

## 資料3

# 大飯発電所

## 地盤モデルの評価について

平成26年3月5日

関西電力株式会社

# 目次

---

1

1. 敷地の地下構造モデル設定のための調査
  1. 1 地盤モデルの評価の考え方 p.2～5
  1. 2 浅部地下構造の評価 p.6～63
  1. 3 深部地下構造の評価 p.64～103
2. 大飯発電所周辺の観測データに基づく地盤モデル p.103～115
3. 地震発生層の評価について p.116～126
4. まとめ p.127

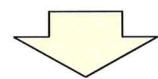
# 1. 地盤モデル設定のための調査

# 地盤モデル設定のための調査

2-2

## 地盤モデルの評価の考え方

- ガイドの考え方により、地震観測記録、微動アレイ探査、重力探査、深層ボーリング、二 次元あるいは三次元の適切な物理探査等 のデータに基づき、モデルを評価する。



## 浅部地下構造の評価

### ①速度構造について

- ・敷地内ボーリング調査
- ・PS検層
- ・試掘坑弾性波探査

結果:  $V_s = 2.2 \text{ km/s}$  程度の硬質な岩盤が広がっていることが確認された。

### ②減衰定数について

- ・不均質強度の評価
- ・Q値測定

結果: 浅部の減衰定数を3%とする。

### ③浅部構造の追加確認

- ・単点微動観測
- ・反射法地震探査・屈折法解析

結果: 3次元的な特異性は無い。

## 深部地下構造の評価

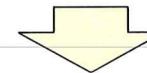
### ①短周期での位相速度の測定

- ・微動アレイ観測

結果: 得られた位相速度は、後述する地盤 モデル策定でのインバージョン解析の 目的関数の一部とする。

### ②群速度・位相速度の推定において、堆 積層等の影響について検討

結果: 長周期側では堆積層等の影響が小 さく、地盤モデルの理論位相速度と観測 の位相速度と大きく変わるものではない ことを確認した。



## まとめ

- 観測データから敷地周辺の地下構 造に3次元的な特異性がないことを 確認、これらの観測データを用いて 地盤モデルを評価する。

# 1. 1 地盤モデルの評価の考え方

## ■基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド

⇒地震観測や各種物理探査のデータに基づき地盤モデルを評価することが求められている。

- 3) 地下構造モデルの設定においては、地下構造（深部・浅部地下構造）が地震波の伝播特性に与える影響を検討するため、地層の傾斜、断層、褶曲構造等の地質構造を評価するとともに、地震発生層の上端深さ、地震基盤・解放基盤の位置や形状、地下構造の三次元不整形性、地震波速度構造等の地下構造及び地盤の減衰特性が適切に評価されていることを確認する。
- 4) 地震基盤までの三次元地下構造モデルの設定に当たっては、地震観測記録（鉛直アレイ地震動観測や水平アレイ地震動観測記録）、微動アレイ探査、重力探査、深層ボーリング、二次元あるいは三次元の適切な物理探査（反射法・屈折法地図探査）等のデータに基づき、ジョイントインパージョン解析手法など客観的・合理的な手段によってモデルが評価されていることを確認する。なお、地下構造の評価の過程において、地下構造が水平成層構造と認められる場合を除き、三次元的な地下構造により検討されていることを確認する。
- 5) 特に、敷地及び敷地近傍においては鉛直アレイ地震動観測や水平アレイ地震動観測記録、及び物理探査データ等を追加して三次元地下構造モデルを詳細化するとともに、地震観測記録のシミュレーションによってモデルを修正するなど高精度化が図られていることを確認する。この場合、適切な地震観測記録がない場合も含めて、作成された三次元地下構造モデルの精度が地震動評価へ与える影響について、適切に検討されていることを確認する（信頼性の高い地震動評価が目的であるため、地下構造モデルの精度に囚われすぎないことに留意する。）。

# 地盤モデルの評価のための調査結果の整理

4

- 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。

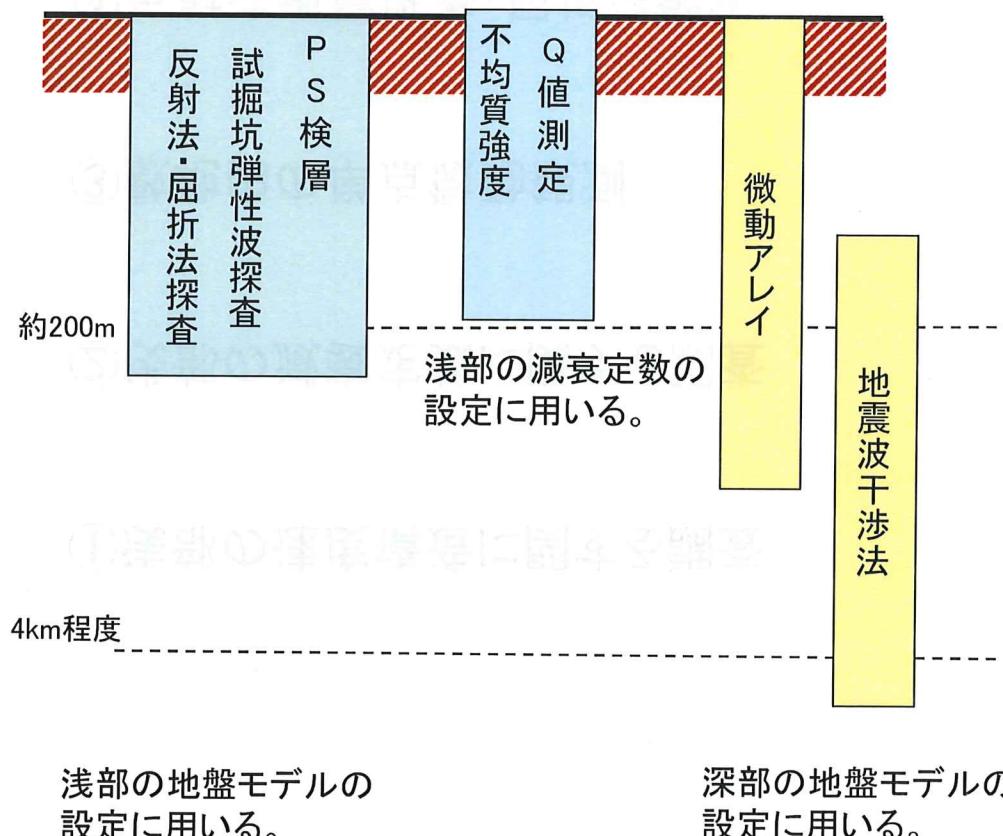
調査・検討項目	審査会合	検討結果の概要
PS検層	9/18 第21回会合	浅部の速度構造の評価
試掘坑弾性波探査	9/18 第21回会合	解放基盤面のP波・S波速度の評価
地質構造の評価	9/18 第21回会合	敷地内の地質に特異な構造がないことを確認
PS検層結果を用いた不均質強度の評価	9/18 第21回会合	浅部の減衰定数の評価
Q値測定	9/18 第21回会合	浅部の減衰定数の評価
敷地内の単点微動調査	9/18 第21回、第41回	解放基盤面に著しい高低差等の特異な構造がないことを確認
反射法地震探査	12/18 第59回会合	敷地の地下構造に特異な構造がないことを確認
屈折法地震探査	12/18 第59回会合	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	本日	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、本日	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。

# 地盤モデルの評価の考え方

■敷地周辺で実施した各種調査結果を組み合わせて、地盤モデルを策定する。



## 1.2 浅部地下構造の評価

①浅部の速度構造に関する調査

②浅部の減衰定数に関する調査

③敷地内の単点微動観測

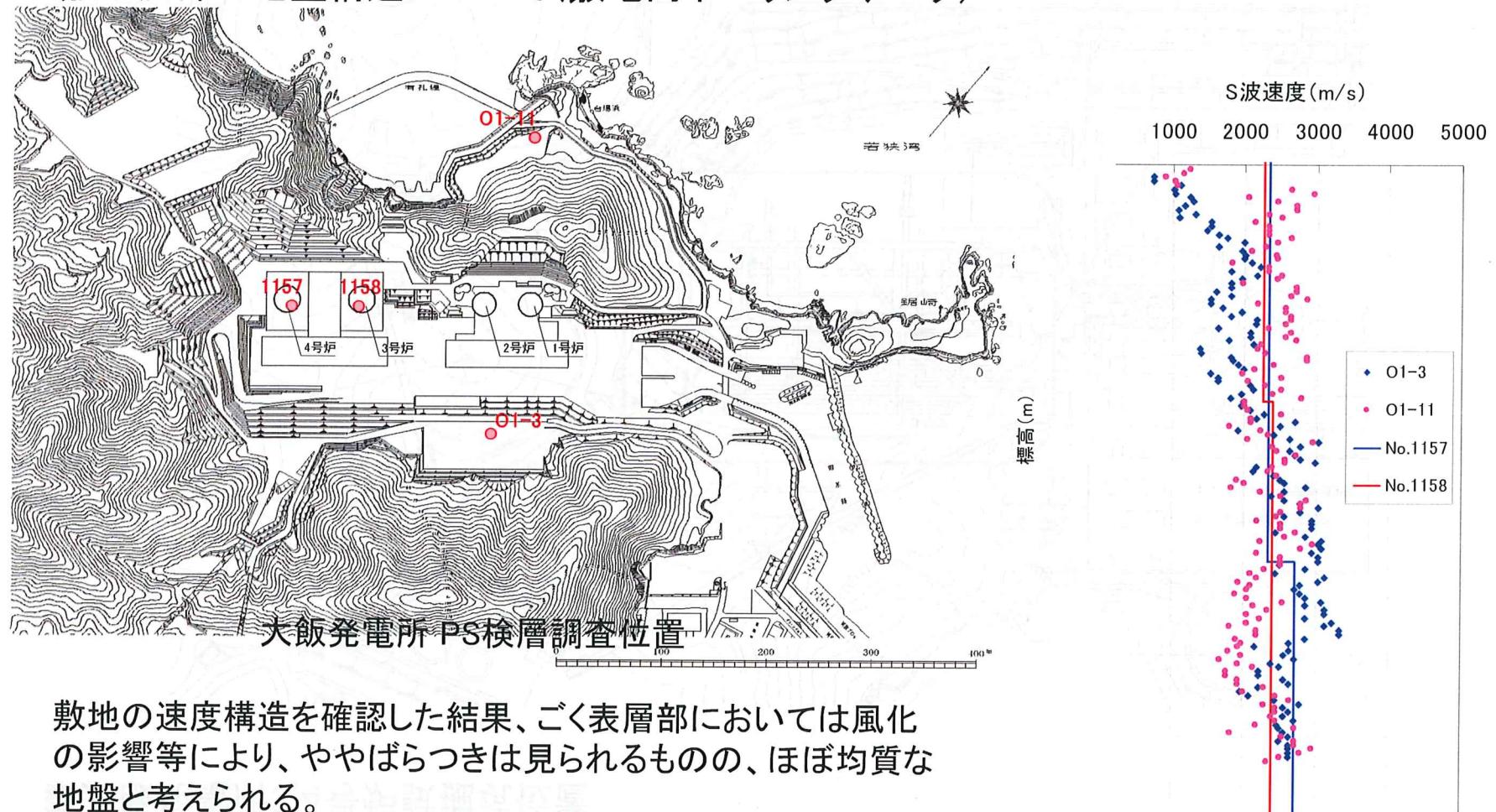
④反射法地震探査・屈折法解析

# ①浅部の速度構造に関する調査

第21回審査会合  
資料再掲

7

## ■敷地浅部の地盤構造について(敷地内ボーリングデータ)



敷地の速度構造を確認した結果、ごく表層部においては風化の影響等により、ややばらつきは見られるものの、ほぼ均質な地盤と考えられる。

⇒敷地内の浅部構造に特異な構造は見られない

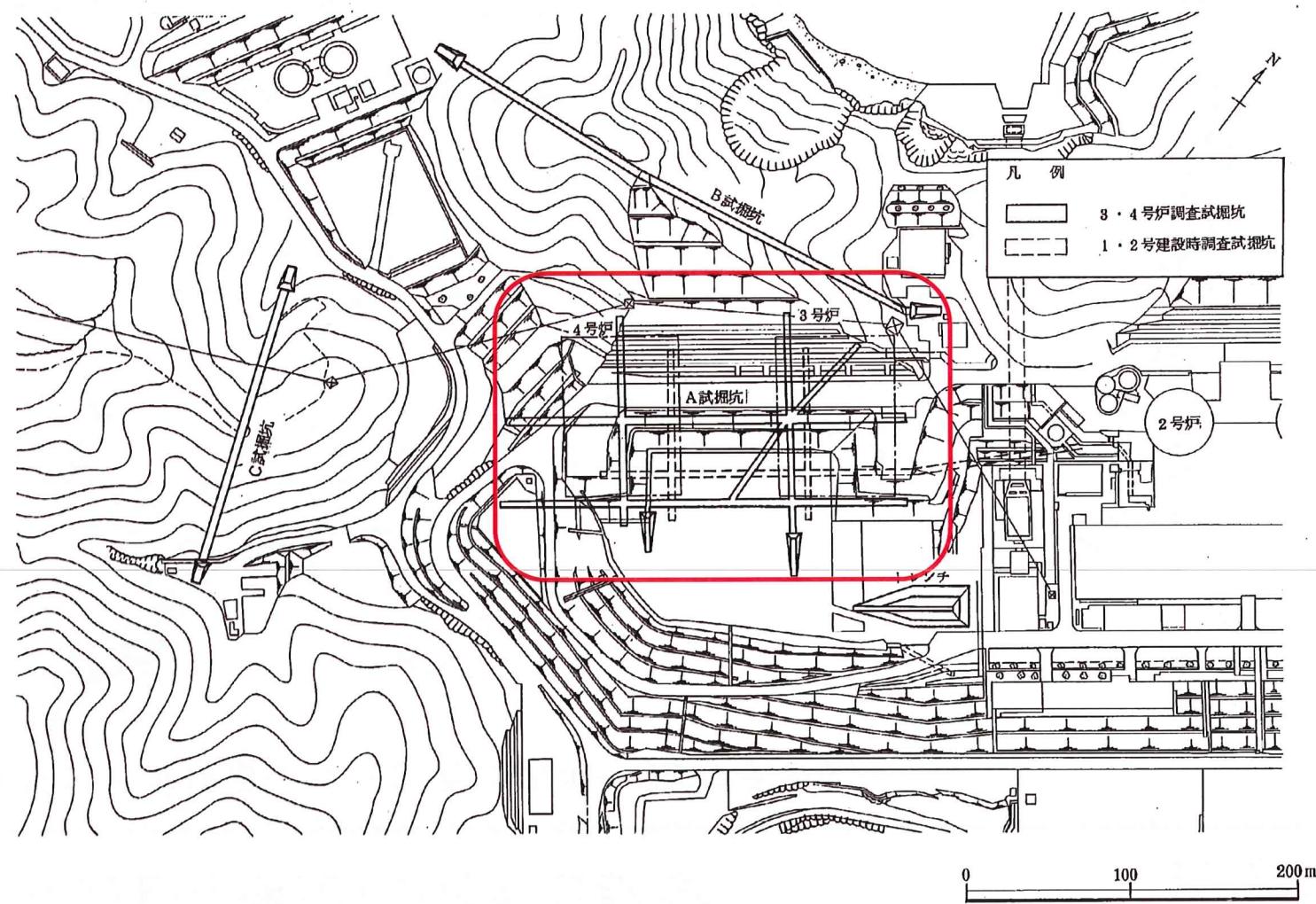
S波速度構造

# ①浅部の速度構造に関する調査

第21回審査会合  
資料再掲

8

## ■大飯発電所3,4号炉試掘坑位置



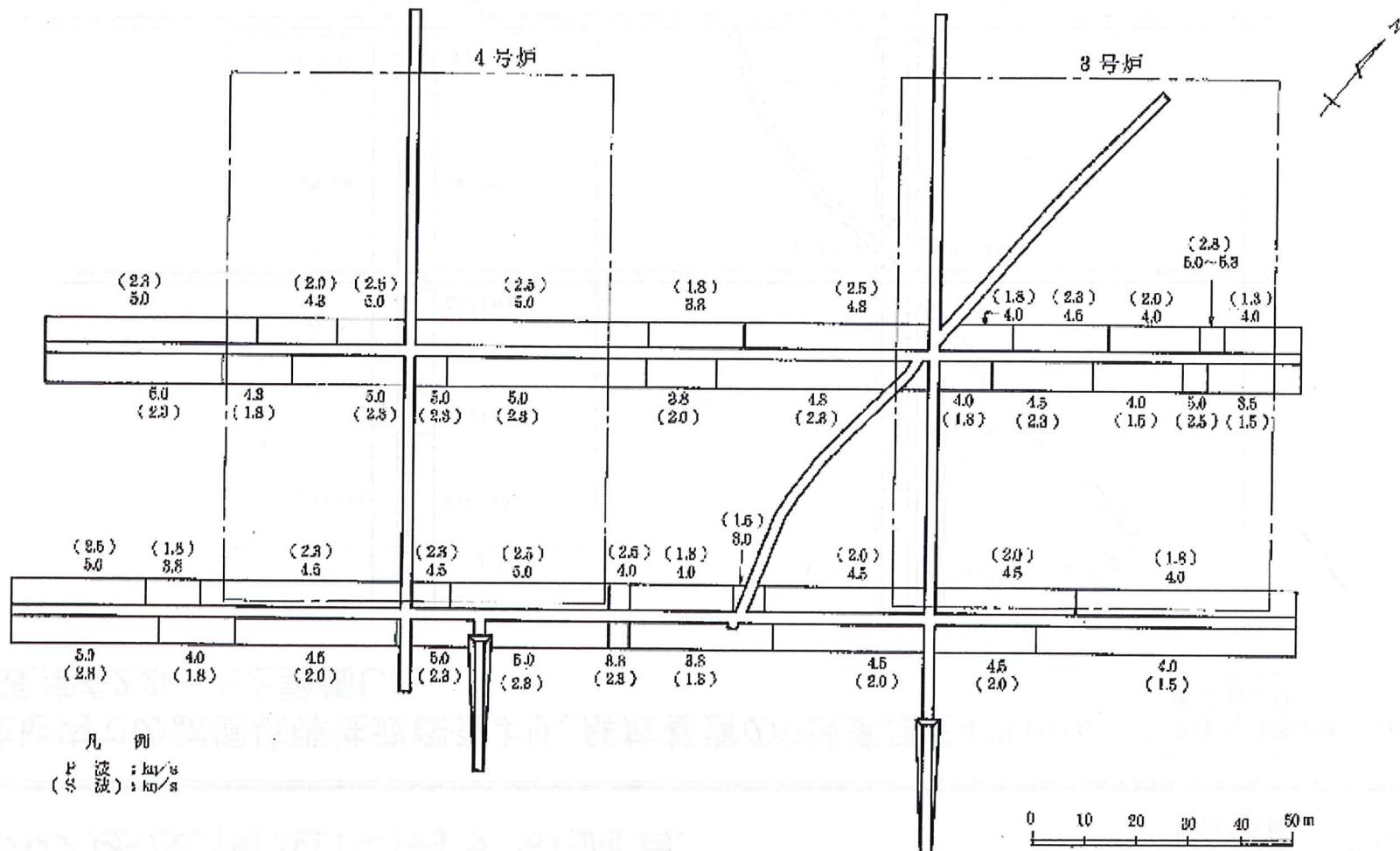
# 浅部の速度構造に関する調査

第21回審査会合  
資料再掲

9

■敷地内での試掘坑弹性波探査より、解放基盤のP波速度を4.3km/s、  
S波速度を2.2km/sと評価した。

大飯3, 4号機設置許可  
申請書より



試掘坑内弹性波速度図(1) 本坑

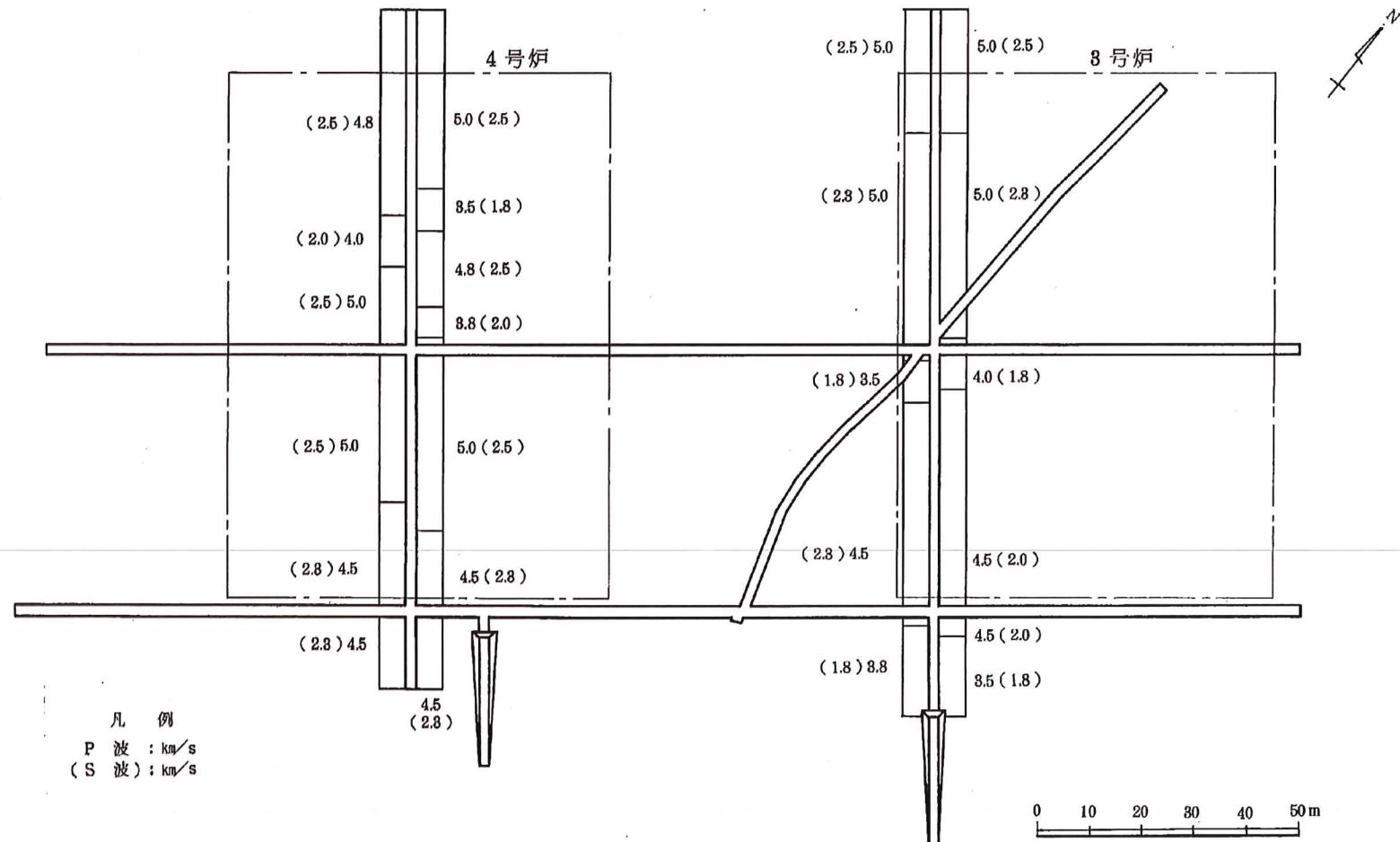
# 浅部の速度構造に関する調査

第21回審査会合  
資料再掲

10

■敷地内の試掘坑弾性波探査より、解放基盤のP波速度を4.3km/s、S波速度を2.2km/sと評価した。

大飯3, 4号機設置許可  
申請書より



試掘坑内弾性波速度図(2) 枝坑

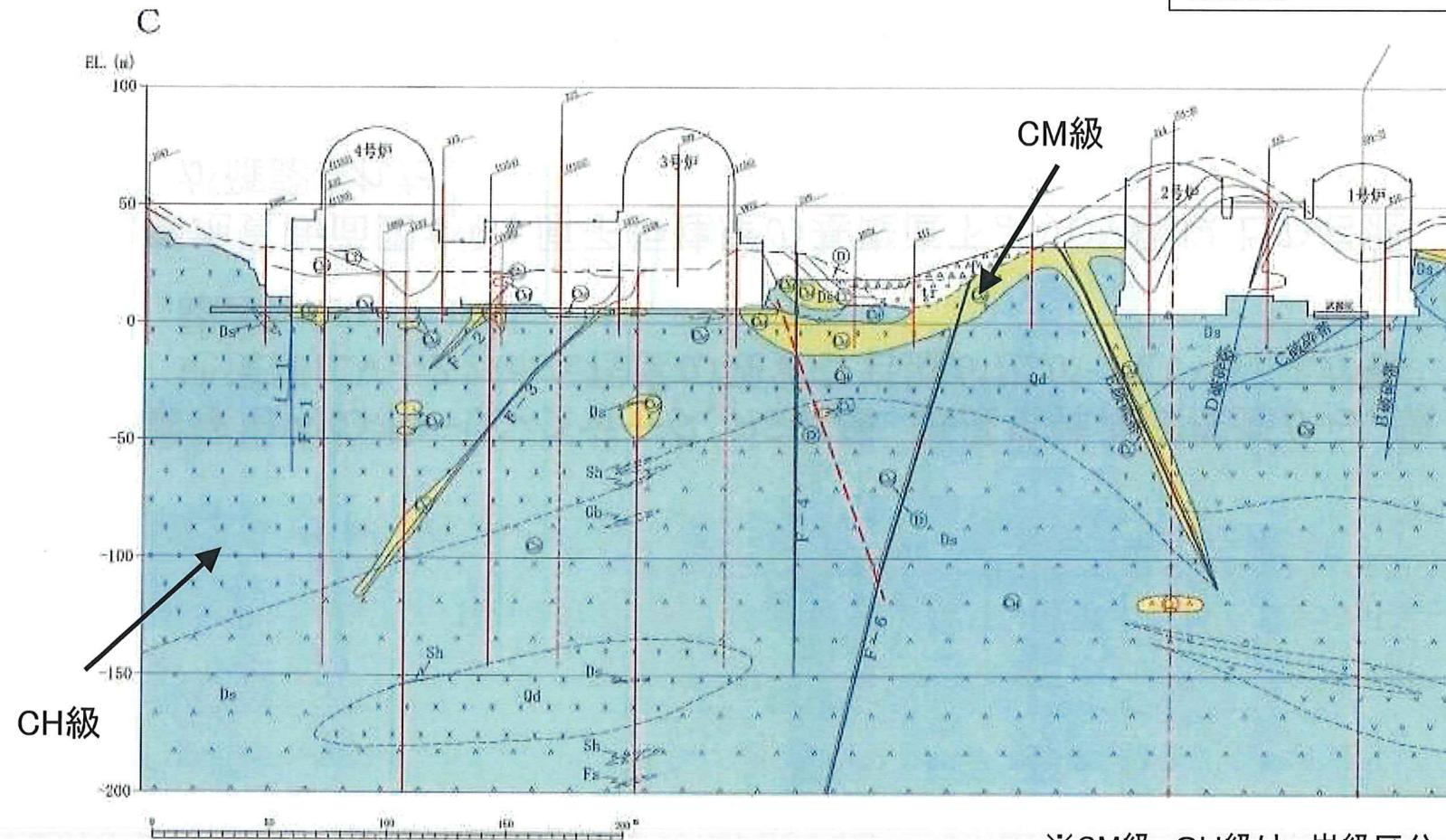
# 浅部の速度構造に関する調査

第21回審査会合  
資料再掲

11

■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。

## 大飯発電所敷地内破碎帯の調査に関する 有識者会合 第5回資料「大飯・現調6-1」 を加筆修正



### 3. 4号機直下の地質断面図

- 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が確認された。
- 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た。

## ②浅部の減衰定数に関する調査

第21回審査会合  
資料再掲

13

### ■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

- 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。

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

- 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。

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

- 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 $\alpha$ を求め、更にHurst指数 $\nu$ を次式(3)から求める。

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

- 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 $\varepsilon$ 、相関距離 $a$ を求める。なお、Hurst指数 $\nu$ 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、 $K_\nu$ は $\nu$ 次修正ベッセル関数、「 $\Gamma$ 」はガンマ関数である。

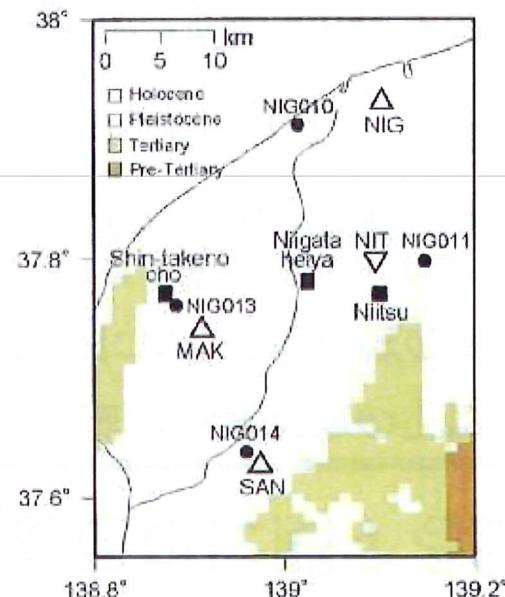
# 浅部の減衰定数に関する調査

第21回審査会合  
資料再掲

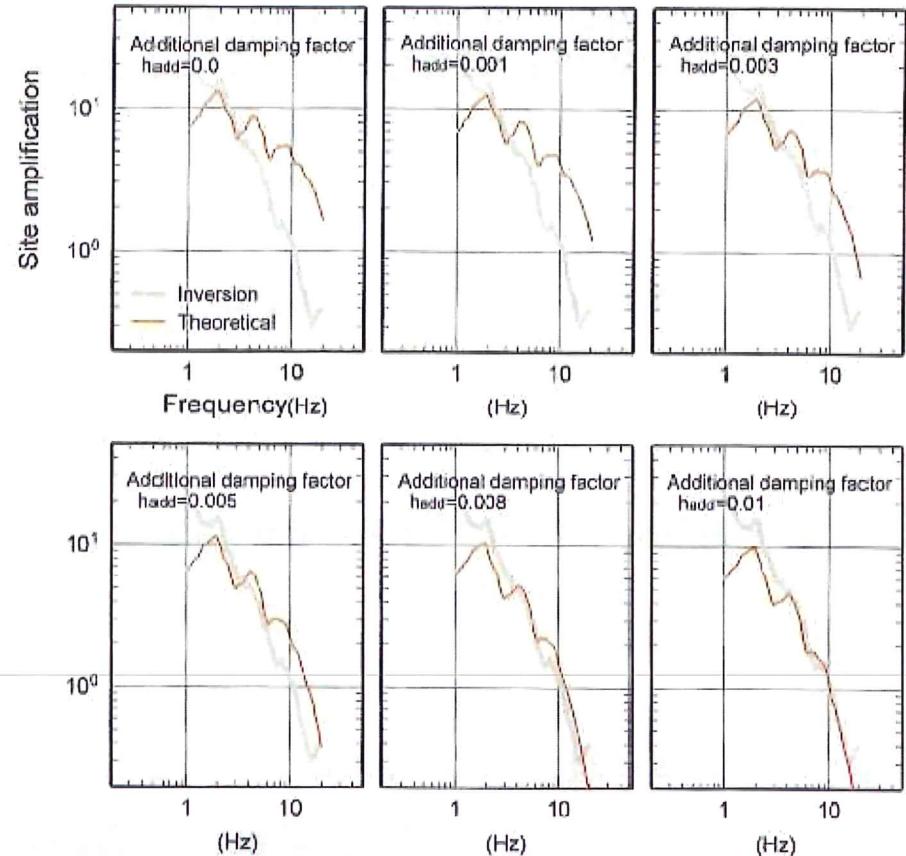
14

## ■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增幅特性について、理論サイト增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、経験的サイト增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錐(■)、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增幅特性(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增幅特性(赤線)の比較

※図は佐藤(浩)(2009)より抜粋

# 浅部の減衰定数に関する調査

第21回審査会合  
資料再掲

15

## ■速度構造の不均質性と付加減衰に関する知見(続き)

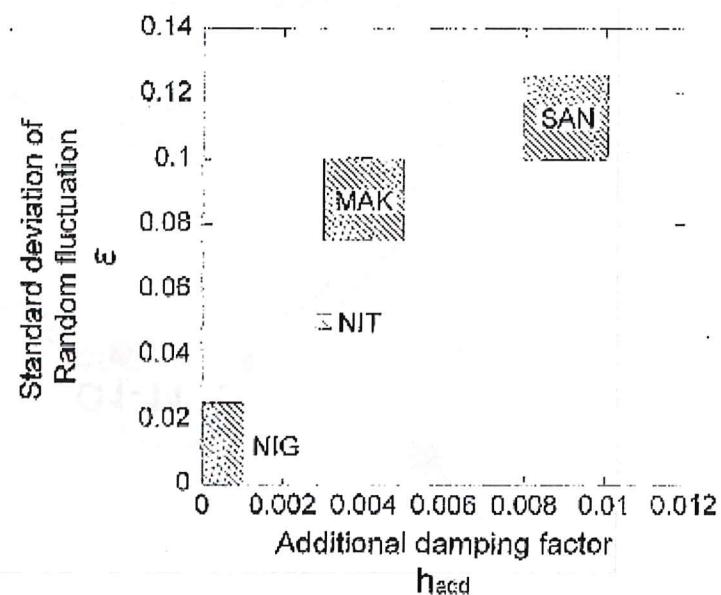
- また、不均質データの標準偏差  $\varepsilon$  が不均質強度を支配しており、平均的な減衰定数に対して付加すべき減衰定数とその地点で考慮すべき不均質強度は比例するとしている。

広帯域のサイト增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 $\varepsilon$	0 ~ 0.025	0.05	0.075 ~ 0.1	0.1 ~ 0.125

広帯域のサイト增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增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  $\varepsilon$ )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

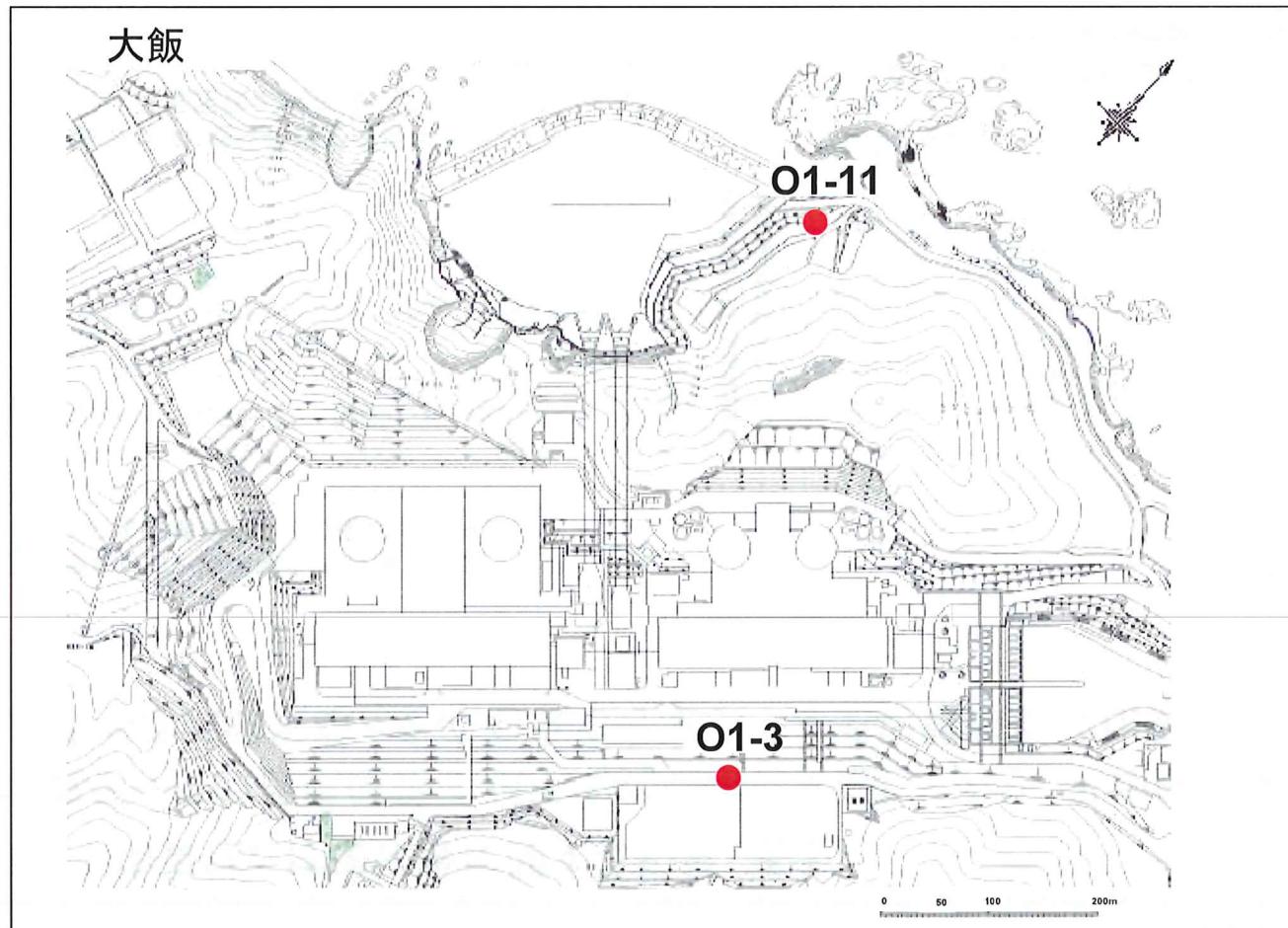
※図・表は佐藤(浩)(2009)より抜粋

# 浅部の減衰定数に関する調査

第21回審査会合  
資料修正

16

- 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、不均質強度を検討し、浅部(深さ200m以浅)の地盤の減衰定数を評価。



● : 不均質強度検討に使用したPS検層孔

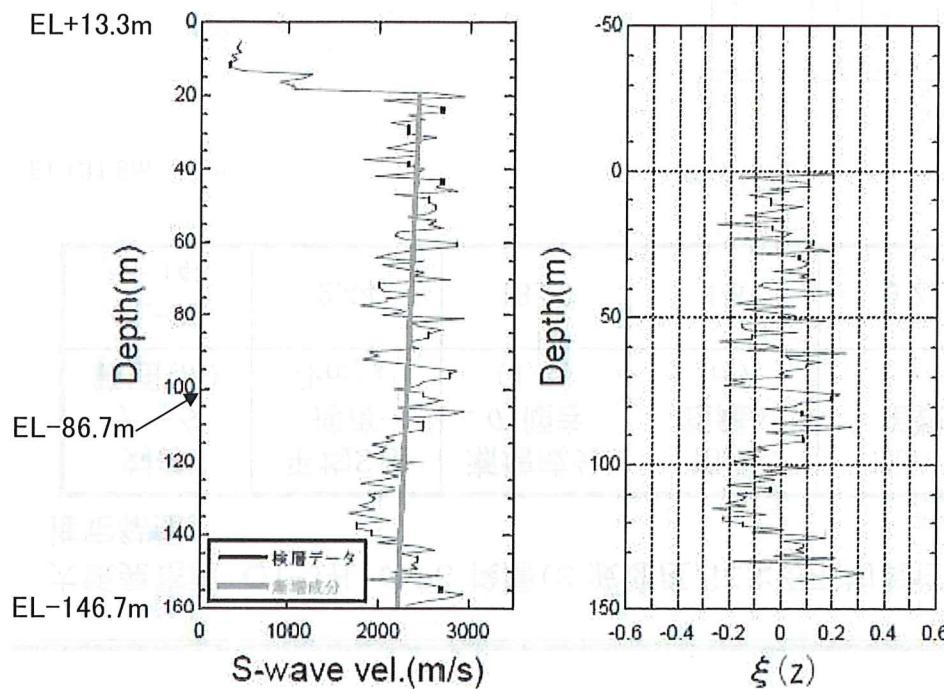
# 浅部の減衰定数に関する調査

第21回審査会合  
資料修正

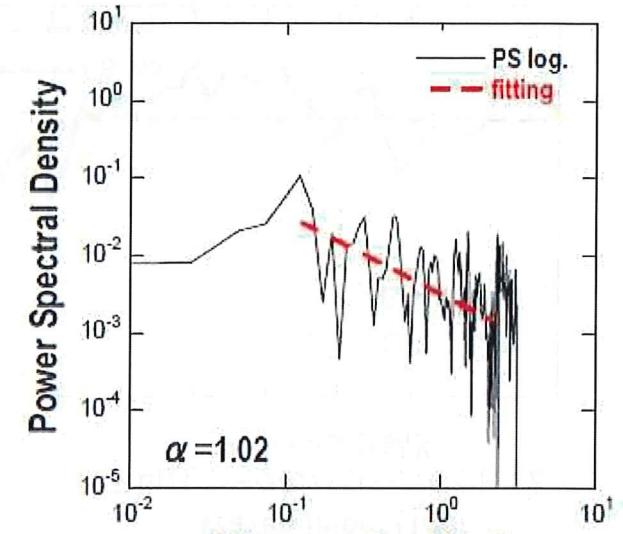
17

大飯発電所(O1-11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

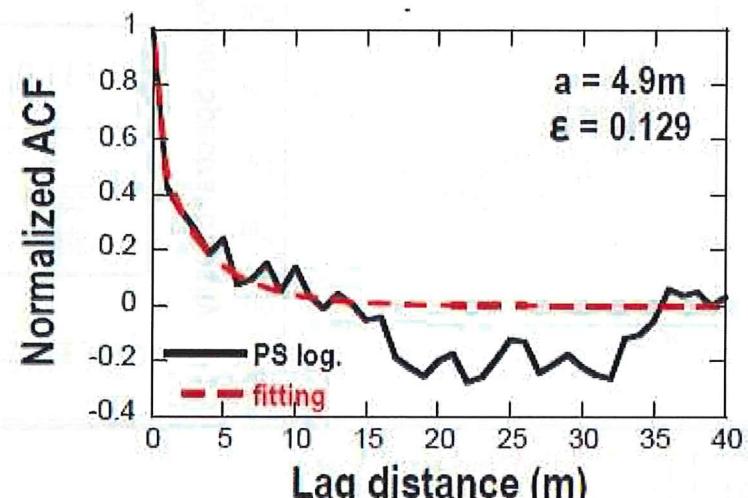
対象データ範囲(m)	平均S波速度(km/s)	漸増成分の傾き(1/s)	相関距離a(m)	Hurst指数ν	標準偏差ε
GL-19 ~-159	2.34	-1.67	4.9	0.21	0.129



検層データに対するフィッティング結果(左)と  
(孔口標高EL+13.3m) 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

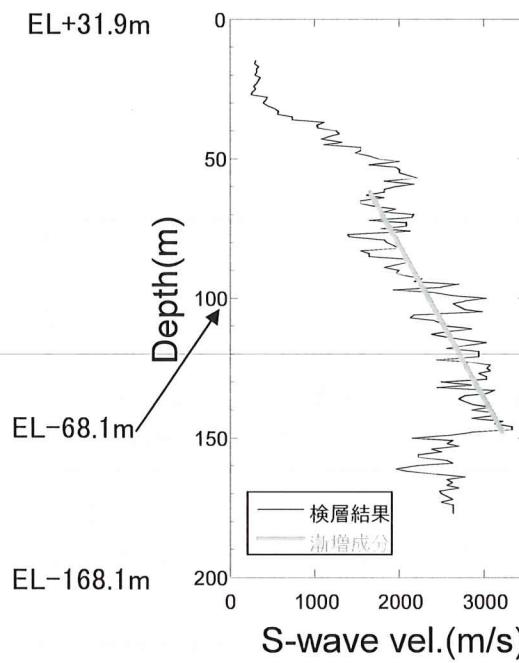
# 浅部の減衰定数に関する調査

第21回審査会合  
資料修正

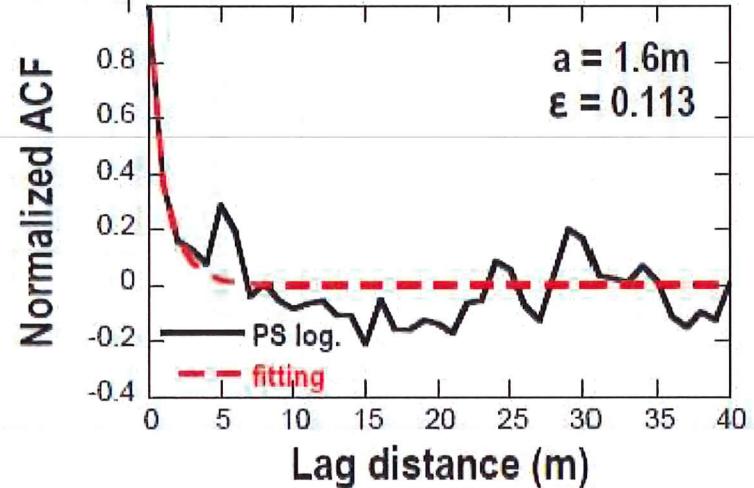
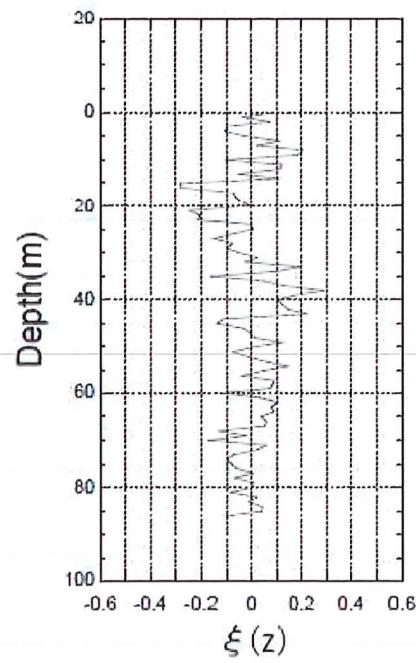
18

大飯発電所(O1-3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

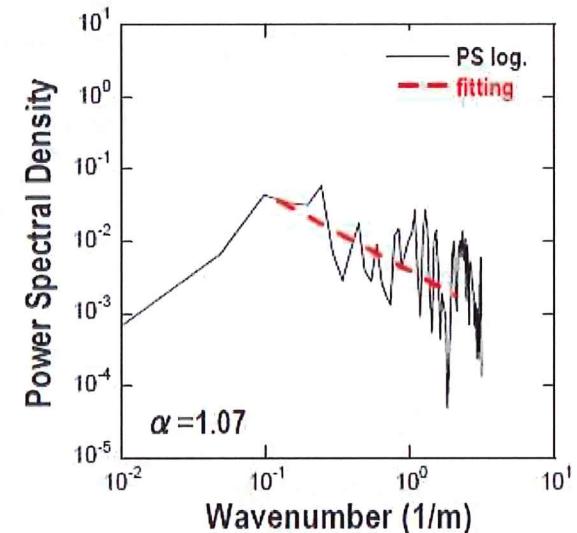
対象データ範囲(m)	平均S波速度(km/s)	漸増成分の傾き(1/s)	相関距離a(m)	Hurst指数ν	標準偏差ε
GL-62 ~-148	2.44	18.29	1.6	0.21	0.113



検層データに対するフィッティング結果(左)  
(孔口標高EL+31.9m) 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



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

# 浅部の減衰定数に関する調査

第21回審査会合  
資料再掲

19

## ■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。

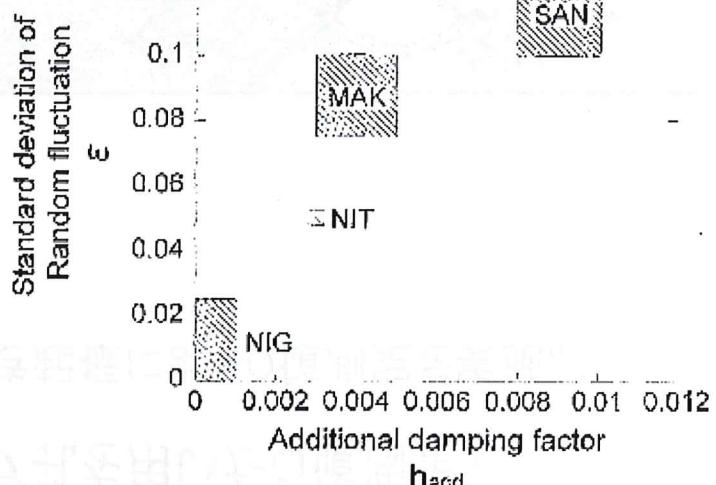
広帯域のサイト增幅特性で考慮すべき  
不均質性の標準偏差(強度)の目安

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

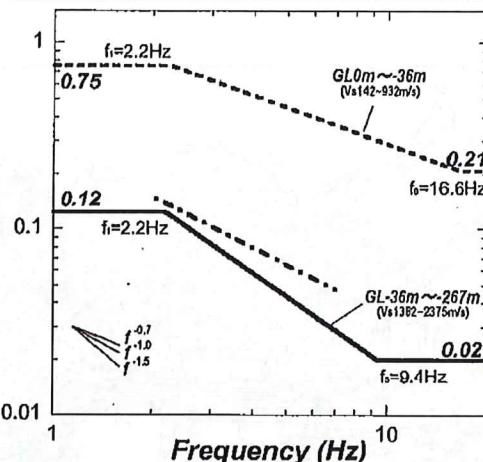
	NIG (NIG010)	NIT (NIG011)	MAK (NIG013)	SAN (NIG014)
Additional damping factor $h_{add}$	0 ~ 0.001	0.003	0.003 ~ 0.005	0.008 ~ 0.01

広帯域のサイト增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增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  $\epsilon$ )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



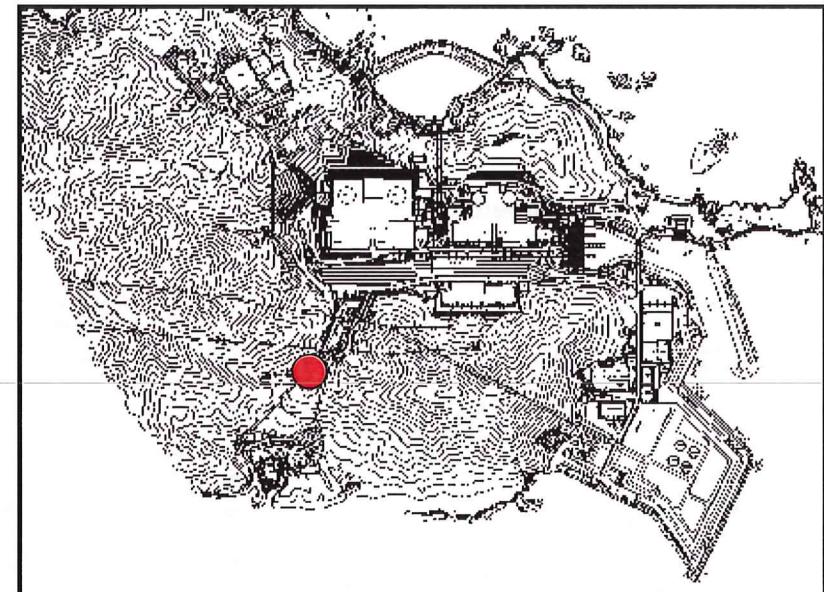
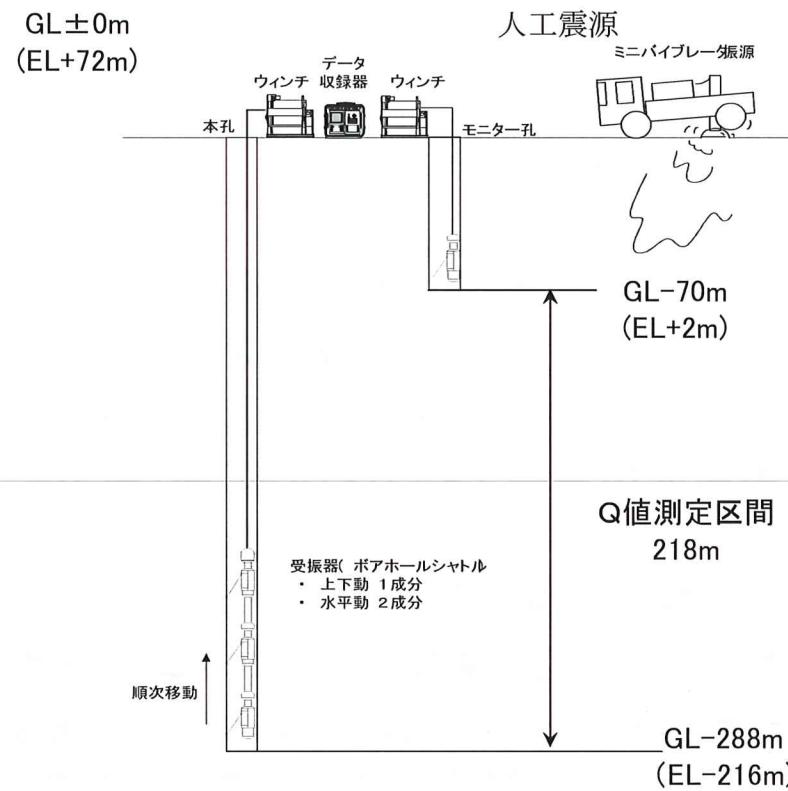
# 浅部の減衰定数に関する調査

第21回審査会合  
資料再掲

20

## ■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)

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値測定を実施。

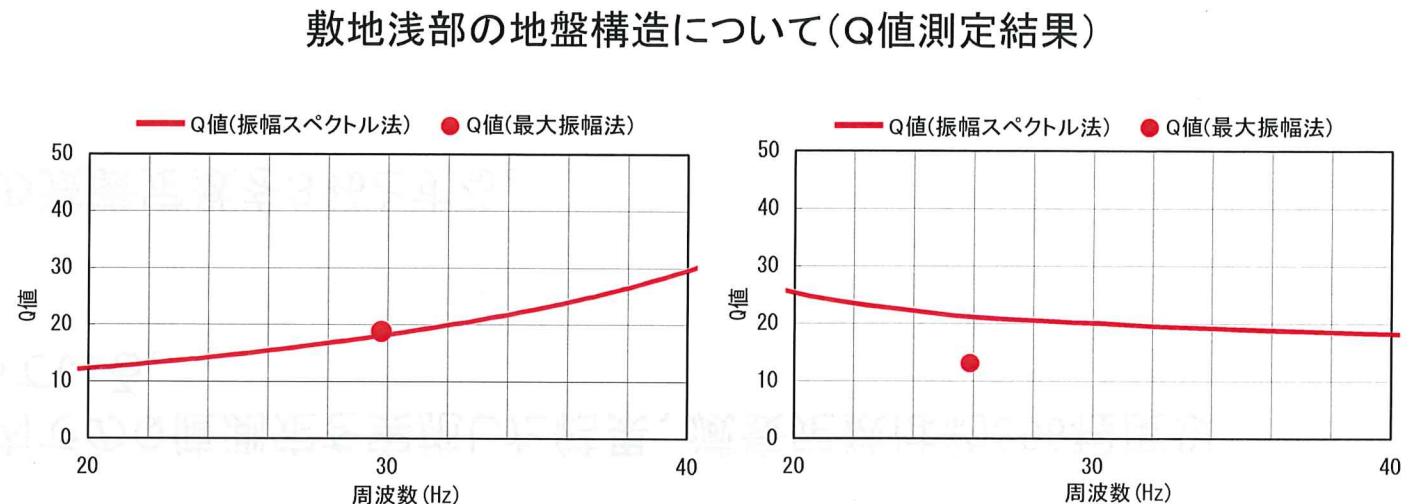
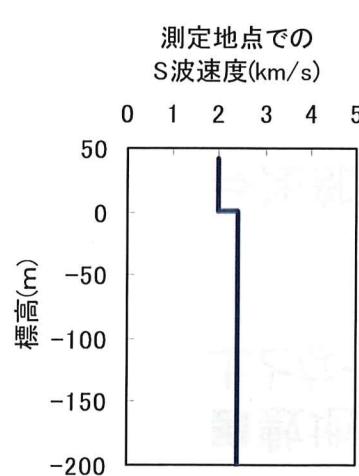


測定位置

# 浅部の減衰定数に関する調査

第21回審査会合  
資料加筆修正

21



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	ミニバイブルータ	42~70	30.2	15.78(3.17)
		70~288	29.8	19.05(2.62)
	板たたき	42~70	29.7	7.42(6.74)
		70~288	25.9	13.21(3.79)

# 浅部の減衰定数に関する調査

---

22

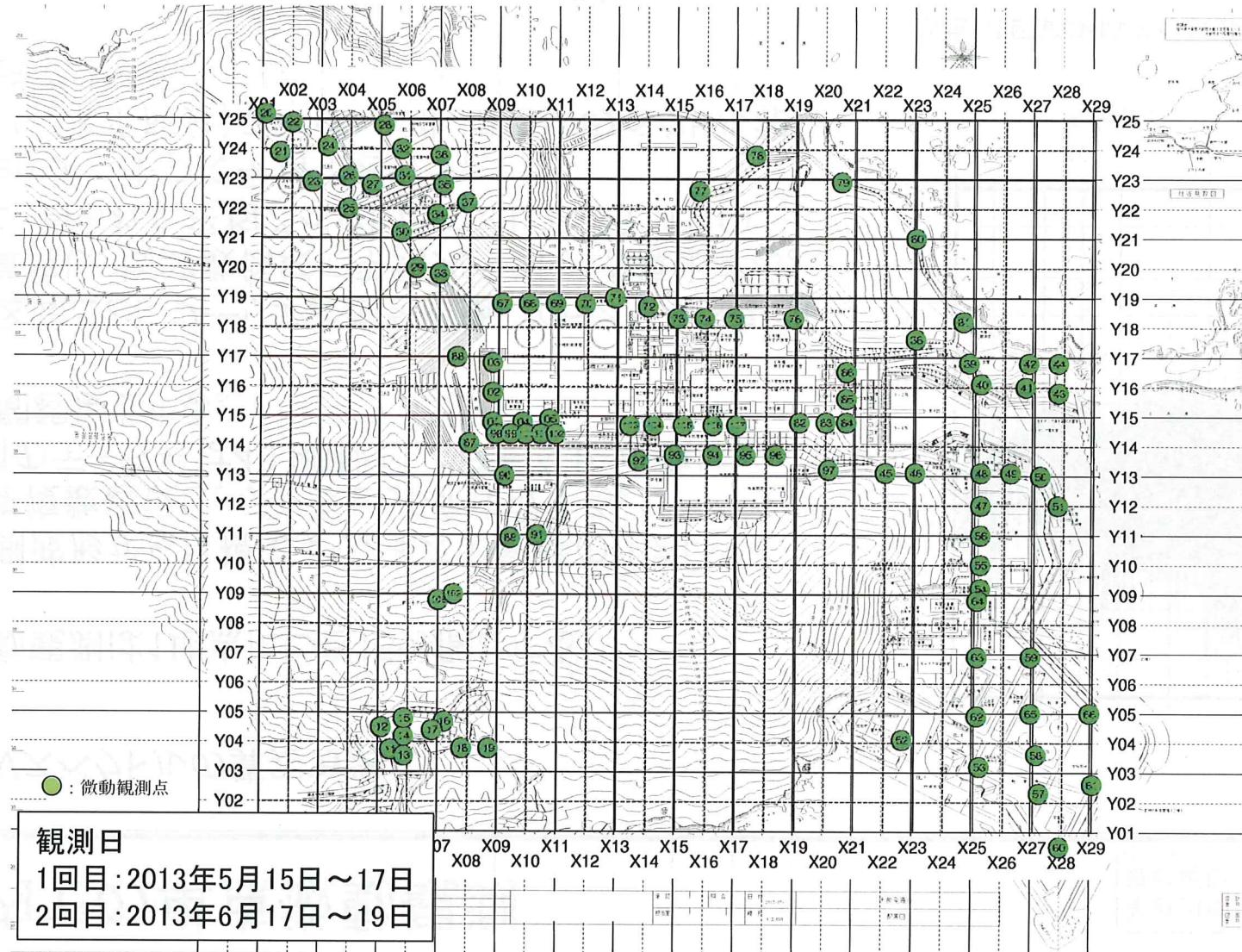
- 佐藤・他(2007)、佐藤・山中(2009)の知見を基に、敷地内のPS検層結果から速度構造の不均質性と減衰定数の関係について着目して不均質強度を評価した。
- 敷地内でのQ値測定を実施した結果、減衰定数は約3%程度以上となっている。  
⇒浅部の減衰定数を3%とする。

### ③敷地内での単点微動観測

第21回審査会合  
資料再掲

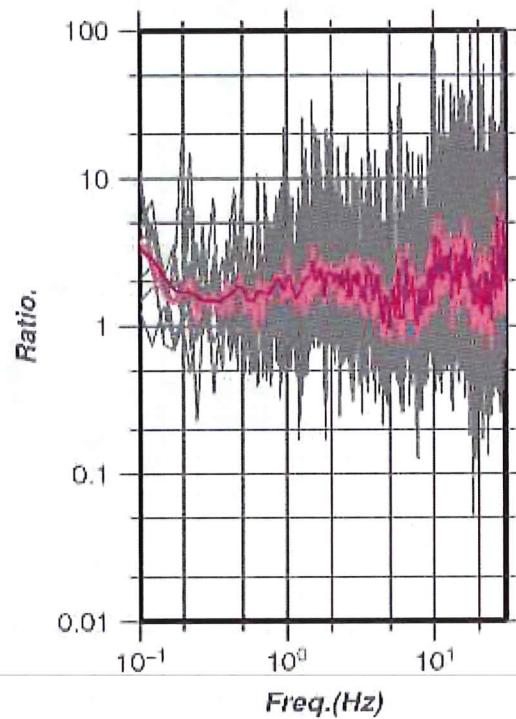
23

■大飯発電所敷地内において、約50m間隔の微動観測を実施してH/Vスペクトルを評価し、敷地内における空間変動を評価した。



## ■H/Vスペクトルの算定方法

- ①微動観測は1地点につき15分間とする。
- ②観測波形から目視によりノイズの影響の小さい区間を複数選択し、データセットを作成する。1区間のデータ長は40.96秒とし、データセット数は10区間程度とする。
- ③各区間ごとにフーリエ変換を実施してH/Vスペクトル比を算定し、周波数領域で平均スペクトルを算出する。さらに、得られた平均スペクトルに対して幅0.1HzのParzenウィンドウで平滑化を行う。  
なお、H(水平成分)スペクトルは、2方向のベクトル和としたものとする。
- ④ H/Vスペクトルの評価においては、信頼性の観点から、1Hz～数Hzの周波数範囲に着目して評価を行う。



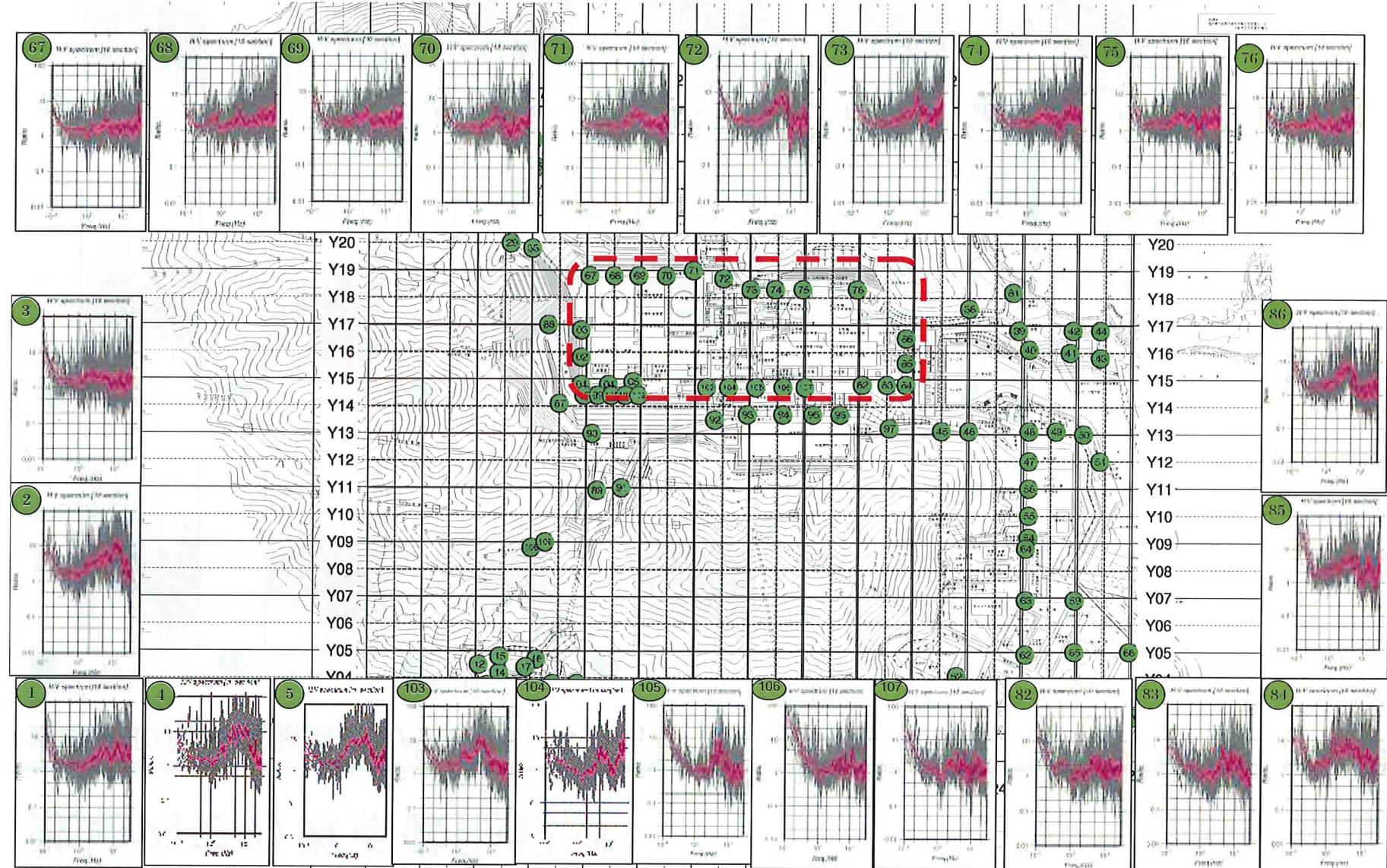
灰色:各区間のH/Vスペクトル比  
薄紫:平均H/Vスペクトル比  
紫色:平滑化されたH/Vスペクトル比  
H/Vスペクトル比の例

# 敷地内での単点微動観測

第21回審査会合  
資料再掲

25

## ■原子炉建屋周辺観測点のH/Vスペクトル分布

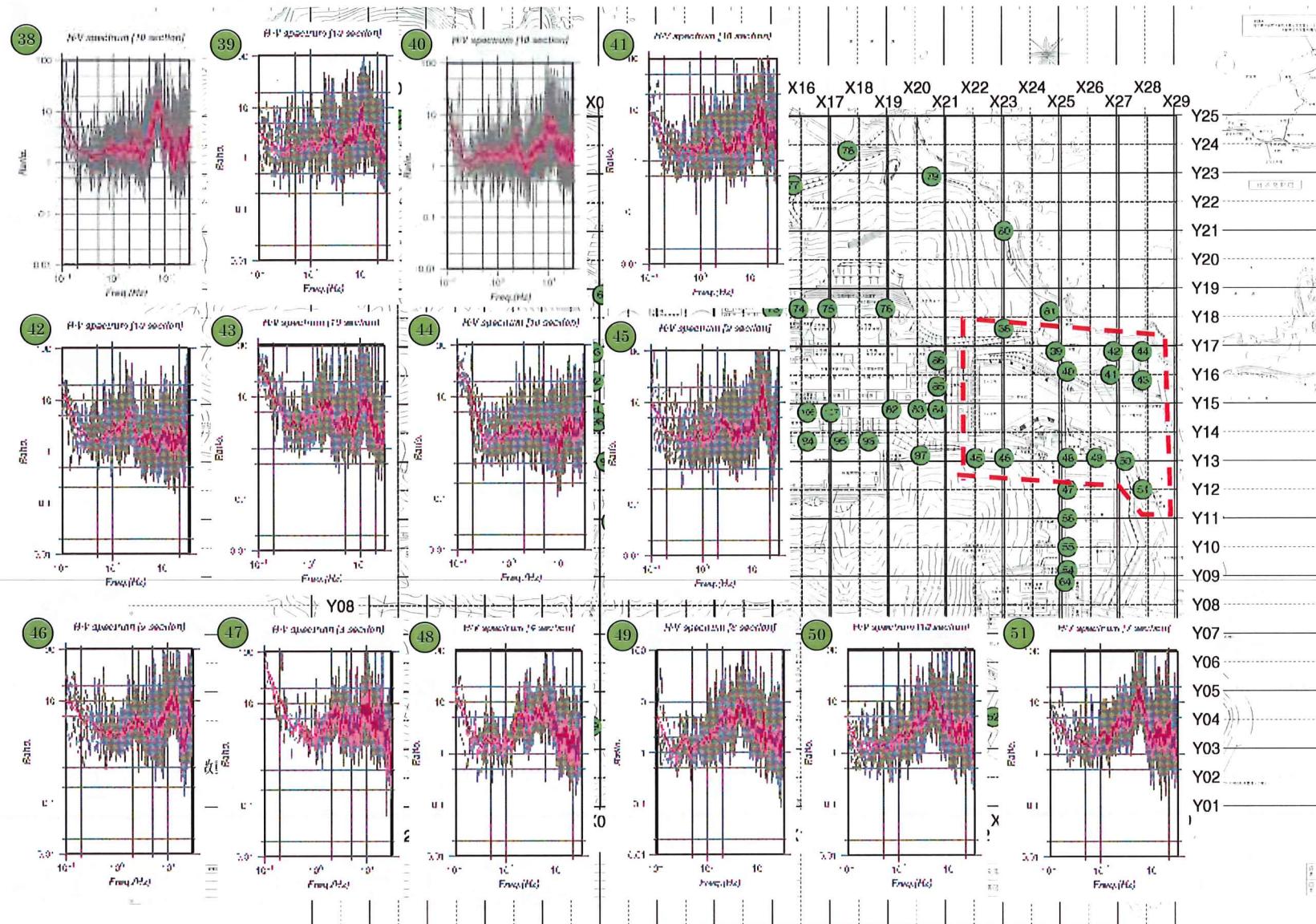


# 敷地内での単点微動観測

第21回審査会合  
資料再掲

26

## ■取水口周辺観測点のH/Vスペクトル分布

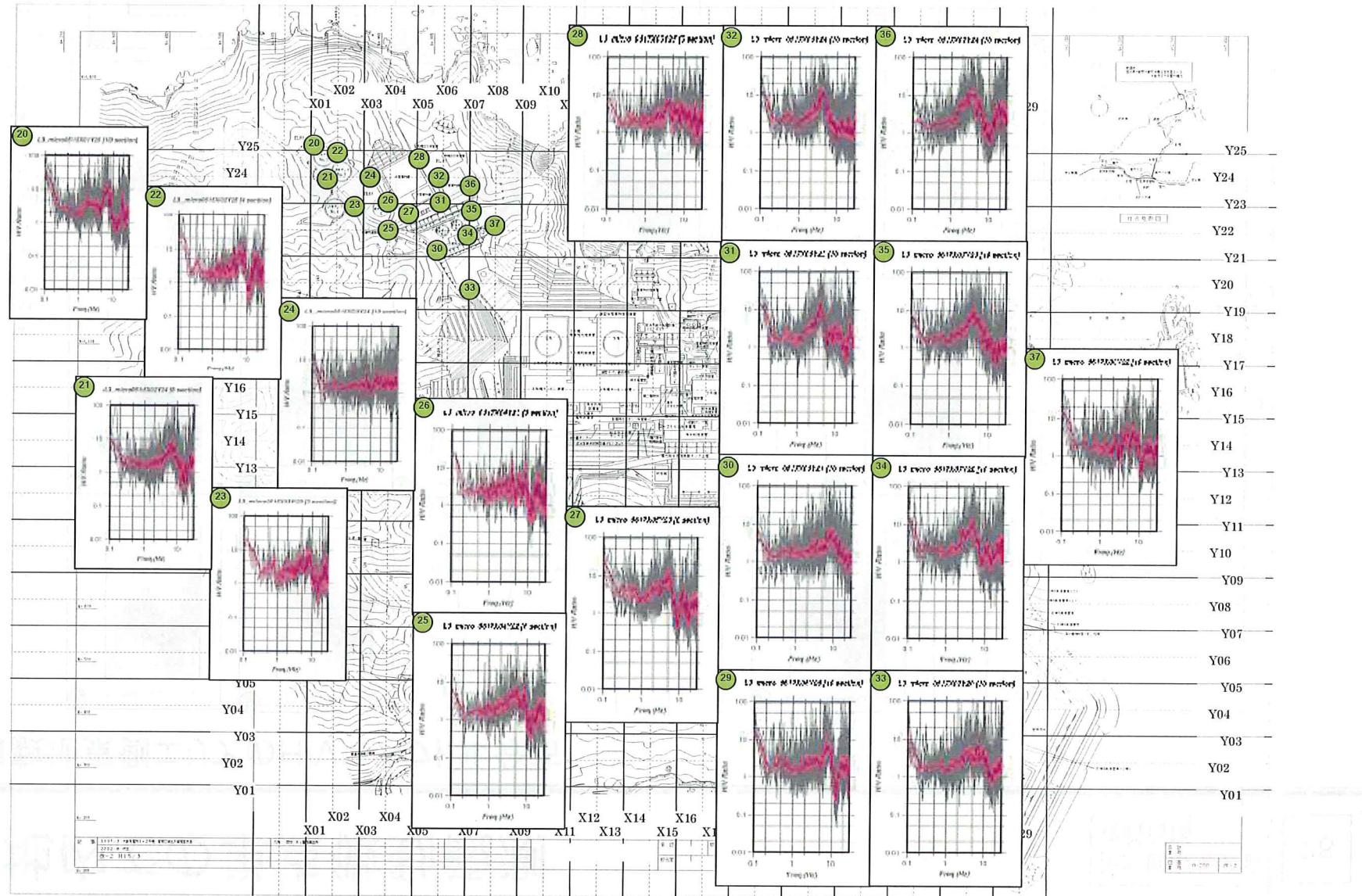


# 敷地内での単点微動観測

第21回審査会合  
資料再掲

27

## ■敷地西側エリアのH/Vスペクトル分布

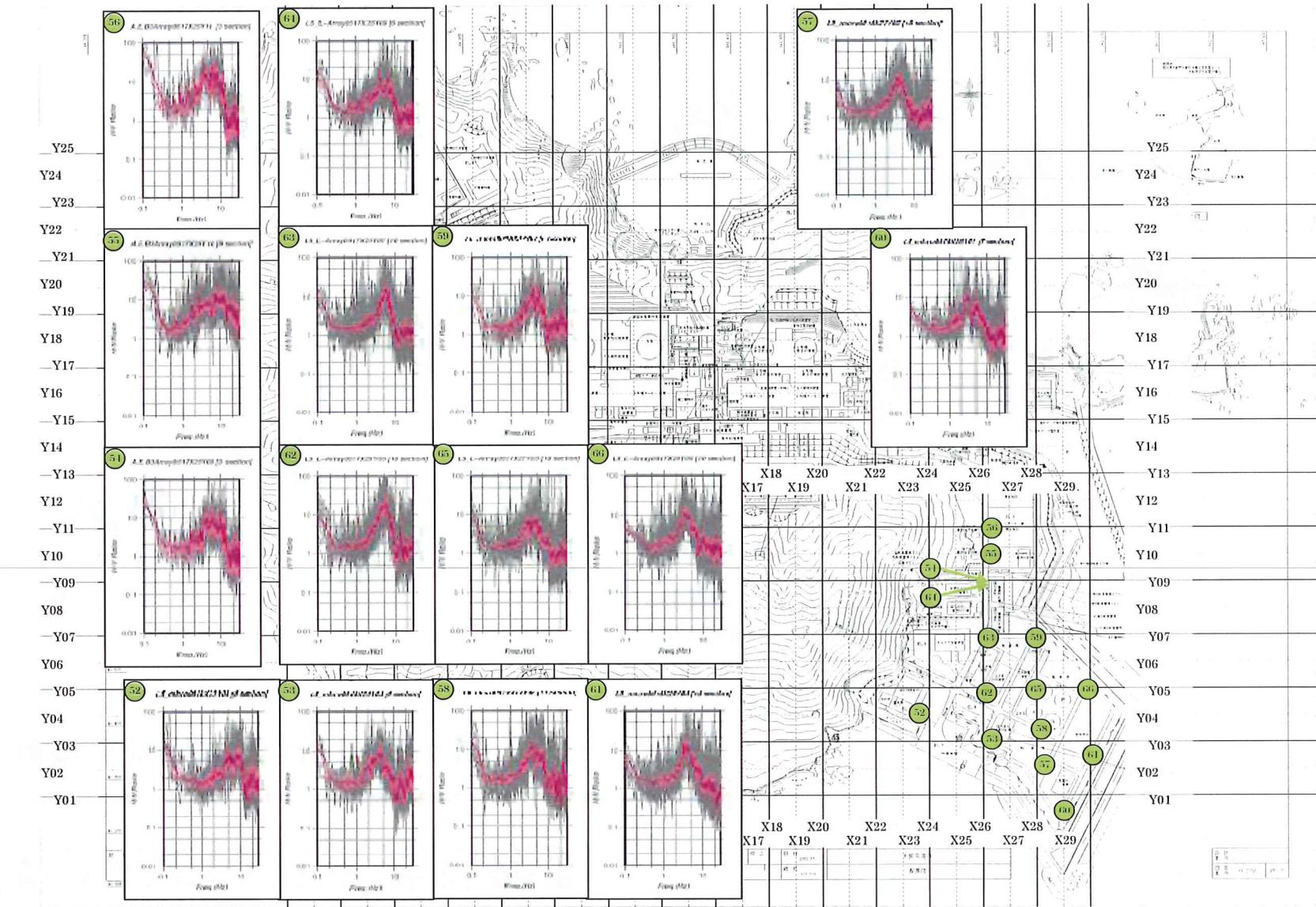


## 敷地内での単点微動観測

第21回審査会合  
資料再掲

28

## ■ 敷地東側エリアのH/Vスペクトル分布

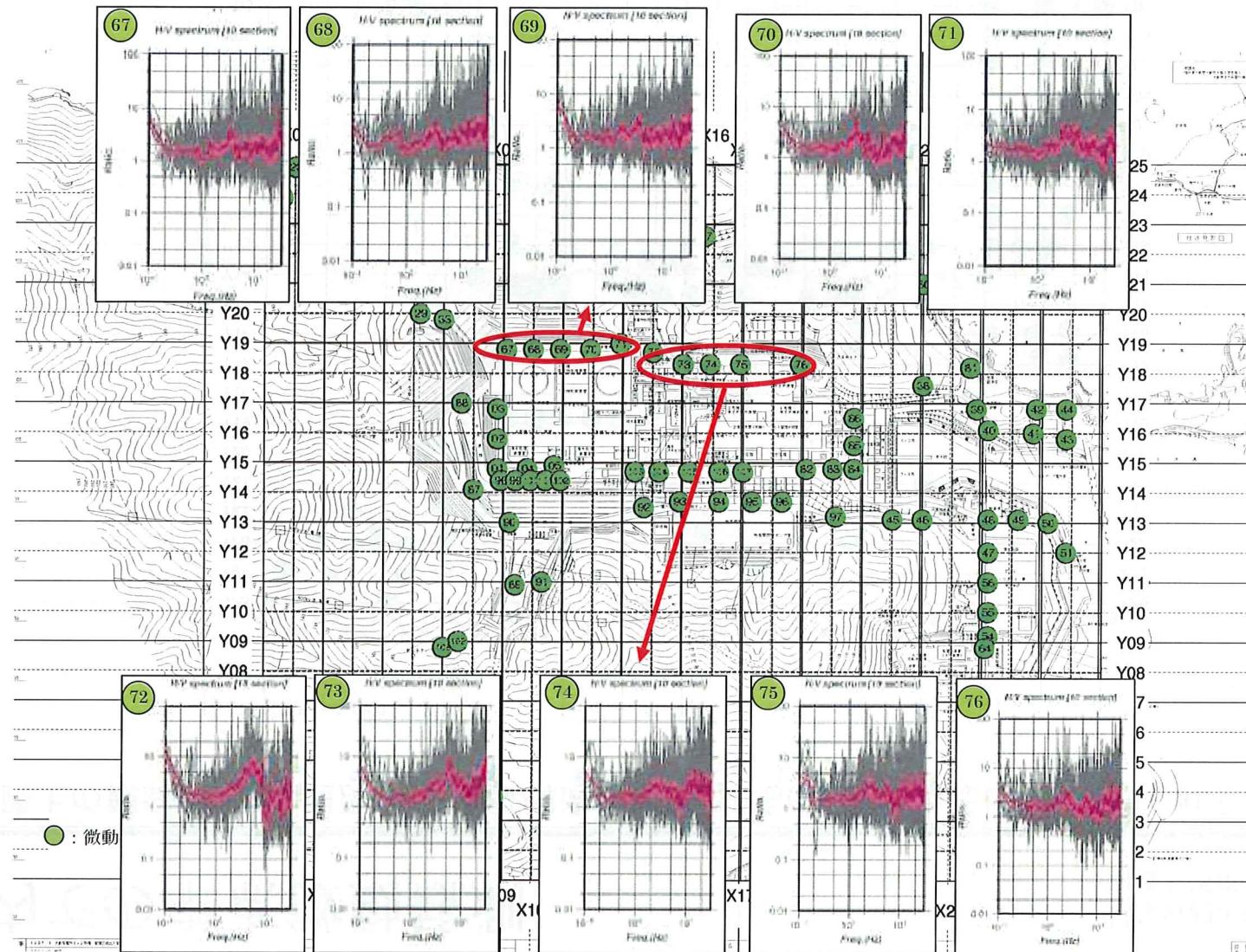


# 敷地内での単点微動観測

第21回審査会合  
資料再掲

29

■背面道路では、72,73地点を除き、フラットなスペクトルであり特異なピークは見られない。

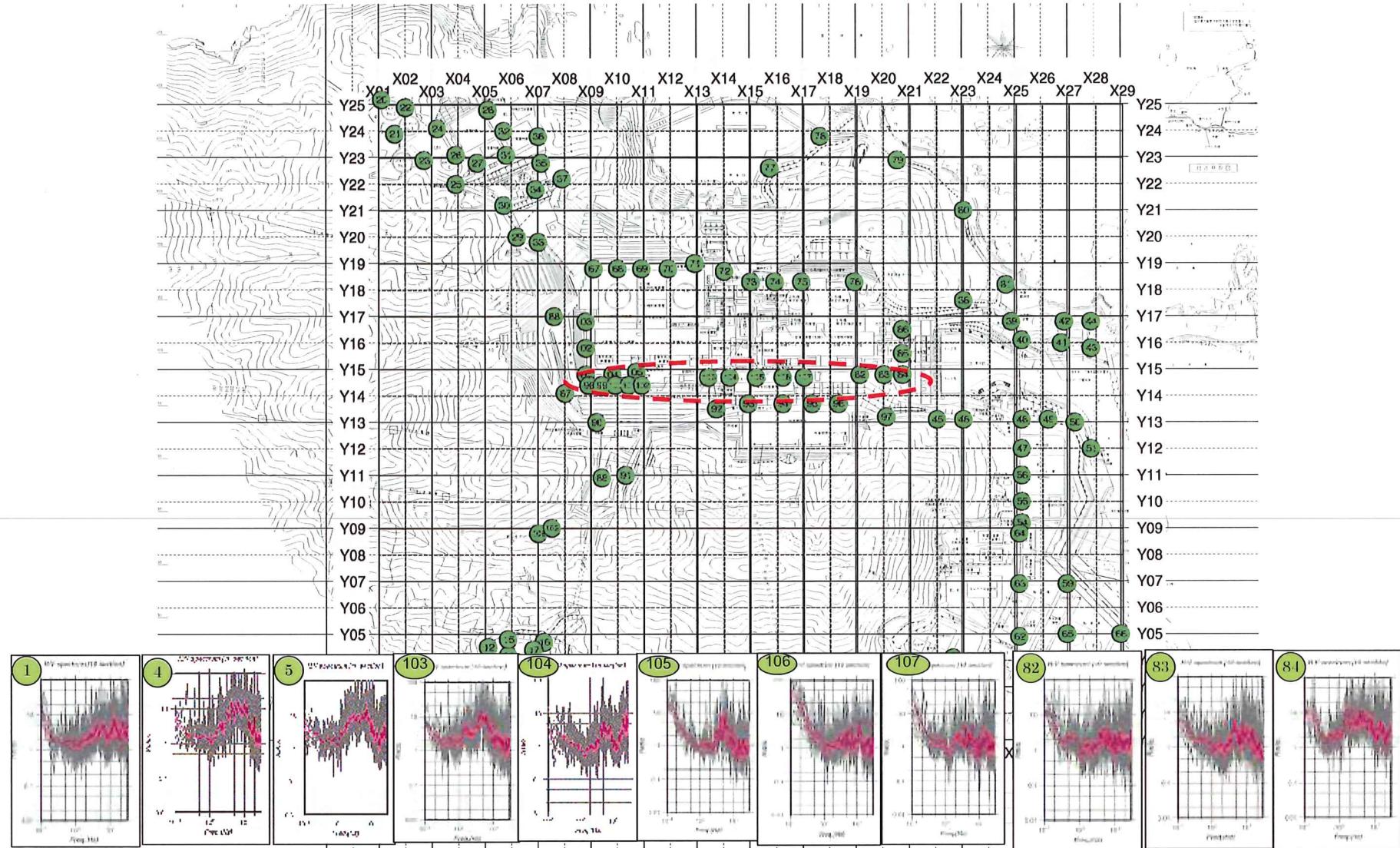


# 敷地内での単点微動観測

第21回審査会合  
資料再掲

30

■前面道路上の観測点では、埋戻し土・埋設構造物等によるものと思われるピークが見られる。



# 敷地内での単点微動観測

第41回審査会合  
資料再掲

31

## ■2層地盤によるH/Vスペクトルの同定手順

### ①2層地盤の仮定

第1層のVs・Vpは、敷地内の各ボーリング孔のPS検層結果から、表層の埋土部分の平均値を用いる。  
(Vs=472m/s, Vp=1124m/s)

第2層のVsは2200m/sとする。

密度  $\rho$  と第2層のVpは、以下の経験式により算定する。

$$Vp = 1.29 + 1.11Vs$$

$$\rho = 1.2475 + 0.399Vp - 0.026Vp^2$$

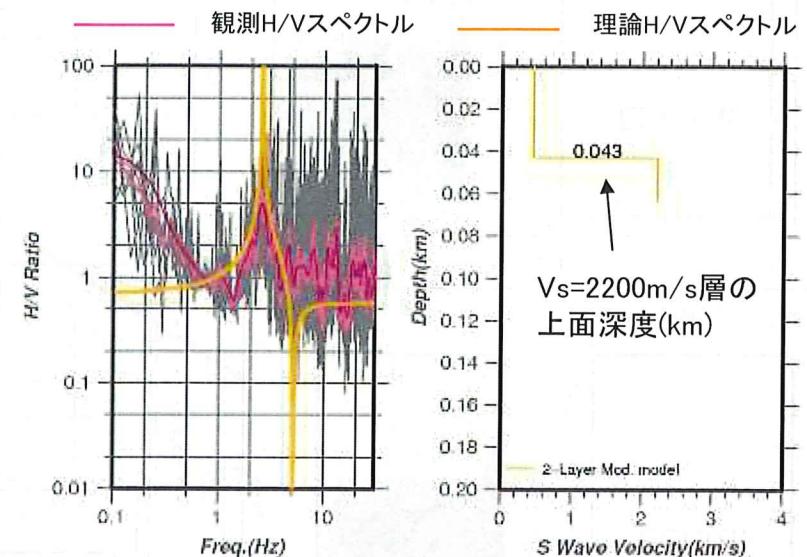
### ②観測H/Vスペクトルのピーク周波数の読み取り

微動のH/Vスペクトルから、1Hz～10HzでH/Vスペクトルが最大となる周波数を読み取る

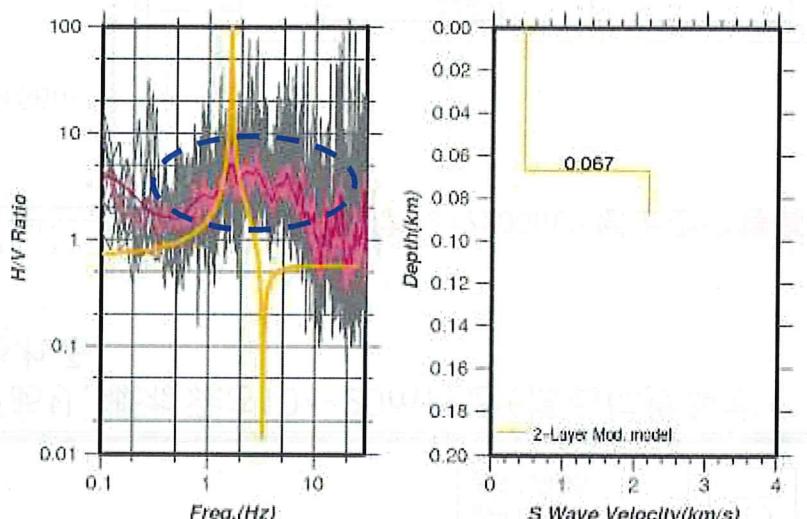
### ③H/Vスペクトルの同定

①の物性値から算定した理論H/Vのピーク周波数が、  
②で求めた観測H/Vのピーク周波数と一致するように、  
第1層の層厚を求める。

※なお、1Hz～10Hzに明瞭なピークが見られるものの  
みを対象とする。



明瞭なピークが見られる場合のH/Vスペクトル



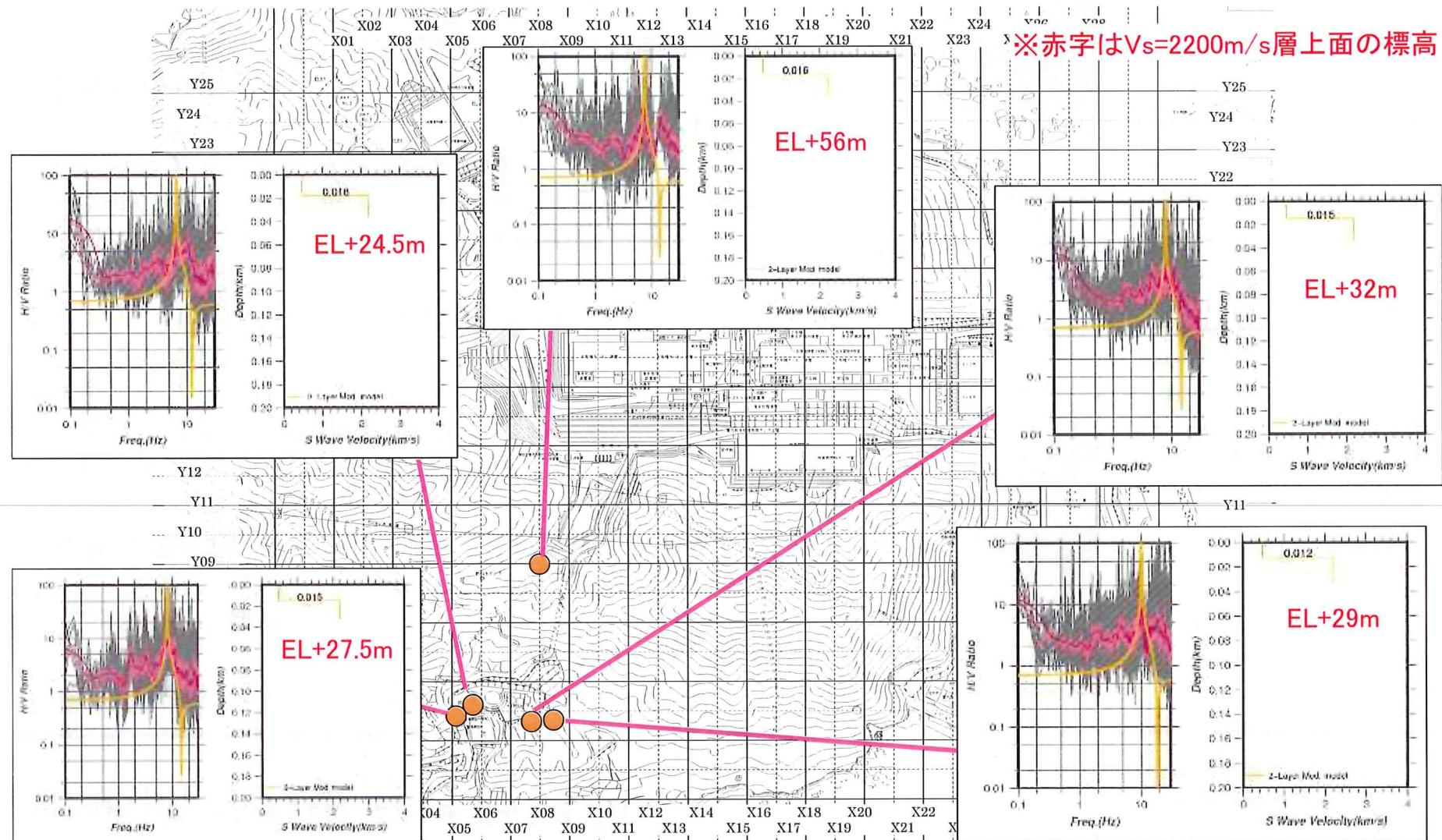
明瞭なピークが見られない場合のH/Vスペクトル

# 敷地内での単点微動観測

第41回審査会合  
資料再掲

32

■PR館では、約5~10Hz付近にH/Vスペクトルのピークがあり、概ね深さ10~20m付近(標高に換算するとEL+25~60m程度)にVs=2,200m/s層の上面が推定される。

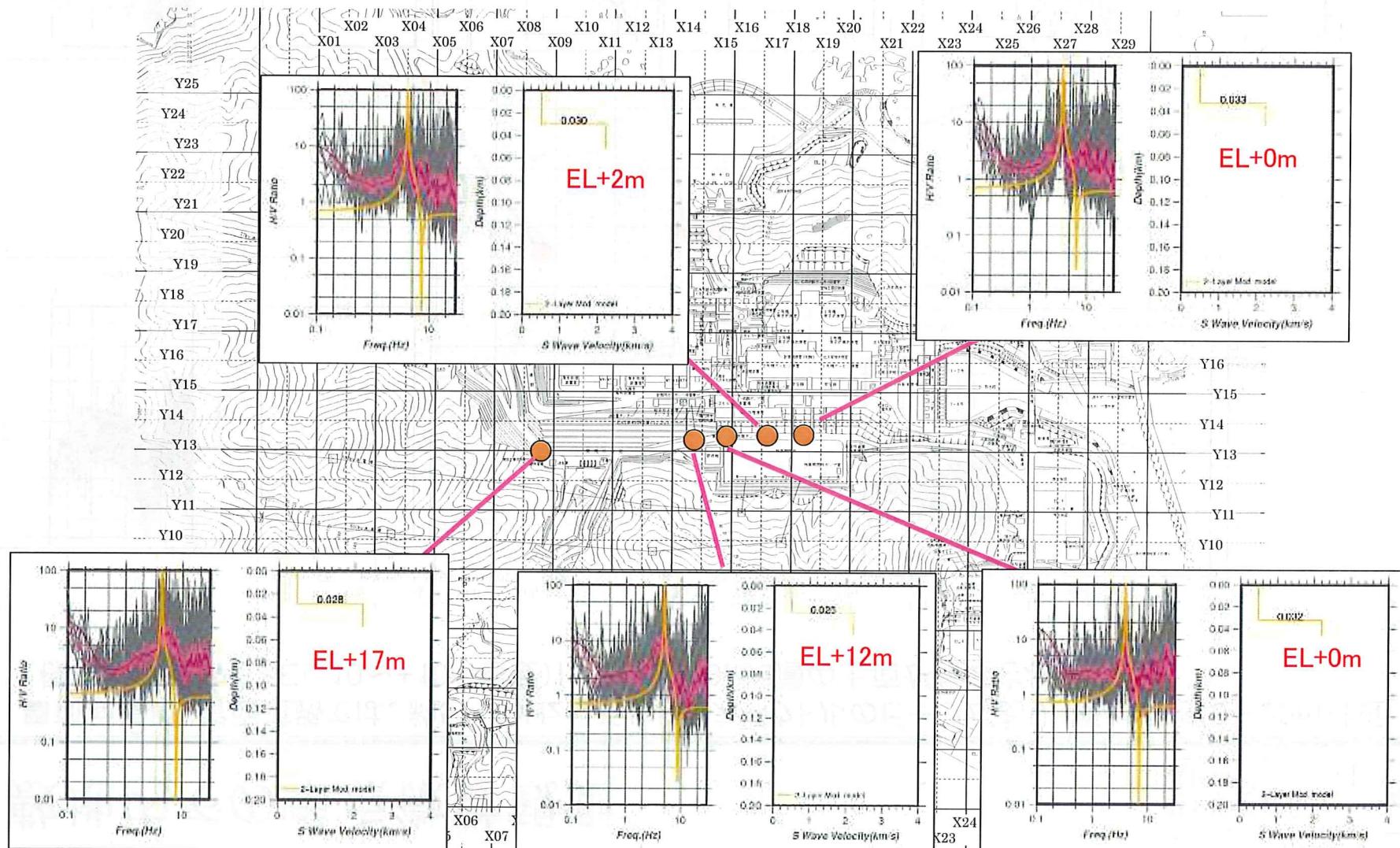


# 敷地内での単点微動観測

第41回審査会合  
資料再掲

33

■正門前道路では、約5Hz付近にH/Vスペクトルのピークがあり、概ね深さ20~30m付近(標高に換算するとEL+0~20m程度)にVs=2,200m/s層の上面が推定される。

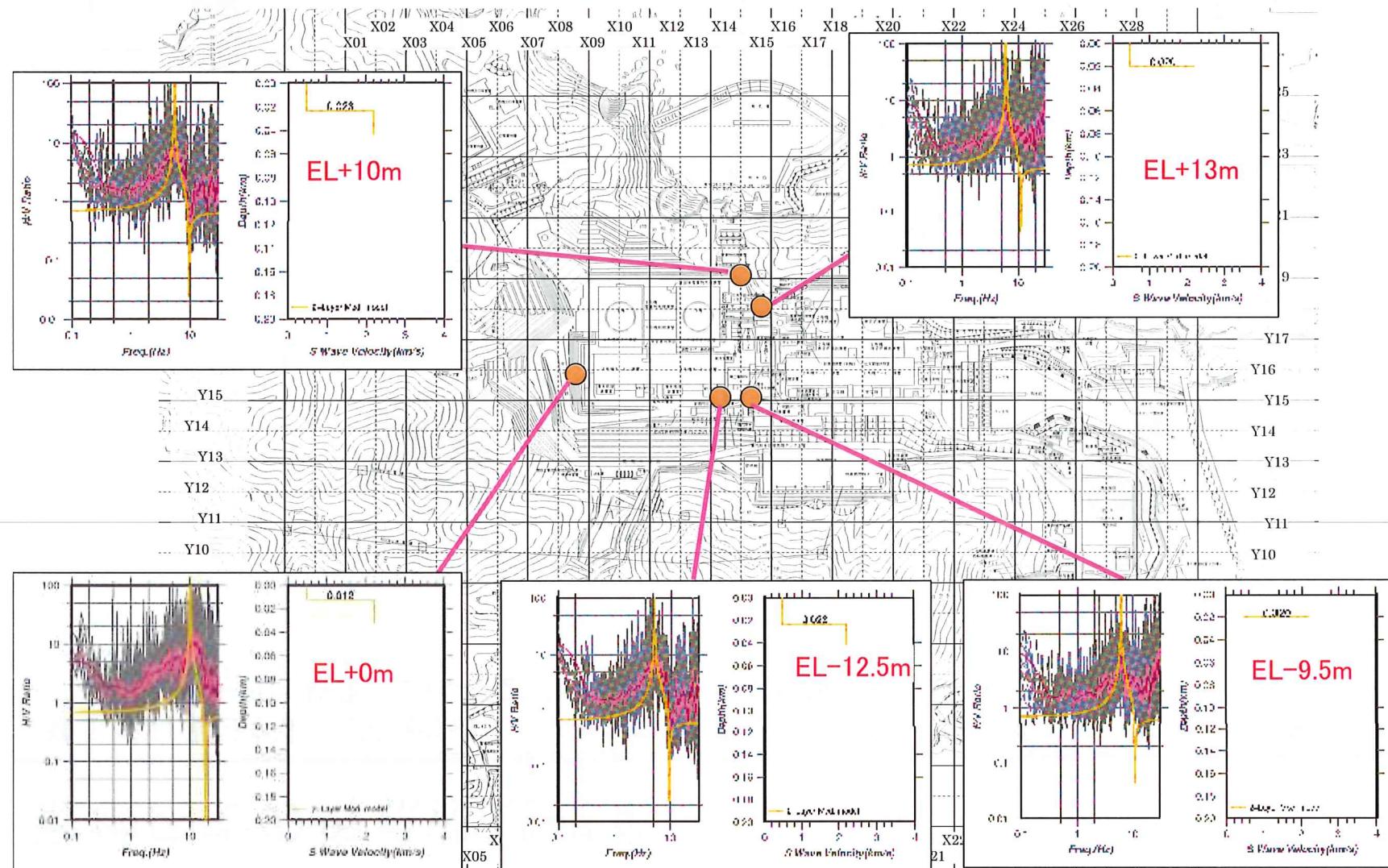


# 敷地内での単点微動観測

第41回審査会合  
資料再掲

34

- 前面道路・背面道路では、約5~10Hz付近にH/Vスペクトルのピークがあり、概ね深さ10~20m付近（標高に換算するとEL-10~+10m程度）にVs=2,200m/s層の上面が推定される。

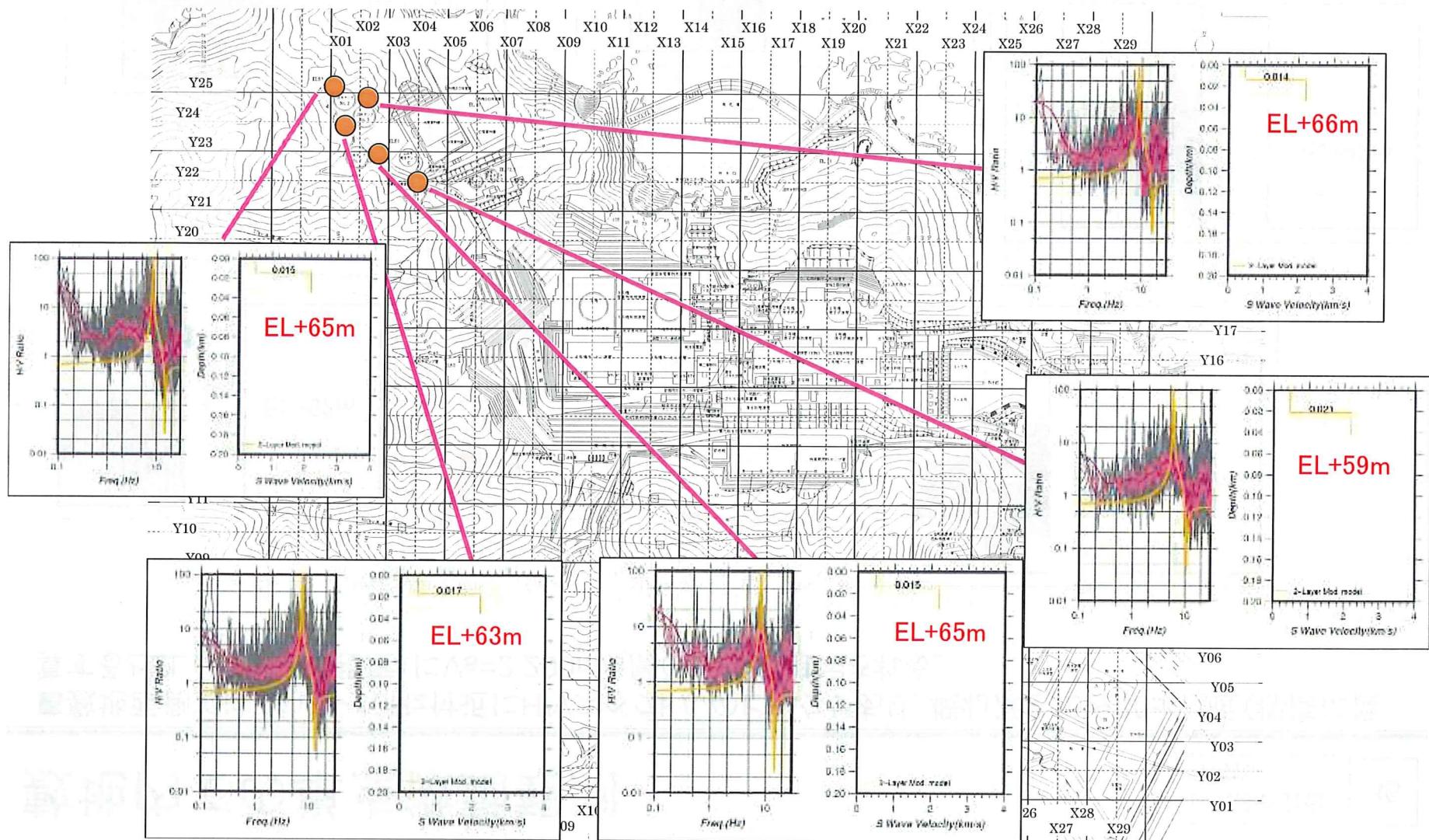


# 敷地内での単点微動観測

第41回審査会合  
資料再掲

35

■敷地西側では、約5~10Hz付近にH/Vスペクトルのピークがあり、概ね深さ10~20m付近(標高に換算するとEL+60~65m程度)にVs=2,200m/s層の上面が推定される。

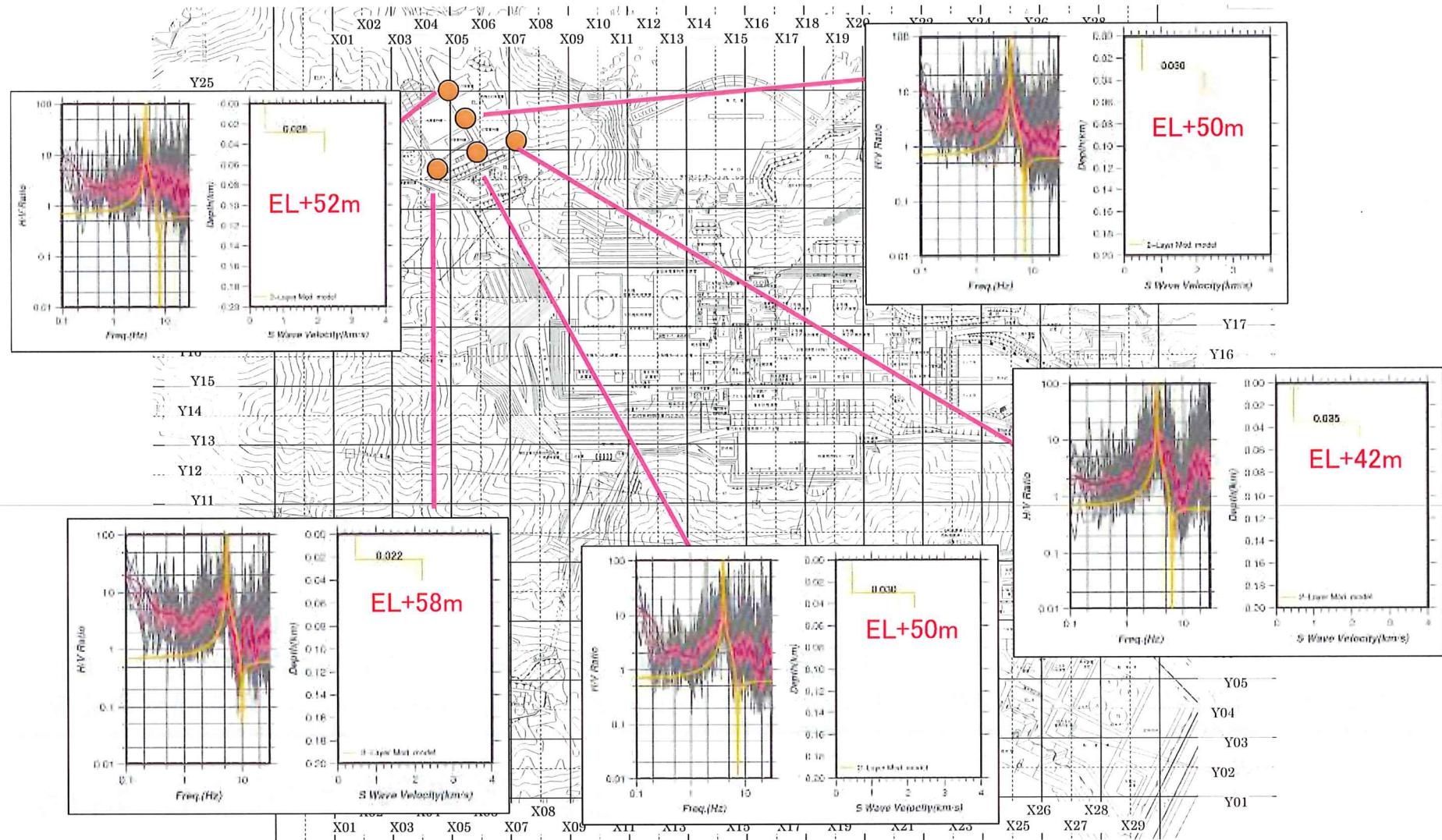


# 敷地内での単点微動観測

第41回審査会合  
資料再掲

36

■敷地西側では、約5~10Hz付近にH/Vスペクトルのピークがあり、概ね深さ20~30m付近(標高に換算するとEL+45~60m程度)にVs=2,200m/s層の上面が推定される。

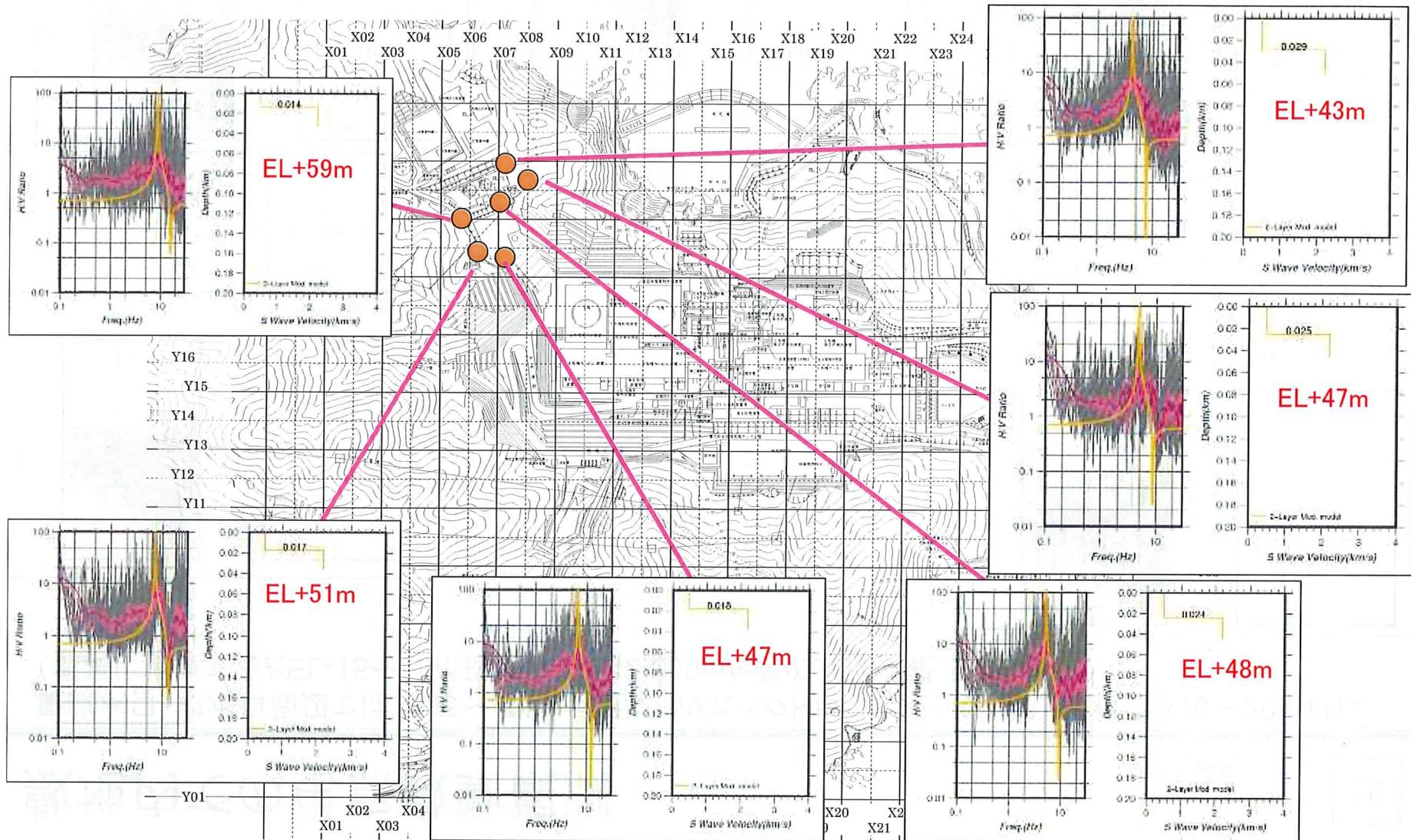


# 敷地内での単点微動観測

第41回審査会合  
資料再掲

37

■敷地西側では、約5~10Hz付近にH/Vスペクトルのピークがあり、概ね深さ15~30m付近(標高に換算するとEL+45~60m程度)にVs=2,200m/s層の上面が推定される。

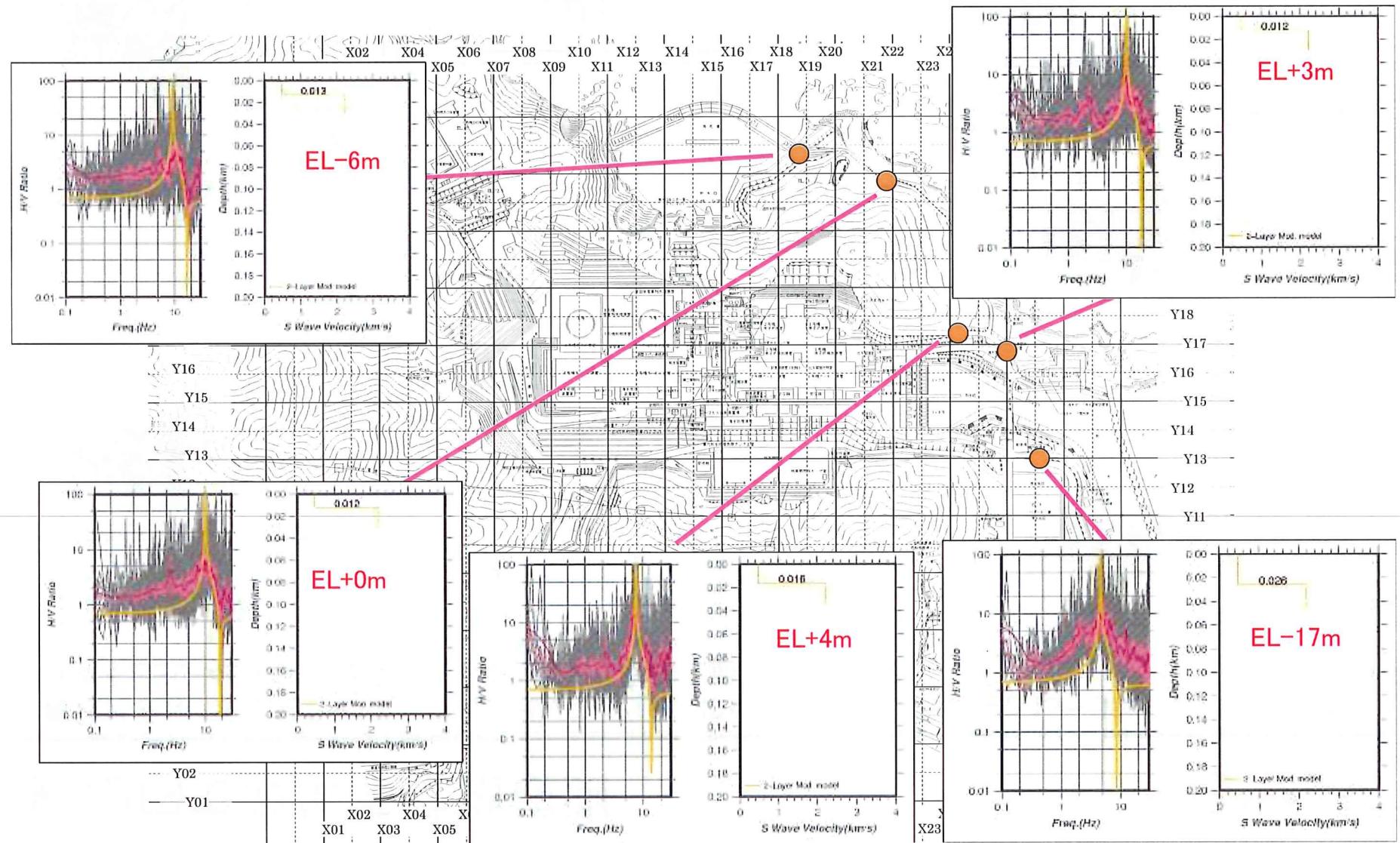


# 敷地内での単点微動観測

第41回審査会合  
資料再掲

38

■放水口・取水口周辺では、約5~10Hz付近にH/Vスペクトルのピークがあり、概ね深さ10~20m付近（標高に換算するとEL-15~+5m程度）にVs=2,200m/s層の上面が推定される。

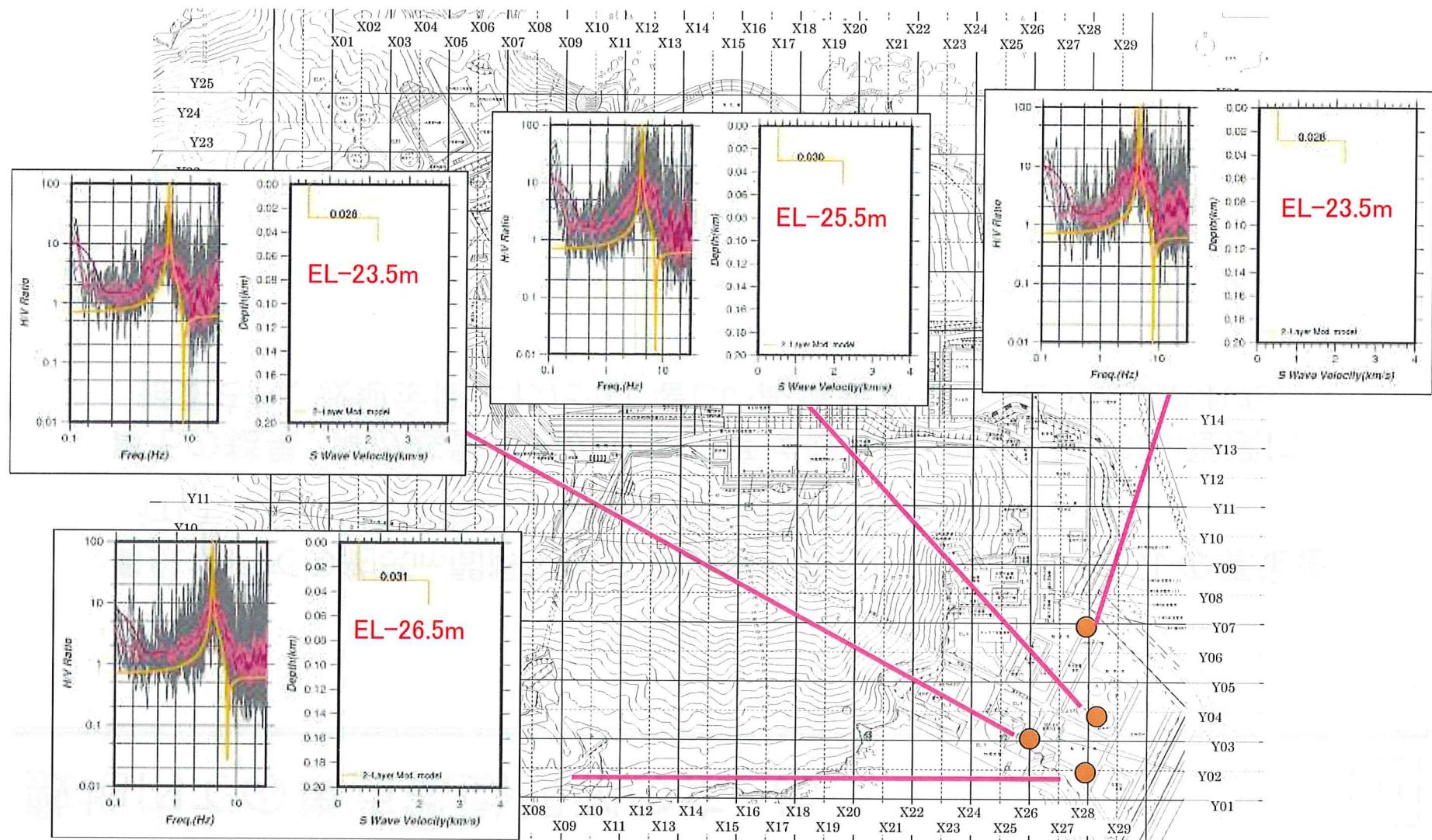


# 敷地内での単点微動観測

第41回審査会合  
資料再掲

39

■敷地南東側では、約5Hz付近にH/Vスペクトルのピークがあり、概ね深さ30m付近(標高に換算するとEL-25m程度)にVs=2,200m/s層の上面が推定される。



## 敷地内での単点微動観測のまとめ

40

- 敷地内での約50m間隔で単点微動観測を行い、H/Vスペクトルの算定を行い、さらに2層地盤を仮定した解放基盤深度の推定を行った。
- その結果、解放基盤相当の上面深度は概ねEL-25m～EL+65m程度に推定され、敷地全体にわたって著しい高低差がないことが確認された。