

# 伊方発電所の地震動評価のための 地下構造評価について

1. 地震観測記録を用いた評価について
2. 深部ボーリング等による評価について
3. まとめ

平成25年7月31日  
四国電力株式会社

---

# 1. 地震観測記録を用いた評価について

## 1.1 地震波の到来方向による分析

## 1.2 浅部地盤増幅特性の分析

### 1.2.1 観測記録

### 1.2.2 伝達関数



# 地震波の到来方向による分析

## 検討内容

伊方発電所で観測した地震記録の分析を行い、地震の到来方向や地盤構造によって特異な増幅が見られるか否かの検討を行う。

### ○増幅特性の検討(規模の大きい地震)

伊方発電所で観測した比較的規模の大きい、Noda et al.(2002)の適用が可能な内陸地殻内地震を用いて、『観測記録の応答スペクトル』と『Noda et al.(2002)により推定した応答スペクトル』の比をとって、増幅特性の検討を行う。

### ○増幅特性の検討(規模の小さい地震)

地震規模の小さい内陸地殻内地震を対象として、地震波の到来方向による特異性について検討を行う。



# 増幅特性の検討(規模の大きい地震)

## ○増幅特性の検討(規模の大きい地震)

伊方発電所で観測した比較的規模の大きい, Noda et al.(2002)との比較が可能な内陸地殻内地震を用いて、『観測記録の応答スペクトル』と『Noda et al.(2002)により推定した応答スペクトル』の比をとって, 増幅特性の検討を行う。

増幅特性の検討に用いた地震

| No. | 年月日          | 地震名        | M <sub>JMA</sub> | 深さ<br>(km) | 震央距離<br>(km) | 最大加速度<br>(cm/s <sup>2</sup> ) | 観測<br>地点 |
|-----|--------------|------------|------------------|------------|--------------|-------------------------------|----------|
| 1   | 1995. 01. 17 | 兵庫県南部地震    | 7. 3             | 16         | 280          | 2. 1                          | ①        |
| 2   | 1997. 03. 26 | 鹿児島県北西部の地震 | 6. 6             | 12         | 249          | 0. 9                          | ①        |
| 3   | 1997. 06. 25 | 山口県北部の地震   | 6. 6             | 8          | 121          | 2. 7                          | ①        |
| 4   | 2000. 10. 06 | 鳥取県西部地震    | 7. 3             | 9          | 220          | 3. 4                          | ②        |
| 5   | 2005. 03. 20 | 福岡県西方沖地震   | 7. 0             | 9          | 200          | 1. 9                          | ②        |

観測地点①: 3号原子炉補助建屋基礎上端EL+3. 3m

観測地点②: 微小地震計GL-20m

最大加速度はNS・EWの大きい方

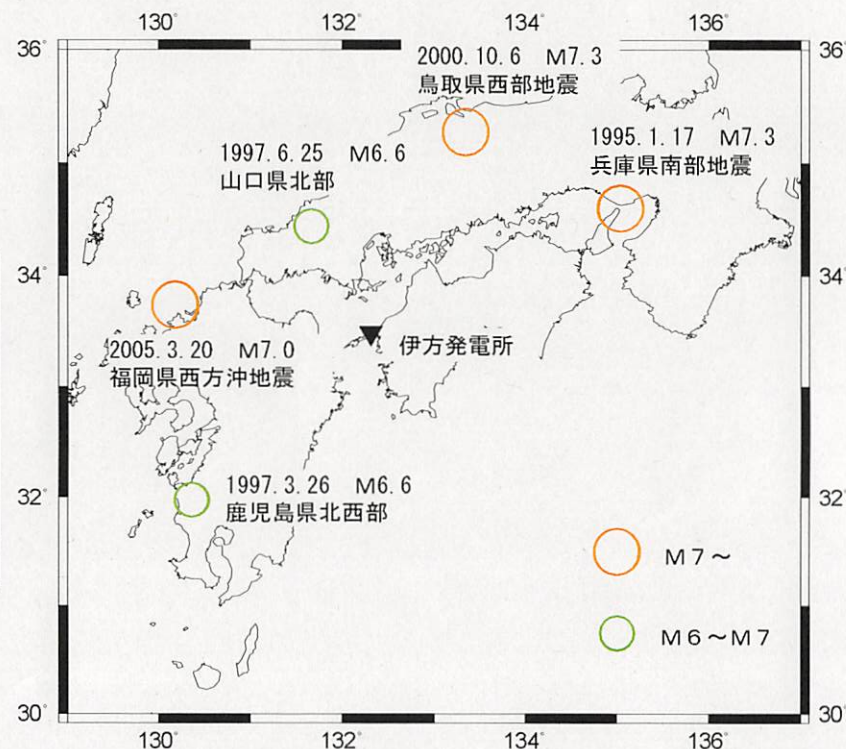
### 【Noda et al.(2002)が回帰に使用したデータセット】

→ M=5.5~7.0, 等価震源距離 $X_{eq}=28\sim202$ km

### 【Noda et al.(2002)が適用性の確認に用いたデータセット】

→ M=5.4~8.1, 等価震源距離 $X_{eq}=14\sim218$ km

これらを勘案すると, No.1,2,4の地震は震央距離が遠いため, 厳密には Noda et al.(2002)の適用範囲外。



検討対象地震



# 増幅特性の検討(規模の大きい地震)

## 評価結果(増幅特性の検討)

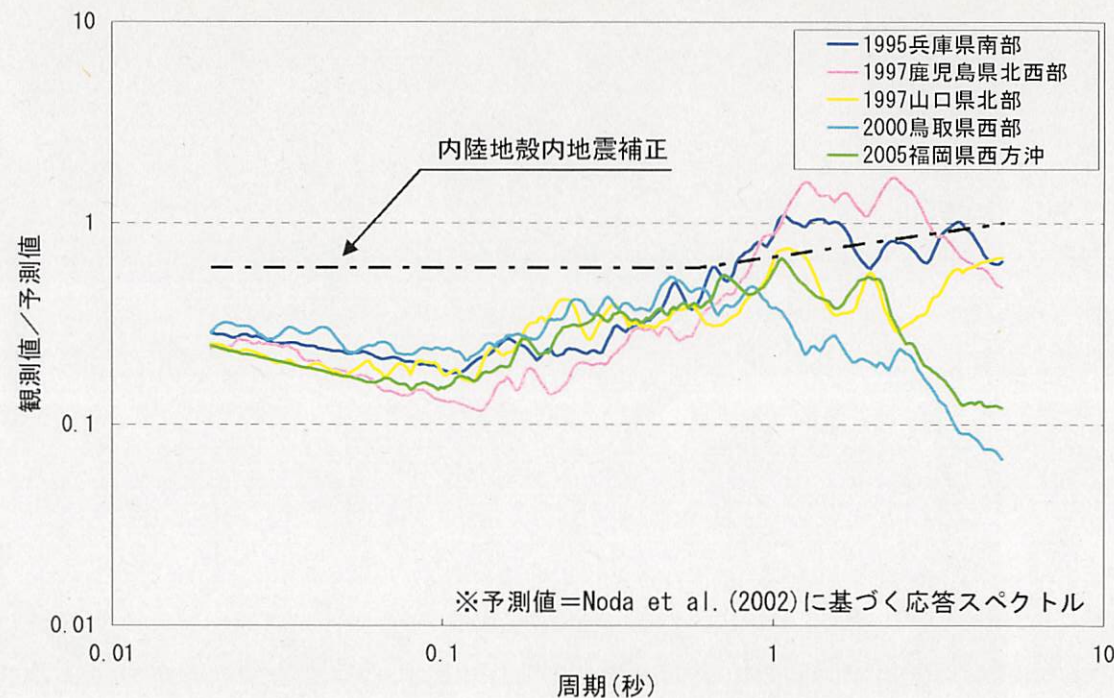
どの地震においても、短周期側では観測値は予測値よりも小さい傾向を示している。観測値が予測値よりも小さい理由としては、

○検討に用いた地震が遠地の地震ばかりであり、観測記録の最大振幅が小さいこと

○サイトの岩盤がNoda et al.(2002)の想定する地盤よりも硬いこと

が挙げられる。

小さい記録ばかりのため断定的なこととは言えないが、特異な増幅特性を示す地震はない。

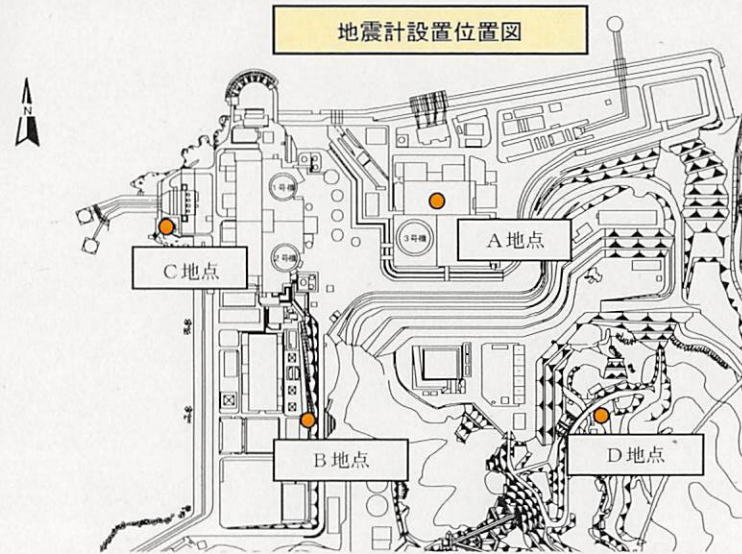


観測記録とNoda et al. (2002)による予測値の比較 (NS・EW平均)



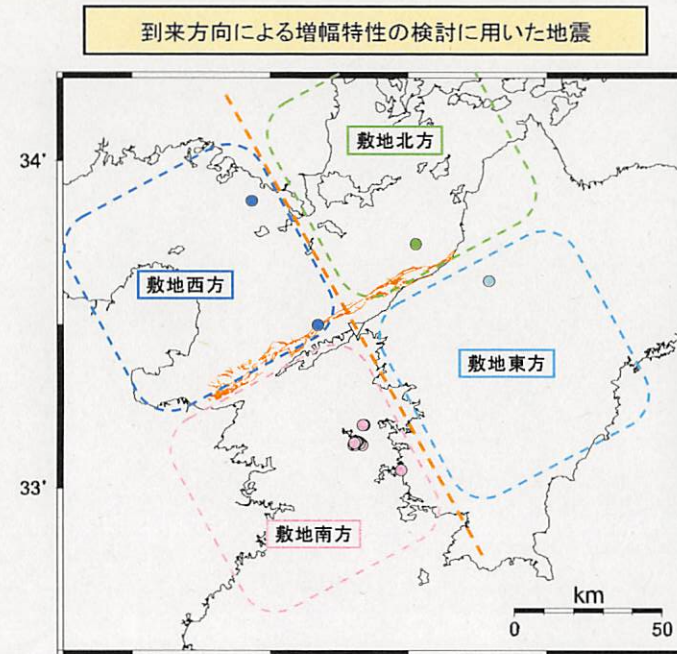
# 増幅特性の検討(規模の小さい地震)

微小地震計で観測した地震記録を用いて、地震波の到来方向によって特異性が見られないかの検討を行なった。



| 観測点 | 観測期間      |
|-----|-----------|
| A地点 | 1975～1982 |
| B地点 | 1982～1994 |
| C地点 | 1999～     |
| D地点 | 1998～     |

A～C：強震観測  
D：微小地震観測



| No. | 年    | 月  | 日  | 時  | 分  | 震央地名   | M   | 震央距離(km) | 震さ(km) | 最大加速度( $\text{cm/s}^2$ ) |
|-----|------|----|----|----|----|--------|-----|----------|--------|--------------------------|
| 1   | 1998 | 7  | 27 | 17 | 53 | 豊後水道   | 4.0 | 39.30    | 13.8   | 0.52                     |
| 2   | 1998 | 9  | 6  | 6  | 6  | 豊後水道   | 3.2 | 39.70    | 13.3   | 0.14                     |
| 3   | 1999 | 3  | 9  | 2  | 30 | 豊後水道   | 2.9 | 39.00    | 14.1   | 0.16                     |
| 4   | 1999 | 9  | 9  | 1  | 59 | 豊後水道   | 2.2 | 38.4     | 11.2   | 0.03                     |
| 5   | 2000 | 11 | 4  | 23 | 13 | 豊後水道   | 3.1 | 39.7     | 11.0   | 0.05                     |
| 6   | 2000 | 12 | 31 | 23 | 37 | 愛媛県南西部 | 3.5 | 47.50    | 11.4   | 0.28                     |
| 7   | 2001 | 3  | 14 | 20 | 46 | 豊後水道   | 3.2 | 39.6     | 11.4   | 0.11                     |
| 8   | 2001 | 3  | 21 | 1  | 7  | 伊予灘    | 2.2 | 12.90    | 3.3    | 0.44                     |
| 9   | 2001 | 4  | 29 | 10 | 13 | 周防灘    | 3.2 | 55.50    | 14.4   | 0.13                     |
| 10  | 2001 | 8  | 14 | 5  | 45 | 豊後水道   | 2.5 | 33.00    | 12.1   | 0.10                     |
| 11  | 2001 | 8  | 14 | 5  | 54 | 豊後水道   | 2.8 | 33.00    | 14.2   | 0.16                     |
| 12  | 2002 | 4  | 4  | 17 | 59 | 愛媛県南西部 | 2.8 | 50.80    | 15.0   | 0.19                     |
| 13  | 2002 | 12 | 6  | 22 | 31 | 豊後水道   | 2.9 | 38.70    | 10.2   | 0.08                     |
| 14  | 2003 | 3  | 26 | 4  | 8  | 豊後水道   | 4.5 | 38.90    | 10.0   | 2.28                     |
| 15  | 2003 | 4  | 30 | 16 | 37 | 伊予灘    | 3.0 | 34.8     | 7.1    | 0.13                     |

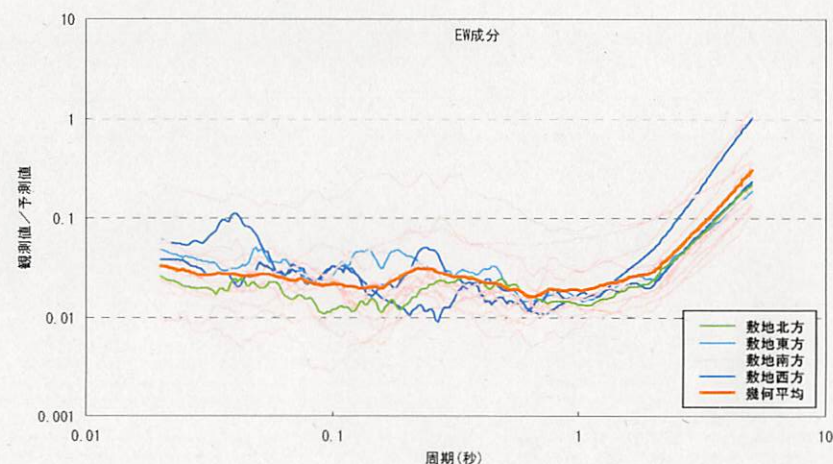


# 増幅特性の検討(規模の小さい地震)

到来方向による増幅の検討(NS成分)



到来方向による増幅の検討(EW成分)



観測記録の応答スペクトルと耐震スペクトルにより推定した応答スペクトルの比をとって増幅特性の検討を行なった。

観測された地震の発生地域を、敷地の北方・東方・南方・西方の4方向に区分けして到来方向による影響を検討したところ、到来方向によって増幅特性が異なるような傾向は確認されなかった。



---

# 1. 地震観測記録を用いた評価について

## 1.1 地震波の到来方向による分析

## 1.2 浅部地盤増幅特性の分析

### 1.2.1 観測記録

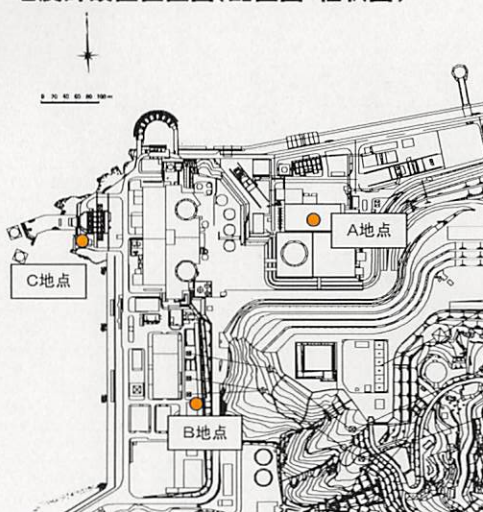
### 1.2.2 伝達関数



# 伊方発電所における地震観測と主な観測記録

伊方発電所における地盤系地震計の設置位置、観測期間および主な観測記録を示す。

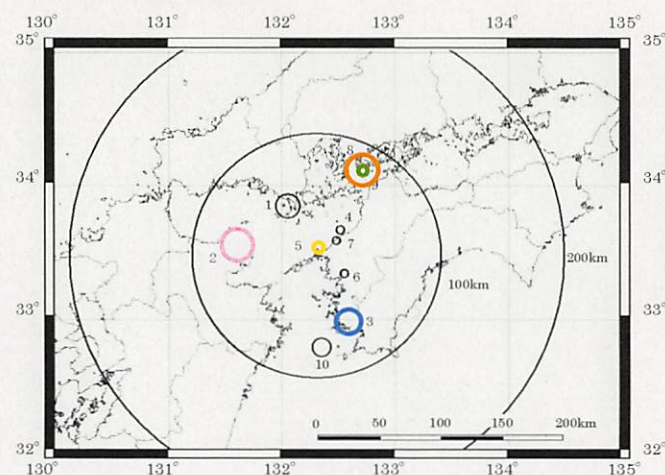
地震計設置位置図(配置図・柱状図)



| 観測点 | 観測期間      |
|-----|-----------|
| A地点 | 1975～1982 |
| B地点 | 1982～1994 |
| C地点 | 1999～     |

| 標高<br>(m) | A地点    |     | B地点     |                 | C地点     |                 |
|-----------|--------|-----|---------|-----------------|---------|-----------------|
|           | 地震計    | 地層  | 地震計     | 地層              | 地震計     | 地層              |
| +51       | GL     | 第四系 | GL      | 三波川<br>変成岩<br>類 | GL      | 三波川<br>変成岩<br>類 |
| +10       | GL±0m  |     |         |                 |         |                 |
| +5        |        |     |         |                 |         |                 |
| -9        | GL-60m |     |         |                 |         |                 |
| -70       |        |     | GL-80m  |                 | GL-80m  |                 |
| -150      |        |     | GL-160m |                 | GL-160m |                 |
| -200      |        |     |         |                 |         |                 |

敷地における観測記録



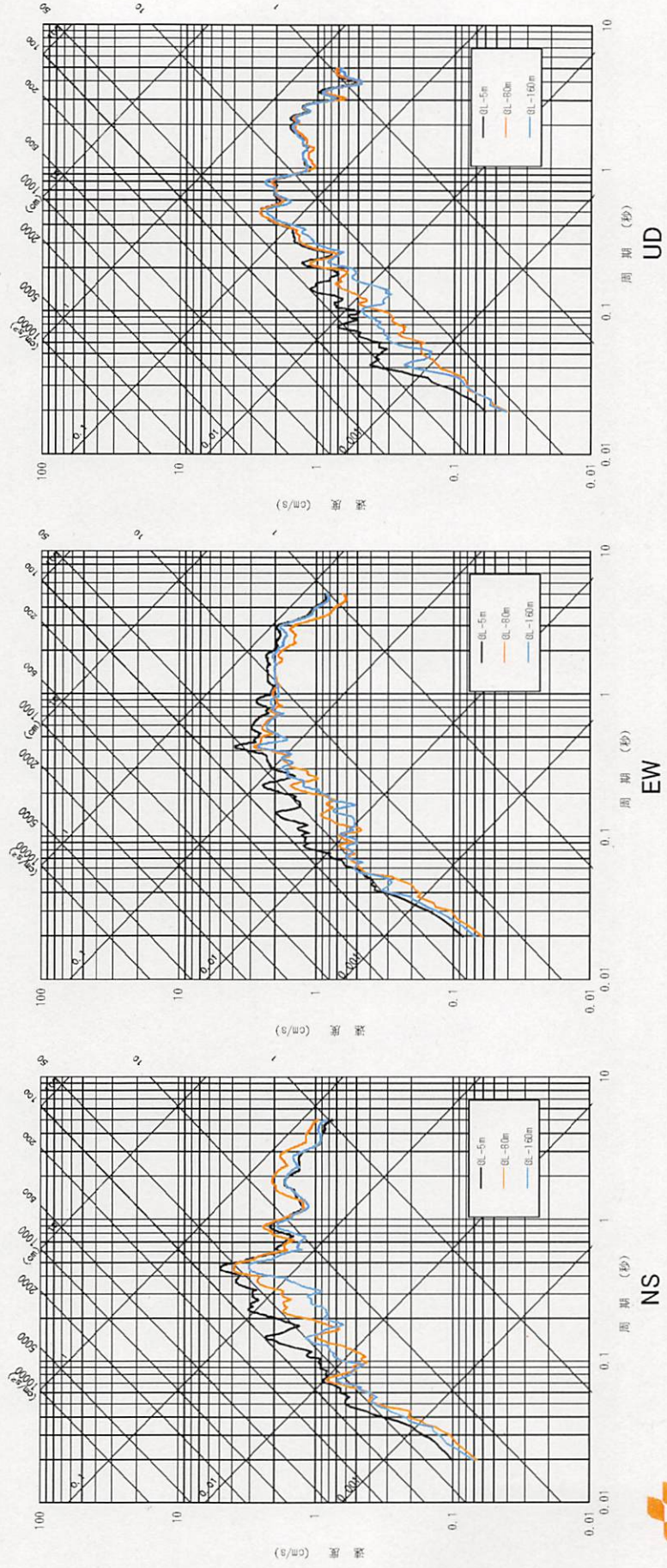
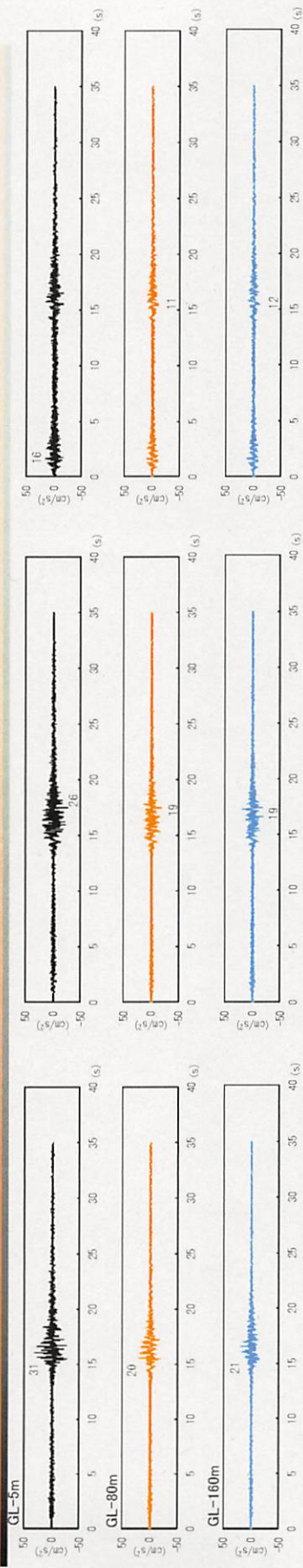
| 凡 例 |               |
|-----|---------------|
| ○   | 5.0 ≤ M < 5.5 |
| ○   | 5.5 ≤ M < 6.0 |
| ○   | 6.0 ≤ M < 6.5 |
| ○   | 6.5 ≤ M < 7.0 |

| 番号 | 震央位置<br>または地震名 | 発生日時        | M   | 深さ<br>(km) | 震央<br>距離<br>(km) |
|----|----------------|-------------|-----|------------|------------------|
| 1  | 周防灘            | 1979年 7月13日 | 6.0 | 70         | 47               |
| 2  | 大分県北部          | 1983年 8月26日 | 6.6 | 116        | 66               |
| 3  | 愛媛県南予          | 1985年 5月13日 | 6.0 | 39         | 61               |
| 4  | 伊予灘            | 1988年 7月29日 | 5.1 | 53         | 28               |
| 5  | 伊予灘            | 1991年 1月 4日 | 5.3 | 58         | 6                |
| 6  | 愛媛県南予          | 1993年 8月14日 | 5.3 | 47         | 27               |
| 7  | 伊予灘            | 1993年 8月31日 | 5.1 | 62         | 19               |
| 8  | 2001年芸子地震      | 2001年 3月24日 | 6.7 | 46         | 80               |
| 9  | 安芸灘            | 2001年 3月26日 | 5.2 | 46         | 78               |
| 10 | 豊後水道           | 2001年 4月25日 | 5.7 | 39         | 77               |

○経験的グリーン関数法による地震動  
評価では、  
No.9地震 → 内陸地殻内地震およ  
び海洋プレート内地震  
の要素地震に採用

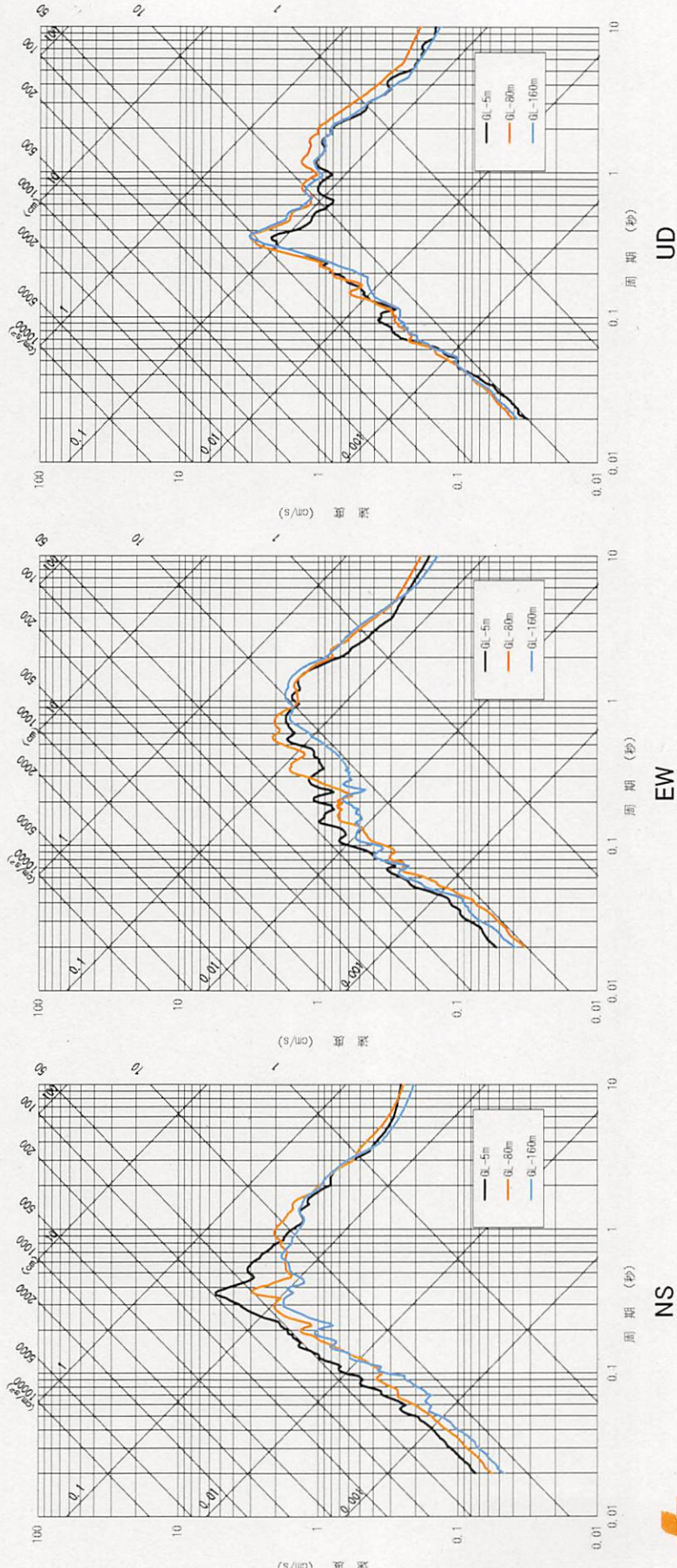
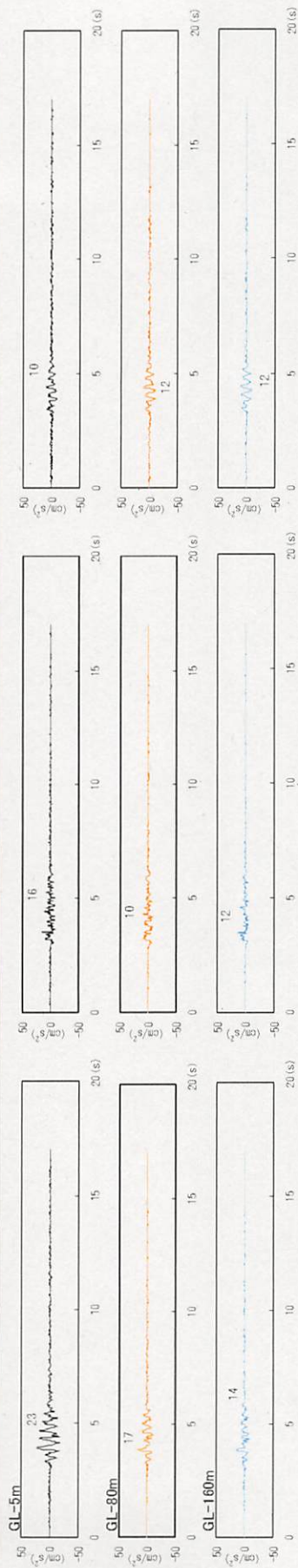


# No.2 1983.8.26 大分県北部の地震 M6.6





# No.3 1985.5.13 愛媛県南予の地震 M6.0



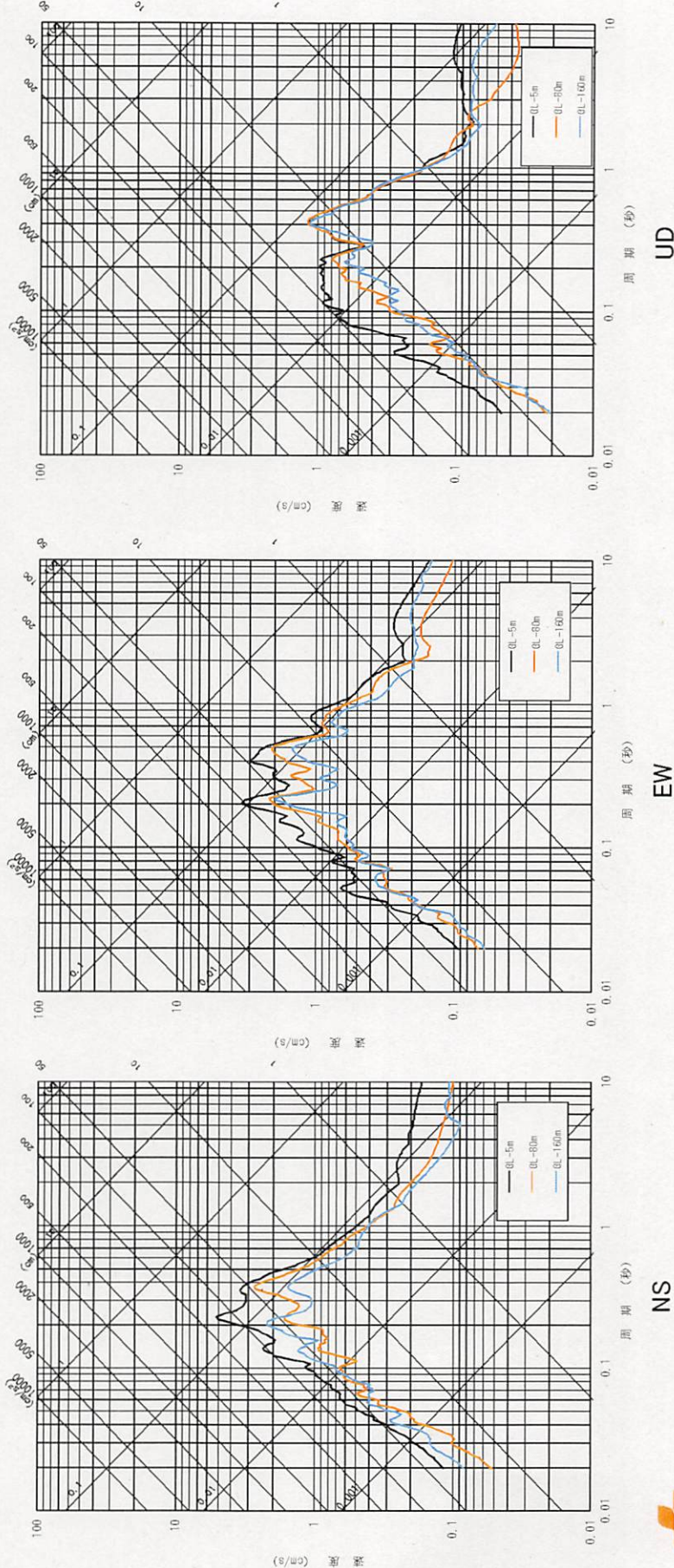
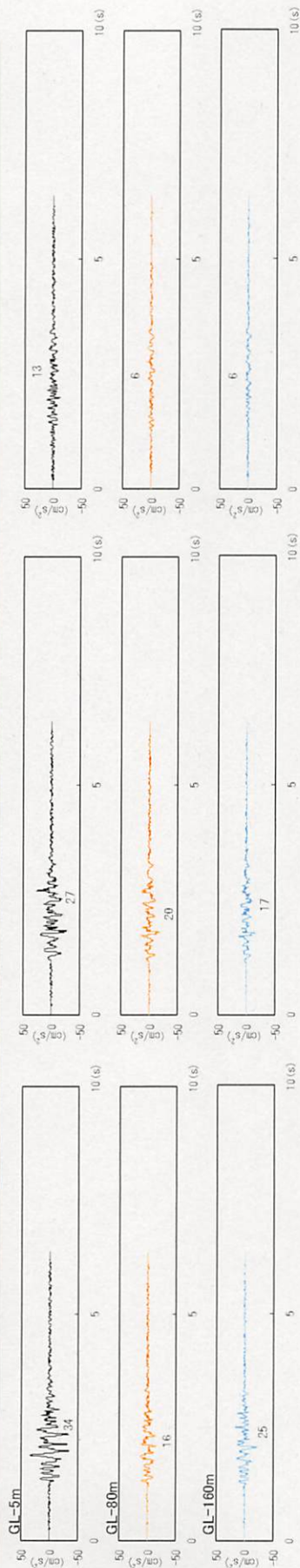
NS

EW

UD

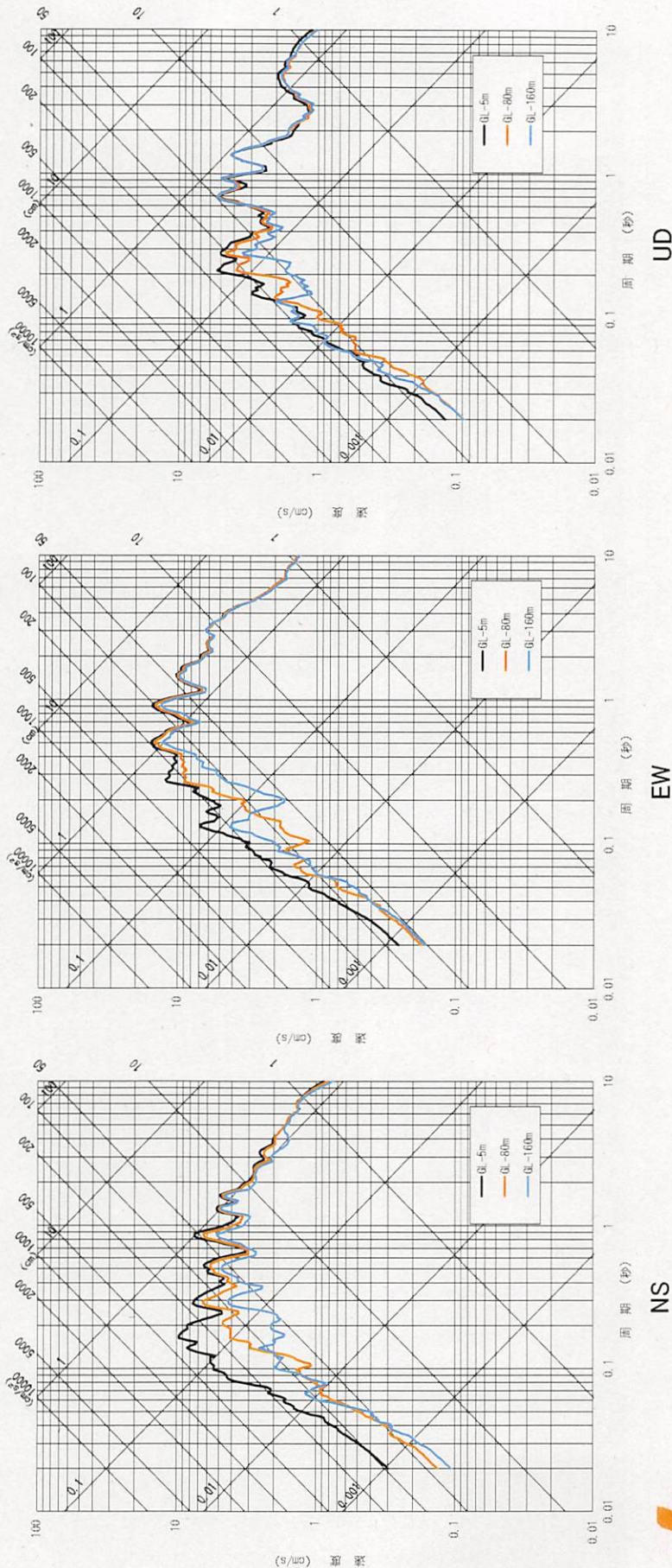
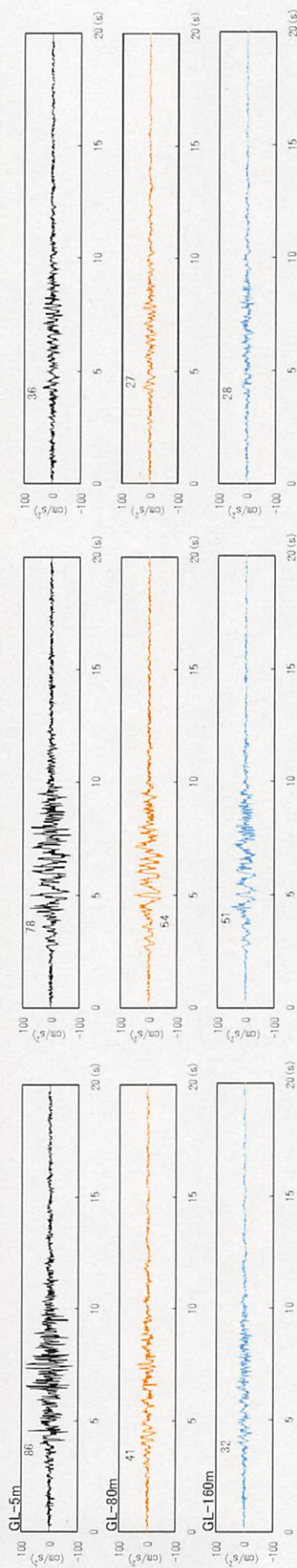


# No.5 1991.1.4 伊予灘 M5.3



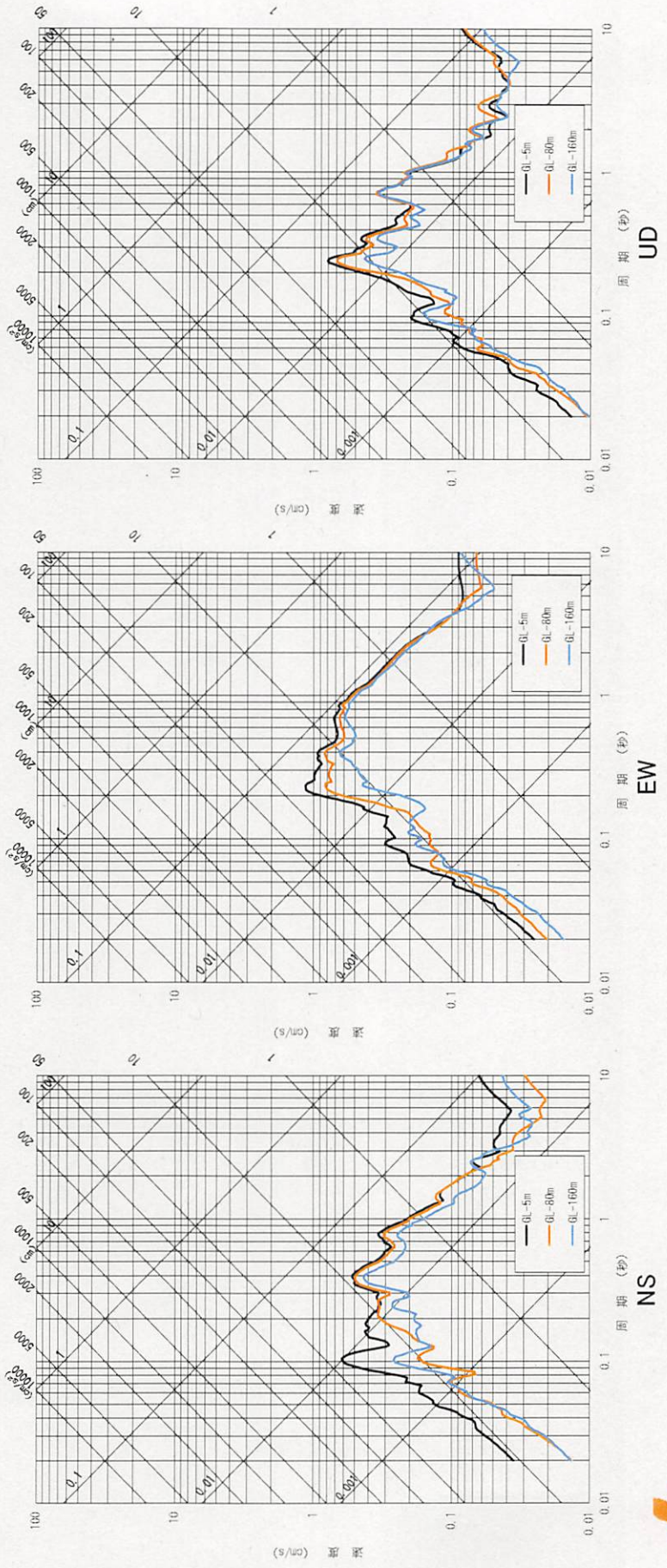
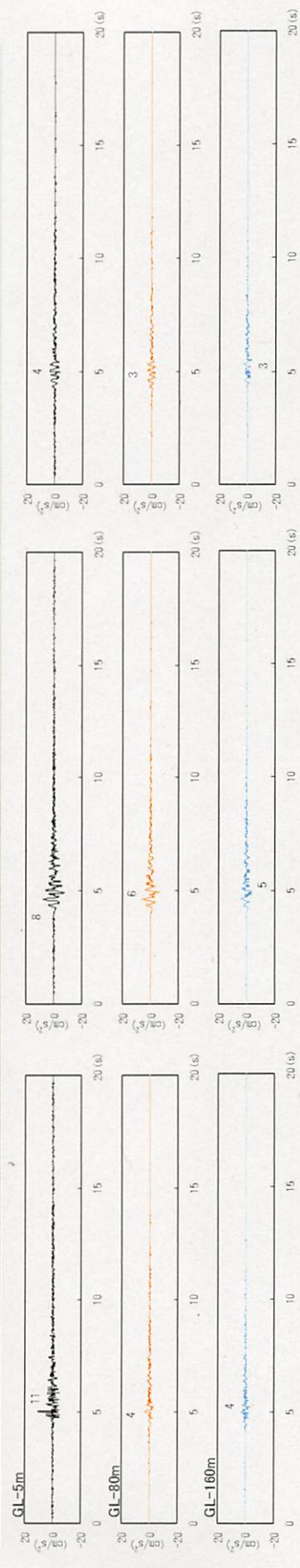


# No.8 2001.3.24 2001年芸予地震 M6.7





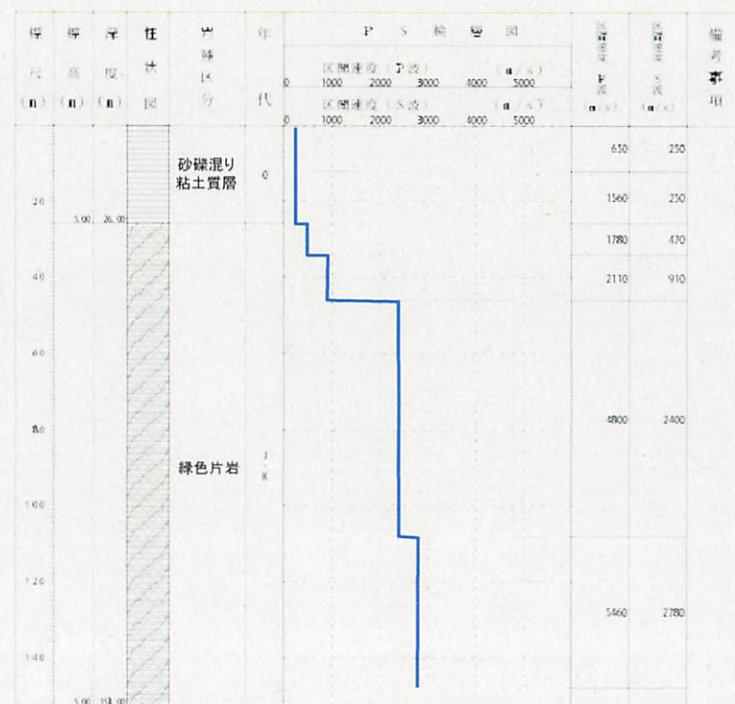
# No.9 2001.3.26 安芸灘 M5.2





# 2001.3.26 安芸灘 M5.2 近傍のKiK-net観測記録との比較

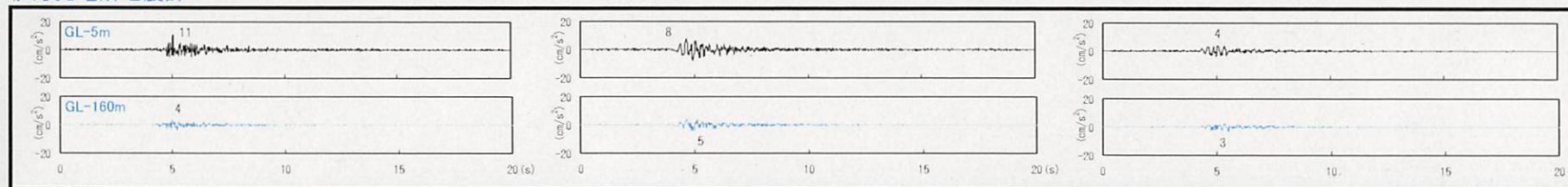
敷地南方約2kmに位置するKiK-net伊方観測点の地中記録と比較する



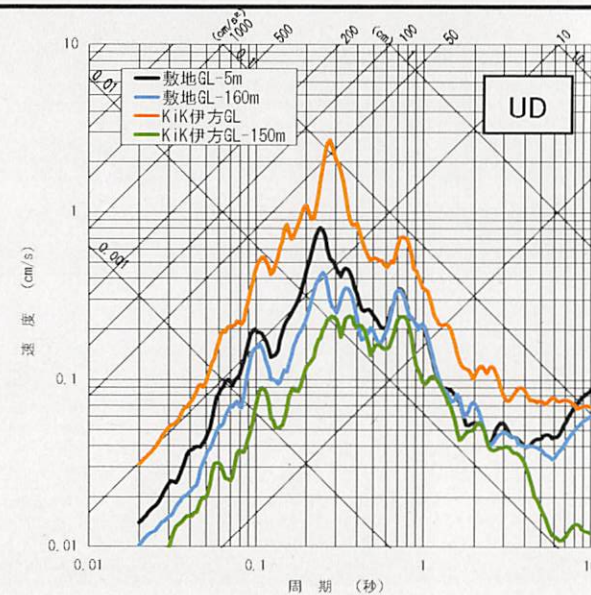
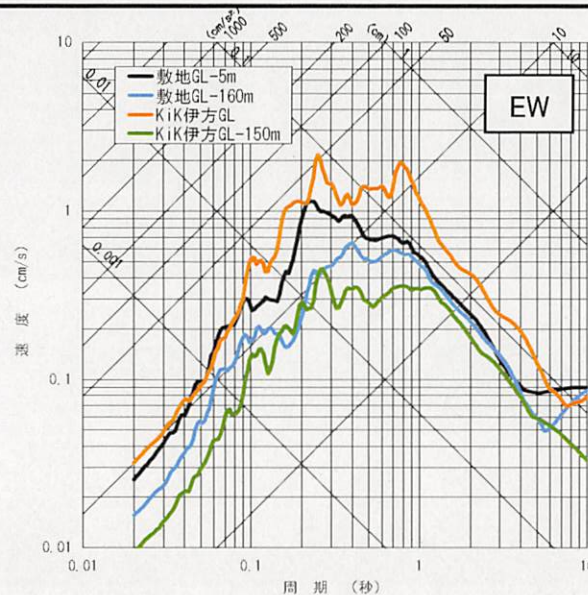
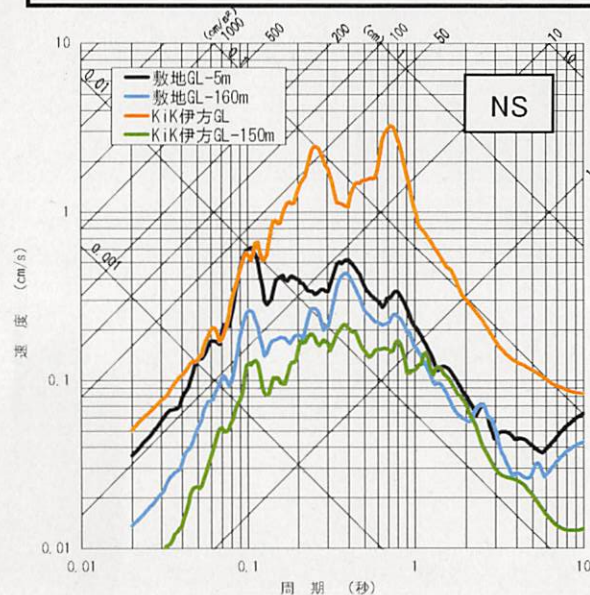
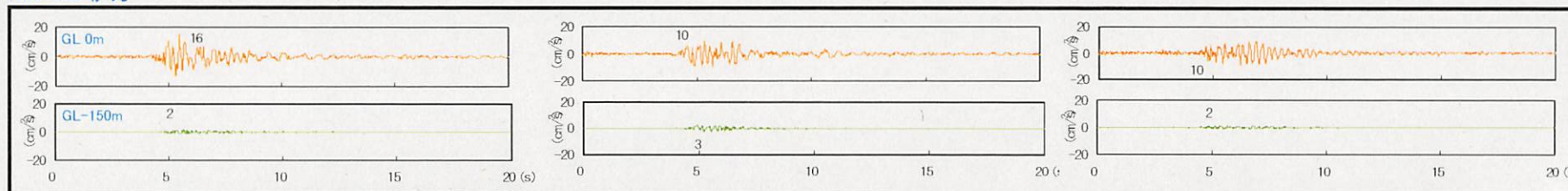


# 2001.3.26 安芸灘 M5.2 近傍のKiK-net観測記録との比較

伊方発電所地震計



KiK-net 伊方



敷地GL-5m記録のNS成分にみられる周期0.1秒付近のピークは地中の記録(敷地およびKiK-net伊方)にもみられる。さらに、EWやUD成分の地中記録にも確認できる。ゆえにNSのピークは、極浅部の地盤(GL-160m以浅)による増幅以外の原因の可能性が高いと考えられる。



---

# 1. 地震観測記録を用いた評価について

## 1.1 地震波の到来方向による分析

## 1.2 浅部地盤増幅特性の分析

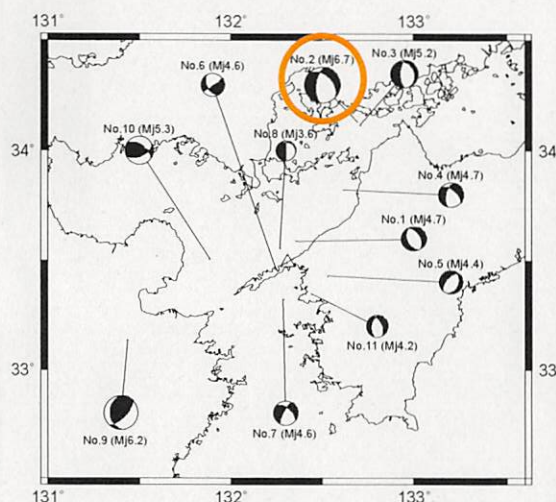
### 1.2.1 観測記録

### 1.2.2 伝達関数

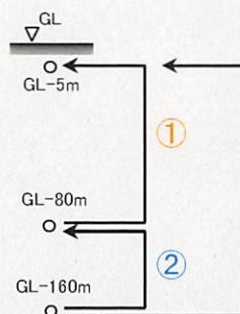


# 2001年芸予地震における伝達関数の分析

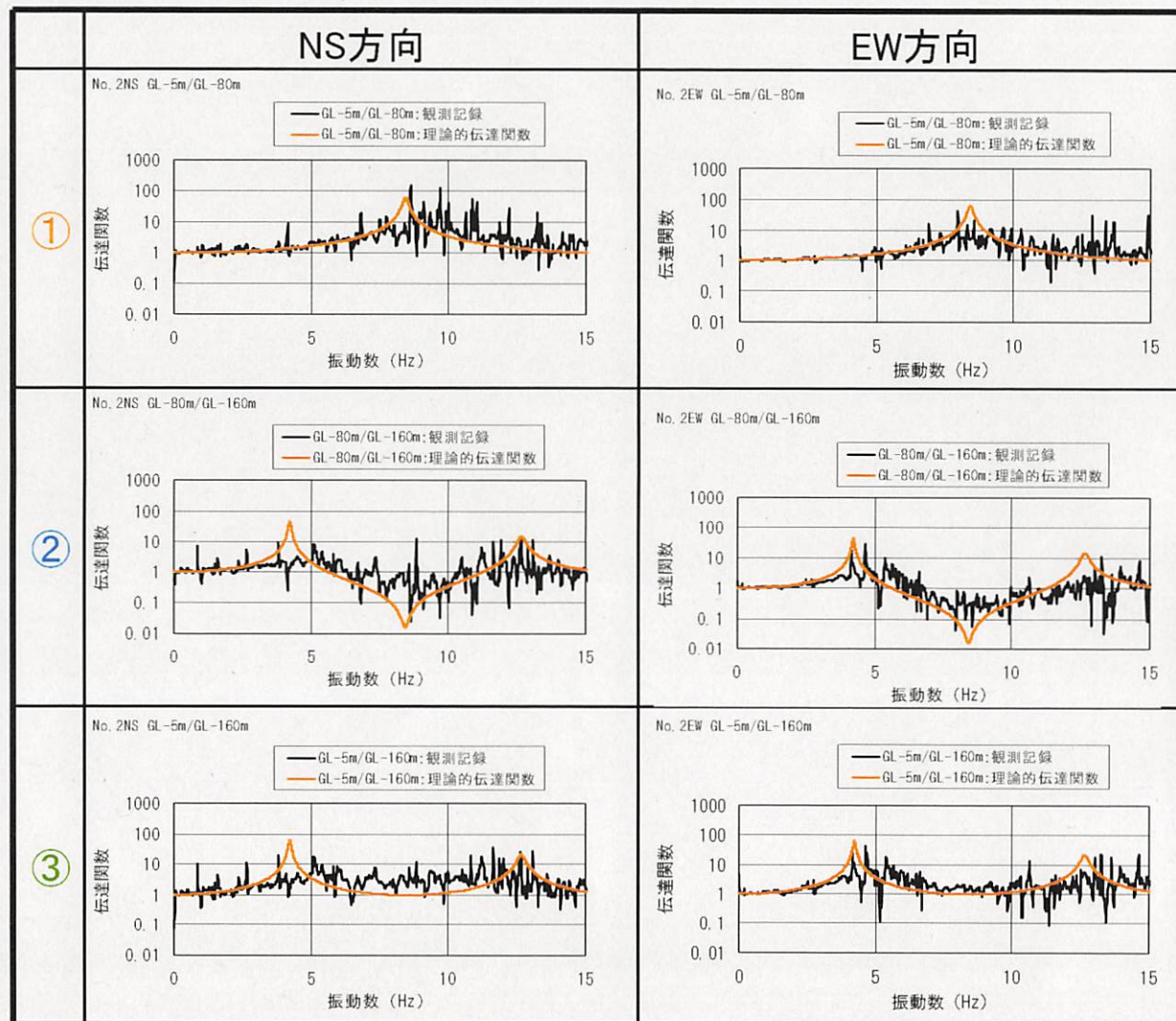
2001.3.24 Mj6.7 安芸灘(2001年芸予地震)



地震位置図



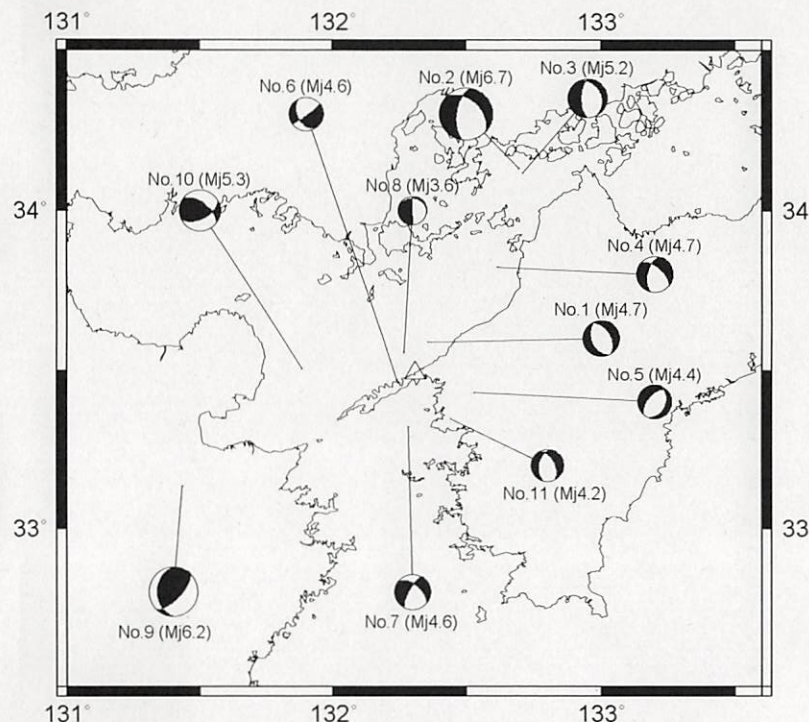
伝達関数検討位置





# 最大加速度10Gal以上の観測記録における伝達関数

地盤系地震計(C地点)における観測記録のうち、GL -5mの位置における最大加速度が10Gal以上の11地震の記録を平均して伝達関数の検討を行う。



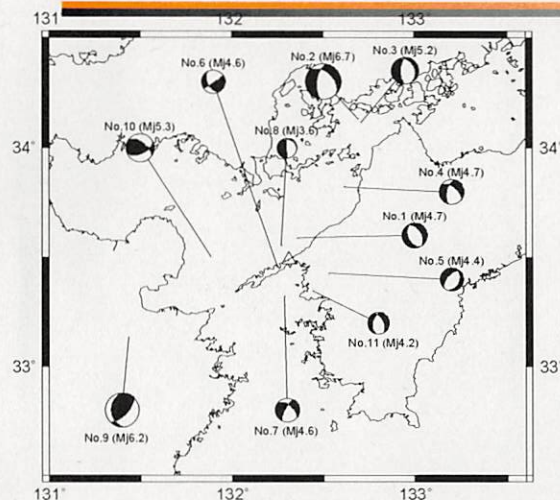
地震の震央位置およびメカニズム解

観測地震の諸元

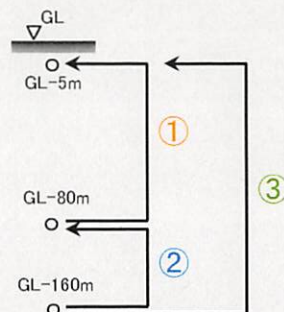
| No. | 年月日        | 時刻    | 北緯        | 東経         | 深さ(km) | Mj  |
|-----|------------|-------|-----------|------------|--------|-----|
| 1   | 2001/01/09 | 13:37 | 33° 35.3" | 132° 21.4" | 46     | 4.7 |
| 2   | 2001/03/24 | 15:27 | 34° 07.9" | 132° 41.6" | 46     | 6.7 |
| 3   | 2001/03/26 | 5:40  | 34° 07.0" | 132° 42.5" | 46     | 5.2 |
| 4   | 2002/03/25 | 22:58 | 33° 49.4" | 132° 36.9" | 46     | 4.7 |
| 5   | 2002/04/06 | 1:57  | 33° 25.7" | 132° 31.8" | 42     | 4.4 |
| 6   | 2004/04/20 | 22:26 | 33° 28.1" | 132° 14.6" | 48     | 4.6 |
| 7   | 2005/05/25 | 20:31 | 33° 19.4" | 132° 17.2" | 54     | 4.6 |
| 8   | 2006/06/06 | 23:28 | 33° 33.3" | 132° 16.1" | 49     | 3.6 |
| 9   | 2006/06/12 | 5:01  | 33° 08.1" | 131° 26.1" | 146    | 6.2 |
| 10  | 2006/09/26 | 7:03  | 33° 30.3" | 131° 53.0" | 70     | 5.3 |
| 11  | 2006/11/19 | 13:29 | 33° 20.8" | 132° 26.4" | 41     | 4.4 |



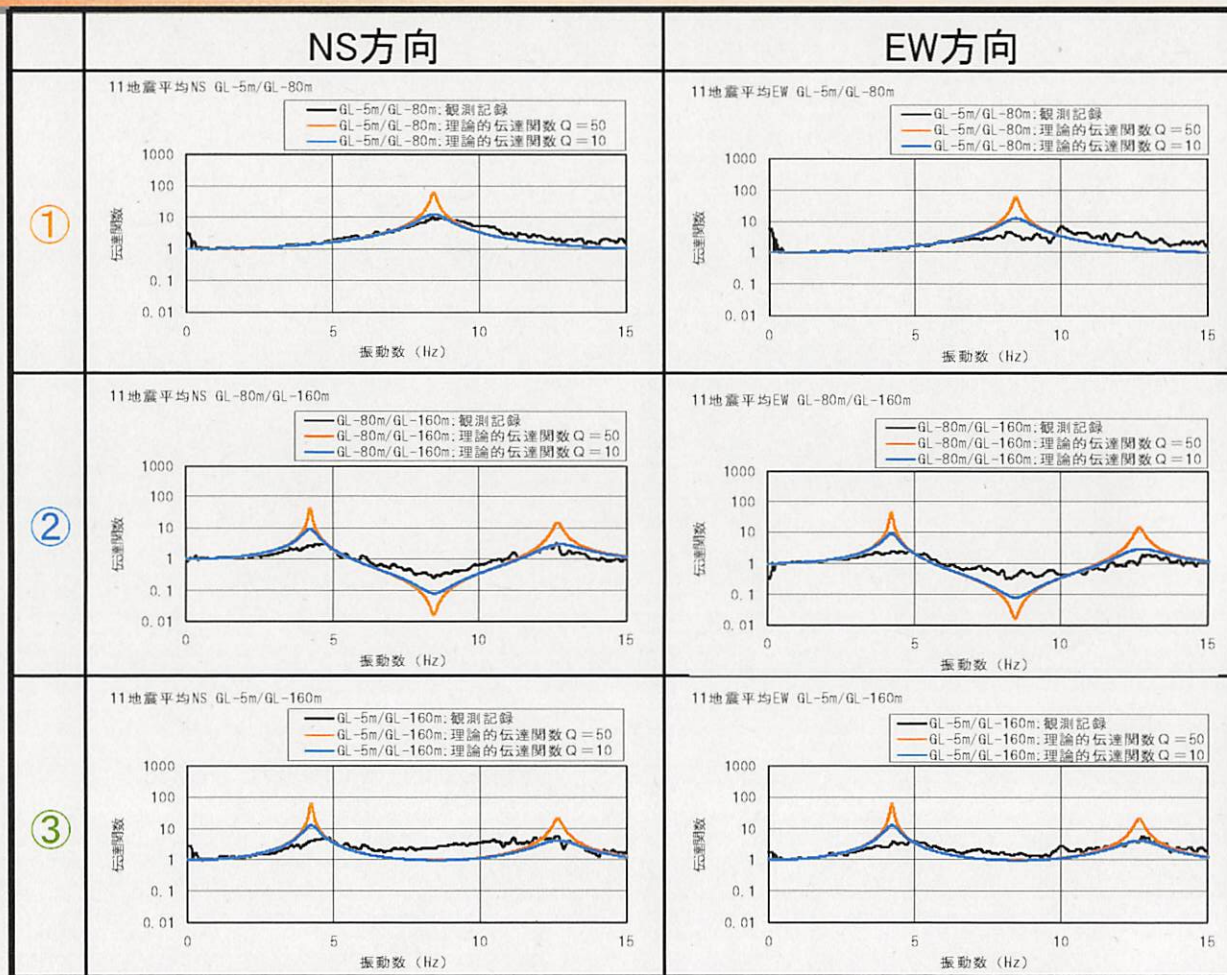
# 10Gal以上の観測記録を平均した伝達関数との比較



地震位置図



伝達関数検討位置



設定した地盤構造モデルによる理論的伝達関数(図の赤線)は、観測記録の伝達関数とほぼ整合していることを確認した。

なお参考までに、観測記録の伝達関数のピークレベルと整合するQ値を算定すると、10程度と求まる(図の青線)。



---

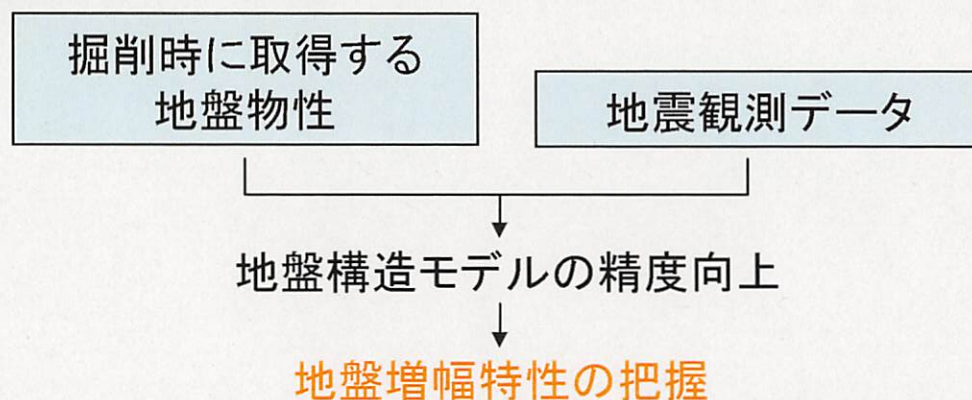
## 2. 深部ボーリング等による評価について

- 2.1 調査概要
- 2.2 地質・地質構造
- 2.3 地盤物性
- 2.4 地盤増幅特性
- 2.5 敷地の地下構造評価



# 調査目的

深部地盤に起因する地震動の増幅について検証するため、深部ボーリングにより深度2,000mまでの地盤物性を測定するとともに、深井戸で地震観測を実施する。



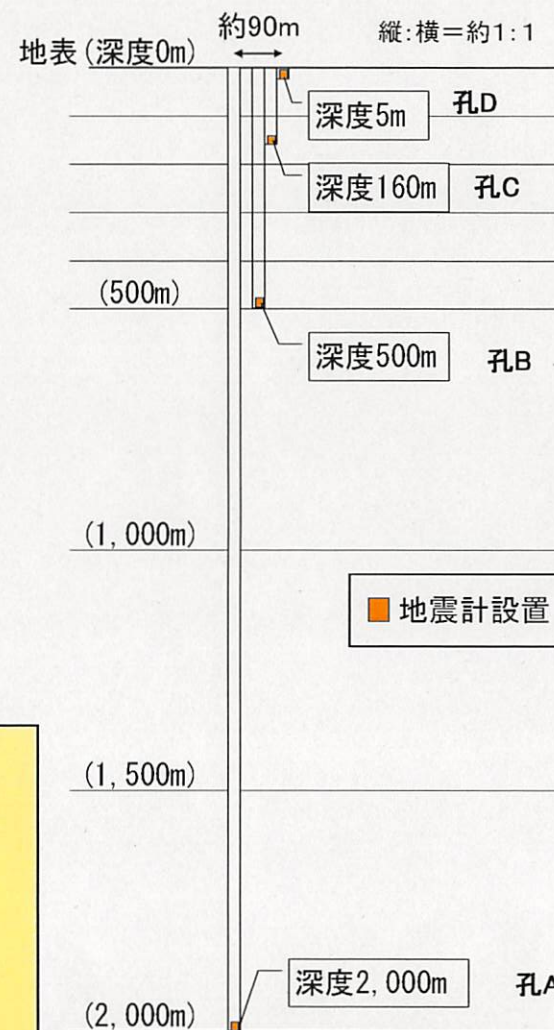
以下の項目からなる深部ボーリング工事を実施

## 【掘削工事】

- ・地震計設置を目的とした孔A～Dの4孔の掘削
- ・岩石コアの採取による地質状況の確認

## 【地盤物性取得】

- ・孔、岩石コアを利用した地盤物性取得



地震計設置断面図



# 調査位置

- 新設地震計
- 既設地震計

## 既設地震計

深度 5m, 80m, 160m

## 深部ボーリング (新設地震計)

伊予灘

深度160m(孔C)

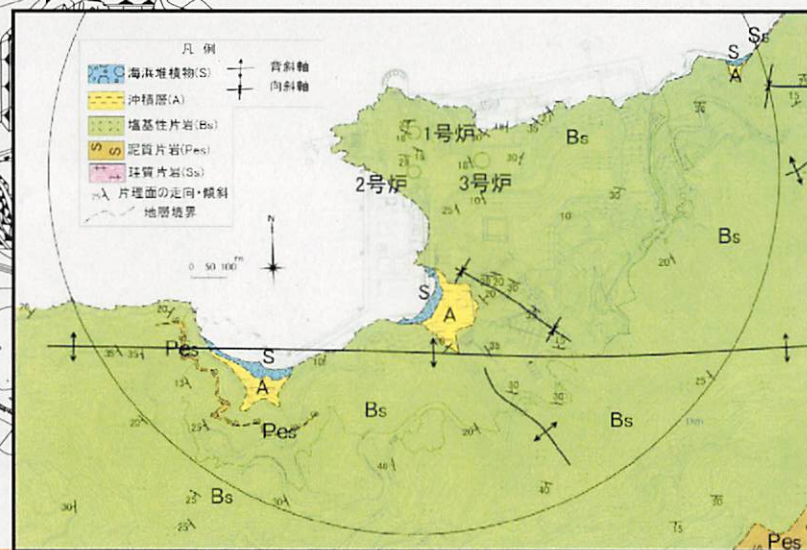
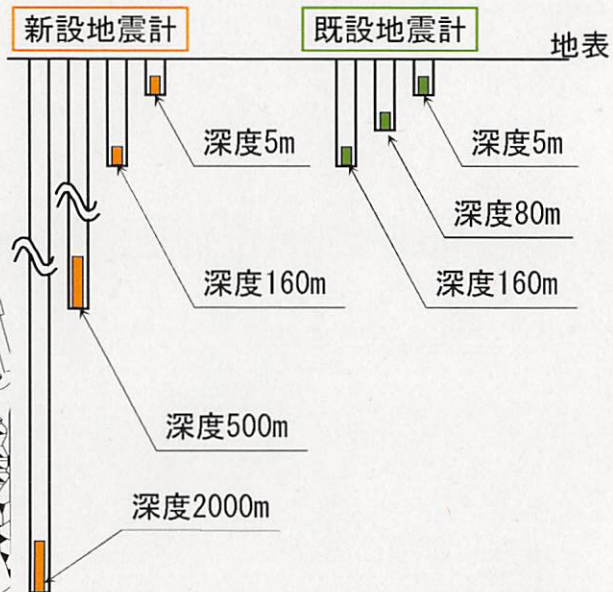
深度5m(孔D)

深度500m(孔B)

荷揚岸壁

深度2,000m(孔A)

0 100 200 300m





# 調査項目

## 地質・地質構造

- ・岩石コア観察
- ・敷地内地質構造の検討(既存ボーリング調査結果等を踏まえて)
- ・敷地近傍および周辺の地質構造の検討(地表踏査等を含む)

## 地盤物性

| 項目             | 測定物性            | 目 的                 |
|----------------|-----------------|---------------------|
| PS検層           | P波、S波速度<br>減衰特性 | 地盤構造モデルの精度向上(深度方向)  |
| 密度検層           | 密度              | 地盤構造モデルの精度向上(深度方向)  |
| オフセット<br>VSP探査 | P波速度<br>(速度構造)  | 地盤構造モデルの精度向上(2次元断面) |



---

## 2. 深部ボーリング等による評価について

### 2.1 調査概要

### 2.2 地質・地質構造

### 2.3 地盤物性

### 2.4 地盤増幅特性

### 2.5 敷地の地下構造評価

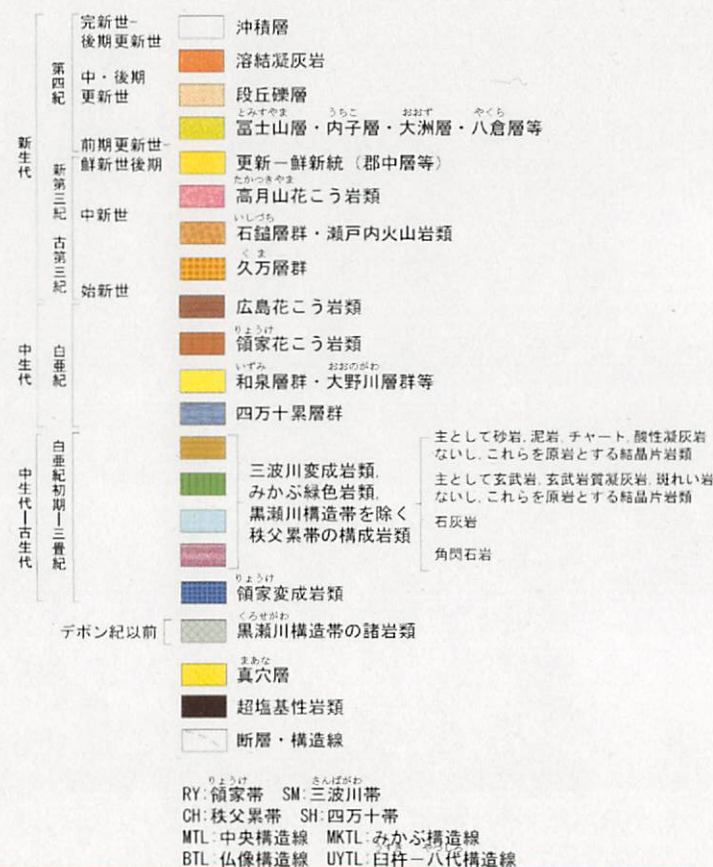


# 敷地周辺の地質

・伊方発電所敷地周辺には、北側から領家帯、三波川帯、秩父累帯および四万十帯に属する地層が分布し、敷地付近には三波川変成岩類に属する塩基性片岩が広く分布する。

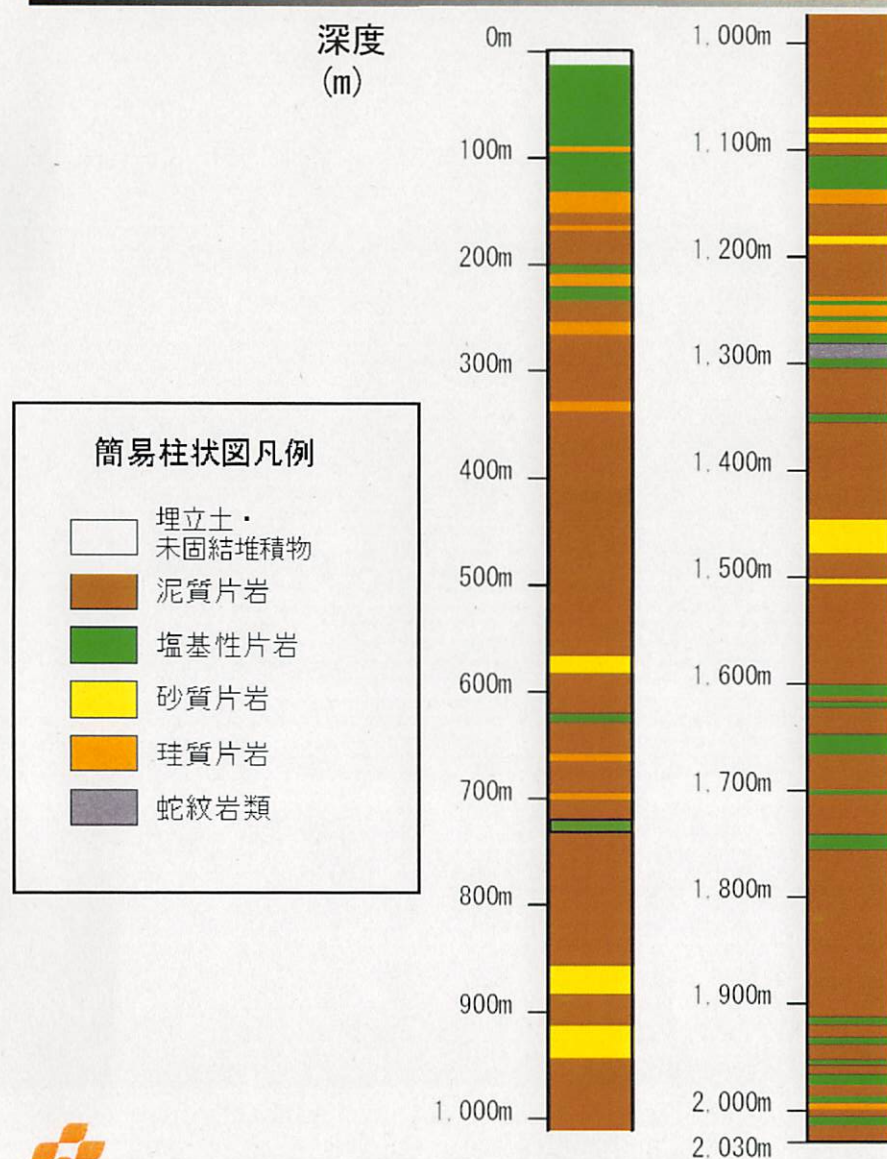


凡 例





# 岩石コアの観察結果 (簡易柱状図)

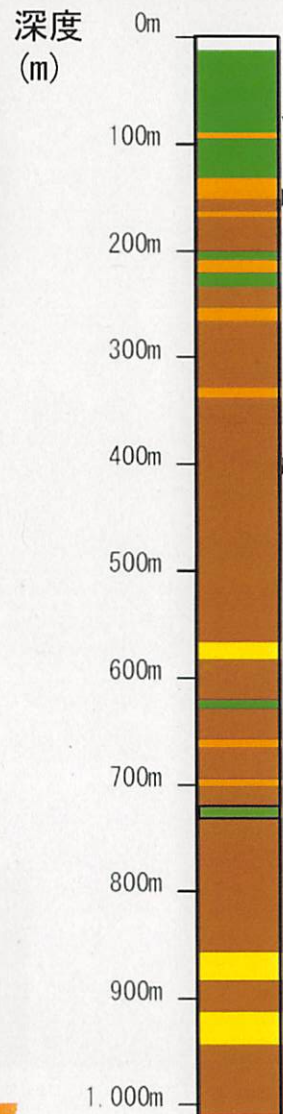


本調査で取得した岩石コアの観察によると、地表から深度2,000mまで三波川帯の堅硬かつ緻密な結晶片岩が分布する。

- ・ 地表～深度130m :  
塩基性片岩が主体
- ・ 深度130m以深 :  
泥質片岩が主体

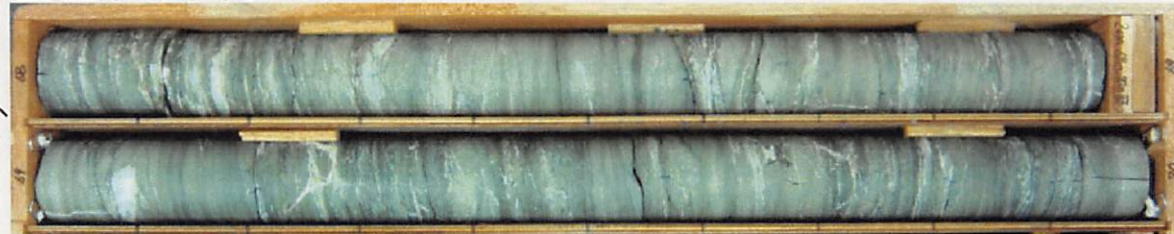


# 岩石コアの観察結果 (コア写真①)



各岩種の代表的な岩石コア写真を示す。

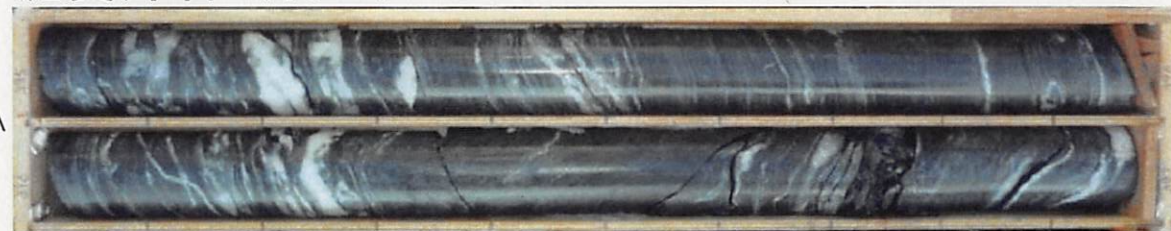
塩基性片岩 (孔B)



珪質片岩 (孔B)



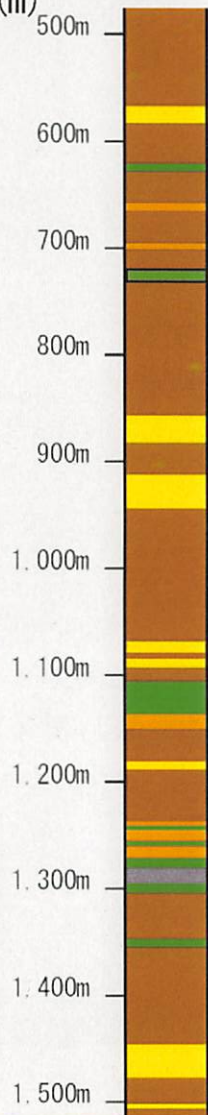
泥質片岩 (孔B)





## 岩石コアの観察結果 (コア写真②)

深度 (m)



深部の岩石コアも非常に堅硬である。

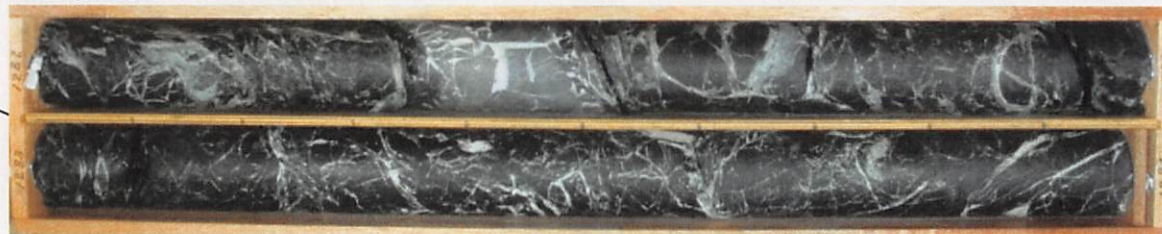
砂質片岩 (孔 A)



泥質片岩 (孔 A)

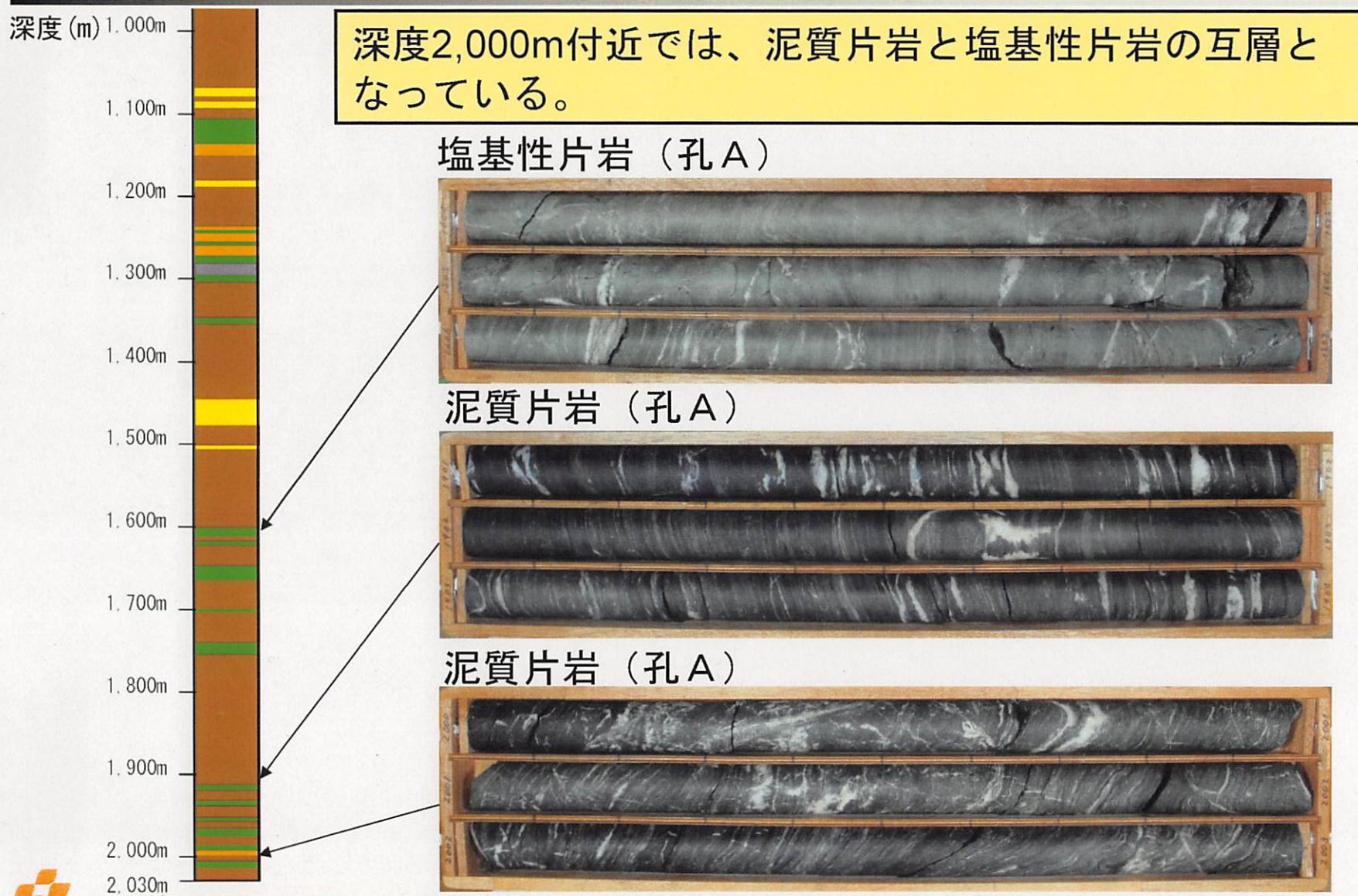


蛇紋岩 (孔 A)



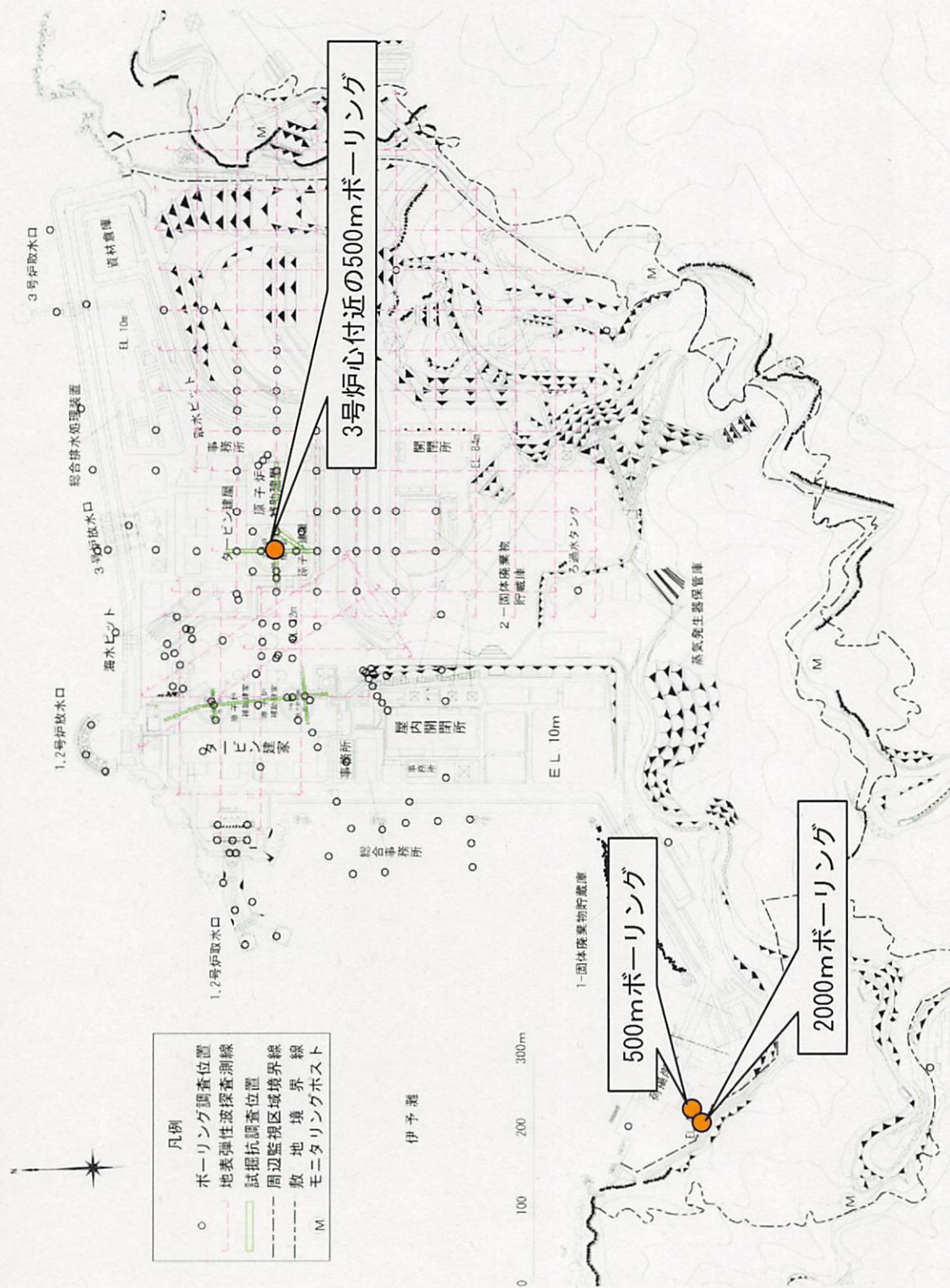


## 岩石コアの観察結果 (コア写真③)





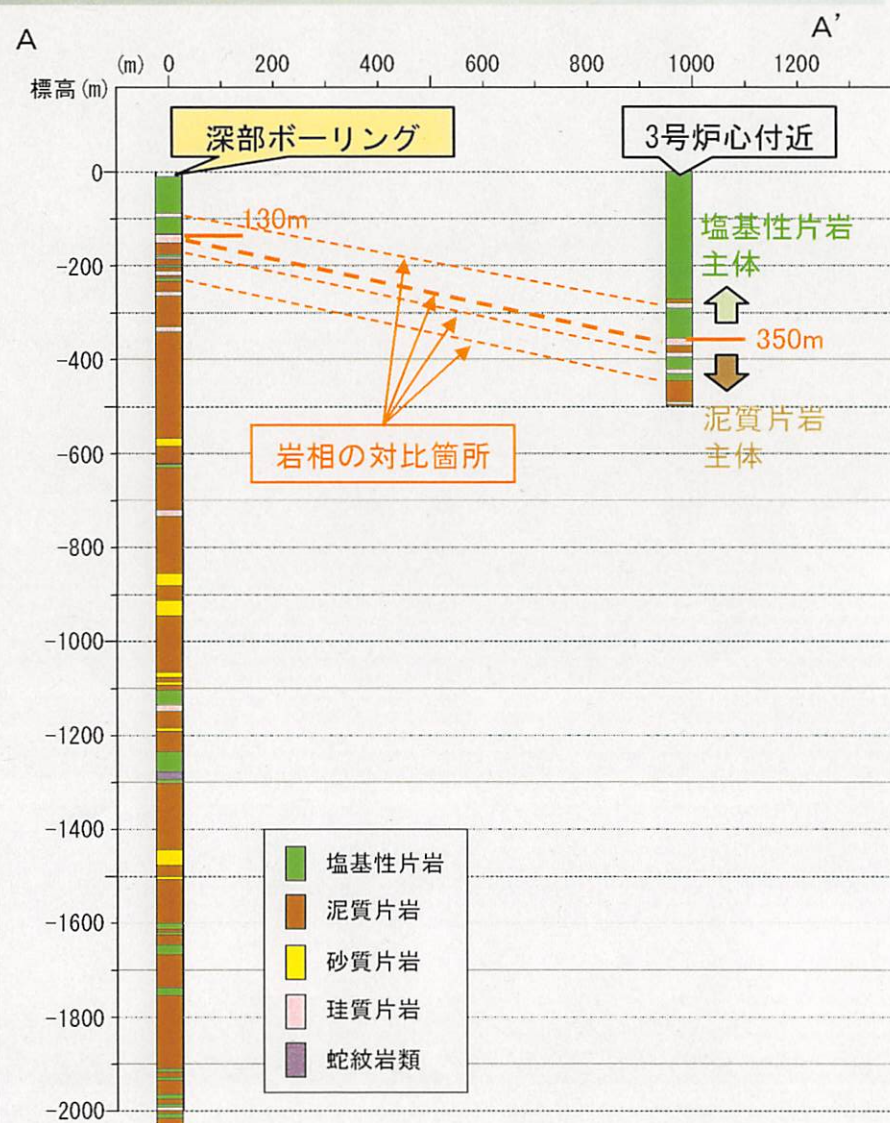
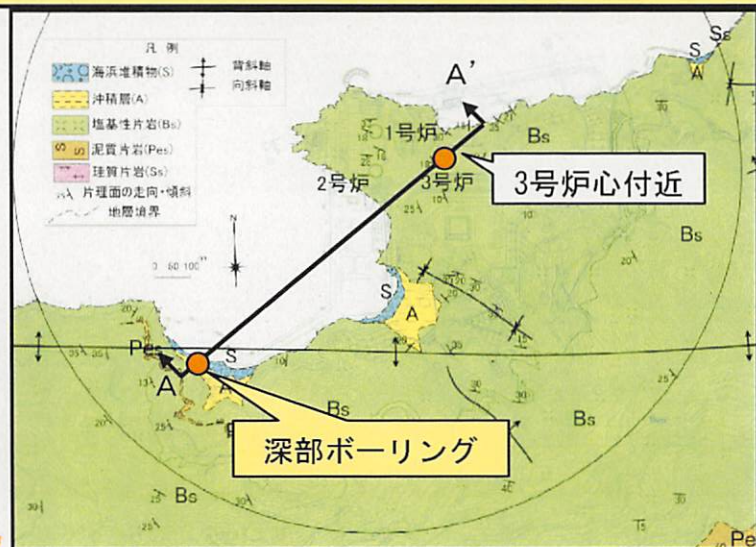
# 敷地の地質調査位置





# 敷地の地質構造

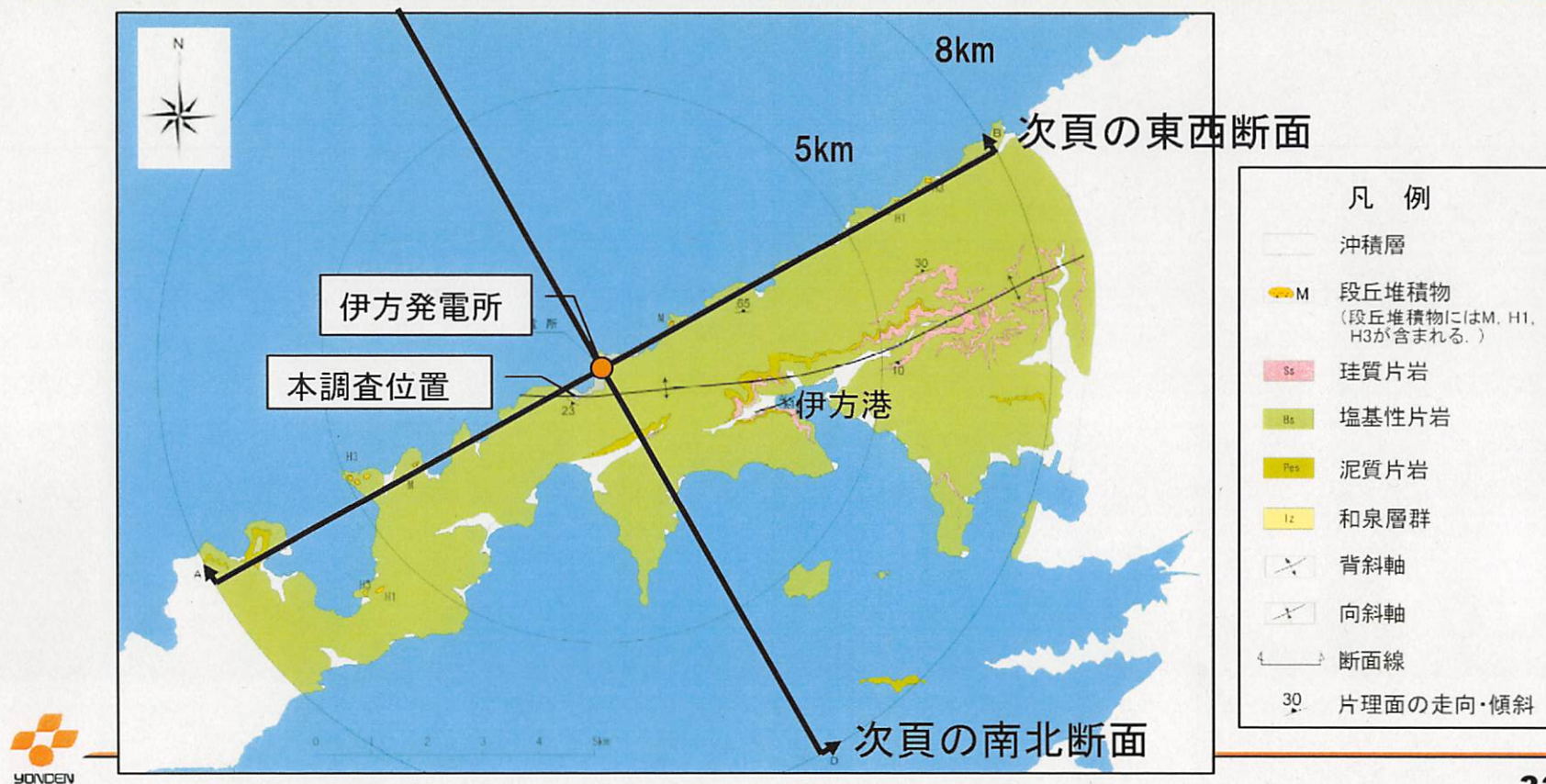
- ・敷地内のボーリングデータや地表踏査から、地下浅部に広く塩基性片岩が分布することを把握している。
- ・3号炉心付近の500mボーリングと岩相を対比した結果、本調査で確認した荷揚岸壁における泥質片岩主体層の上面（深度約130m）は、3号炉心付近における深度約350mに対比され、境界面は地下深部で北へ緩く傾斜しているものと評価される。





## 敷地近傍の地質構造(平面図)

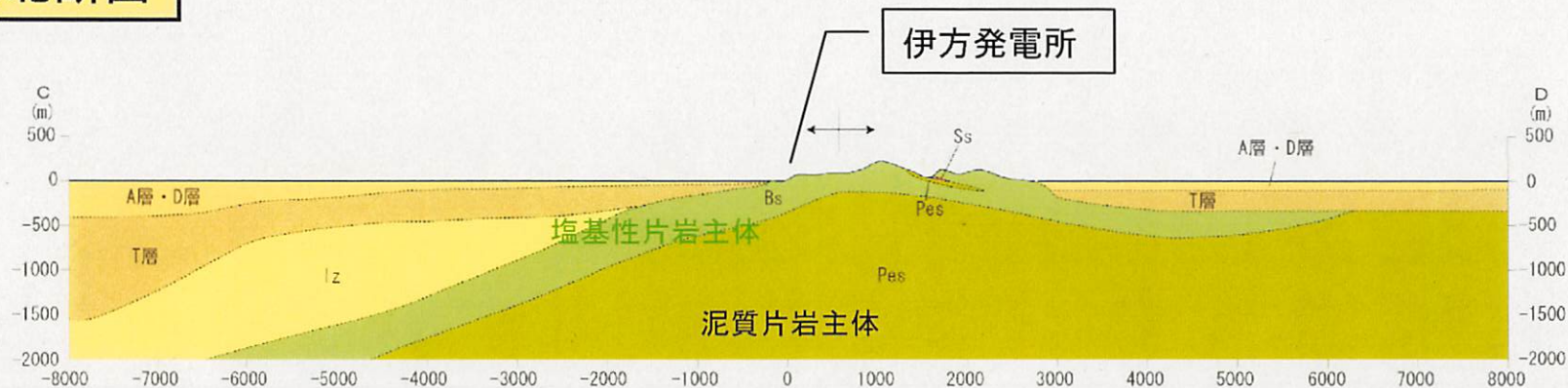
- ・ 敷地近傍には広く塩基性片岩露頭が分布し、地下浅部に厚さ数百m程度の塩基性片岩主体層が分布する。
- ・ 敷地近傍における地表踏査結果と深部ボーリング調査結果を総合すると、地下深部には泥質片岩主体層が分布し、佐田岬半島に沿って開いた背斜（緩く凸状）を示すと評価される。



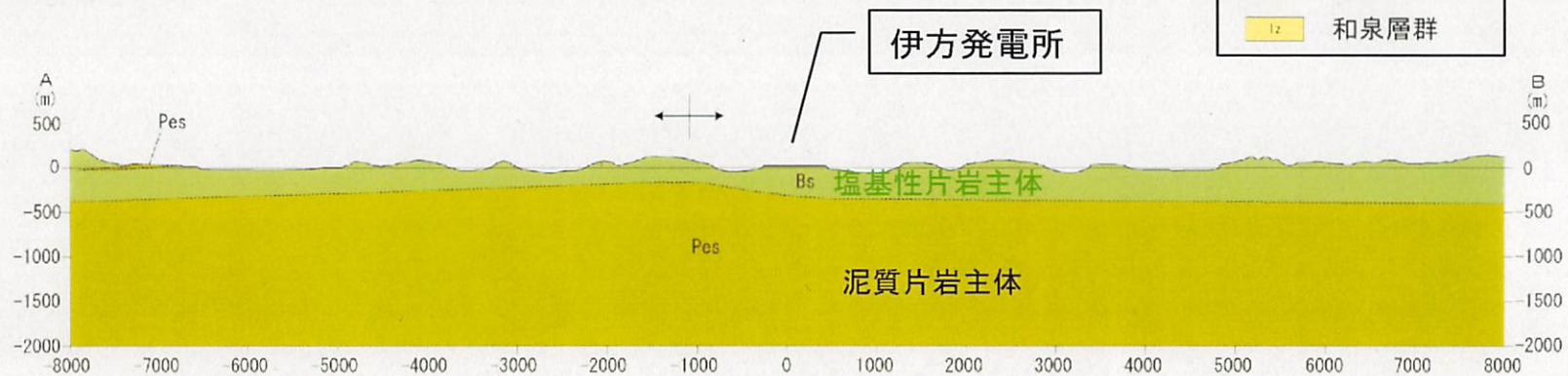


# 敷地近傍の地質構造(断面図)

## 南北断面



## 東西断面





# 敷地近傍の詳細地質構造(断面位置図)

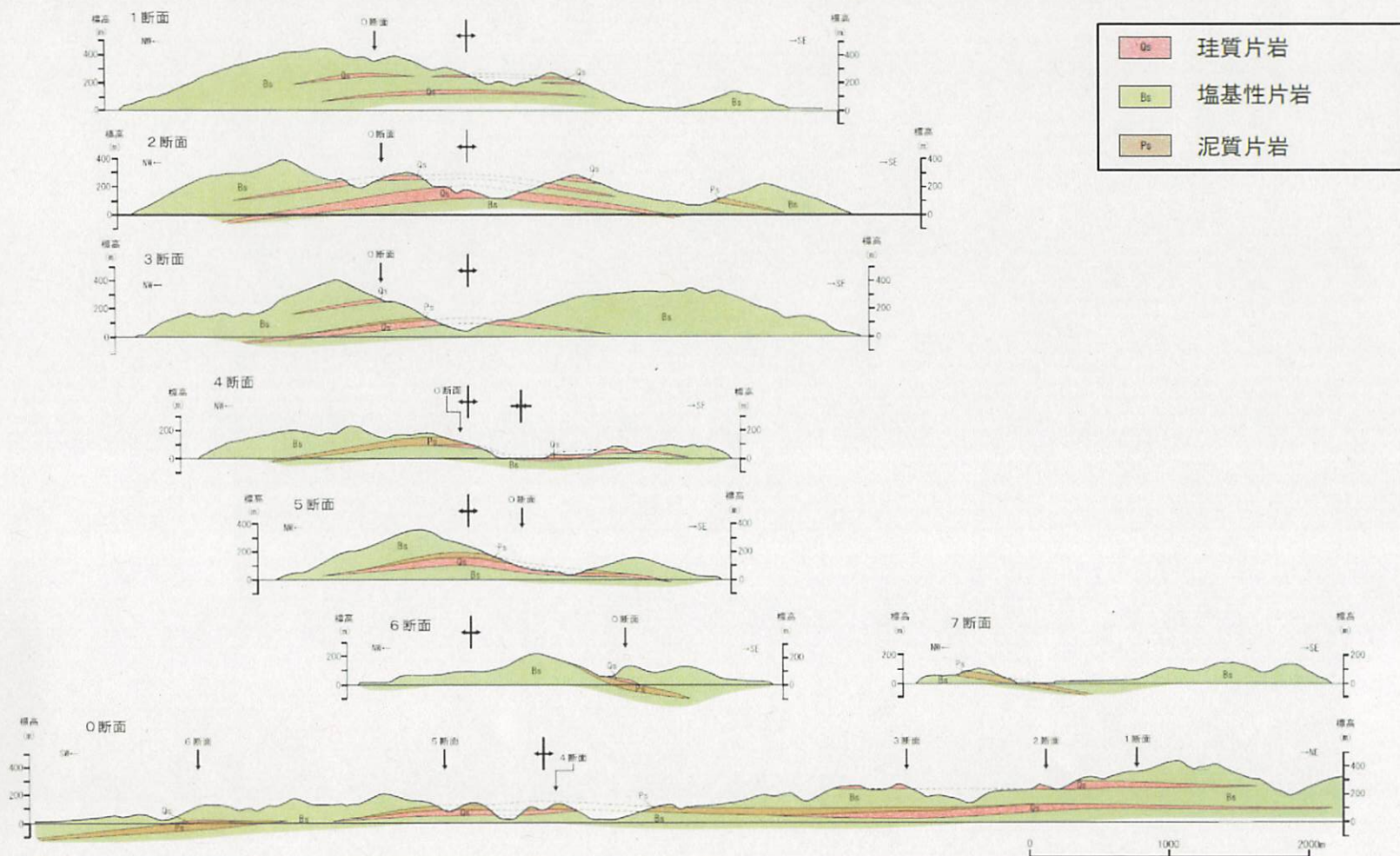
・次頁に示す地質断面図の位置を示す。





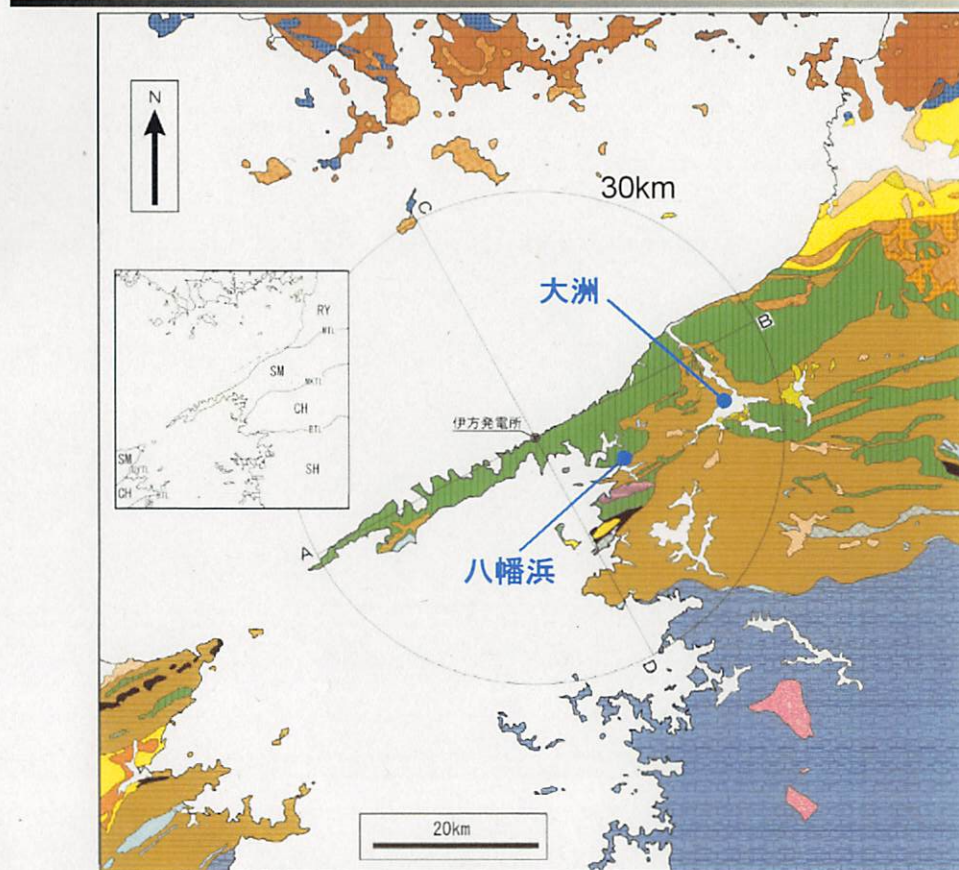
# 敷地近傍の詳細地質構造(断面図)

- ・ 地表で確認される珪質片岩、泥質片岩の薄層を鍵層として地質断面図を作成し、敷地近傍の三次元的な地質構造がほぼ水平であることを把握している。

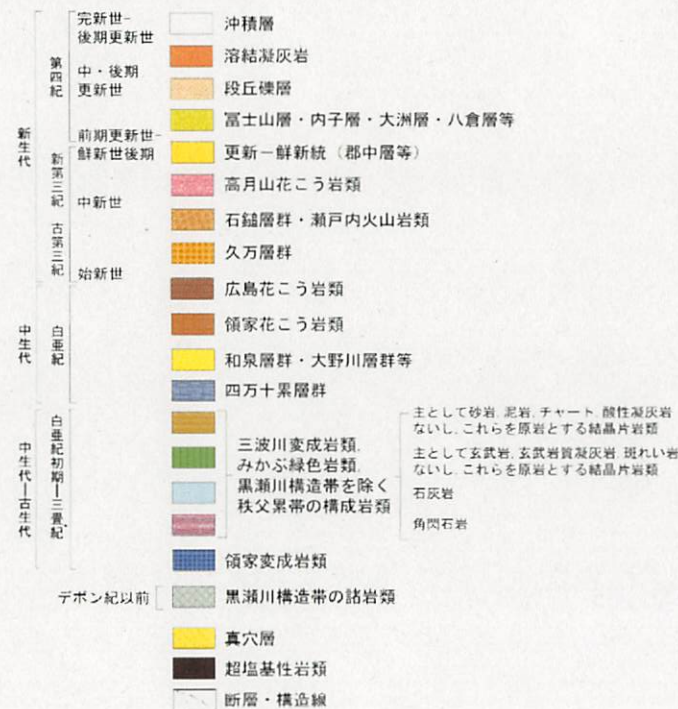




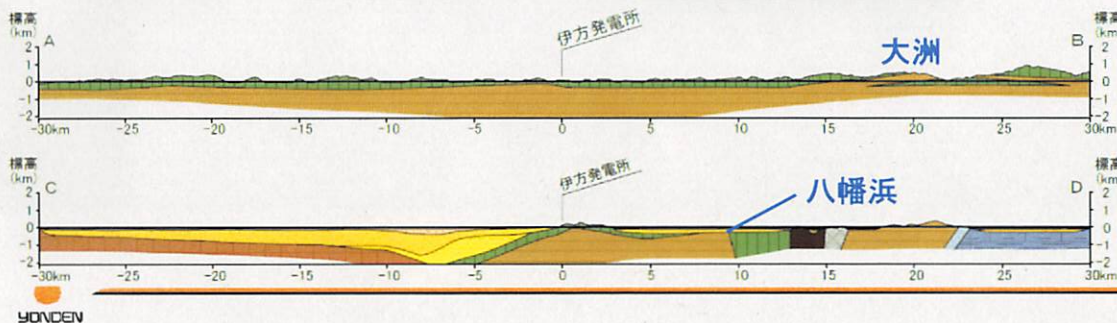
# 敷地周辺の地質構造(平面図、断面図)



凡 例



伊方発電所深部の泥質片岩主体層は大洲や八幡浜に分布する泥質片岩層と対比され、地質構造は極めて水平である。





## 2. 深部ボーリング等による評価について

- 2.1 調査概要
- 2.2 地質・地質構造
- 2.3 地盤物性
- 2.4 地盤増幅特性
- 2.5 敷地の地下構造評価



# 地盤物性測定項目

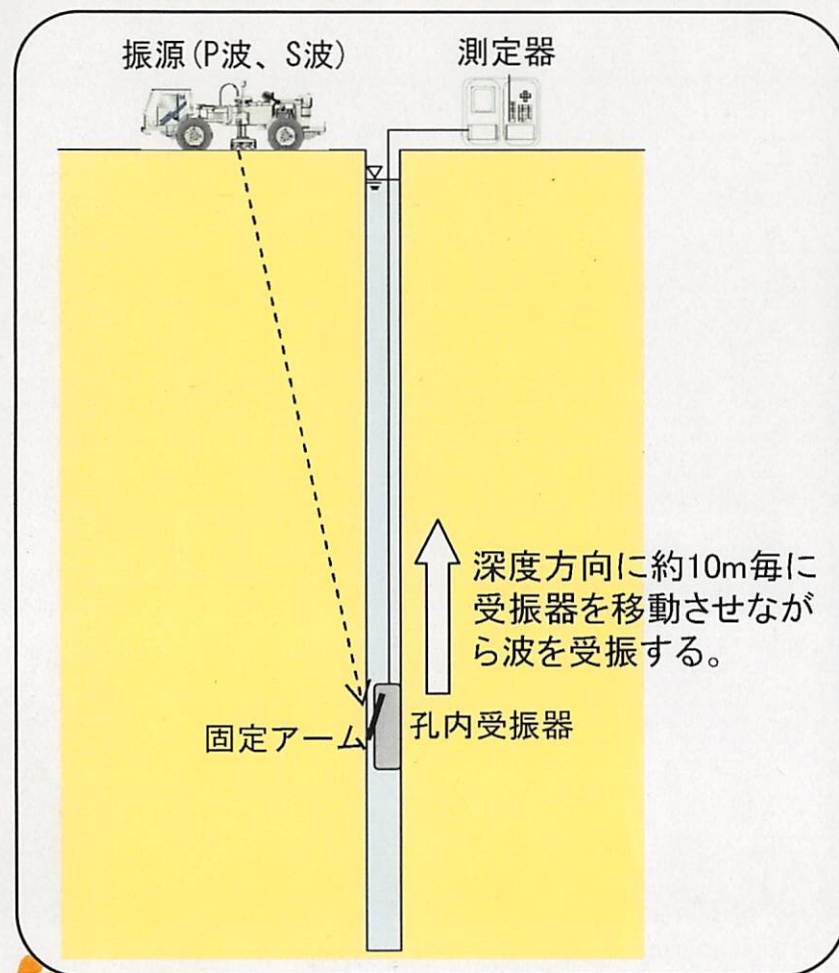
・地表から深度2,000mにかけて、以下のとおり地盤物性を測定した。

| 物性          | 測定方法               | 算出手順                                  |
|-------------|--------------------|---------------------------------------|
| P波・S波<br>速度 | PS検層<br>(ダウンホール法)  | 地表からの発振に対して孔内で受振を行い、長い区間の平均速度を算出する。   |
|             | PS検層<br>(サスペンション法) | 測定器を孔内に挿入して発振、受振を行い、短い区間の平均速度を算出する。   |
| 密度          | 密度検層               | 測定器を孔内に挿入し、孔内の地層密度の変化を連続的に測定する。       |
| Q値          | PS検層<br>(ダウンホール法)  | PS検層(ダウンホール法)の取得波形を解析して減衰特性(Q値)を算出する。 |

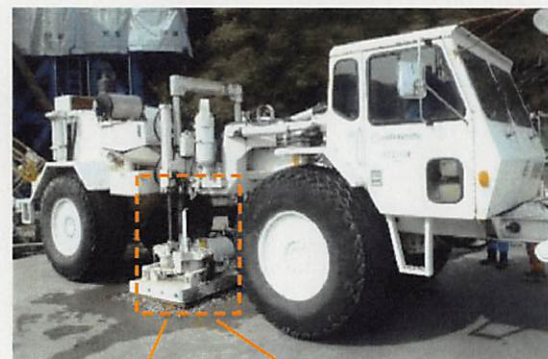


# PS検層 (ダウンホール法) の概要

・地表からの発振に対して孔内で受振を行い、孔—地表間のP波速度、S波速度、減衰特性(Q値)を取得する。



起振器 (全景)



受振器



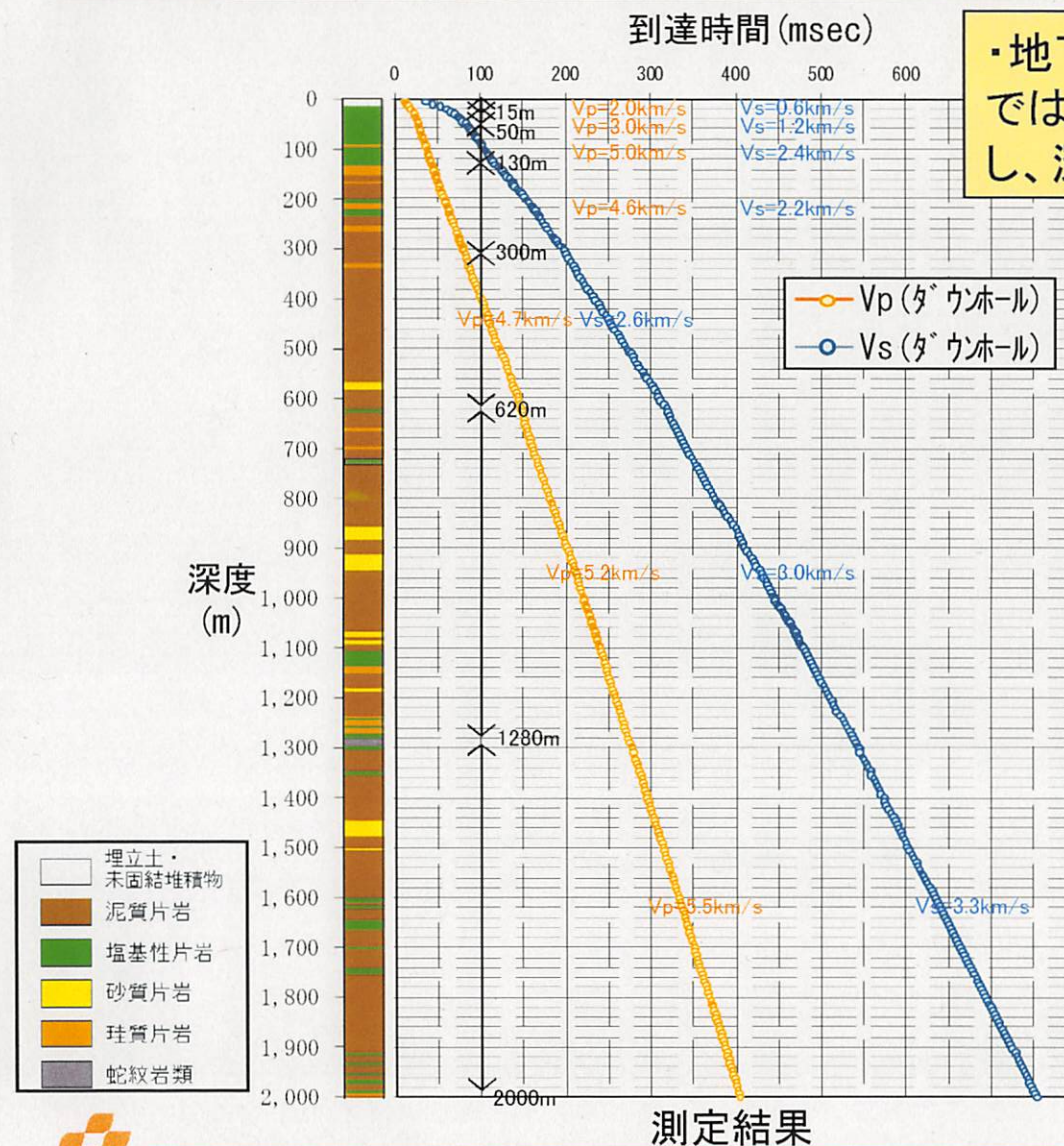
P波起振器



S波起振器



# PS検層 (ダウンホール法) 結果①(速度)



・地下浅部で $V_s=2\text{km/s}$ を超え、地下深部では $V_s=3\text{km/s}$ 超の非常に速い速度を示し、深度方向に漸増する。

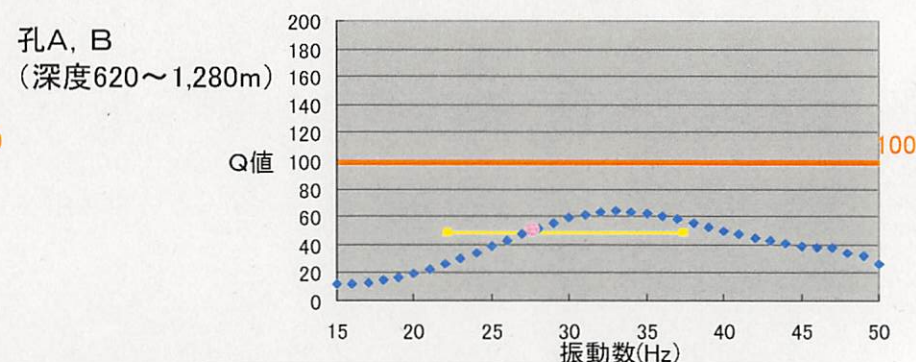
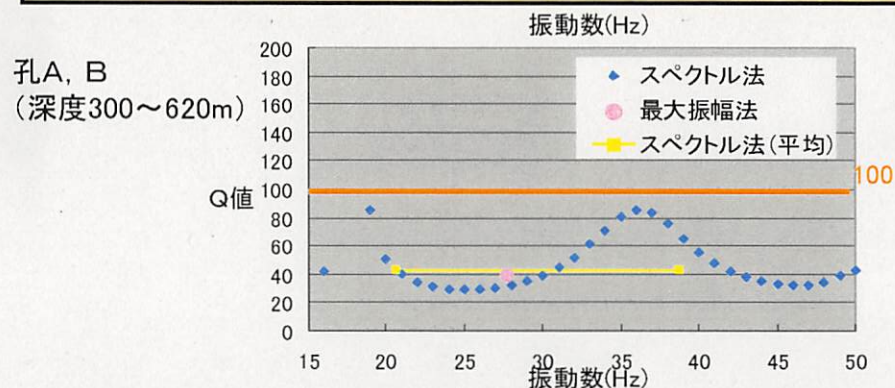
| 深度(m)                 | Vp<br>(km/s) | Vs<br>(km/s) |
|-----------------------|--------------|--------------|
| ～15<br>(埋立土等)         | 2.0          | 0.6          |
| 15～50<br>(風化した塩基性片岩)  | 3.0          | 1.2          |
| 50～130<br>(塩基性片岩主体)   | 5.0          | 2.4          |
| 130～300<br>(泥質片岩主体)   | 4.6          | 2.2          |
| 300～620<br>(泥質片岩主体)   | 4.7          | 2.6          |
| 620～1280<br>(泥質片岩主体)  | 5.2          | 3.0          |
| 1280～2000<br>(泥質片岩主体) | 5.5          | 3.3          |





# PS検層 (ダウンホール法) 結果②(Q値)

・Q値は深度方向に大きくなる傾向にあり、深度1,280m以浅のQ値は100以下である。



| 孔    | 深度(m)       | Q 値   |               |                 | 卓越周波数 | スペクトル法<br>評価に用いた<br>周波数範囲 |
|------|-------------|-------|---------------|-----------------|-------|---------------------------|
|      |             | 最大振幅法 | スペクトル法<br>最大値 | スペクトル法<br>平均値※1 |       |                           |
| A, B | 15～130      | 6.3※2 | 6.3※2         | 6.3※2           | 26.3  | 20～38                     |
|      | 130～300     | 18.8  | 発散            | 36.9            | 26.1  | 18～38                     |
|      | 300～620     | 38.7  | 85.6          | 42.3            | 27.7  | 21～39                     |
|      | 620～1280    | 50.0  | 63.8          | 48.3            | 27.7  | 22～37                     |
|      | 1,280～2,000 | 101.8 | 発散            | 163             | 28.5  | 24～38                     |

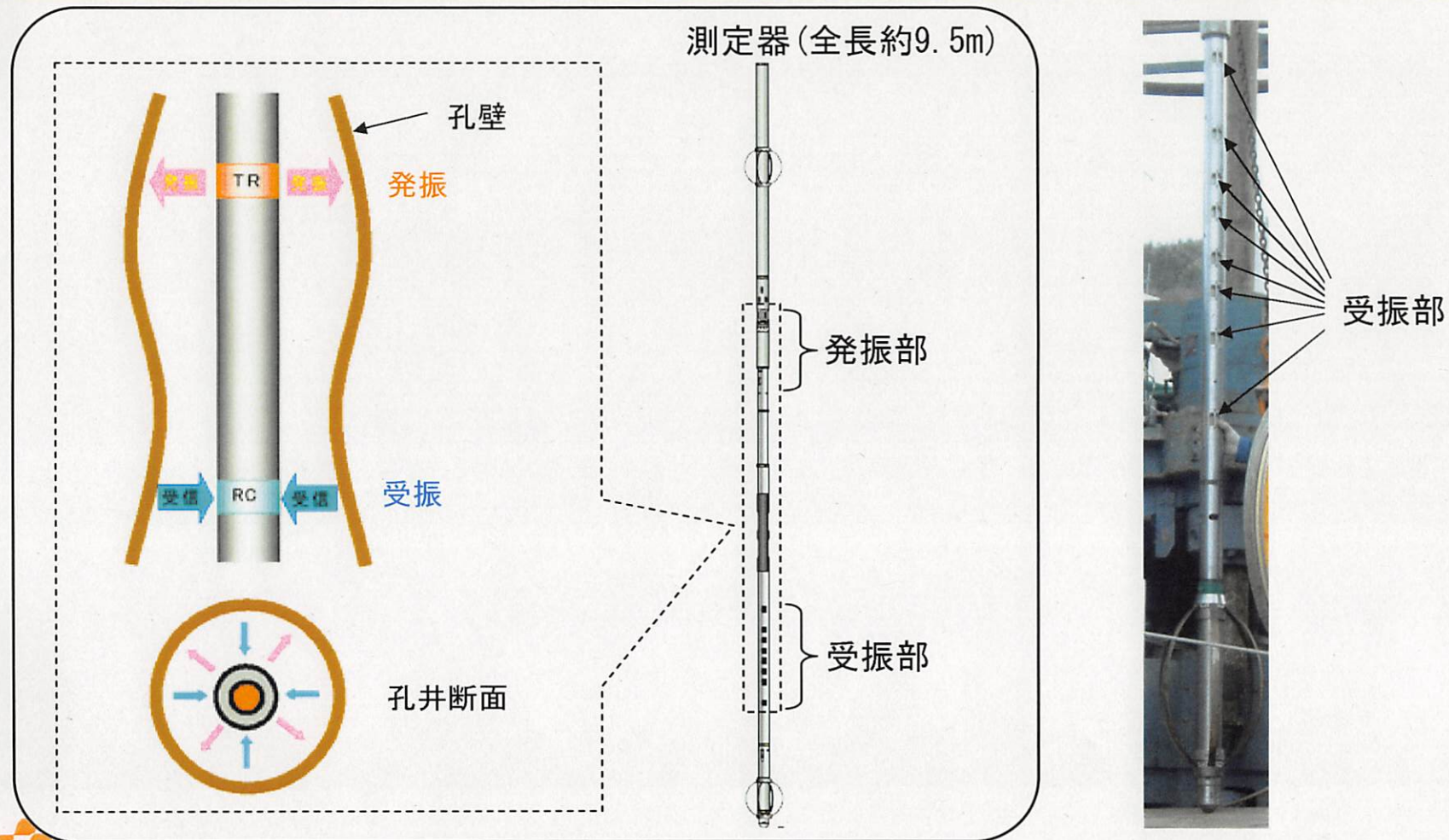
※1: スペクトル法の平均値は、卓越周波数における振幅スペクトルの $1/\sqrt{2}$ 以上の振幅スペクトルを示す周波数範囲において得られたQ値を調和平均して求めた。Q値は減衰係数 $\alpha$ の逆数から決定されることから、Q値の平均を評価するにあたり、逆数の平均である調和平均を用いた。

※2: Q値の適用範囲を考慮して下限を6.3( $\approx 2\pi$ )とした。



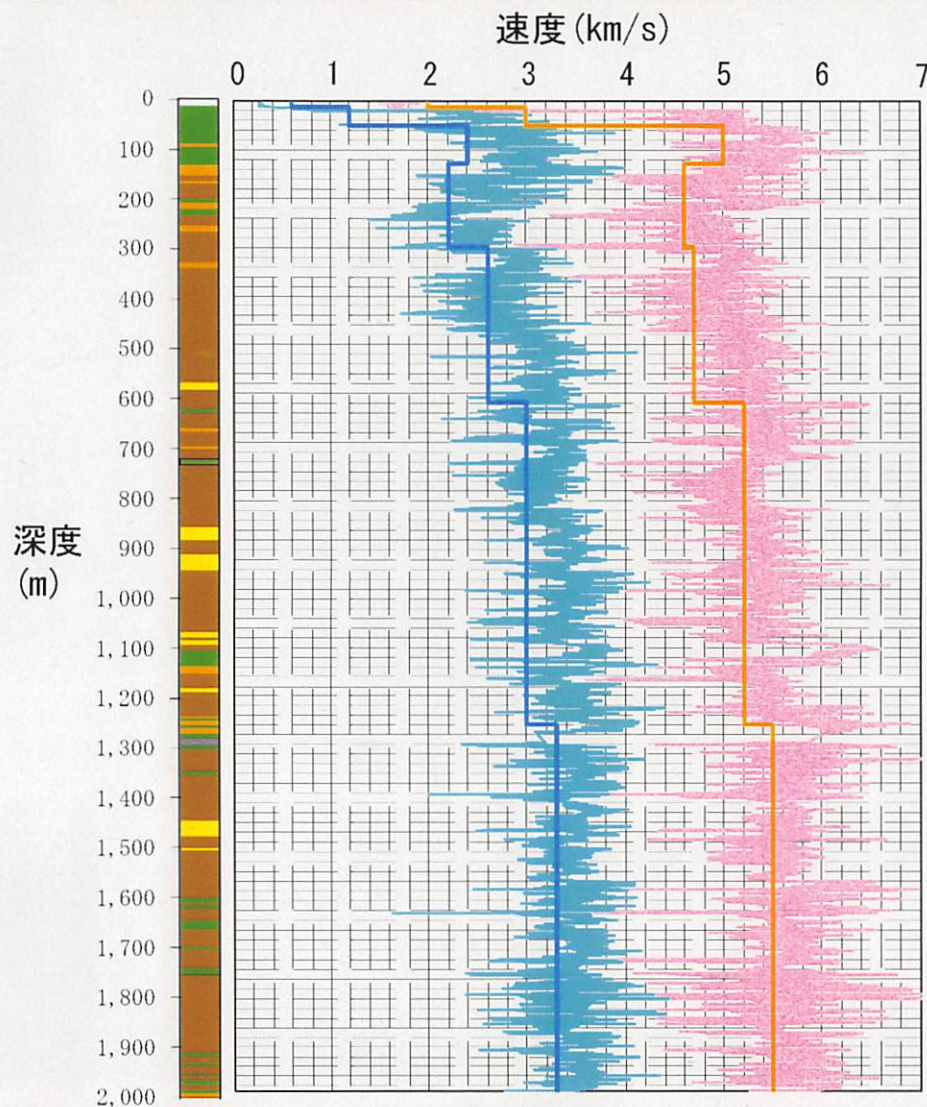
# PS検層 (サスペンション法) の概要

- ・ 発振器と受振器が組み込まれた測定器を用いて、孔内のP波速度、S波速度の孔壁に沿った微細な変化を連続的に取得する。





# PS検層 (サスペンション法) 結果



・ ダウンホール法およびサスペンション法による速度値はほぼ同等である。

・ 地下浅部から地下深部まで非常に速い速度 ( $V_s=2.2\sim3.3\text{km/s}$ ) を示し、深度方向に漸増するものの、地震動増幅の要因となるインピーダンス比は小さい。

・ 深度2,000mは地震基盤 ( $V_s=3.5\text{km/s}$ ) に相当する。

— Vp (サスペンション法)  
— Vs (サスペンション法)  
— Vp (ダウンホール法)  
— Vs (ダウンホール法)

□ 埋立土・未固結堆積物  
■ 泥質片岩  
■ 塩基性片岩  
■ 砂質片岩  
■ 珪質片岩  
■ 蛇紋岩類



YONDEX

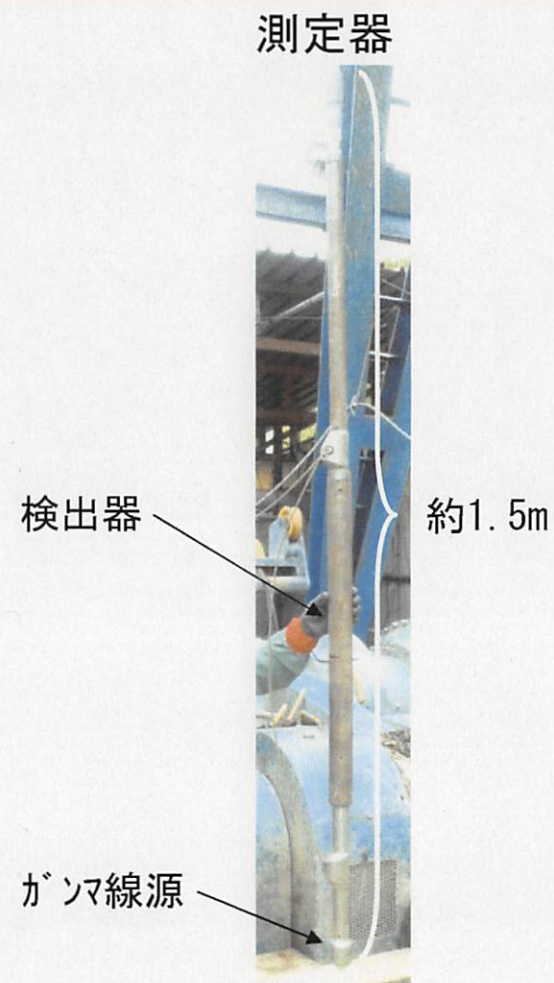
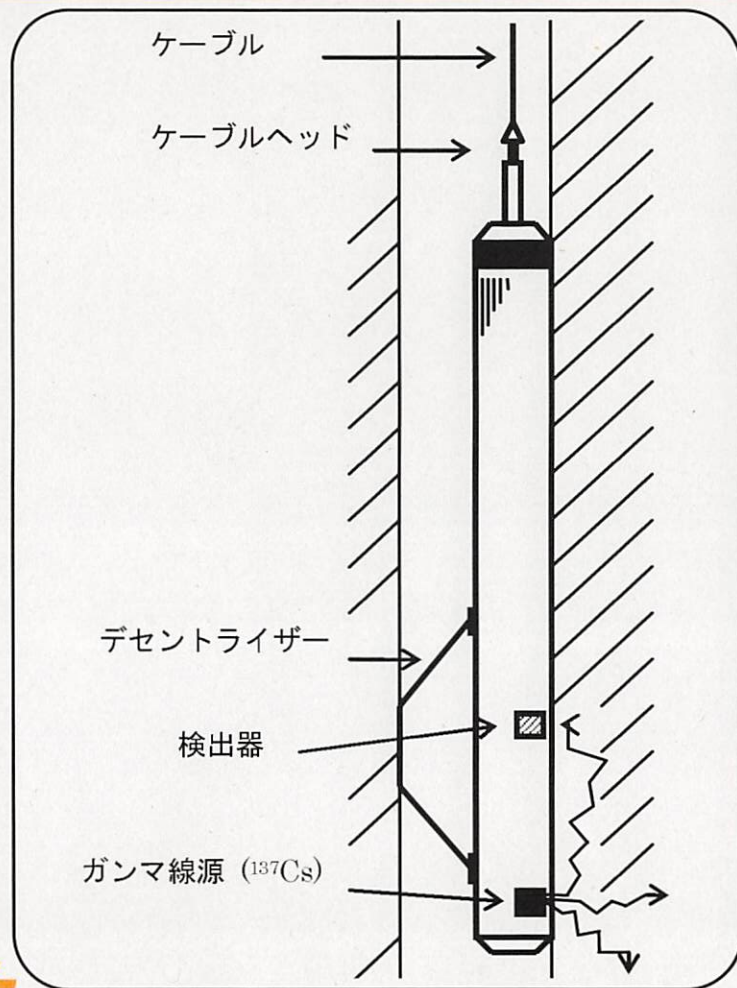
測定結果

(耐震バックチェックにおける地盤構造モデルでは深度2,000mでS波速度3.5km/s)



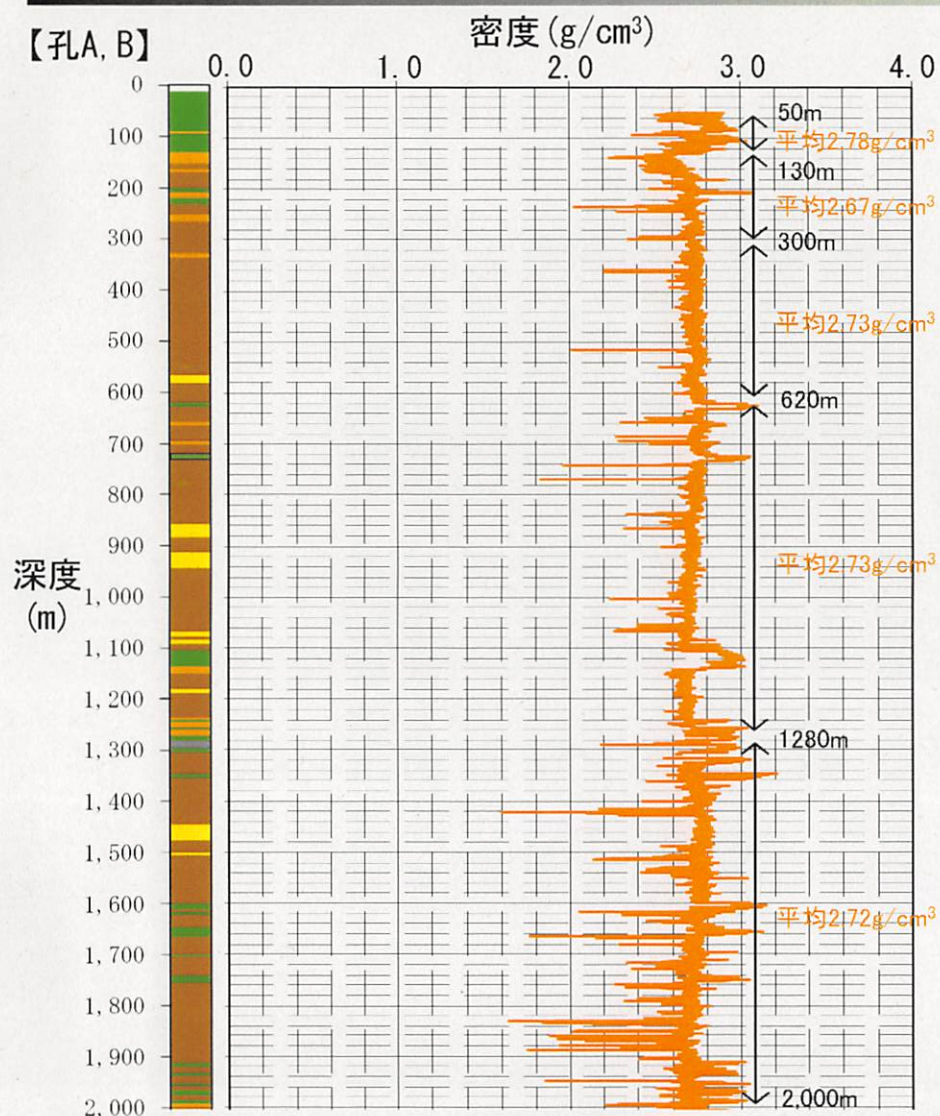
# 密度検層の概要

- ・測定器にガンマ線源(セシウム137)と検出器を装着し、地層に照射したガンマ線が衝突・散乱した強度を測定し、**地層密度**を連続的に取得する。





# 密度検層結果



・密度は2.7～3.0g/cm<sup>3</sup>を示し、岩種に応じてやや変化するものの、深度方向への大局的な増減傾向は認められない。



測定結果



(耐震バックチェックにおける地盤構造モデルでは深度0～2,000mで密度3.0g/cm<sup>3</sup>)



## 2. 深部ボーリング等による評価について

- 2.1 調査概要
- 2.2 地質・地質構造
- 2.3 地盤物性
- 2.4 地盤増幅特性
- 2.5 敷地の地下構造評価



# 3号耐震バックチェックモデルの妥当性の検討

- ・ 本調査では、200m以深のデータを拡充し、深部まで堅硬かつ緻密な三波川変成岩類が分布することを確認できた。また、PS検層ダウンホール法の結果から、深度2,000m以深で $V_s=3.5\text{km/s}$ の地震基盤に達するというこれまでのモデルの妥当性が確認できた。
- ・ 深度2,000m以浅のモデルの妥当性について、本調査結果を踏まえて検討する。

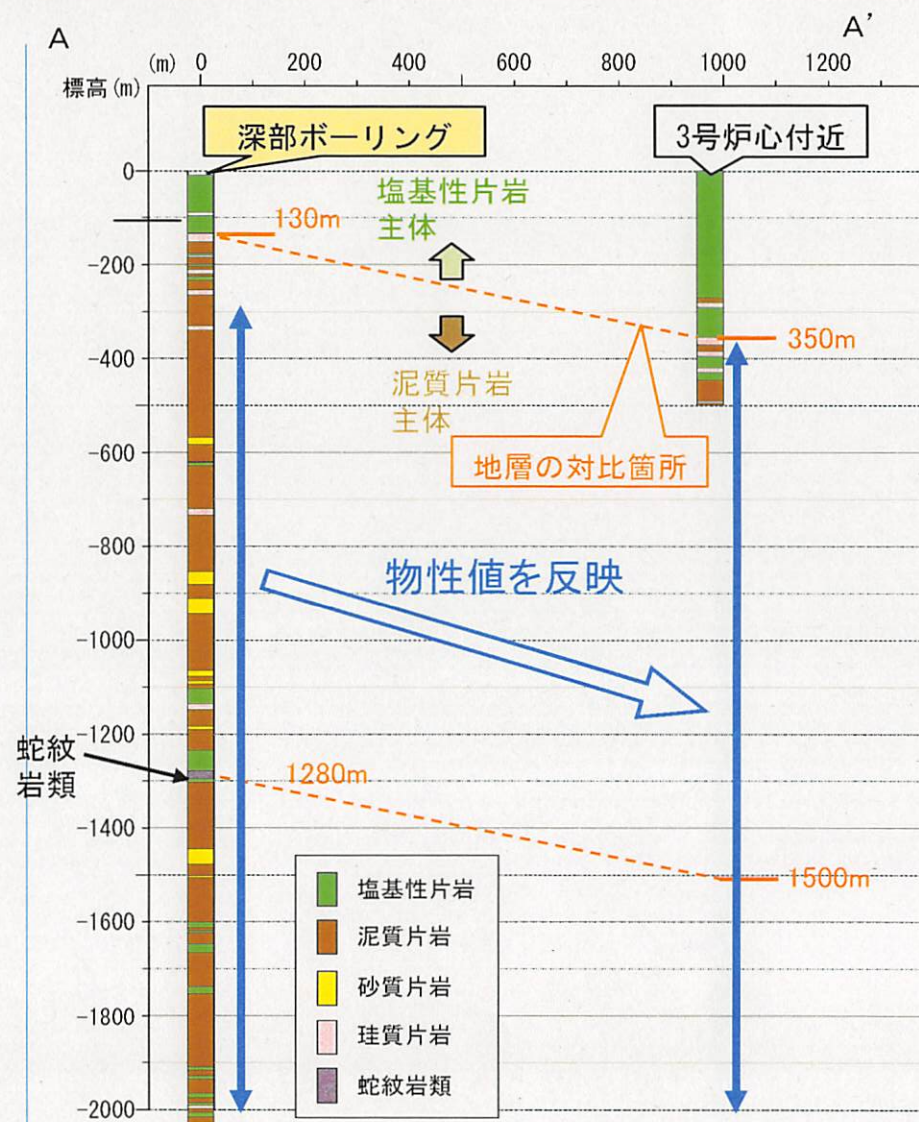
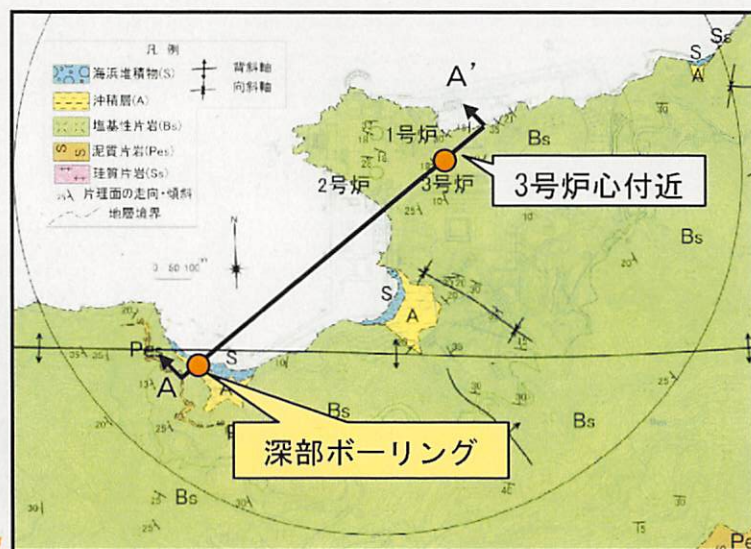
＜3号耐震バックチェックにおける地盤構造モデル＞

| 地表     | 深度<br>(m)   | $V_p$<br>(km/s) | $V_s$<br>(km/s) | $\rho$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Q値   | 区分     |
|--------|-------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|------|--------|
|        | 0～10        | 5.3             | 2.6             | 3.0                            | 50   | 上部地殻   |
| 検討範囲 → | 10～200      | 5.5             | 2.7             | 3.0                            | 50   |        |
| 地震基盤 → | 200～2000    | 5.7             | 2.8             | 3.0                            | 190  |        |
|        | 2000～16000  | 6.1             | 3.5             | 3.0                            | 230  |        |
|        | 16000～40000 | 6.7             | 3.87            | 2.8                            | 400  | 下部地殻   |
|        | 40000～42000 | 6.6             | 3.82            | 2.8                            | 400  | 海洋性地殻1 |
|        | 42000～46000 | 6.7             | 3.87            | 2.9                            | 400  | 海洋性地殻2 |
|        | 46000～      | 8.0             | 4.62            | 3.2                            | 1200 | 海洋マントル |



# 地盤モデル妥当性確認の考え方

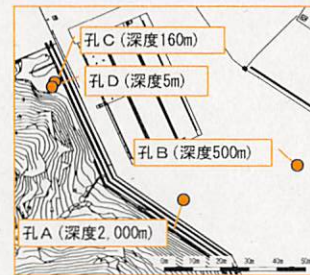
・ 本調査で得られた泥質片岩主体層における $V_p$ 、 $V_s$ 、密度および $Q$ 値を3号炉地点の深度350～2000mに反映した場合の地盤増幅特性を検討し、既存の地盤構造モデルの妥当性を検証する。





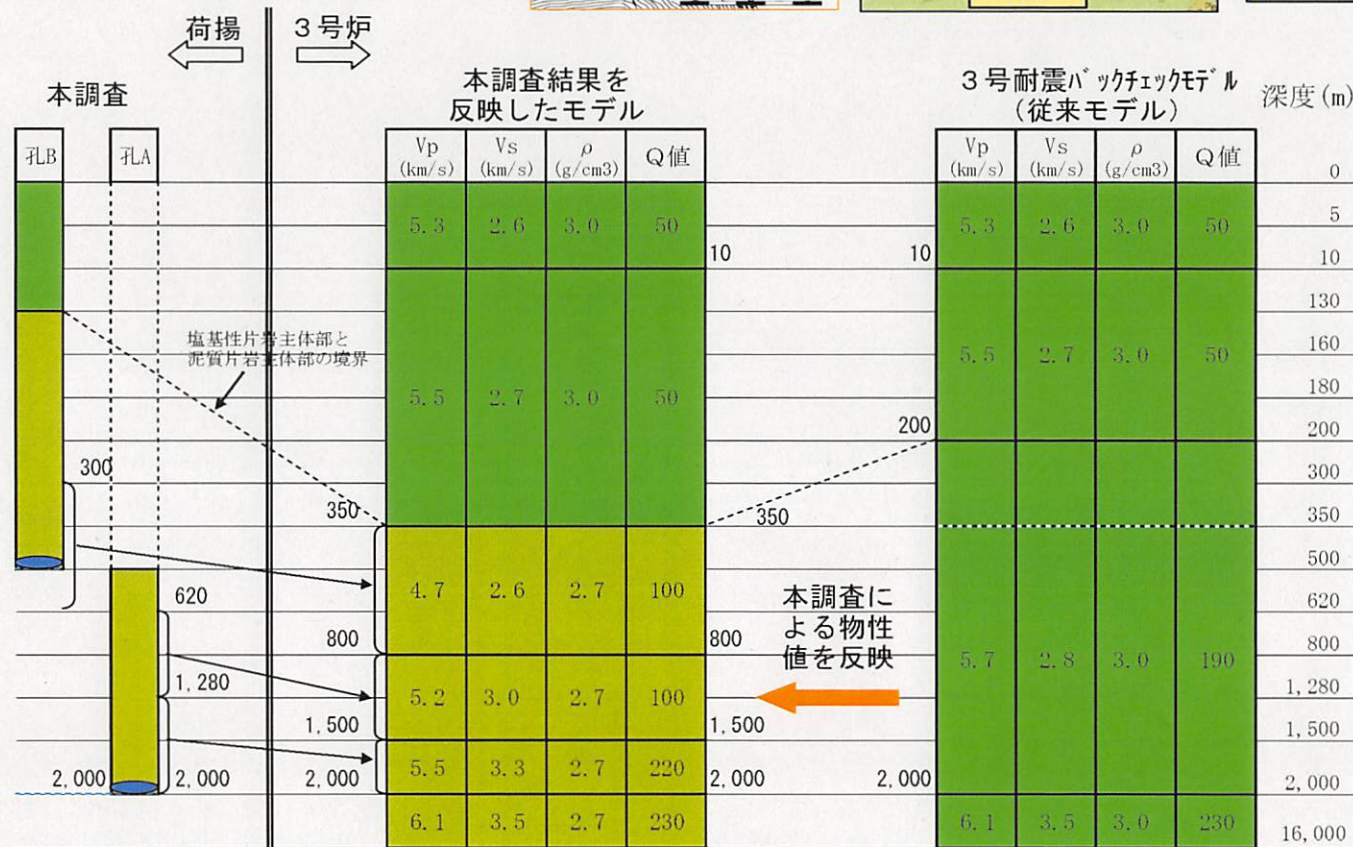
# 本調査による物性値を反映した地盤モデル

・本調査結果によると、従来モデルと比較し、Vsはほぼ同等もしくはやや大きめ、Vp, 密度, Q値はやや小さめである。



【凡例】

- : 地震計設置位置
- : 塩基性片岩主体層
- : 泥質片岩主体層





# P波速度、S波速度の設定の考え方

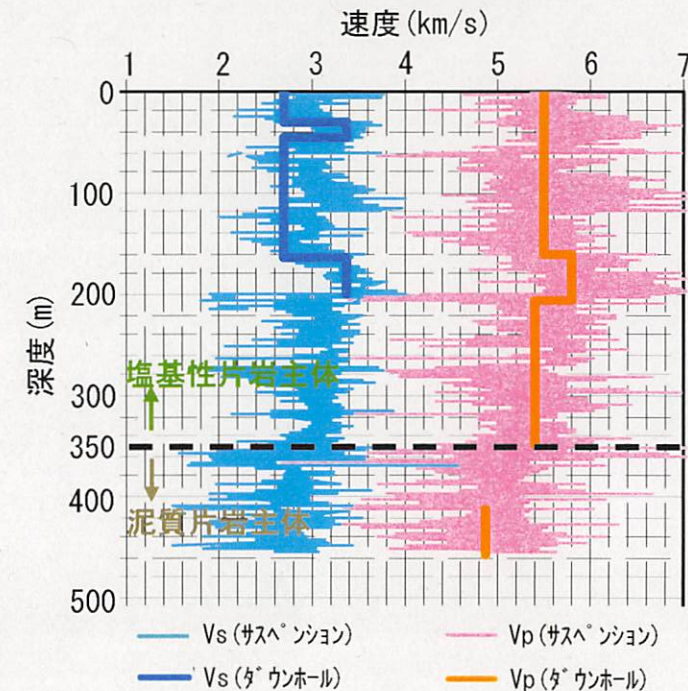
- ・ Vp, Vsについて、深度350m以浅の塩基性片岩主体層は3号炉心位置における測定データによる物性値を採用。
- ・ 深度350～800mの泥質片岩主体層については、本調査による物性値と3号炉心位置の測定データが整合的であることを確認した上で、本調査による物性値を採用。

本調査結果反映モデル

| 地表からの深度 (m) | Vp (km/s) | Vs (km/s) | 設定根拠                                                                                                           |
|-------------|-----------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0～10        | 5.3       | 2.6       | Vp: 試掘坑における測定値<br>Vs: "                                                                                        |
| 10～350      | 5.5       | 2.7       | 10～200<br>Vp: Vsと $\nu$ (動弾アソビ比)より算定<br>Vs: 原位置のPS検層 (ダウンホール法) 測定値                                             |
|             |           |           | 200～350<br>上記の10～200mの物性値を採用<br>Vp: 原位置のPS検層 (ダウンホール法) 測定値と整合的<br>Vs: 原位置のPS検層 (サスペンション法) 測定値と整合的              |
| 350～800     | 4.7       | 2.5       | 本調査による深度300～620mのPS検層 (ダウンホール法) による測定値を採用<br>Vp: 原位置のPS検層 (ダウンホール法) 測定値と整合的<br>Vs: 原位置のPS検層 (サスペンション法) 測定値と整合的 |
| 800～1,500   | 5.3       | 3.0       | 本調査による深度620～1,280mのPS検層 (ダウンホール法) による測定値を採用                                                                    |
| 1,500～2,000 | 5.5       | 3.3       | 本調査による深度1,280～2,000mのPS検層 (ダウンホール法) による測定値を採用                                                                  |

黒字: 3号炉心における測定値を採用、赤字: 本調査による測定値を反映

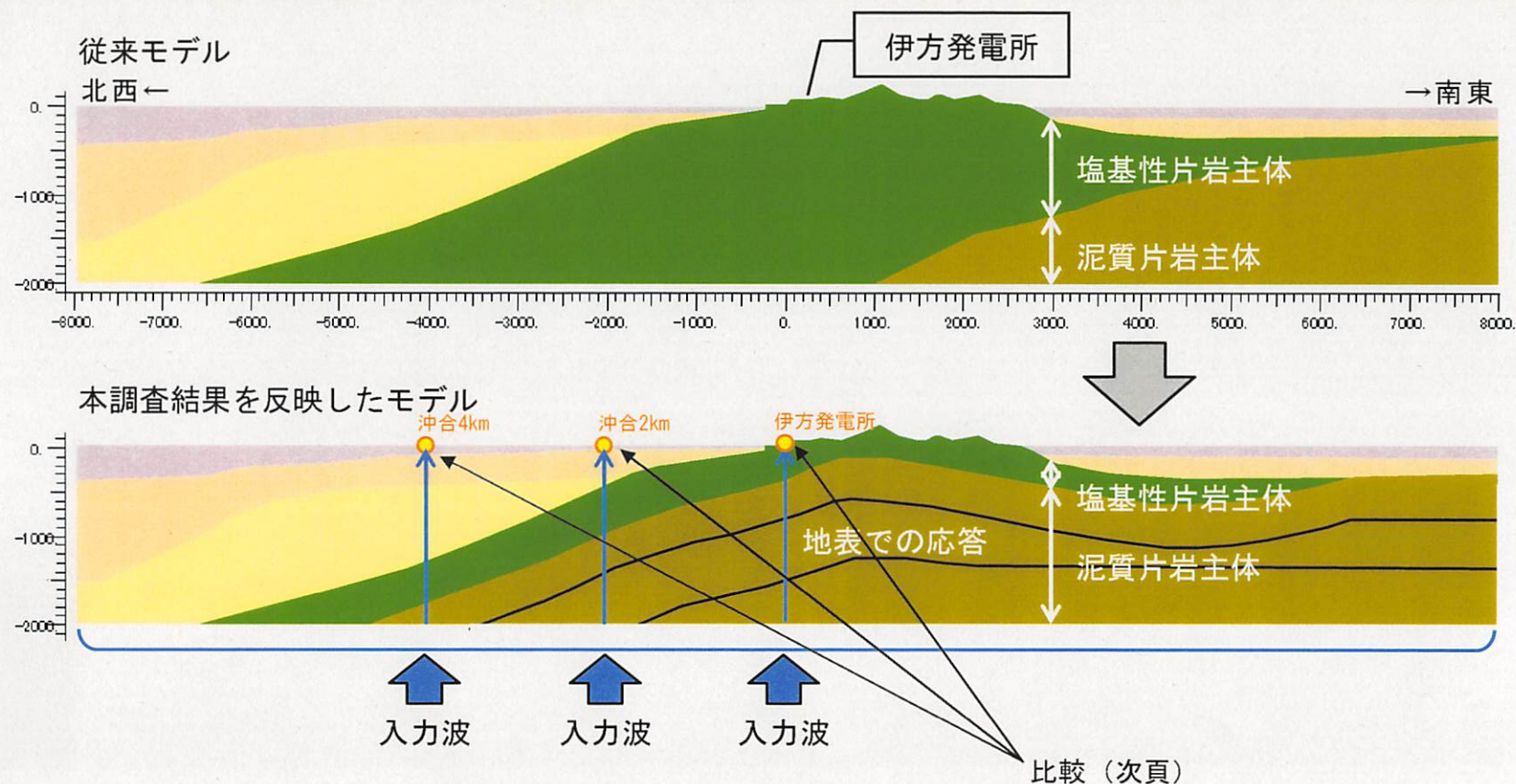
3号炉心PS検層結果





## 2次元地盤構造モデル

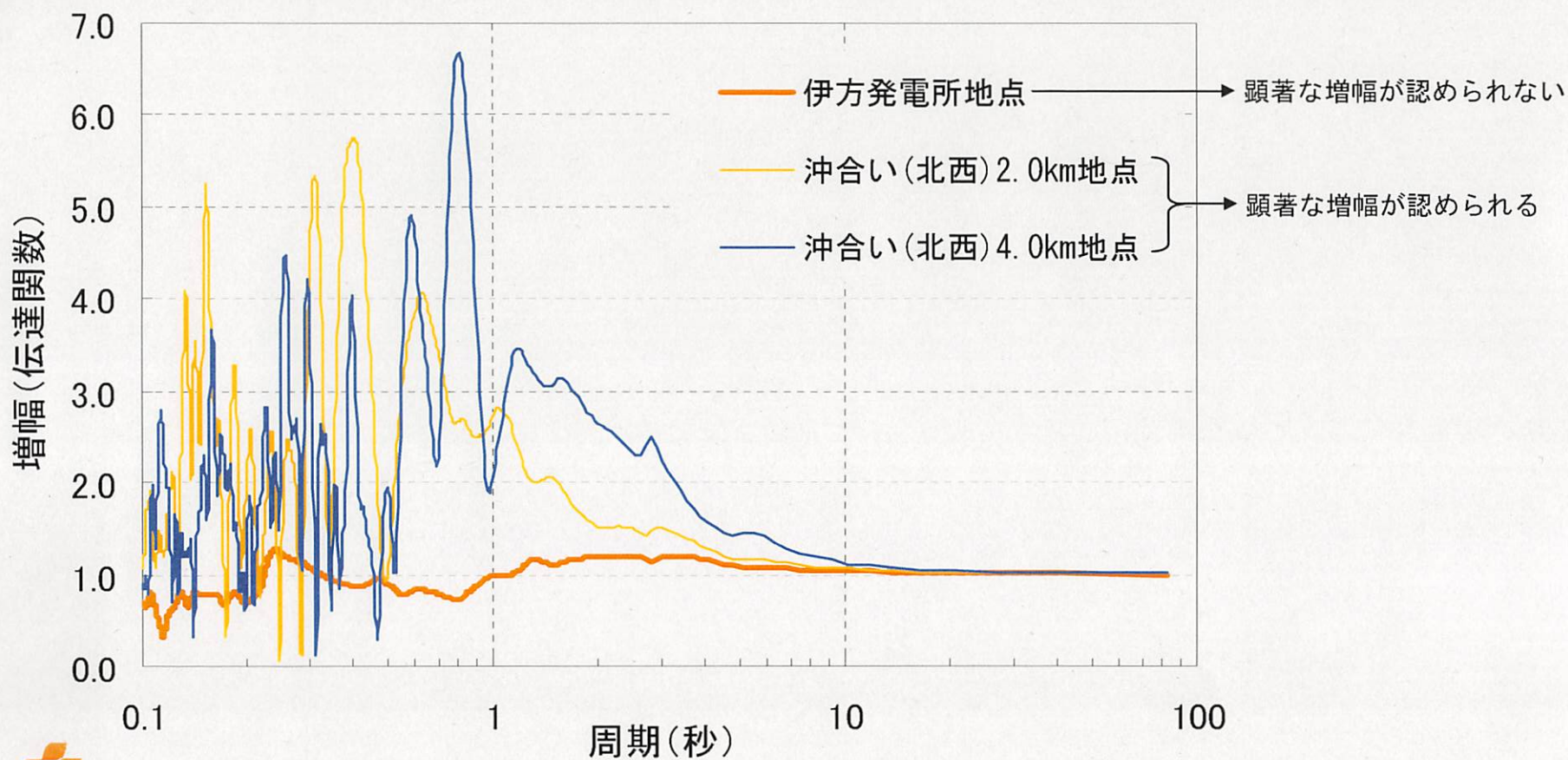
- ・ 佐田岬半島と直交方向の2次元断面で地盤増幅特性を検討する。
- ・ 本調査で実施した深部ボーリングで得られた地盤物性に加え、敷地近傍および周辺の地質調査結果、さらには既存の海域調査結果等を踏まえ、敷地を中心とした2次元地盤構造モデルを設定し、地盤増幅特性について解析的検討を行った。





## 地盤増幅特性①

沖積層が厚く堆積している発電所沖合いでは顕著な増幅が認められるが、伊方発電所地点における増幅は沖合いより大幅に小さく(沖合いの方が増幅が大きく)、地震動の顕著な増幅は認められない。



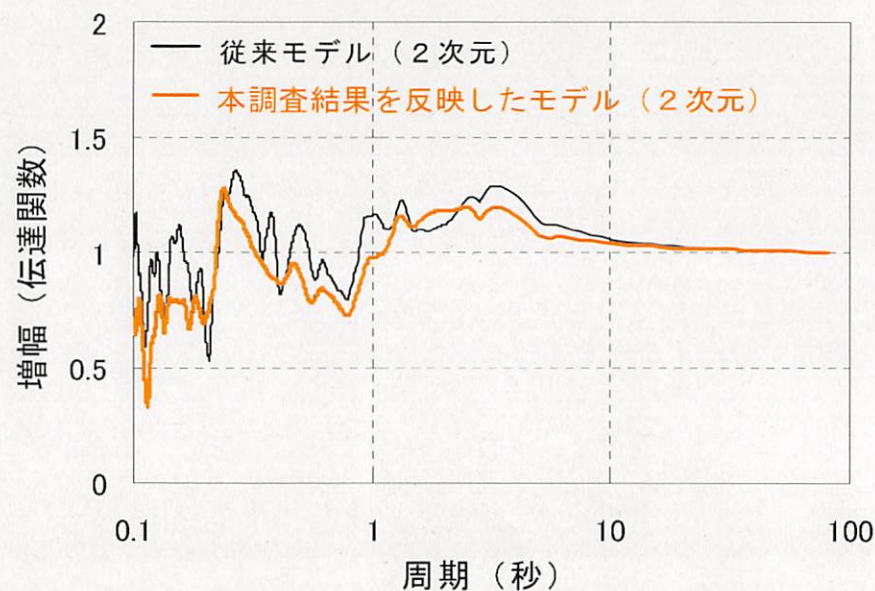
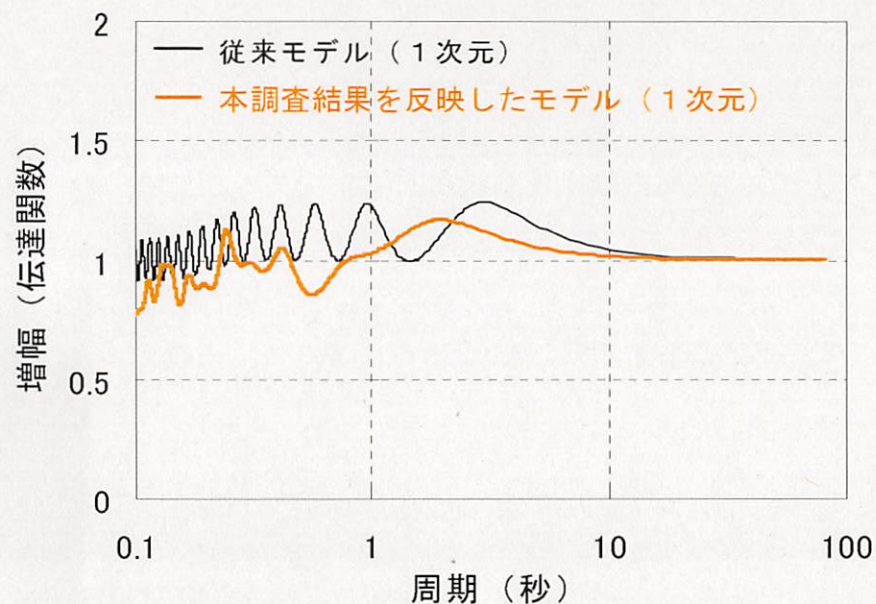


## 地盤増幅特性②

従来モデルと本調査結果を反映したモデルのいずれも増幅(伝達関数)は1前後であり、地震動の顕著な増幅は認められない。

1次元および2次元いずれのモデルにおいても、本調査結果を反映したモデルの伝達関数は、全般に従来モデルの伝達関数と比較してほぼ同等またはそれ以下である。

したがって、伊方発電所において地下構造に起因する地震動の顕著な増幅は認められず、本調査によって従来の地盤モデルが地震動評価上妥当であることを確認できた。





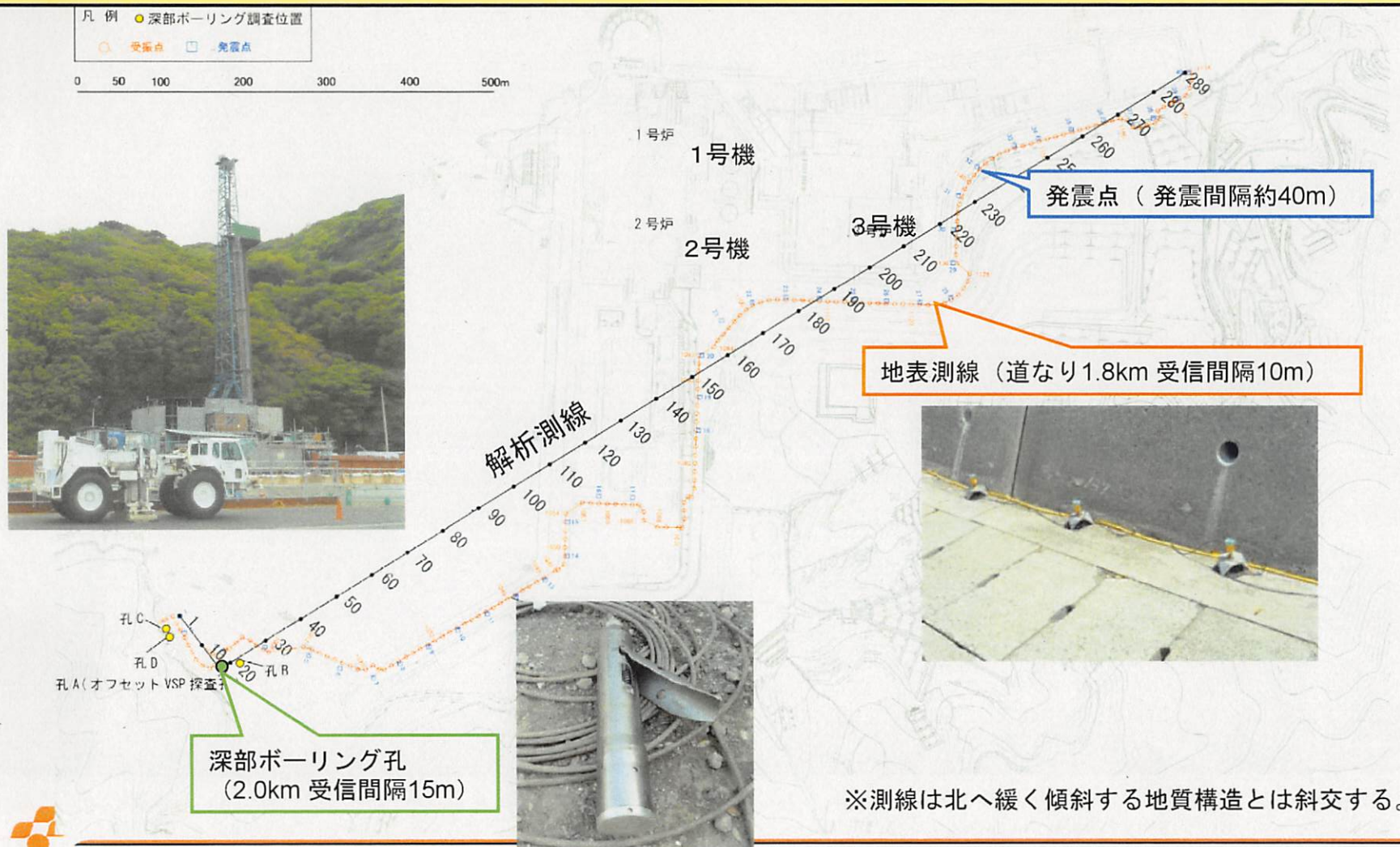
## 2. 深部ボーリング等による評価について

- 2.1 調査概要
- 2.2 地質・地質構造
- 2.3 地盤物性
- 2.4 地盤増幅特性
- 2.5 敷地の地下構造評価



# オフセットVSP探査測線図

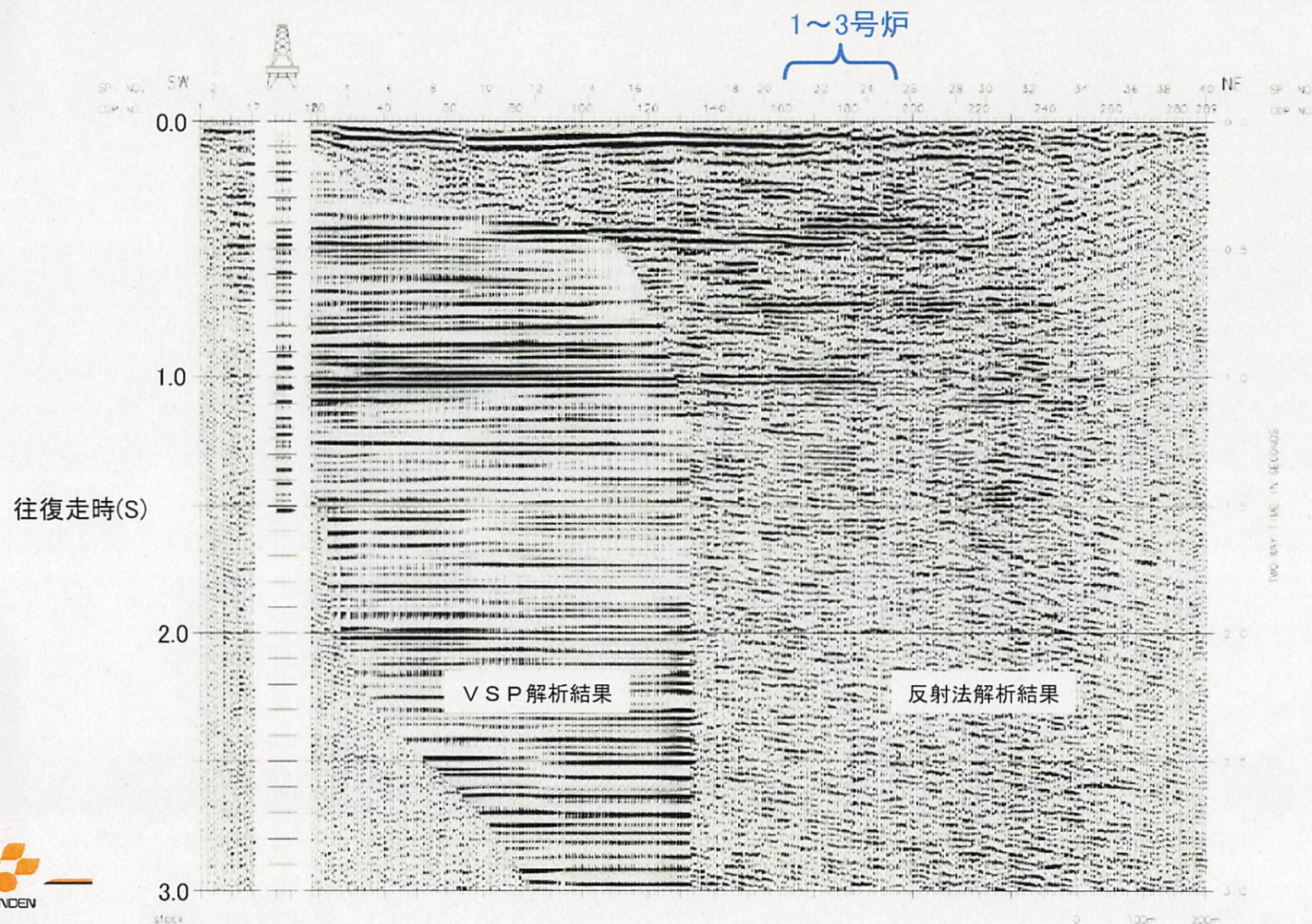
・孔A(深度2,000m)と3号炉心付近とを結ぶ測線でオフセットVSP探査(Vertical Seismic Profiling: 鉛直地震探査)を行い、反射法解析、VSP解析、トモグラフィ解析により敷地の速度構造について検討した。





# オフセットVSP探査結果(時間断面)

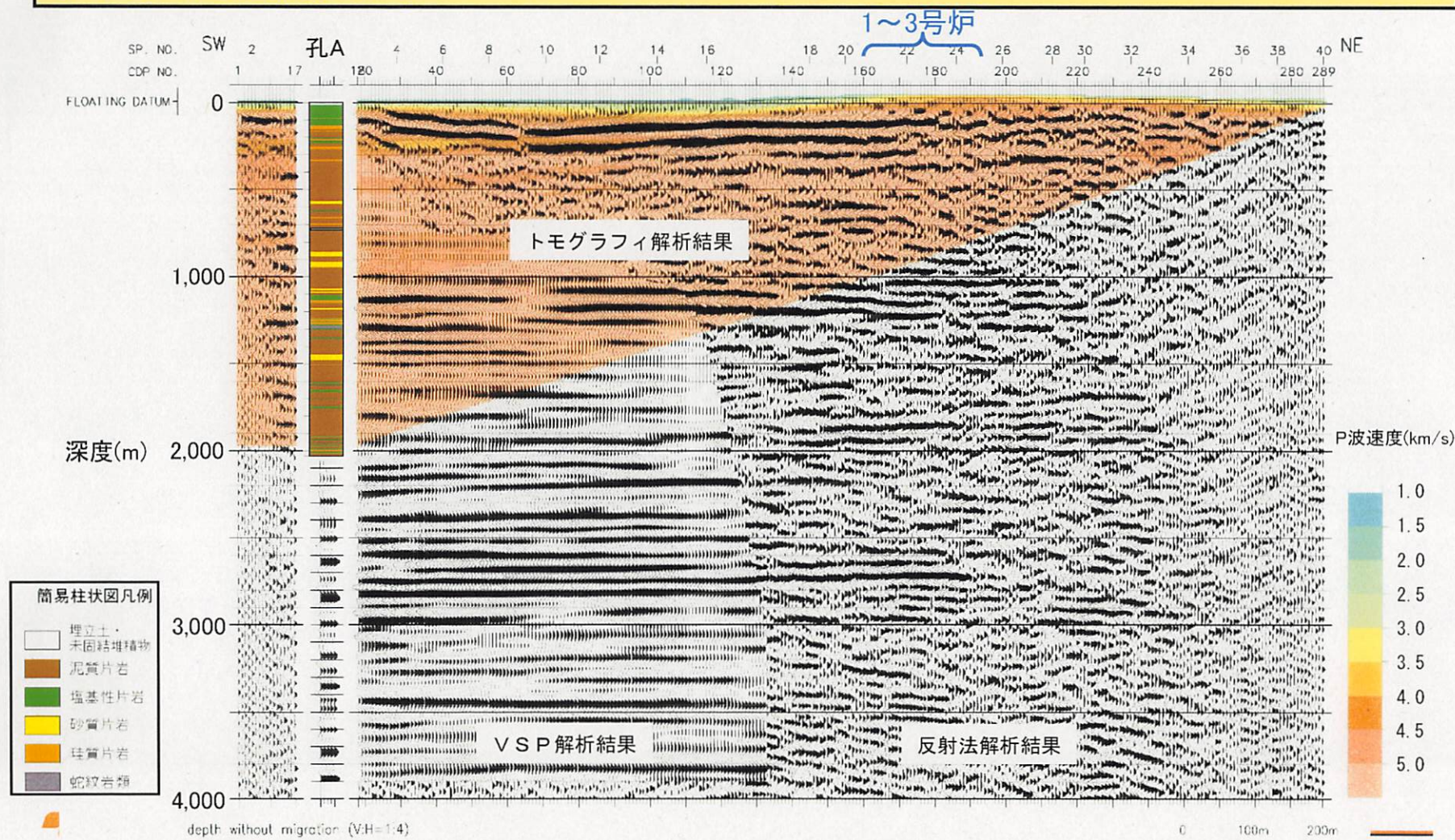
・地下深部までほぼ水平な反射面が連続し、地震動の特異な増幅の要因となる褶曲構造は認められず、敷地の地盤の速度構造は成層かつ均質と評価される。1～3号炉の下方に水平な反射面が連続し、各々の地下構造に差は認められない。





# オフセットVSP探査結果(深度断面)

・敷地の地盤は極浅部を除けば $V_p=5\text{km/s}$ を上回る。地震動の特異な増幅の要因となる低速度域及び褶曲構造は認められず、敷地の地盤の速度構造は成層かつ均質と評価される。1～3号炉の下方に水平な反射面が連続するとともに $V_p=5\text{km/s}$ 以上で均質であり、各々の地下構造に差は認められない。





## 敷地の地下構造評価

- ・ オフセットVSP探査によると、地下深部までほぼ水平な反射面が連続し、地震動の特異な増幅の要因となる褶曲構造は認められない。また、敷地の地盤は極浅部を除けば $V_p=5\text{km/s}$ を上回り、地震動の特異な増幅の要因となる低速度域は認められない。以上より、敷地の地盤の速度構造は成層かつ均質と評価される。
- ・ 敷地内におけるボーリング調査や地表踏査等によると、1～3号炉付近には地下数百m程度まで広く塩基性片岩が分布する。敷地の三次元的な地下地質構造は、東西方向にはほとんど水平であり、南北方向には北へ傾斜するものの緩やかである。
- ・ 緩く北傾斜する地質構造は岩盤の速度および密度が非常に大きく、かつ水平方向・深度方向にも大きな変化は認められない（インピーダンス比が小さい）。したがって地震動を増幅させるような地下構造ではないと言える。これらについては、2次元断面で解析的検討を行った結果においても確認できた。
- ・ 以上より、敷地の地下構造は特異な地盤増幅を示すものではない。



### 3. まとめ



## まとめ

- ・地震観測記録の分析によると、敷地の浅部地盤（GL-160m～地表間）による増幅はほとんどなく、到来方向によって増幅特性が異なるような傾向も確認されない。
- ・敷地近傍には広く塩基性片岩露頭が分布し、地下浅部に厚さ数百m程度の塩基性片岩主体層が分布する。地下深部には泥質片岩主体層が分布し、佐田岬半島に沿って開いた背斜（緩く凸状）を示す。敷地近傍の三次元的な地質構造はほぼ水平であり、敷地の地質構造としては地下深部で北へ緩く傾斜しているものと評価される。
- ・地下浅部から地下深部まで非常に速い速度（ $V_s=2.2\sim3.3\text{km/s}$ ）を示し、深度方向に漸増するものの、地震動増幅の要因となるインピーダンス比は小さい。深度2,000mは地震基盤（ $V_s=3.5\text{km/s}$ ）に相当する。
- ・オフセットVSP探査結果によると、地下深部までほぼ水平な反射面が連続し、地震動の特異な増幅の要因となる低速度域及び褶曲構造は認められず、敷地の地盤の速度構造は成層かつ均質と評価される。また、1～3号炉の各々の地下構造に差は認められない。
- ・これまで情報量の少なかった深度200mから地震基盤（深度2,000m）の地盤物性データを充実させ、地下構造を原因とする顕著な地震動の増幅がないことおよび従来の地盤モデルが地震動評価上妥当であることを確認できた。
- ・今後、深度2,000m孔を用いた鉛直アレー観測、さらには既設地震計を加えた水平アレー観測を行い、地震観測記録を蓄積して地盤増幅特性の評価をさらに高度化し、信頼性向上に努めていく。