

高浜発電所 地震動評価について

平成26年8月22日
関西電力株式会社

ご説明内容

1

-
- | | |
|------------------------|-------------|
| 1. 敷地周辺の地震発生状況 | … P.2～5 |
| 2. 敷地周辺の活断層の分布 | … P.6～9 |
| 3. 地盤モデルの策定 | … P.10～40 |
| 4. 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動 | … P.41～94 |
| 5. 震源を特定せず策定する地震動 | … P.95～101 |
| 6. 基準地震動の策定 | … P.102～109 |
| 7. 基準地震動 S_s の超過確率 | … P.110～131 |
| 8. 地震動評価のまとめ | … P.132 |

1. 敷地周辺の地震発生状況

■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、1596年畿内および近隣の地震、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、1819年伊勢・美濃・近江の地震、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7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のあるものとして、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くない。

○スラブ内地震

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1952年吉野地震や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くない。

○アウターライズ地震

海溝軸周辺で発生した地震として、2004年紀伊半島南東沖地震が該当するが、敷地から200kmを超える範囲で発生しており、敷地へ及ぼす影響は大きくない。

○その他の地震

敷地周辺地域では、上記4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。

1. 敷地周辺の地震発生状況

■敷地周辺で過去に発生した被害地震



地震諸元は「最新版 日本被害地震総覧」(1984年以前)、「宇津カタログ」(1982)(1985年～1922年)、「気象庁地震カタログ」(1983年以降)による

○内陸地殻内地震

敷地周辺の主な被害地震として、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・信濃の地震や1963年越前岬沖地震などが発生している。

○プレート間地震

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くない。

○スラブ内地震

敷地周辺地域では、沈み込んだ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1952年吉野地震、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、また敷地から離れた場所で発生しているため、敷地へ及ぼす影響は大きくない。

○アウターライズ地震

海溝軸付近で発生した地震として、2004年紀伊半島南東沖地震などが該当するが、敷地から200kmを超える範囲で発生しており、敷地へ及ぼす影響は大きくない。

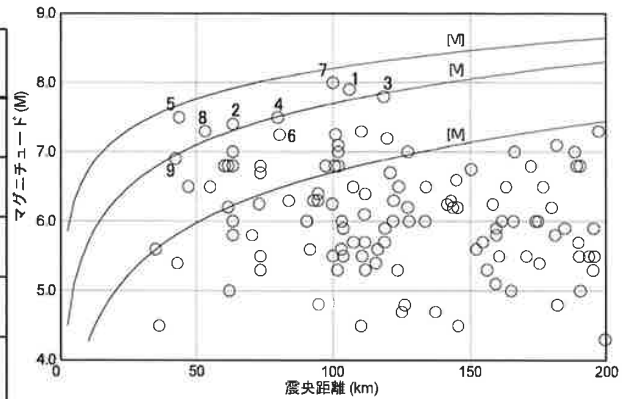
○その他の地震

敷地周辺地域では、上記4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。

1. 敷地周辺の地震発生状況

■敷地に大きな影響を及ぼす被害地震

番号	年月日	マグニチュード	震央距離 (km)	地名 (地震名)
1	745.6.5	7.9	106	美濃
2	1185.8.13	7.4	64	近江・山城・大和
3	1586.1.18	7.8	118	畿内・東海・東山・北陸諸道
4	1596.9.5	7.5	80	畿内および近隣
5	1662.6.16	7.5	44	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
6	1819.8.2	7.25	81	伊勢・美濃・近江
7	1891.10.28	8.0	100	愛知県・岐阜県 (濃尾地震)
8	1927.3.7	7.3	53	京都府西北部 (北丹後地震)
9	1963.3.27	6.9	42	福井県沖 (越前岬沖地震)



【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

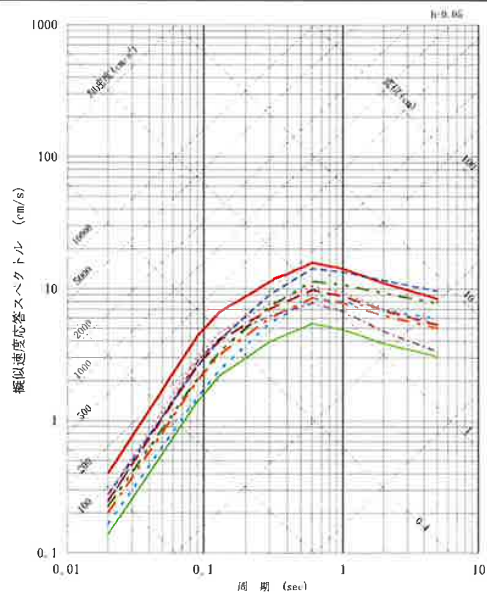
敷地に大きな影響を及ぼす被害地震のM-Δ図

震度5弱(1996年以前は震度V)程度以上と推定される過去の地震を敷地に大きな影響を及ぼす被害地震として、表のとおり抽出する。

1. 敷地周辺の地震発生状況

■検討用地震の選定(過去に発生した地震)

番号	年月日	マグニチュード	震央距離 (km)	地名 (地震名)
1	745.6.5	7.9	106	美濃
2	1185.8.13	7.4	64	近江・山城・大和
3	1586.1.18	7.8	118	畿内・東海・東山・北陸諸道
4	1596.9.5	7.5	80	畿内および近隣
5	1662.6.16	7.5	44	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
6	1819.8.2	7.25	81	伊勢・美濃・近江
7	1891.10.28	8.0	100	愛知県・岐阜県 (濃尾地震)
8	1927.3.7	7.3	53	京都府西北部 (北丹後地震)
9	1963.3.27	6.9	42	福井県沖 (越前岬沖地震)



敷地に影響を及ぼしたと考えられる過去の地震の応答スペクトル図

2. 敷地周辺の活断層の分布

第122回審査会合
資料再掲

6

■若狭湾周辺の主な断層の分布



2. 敷地周辺の活断層の分布

第122回審査会合
資料再掲

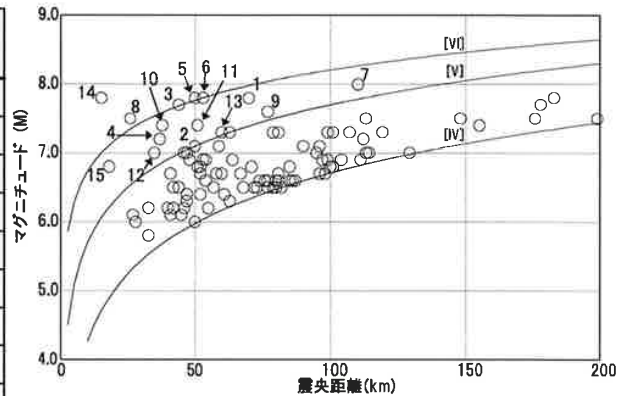
7

■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-干飯崎沖断層~甲楽城断層	60	7.8	70
2	敦賀断層	23	7.1	50
3	大陸棚外縁~日~野坂断層	49	7.7	44
4	三方断層	27	7.2	37
5	花折断層	58	7.8	50
6	琵琶湖西岸断層系	60	7.8	53
7	濃尾地震断層系	80	8.0	110
8	上林川断層	39.5※1	7.5	26
9	有馬-高槻構造線	45	7.6	77
10	山田断層	33	7.4	38
11	郷村断層	34	7.4	51
12	三峠断層	20	7.0	35
13	FGA3東部	29	7.3	60
14	FO-A~FO-B~熊川断層	63.4※1	7.8	15
15	FO-C断層	20※1	6.8※2	18

※1 地震動評価上の長さ

※2 孤立した短い活断層として、M6.8の地震規模を想定した。



[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

震度5弱程度以上と推定される活断層による地震を表のとおり抽出する。

2. 敷地周辺の活断層の分布

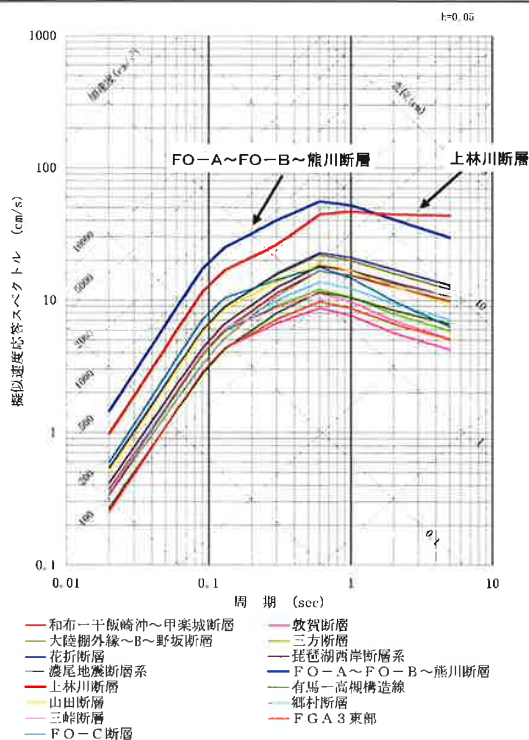
第122回審査会合
資料再掲

8

■ 検討用地震の選定(活断層による地震)

番号	断層名	マグニチュード	等価震源距離※ (km)
1	和布一干飯崎沖～甲斐城断層	7.8	71.5
2	敦賀断層	7.1	51.2
3	大陸棚外縁～B～野坂断層	7.7	47.5
4	三方断層	7.2	44.5
5	花折断層	7.8	51.4
6	琵琶湖西岸断層系	7.8	65.4
7	濃尾地震断層系	8.0	95.4
8	上林川断層	7.5	24.8
9	有馬-高槻構造線	7.6	38.6
10	山田断層	7.4	50.9
11	郷村断層	7.4	36.9
12	三峠断層	7.0	60.5
13	FGA3東部	7.3	71.5
14	FO-A～FO-B～熊川断層	7.8	23.5
15	FO-C断層	6.8	20.5

FO-A～FO-B～熊川断層および上林川断層を
検討用地震として選定する。



敷地に影響を及ぼすと考えられる活断層の地震による応答スペクトル図

2. 敷地周辺の活断層の分布

第122回審査会合
資料再掲

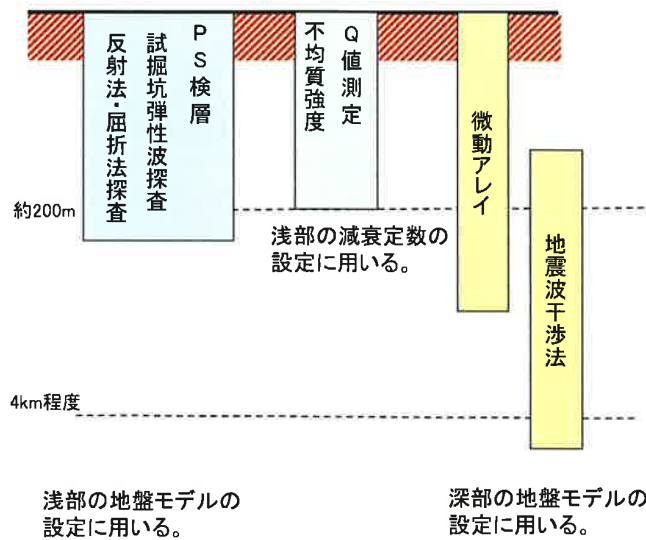
9

■ 敷地周辺の過去の地震および活断層について、Mと震央距離および敷地で想定される震度の関係から影響の大きい地震を抽出。

■ FO-A～FO-B～熊川断層および上林川断層を検討用地震として選定した。

3. 地盤モデルの策定

■敷地周辺で実施した各種調査結果を組み合わせ、地盤モデルを策定する。



3. 地盤モデルの策定

■これまでに実施した地下構造モデル策定のための調査は以下のとおり。

調査・検討項目	審査会合	検討結果の概要
PS検層	7/31 第5回会合	浅部の速度構造の評価
試掘坑弾性波探査	7/31 第5回会合	解放基盤面のP波・S波速度の評価
地質構造の評価	7/31 第5回会合	敷地内の地質に特異な構造がないことを確認
PS検層結果を用いた不均質強度の評価	7/31 第5回会合	浅部の減衰定数の評価
Q値測定	7/31 第5回会合	浅部の減衰定数の評価
敷地内の単点微動調査	8/28 第14回、第41回	解放基盤面に著しい高低差等の特異な構造がないことを確認
反射法地震探査	11/1 第41回会合	敷地の地下構造に特異な構造がないことを確認
屈折法地震探査	11/1 第41回、第74回	浅部のP波速度の評価、および浅部に特異な構造がないことを確認
敷地内での微動アレイ探査	第107回	周期約0.5~2.0秒の位相速度を評価
地震波干渉法	第41回、第59回、第74回、第89回、第107回	周期約2秒以上の位相速度・群速度を評価

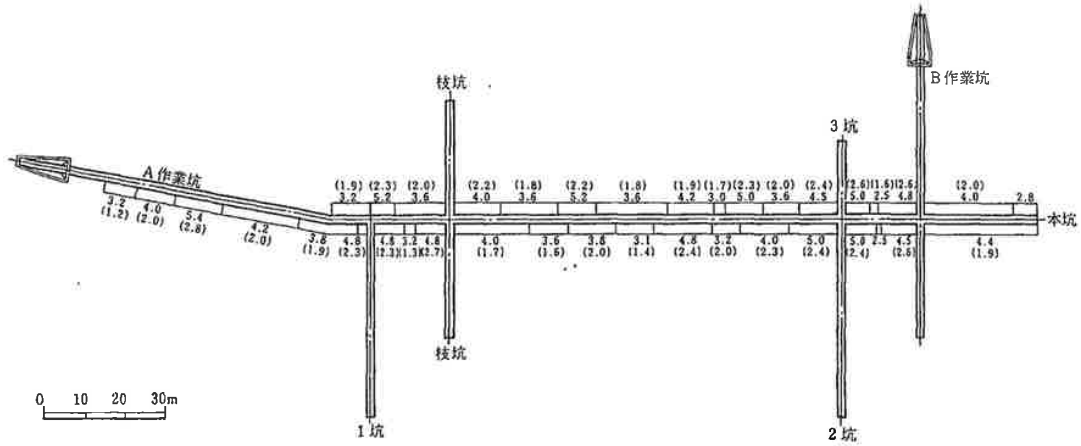
浅部の地下構造評価に用いる。

主に深部の地下構造評価に用いる。

3. 地盤モデルの策定



敷地内での試掘坑弾性波探査より、解放基盤のS波速度を2.2km/sと評価した。



試掘坑内弾性波速度図(1) 本坑

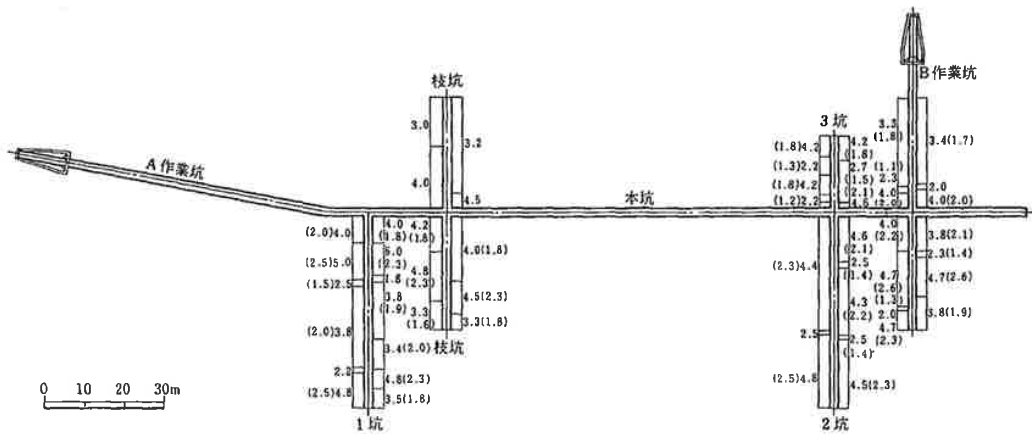
P 波 : km/s

(S 波) : km/s

3. 地盤モデルの策定



敷地内での試掘坑弾性波探査より、解放基盤のS波速度を2.2km/sと評価した。

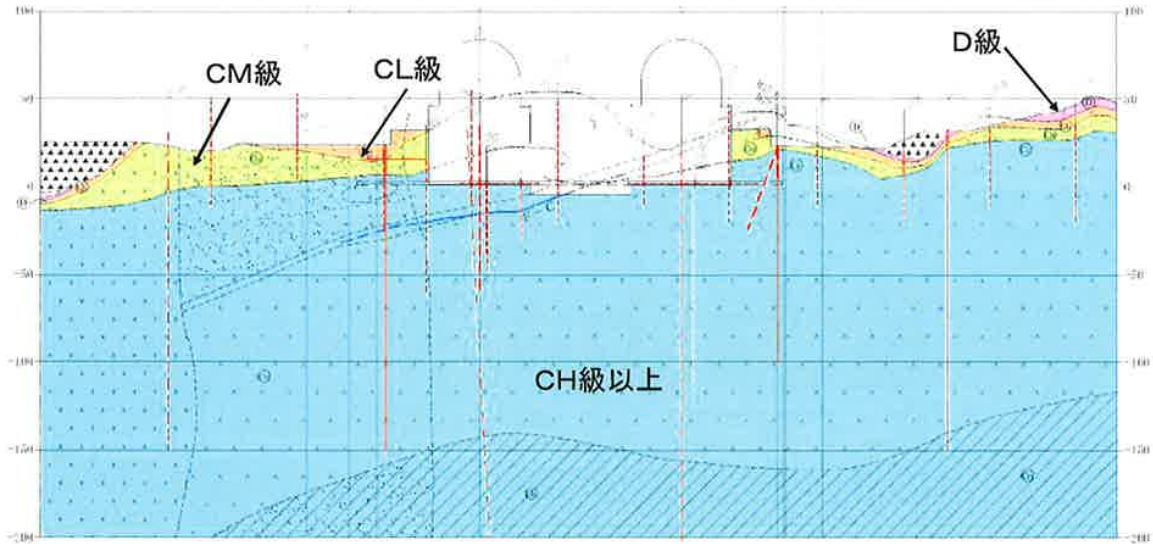


試掘坑内弾性波速度図(2) 枝坑

P 波 : km/s

(S 波) : km/s

■原子炉建屋基礎岩盤については、CM級以上の岩盤が基礎直下より確認されている。



3. 4号機地質断面図

■敷地内のボーリングデータ、PS検層、試掘坑弾性波探査から、敷地浅部に $V_s=2.2\text{km/s}$ 程度の硬質な岩盤が広がっていることを確認。また、地質断面図から、原子炉建屋の基礎直下よりCM級以上の岩盤が確認されていることから、原子炉建屋設置位置付近のEL+2mの位置に解放基盤表面を設定。

3. 地盤モデルの策定(減衰定数)

■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。

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

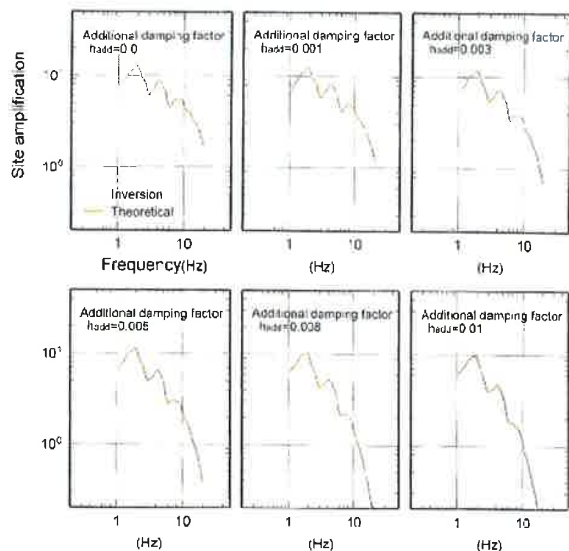
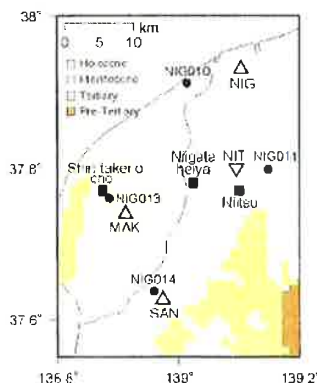
ここに、 r は相対的な距離、 K_ν は ν 次修正ベッセル関数、 Γ はガンマ関数である。

3. 地盤モデルの策定(減衰定数)

■速度構造の不均質性と付加減衰に関する知見

- 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、新潟平野や関東平野の検層結果から求めた不均質強度と減衰定数の関係にも着目している。
- これによると、新潟平野地域の4地点におけるサイト増幅特性について、理論サイト増幅特性に速度構造の不均質性とそれと等価な効果をもたらす減衰定数の付加値を考慮すると、経験的サイト増幅特性と調和的なレベルとなるように改善されるとしている。

佐藤(浩)(2009)で対象とした石油公団による基礎試験(■)、微動アレイ観測点(△)および地震観測点(●)の位置



NIG014における経験的サイト増幅特性(灰太線)と表層地盤を考慮したSANの深部地盤モデルの減衰定数を変化させたときの理論サイト増幅特性(赤線)の比較

※図は佐藤(浩)(2009)より抜粋

3. 地盤モデルの策定(減衰定数)

■速度構造の不均質性と付加減衰に関する知見(続き)

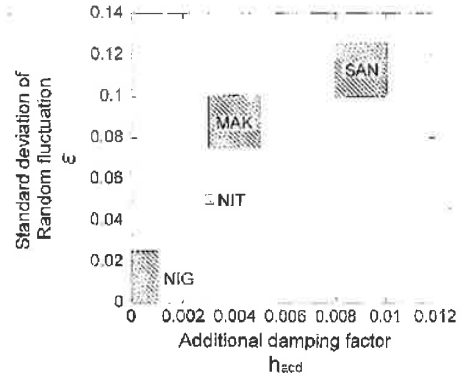
▶また、不均質データの標準偏差 ε が不均質強度を支配しており、平均的な減衰定数に対して付加すべき減衰定数とその地点で考慮すべき不均質強度は比例するとしている。

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	0.005 ~ 0.005	0.008 ~ 0.01

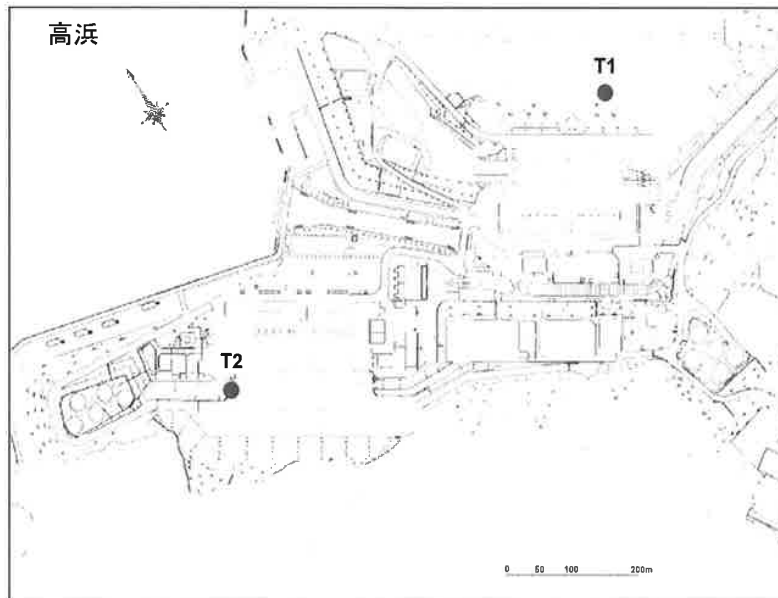


新潟平野地域での広帯域のサイト増幅特性評価において、考慮すべき深部地盤の不均質強度(標準偏差 ε)とそれと等価な効果をもたらす減衰定数の付加量 h_{add} の関係

※図・表は佐藤(浩)(2009)より抜粋

3. 地盤モデルの策定(減衰定数)

■敷地内で実施した深さ150mまでのボーリング孔のPS検層データを用いて地盤の不均質性を検討し、浅部で考慮すべき減衰定数との関係性を評価。

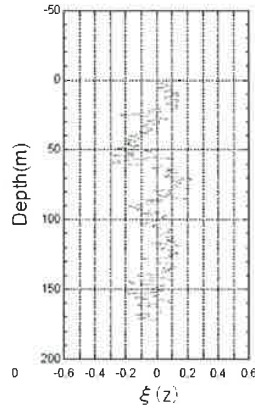
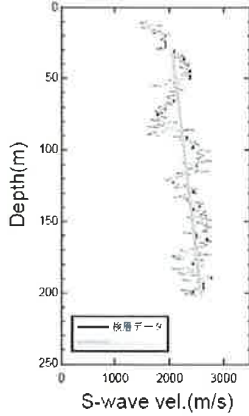


● : 不均質強度検討に使用したPS検層孔

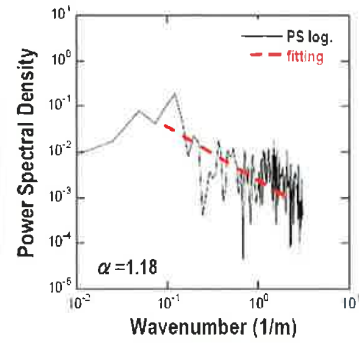
3. 地盤モデルの策定(減衰定数)

高浜発電所(T1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

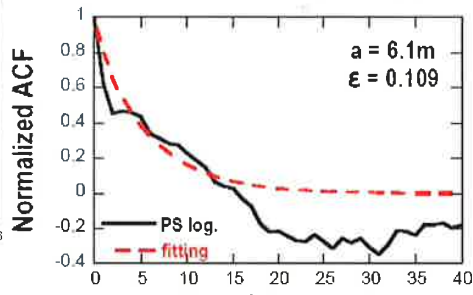
対象データ範囲(m)	平均S波速度(km/s)	漸増成分の傾き(1/s)	相関距離a(m)	Hurst指数 ν	標準偏差 ϵ
GL-30 ~-202	2.3	3.18	6.1	0.42	0.109



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

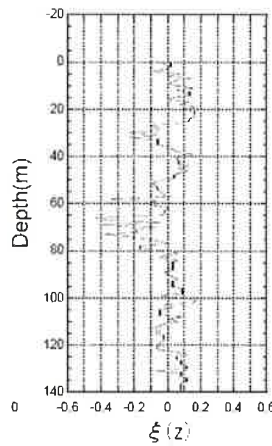
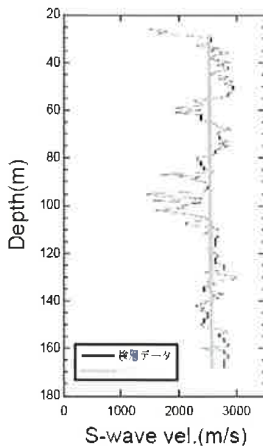


不均質データの自己相関関数とフィッティング結果

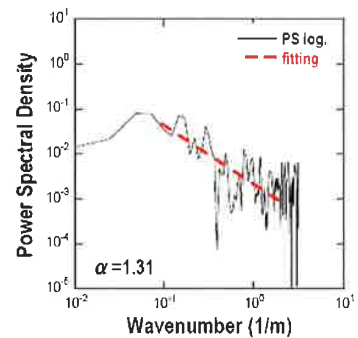
3. 地盤モデルの策定(減衰定数)

高浜発電所(T2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

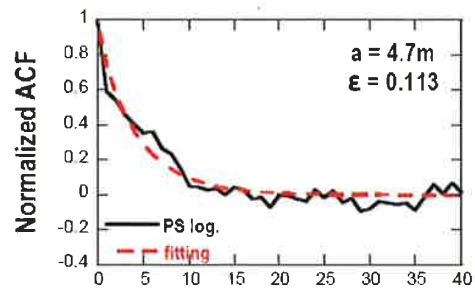
対象データ範囲(m)	平均S波速度(km/s)	漸増成分の傾き(1/s)	相関距離a(m)	Hurst指数 ν	標準偏差 ϵ
GL-29 ~-168	2.54	0.36	4.7	0.40	0.113



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

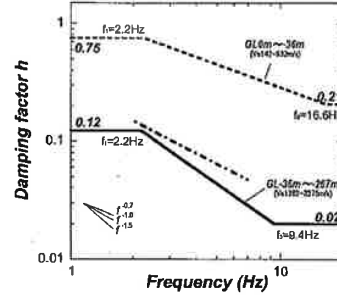


不均質データの自己相関関数とフィッティング結果

3. 地盤モデルの策定(減衰定数)

■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・山中(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3%程度と考えられる。

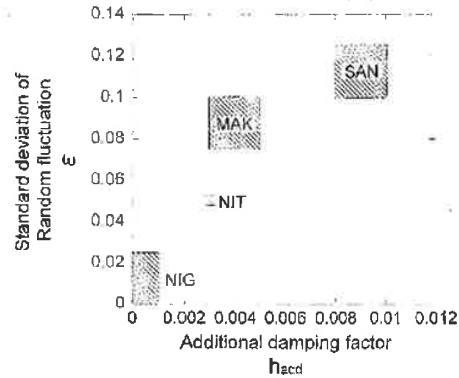


広帯域のサイト増幅特性で考慮すべき
不均質性の標準偏差(強度)の目安

	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	0.005 ~ 0.005	0.008 ~ 0.01

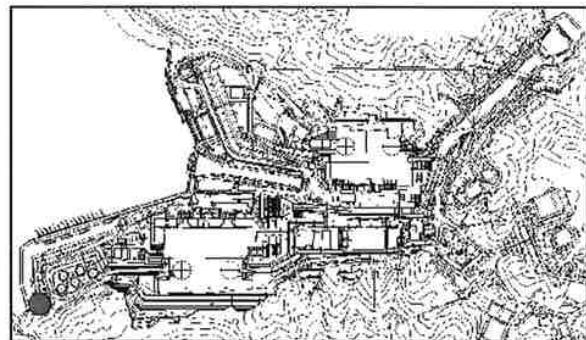
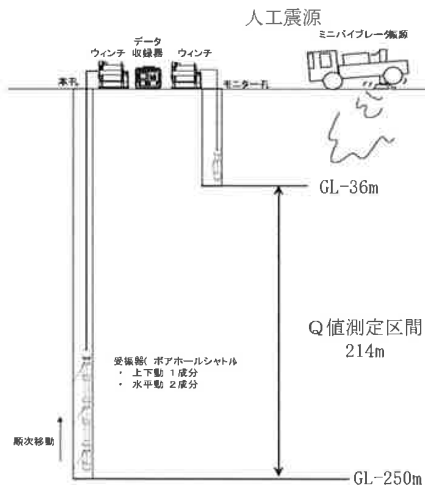


新潟平野地域での広帯域のサイト増幅特性評価において、考慮すべき深部地盤の不均質性強度(標準偏差 ϵ)とそれと等価な効果をもたらす減衰定数の付加量 h_{add} の関係

3. 地盤モデルの策定(減衰定数)

■敷地浅部の地盤構造について(ボーリング孔を用いたQ値測定)

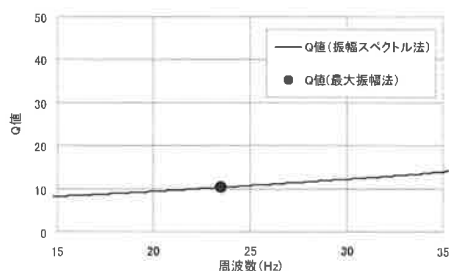
耐震バックチェックの審議を踏まえて、発電所構内のボーリング孔を用いて、ミニバイブおよび板叩き起振によるQ値測定をH23年度に実施。



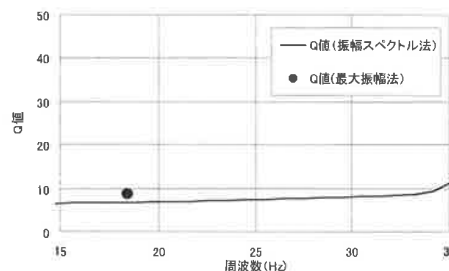
測定位置

3. 地盤モデルの策定(減衰定数)

敷地浅部の地盤構造について(Q値測定結果)



S波・ミニバイブレータ



S波・板たたき

波種	起振源	解析深度区間 (m)	卓越周波数 (Hz)	Q値 (減衰定数(%))
S波	ミニバイブレータ	36 ~ 144	23.1	8.99(5.56)
		144 ~ 250	23.5	10.50(4.76)
	板たたき	36 ~ 144	19.2	7.17(6.98)
		144 ~ 250	18.4	8.56(5.84)

3. 地盤モデルの策定(減衰定数)

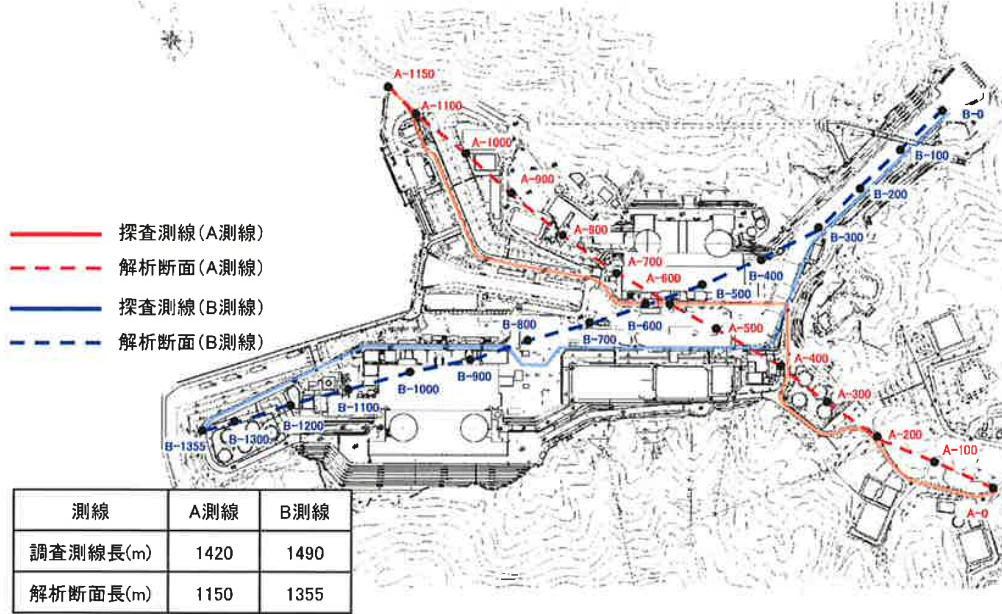
■佐藤・他(2007)、佐藤・山中(2009)の知見を元に、敷地内のPS検層結果から速度構造の不均質性と減衰定数の関係について着目して不均質強度を評価した結果から減衰定数は3%程度と考えられる。

■敷地内でのQ値測定を実施した結果、減衰定数は約3%程度以上となっている。

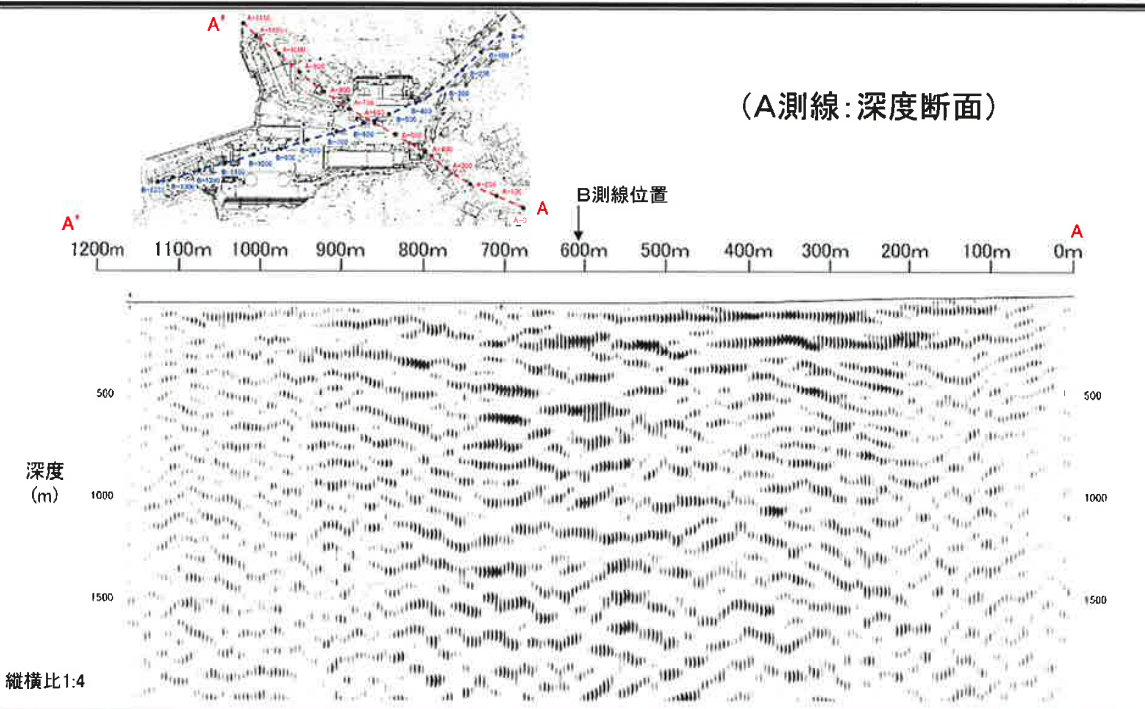
⇒浅部の減衰定数を3%とする。

3. 地盤モデルの策定(反射法地震探査)

■本調査では測線配置が屈曲しているため、反射点分布のほぼ中央付近を通過する解析断面を設定した。



3. 地盤モデルの策定(反射法地震探査)

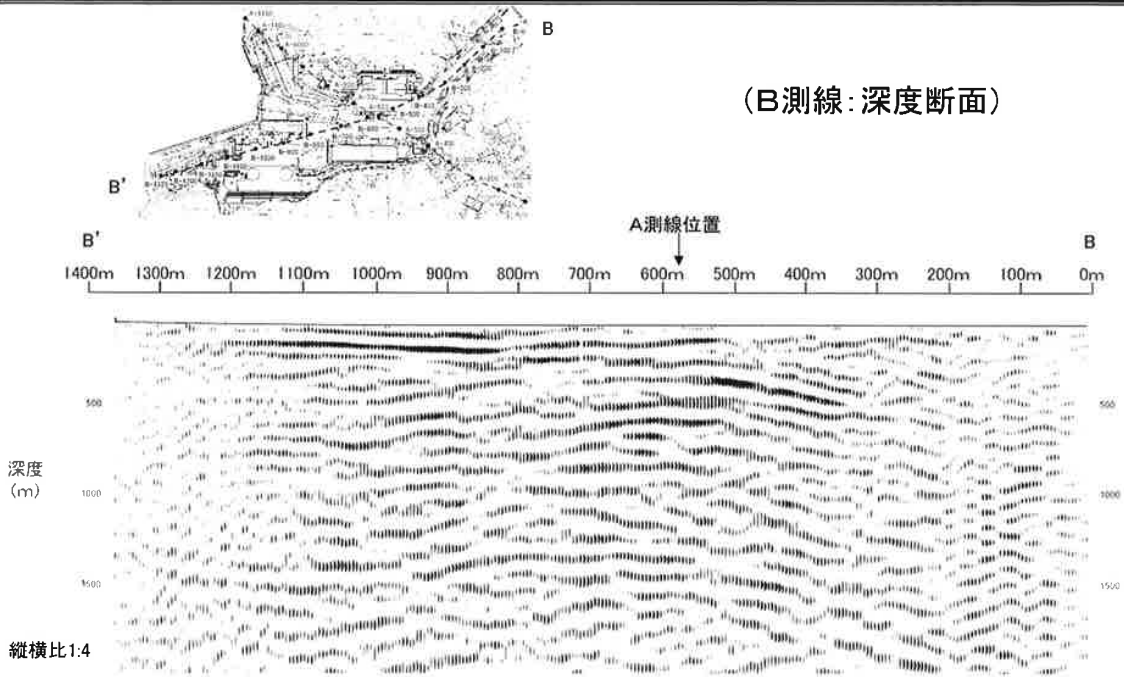


■1,000m以深まで複数の連続する反射面が観測され、その範囲内では特異な構造は認められていない。

3. 地盤モデルの策定(反射法地震探査)

第122回審査会合
資料再掲

30



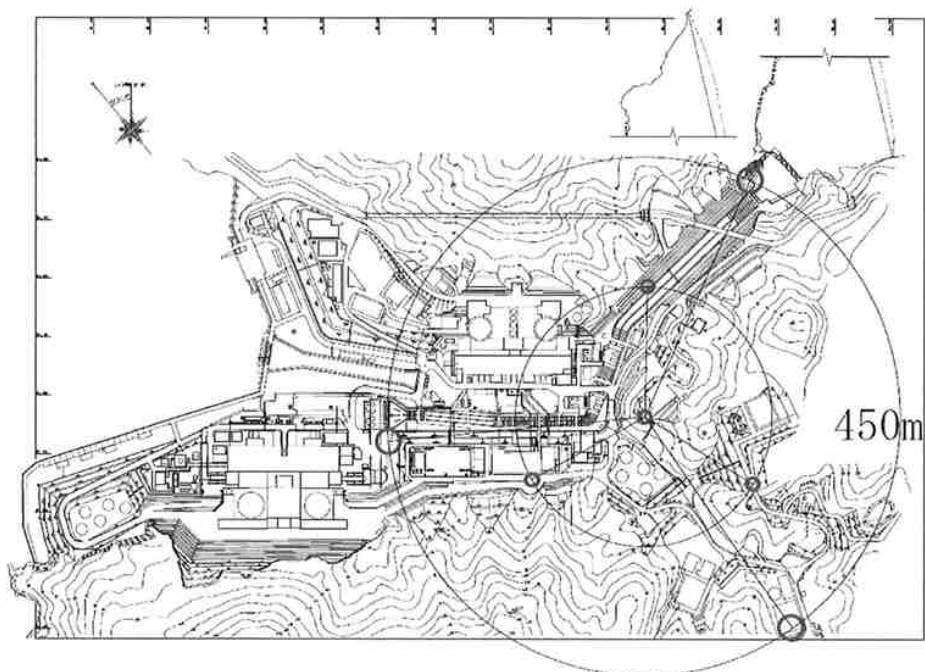
■ 1,000m以深まで複数の連続する反射面が観測され、その範囲内では特異な構造は認められていない。

3. 地盤モデルの策定(敷地内微動アレイ)

第122回審査会合
資料再掲

31

■ 高浜発電所敷地内で半径約450m・225mの微動アレイ観測を行う。

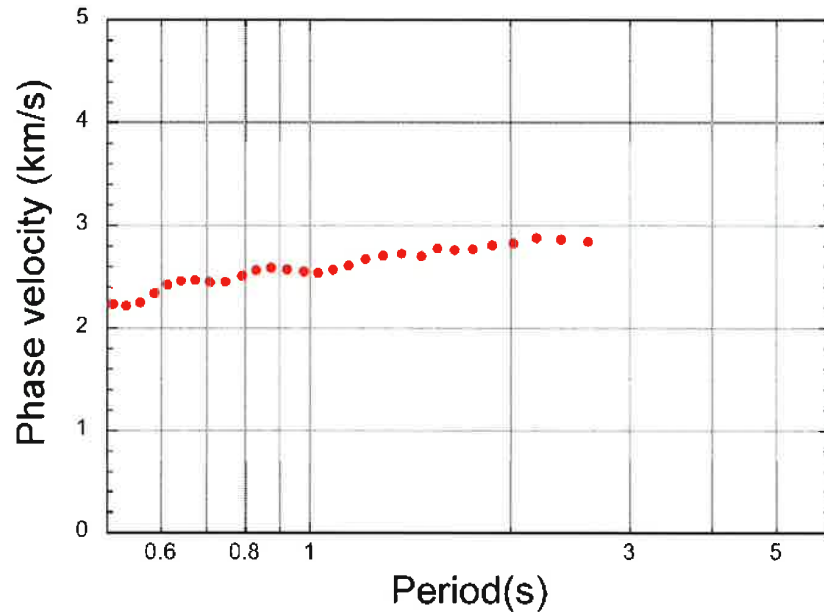


3. 地盤モデルの策定(敷地内微動アレイ)

第122回審査会合
資料再掲

32

- 得られた位相速度は、短周期側で2.2km/s、長周期側で約3km/sとなった。
- 得られた位相速度を目的関数としてインバージョン解析を行い、速度構造を推定する。

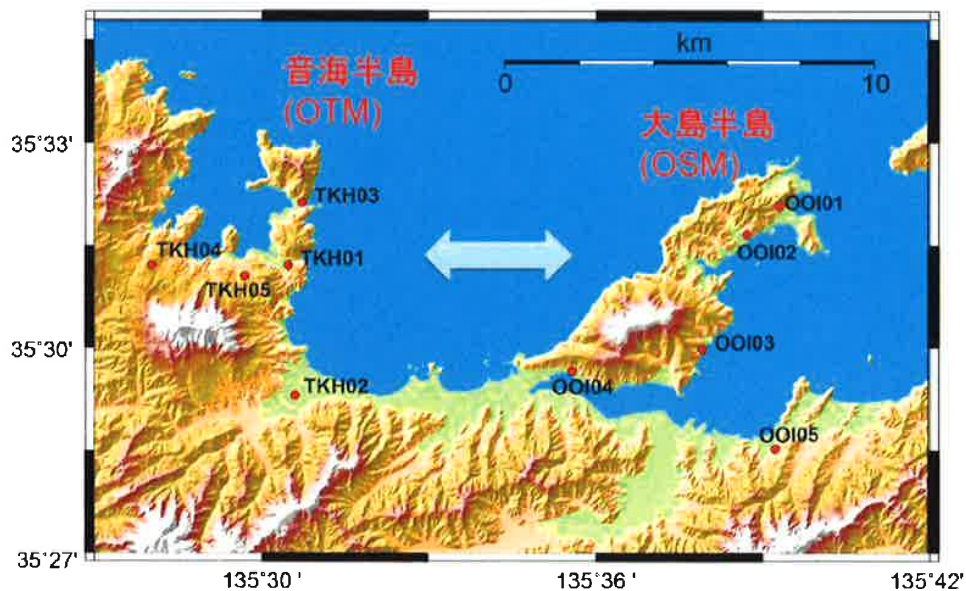


3. 地盤モデルの策定(地震波干渉法)

第122回審査会合
資料再掲

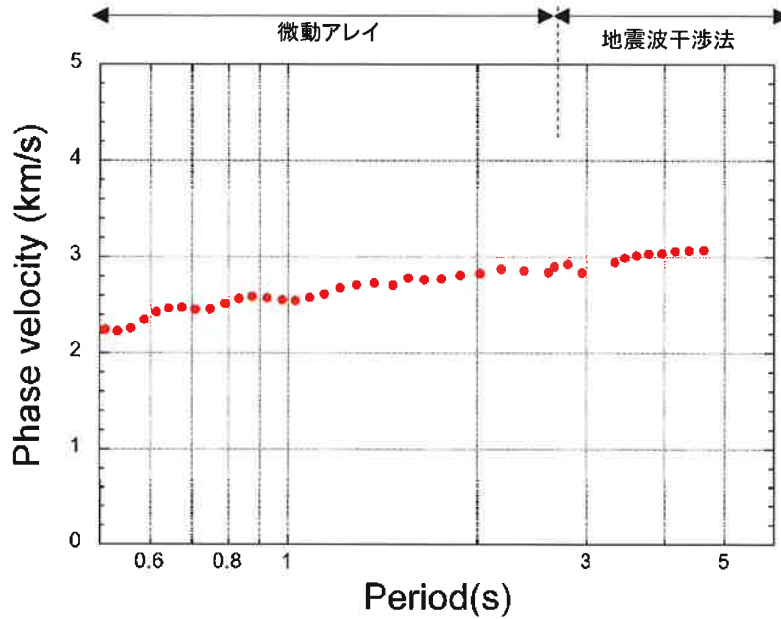
33

- 大飯・高浜発電所周辺で7月末より12月末まで実施した地表面地震観測で得られた常時微動記録を用いて、地震波干渉法による深部地下構造の評価を行う。



3. 地盤モデルの策定(地震波干渉法)

- 高浜発電所敷地内の微動アレイによる位相速度と、地震波干渉法(参照点付きF-Kスペクトル解析)による位相速度は、周期2~3秒付近でよい連続性を示す。
⇒微動アレイによる位相速度(2.6秒以下)と地震波干渉法による位相速度(2.6秒以上)を目的関数としたジョイントインバージョン解析により、速度構造を推定する。



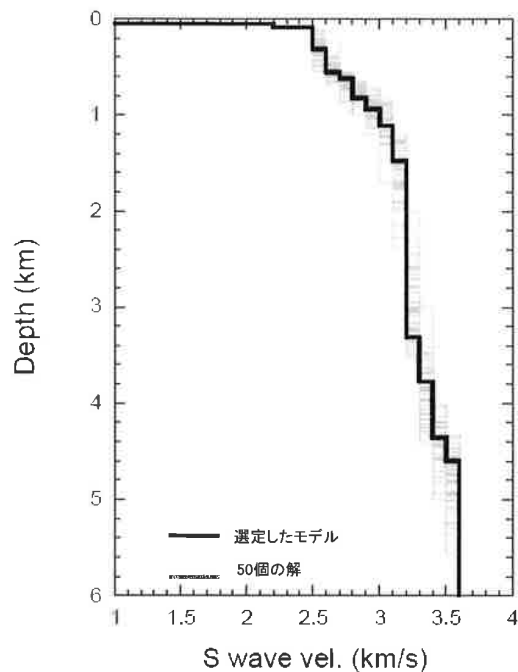
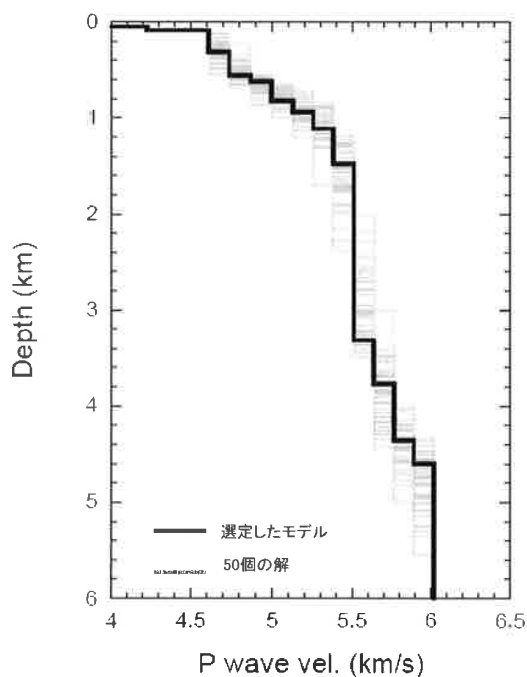
3. 地盤モデルの策定

- 第1層に $V_s=0.5\text{km/s}$ 層、第2層に $V_s=2.2\text{km/s}$ 層を考慮し、層厚 $0.01\sim 0.05\text{km}$ の範囲で探索する。
- 第3層以深は、サイトでのボーリング結果や既往の分析結果から、 $V_s=2.5\sim 3.6\text{km/s}$ までを 0.1km/s ごとにS波速度を設定し、層厚を $0.01\sim 2.0\text{km}$ の範囲で探索する。
- 逆解析は山中(2007)によるハイブリッドヒューリスティック探索を用いる。

No.	P波速度 (km/s)	S波速度 (km/s)	層厚 (km)	密度 (g/cm ³)
1	2.0	0.5	0.01 - 0.05	2.07
2	4.2	2.2	0.01 - 0.05	2.7
3	4.6	2.5	0.01 - 2.0	2.7
4	4.7	2.6	0.01 - 2.0	2.7
5	4.9	2.7	0.01 - 2.0	2.7
6	5.0	2.8	0.01 - 2.0	2.7
7	5.1	2.9	0.01 - 2.0	2.7
8	5.3	3.0	0.01 - 2.0	2.7
9	5.4	3.1	0.01 - 2.0	2.7
10	5.5	3.2	0.01 - 2.0	2.7
11	5.6	3.3	0.01 - 2.0	2.7
12	5.8	3.4	0.01 - 2.0	2.7
13	5.9	3.5	0.01 - 2.0	2.7
14	6.0	3.6	-	2.7

3. 地盤モデルの策定

■得られた50個の解から、その平均に最も近いモデルを地盤モデルとして選定する。



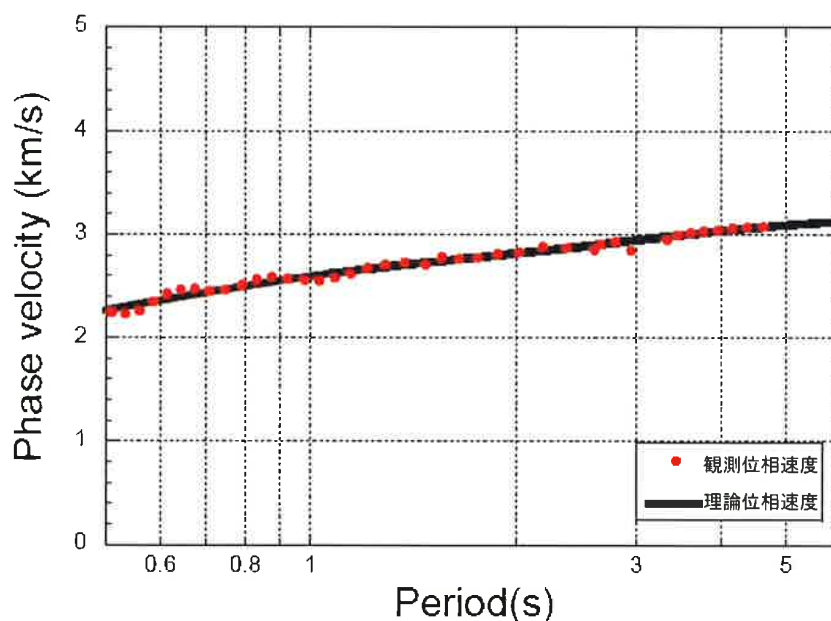
3. 地盤モデルの策定

■今回選定された地盤モデルの諸元は以下のとおりであり、断層上端深さに相当すると考えられるVp=5.8km/s層の上面深度は約3.7kmと評価された。

No.	P波速度 (km/s)	S波速度 (km/s)	密度 (g/cm ³)	層厚 (km)	上面深度 (km)
1	2.0	0.5	2.07	0.05	0
2	4.2	2.2	2.7	0.04	0.05
3	4.6	2.5	2.7	0.22	0.09
4	4.7	2.6	2.7	0.25	0.31
5	4.9	2.7	2.7	0.06	0.56
6	5.0	2.8	2.7	0.20	0.62
7	5.1	2.9	2.7	0.11	0.82
8	5.3	3.0	2.7	0.17	0.93
9	5.4	3.1	2.7	0.36	1.10
10	5.5	3.2	2.7	1.84	1.46
11	5.6	3.3	2.7	0.46	3.30
12	5.8	3.4	2.7	0.59	3.76
13	5.9	3.5	2.7	0.24	4.35
14	6.0	3.6	2.7	-	4.59

3. 地盤モデルの策定

■今回選定された地盤モデルについて、その物性値を用いて算定される理論位相速度を評価した結果、観測位相速度と良く対応していることを確認した。



3. 地盤モデルの策定

■断層モデルを用いた手法による地震動評価のための地盤モデルは以下のとおり。

高浜発電所の地盤モデル

No.	P波速度 (km/s)	S波速度 (km/s)	密度 (g/cm ³)	層厚 (km)	上面深度 (km)	Qs	減衰定数 (%)
1	4.2	2.2	2.7	0.04	0.00	16.67	3.0
2	4.6	2.5	2.7	0.16	0.04	16.67	3.0
2'	4.6	2.5	2.7	0.06	0.2	100.00	0.5
3	4.7	2.6	2.7	0.25	0.26	100.00	0.5
4	4.9	2.7	2.7	0.06	0.51	100.00	0.5
5	5.0	2.8	2.7	0.20	0.57	100.00	0.5
6	5.1	2.9	2.7	0.11	0.77	100.00	0.5
7	5.3	3.0	2.7	0.17	0.88	100.00	0.5
8	5.4	3.1	2.7	0.36	1.05	100.00	0.5
9	5.5	3.2	2.7	1.59	1.41	100.00	0.5
10	6.0	3.6	2.7	—	3.00	100.00	0.5

3. 地盤モデルの策定

- 敷地内における微動アレイ観測、および敷地周辺で実施した地表面地震観測で得られた微動データを用いた地震波干渉法により位相速度を求めた。
- 得られた位相速度の同定より地盤の速度構造を推定し、地震動評価に用いる地盤モデルを策定した。
- 同定結果より、 $V_p=5.8\text{km/s}$ 層の上面深度が約3.7kmとなることから、断層上端深さを3kmと設定した。

4. 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動

- 断層上端深さについて、下記の文献を参考にして検討した。

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5.8~5.9km/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となるとおおよそ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5.8~6.4km/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。

■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 $6\sim 16\text{km}$ 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

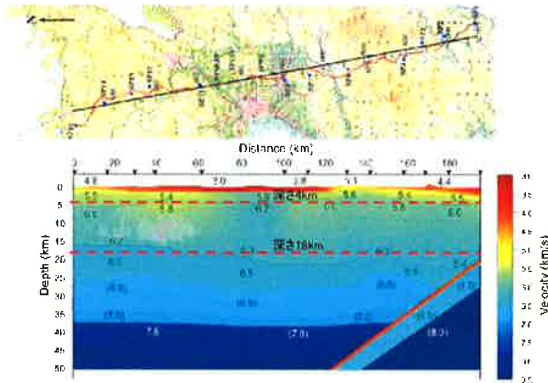


Fig. 15 P-wave velocity structure for the Niimi-Kumano profile. P-wave velocities in km/s. Purple colors show assumed velocity value (5.0 to 6.2) and red dots (about 30-40km depth) show earthquakes and low-velocity earthquake hypocenters, respectively. (For details see Fig. 2007)

伊藤、他(2007)に一部加筆

○藤橋—上郡測線(1989)の再解析結果

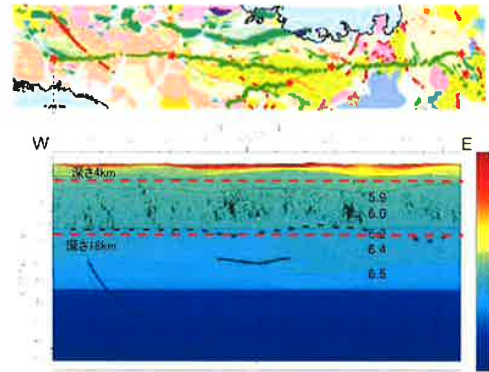
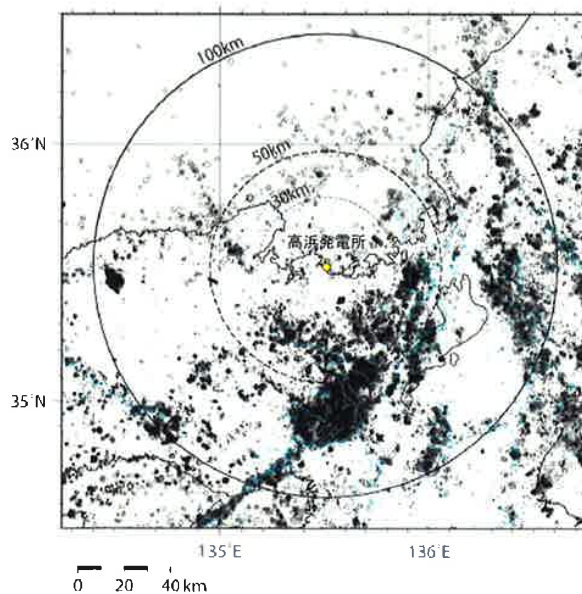


図16 若狭—上郡測線の地震発生層構造に、高深層内の震源分布も反時計回りに修正し、出た直交反射面を求めた。

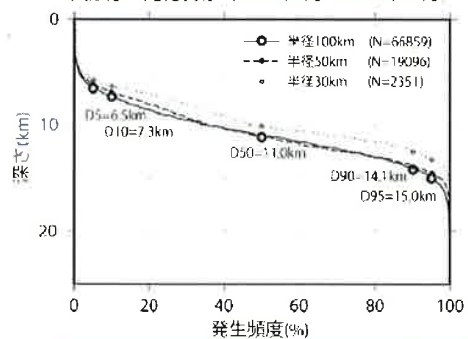
伊藤、他(2006)に一部加筆

■微小地震記録を用いた検討(高浜発電所)

伊藤・中村(1998)を参考に、高浜発電所を中心とする半径 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 $2\sim 3\text{km}$ 浅いとされている。



気象庁一元化震源(2000年1月~2012年12月)



	半径100km	半径50km	半径30km
D5	6.5km	6.2km	5.8km
D10	7.3km	6.9km	6.3km
D50	11.0km	11.1km	10.1km
D90	14.1km	13.9km	12.5km
D95	15.0km	14.5km	13.2km
地震個数N	66859	19096	2351

4. 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動

第122回審査会合
資料再掲

44

■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、震源の拡がりやが考慮できること、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。)を採用
- ・地震規模は松田式により算定

	長さ※1	地震規模※2
FO-A~FO-B~熊川断層	63.4km	7.8
上林川断層	39.5km	7.5

※1: 地震動評価上の長さ

※2: 地震規模は松田式より算出

○断層モデルを用いた手法による地震動評価

- ・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(離散化波数法)を適用したハイブリッド合成法により評価
- ・前回審査会合にて示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を踏まえて、短周期の地震動レベルを1.5倍したケースも評価

4. 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動

第122回審査会合
資料再掲

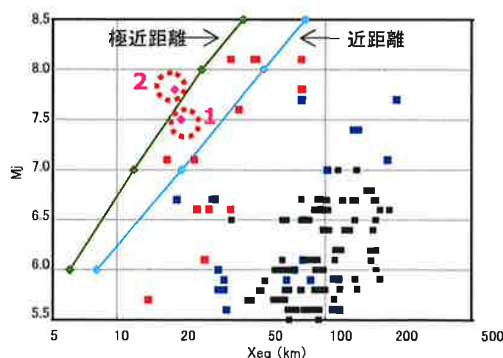
45

○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)
 $h \leq 60$ km (h : 震源深さ)
 28 km $\leq X_{eq} \leq 202$ 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)
 $h \leq 60$ km (h : 震源深さ)
 14 km $\leq X_{eq} \leq 218$ 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)



マグニチュードMと等価震源距離Xeq

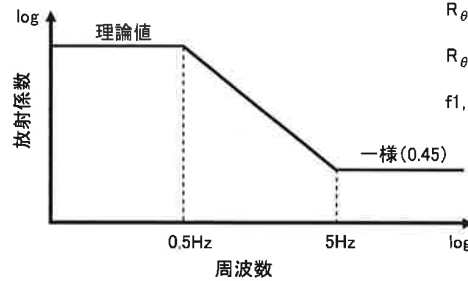
No.	検討用地震	Mj	Xeq (km)
高浜	1 上林川断層	7.5	19.9
	2 FO-A~FO-B断層~熊川断層	7.8	18.6

極近距離との乖離が小さいため、FO-A~FO-B断層と熊川断層との3連動についても、耐専式を適用できると判断した。

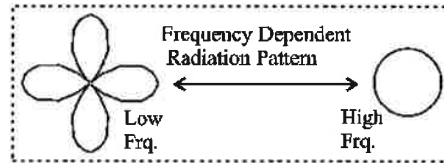
■統計的グリーン関数法における放射係数の設定

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、 $f_1=0.5\text{Hz}$ 、 $f_2=5\text{Hz}$ と設定した。

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

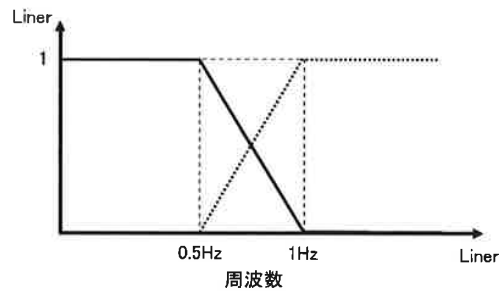


$R_{\theta\phi 0}$: 震源とサイトの位置関係及びすべり方向から理論的に評価される放射係数
 $R_{\theta\phi m}$: 高周波数で等方放射として平均化された放射係数
 f_1, f_2 : 理論的な放射から等方的な放射へと遷移する周波数帯



■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。



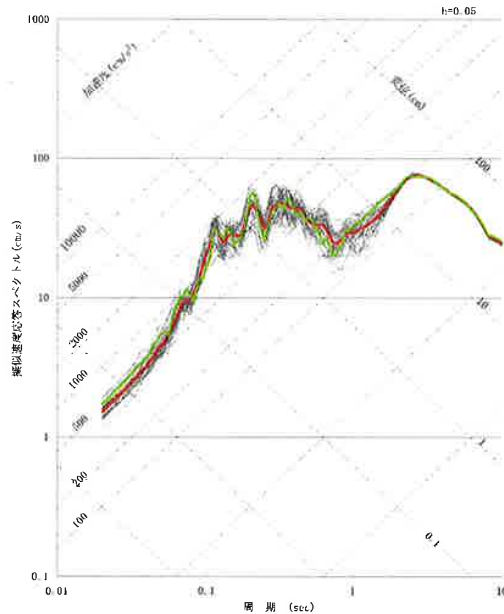
マッチングフィルターの形状

4. 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動

第122回審査会合
資料再掲

48

■破壊伝播速度 V_r は、Geller(1976)によりS波速度の0.72倍とする。また、統計的グリーン関数法における位相の乱数と、破壊伝播速度 V_r を±5%の揺らぎを与える乱数を変えて50組の波形合成を行い、50波の平均値(減衰定数5%の擬似速度応答スペクトル)との残差が最小となる波形を選定した。



「震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レンビ」)」(平成21年12月21日)には、以下のとおり記載されている。

平均破壊伝播速度 V_r (km/s) は、特にその震源域の詳しい情報がない限り、Geller (1976) による地震発生層のS波速度 β (km/s) との経験式 $V_r = 0.72 \cdot \beta$ により推定する。

— 50波平均
— 選定波

4. 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動

第122回審査会合
資料再掲

49

■FO-A～FO-B断層と熊川断層との3連動を考慮した場合の地震動評価ケースにおいては以下のとおり震源モデルを設定した。

①基本ケースの震源モデルを調査結果等に基づき、左横ずれ断層傾斜角 90° 、すべり角 0° と設定。

②考慮する不確かさケース

- ・新潟県中越沖地震の反映を踏まえ短周期の地震動レベルを1.5倍としたケースを考慮
- ・断層傾斜角について敷地側へ近くなるように傾斜させた傾斜角 75° としたケースを考慮
- ・横ずれ断層であるが、縦ずれ成分もあることも想定し、すべり角 30° としたケースを考慮
- ・破壊伝播速度については基本ケース $V_r = 0.72 \beta$ (β は地震発生層のS波速度)に対して、宮腰・他(2003)の知見を参考にしてアスペリティ領域の平均的な破壊伝播速度に標準偏差 1σ を考慮した $V_r = 0.87 \beta$ としたケースを考慮
- ・アスペリティ位置については、基本ケースにおいて各断層ごとに敷地近傍に配置しているが、さらにすべてのアスペリティを一塊として敷地近傍に配置し、影響が大きくなるようなケース(アスペリティの形状を変えて2ケース)を考慮

なお、破壊開始点については、すべてのケースにおいて、断層およびアスペリティ下端に複数のケースを設定した。その結果、全56ケースを評価した。