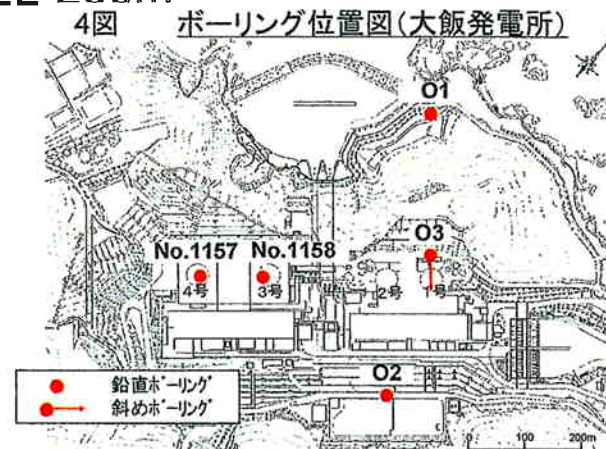
■速度構造の不均質性に関する検討(大飯 EL-150m～EL-200m)



- ◎ボーリングコアの弾性波速度はPS検層の速度を上回る傾向にあり、不連続面の影響等を考慮すれば、両者の分布状況は整合的。(O1孔, O2孔)
- ◎ EL-60m～EL-150m区間のPS検層実施孔(O1孔)とO3孔の岩種は同じで、それぞれのコアの弾性波速度は類似した傾向を示す。(O2孔とO3孔も同様の関係)
- ◎O3孔のコアの弾性波速度はEL-60m～EL-150m区間とEL-150m～EL-200m区間は類似した傾向を示す。
- ◎O3孔のEL-60m～EL-150m区間とEL-150m～EL-200m区間の不連続面の密度分布状況は、類似している。

1表
不連続面の区間平均密度 (本/m)

区 間	O3孔
EL±0m～EL-60m	1.3
EL-60m～EL-150m	1.0
EL-150m～EL-200m	0.9



PS検層(サスペンション)のデータがないEL-150m～EL-200mの区間についても、その他の地質データから、EL-60m～EL-150m区間と類似した速度構造の不均質性を有すると判断。

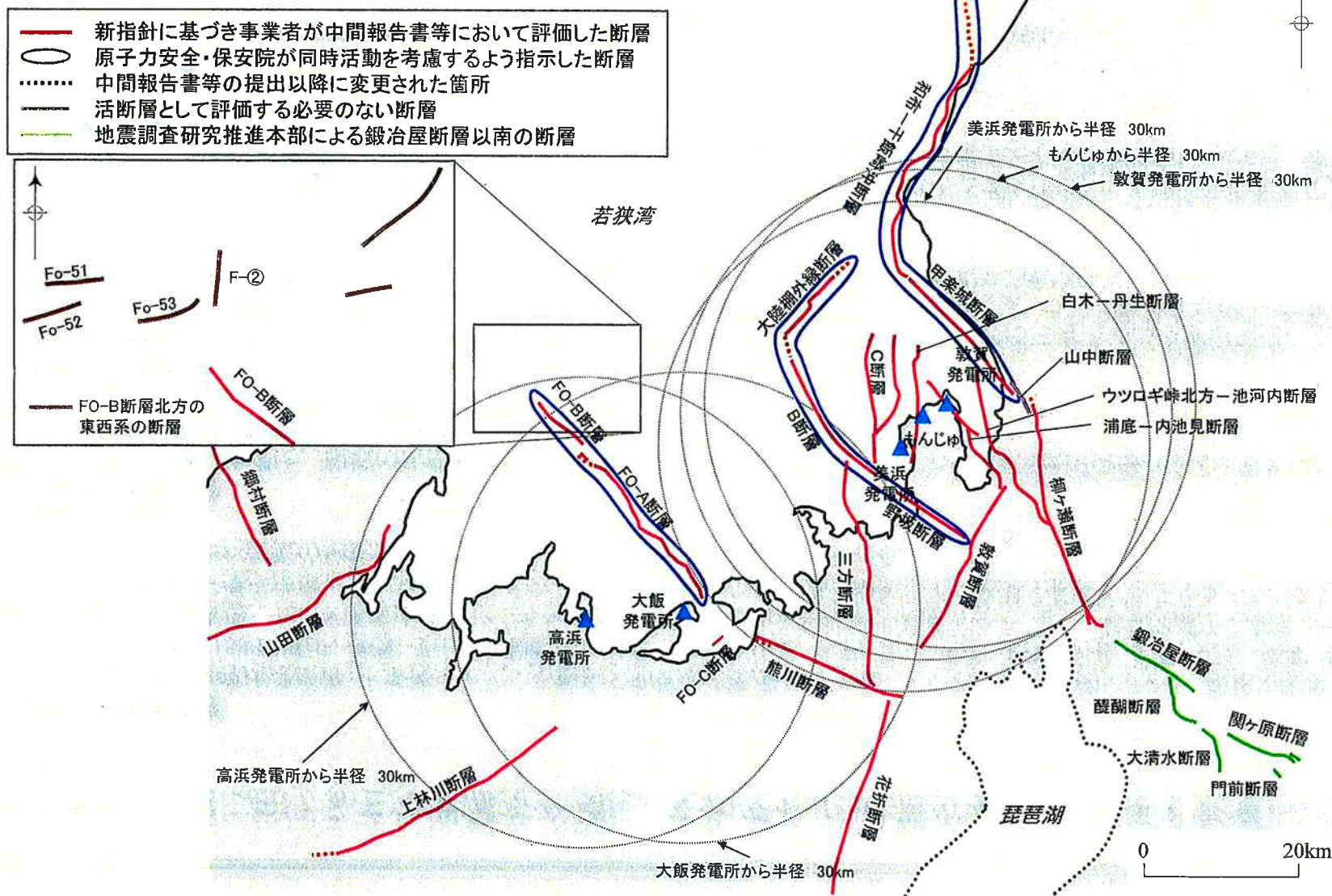
3. 地震動評価に用いる地盤モデルの設定

■断層モデルによる地震動評価のための地盤モデルを以下のとおり設定する

EL (m)	層	層厚 (m)	密度 ρ (t/m^3)	S波速度 V_s (m/s)	P波速度 V_p (m/s)	Q_s	減衰定数 (%)
0							
-60	1	60	2.7	2,200	4,300	16.67	3.0
-200	2	140	2.7	2,560	4,860	16.67	3.0
-630	2'	430	2.7	2,560	4,860	100.00	0.5
-1400	3	770	2.7	2,800	5,130	100.00	0.5
-4000	4	2600	2.7	3,100	5,310	100.00	0.5
	5	—	2.7	3,600	6,270	100.00	0.5

4. 震源を特定して策定する地震動

若狭湾周辺の主な断層の分布



(注)敷地から半径約30kmの範囲の主な断層について図示している。

4-1. 検討用地震の選定

■敷地周辺における主な地震を分類し、それぞれの地震が敷地に及ぼす影響について検討する。

○過去の被害地震

「最新版 日本被害地震総覧」に記載されている震度分布図及び気象庁が公表している震度分布図によると、敷地で震度Ⅴ以上であった地震には、1586年畿内・東海・東山・北陸諸道の地震、1662年山城・大和・河内・和泉・摂津・丹後・若狭・近江・美濃・伊勢・駿河・三河・信濃の地震、1891年濃尾地震、1927年北丹後地震及び1963年越前岬沖地震がある。また、被害地震から想定される地震について、規模 M と震央距離 Δ 及び敷地で想定される震度の関係から、上記5地震以外に敷地で震度Ⅴ以上であったと考えられる被害地震として、745年美濃の地震及び1185年近江・山城・大和の地震が挙げられる。

○内陸地殻内地震

震度Ⅴ以上の被害地震は、陸域の活断層との関連や地震の発生深さからして、いずれも内陸地殻内地震であると考えられる。抽出された被害地震と活断層について、規模と距離の観点から敷地への影響を検討する。

○プレート間地震

敷地周辺地域では、プレート間地震の可能性があるものとして、1855年遠州灘の地震や1906年三重県沖の地震が発生している。また、南海トラフに沿って $M8$ クラスのプレート間地震が繰り返し発生しているが、これらの地震はいずれも敷地から200kmを超える範囲で発生しており、敷地で震度Ⅴ以上が想定される地震はないことから、敷地へ及ぼす影響は大きい。

○海洋プレート内地震

敷地周辺地域では、沈み込んだフィリピン海プレート内で発生したと考えられる陸域のやや深い地震として1994年滋賀県中東部の地震等が該当し、それらの地震の多くが近畿中南部で発生しており、敷地で震度Ⅴ以上が想定される地震はないことから、敷地へ及ぼす影響は大きい。

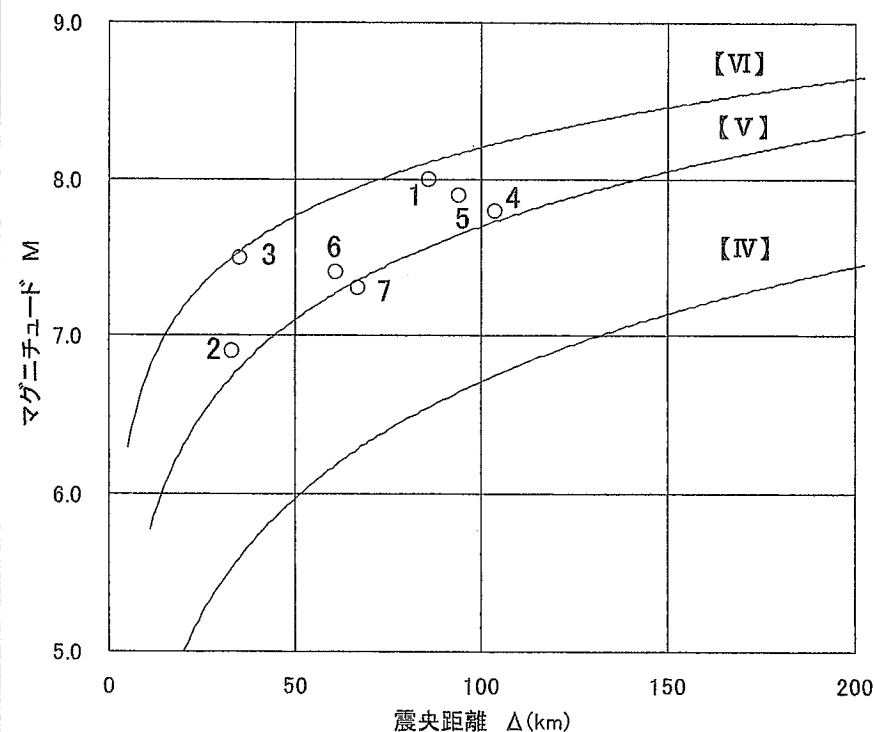
○その他の地震

敷地周辺地域では、上記3種類の地震のいずれにも分類されない特徴的な地震は発生していない。

4-1. 検討用地震の選定

■ 敷地に大きな影響を及ぼす被害地震

番号	年月日	規模 M	震央 距離 (km)	地名 (地震名)
1	1891.10.28	8.0	86	愛知県・岐阜県 (濃尾地震)
2	1963. 3.27	6.9	33	福井県沖 (越前岬沖地震)
3	1662. 6.16	7.5	35	山城・大和・河内・和泉・摂 津・丹後・若狭・近江・美濃・ 伊勢・駿河・三河・信濃
4	1586. 1.18	7.8	104	畿内・東海・東山・北陸諸道
5	745. 6. 5	7.9	94	美濃
6	1185.8.13	7.4	61	近江・山城・大和
7	1927. 3. 7	7.3	67	京都府北西部 (北丹後地震)



【Ⅳ】、【Ⅴ】、【Ⅵ】は気象庁震度階級で、震度の境界線は村松(1969)、勝又・徳永(1971)による

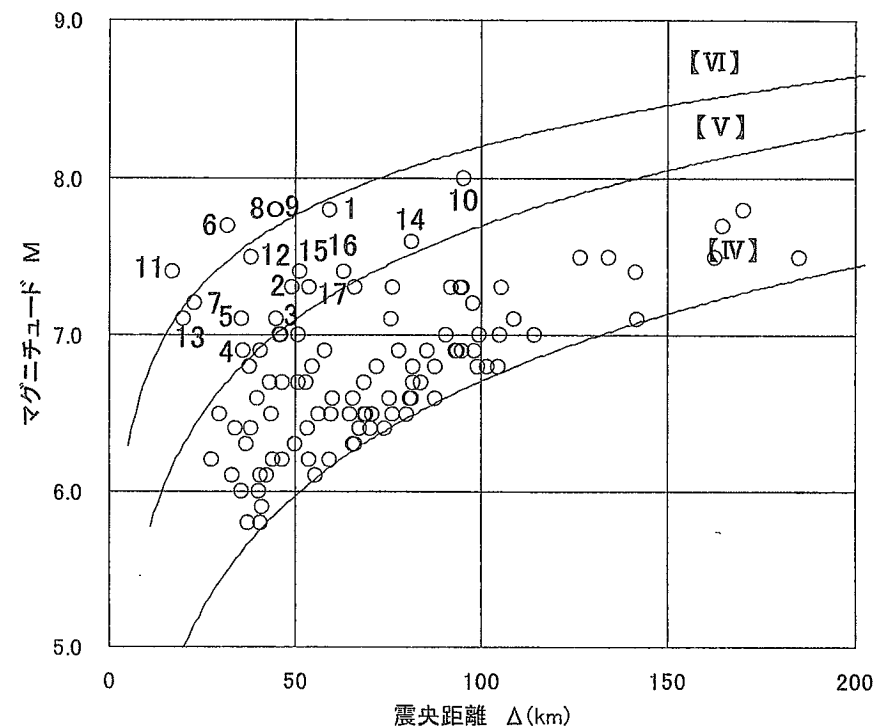
敷地に大きな影響を及ぼす被害地震のM-Δ図

※1922年以前の歴史地震の地震規模は「最新版 日本被害地震総覧」での中央値を採用

4-1. 検討用地震の選定

■ 敷地に大きな影響を及ぼす活断層の地震

番号	断層名	長さ (km)	規模 M	震央 距離 (km)
1	和布-干飯崎沖~甲楽城断層	60	7.8	59
2	柳ヶ瀬断層	31	7.3	49
3	ウツロギ峠北方~池河内断層	23	7.1	45
4	C断層	18	6.9	36
5	敦賀断層	23	7.1	36
6	大陸棚外縁~B~野坂断層	49	7.7	32
7	三方断層	27	7.2	23
8	花折断層	58	7.8	44
9	琵琶湖西岸断層系	60	7.8	45
10	濃尾地震断層系	80	8.0	95
11	FO-A~FO-B断層	35	7.4	17
12	上林川断層	40	7.5	38
13	熊川断層	23	7.1	20
14	有馬-高槻構造線	45	7.6	81
15	山田断層	33	7.4	51
16	郷村断層	34	7.4	63
17	FGA3東部	29	7.3	54

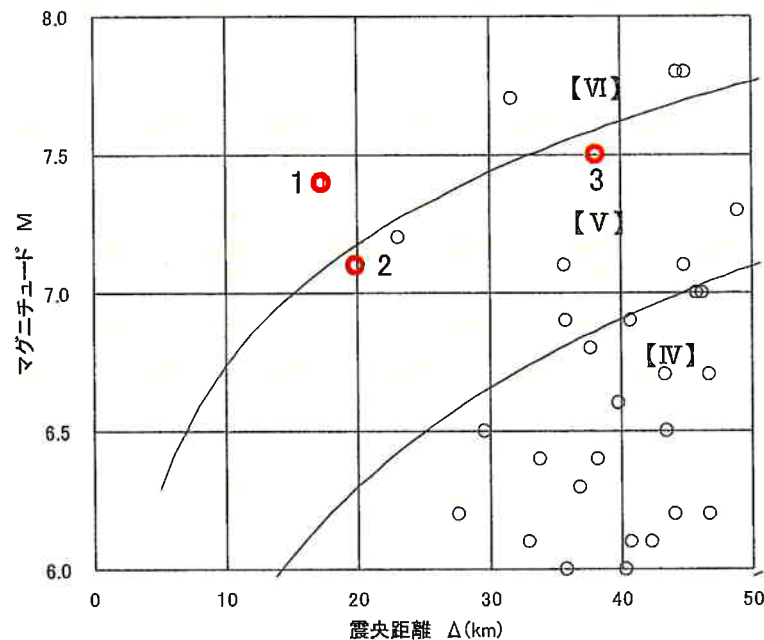


【IV】、【V】、【VI】は気象庁震度階級で、震度の境界線は村松(1969)、勝又・徳永(1971)による

敷地に大きな影響を及ぼす活断層のM-Δ図

4-1. 検討用地震の選定

■敷地周辺における主な地震を分類し、それぞれの地震が敷地に及ぼす影響について検討した結果、敷地へ及ぼす影響の大きい地震として、内陸地殻内地震から以下の3地震を選定する。



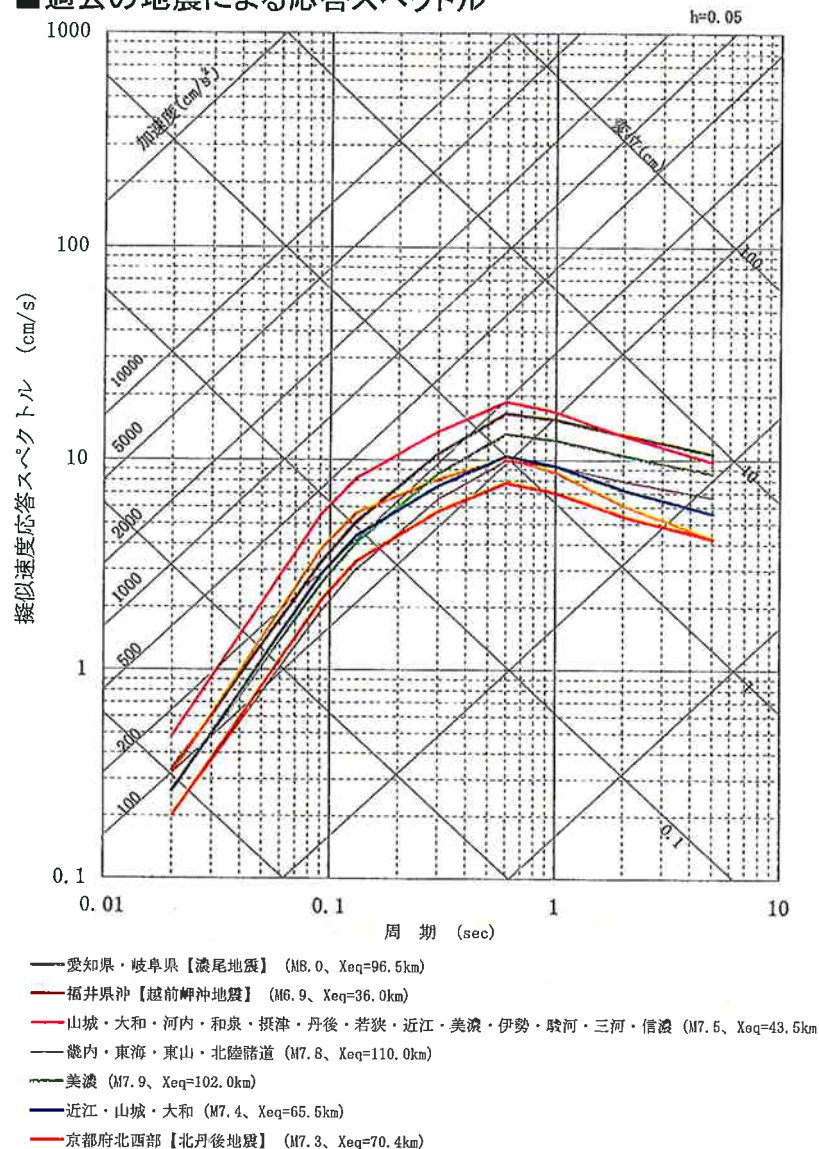
【IV】、【V】、【VI】は気象庁震度階級で、震度の境界線は村松(1969)、勝又・徳永(1971)による

番号	選定した検討用地震	長さ	規模 M
1	FO-A～FO-B断層	35km	7.4
2	熊川断層	23km	7.1
3	上林川断層	40km	7.5

■プレート間地震、海洋プレート内地震及びその他の地震については、敷地に大きな影響を及ぼすと考えられる地震はないため、検討用地震としては選定しない。

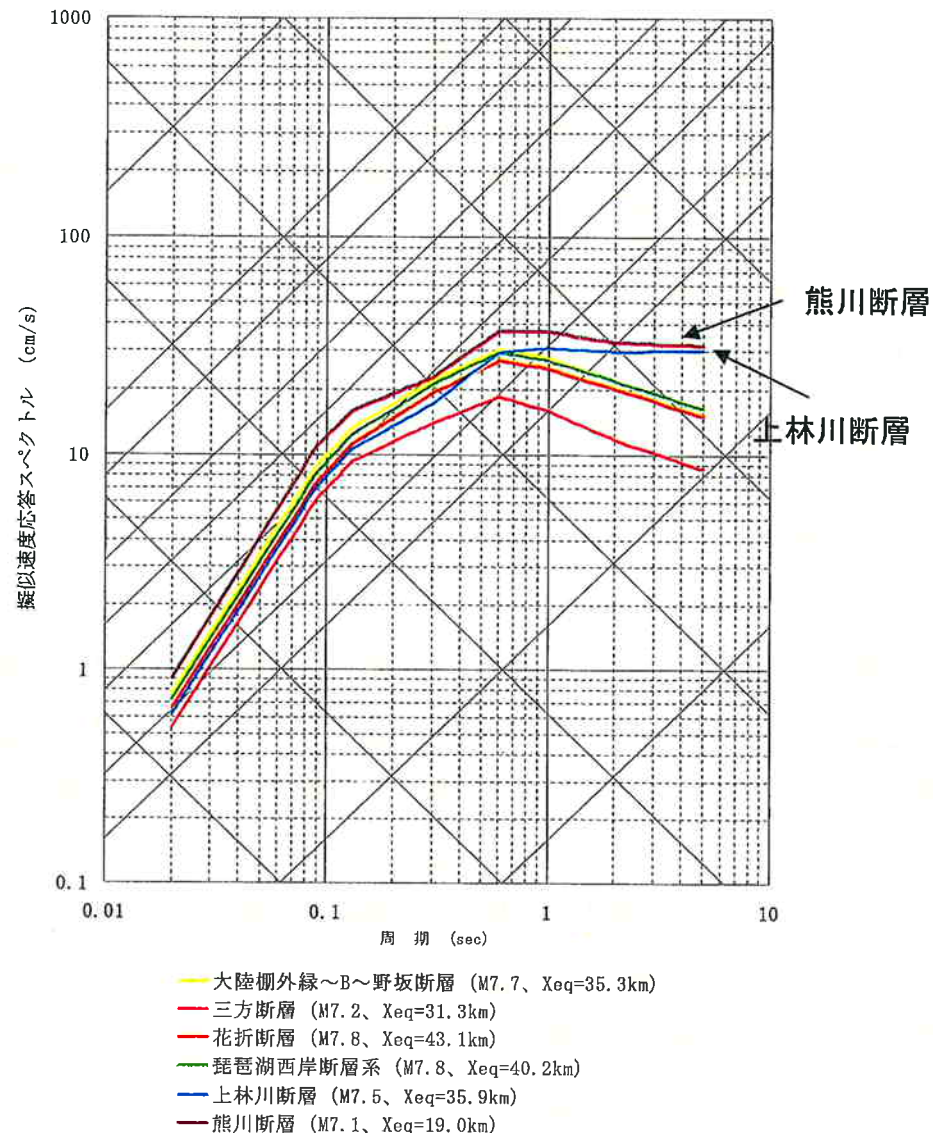
4-1. 検討用地震の選定

■過去の地震による応答スペクトル



※ X_{eq} は円形断層を仮定して算定

■活断層による地震の応答スペクトル



※ X_{eq} は矩形断層を仮定して算定

4-1. 検討用地震の選定

■下記の活断層による地震を検討用地震として選定

検討用地震	長さ	地震規模※1
FO-A～FO-B断層	35km	7.4
熊川断層	18km	7.1※2
上林川断層	26km以上	7.5※3

※1:地震規模は松田式より算出

※2:熊川断層については、断層モデルの長さ22.9kmとして評価

※3:上林川断層については、断層モデルの長さ39.5kmとして評価

4-2. 地震動評価手法

■評価方法

○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
- ・検討用地震毎に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
- ・地震規模は松田式により算定

○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、短周期レベルを1.5倍したケースを精査して再計算

4-2. 地震動評価手法

○応答スペクトルに基づく地震動評価

■検討用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

$5.5 \leq M_j \leq 7.0$ (M_j : 気象庁マグニチュード)

$h \leq 60\text{km}$ (h : 震源深さ)

$28\text{km} \leq X_{eq} \leq 202\text{km}$ (X_{eq} : 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

$5.4 \leq M_j \leq 8.1$ (M_j : 気象庁マグニチュード)

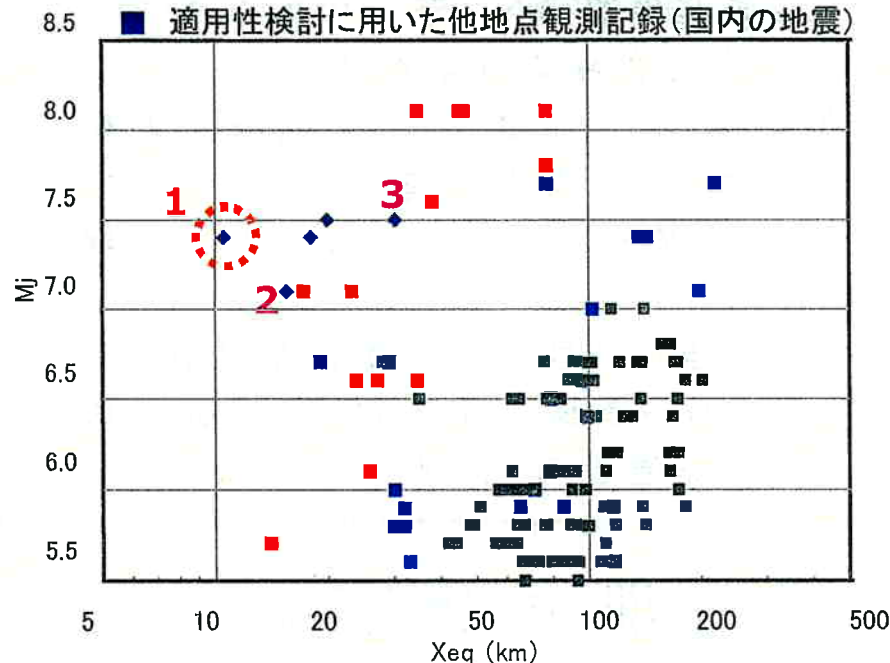
$h \leq 60\text{km}$ (h : 震源深さ)

$14\text{km} \leq X_{eq} \leq 218\text{km}$ (X_{eq} : 等価震源距離)

■ 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)



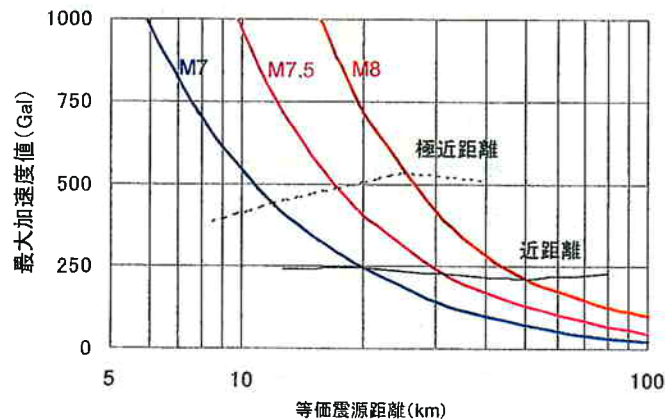
No.	検討用地震		Mj	Xeq (km)
大飯	1	FO-A～FO-B断層	7.4	10.5
	2	熊川断層	7.1	15.4
	3	上林川断層	7.5	30.2

平成21年5月22日原安委意見交換会資料(東京電力)に加筆

4-2. 地震動評価手法

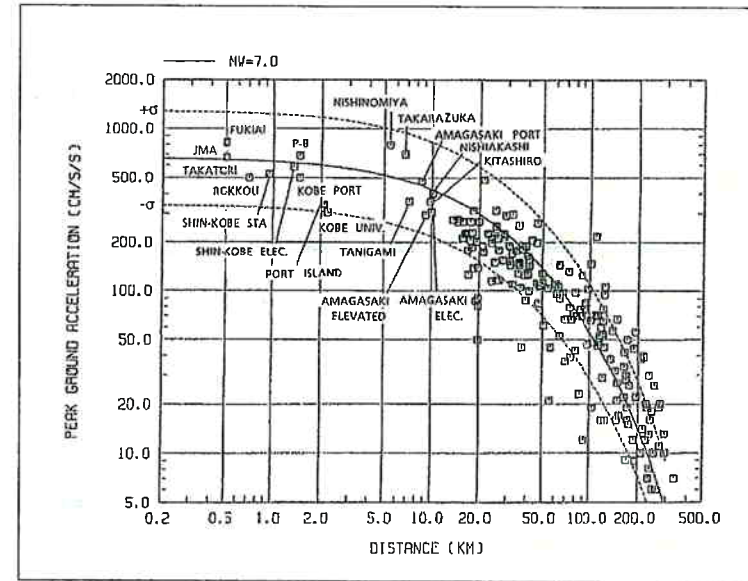
○応答スペクトルに基づく地震動評価

- 等価震源距離と極近距離との乖離が大きく、回帰式を策定するうえ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、大きく外挿することになる
- FO-A~FO-B断層(大飯)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、その妥当性を検証するため、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, 1997)

4-2. 地震動評価手法

○応答スペクトルに基づく地震動評価

■ 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、FO-A～FO-B断層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	$100 \leq V_{s30} \leq 1400 \text{m/s}$ (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	・ $V_{s30} > 1100 \text{m/s}$ ・ $V_{s30} > 600 \text{m/s}$ 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	$V_{s30} = 500 \text{m/s}$ 程度の工学的 基盤	インピーダンス比を乗じることに より補正
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 V_{s30} の平均値は720m/s	インピーダンス比を乗じることに より補正
Abrahamson and Silva(2008)	国内外	内陸	4.27～7.9	200km以内	$100 \leq V_{s30} \leq 2000 \text{m/s}$	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	$150 \leq V_{s30} \leq 1500 \text{m/s}$	原論文の評価式を用いて補正
Chiou and Youngs(2008)			4.27～7.9	70km以内	$100 \leq V_{s30} \leq 2000 \text{m/s}$	原論文の評価式を用いて補正
Idriss(2008)			4.5～7.7	200km以内	$450 \leq V_{s30} \leq 900 \text{m/s}$	原論文の評価式を用いて補正

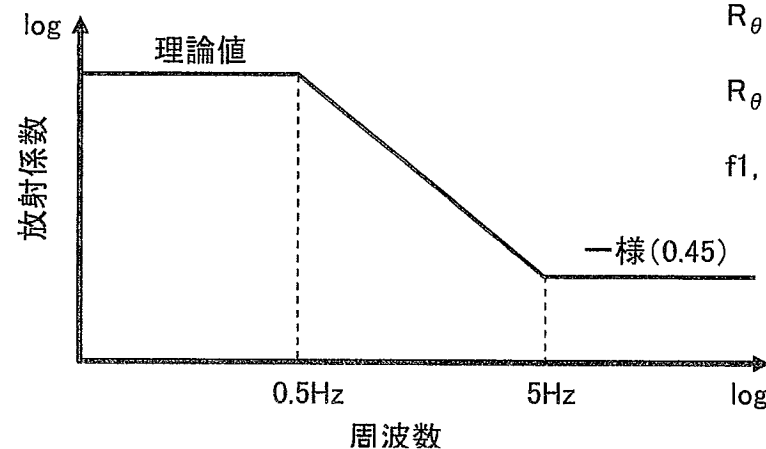
※ V_{s30} : 地表から深さ30mまでの平均S波速度(大飯は $V_{s30} = 2200 \text{m/s}$)

4-2. 地震動評価手法

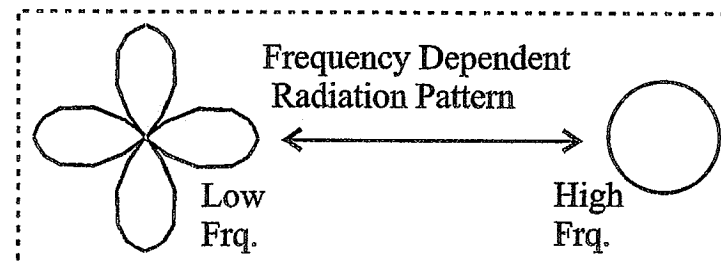
■統計的グリーン関数法における放射係数の設定

SH波及びSV波の放射特性を、釜江・他(1990)による振動数に依存するモデル(下式)を用いた。ここで、パラメータ f_1, f_2 は釜江・他(1990)に従い、 $f_1=0.5\text{Hz}$ 、 $f_2=5\text{Hz}$ と設定する。

$$R_{\theta\phi}(f) = \frac{(\log(f_2) - \log(f))R_{\theta\phi 0} + (\log(f) - \log(f_1))R_{\theta\phi m}}{\log(f_2) - \log(f_1)}$$

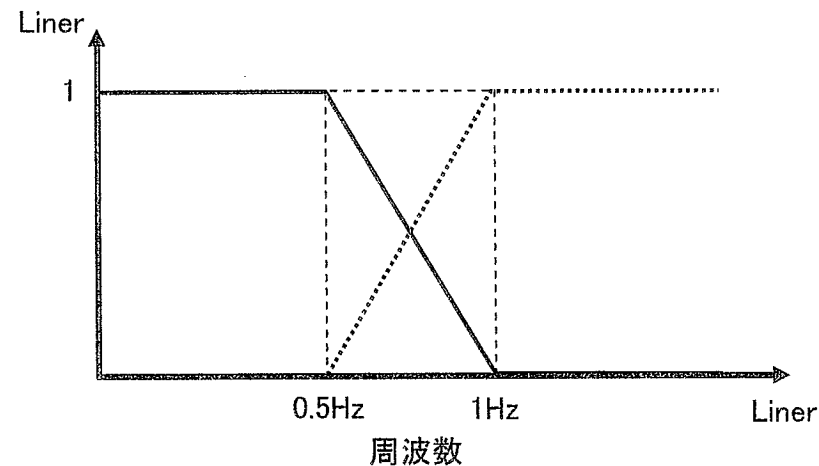


$R_{\theta\phi 0}$: 震源とサイトの位置関係及びすべり方向から理論的に評価される放射係数
 $R_{\theta\phi m}$: 高周波数で等方放射として平均化された放射係数
 f_1, f_2 : 理論的な放射から等方的な放射へと遷移する周波数帯



4-2. 地震動評価手法

■統計的グリーン関数法と理論的方法の結果のハイブリッドのフィルター
遷移周波数帯(0.5Hz~1Hz)で相補的に低減するフィルター(マッチングフィルター)を
施した。



マッチングフィルターの形状

4-3. 地震動評価結果

- 各パラメータについて、地震動への影響の程度を検討し、敷地に大きな影響を与えると考えられるパラメータに対して不確かさを考慮

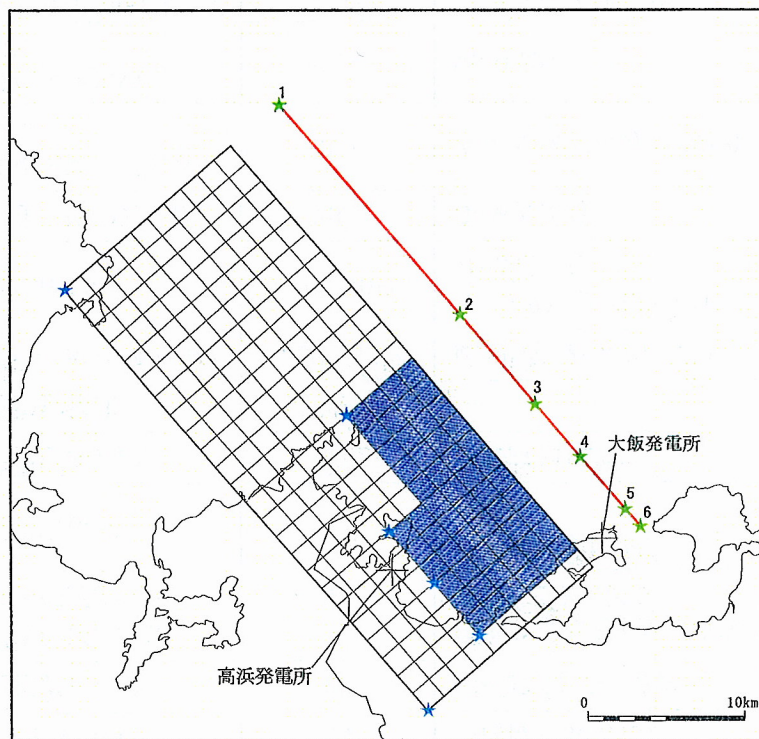
FO-A～FO-B断層の地震動評価に考慮する不確かさ

	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	レスピ平均	
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	レスピ平均	
短周期レベル	4km	90°	敷地近傍に配置	複数設定	レスピ平均 × 1.5倍	中越沖地震 知見反映
断層傾斜角の不確かさを考慮	4km	75°	敷地近傍に配置	複数設定	レスピ平均	

 : 不確かさを考慮したパラメータ

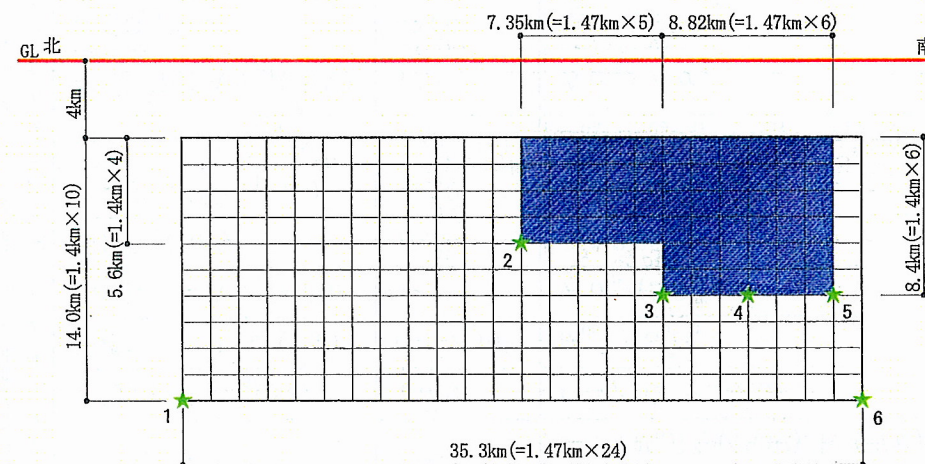
4-3. 地震動評価結果

■ FO-A～FO-B断層のモデル図



i) 断層配置図

★：破壊開始点



ii) 断面図

★：破壊開始点

※モデル図は基本ケースを代表して示す

4-3. 地震動評価結果

■FO-A～FO-B断層のパラメータ

断層パラメータ	パラメータ	設定方法
断層長さL(km)	35	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)	4	微小地震の発生及び地下構造を参考に設定
断層下端深さ(km)	18	
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)	494.2	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)	1.36 × 10 ¹⁹	M ₀ ={S/(4.24 × 10 ⁻¹¹)} ^{2.0}
剛性率(N/m ²)	3.5 × 10 ¹⁰	μ = ρ β ² , ρ = 2.7g/cm ³ , β = 3.6km/s
平均すべり量D(cm)	78.6	D=M ₀ /(μ S)
平均応力降下量Δσ(MPa)	3.0	Δσ=(7π ^{1.5} /16)(M ₀ /S ^{1.5})
破壊伝播速度Vr(km/s)	2.59	Vr=0.72 β
立ち上がり時間Tr(sec)	1.04	Tr=2.03 × 10 ⁻⁹ M ₀ ^{1/3}
高周波限界遮断周波数fmax(Hz)	8.3	香川ほか、2003
短周期レベルA(Nm/s ²)	1.26 × 10 ¹⁹	A=2.46 × 10 ¹⁷ × M ₀ ^{1/3}
Q値	50f ^{1.1}	佐藤ほか、2007

	断層パラメータ	パラメータ	設定方法
全アスベリテイ	面積S _a (km ²)	117.01	S _a =π r ² , r=(7π M ₀ β ²)/(4AaR), R=(S/π) ^{0.5}
	平均すべり量D _a (cm)	157.9	D _a =γ _D D, γ _D =2.01
	地震モーメントM _{0a} (Nm)	6.47 × 10 ¹⁸	M _{0a} =μ S _a D _a
	応力降下量Δσ _a (MPa)	12.7	Δσ _a =(S/S _a)Δσ
大アスベリテイ	面積S _{a1} (km ²)	78.00	S _{a1} =2/3S _a
	平均すべり量D _{a1} (cm)	175.0	D _{a1} =M _{0a1} /(μ S _{a1})
	地震モーメントM _{0a1} (Nm)	4.78 × 10 ¹⁸	M _{0a1} =M _{0a} S _{a1} ^{1.5} /(S _{a1} ^{1.5} +S _{a2} ^{1.5})
	応力降下量Δσ _{a1} (MPa)	12.7	Δσ _{a1} =Δσ _a
小アスベリテイ	面積S _{a2} (km ²)	39.00	S _{a2} =1/3S _a
	平均すべり量D _{a2} (cm)	123.7	D _{a2} =M _{0a2} /(μ S _{a2})
	地震モーメントM _{0a2} (Nm)	1.69 × 10 ¹⁸	M _{0a2} =M _{0a} S _{a2} ^{1.5} /(S _{a1} ^{1.5} +S _{a2} ^{1.5})
	応力降下量Δσ _{a2} (MPa)	12.7	Δσ _{a2} =Δσ _a
背景領域	面積S _b (km ²)	337.19	S _b =S-S _a
	平均すべり量D _b (cm)	53.9	D _b =M _{0b} /(μ S _b)
	地震モーメントM _{0b} (Nm)	7.12 × 10 ¹⁸	M _{0b} =M ₀ -M _{0a}
	実効応力σ _b (MPa)	2.5	σ _b =0.2Δσ _a

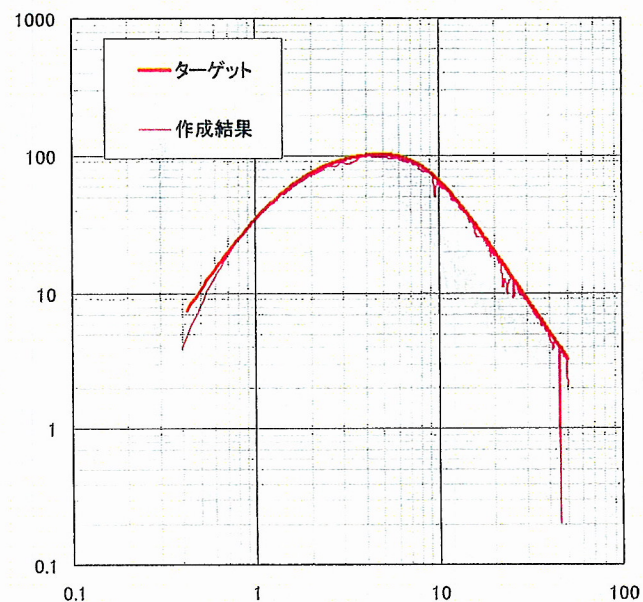
※パラメータは基本ケースを代表して示す

4-3. 地震動評価結果

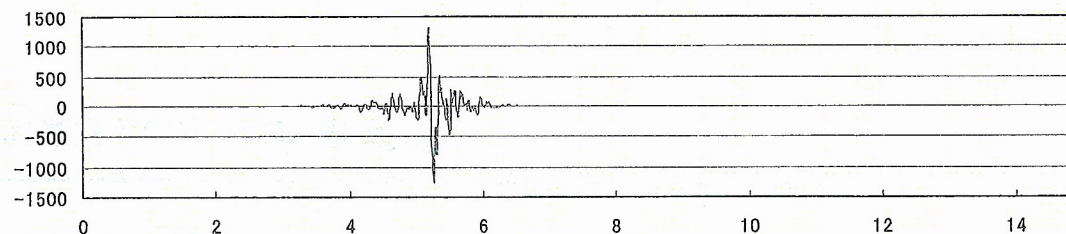
■統計的グリーン関数法で用いる要素地震の振幅及び経時特性(時刻歴の包絡関数)

要素地震波の作成結果(FO-A～FO-B断層のSH波の例)

作成条件(FO-A～FO-B断層)	
地震モーメント M_0	$2.1 \times 10^{16} \text{N} \cdot \text{m}$
応力降下量 $\Delta \sigma_a$	12.9MPa
高周波限界遮断周波数 f_{max}	8.3Hz
要素断層面積 S	2.058km^2 (1.4km × 1.47km)
震源距離 R	1km



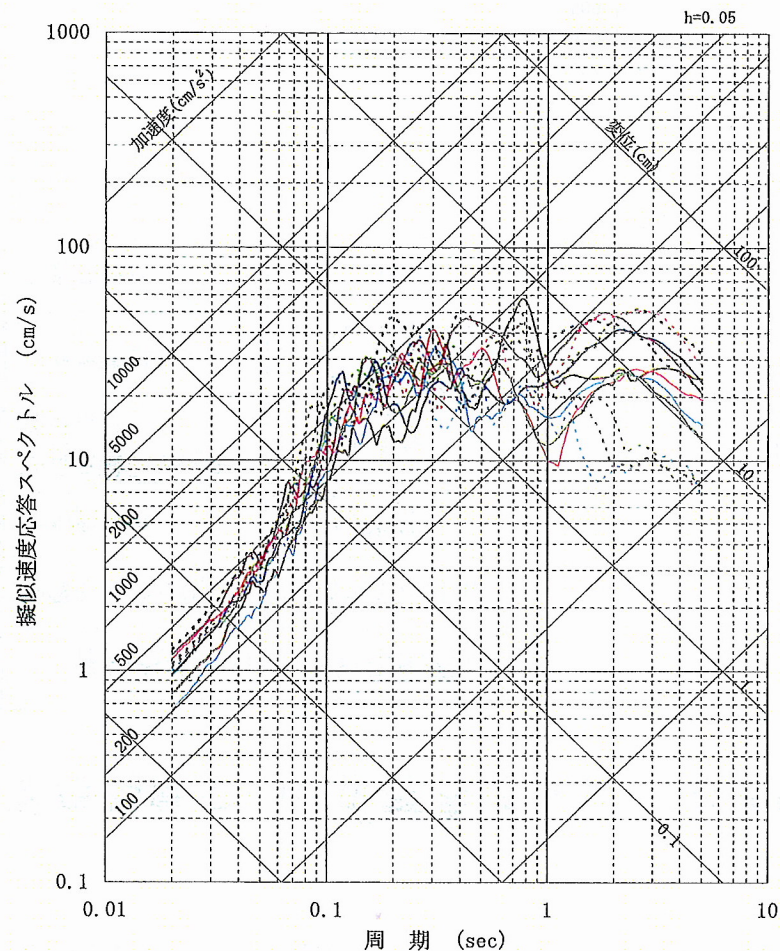
加速度震源スペクトル



加速度時刻歴波形

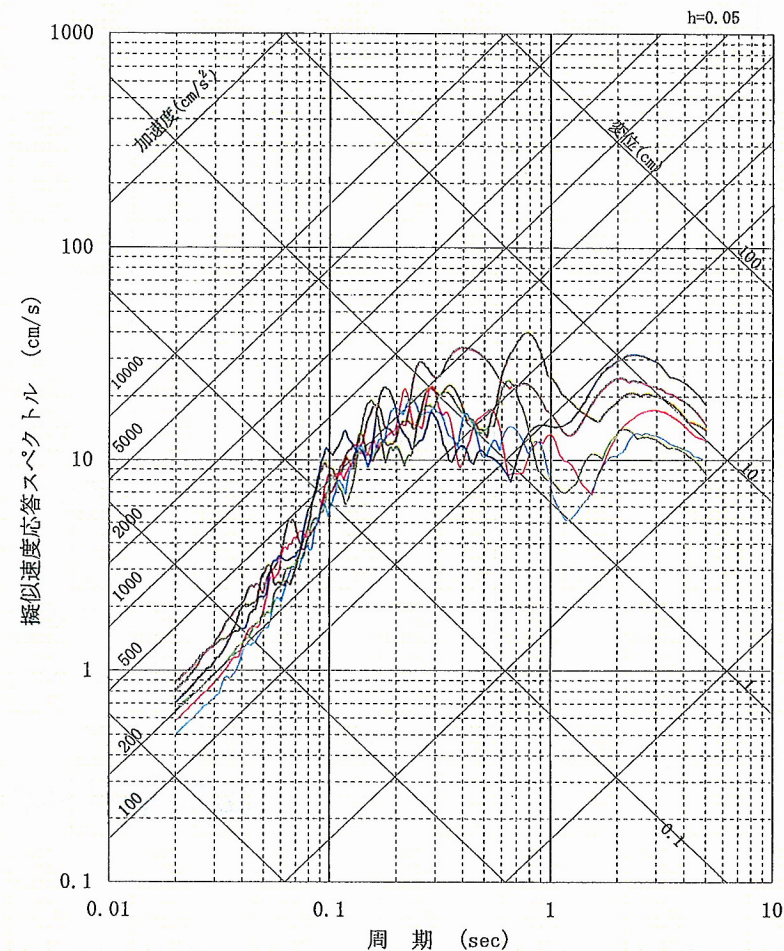
4-3. 地震動評価結果

■ FO-A~FO-B断層:上端深さ4km(大飯発電所)



— 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 — 破壊開始点-6

水平(実線: NS方向、破線: EW方向)

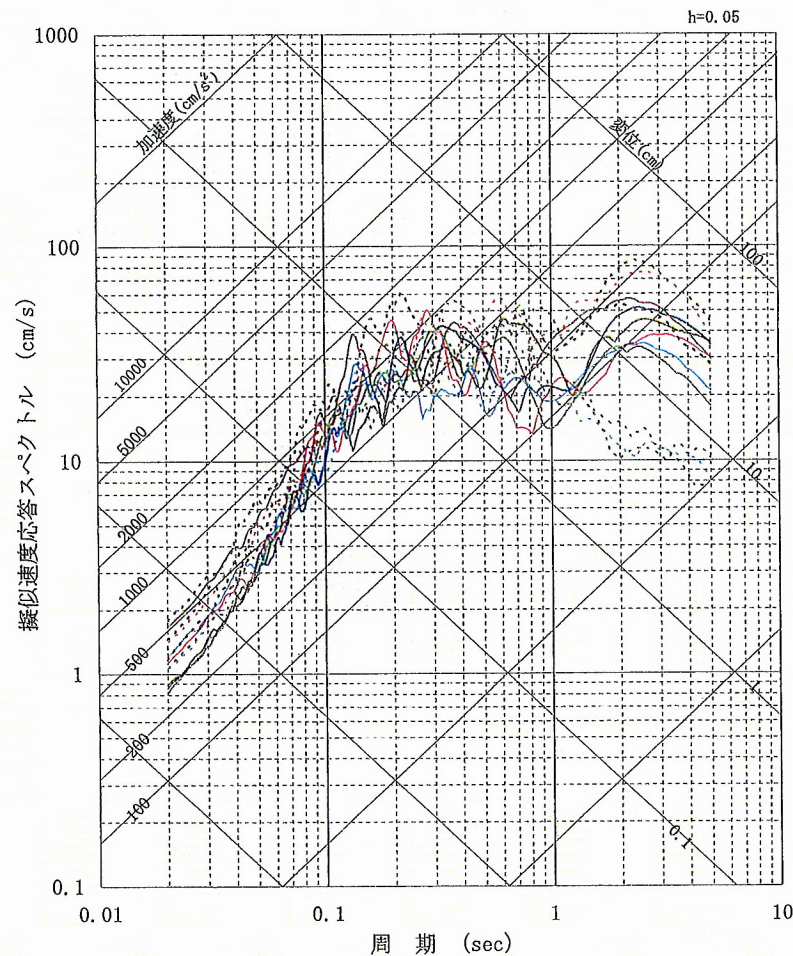


— 破壊開始点-1 — 破壊開始点-2 — 破壊開始点-3
 — 破壊開始点-4 — 破壊開始点-5 — 破壊開始点-6

鉛直

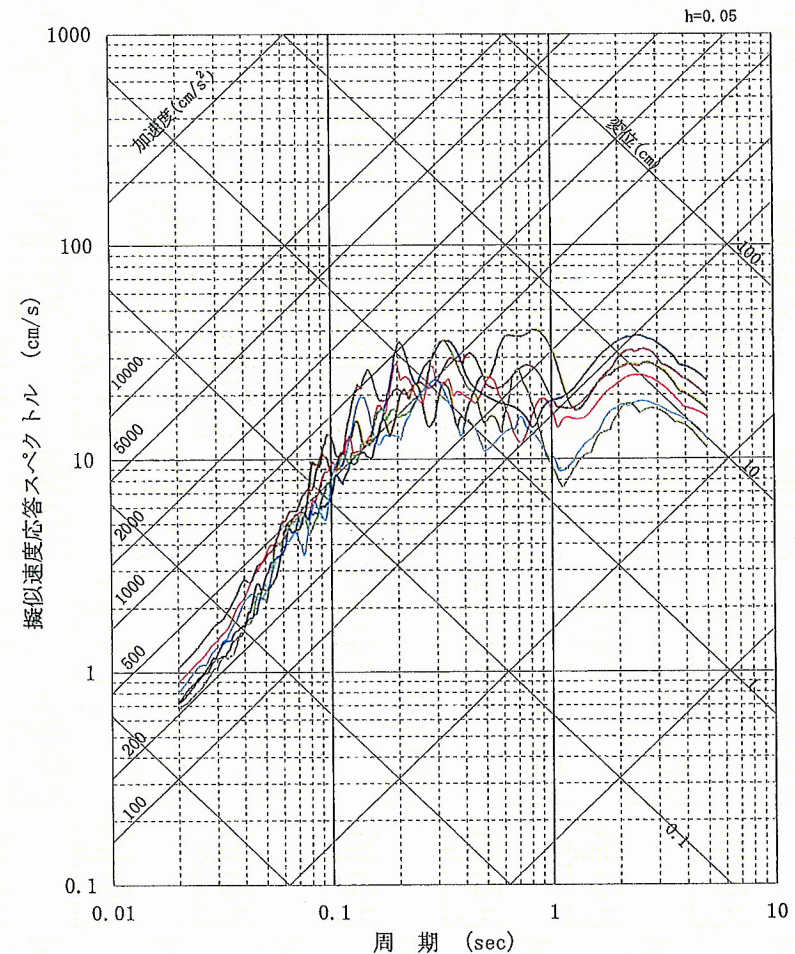
4-3. 地震動評価結果

■FO-A~FO-B断層:上端深さ3km(大飯発電所)



— 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 — 破壊開始点-6

水平(実線: NS方向、破線: EW方向)

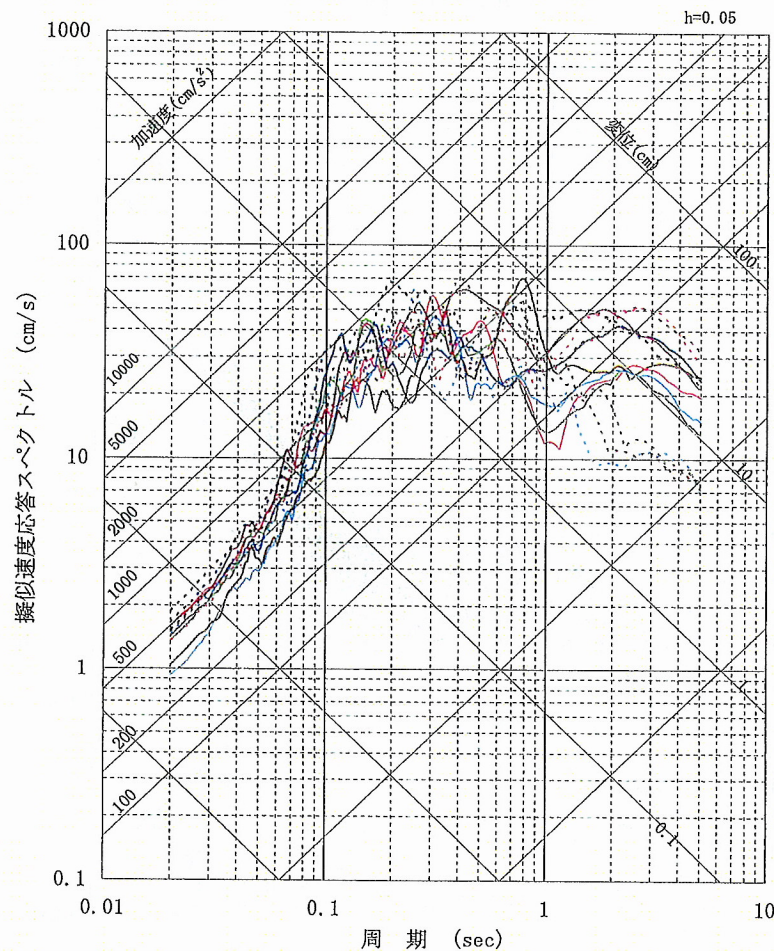


— 破壊開始点-1 — 破壊開始点-2 — 破壊開始点-3
 — 破壊開始点-4 — 破壊開始点-5 — 破壊開始点-6

鉛直

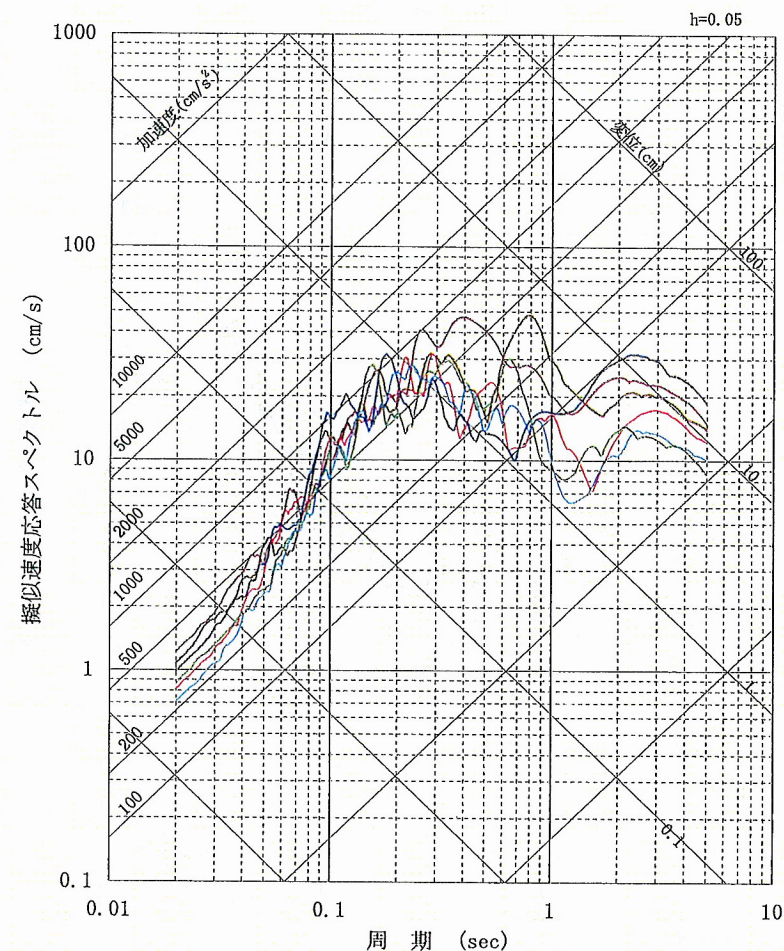
4-3. 地震動評価結果

■ FO-A~FO-B断層: 上端深さ4km、短周期レベル1.5倍(大飯発電所)



— 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 — 破壊開始点-6

水平(実線: NS方向、破線: EW方向)

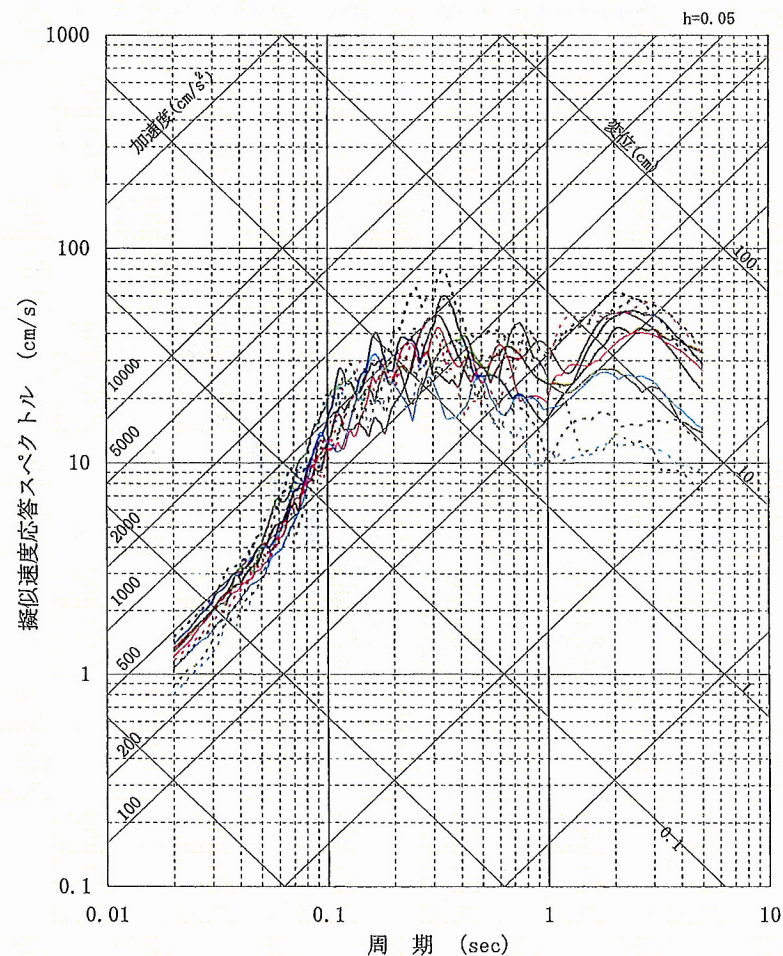


— 破壊開始点-1 — 破壊開始点-2 — 破壊開始点-3
 — 破壊開始点-4 — 破壊開始点-5 — 破壊開始点-6

鉛直

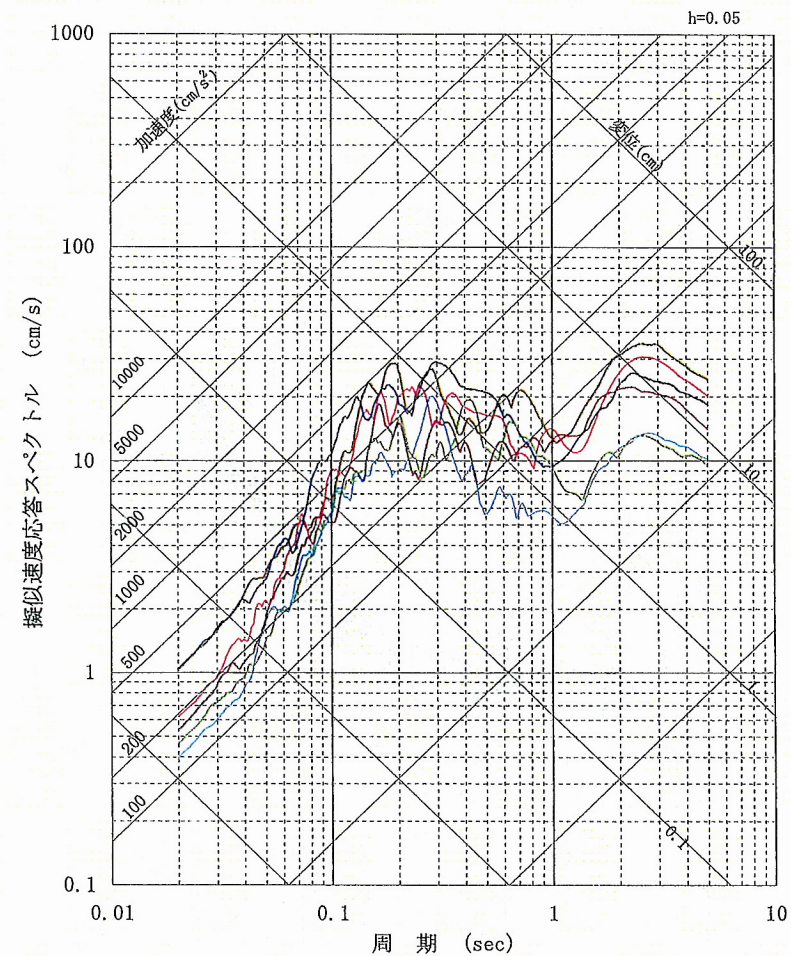
4-3. 地震動評価結果

■ FO-A~FO-B断層: 上端深さ4km、傾斜角75° (大飯発電所)



— 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 — 破壊開始点-6

水平(実線: NS方向、破線: EW方向)

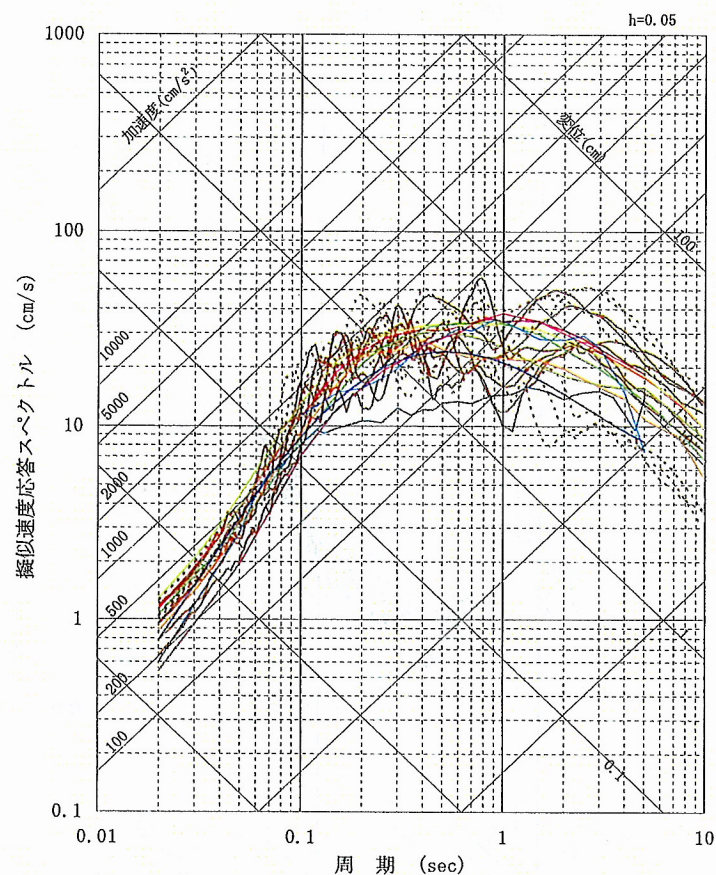


— 破壊開始点-1 — 破壊開始点-2 — 破壊開始点-3
 — 破壊開始点-4 — 破壊開始点-5 — 破壊開始点-6

鉛直

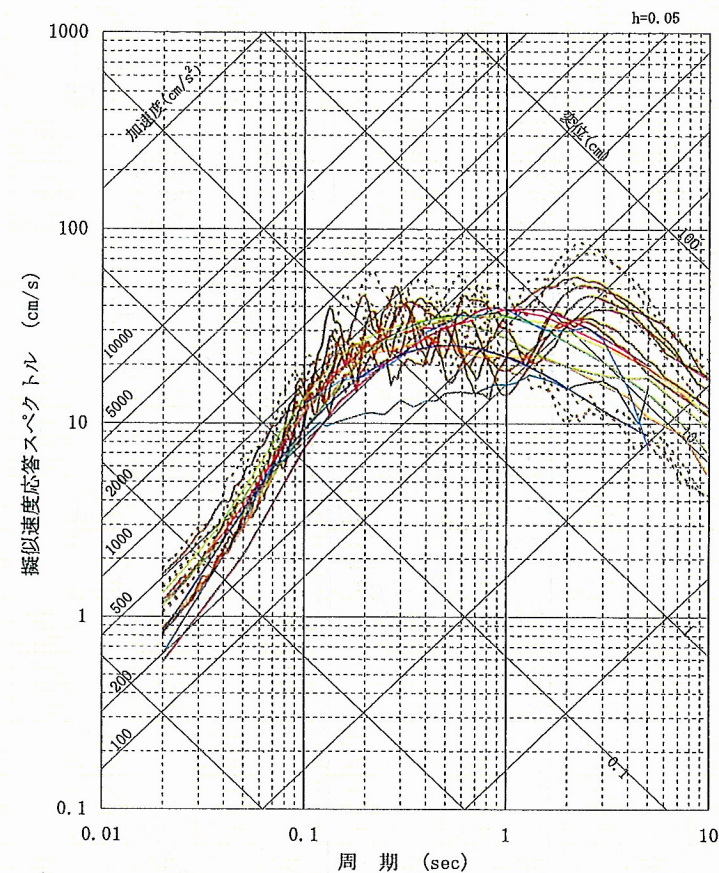
4-3. 地震動評価結果

■ 各種距離減衰式による妥当性評価: FO-A~FO-B断層(大飯発電所)



- | | |
|---------------------------------|-----------------------------|
| — 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) | |

上端深さ4km



- | | |
|---------------------------------|-----------------------------|
| — 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) | |

上端深さ3km

褐色線: 断層モデルを用いた手法(実線: NS方向、破線: EW方向)

4-3. 地震動評価結果

- 各パラメータについて、地震動への影響の程度を検討し、敷地に大きな影響を与えると考えられるパラメータに対して不確かさを考慮

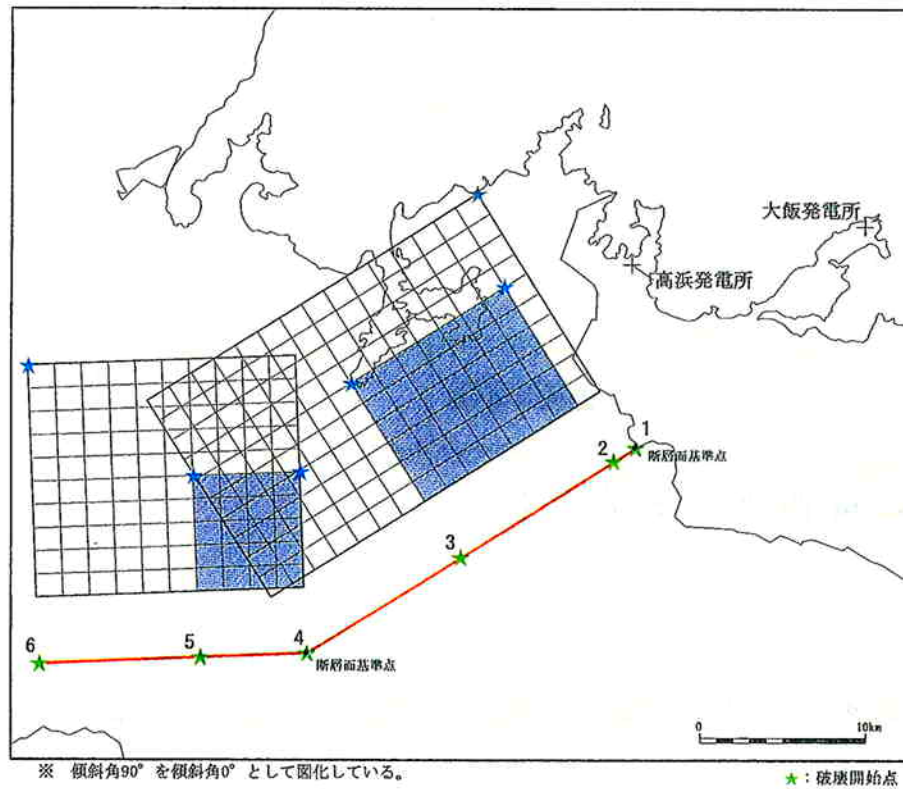
上林川断層の地震動評価に考慮する不確かさ

	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	レシピア平均	
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	レシピア平均	
短周期レベル	4km	90°	敷地近傍に配置	複数設定	レシピア平均 × 1.5倍	中越沖地震 知見反映

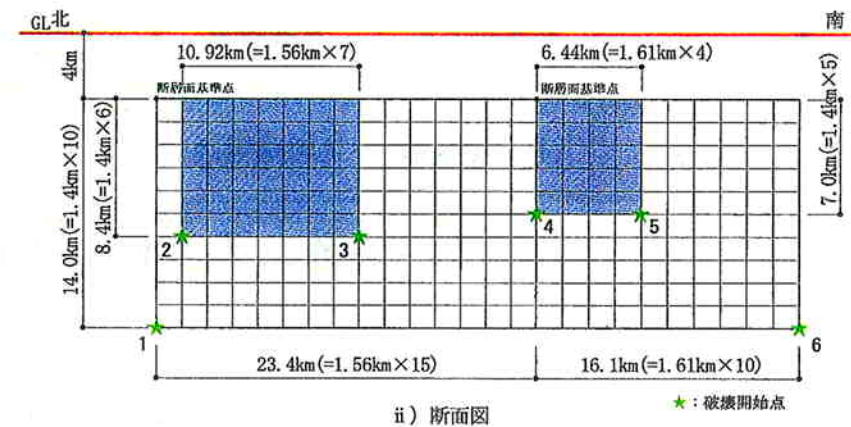
: 不確かさを考慮したパラメータ

4-3. 地震動評価結果

■上林川断層のモデル図



i) 断層配置図



※モデル図は基本ケースを代表して示す

4-3. 地震動評価結果

■上林川断層のパラメータ

断層パラメータ	パラメータ	設定方法
断層長さL(km)	39.5	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)	4	微小地震の発生及び地下構造を参考に設定
断層下端深さ(km)	18	
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)	553.0	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)	1.70×10^{19}	$M_0 = \{S / (4.24 \times 10^{-11})\}^{2.0}$
剛性率(N/m ²)	3.5×10^{10}	$\mu = \rho \beta^2$, $\rho = 2.7 \text{g/cm}^3$, $\beta = 3.6 \text{km/s}$
平均すべり量D(cm)	87.9	$D = M_0 / (\mu S)$
平均応力降下量 $\Delta \sigma$ (MPa)	3.19	$\Delta \sigma = (7 \pi^{1.5} / 16) (M_0 / S^{1.5})$
破壊伝播速度Vr(km/s)	2.59	$Vr = 0.72 \beta$
立ち上がり時間Tr(sec)	1.12	$Tr = 2.03 \times 10^{-9} M_0^{1/3}$
高周波限界遮断周波数fmax(Hz)	8.3	香川ほか、2003
短周期レベルA(Nm/s ²)	1.36×10^{19}	$A = 2.46 \times 10^{17} \times M_0^{1/3}$
Q値	50f ^{1.1}	佐藤ほか、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)	141.12	$S_a = \pi r^2$, $r = (7 \pi M_0 \beta^2) / (4 A a R)$, $R = (S / \pi)^{0.5}$
	平均すべり量D _a (cm)	176.7	$D_a = \gamma_D D$, $\gamma_D = 2.01$
	地震モーメントM _{0a} (Nm)	8.73×10^{18}	$M_{0a} = \mu S_a D_a$
	応力降下量 $\Delta \sigma_a$ (MPa)	12.5	$\Delta \sigma_a = (S / S_a) \Delta \sigma$
大 ア ス ペ リ テ ィ	面積S _{a1} (km ²)	94.08	$S_{a1} = 2/3 S_a$
	平均すべり量D _{a1} (cm)	195.8	$D_{a1} = M_{0a1} / (\mu S_{a1})$
	地震モーメントM _{0a1} (Nm)	6.45×10^{18}	$M_{0a1} = M_{0a} S_{a1}^{1.5} / (S_{a1}^{1.5} + S_{a2}^{1.5})$
	応力降下量 $\Delta \sigma_{a1}$ (MPa)	12.5	$\Delta \sigma_{a1} = \Delta \sigma_a$
小 ア ス ペ リ テ ィ	面積S _{a2} (km ²)	47.04	$S_{a2} = 1/3 S_a$
	平均すべり量D _{a2} (cm)	138.5	$D_{a2} = M_{0a2} / (\mu S_{a2})$
	地震モーメントM _{0a2} (Nm)	2.28×10^{18}	$M_{0a2} = M_{0a} S_{a2}^{1.5} / (S_{a1}^{1.5} + S_{a2}^{1.5})$
	応力降下量 $\Delta \sigma_{a2}$ (MPa)	12.5	$\Delta \sigma_{a2} = \Delta \sigma_a$
背 景 領 域	面積S _b (km ²)	411.88	$S_b = S - S_a$
	平均すべり量D _b (cm)	57.5	$D_b = M_{0b} / (\mu S_b)$
	地震モーメントM _{0b} (Nm)	8.29×10^{18}	$M_{0b} = M_0 - M_{0a}$
	実効応力 σ_b (MPa)	2.5	$\sigma_b = 0.2 \Delta \sigma_a$

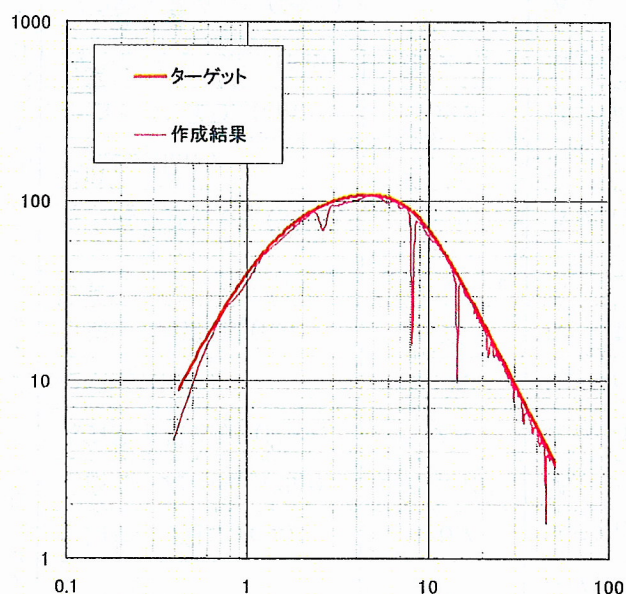
※パラメータは基本ケースを代表して示す

4-3. 地震動評価結果

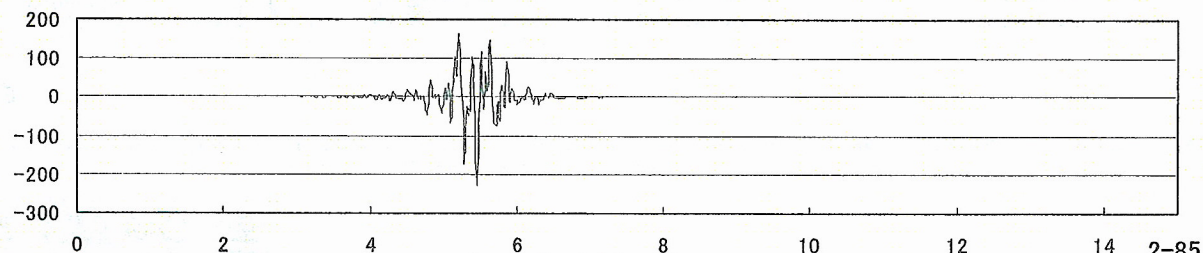
■統計的グリーン関数法で用いる要素地震の振幅及び経時特性(時刻歴の包絡関数)

要素地震波の作成結果(上林川断層のSH波の例)

作成条件(上林川断層)	
地震モーメント M_0	$2.5 \times 10^{16} \text{N} \cdot \text{m}$
応力降下量 $\Delta \sigma_a$	13.0MPa
高周波限界遮断周波数 f_{max}	8.3Hz
要素断層面積 S	2.184km^2 (1.4km $\times$ 1.56km)
震源距離 R	1km



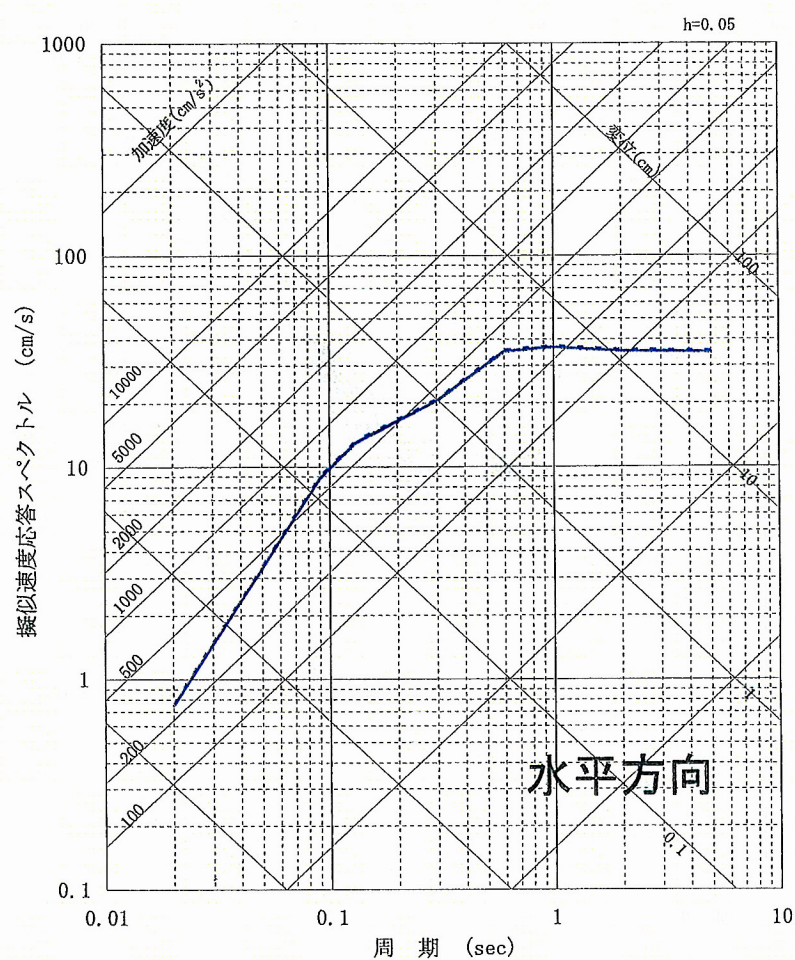
加速度震源スペクトル



加速度時刻歴波形

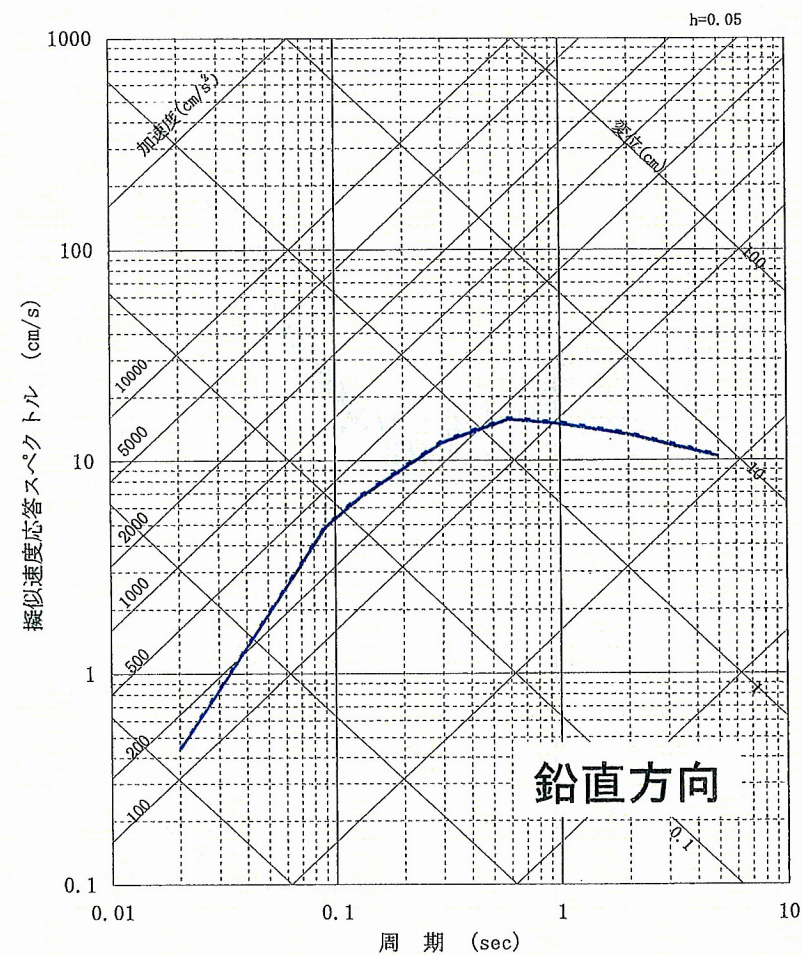
4-3. 地震動評価結果

■ 耐専式による地震動評価結果：上林川断層（大飯発電所）



— 上林川断層（上端4km）

- - - 上林川断層（上端3km）

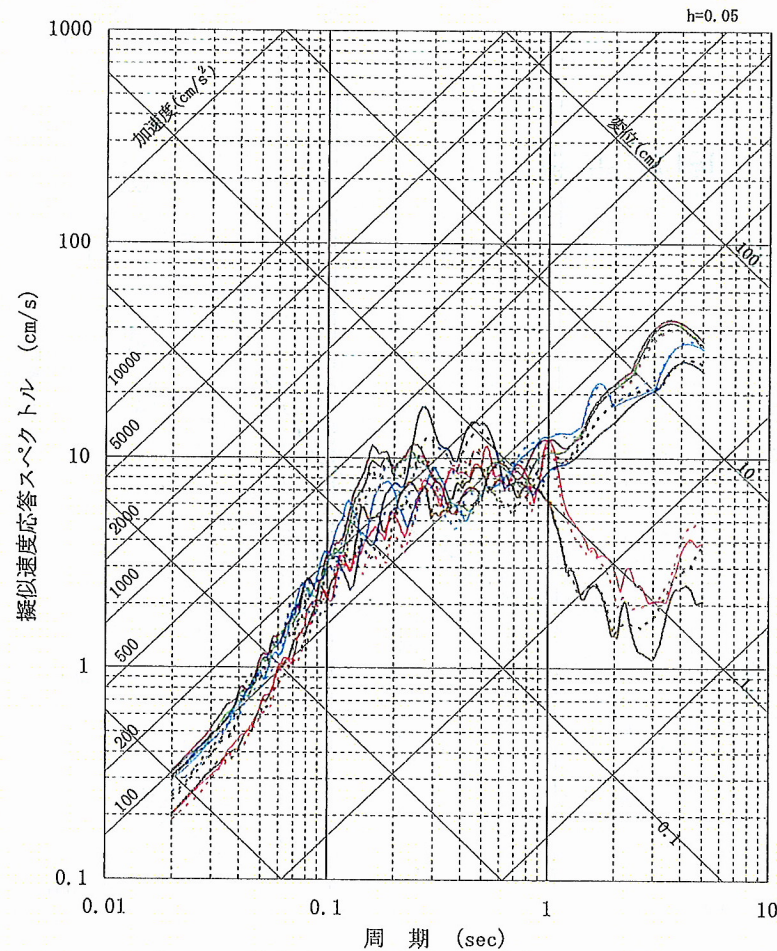


— 上林川断層（上端4km）

- - - 上林川断層（上端3km）

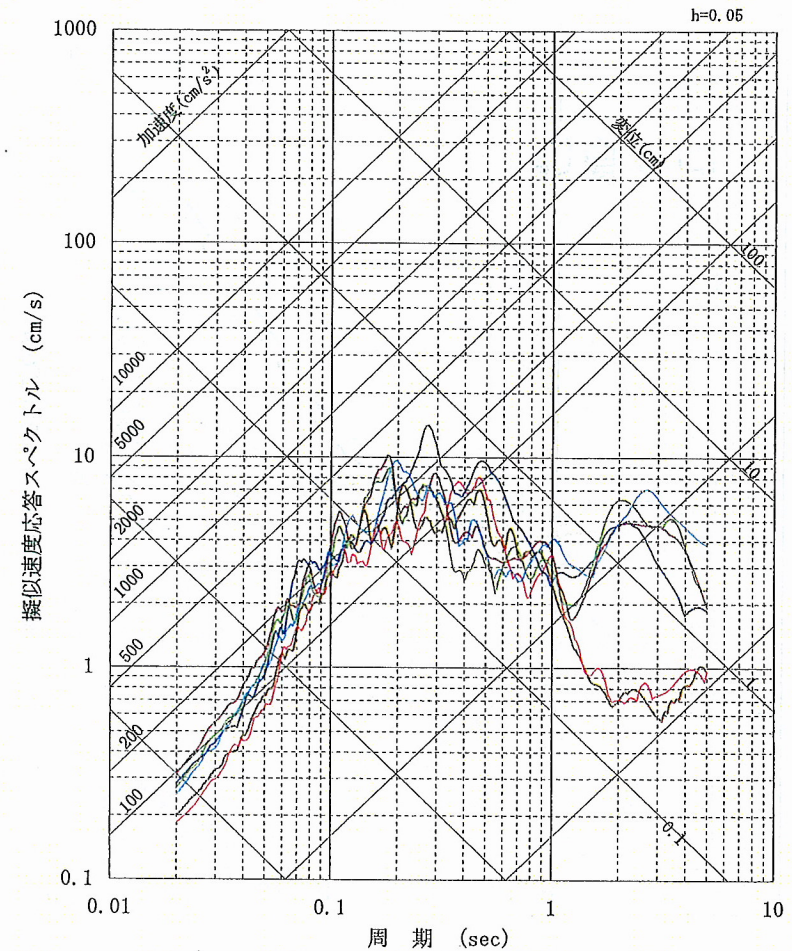
4-3. 地震動評価結果

■上林川断層:上端深さ4km(大飯発電所)



—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 —破壊開始点-6

水平(実線: NS方向、破線: EW方向)

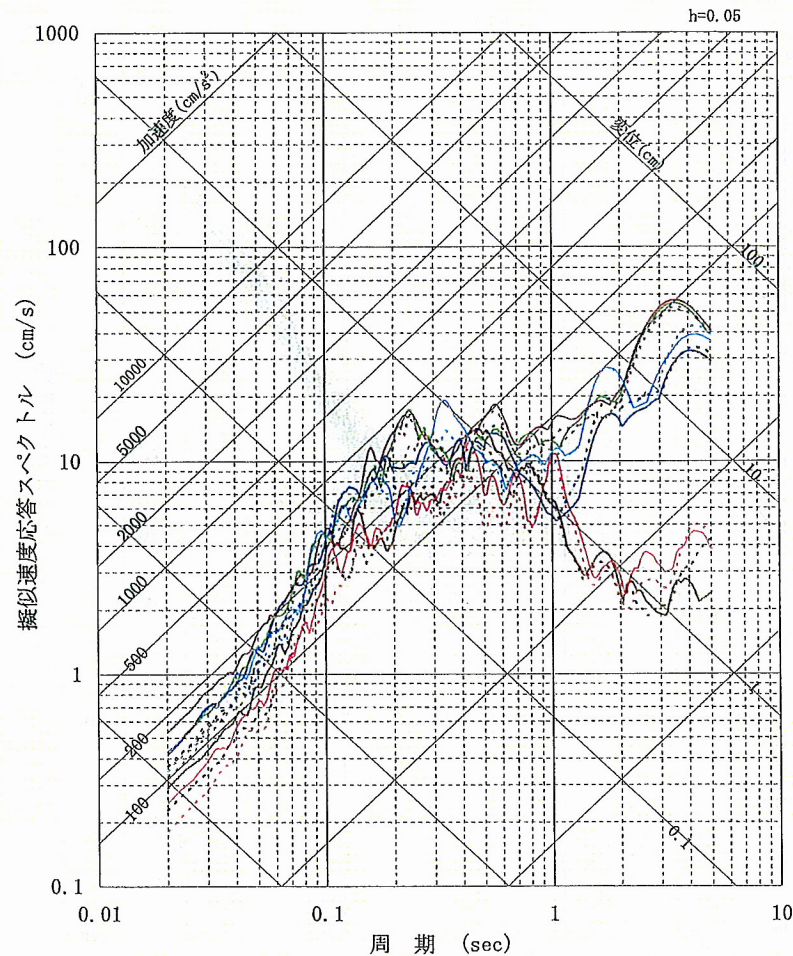


—破壊開始点-1 —破壊開始点-2 —破壊開始点-3
 —破壊開始点-4 —破壊開始点-5 —破壊開始点-6

鉛直

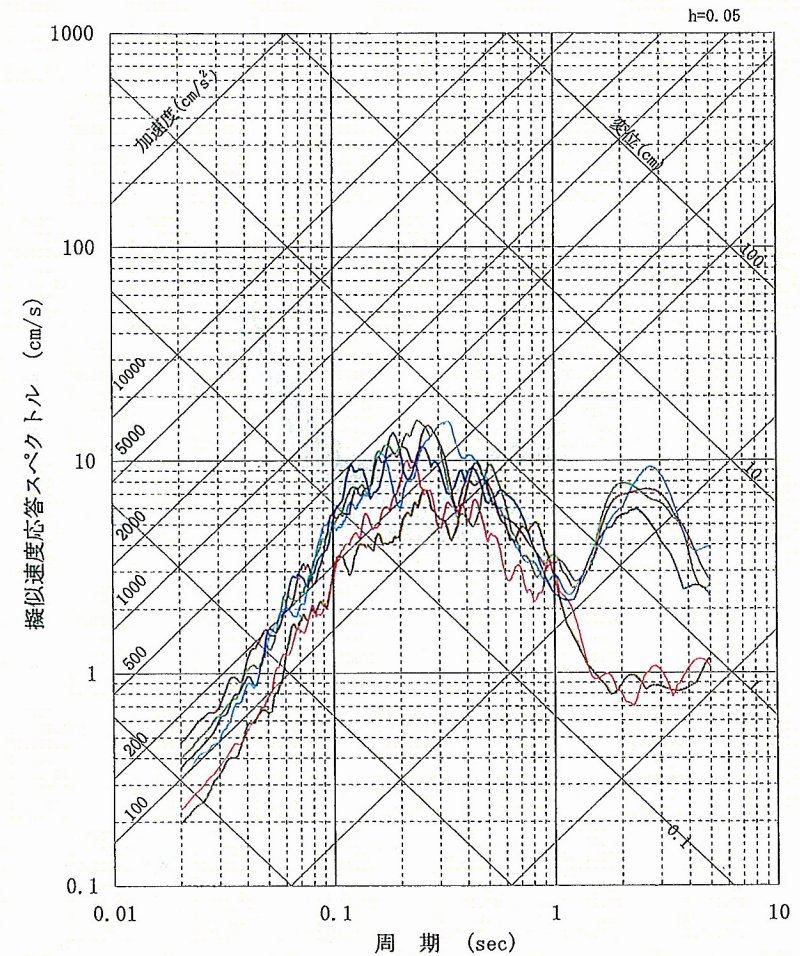
4-3. 地震動評価結果

■上林川断層: 上端深さ3km(大飯発電所)



— 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 — 破壊開始点-6

水平(実線: NS方向、破線: EW方向)

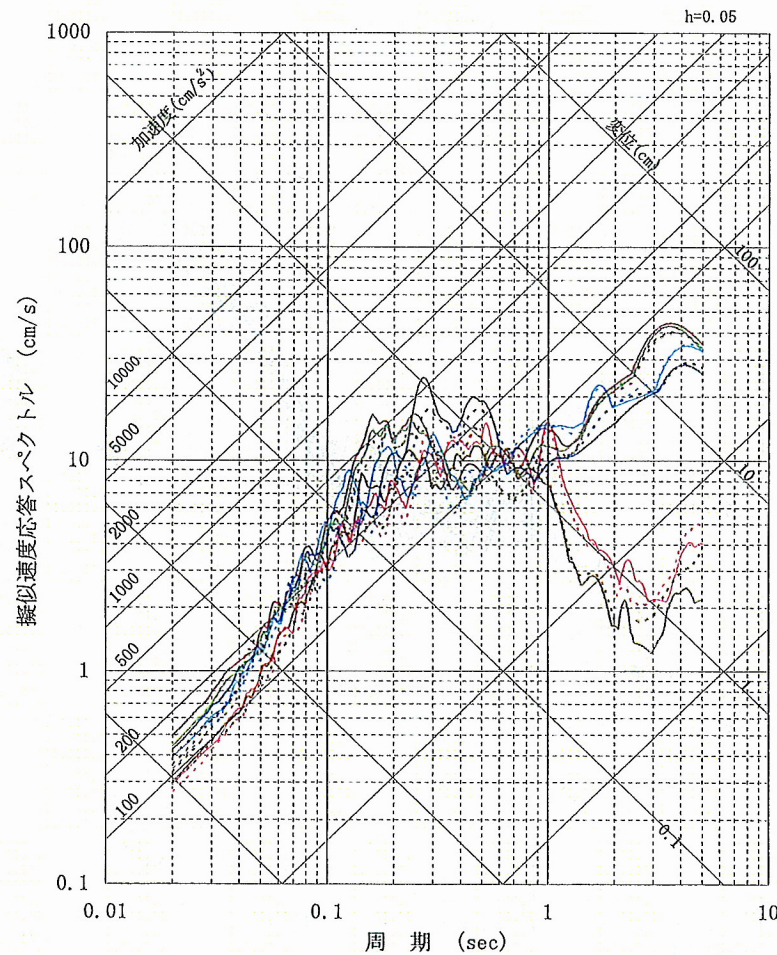


— 破壊開始点-1 — 破壊開始点-2 — 破壊開始点-3
 — 破壊開始点-4 — 破壊開始点-5 — 破壊開始点-6

鉛直

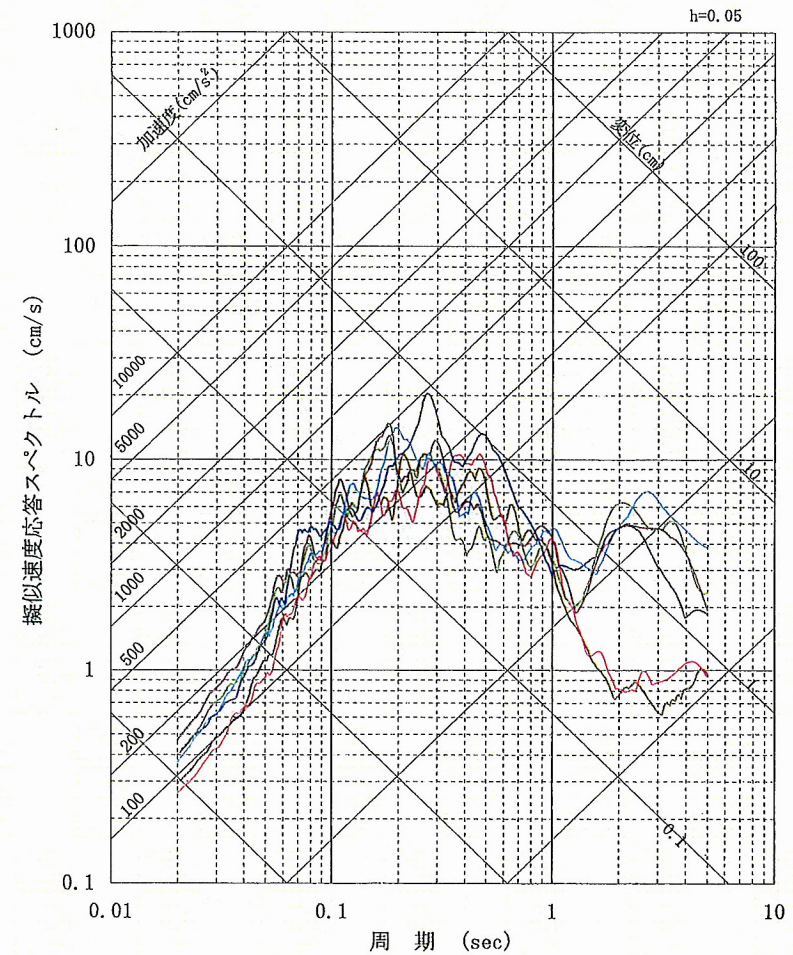
4-3. 地震動評価結果

■ 上林川断層: 上端深さ4km、短周期レベル1.5倍(大飯発電所)



— 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 — 破壊開始点-6

水平(実線: NS方向、破線: EW方向)



— 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 — 破壊開始点-6

鉛直

4-3. 地震動評価結果

- 各パラメータについて、地震動への影響の程度を検討し、敷地に大きな影響を与えると考えられるパラメータに対して不確かさを考慮

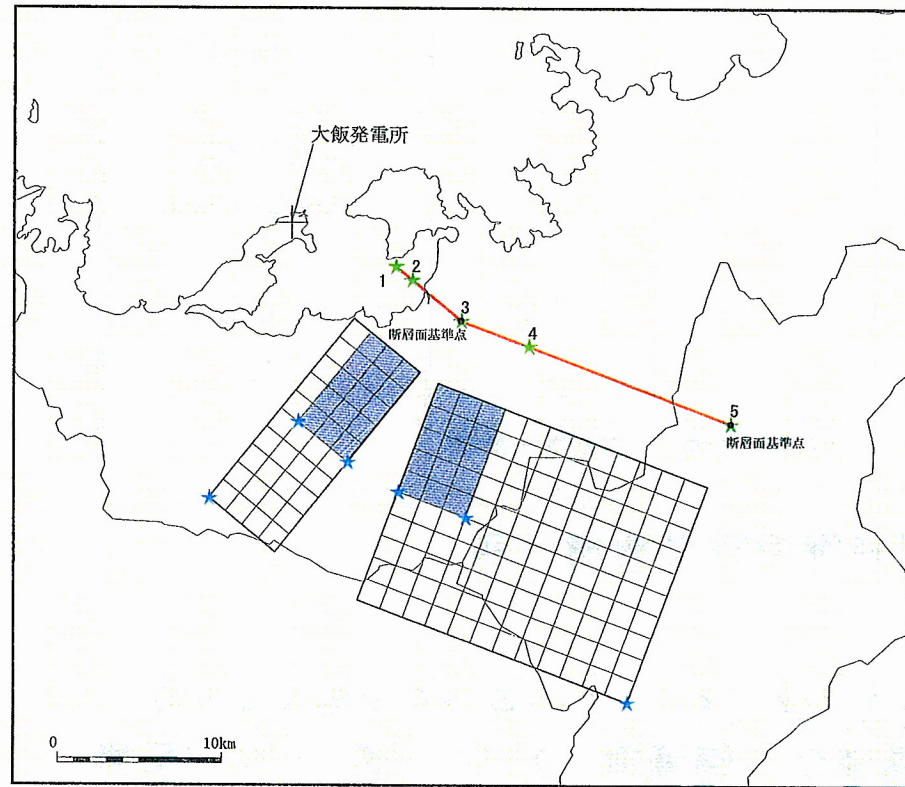
熊川断層の地震動評価に考慮する不確かさ

	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

 : 不確かさを考慮したパラメータ

4-3. 地震動評価結果

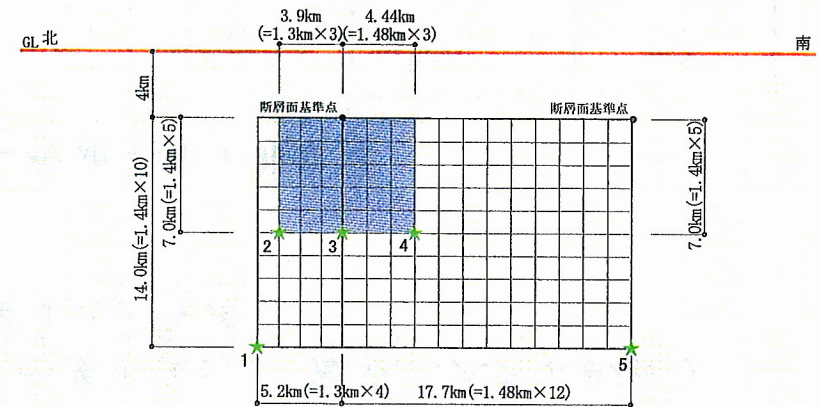
■熊川断層のモデル図



※ 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



★：破壊開始点

ii) 断面図

※モデル図は基本ケースを代表して示す

4-3. 地震動評価結果

■熊川断層の断層パラメータ: 上端4km

断層パラメータ	パラメータ	設定方法
断層長さL(km)	22.9	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)	4	微小地震の発生及び地下構造を参考に設定
断層下端深さ(km)	18	
断層幅W(km)	14.0	地震発生層と傾斜角から設定
断層面積S(km ²)	320.6	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)	5.72×10^{18}	$M_0 = \{S / (4.24 \times 10^{-11})\}^{2.0}$
剛性率(N/m ²)	3.5×10^{10}	$\mu = \rho \beta^2$, $\rho = 2.7 \text{g/cm}^3$, $\beta = 3.6 \text{km/s}$
平均すべり量D(cm)	51.0	$D = M_0 / (\mu S)$
平均応力降下量 $\Delta \sigma$ (MPa)	2.4	$\Delta \sigma = (7 \pi^{1.5} / 16) (M_0 / S^{1.5})$
破壊伝播速度Vr(km/s)	2.59	$Vr = 0.72 \beta$
立ち上がり時間Tr(sec)	0.78	$Tr = 2.03 \times 10^{-9} M_0^{1/3}$
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)	9.48×10^{18}	$A = 2.46 \times 10^{17} \times M_0^{1/3}$
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)	56.88	$S_a = \pi r^2$, $r = (7 \pi M_0 \beta^2) / (4 A_a R)$, $R = (S / \pi)^{0.5}$
	平均すべり量D _a (cm)	102.4	$D_a = \gamma_D D$, $\gamma_D = 2.01$
	地震モーメントM _{0a} (Nm)	2.04×10^{18}	$M_{0a} = \mu S_a D_a$
	応力降下量 $\Delta \sigma_a$ (MPa)	13.7	$\Delta \sigma_a = (S / S_a) \Delta \sigma$
背景領域	面積S _b (km ²)	263.72	$S_b = S - S_a$
	平均すべり量D _b (cm)	39.9	$D_b = M_{0b} / (\mu S_b)$
	地震モーメントM _{0b} (Nm)	3.68×10^{18}	$M_{0b} = M_0 - M_{0a}$
	実効応力 σ_b (MPa)	2.74	$\sigma_b = 0.2 \Delta \sigma_a$

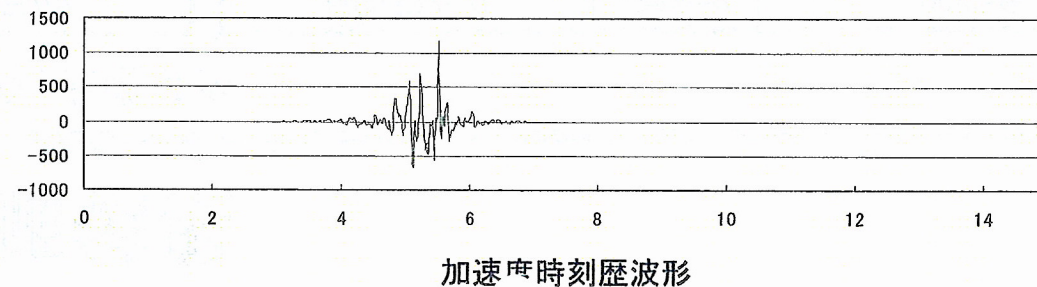
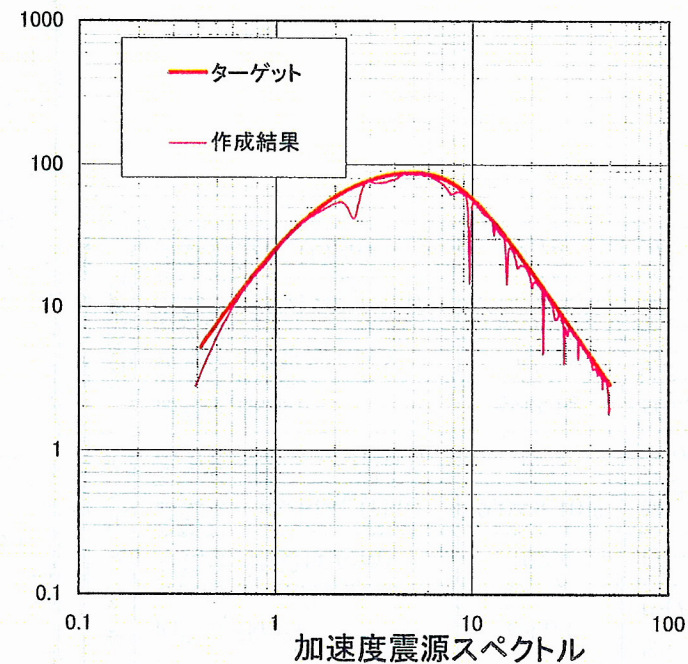
※パラメータは基本ケースを代表して示す

4-3. 地震動評価結果

■統計的グリーン関数法で用いる要素地震の振幅及び経時特性(時刻歴の包絡関数)

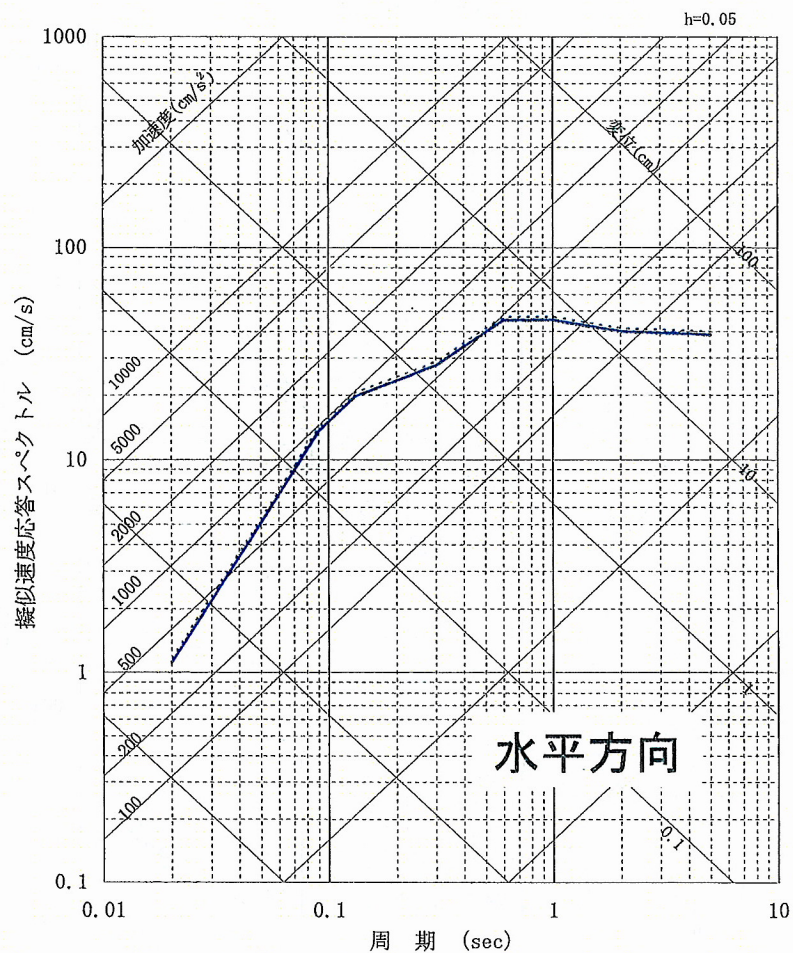
要素地震波の作成結果(熊川断層のSH波の例)

作成条件(熊川断層)	
地震モーメント M_0	$1.44 \times 10^{16} \text{N} \cdot \text{m}$
応力降下量 $\Delta \sigma_a$	12.9MPa
高周波限界遮断周波数 f_{max}	8.3Hz
要素断層面積 S	2.072km^2 (1.4km $\times$ 1.48km)
震源距離 R	1km



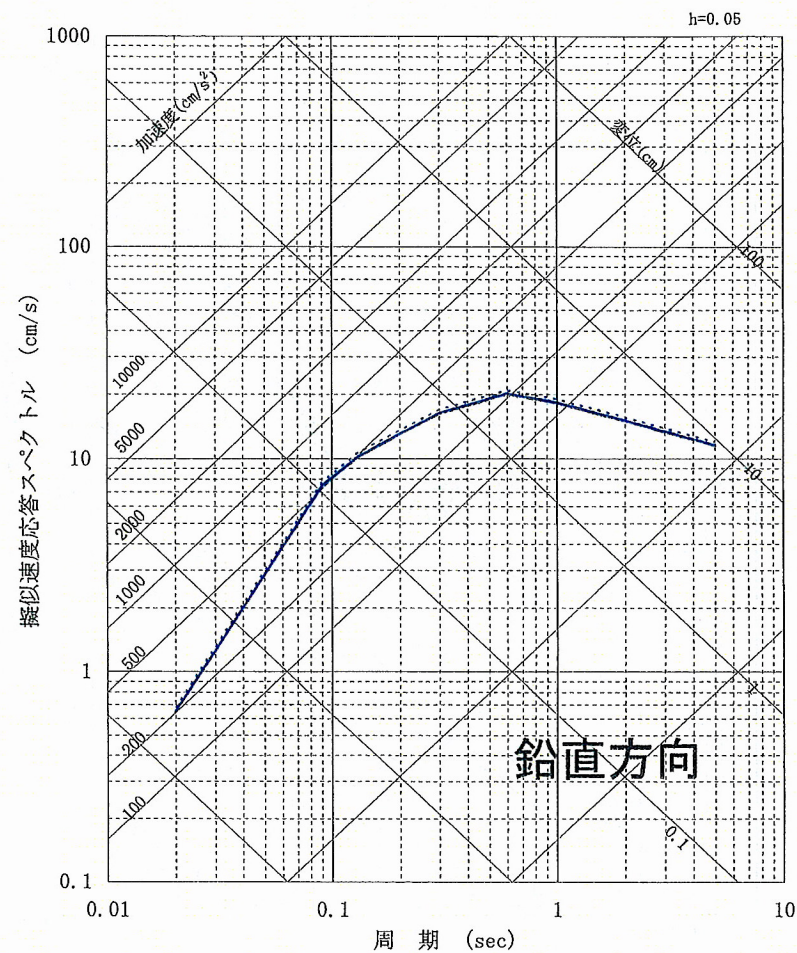
4-3. 地震動評価結果

■耐専式による地震動評価結果:熊川断層(大飯発電所)



——熊川断層 (上端4km)

.....熊川断層 (上端3km)

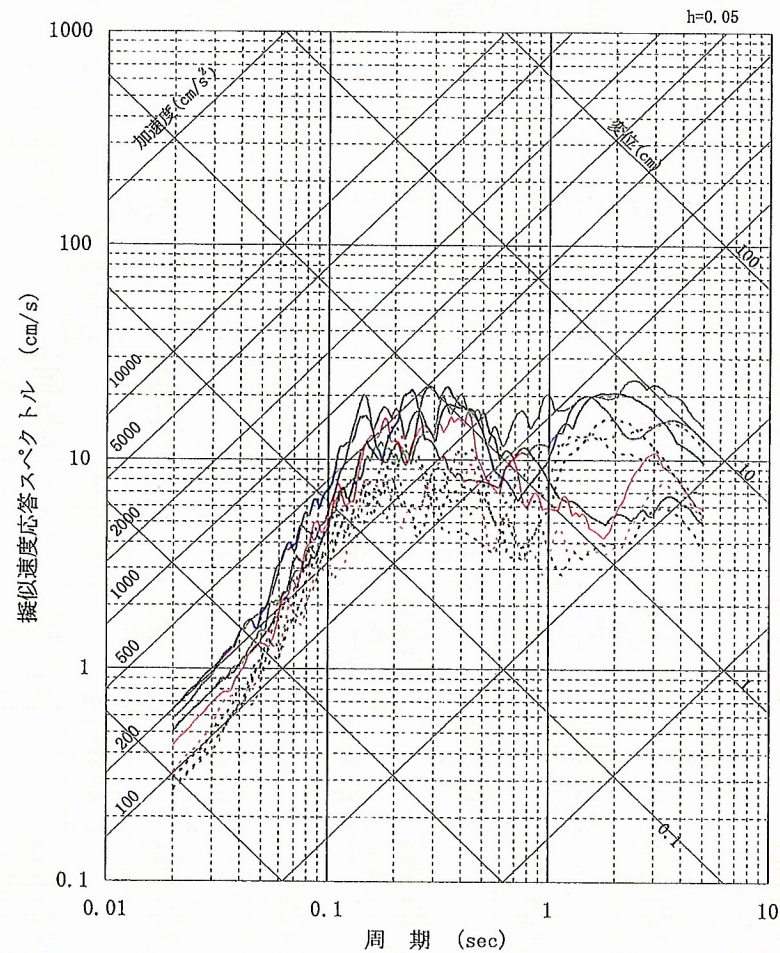


——熊川断層 (上端4km)

.....熊川断層 (上端3km)

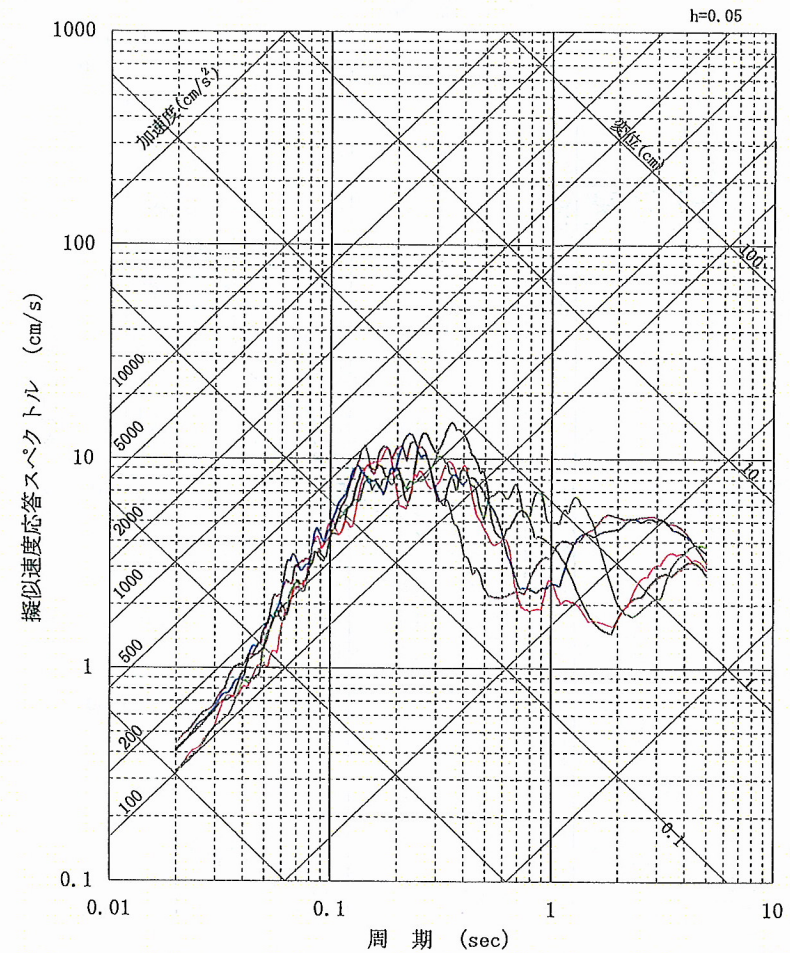
4-3. 地震動評価結果

■熊川断層: 上端深さ4km(大飯発電所)



— 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

水平(実線: NS方向、破線: EW方向)

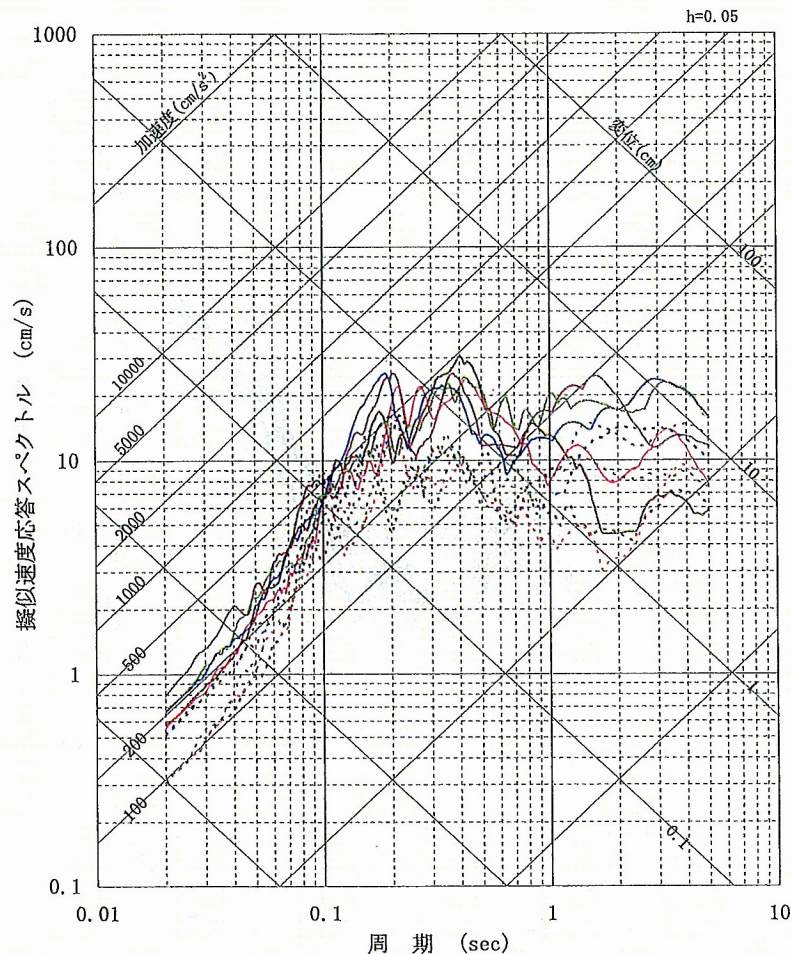


— 破壊開始点-1 — 破壊開始点-2 — 破壊開始点-3
 — 破壊開始点-4 — 破壊開始点-5

鉛直

4-3. 地震動評価結果

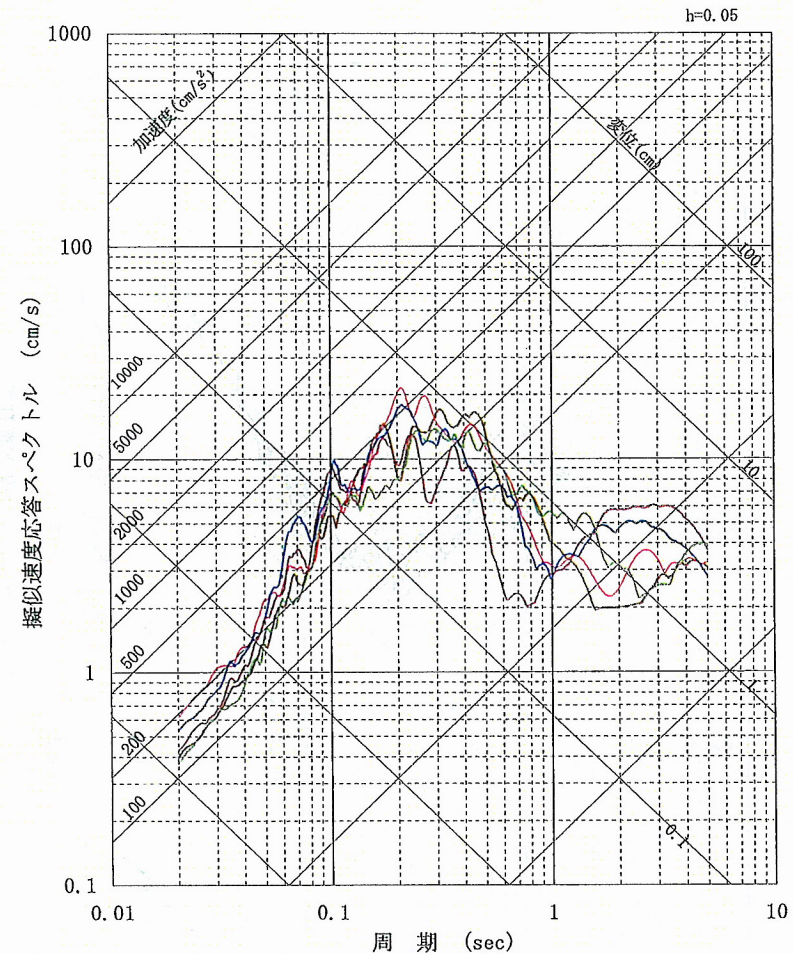
■ 熊川断層: 上端深さ3km(大飯発電所)



— 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

水平(実線: NS方向、破線: EW方向)



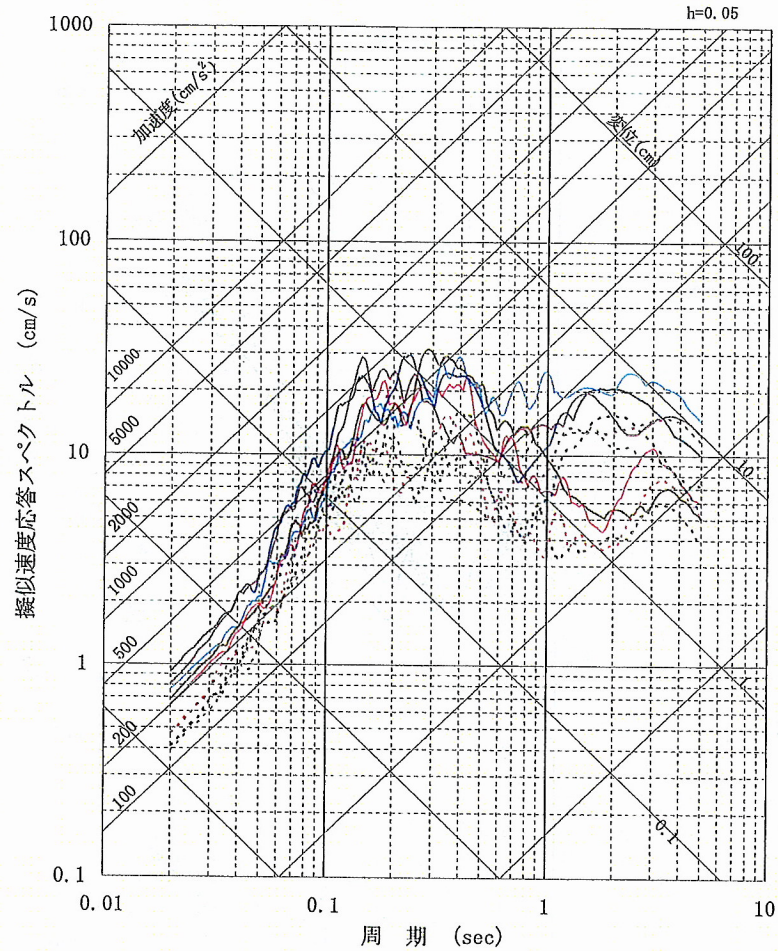
— 破壊開始点-1 — 破壊開始点-2 — 破壊開始点-3

— 破壊開始点-4 — 破壊開始点-5

鉛直

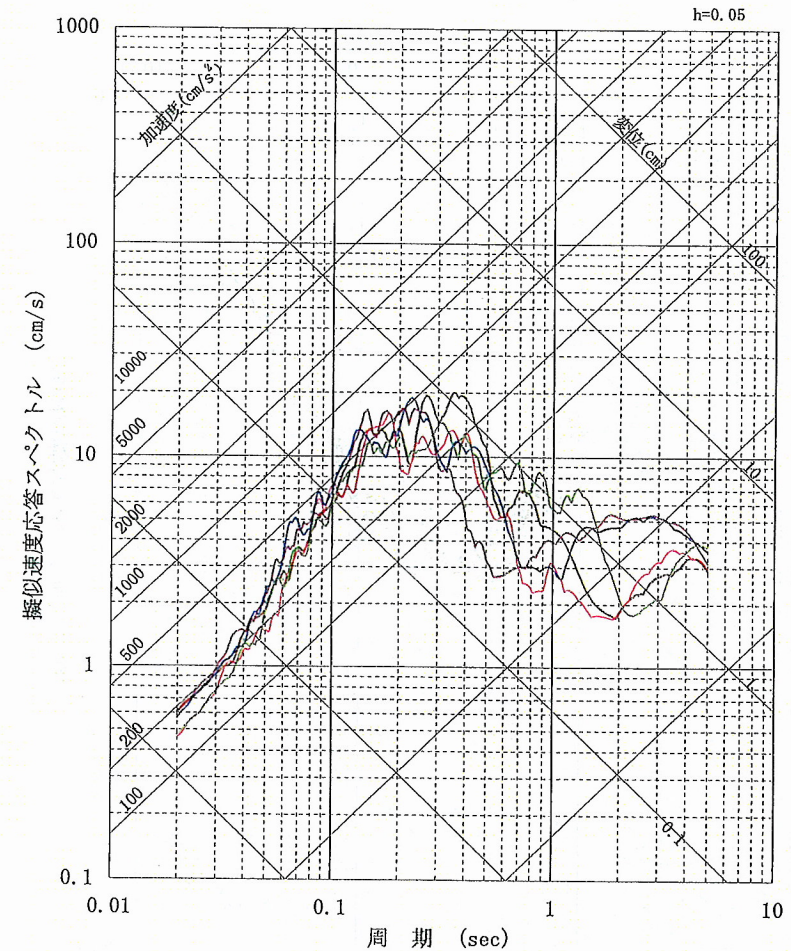
4-3. 地震動評価結果

■熊川断層: 上端深さ4km、短周期レベル1.5倍(大飯発電所)



—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

水平(実線: NS方向、破線: EW方向)



—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

4-3. 地震動評価結果

■ 孤立した短い活断層(FO-C断層)について、地震動への影響の程度を検討する。

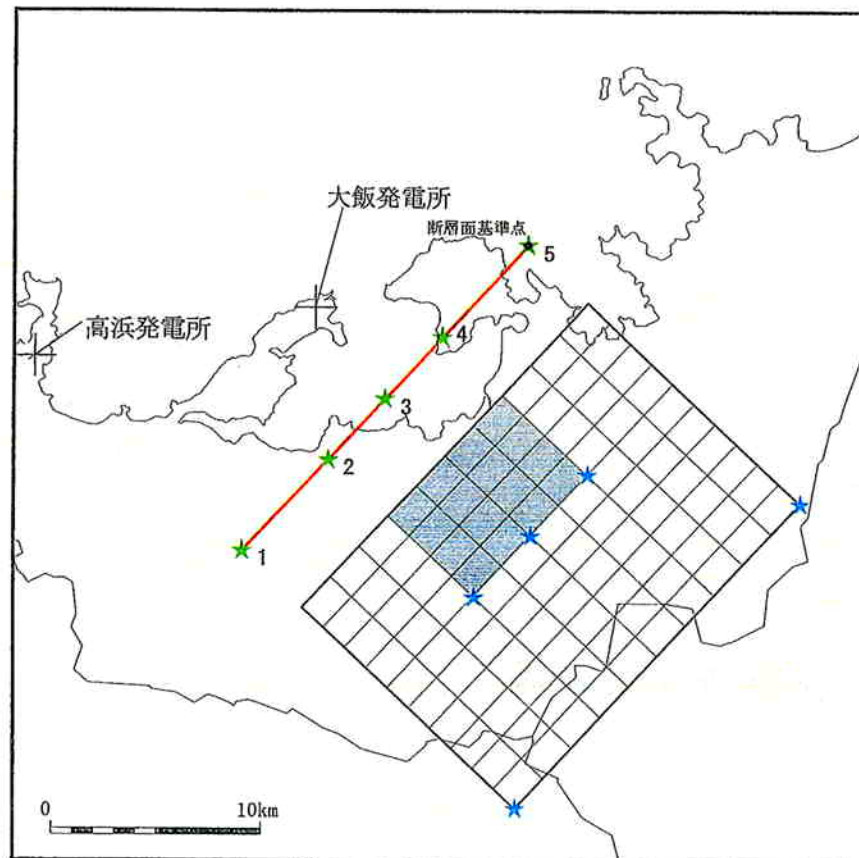
FO-C断層の地震動評価に考慮する不確かさ

	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°	断層が確認されている位置	複数設定	レシピ平均	
断層傾斜角の不確かさを考慮	4km	75°	断層が確認されている位置	複数設定	レシピ平均	
上端深さの不確かさを考慮	3km	90°	断層が確認されている位置	複数設定	レシピ平均	
短周期レベル1.5倍	4km	90°	断層が確認されている位置	複数設定	レシピ平均 × 1.5倍	
ずれの方向	4km	75° (縦ずれ)	断層が確認されている位置	複数設定	レシピ平均	

: 不確かさを考慮したパラメータ

4-3. 地震動評価結果

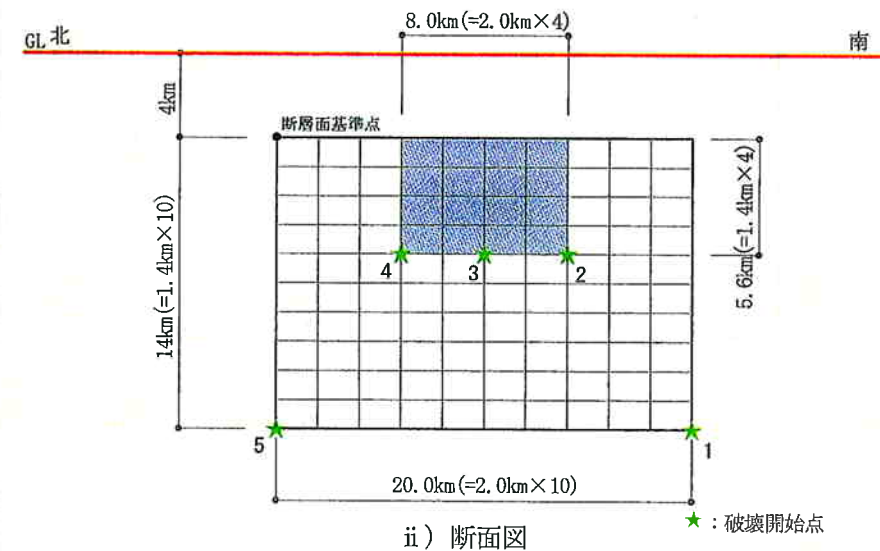
■ 孤立した短い活断層(FO-C断層)のモデル図



※ 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



ii) 断面図

※モデル図は基本ケースを代表して示す

4-3. 地震動評価結果

■FO-C断層の断層パラメータ: 上端4km

断層パラメータ	パラメータ	設定方法
断層長さL(km)	20	断層位置を延長
断層傾斜角(°)	90	調査結果に基づき設定
断層上端深さ(km)	4	微小地震の発生及び地下構造を参考に設定
断層下端深さ(km)	18	
断層幅W(km)	14.0	地震発生層と傾斜角から設定
断層面積S(km ²)	280.0	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)	4.45 × 10 ¹⁸	$M_0 = \{S / (2.23 \times 10^{-15})\}^{1.5}$
剛性率(N/m ²)	3.5 × 10 ¹⁰	$\mu = \rho \beta^2$, $\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$, $\beta = 3.6 \text{ km/s}$
平均すべり量D(cm)	45.4	$D = M_0 / (\mu S)$
平均応力降下量 $\Delta \sigma$ (MPa)	2.3	$\Delta \sigma = (7 \pi^{1.5} / 16) (M_0 / S^{1.5})$
破壊伝播速度Vr(km/s)	2.59	$Vr = 0.72 \beta$
立ち上がり時間Tr(sec)	0.72	$Tr = 2.03 \times 10^{-9} M_0^{1/3}$
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)	8.72 × 10 ¹⁸	$A = 2.46 \times 10^{17} \times M_0^{1/3}$
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 イ	面積S _a (km ²)	$S_a = \pi r^2$ $r = (7 \pi M_0 \beta^2) / (4 A a R)$, $R = (S / \pi)^{0.5}$
	平均すべり量D _a (cm)	$D_a = \gamma_D D$, $\gamma_D = 2.01$
	地震モーメントM _{0a} (Nm)	$M_{0a} = \mu S_a D_a$
	応力降下量 $\Delta \sigma_a$ (MPa)	$\Delta \sigma_a = (S / S_a) \Delta \sigma$
背 景 領 域	面積S _b (km ²)	$S_b = S - S_a$
	平均すべり量D _b (cm)	$D_b = M_{0b} / (\mu S_b)$
	地震モーメントM _{0b} (Nm)	$M_{0b} = M_0 - M_{0a}$
	実効応力 $\Delta \sigma_b$ (MPa)	$\Delta \sigma_b = 0.2 \Delta \sigma_a$

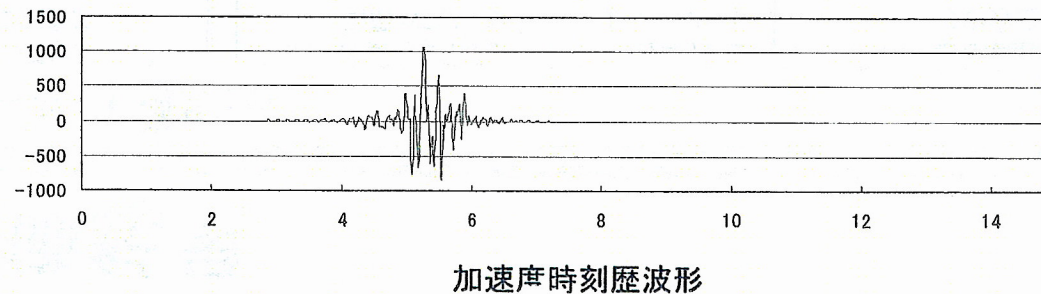
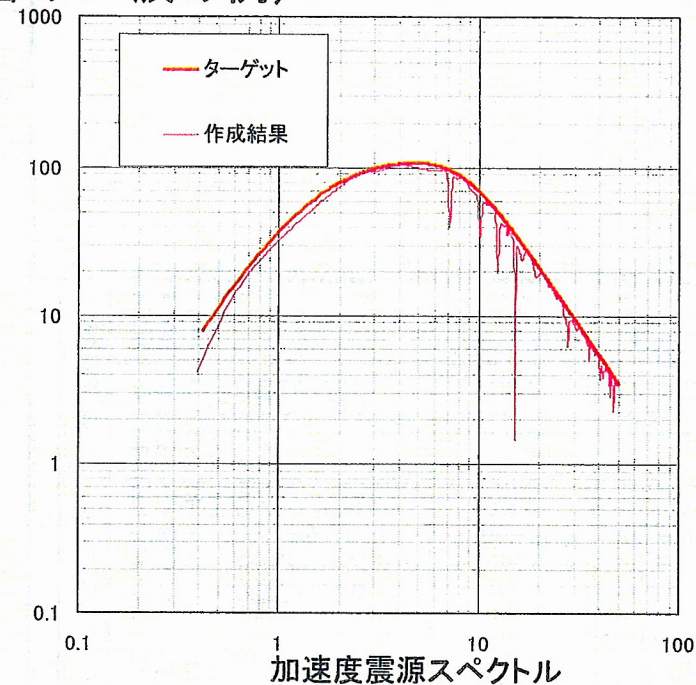
※パラメータは基本ケースを代表して示す

4-3. 地震動評価結果

■統計的グリーン関数法で用いる要素地震の振幅及び経時特性(時刻歴の包絡関数)

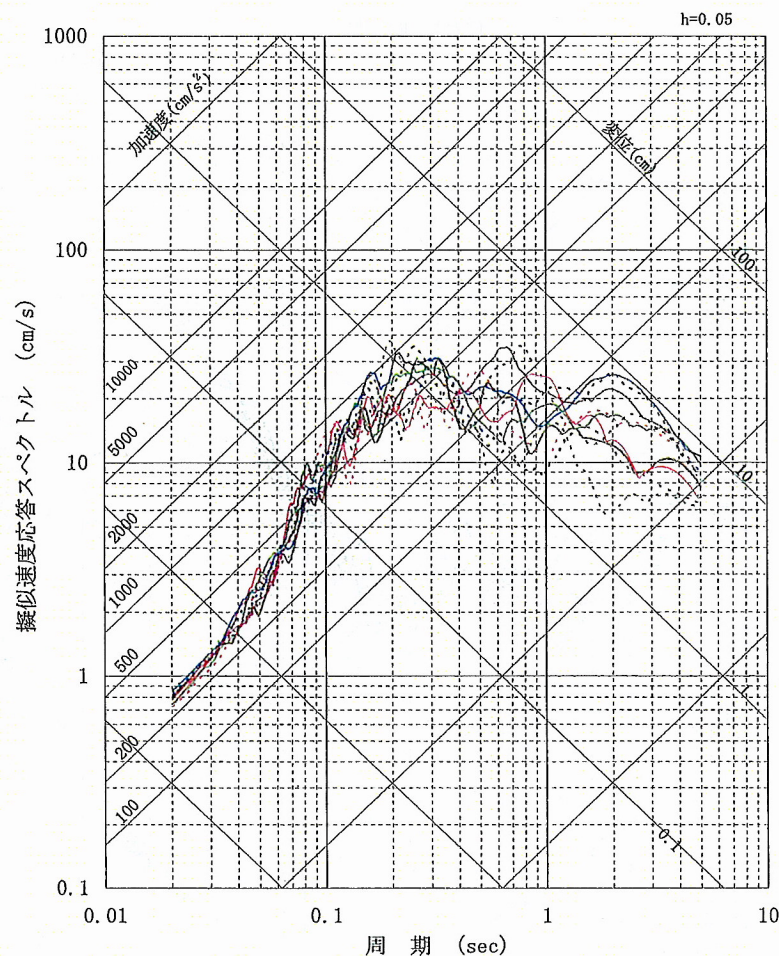
要素地震波の作成結果(FO-C断層のSH波の例)

作成条件(FO-C断層)	
地震モーメント M_0	$2.24 \times 10^{16} \text{N} \cdot \text{m}$
応力降下量 $\Delta \sigma_a$	14.5MPa
高周波限界遮断周波数 f_{max}	8.3Hz
要素断層面積 S	2.8km^2 (1.4km $\times$ 2km)
震源距離 R	1km



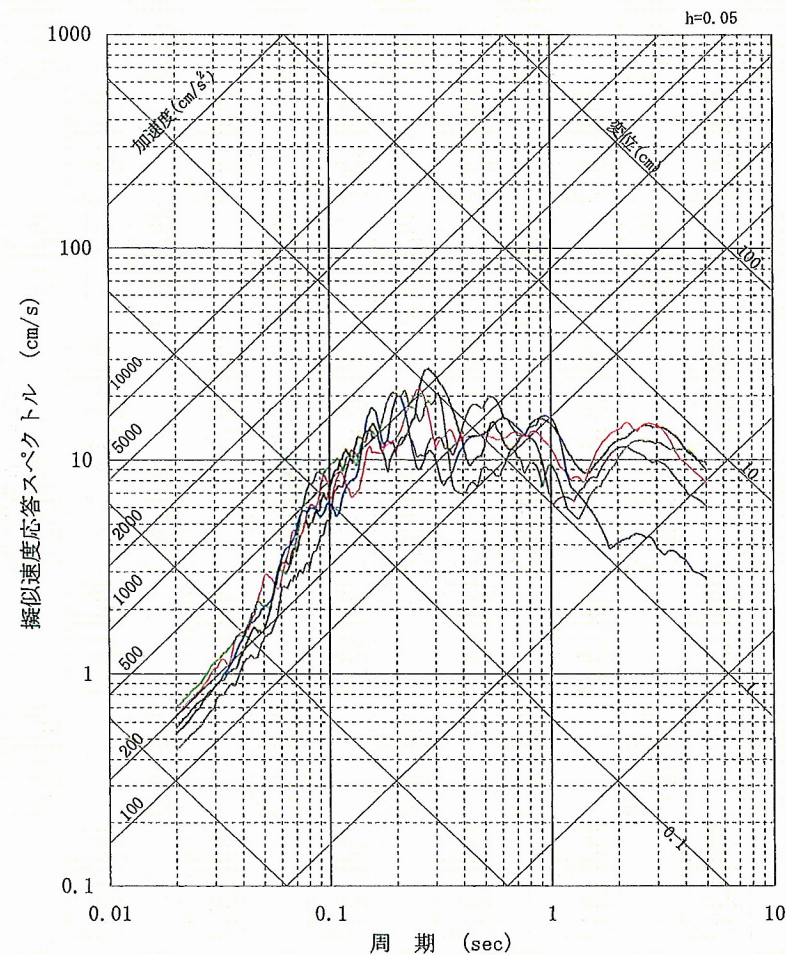
4-3. 地震動評価結果

■FO-C断層:上端深さ4km(大飯発電所)



—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

水平(実線: NS方向、破線: EW方向)

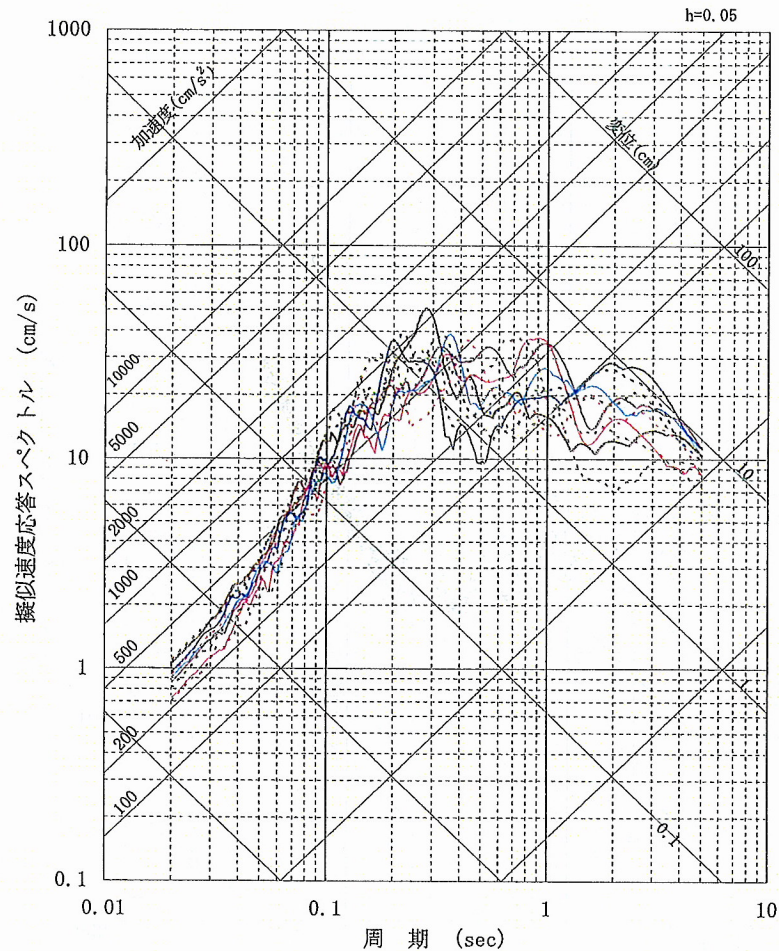


—破壊開始点-1 —破壊開始点-2 —破壊開始点-3
—破壊開始点-4 —破壊開始点-5

鉛直

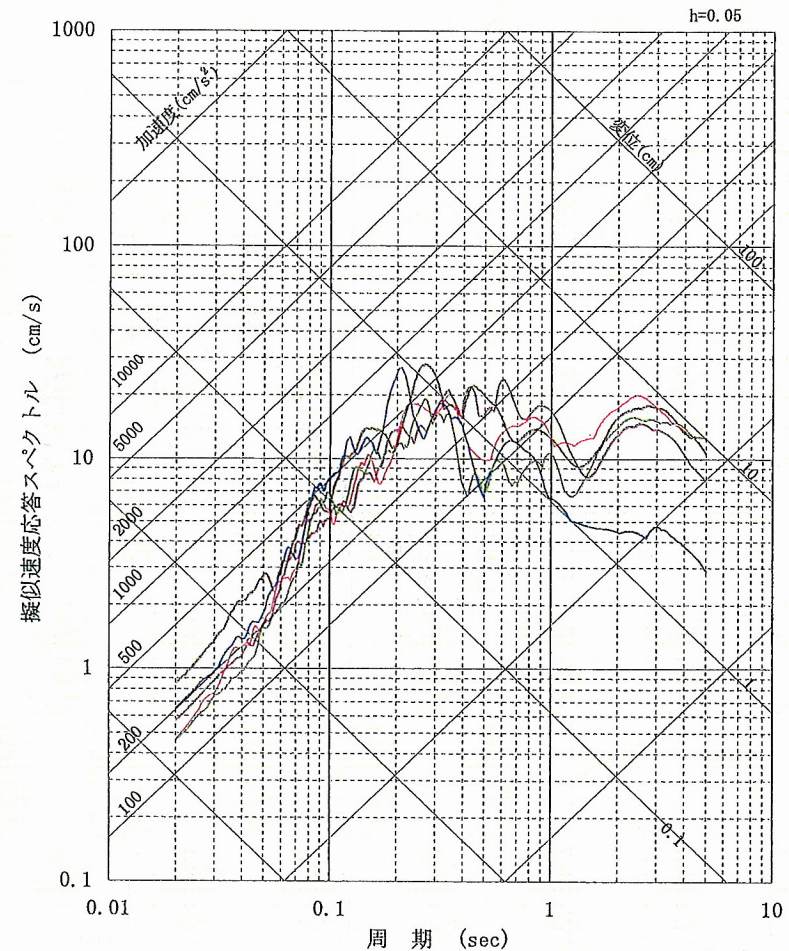
4-3. 地震動評価結果

■FO-C断層:上端深さ4km、傾斜角75° (大飯発電所)



— 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

水平(実線: NS方向、破線: EW方向)

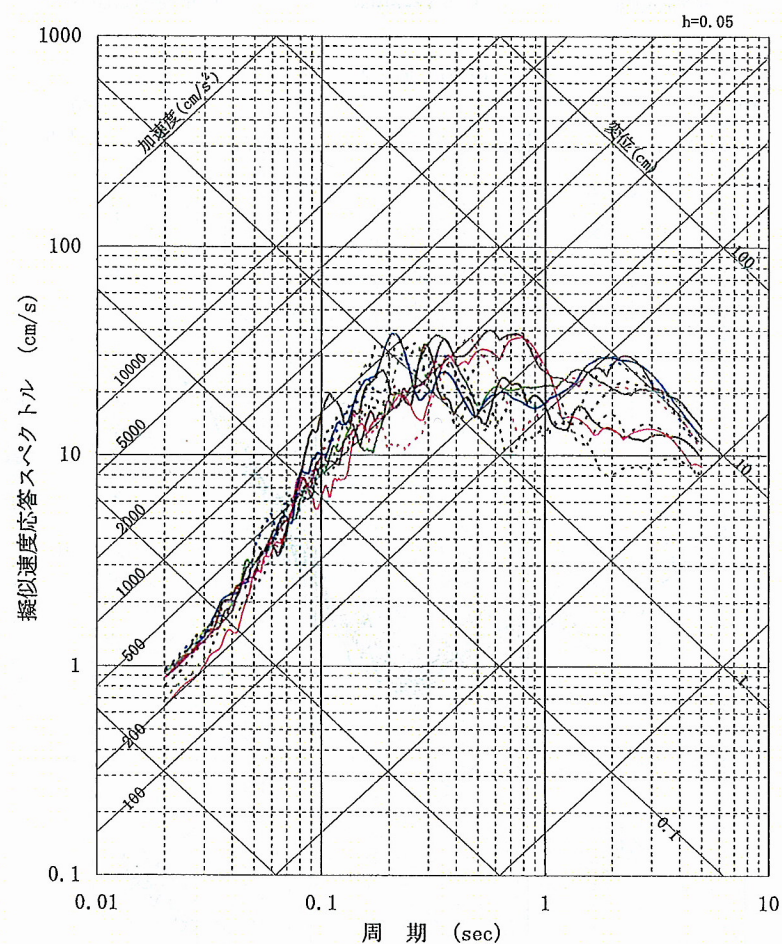


— 破壊開始点-1 — 破壊開始点-2 — 破壊開始点-3
 — 破壊開始点-4 — 破壊開始点-5

鉛直

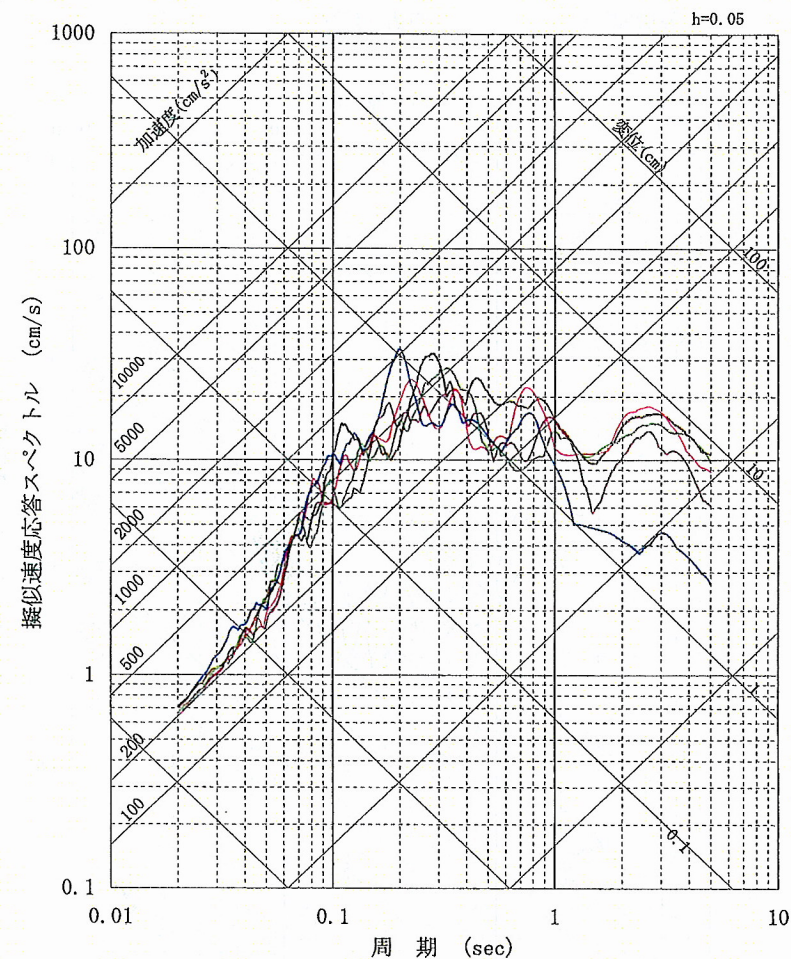
4-3. 地震動評価結果

■FO-C断層: 上端深さ3km(大飯発電所)



—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

水平(実線: NS方向、破線: EW方向)

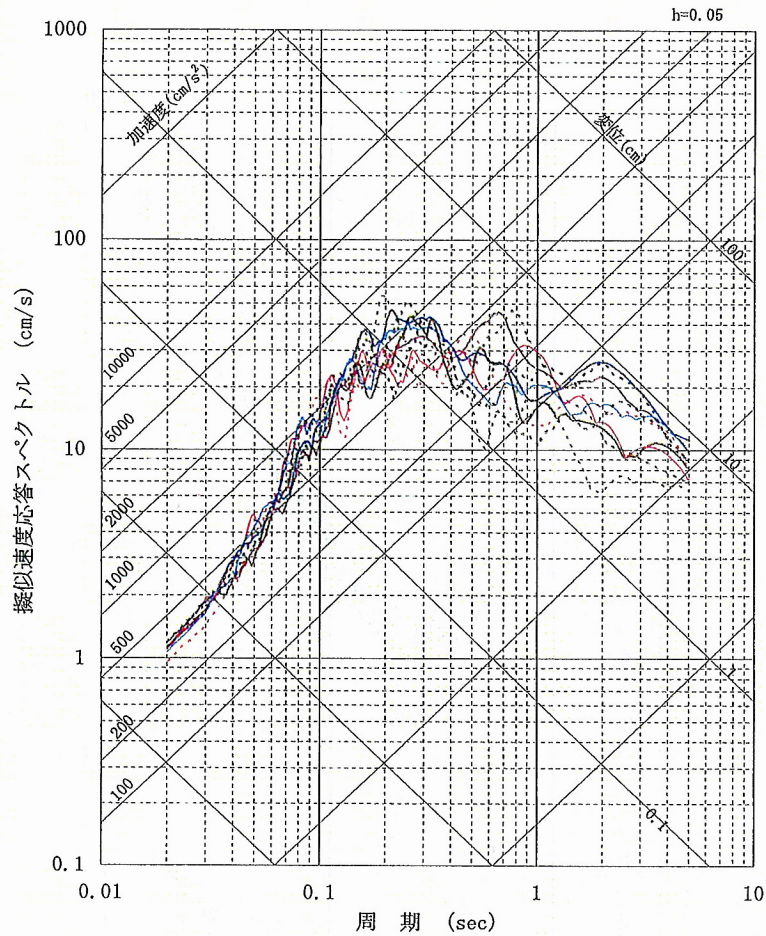


—破壊開始点-1 —破壊開始点-2 —破壊開始点-3
—破壊開始点-4 —破壊開始点-5

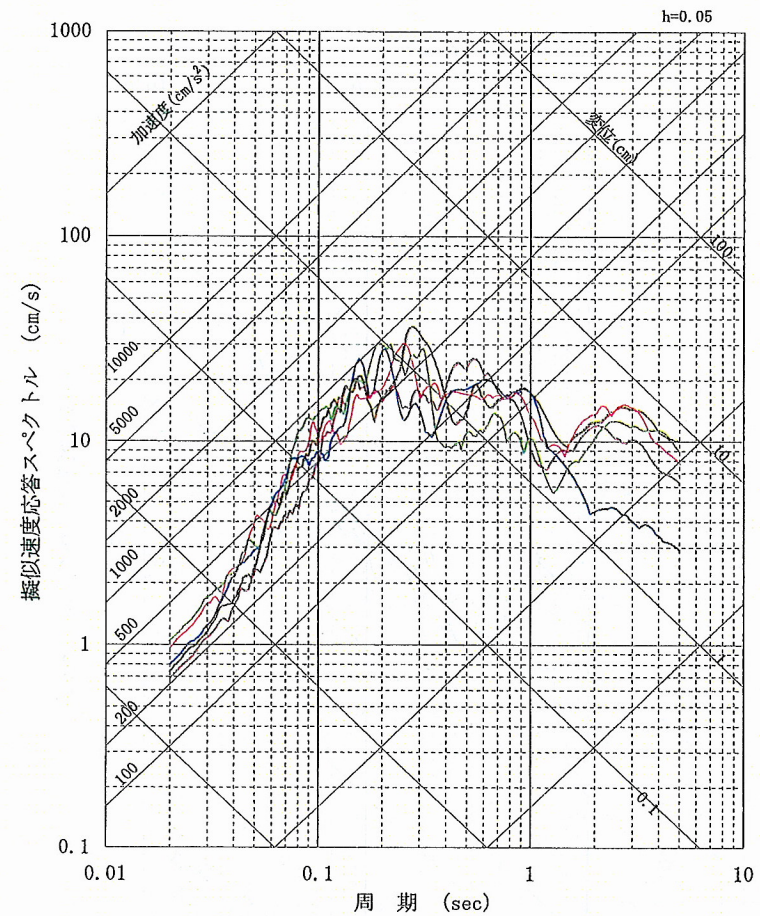
鉛直

4-3. 地震動評価結果

■FO-C断層:上端深さ4km、短周期レベル1.5倍(大飯発電所)



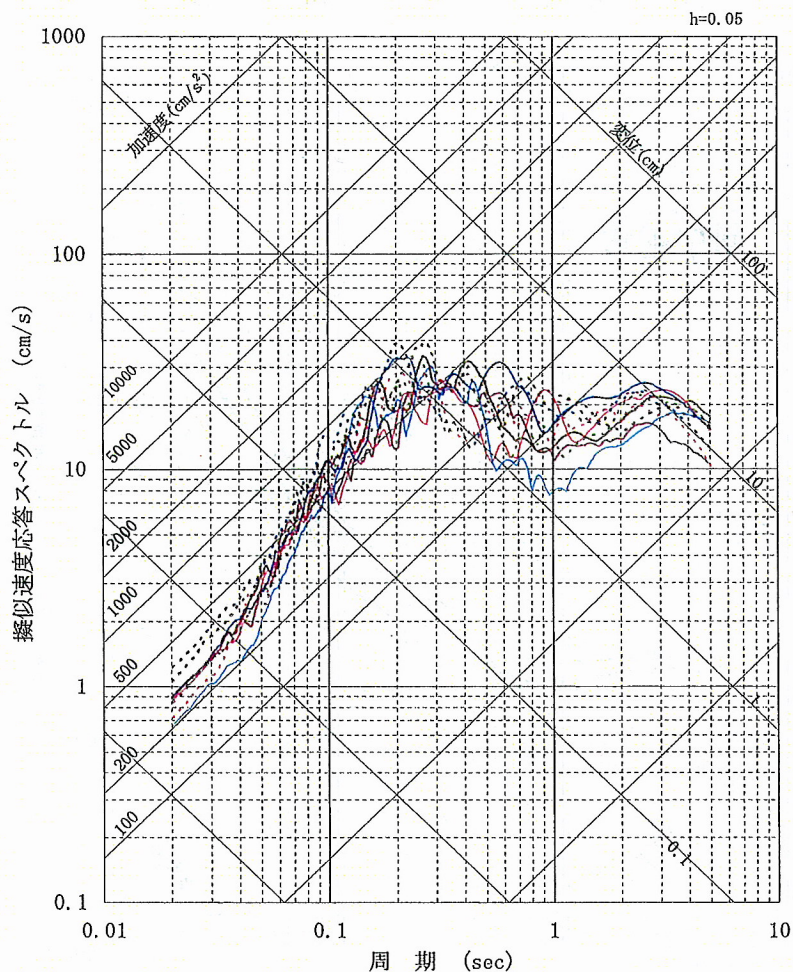
水平(実線: NS方向、破線: EW方向)



鉛直

4-3. 地震動評価結果

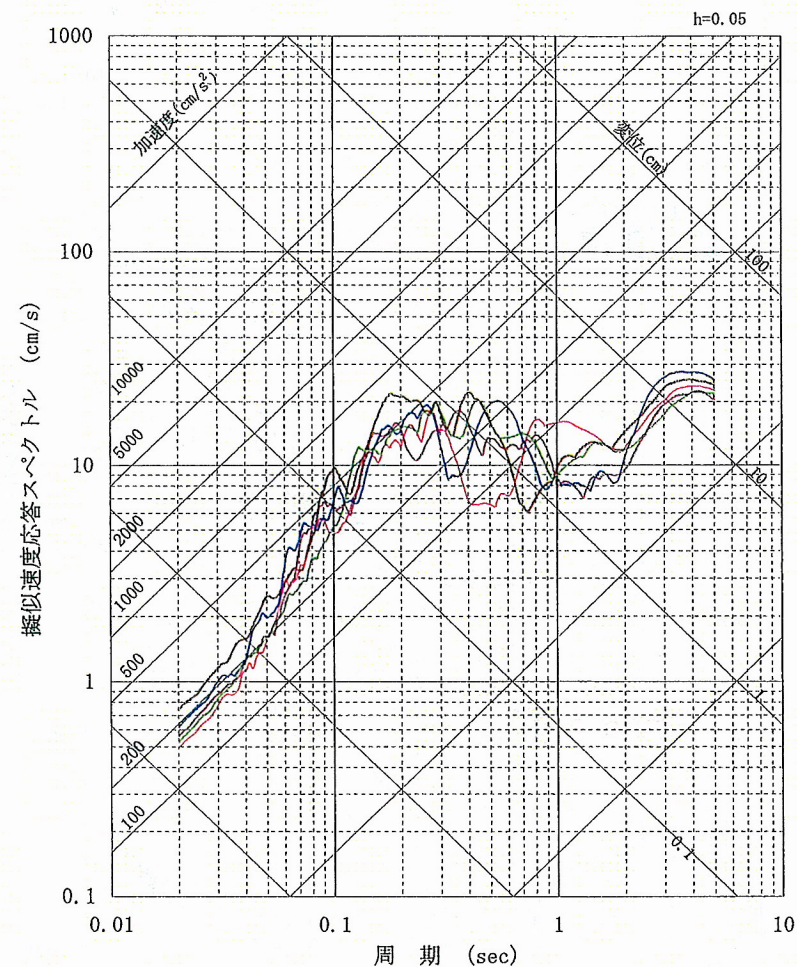
■ FO-C断層: 上端深さ4km、傾斜角75°、縦ずれ(大飯発電所)



— 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

水平(実線: NS方向、破線: EW方向)



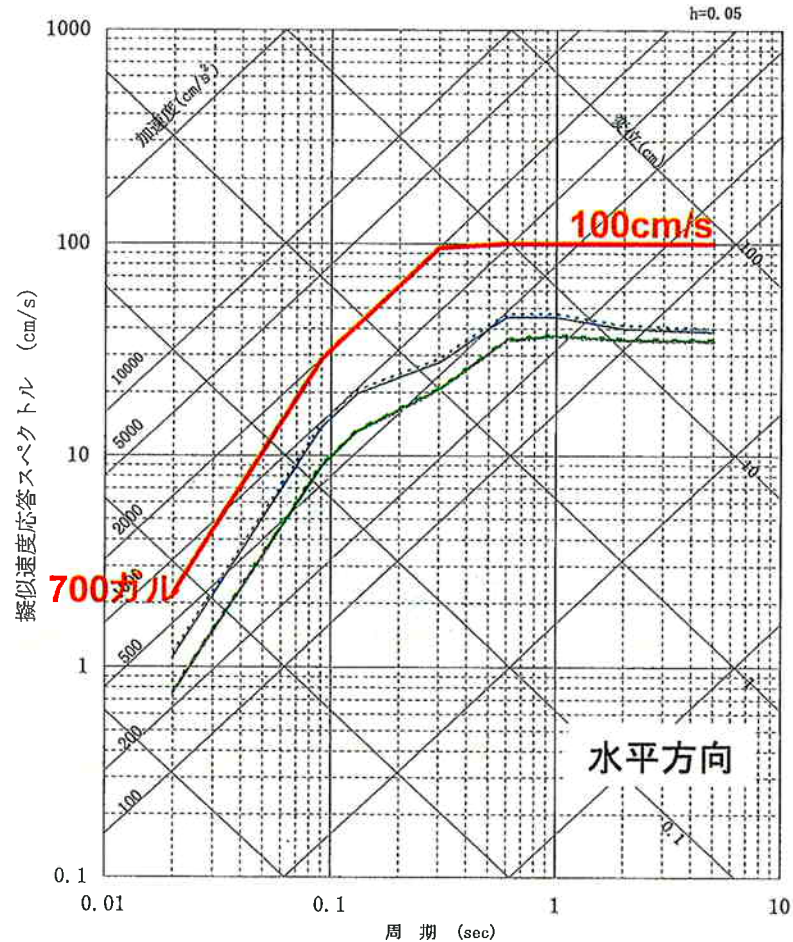
— 破壊開始点-1 — 破壊開始点-2 — 破壊開始点-3

— 破壊開始点-4 — 破壊開始点-5

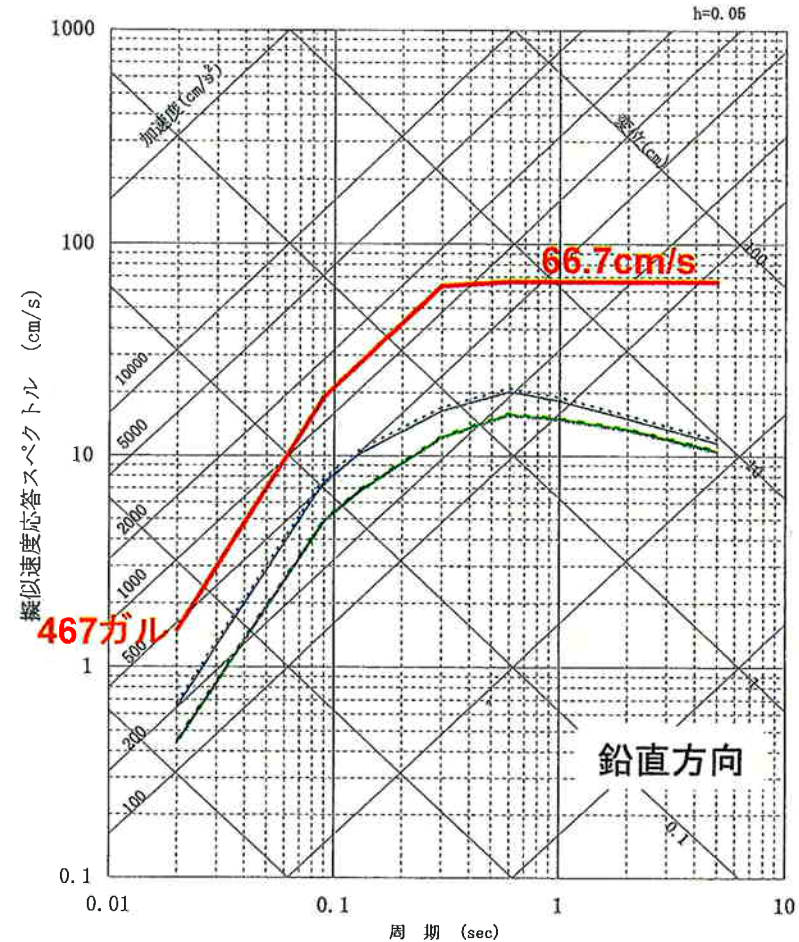
鉛直

4-4. 基準地震動Ssの策定

■ 基準地震動Ssの設計用応答スペクトルと耐専式による評価結果と比較する。



— 熊川断層 (上端4km) 熊川断層 (上端3km)
 — 上林川断層 (上端4km) - - - 上林川断層 (上端3km)
 — 基準地震動Ss-H

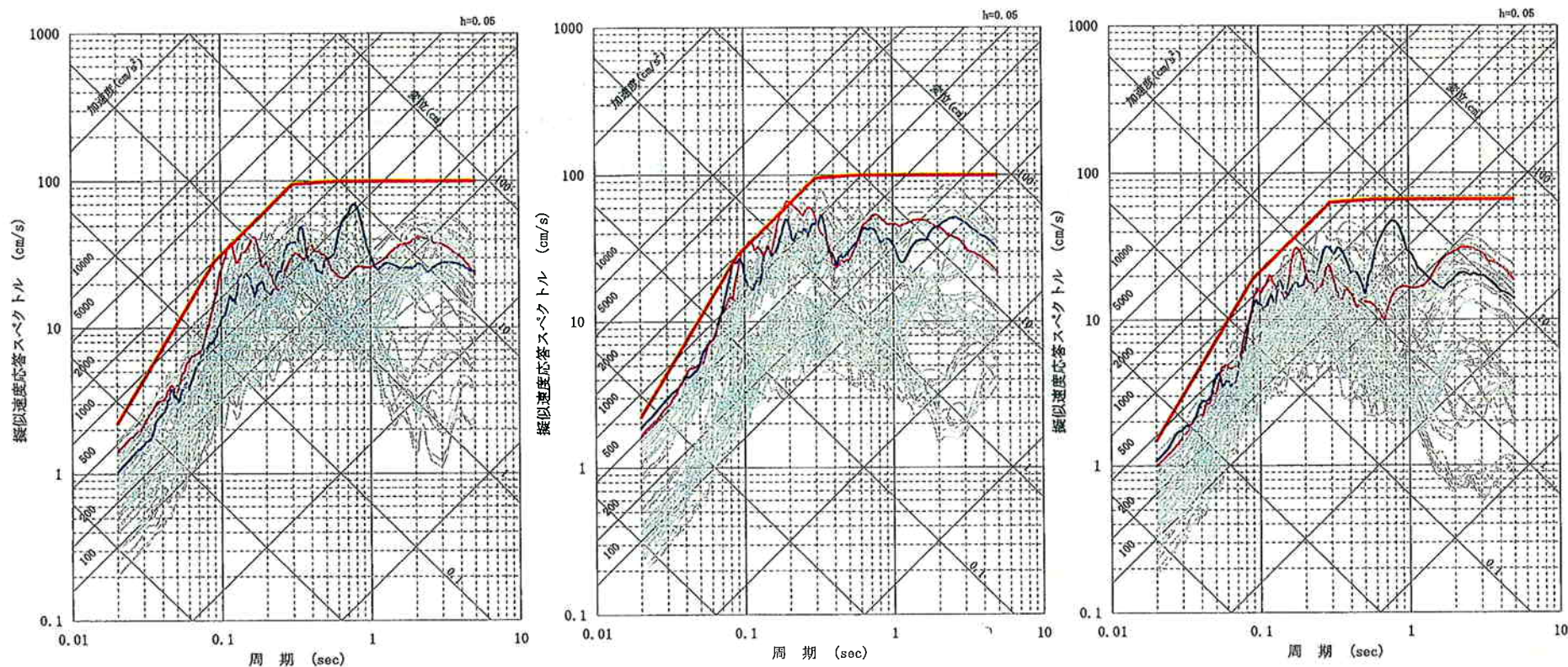


— 熊川断層 (上端4km) 熊川断層 (上端3km)
 — 上林川断層 (上端4km) - - - 上林川断層 (上端3km)
 — 基準地震動Ss-V

※鉛直方向のSsは水平方向の2/3倍

4-4. 基準地震動Ssの策定

■ 前ページで示した基準地震動Ssの設計用応答スペクトルに対し、断層モデルを用いた地震動評価結果のNS/EW/UD方向それぞれの成分にて超過するケースより、基準地震動Ssを選定する。



水平(NS)方向

水平(EW)方向

鉛直(UD)方向

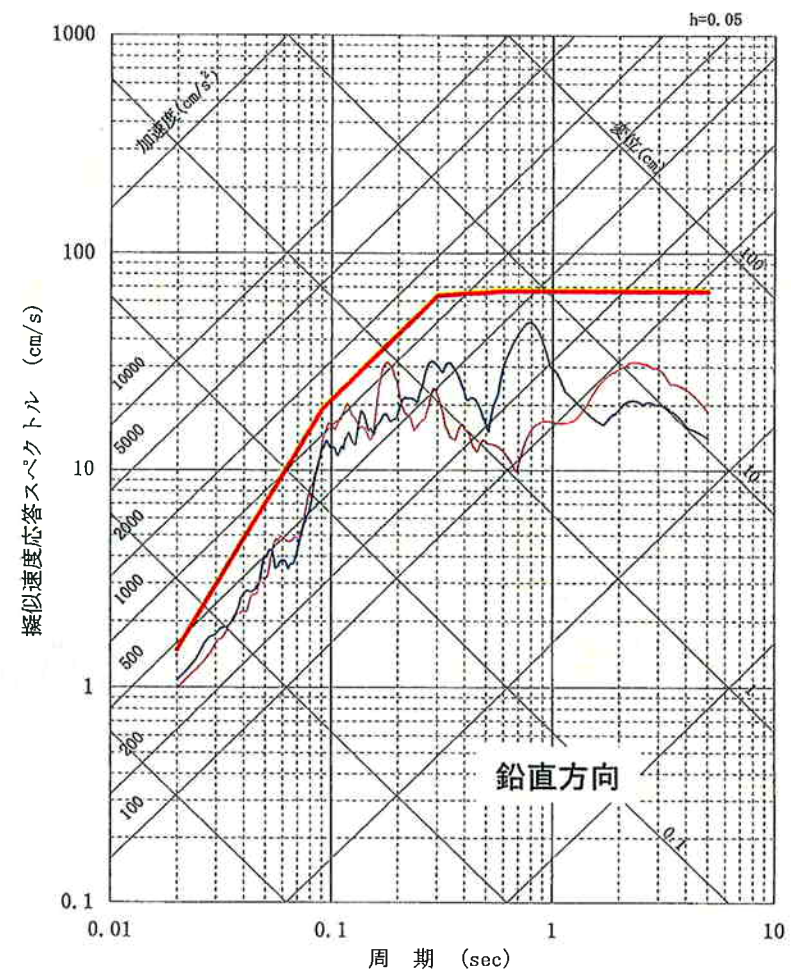
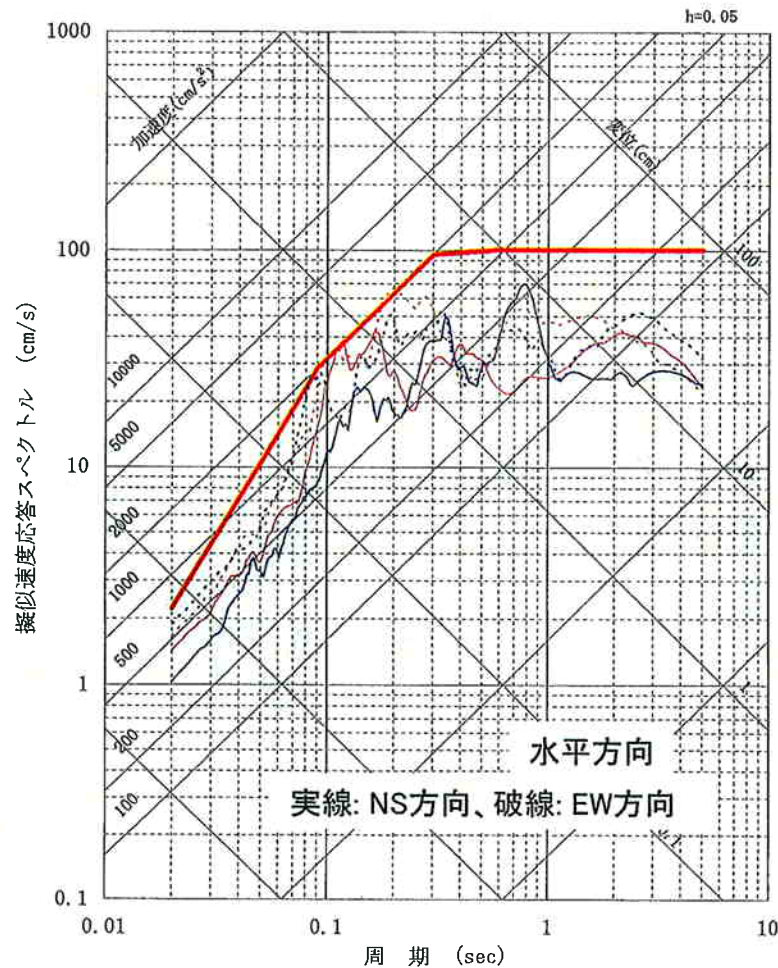
凡例

FO-A～FO-B断層

- 上端4km、短周期レベル1.5倍、破壊開始点1 (326, 591, 338)
- 上端4km、短周期レベル1.5倍、破壊開始点3 (450, 520, 311)

※凡例の()内の数値は順にNS, EW, UD成分の最大加速度値(ガル)

4-4. 基準地震動S_sの策定



凡例

— 基準地震動S_{s-1}

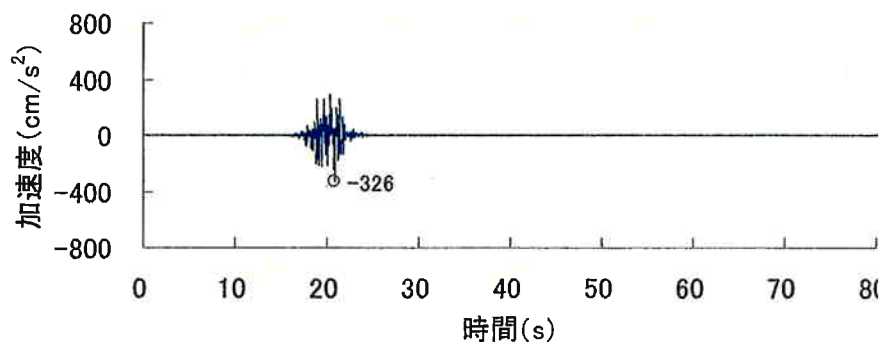
FO-A~FO-B断層

— S_{s-2}上端4km、短周期レベル1.5倍、破壊開始点1 (326, 591, 338)

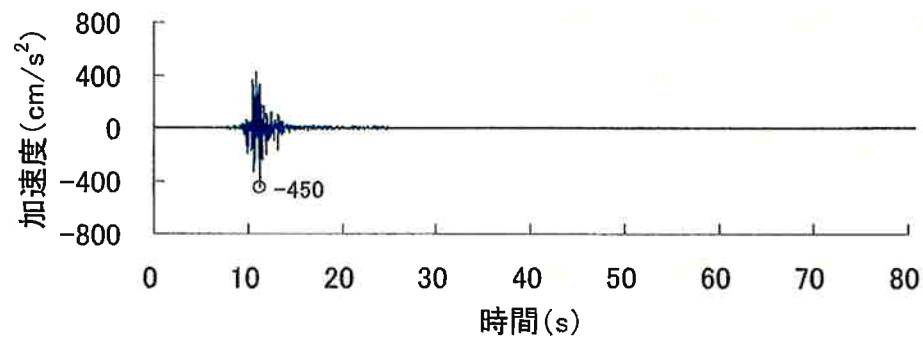
— S_{s-3}上端4km、短周期レベル1.5倍、破壊開始点3 (450, 520, 311)

※凡例の()内の数値は順にNS, EW, UD成分の最大加速度値(ガル)

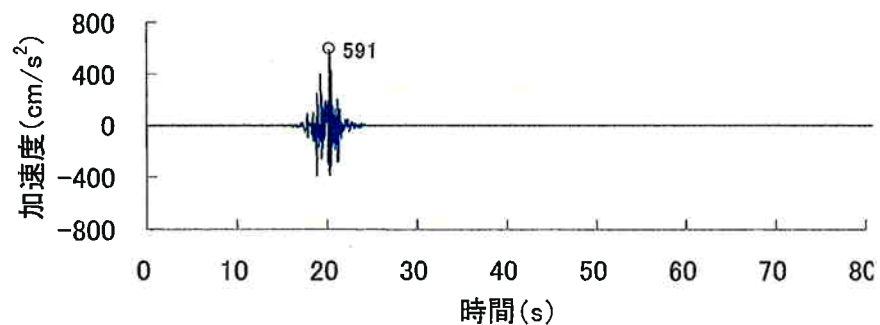
4-4. 基準地震動Ssの策定



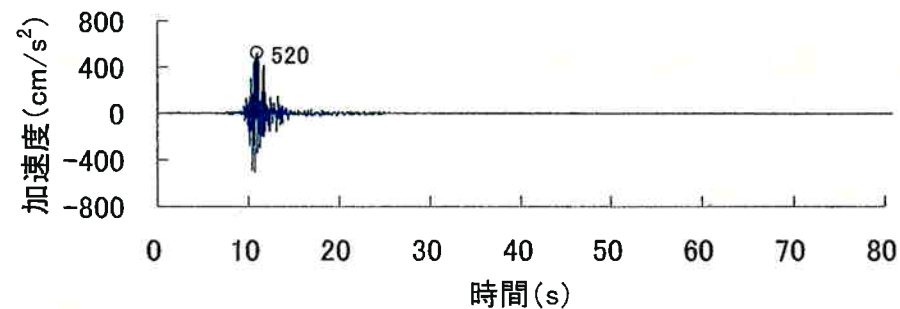
S_{S-2}(NS方向)



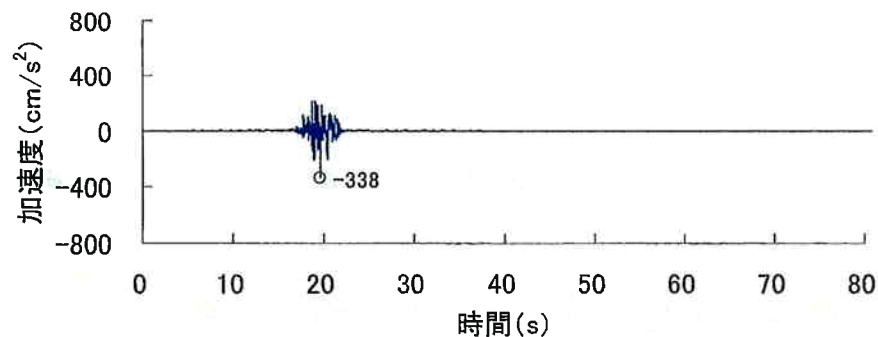
S_{S-3}(NS方向)



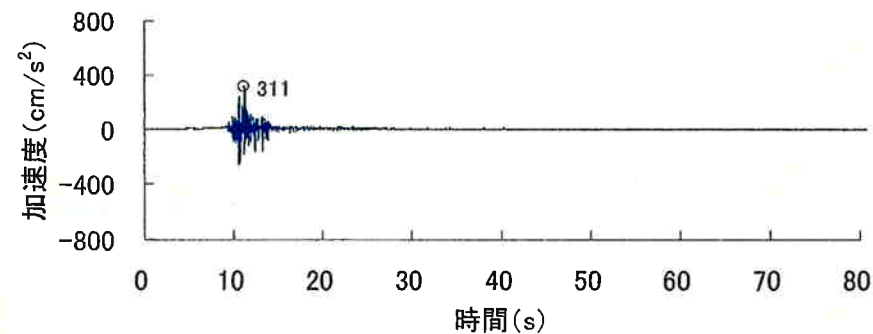
S_{S-2}(EW方向)



S_{S-3}(EW方向)



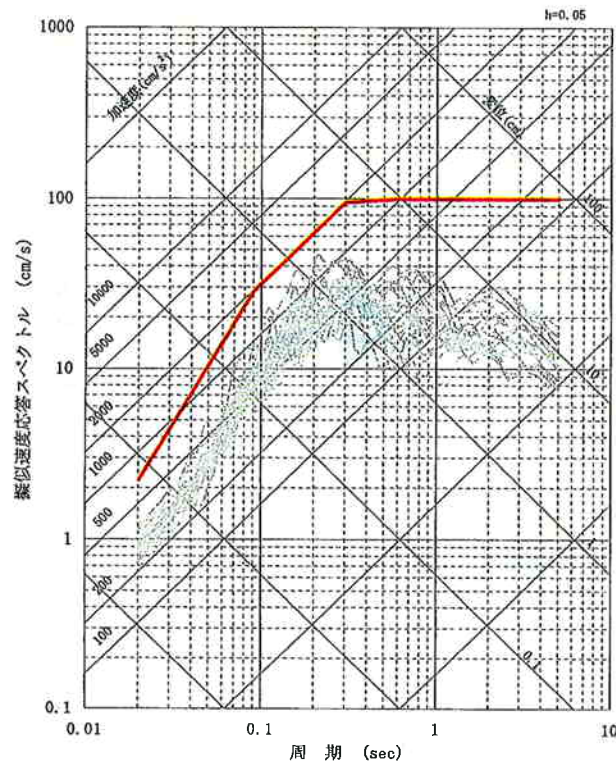
S_{S-2}(UD方向)



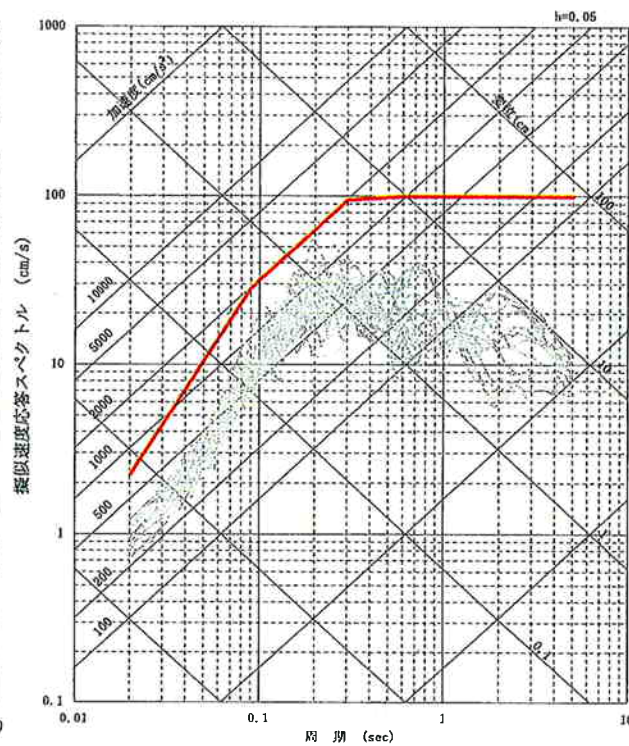
S_{S-3}(UD方向)

4-4. 基準地震動Ssの策定

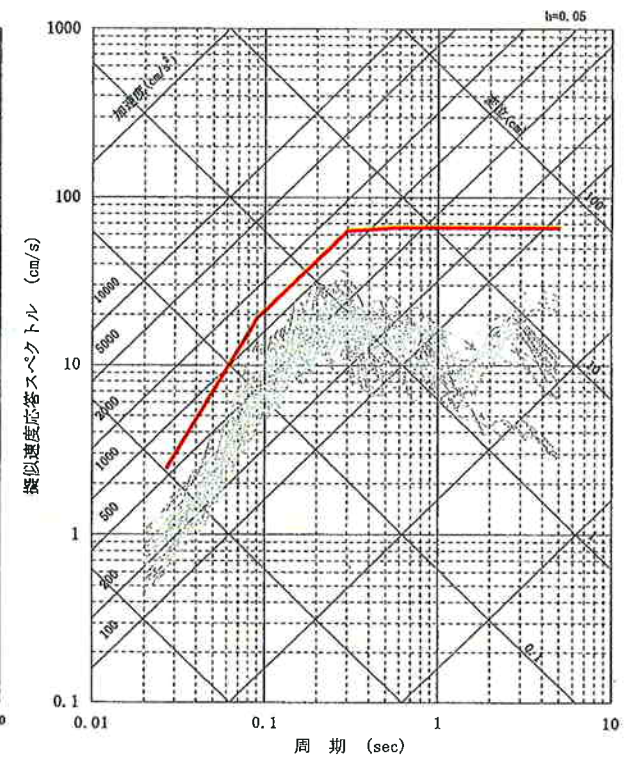
■ 孤立した短い活断層(FO-C)断層による評価結果が、基準地震動Ssに収まっていることを確認する。



水平(NS)方向



水平(EW)方向



鉛直(UD)方向

5. 震源を特定せず策定する地震動

高浜発電所の震源を特定せず策定する地震動は、加藤他(2004)による応答スペクトルを採用する。

加藤他(2004)は、内陸地殻内地震を対象として、詳細な地質学的調査によっても震源位置と地震規模をあらかじめ特定できない地震(以下「震源を事前に特定できない地震」という。)による震源近傍の硬質地盤上における強震記録を用いて、震源を事前に特定できない地震による地震動の上限レベルの応答スペクトルを設定している。

また、最新の知見を考慮しても、この応答スペクトルを上回るような、震源を事前に特定できない地震による震源近傍の観測記録は得られていない。

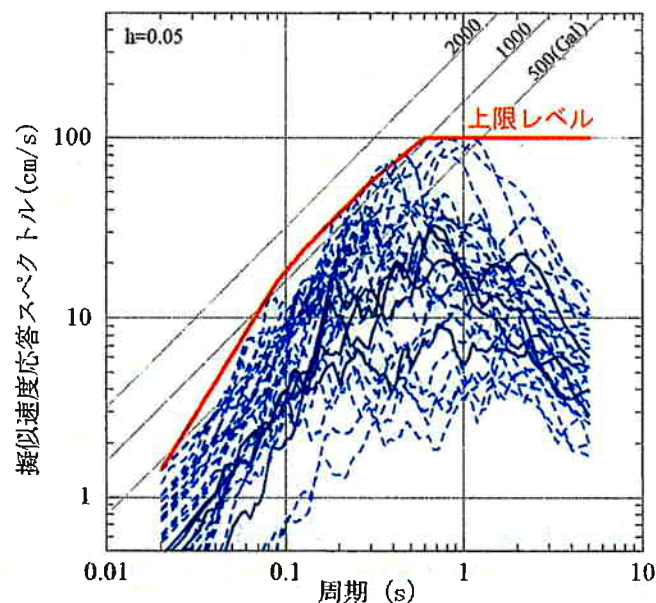


図8 震源を事前に特定できない地震による震源近傍の観測記録の水平動応答スペクトルとその上限レベル

(実線は1997年鹿児島県北西部地震の鶴田ダムの特クトル、破線はスケーリングの観点から確実に事前に震源を特定できるとは断定できないと判断したMj6.5(Mw6.2)以下の7地震の特クトル)

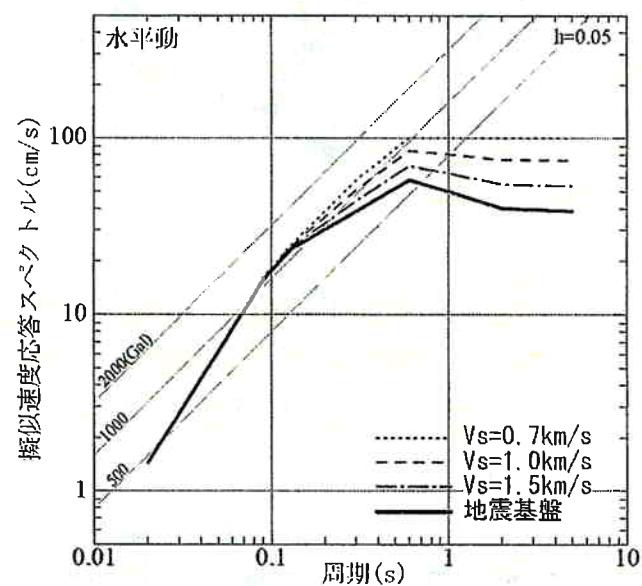
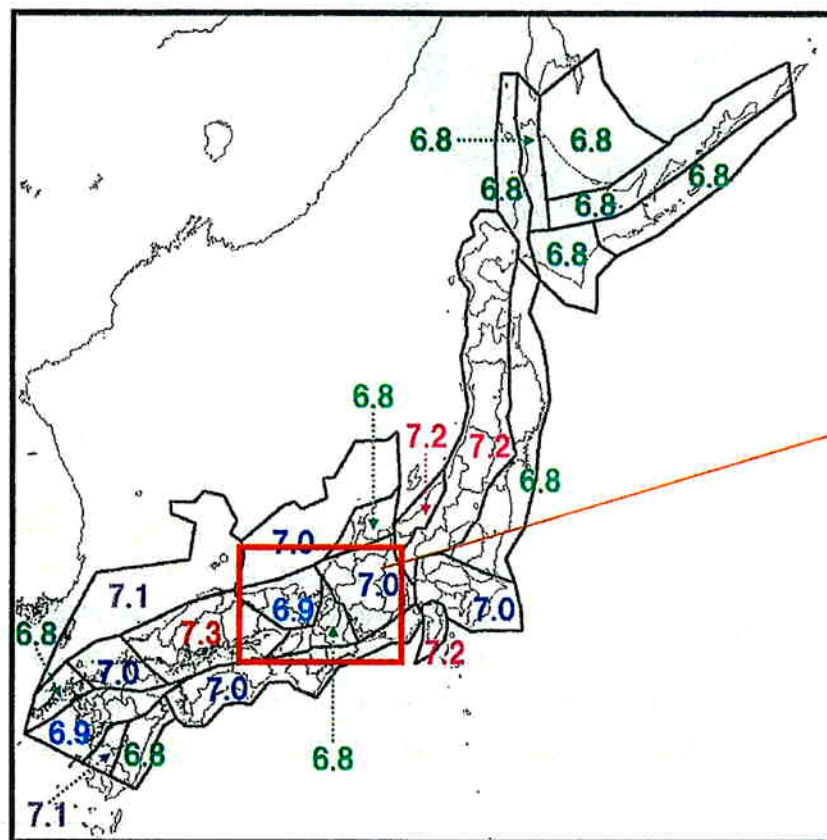


図9 震源を事前に特定できない地震による水平動の地震動レベル

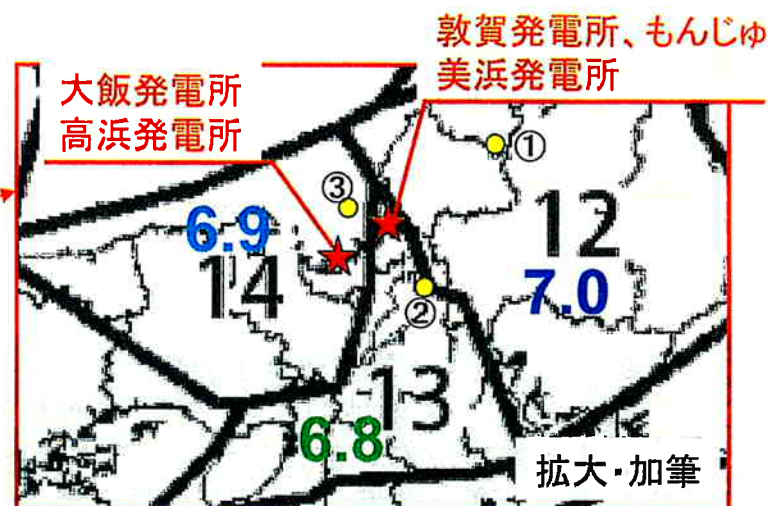
5. 震源を特定せず策定する地震動

■領域震源区分から推定される地震の規模

地震調査研究推進本部(2009)は、震源断層が特定された主要活断層帯と海溝型地震以外にも、例えば活断層が知られていないところで発生する内陸の浅い地震やプレート間の中小地震等を「震源断層を予め特定しにくい地震」と呼び、下図に示すように領域と最大マグニチュードを設定し、確率論的地震動予測地図作成の際にその影響を考慮している。若狭地域における「震源断層を予め特定しにくい地震」の最大マグニチュードはM6.8～6.9とされている。

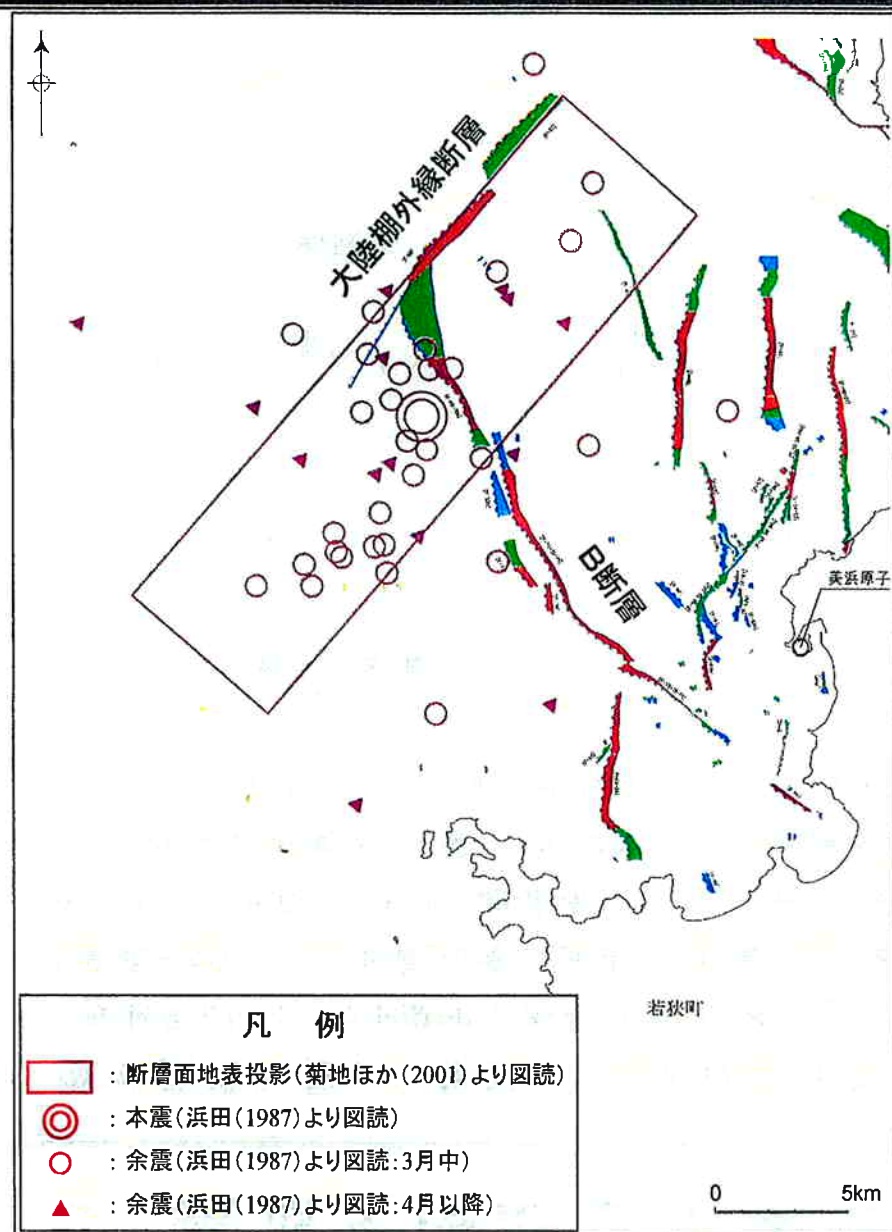


- ①1961年北美濃地震(M7.0)【領域12】
- ②1909年江濃(姉川)地震(M6.8)【領域13】
- ③1963年越前岬沖地震(M6.9)【領域14】



陸域の震源断層を予め特定しにくい地震の領域と
最大マグニチュード 地震調査研究推進本部(2009)

5. 震源を特定せず策定する地震動



- 1963年3月27日に発生した越前岬沖地震について、余震分布の検討⁽¹⁾や波形インバージョンによる検討⁽²⁾が実施されている。
- 余震分布や波形インバージョンにより求められた断層面は、大陸棚外縁断層と調和的である。
- 以上のことから、越前岬沖地震と大陸棚外縁断層とは関連があるものと判断する。

走向と広域応力場との関係から右横ずれが卓越する断層と考えられ、波形インバージョン等の結果からも右横ずれであることが確認される。波形インバージョンの結果では、 63° 南東傾斜である。

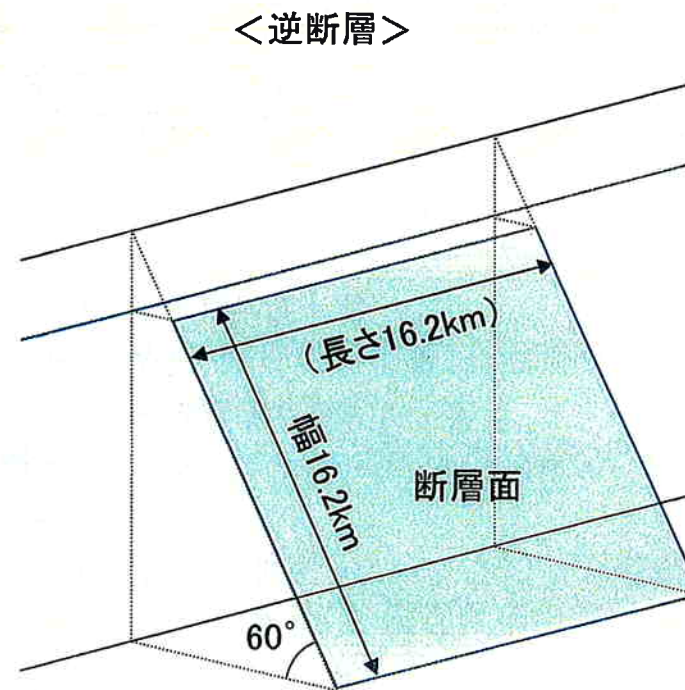
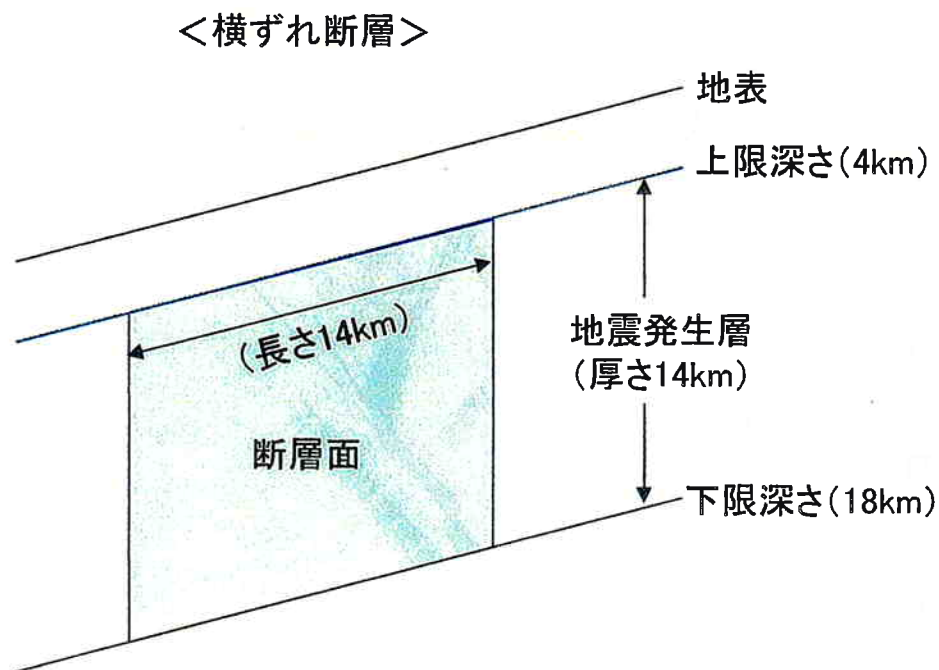
地震動評価においては、傾斜 60° の横ずれ断層として設定

- (1) 浜田信生(1987): 日本列島の内陸部に発生した被害地震に伴う地震活動の再調査とその地震学的意義, 気象研究所研究報告, 38, 77-156
- (2) 菊地正幸・中村操・山田真・吉川一光(2001): 気象庁強震記録による1963年3月27日越前岬沖地震の震源過程

5. 震源を特定せず策定する地震動

■地震発生層から推定される地震の規模

敷地周辺における地震発生層は、上限深さ約4km、下限深さ約18km となり、その厚さは14km程度と推定される。「震源を特定しない地震」の最大規模が、地震発生層を飽和する震源断層による地震であると考え、地震発生層の上限から下限まで広がる断層幅及びそれに等しい断層長さの震源断層を仮定した場合、地震発生層から推定される地震の規模は、入倉・三宅(2001)による断層面積と地震モーメントの関係式及び武村(1990)による地震モーメントとマグニチュードMの関係式を介して鉛直断層ではM6.6、傾斜角 60° の断層ではM6.8 に相当する。

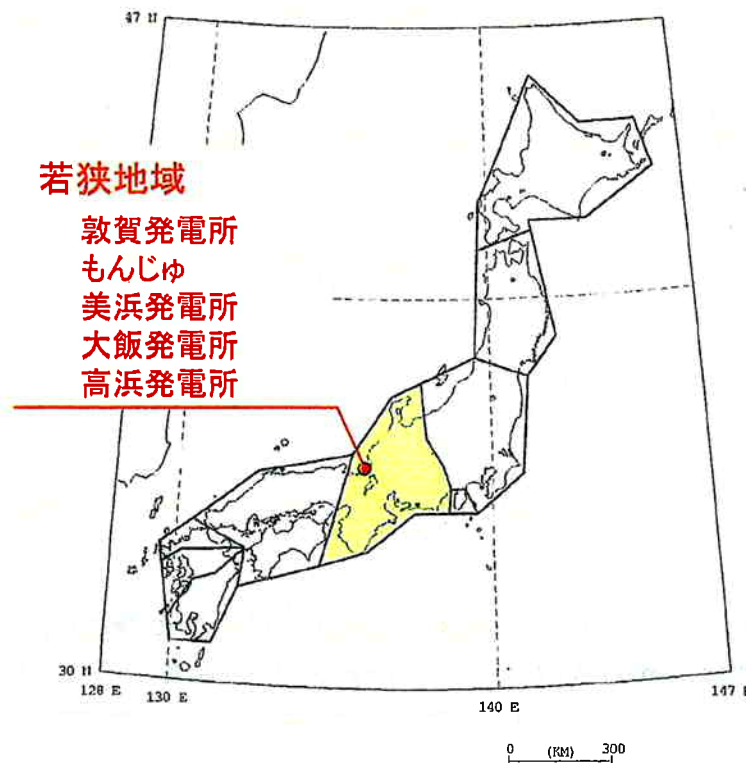


5. 震源を特定せず策定する地震動

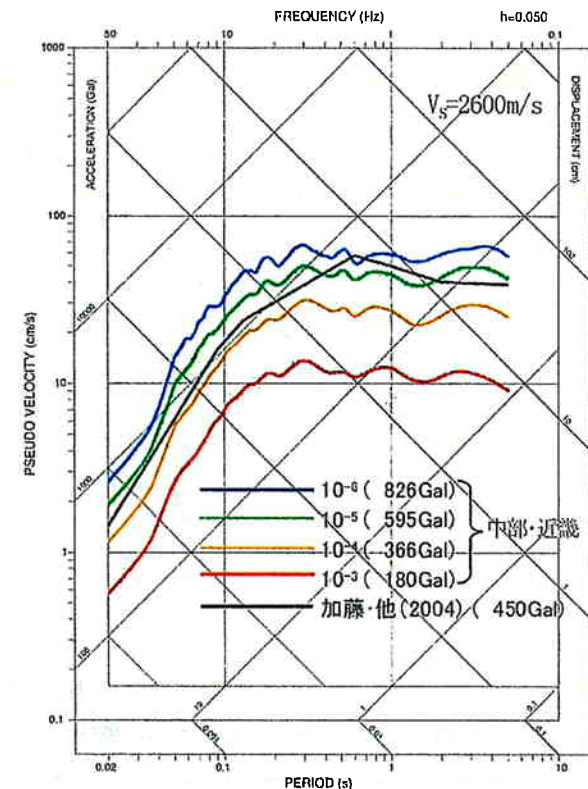
■ 超過確率の参照

原子力安全基盤機構(2005)は、断層モデルを用いた手法によるM5.5～M7.3の地震の震源近傍における地震動評価結果に基づき、各地域の「震源を特定しない地震」による地震動について、地震基盤面における水平動の年超過確率を求め、その一様ハザードスペクトルを算出している。原子力安全基盤機構(2005)による領域区分、及び、敷地が位置する領域(中部・近畿)における一様ハザードスペクトルと、加藤他(2004)による「震源を事前に特定できない地震による地震動」の応答スペクトルをNoda et al.(2002)による地盤の増幅特性を用いて補正した地震基盤表面相当における応答スペクトルを比較して下図に示す。

加藤他(2004)に基づき設定した「震源を特定せず策定する地震動」の年超過確率は $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 程度である。



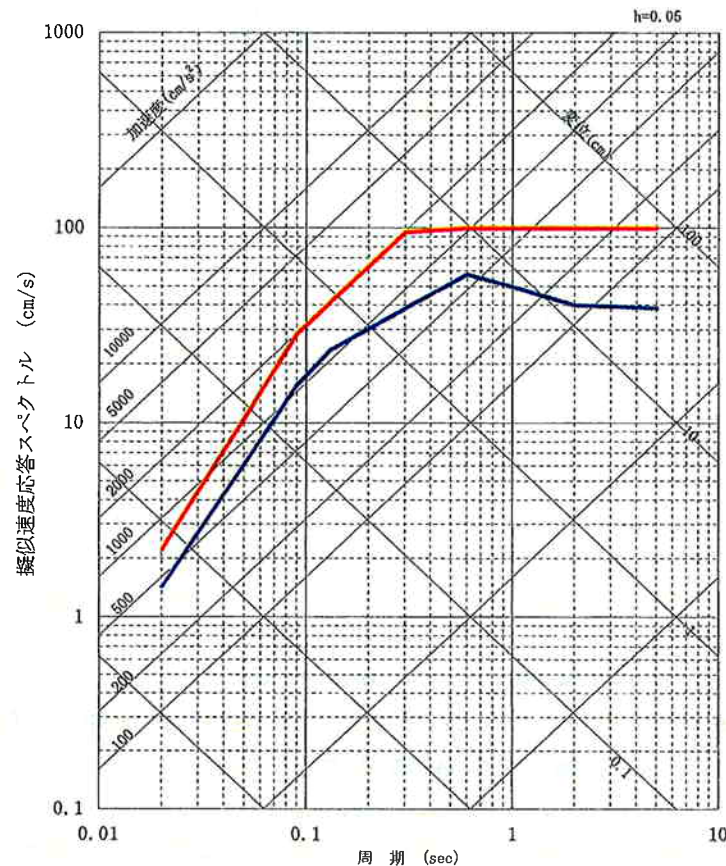
原子力安全基盤機構(2005)による領域区分



敷地が位置する領域(左図黄色網掛部)の地震基盤面相当における一様ハザードスペクトルと加藤他(2004)による「震源を事前に特定できない地震による地震動」の応答スペクトルの比較

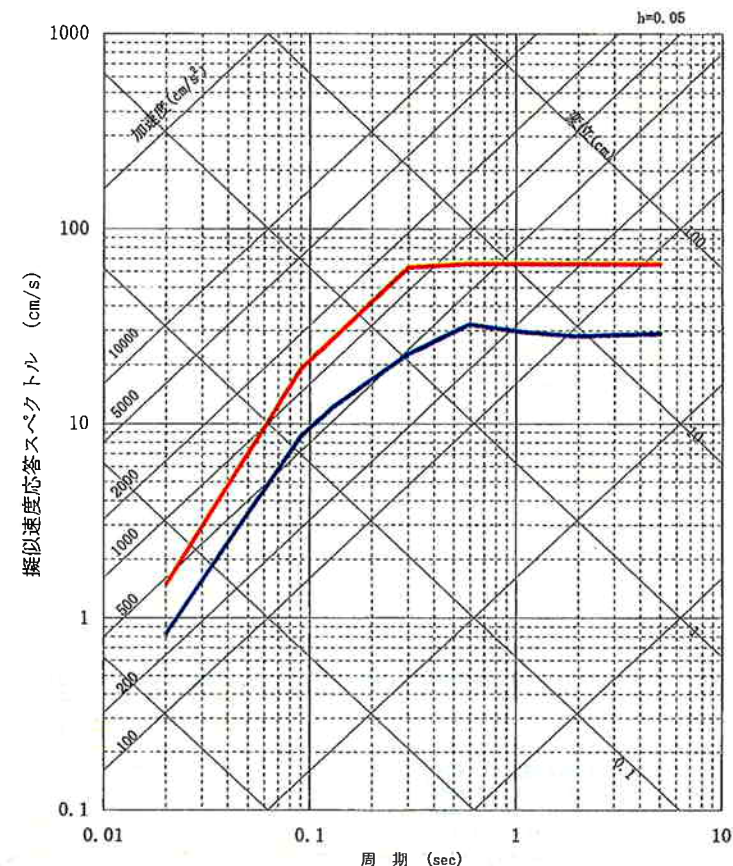
5. 震源を特定せず策定する地震動

「震源を特定せず策定する地震動」は、地域性の検討結果を踏まえ、加藤他(2004)に基づき、地震基盤から大飯サイトにおける解放基盤表面に至る地盤増幅率をNoda et al.(2002)の方法に従い評価した。



— 加藤ほか (2004) による応答スペクトル ($V_s=2.2\text{km/s}$)

— 基準地震動 S_{s-1H}



— 加藤ほか (2004) による応答スペクトル ($V_p=4.3\text{km/s}$)

— 基準地震動 S_{s-1V}

設計用応答スペクトル S_{s-H} 、 S_{s-V} は「震源を特定せず策定する地震動」を全ての周期帯で包絡することから、基準地震動 S_s としては、設計用応答スペクトル S_{s-H} 、 S_{s-V} で代表させることとする。

6. 年超過確率の参照

参考として、基準地震動 S_s の設計用応答スペクトルと日本原子力学会(2007)の方法に基づき試算した敷地における地震動の一樣ハザードスペクトルを比較し、策定した基準地震動 S_s の設計用応答スペクトルがどの程度の年超過確率に相当するか把握する。

震源モデルとして、特定震源モデルと領域震源モデルを作成する。

(1) 特定震源モデルに基づく評価

①「主要活断層震源モデル」

敷地に影響を及ぼすと考えられる活断層として、敷地周辺の地質調査結果等に基づいて設定された活断層をモデル化。このうち、特に敷地に影響を及ぼすと考えられる活断層については、ロジックツリーに展開し評価した。

②「その他の活断層震源モデル」

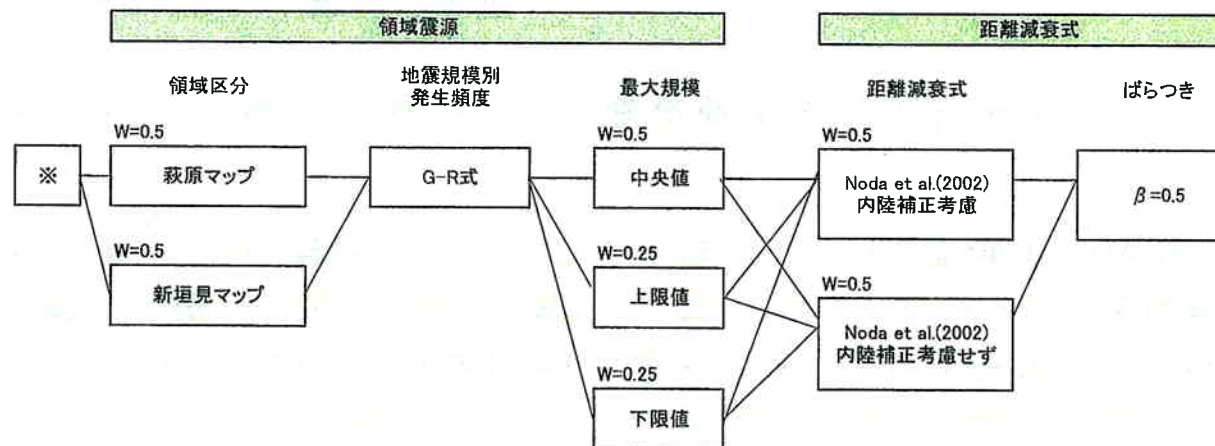
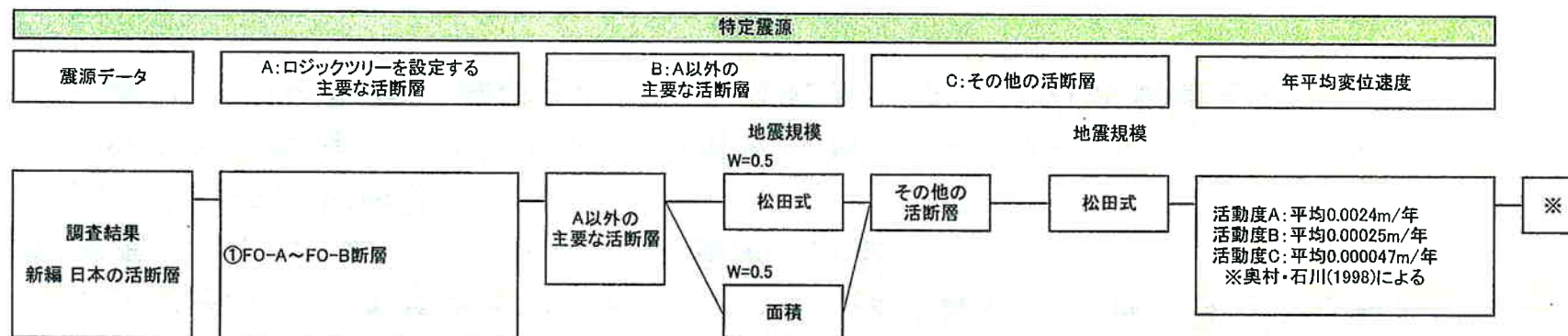
主要活断層震源モデル以外の活断層を対象に、基本的にサイトから100km以内にある新編日本の活断層に掲載されている確実度Ⅰ及びⅡの活断層をモデル化。

(2) 領域震源モデルに基づく評価

領域震源モデルについては、萩原(1991)及び垣見・他(2003)の領域区分に基づき、各領域の最大マグニチュードは領域内の過去の地震の最大値を元に設定。

6. 年超過確率の参照

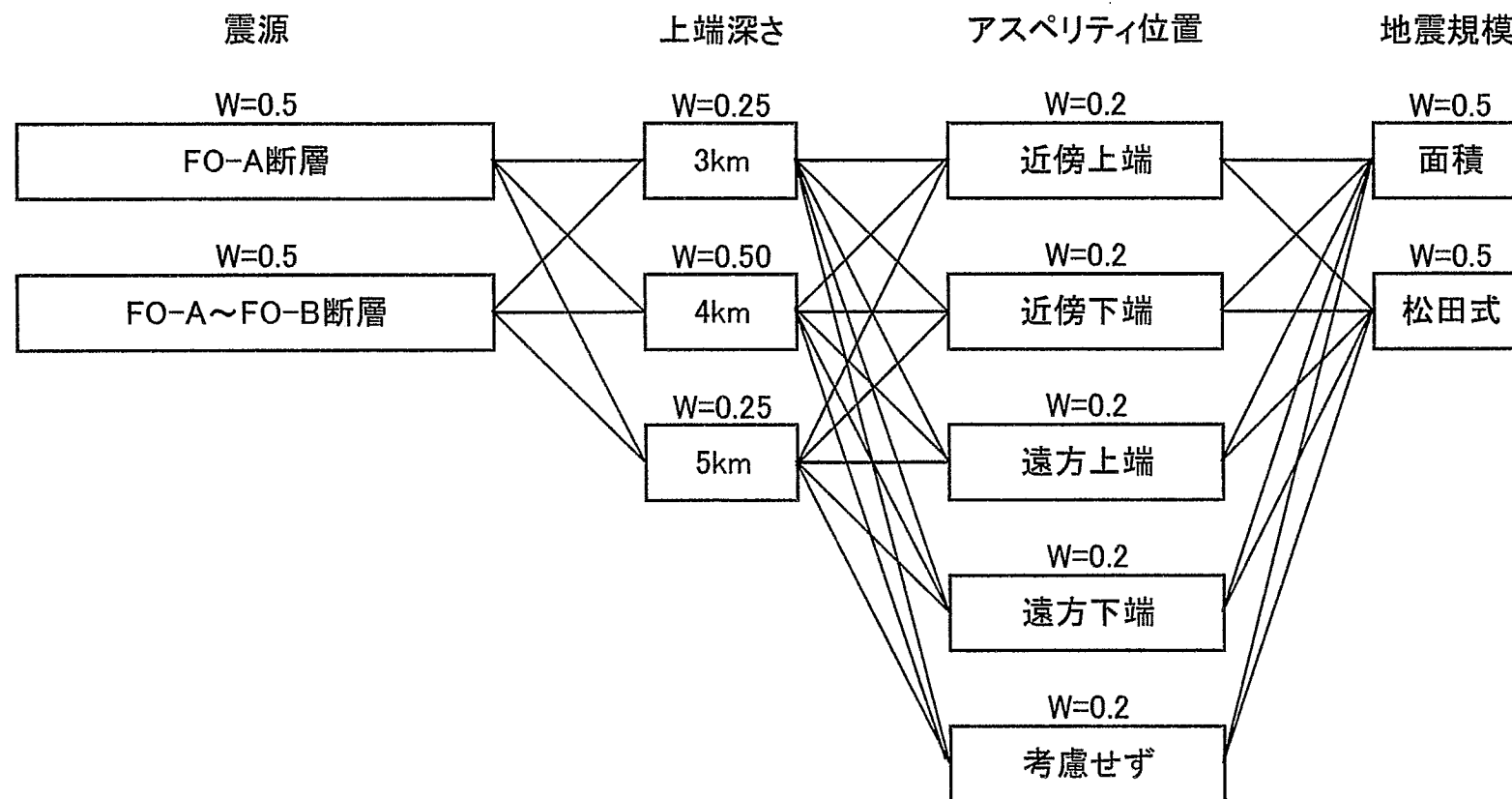
設定したロジックツリー



6. 年超過確率の参照

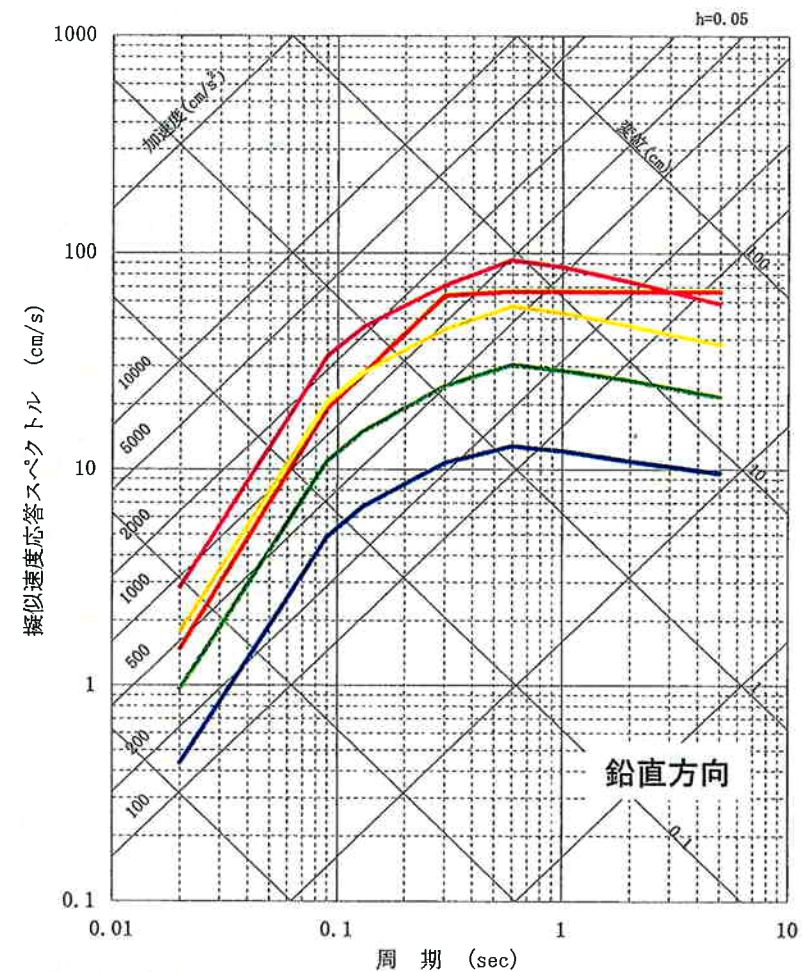
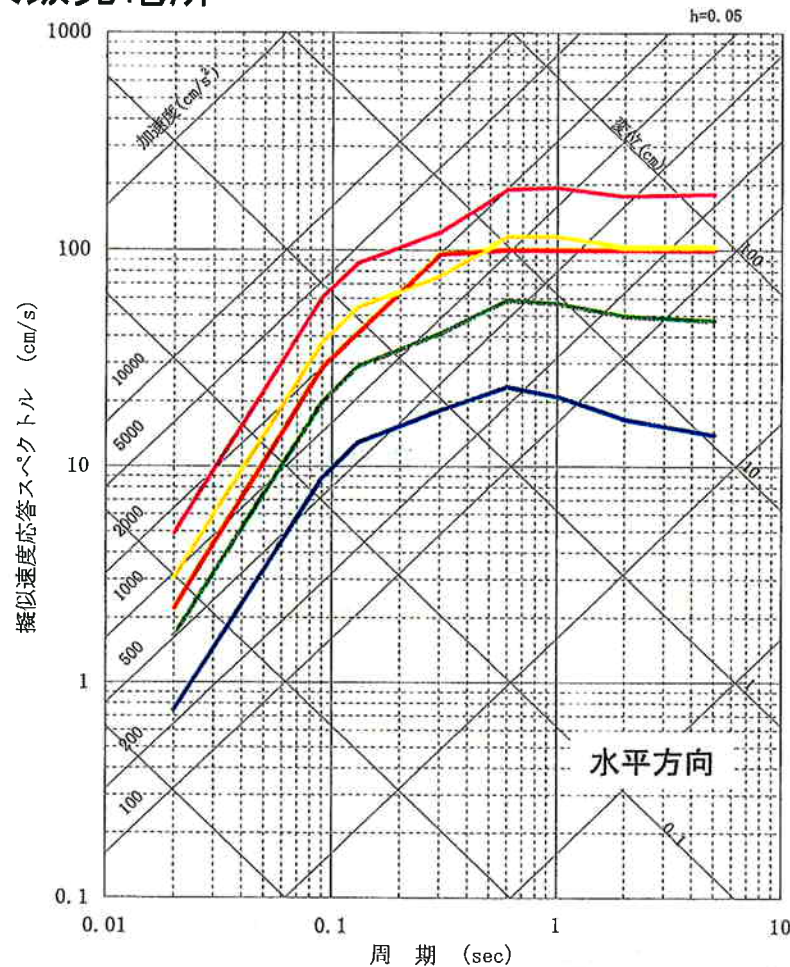
ロジックツリーを設定した主要な活断層(大飯発電所)

①FO-A断層、FO-B断層



6. 年超過確率の参照

基準地震動Ssの設計用応答スペクトルと年超過確率毎の一樣ハザードスペクトルとの比較
○大飯発電所



凡例

— 基準地震動Ss

— 年超過確率 10^{-6}

— 年超過確率 10^{-4}

— 年超過確率 10^{-5}

— 年超過確率 10^{-3}

6. 年超過確率の参照

基準地震動 S_s の設計用応答スペクトルと日本原子力学会(2007)の方法に基づき試算した敷地における地震動の一樣ハザードスペクトルを比較し、策定した基準地震動 S_s の設計用応答スペクトルの年超過確率は $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 程度であることを確認した。

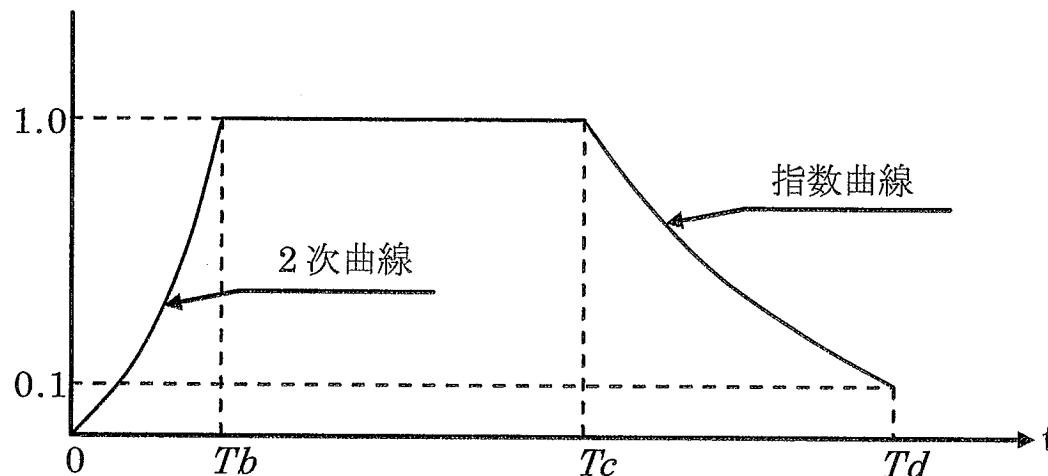
参考1 模擬地震波の作成に関する検討

■設計用応答スペクトルに適合する模擬地震波 S_{S-1H} 、 S_{S-1V} は、位相角を一様乱数として与えた正弦波を重ね合わせて、それぞれの目標とする応答スペクトルに適合するように補正して作成する。

■振幅包絡線の経時的変化については、Noda et al.(2002)に基づく(下表)

模擬地震波 S_{S-H} 、 S_{S-V} の振幅包絡線の経時的変化

地震動	マグニ チュード M	等価震源 距離 X_{eq} (km)	振幅包絡線の経時的変化(s)		
			t_b	t_c	t_d
S_{S-1H} S_{S-1V}	7.8	60	9.33	31.21	79.76



$$T_b = 10^{0.5M-2.93}$$

$$T_c - T_b = 10^{0.3M-1.0}$$

$$T_d - T_c = 10^{0.17M+0.54\log X_{eq}-0.6}$$

$$E(t) = \begin{cases} (T/T_b)^2 & 0 \leq T \leq T_b \\ 1.0 & T_b \leq T \leq T_c \\ e^{\frac{\ln(0.1)}{T_d-T_c}(T-T_c)} & T_c \leq T \leq T_d \end{cases}$$

参考1 模擬地震波の作成に関する検討

■ $h=5\%, 1\%$ の2つの減衰定数に対する応答スペクトルを目標のスペクトルとする。

■ $h=1\%$ の応答スペクトルは、Noda et al.(2002)に基づき、 $h=5\%$ の応答スペクトルに補正係数を乗じて算定する。

○Noda et al.(2002)による補正係数

$$\eta(T, h) = \begin{cases} \frac{1}{(1 + a(h - 0.05) \exp(-b \times T / T_{eq}))^{1/2}} & (T = T_C \sim T_H) \\ \frac{1}{(1 + a(h - 0.05) \exp(-b \times T_c / T_{eq}))^{1/2}} & (T = T_B) \\ 1 & (T = T_A) \end{cases}$$

ここで、

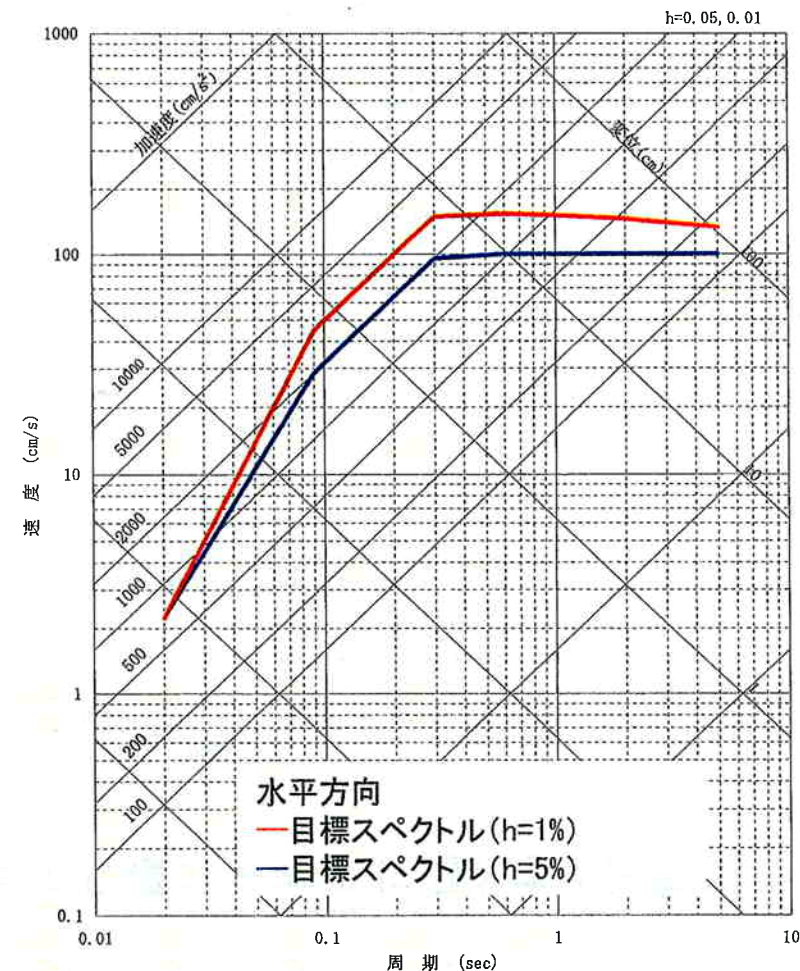
$$T_A = 0.02 \text{ (s)}, T_B = 0.09 \text{ (s)}, T_C = 0.13 \text{ (s)}, T_D = 0.3 \text{ (s)}$$

$$T_E = 0.6 \text{ (s)}, T_F = 1 \text{ (s)}, T_G = 2 \text{ (s)}, T_H = 5 \text{ (s)}$$

$$T_{eq} = 10^{0.3M - 1.0} + 0.2 \times 10^{0.17M + 0.54 \log X_{eq} - 0.6}$$

$$a = 15, b = 2.0 (h < 0.05)$$

$$a = 13, b = 5.0 (h > 0.05)$$



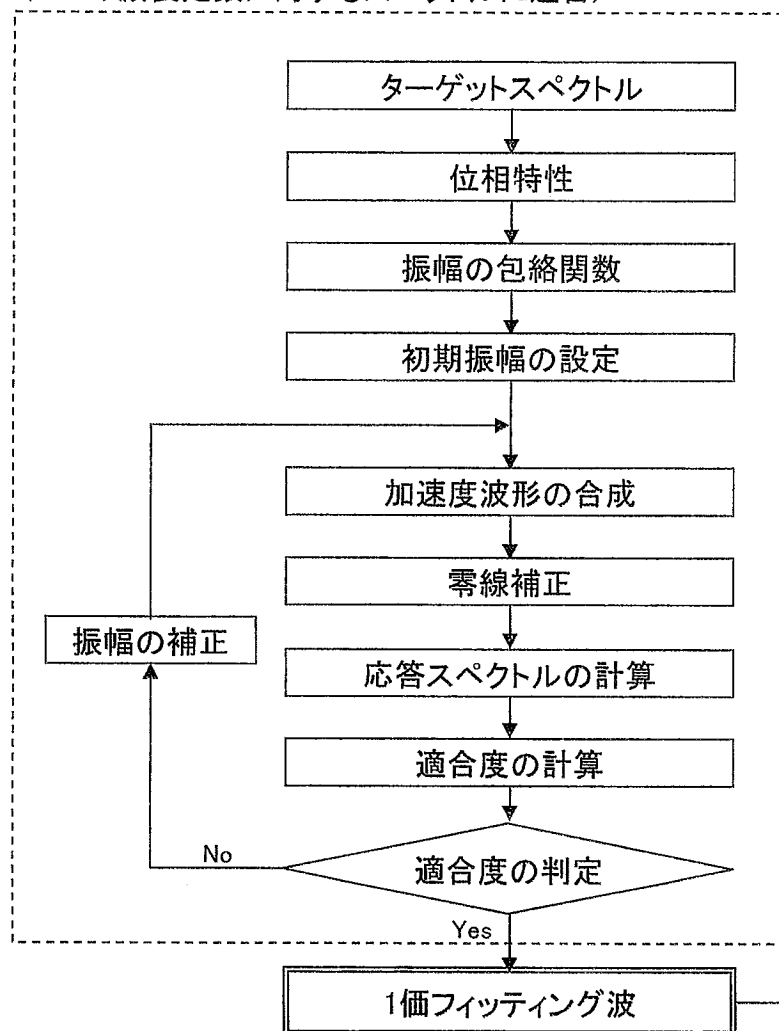
※水平方向の応答スペクトルを代表して示す

参考1 模擬地震波の作成に関する検討

■模擬地震波は、 $h=5\%$, 1% の2つの減衰定数の目標スペクトルに適合させる方法とする。

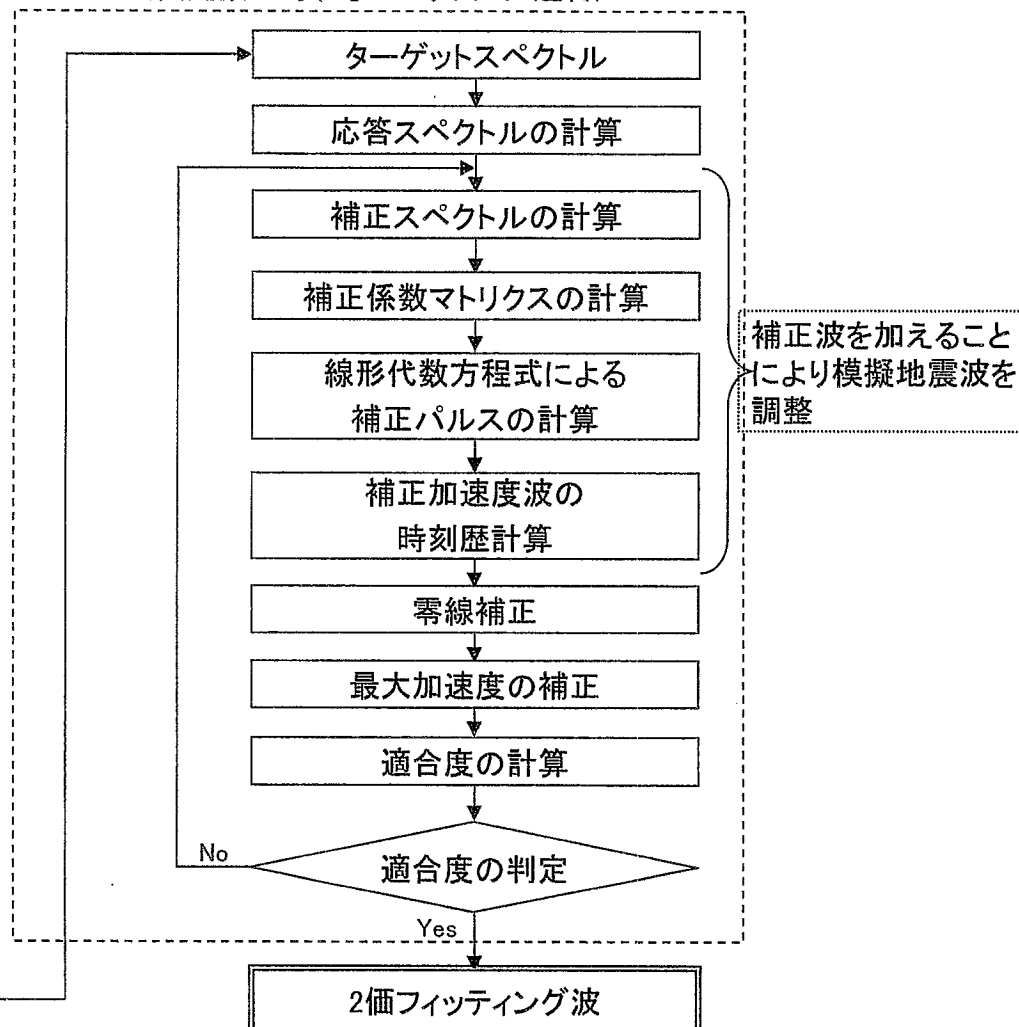
1価フィット模擬地震波の計算

(1つの減衰定数に対するスペクトルに適合)



2価フィット模擬地震波の計算

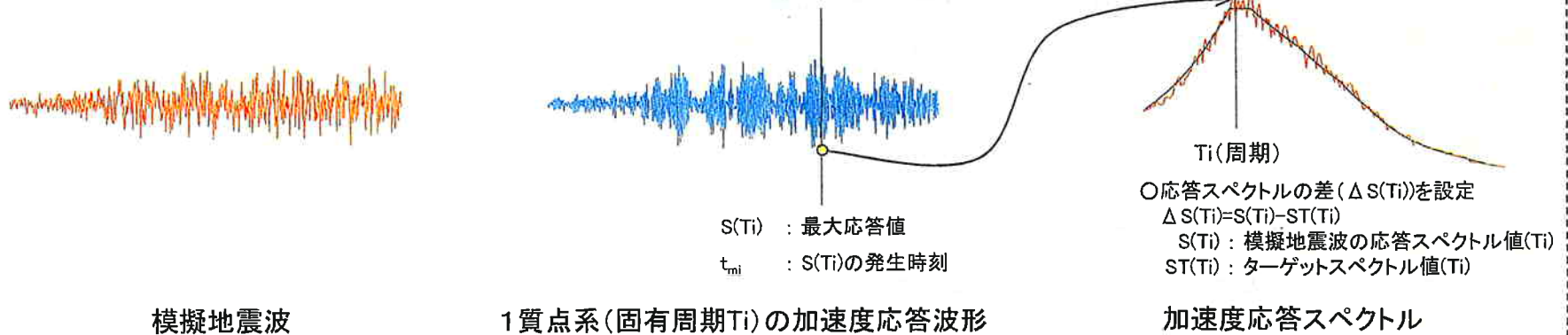
(2つの減衰定数に対するスペクトルに適合)



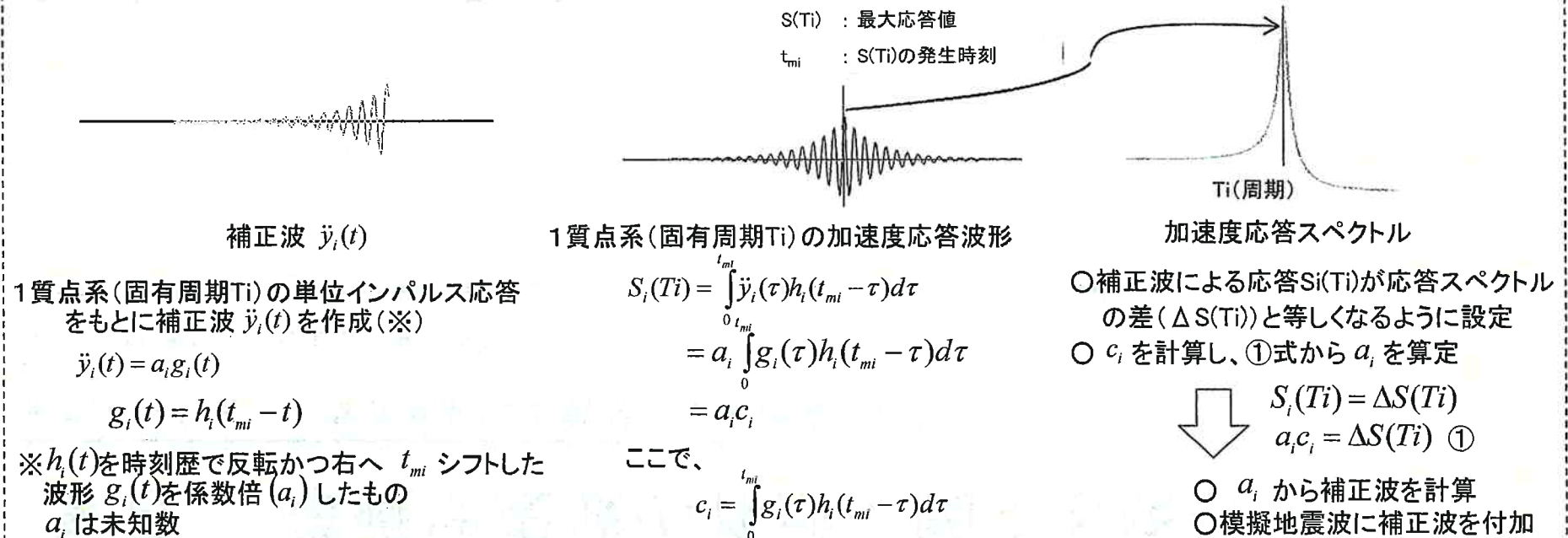
参考1 模擬地震波の作成に関する検討

■補正波を用いた模擬地震波の調整方法の概要

○ターゲットスペクトルと模擬地震波の応答スペクトルの差の計算



○1つの周期 T_i に対応した補正波を作成する場合



参考1 模擬地震波の作成に関する検討

■補正波を用いた模擬地震波の調整方法の概要(続き)

○2つの周期 T_i, T_j に対応した補正波を作成する場合

補正波 $\ddot{y}_{ij}(t)$ (インパルス応答関数の線形結合)

$$\ddot{y}_{ij} = a_i g_i(t) + a_j g_j(t)$$

$$g_i(t) = h_i(t_{mi} - t)$$

$$g_j(t) = h_j(t_{mj} - t)$$

※ a_i, a_j は未知数,

$g_i(t), g_j(t)$ は前項と同様に設定

補正波による周期 T_i, T_j の応答値 $S_{ij}(T_i) \ S_{ij}(T_j)$

$$S_{ij}(T_i) = \int_0^{t_{mi}} \ddot{y}_{ij}(\tau) h_i(t_{mi} - \tau) d\tau$$

$$= a_i c_{ii} + a_j c_{ji}$$

ここで、

$$c_{ii} = \int_0^{t_{mi}} g_i(\tau) h_i(t_{mi} - \tau) d\tau$$

$$c_{ji} = \int_0^{t_{mi}} g_j(\tau) h_i(t_{mi} - \tau) d\tau$$

$$S_{ij}(T_j) = \int_0^{t_{mj}} \ddot{y}_{ij}(\tau) h_j(t_{mj} - \tau) d\tau$$

$$= a_i c_{ij} + a_j c_{jj}$$

ここで、

$$c_{jj} = \int_0^{t_{mj}} g_j(\tau) h_j(t_{mj} - \tau) d\tau$$

$$c_{ij} = \int_0^{t_{mj}} g_i(\tau) h_j(t_{mj} - \tau) d\tau$$

・ 補正波による応答が応答スペクトルの差と等しくなるように設定

・ $c_{ii}, c_{ij}, c_{ji}, c_{jj}$ を計算し、下式から a_i, a_j を算定

$$\begin{aligned} \downarrow \quad S_{ij}(T_i) &= \Delta S(T_i) = a_i c_{ii} + a_j c_{ji} \\ S_{ij}(T_j) &= \Delta S(T_j) = a_i c_{ij} + a_j c_{jj} \end{aligned}$$

・ 補正波 $\ddot{y}_{ij}(t)$ を計算

・ 模擬地震波に補正波 $\ddot{y}_{ij}(t)$ を付加

○複数の周期、減衰定数に対応した補正波を作成する場合

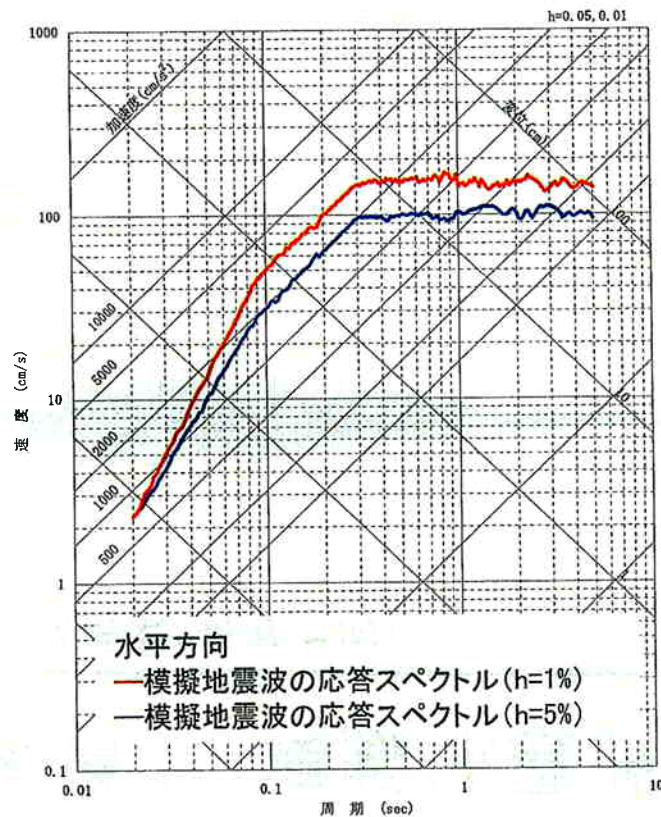
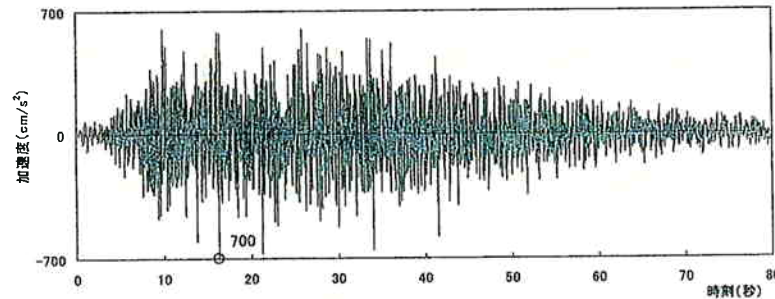
・ 上記と同様な手順により補正波を算定して模擬地震波を調整する。

・ 例えば、計算周期が300点、2つの減衰定数(5%、1%)に対応した補正波は、600(300×2)のインパルス応答関数の線形結合となる。

・ このような調整を繰り返すことにより、2つの減衰定数(5%、1%)のターゲットスペクトルに適合した模擬地震波を作成する。

参考1 模擬地震波の作成に関する検討

■作成結果(水平方向)



●適合条件

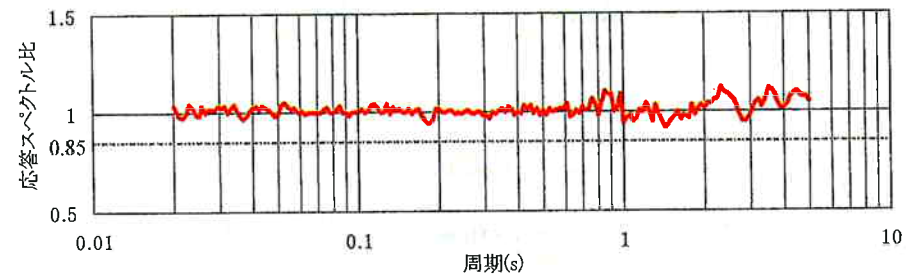
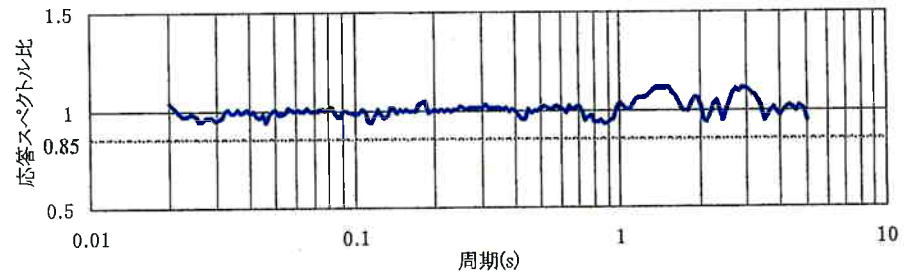
○応答スペクトル比

$$R(T) = \frac{S_{v1}(T)}{S_{v2}(T)} \geq 0.85$$

$R(T)$: スペクトル値

$S_{v1}(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル値

$S_{v2}(T)$: 目標とする応答スペクトル値



○応答スペクトル強さの比(SI比)

$$\text{SI比} = \frac{\int_{0.1}^{2.5} S_v(T) dt}{\int_{0.1}^{2.5} \bar{S}_v(T) dt} \geq 1.0$$

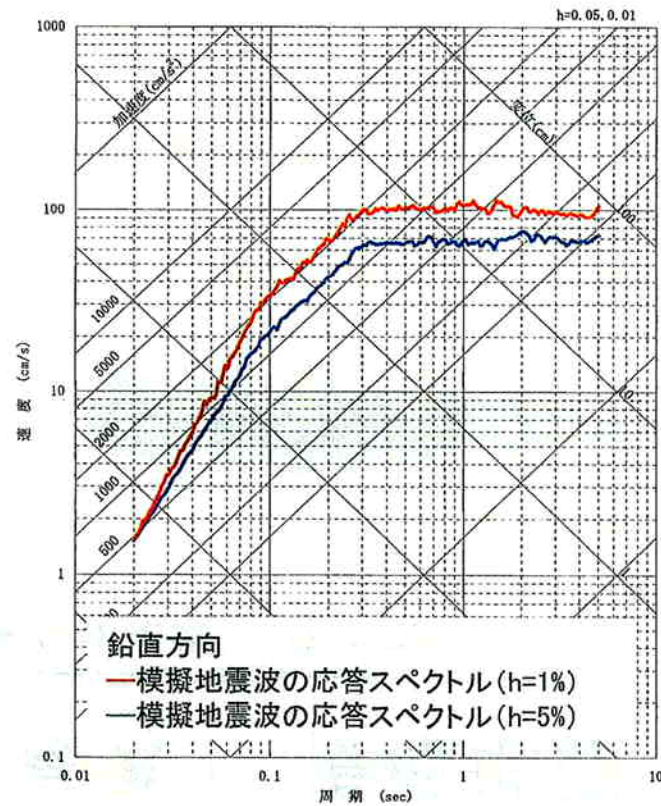
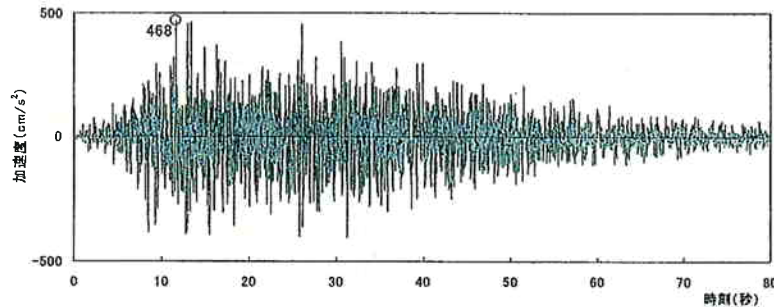
$S_v(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル (cm/s)

$\bar{S}_v(T)$: 目標とする応答スペクトル (cm/s)

SI比	h=5%	h=1%
水平方向	1.02	1.02

参考1 模擬地震波の作成に関する検討

■作成結果(鉛直方向)



●適合条件

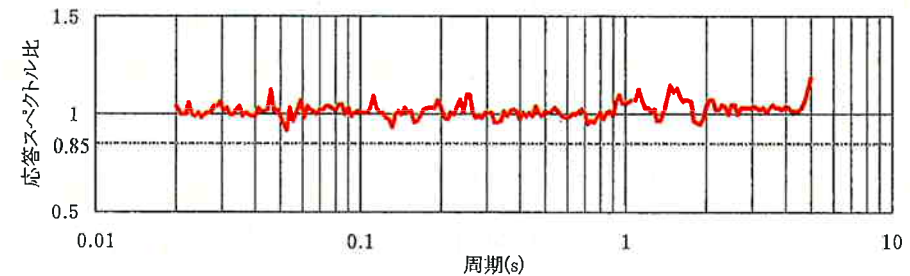
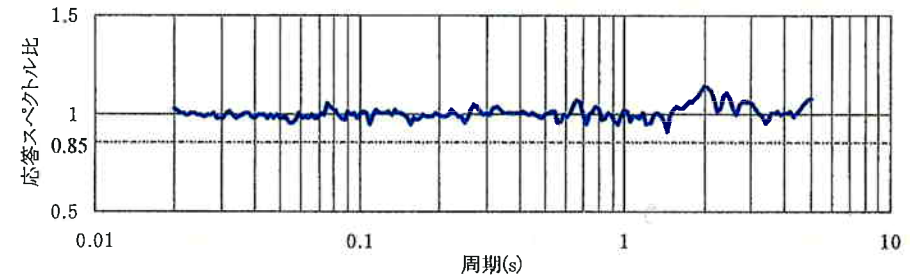
○応答スペクトル比

$$R(T) = \frac{S_{v1}(T)}{S_{v2}(T)} \geq 0.85$$

$R(T)$: スペクトル値

$S_{v1}(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル値

$S_{v2}(T)$: 目標とする応答スペクトル値



○応答スペクトル強さの比(SI比)

$$SI比: \frac{\int_{0.1}^{2.5} S_v(T) dt}{\int_{0.1}^{2.5} \overline{S_v}(T) dt} \geq 1.0$$

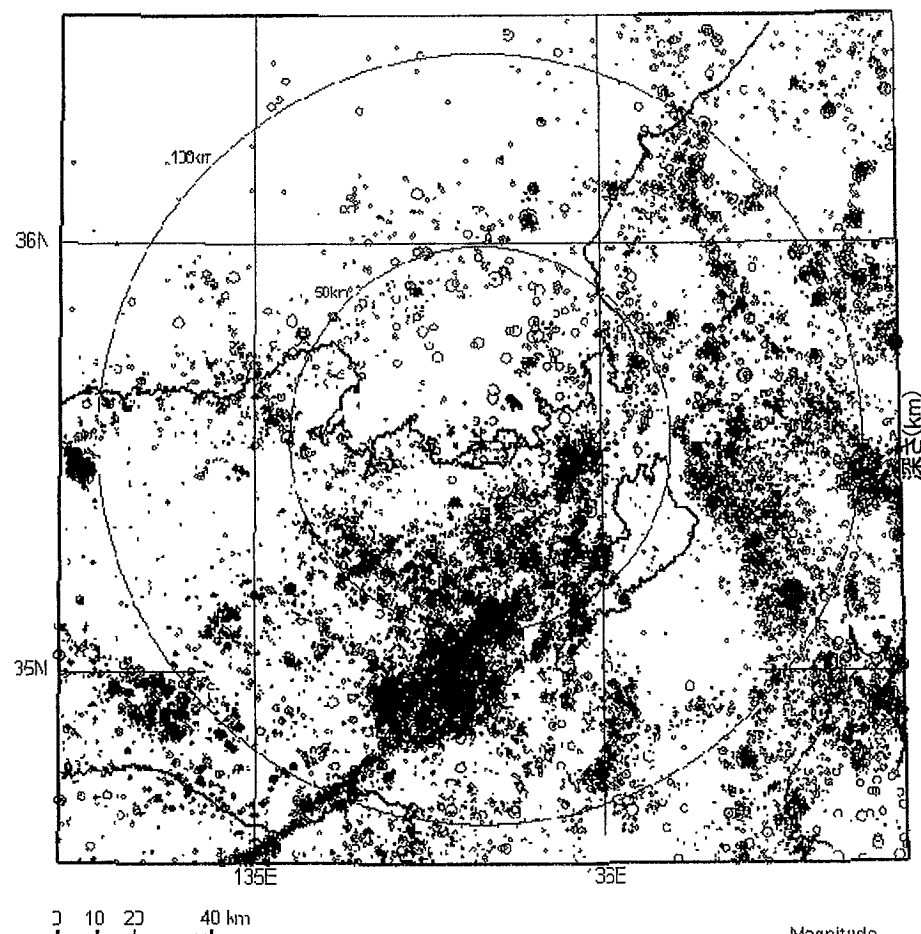
$S_v(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル (cm/s)

$\overline{S_v}(T)$: 目標とする応答スペクトル (cm/s)

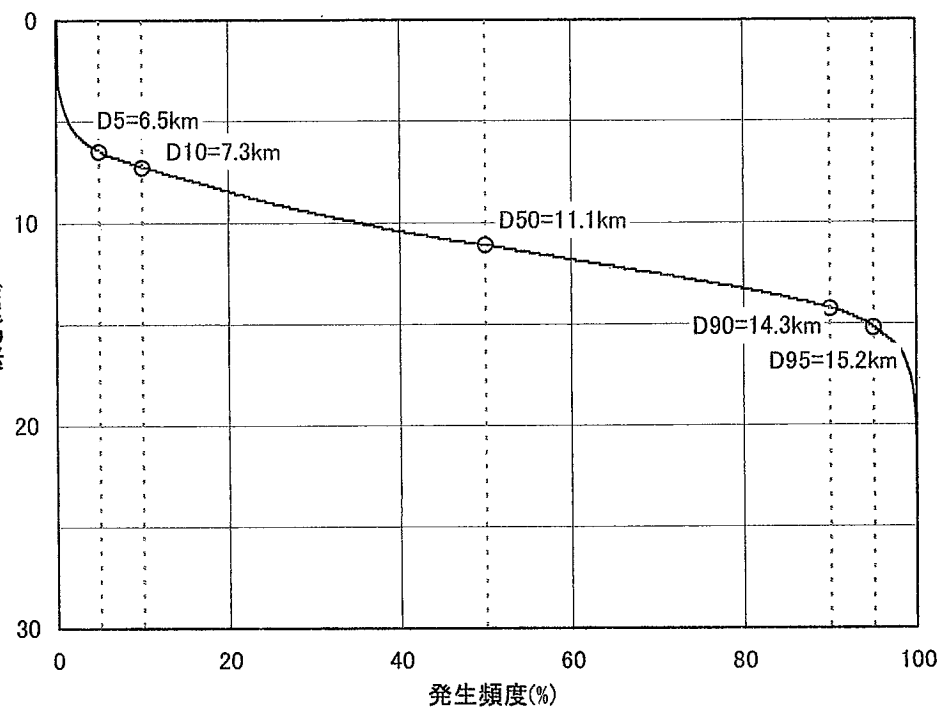
SI比	h=5%	h=1%
鉛直方向	1.03	1.03

参考2 地震発生層に関する追加検討

■大飯発電所を中心として半径100km以内の地震の発生状況を統計的に評価した。



Magnitude
 ○ $7.0 \leq M$
 ○ $6.0 \leq M < 7.0$
 ○ $5.0 \leq M < 6.0$
 ○ $4.0 \leq M < 5.0$
 ○ $3.0 \leq M < 4.0$
 ○ $2.0 \leq M < 3.0$
 ○ $1.0 \leq M < 2.0$
 ○ $M < 1.0$



大飯発電所を中心とした場合
 (気象庁地震カタログ、1998年1月～2007年12月による)

参考2 地震発生層に関する追加検討

検討のまとめ

- 大飯発電所を中心とした半径100km以内の地震発生状況を統計的に評価し、地震の10%(D10)、90%(D90)の発生頻度深さは、敦賀半島を中心とした場合の評価結果と概ね一致した。
- 地震動評価に用いる震源断層の断層下端の設定のために参考となるD90はいずれの場合も約15kmであった。
- 以上のことから、地震動評価に用いる震源断層の断層下端深さは若狭地域共通の条件として18kmを採用している。

■参考文献

- ・伊藤潔・廣瀬一聖・澁谷拓郎・片尾浩・梅田康弘・佐藤比呂志・平田直・伊藤谷生・阿部進・川中卓・井川猛(2007)：近畿地方における地殻および上部マントルの構造と地震活動，京都大学防災研究所年報，第50号B，275-288.
- ・伊藤潔・廣瀬一聖(2006)：人口地震記録を用いた近畿地方の地震波速度構造，大都市大震災軽減化特別プロジェクトI地震動(強い揺れ)の予測「大都市圏地殻構造調査研究」(平成17年度)，549-559.
- ・財団法人原子力安全技術センター(2009)：原子力施設の耐震安全評価手法に関する調査 平成20年度科学技術基礎調査等委託調査報告書
- ・佐藤智美・壇一男・岡崎敦・羽田浩二(2007)：若狭湾周辺の地殻内地震の記録を用いたスペクトルインバージョン解析，日本地震学会講演予稿集，P3-66.
- ・鶴来雅人・田居優・入倉孝次郎・古和田明(1997)：経験的サイト増幅特性評価手法に関する検討，地震第2輯，第50巻，215-227.
- ・赤澤隆士・Petukhin Anatoly(2008)：KiK-net地中記録を利用した中小地震の地震モーメントの簡易推定，日本地震工学会大会-2008梗概集，246-247.
- ・R.E.Abercrombie(1997)：Near-Surface Attenuation and Site Effects from Comparison of Surface and Deep Borehole Recordings,Bulletin of the Seismological Society of America , Vol.87 ,No.3,731-744.
- ・佐藤浩章・東貞成・芝良昭・佐藤清隆・高橋裕幸・敦賀隆史(2007)：地震観測記録に基づく地震動の減衰特性(その3)ー硬質地盤における減衰メカニズムの解明ー，電力中央研究所報告N07013
- ・佐藤浩章(2009)：広帯域強震動予測のための新潟平野における深部地盤のモデル化とサイト増幅特性評価，東京工業大学博士論文
- ・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(6)，849-875
- ・吉井弘治・伊藤潔(2001)：近畿地方北部の地震波速度構造と地震発生層，地球惑星科学連合学会2001年合同大会，Sz-P006

■参考文献(続き)

- 廣瀬一聖・伊藤潔(2006) : 広角地方反射法および屈折法解析による近畿地方の地殻構造の推定, 京都大学防災研究所年報, 第49号B, 275-288.
- 京都大学防災研究所地震予知研究センター : 地震予知連絡会会報, 第69巻, 11-8
- 伊藤潔・中村修一(1998) : 西南日本内帯における地震発生層の厚さの変化と内陸大地震, 京都大学防災研究所年報, 第41号B-1, 27-35.
- 地震調査委員会(2002) : 琵琶湖西岸断層帯の地震を想定した強震動評価について, 平成16年6月21日
- Zhao,D.,S.Horiuchi, and A.Hasegawa (1992) : Seismic velocity structure of the crust beneath the Japan Islands,Tectonophysics, 212, 289-301.
- 大久保泰邦(1984) : 全国のキュリー点解析結果, 地質ニュース, 362号
- Akiko Tanaka , Yuzo Ishikawa(2005):Crustal thermal regime inferred from magnetic anomaly data and its relationship to seismogenic layer thickness : The Japanese islands case study, Physics of the Earth and Planetary Interiors 152, 257-266
- Shizuo Noda, Kazuhiko Yashiro, Katsuya Takahashi, Masayuki Takemura, Susumu Ohno, Masanobu Tohdo, Takahide Watanabe(2002) : RESPONSE SPECTRA FOR DESIGN PURPOSE OF STIFF STRUCTURES ON ROCK SITES,OECD-NEA Workshop on the Relations between Seismological Data and Seismic Engineering Analysis,Oct.16-18,Istanbul
- 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, Vol. 110, No.6, pp.849-875
- Yoshihiro Fujii and Mitsuhiro Matsu'ura(2000) : Regional Difference in Scaling laws for Large Earthquakes and its Tectonic Implication, Pure and Applied Geophysics, 157, 2283-2302
- Geller, R.J. (1976) : Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes, Bulletin of the Seismological Society of America, 66, 1501-1523.

■参考文献(続き)

- ・Paul Somerville, Kojiro Irikura, Robert Graves, Sumio Sawada, David Wald, Norman Abrahamson, Yoshinori Iwasaki, Takao Kagawa, Nancy Smith, Akira Kowada(1999): Characterizing Crustal Earthquake Slip Models for the Prediction of Strong Ground Motion, Seismological Research Letters, Vol.70, pp.59-80
- ・香川敬生・鶴来雅人・佐藤信光(2003): 硬質サイトの強震観測記録に見られる高周波低減特性の検討, 土木学会地震工学論文集,
- ・壇 一男・渡辺基史・佐藤俊明・石井 透(2001): 断層の非一様すべり破壊モデルから算出される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化, 日本建築学会構造系論文集, 545, 51-62.
- ・佐藤智美・壇一男・岡崎敦・羽田浩二(2007): 若狭湾周辺の地殻内地震の記録を用いたスペクトルインバージョン解析, 日本地震学会講演予稿集, P3-66
- ・原子力安全委員会 地震動解析技術等作業会合(H21年4月23日)資料1-1
- ・宇佐美龍夫(2003): 最新版 日本被害地震総覧[416]—2001, 東京大学出版会
- ・村松郁栄(1969): 震度分布と地震のマグニチュードとの関係, 岐阜大学教育学部研究報告, 自然科学, 4, 168-176.
- ・勝又護・徳永規一(1971): 震度Ⅳの範囲と地震の規模および震度と加速度の対応, 験震時報, 36, 89-96.
- ・社団法人 日本原子力学会(2007): 原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準:2007, 日本原子力学会標準, AESJ-SC-P006
- ・活断層研究会編(1991): 新編 日本の活断層 分布図と資料, 東京大学出版会
- ・萩原尊禮編(1991): 日本列島の地震 地震工学と地震地体構造, 鹿島出版会

■参考文献(続き)

- ・垣見俊弘・松田時彦・相田勇・衣笠善博(2003):日本列島と周辺海域の地震地体構造区分,地震 第2輯,第55巻,389-406
- ・奥村俊彦・石川裕(1998):活断層の活動度から推定される平均変位速度に関する検討,土木学会第53回年次学術講演会,I-B277
- ・加藤研一・宮腰勝義・武村雅之・井上大栄・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ー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ー,日本地震工学会論文集,第4巻,第4号
- ・地震調査研究推進本部 地震調査委員会(2009):「全国地震動予測地図」
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_yosokuchizu/index.htm
- ・武村雅之(1990):日本列島およびその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係,地震第2輯,第43巻,pp.257-265
- ・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/SAE05-004,平成17年6月
- ・Boore,D.M.(1983):Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radical spectra,Bulletin of the Seismological Society of America,Vol.71,pp.969-971.
- ・司宏俊・翠川三郎(1999):断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式,日本建築学会構造系論文集,第523号,63-70.