

伊方発電所深部地震観測に係る 工事・調査結果について(詳細データ集)

1. 工事概要
2. 地質・地質構造
3. 地盤物性
4. 地盤増幅特性
5. まとめ

平成25年7月31日
四国電力株式会社



1. 工事概要



1.1 背景

H19.7 新潟県中越沖地震

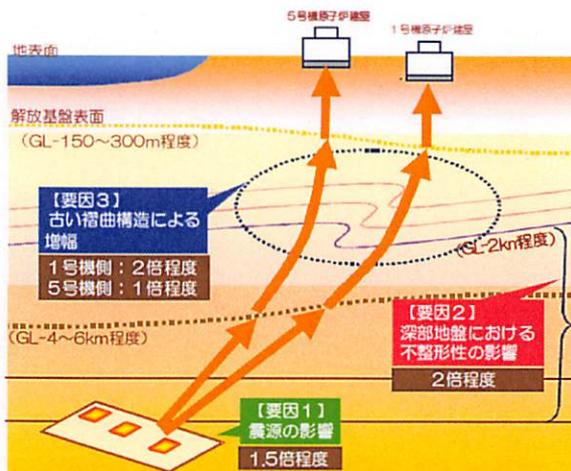
↓
・柏崎刈羽で、**深部地盤構造を原因とする地震動増幅**により、設計時の想定をはるかに上回る地震動を観測

H21.8 駿河湾地震

↓
・浜岡5号機で、**深部地盤構造が原因**と考えられる大きな地震動を観測

伊方3号耐震バックチェックにおける原子力安全委員会からのご指摘

・今後の課題として、情報量が少ない深度200m～2,000m(地震基盤)付近について、**深部ボーリング調査や地震観測を行い地盤構造モデルの精度向上に努めるべき**

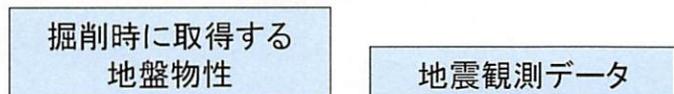


柏崎刈羽における地震動増幅イメージ



1.2 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、大深度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



地盤構造モデルの精度向上

地盤増幅特性の把握

以下の項目からなる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】

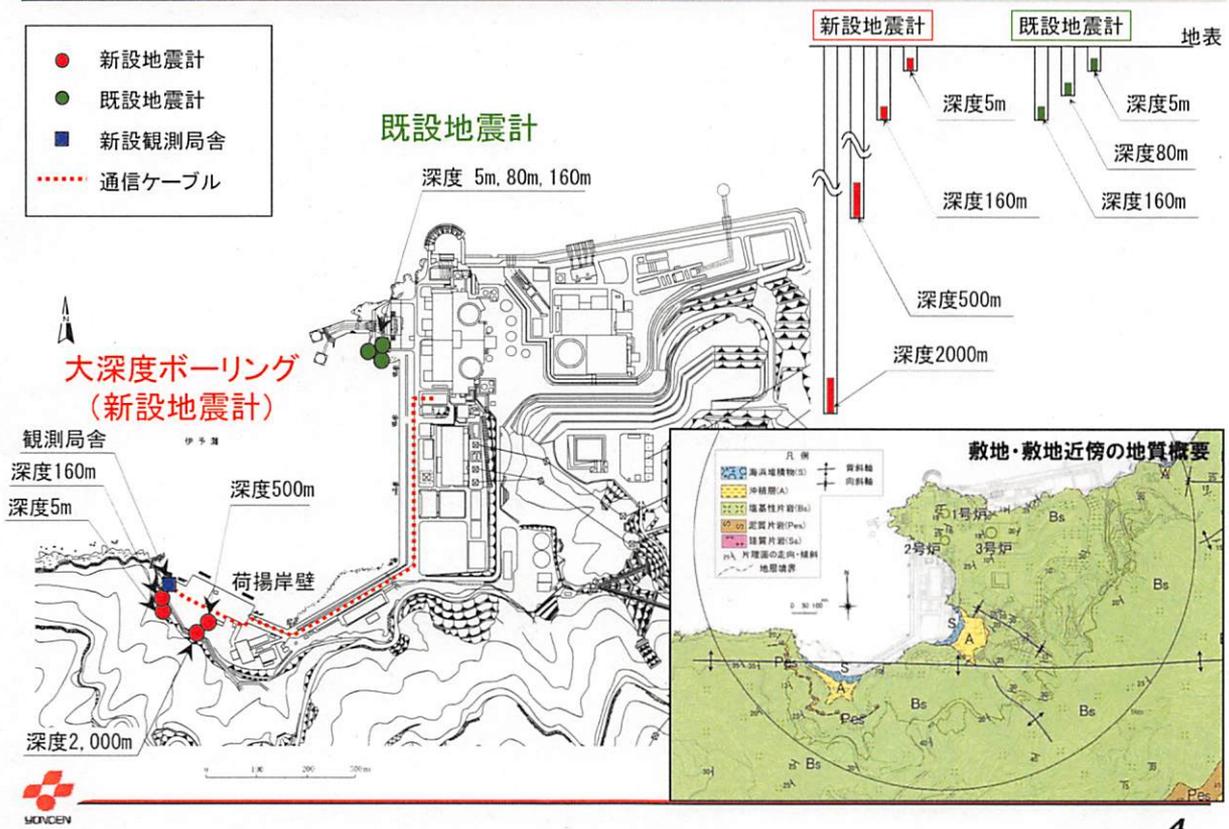
- ・孔、岩石コアを利用した地盤物性取得



地震計設置断面図



1.3(1) 工事概要(工事位置)



4

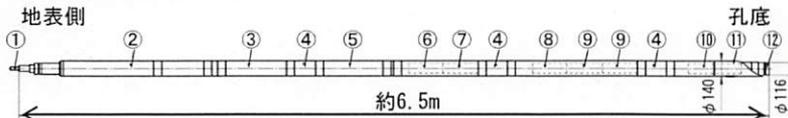
1.3(2) 工事概要(地震計の概要)

深部地震計 (深度2,000m,500m)

強震動観測のための加速度計、微小地震観測のための速度計および、地殻変動観測、地震計の姿勢制御・管理のための傾斜計を設置。(独)防災科学技術研究所で実績がある地震計を参考に設計。

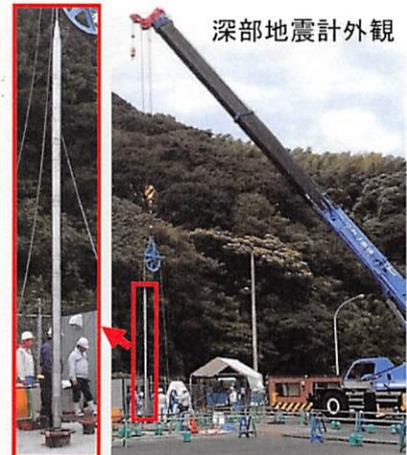
浅部地震計 (深度160m,5m)

既設地震計と同深度に、同様の仕様の加速度計を設置し、深部から浅部にかけての増幅特性、さらには既設地震計と組み合わせて平面的な増幅特性について把握する。



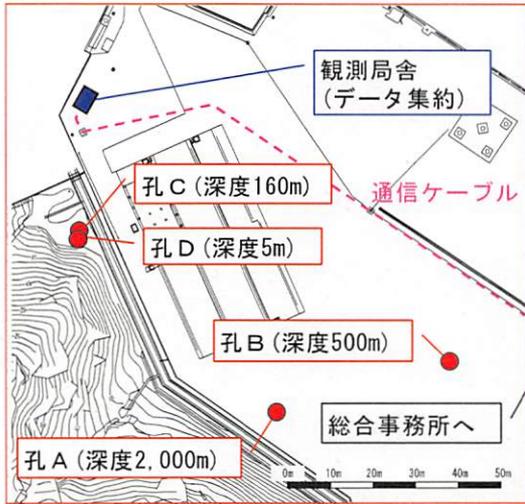
番号	名称	番号	名称
①	信号ケーブル	⑦	サーボ型加速度計 (3成分)
②	ケーブルヘッド	⑧	速度地震計 (上下動)
③	ケーシング・カラーロケーター	⑨	速度地震計 (水平動)
④	耐圧容器固定器	⑩	傾斜計
⑤	地中制御器	⑪	方位設定器
⑥	過減衰型加速度計 (3成分)	⑫	着底・水漏検知器

孔 A (深度2,000m) 地震計 構成図

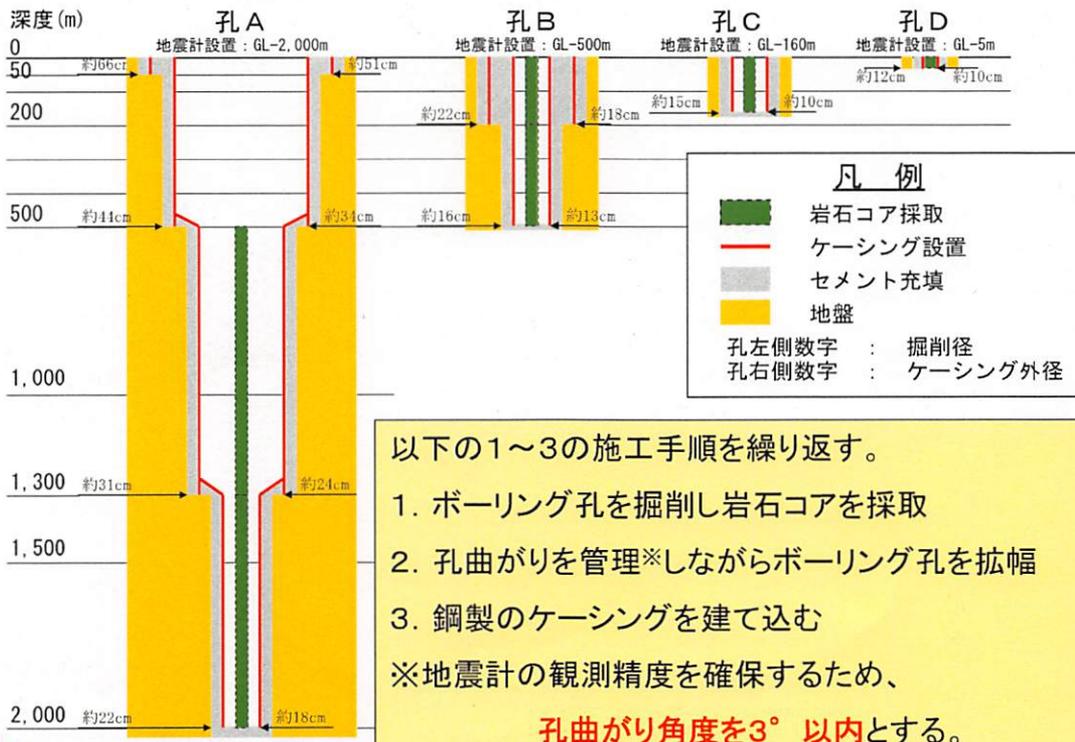


深部地震計外観

1.4 周辺状況



1.5 掘削工事



1.6 地質調査

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)

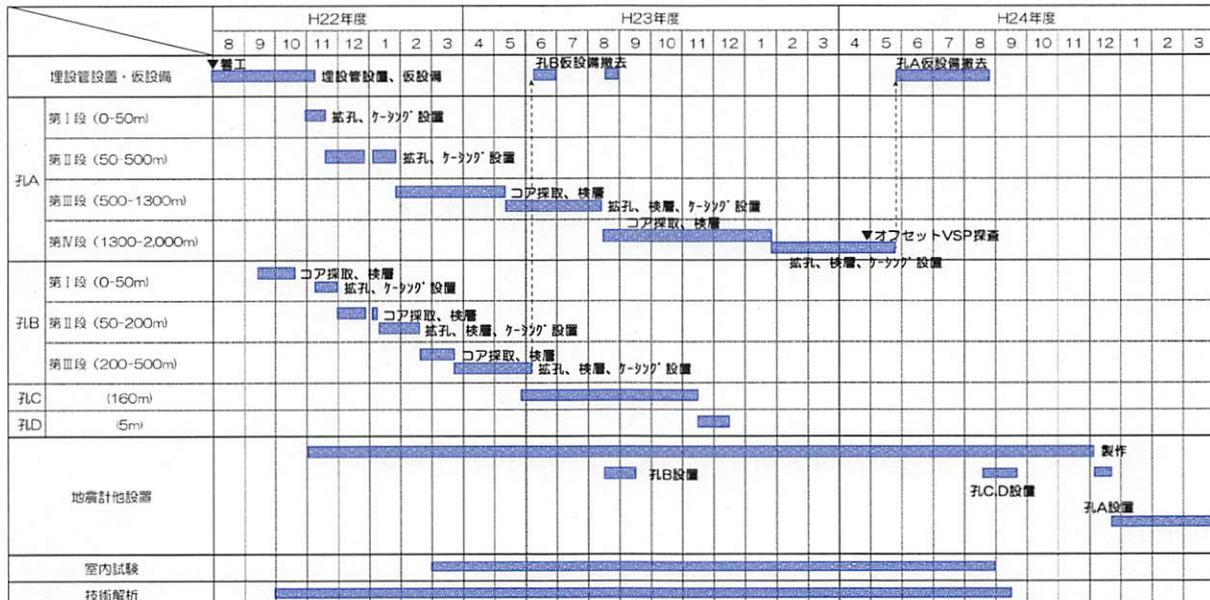
地盤物性

項目	測定物性	目的
PS検層	P波、S波速度 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 VSP探査	P波速度 (速度構造)	地盤構造モデルの精度向上(2次元断面)

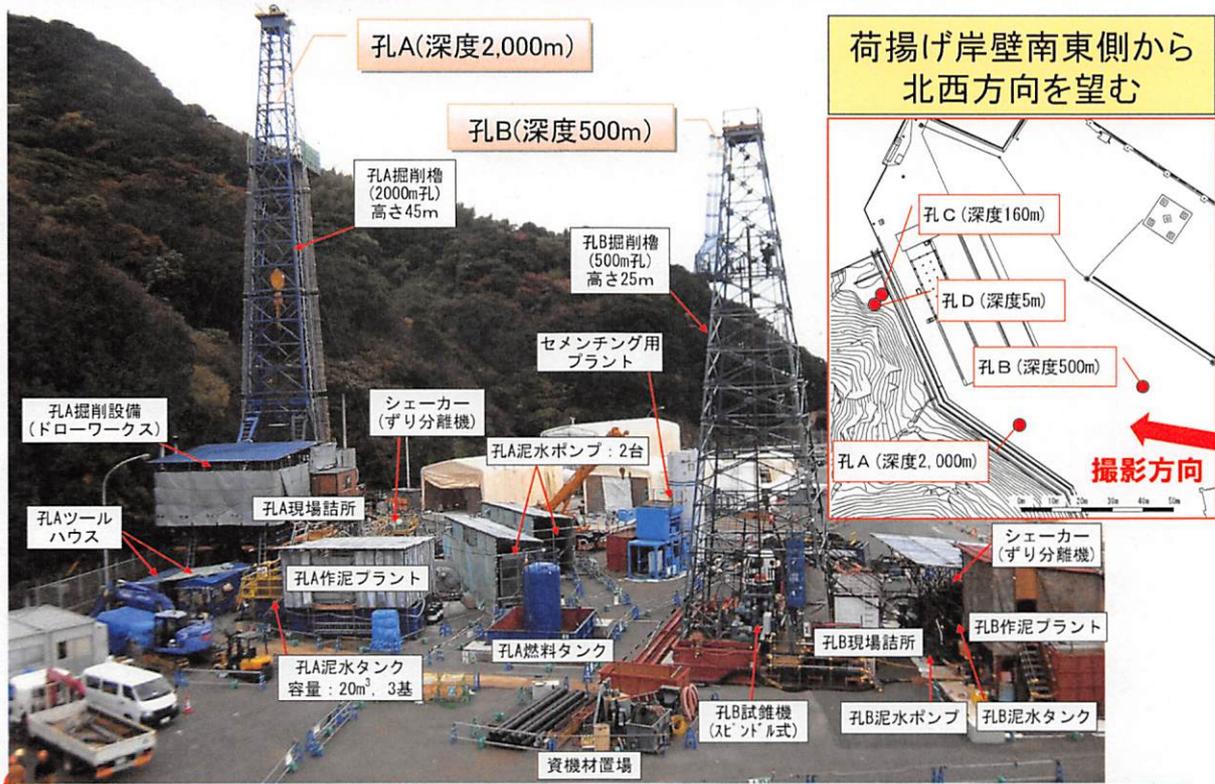


1.7 工程

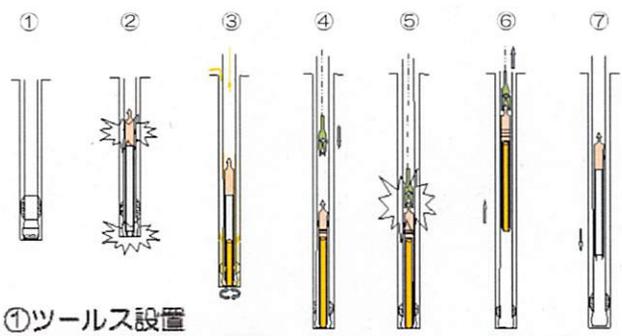
・平成22年8月から準備工事を開始し、平成24年12月に地震計を設置している。



1.8 現場状況(撮影:平成23年5月)



1.9 コア採取(ワイヤーライン工法)



コア採取



ビット先端部

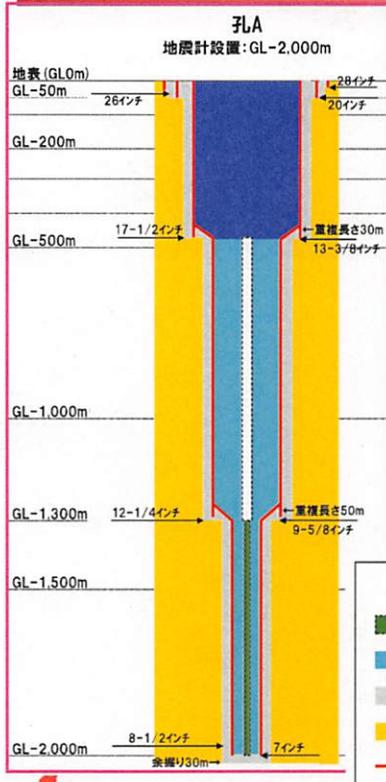


オーバーショット



インナーチューブ挿入

1.10 地震計設置のための孔拡幅



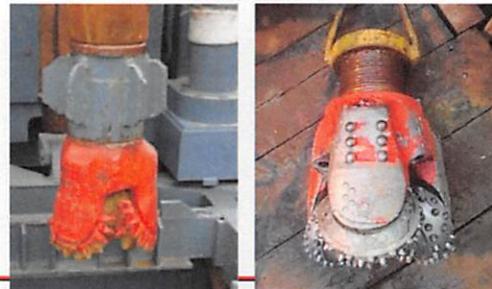
凡例

- コア採取
- 検層範囲 (掘削工の掘削範囲)
- セメント充填
- 地盤
- ケーシング設置

各孔左側数字 : 掘削径
各孔右側数字 : ケーシング外径



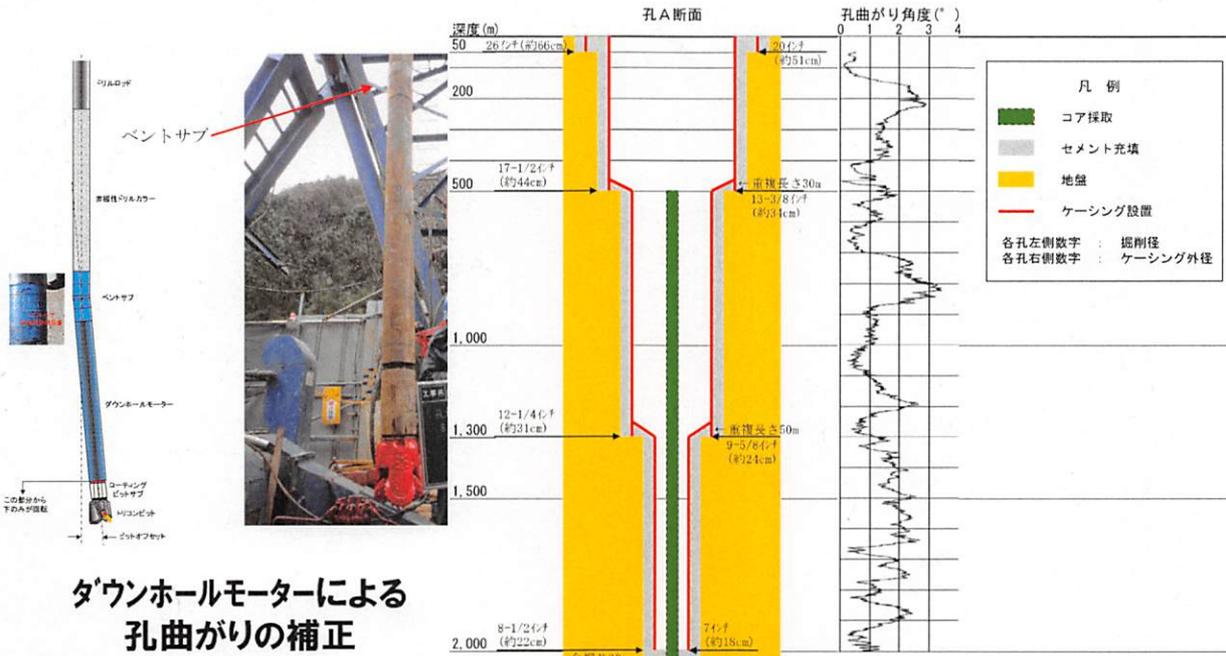
掘削状況



トリコンビット

1.11 孔曲がりの管理

・孔A(深度2,000m)における孔底の孔曲がりを約1°に抑制



ダウンホールモーターによる
孔曲がりの補正

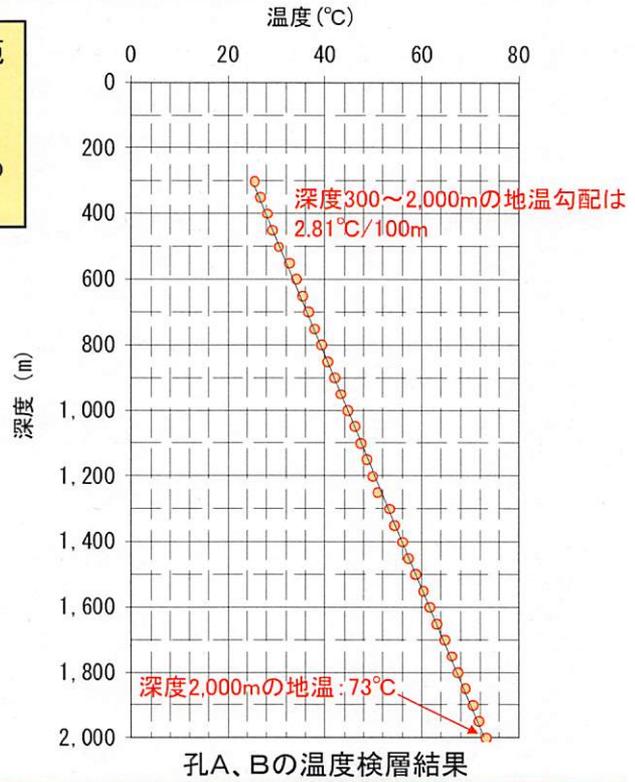


1. 12 地温の測定

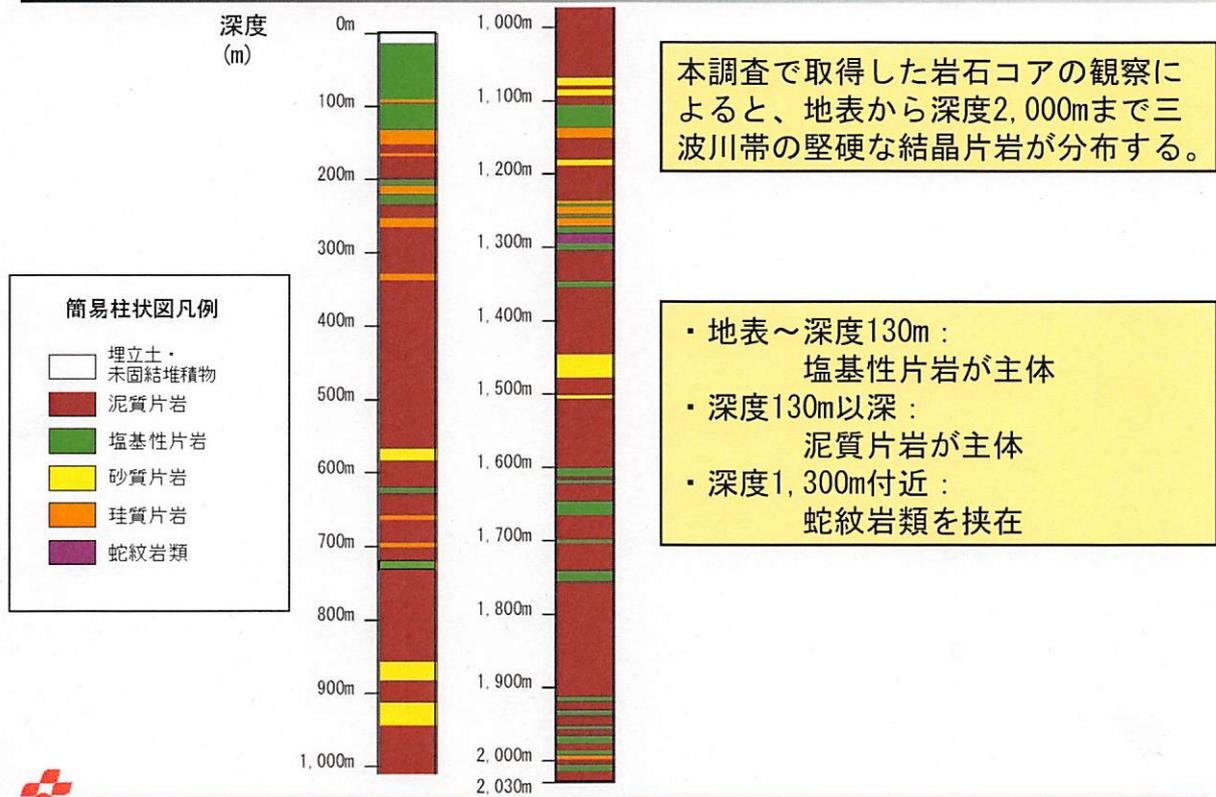
・ボーリング孔を利用した温度検層を実施し、孔Aの深度2,000mにおける地温は73°Cであり、孔Aの孔底に設置する地震計の耐温限界である86°Cを十分に下回ることを確認した。

【補足】

- ・深度300~2,000mの地温勾配は、温度検層による50m毎の測定値の近似直線として求めた。
- ・深度300m以浅は地表からの影響範囲として除外した。

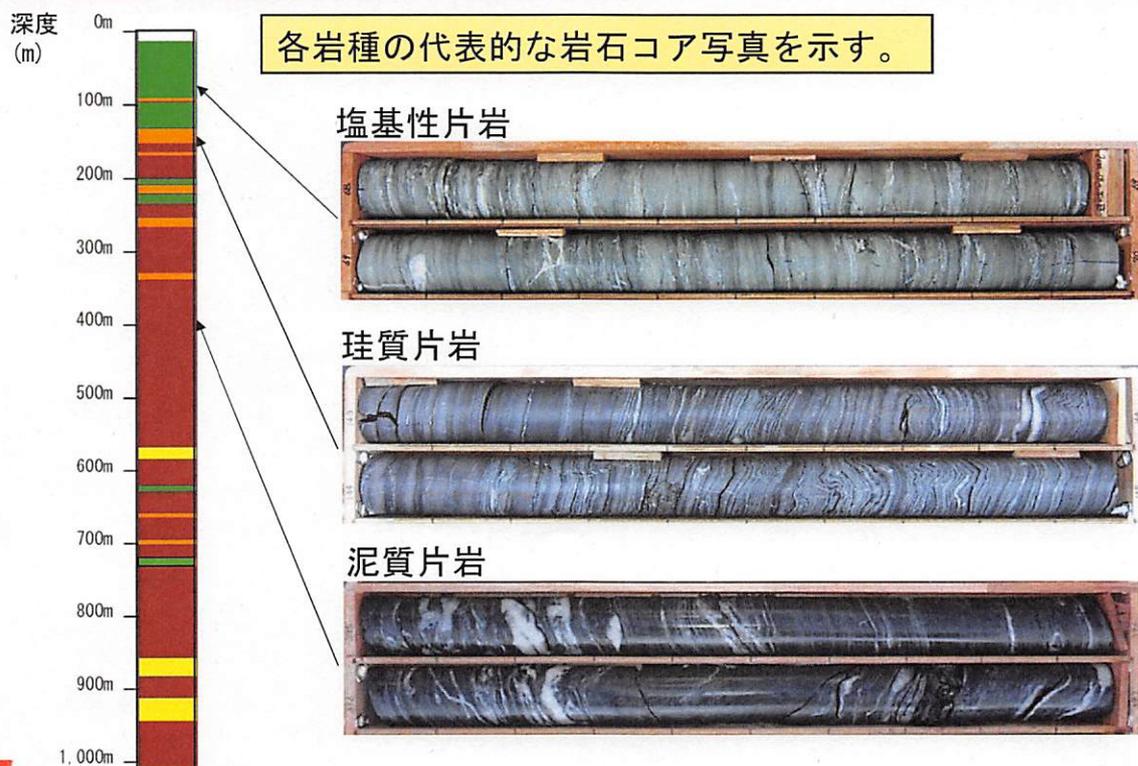


2. 2 (1) 岩石コアの観察結果 (簡易柱状図)



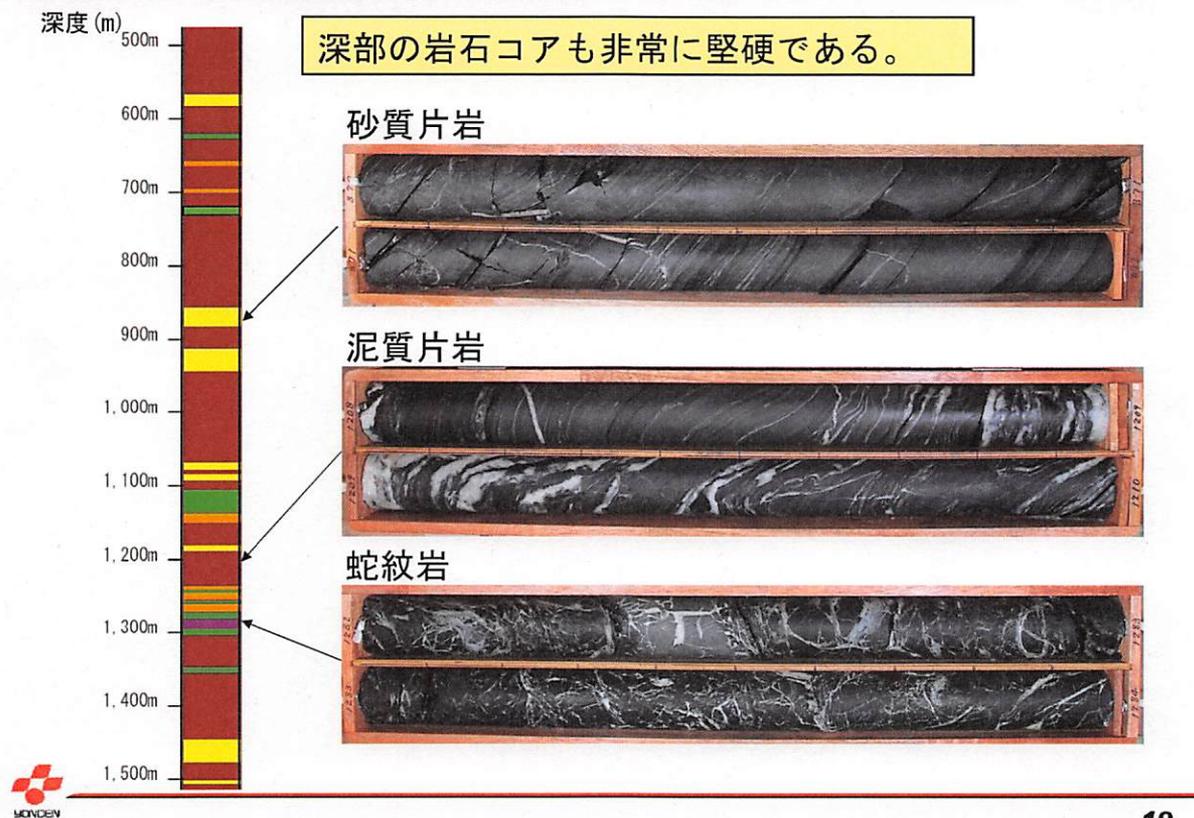
17

2. 2 (2) 岩石コアの観察結果 (コア写真①)



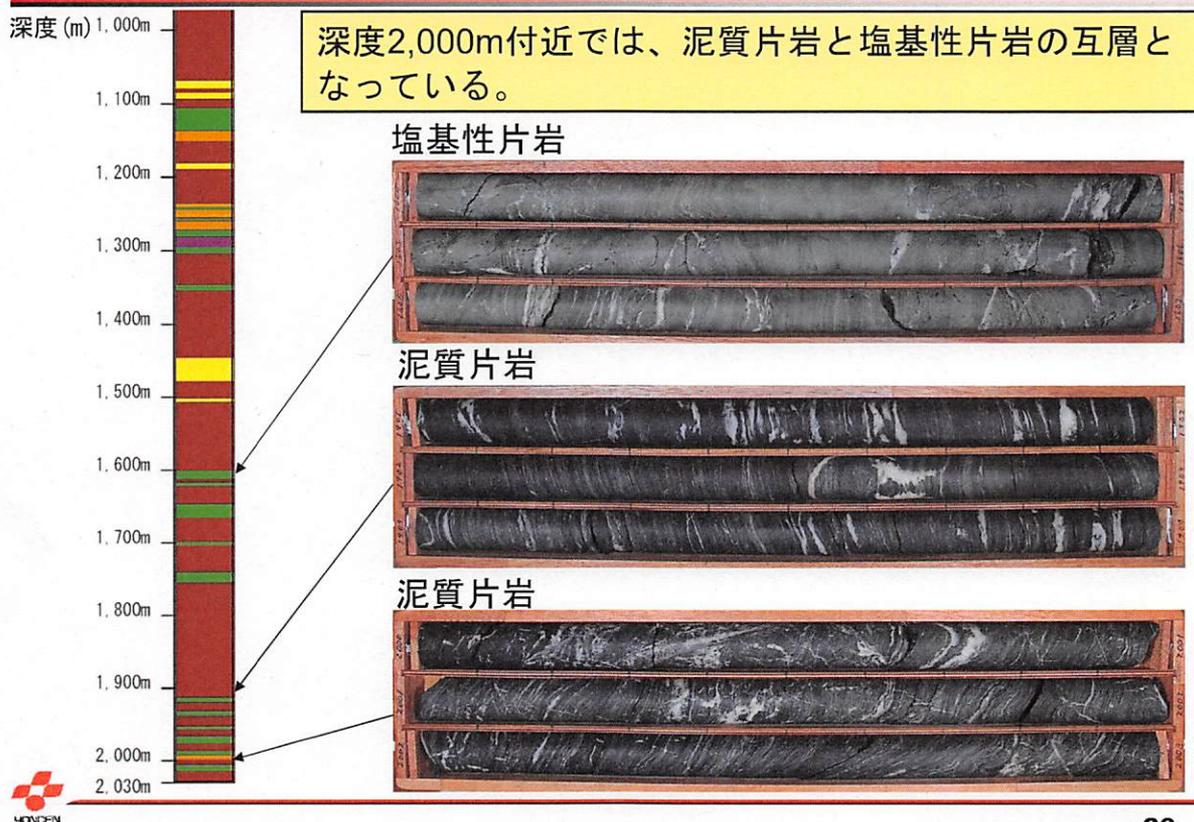
18

2.2(3) 岩石コアの観察結果 (コア写真②)



19

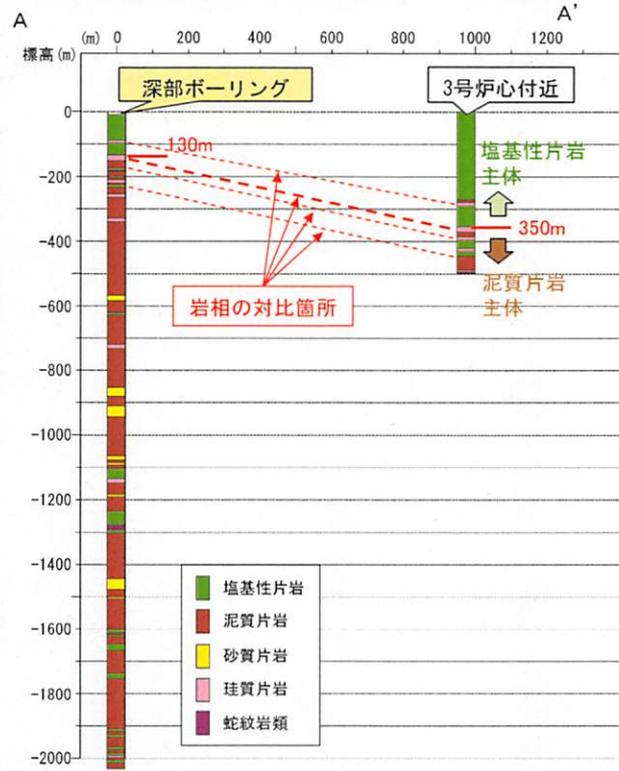
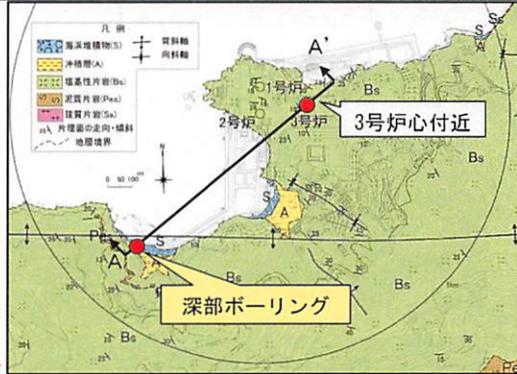
2.2(4) 岩石コアの観察結果 (コア写真③)



20

2.3 敷地の地質構造

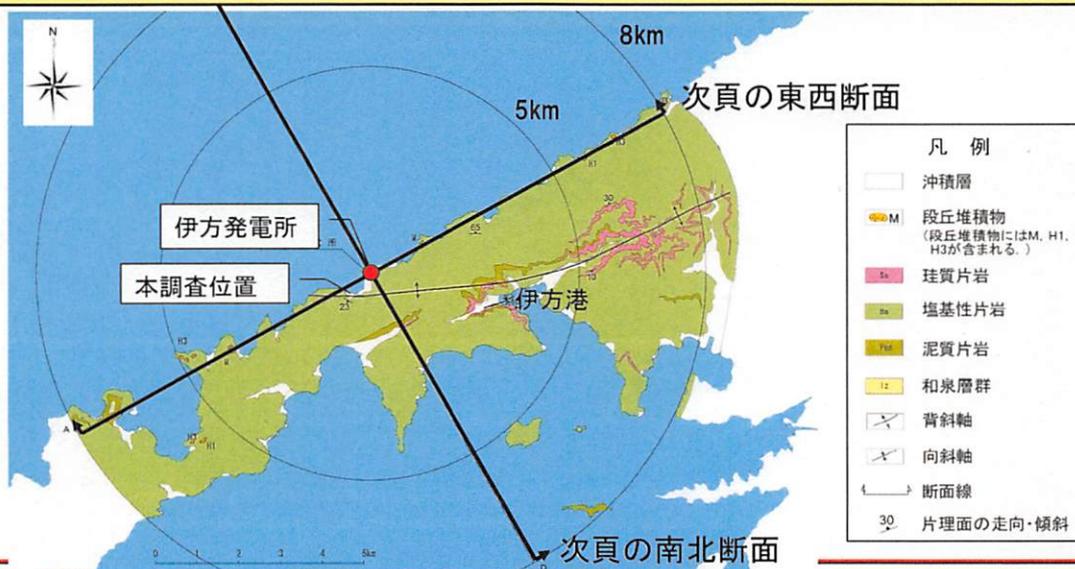
- ・敷地内のボーリングデータや地表踏査から、地下浅部に広く塩基性片岩が分布することを把握している。
- ・3号炉心付近の500mボーリングと岩相を対比した結果、本調査で確認した荷揚岸壁における泥質片岩主体層の上面（深度約130m）は、3号炉心付近における深度約350mに対比され、境界面は地下深部で北へ緩く傾斜しているものと評価される。



21

2.4(1) 敷地近傍の地質構造(平面図)

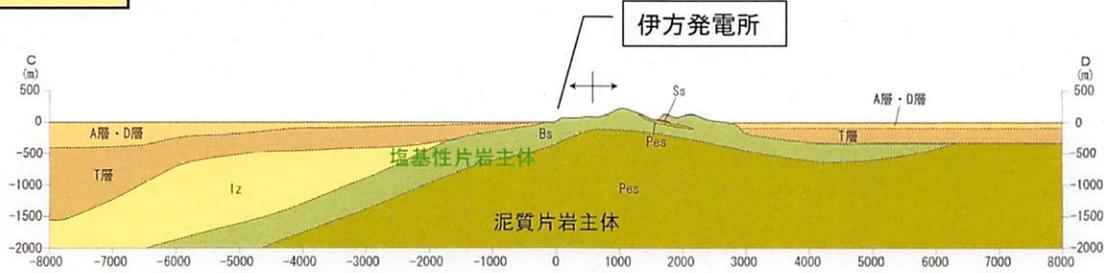
- ・敷地近傍には広く塩基性片岩露頭が分布し、地下浅部に厚さ数百m程度の塩基性片岩主体層が分布する。
- ・敷地近傍における地表踏査結果と深部ボーリング調査結果を総合すると、地下深部には泥質片岩主体層が分布し、佐田岬半島に沿って開いた背斜（緩く凸状）を示すと評価される。



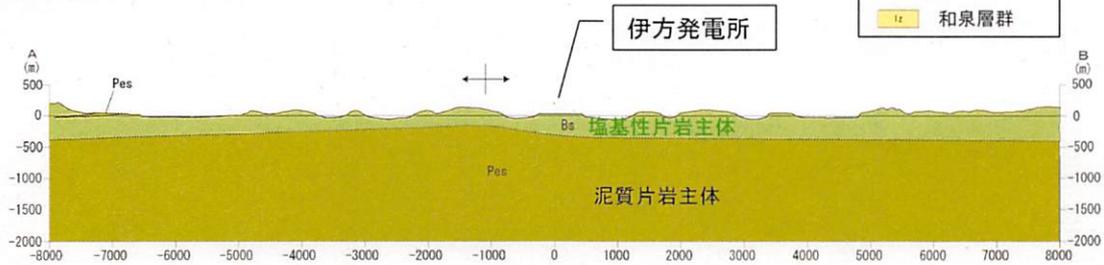
22

2.4 (2) 敷地近傍の地質構造(断面図)

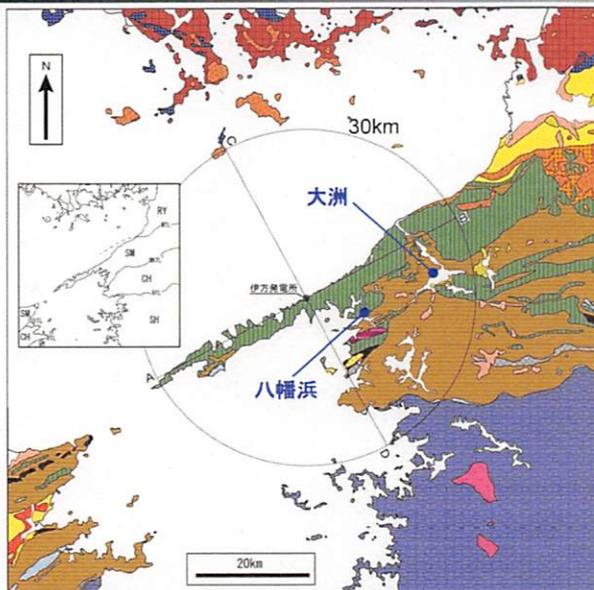
南北断面



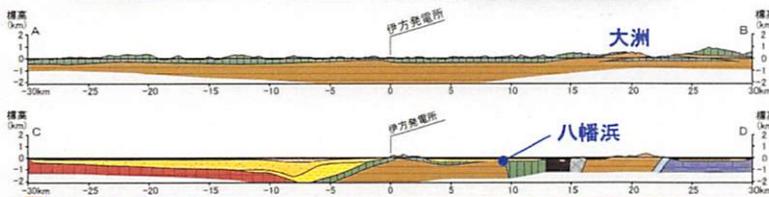
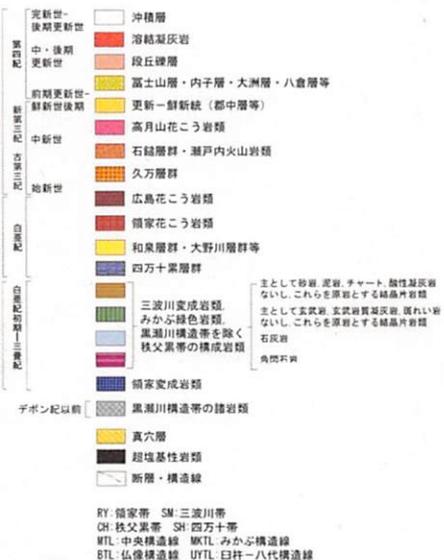
東西断面



2.5 敷地周辺の地質構造(平面図、断面図)



凡例

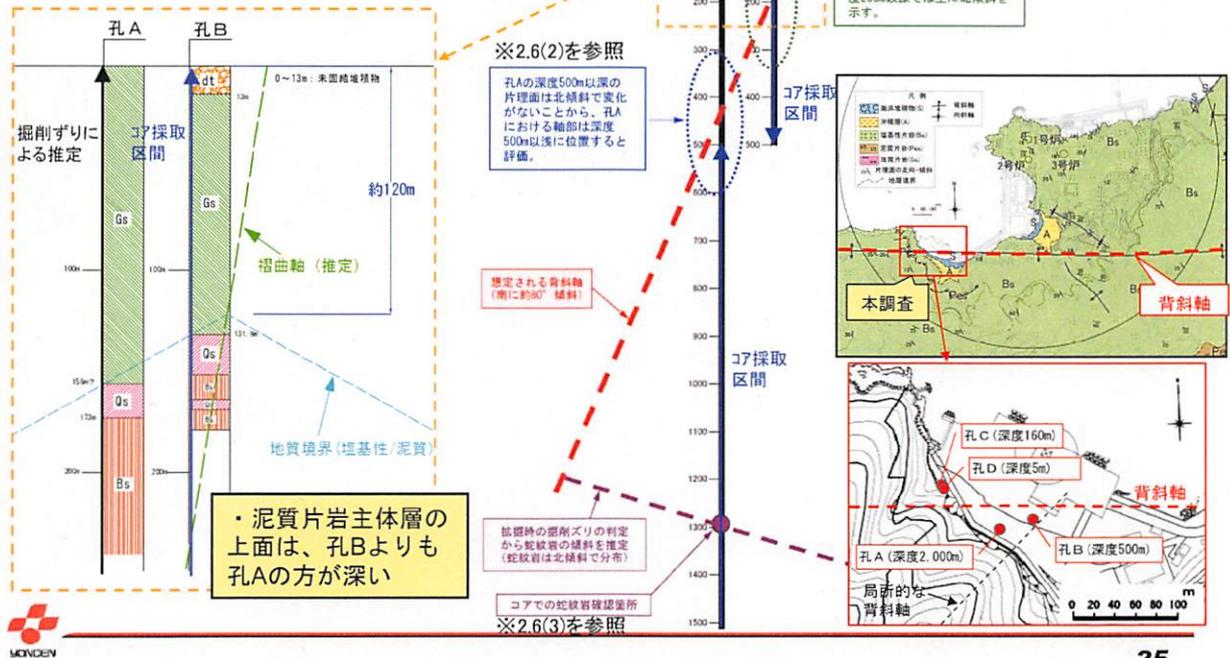


伊方発電所深部の泥質片岩主体層は大洲や八幡浜に対比される。



2.6(1) 敷地近傍の地質構造(背斜軸根拠①)

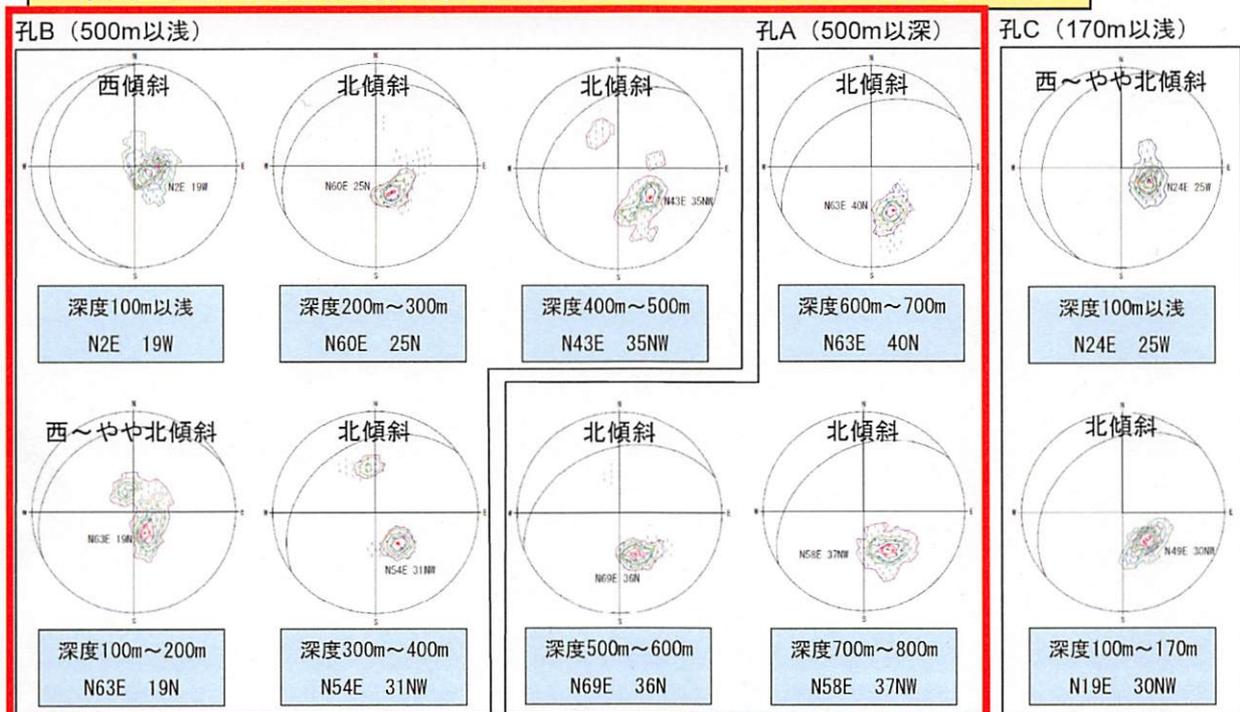
・本調査地点では、孔Bの北に東西走向でやや南に傾斜(約 80°)する背斜軸が想定される。



25

2.6(2) 敷地近傍の地質構造(背斜軸根拠②)

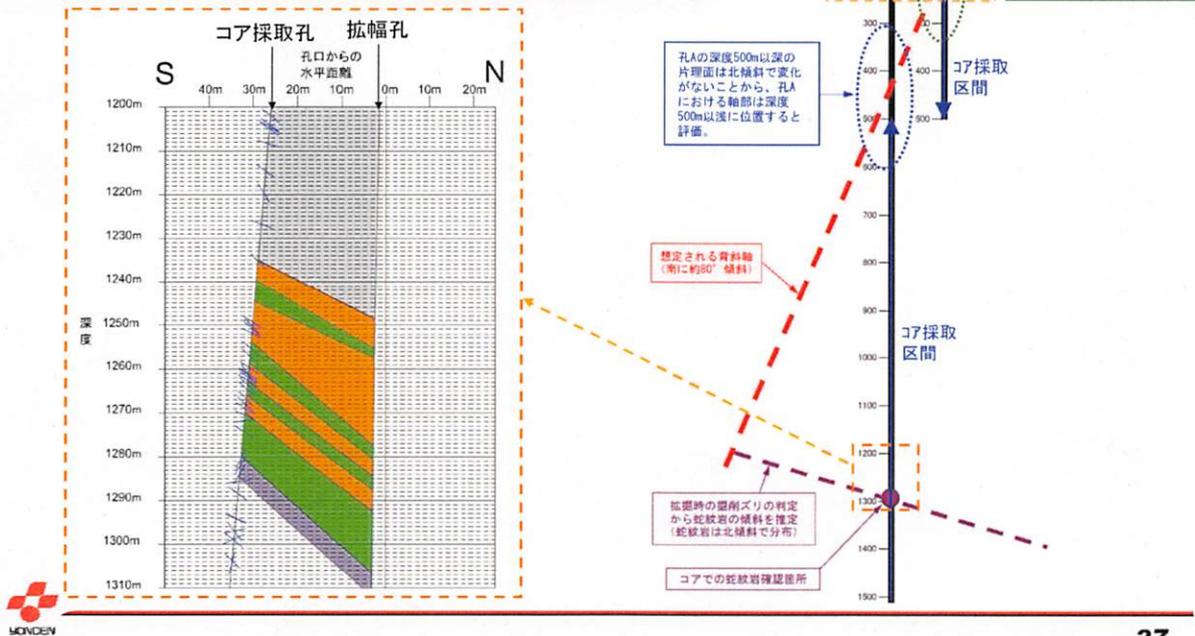
・本調査における各深度の片理面傾斜のコンターダイアグラムを示す。



26

2.6(3) 敷地近傍の地質構造(背斜軸根拠③)

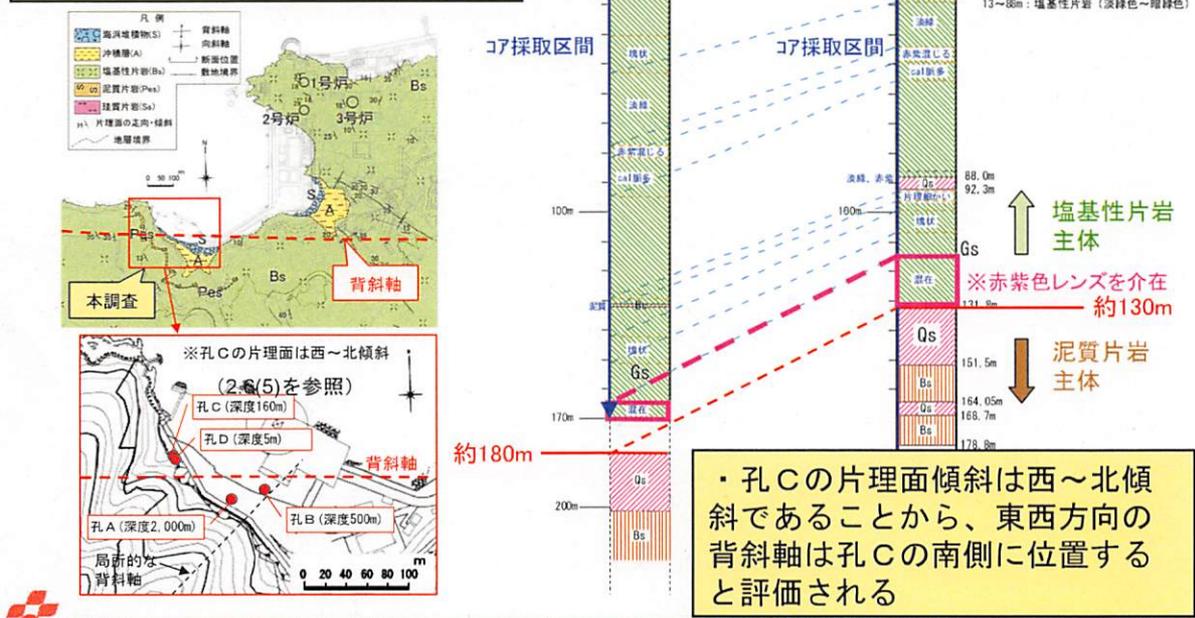
・コア採取孔と、孔曲がり角度を補正しながら掘削した拡幅孔の掘削ズリから確認した地質状況との比較から、孔Aの深度1,300m付近で岩種境界は北傾斜であることを確認。



27

2.6(4) 敷地近傍の地質構造(背斜軸根拠④)

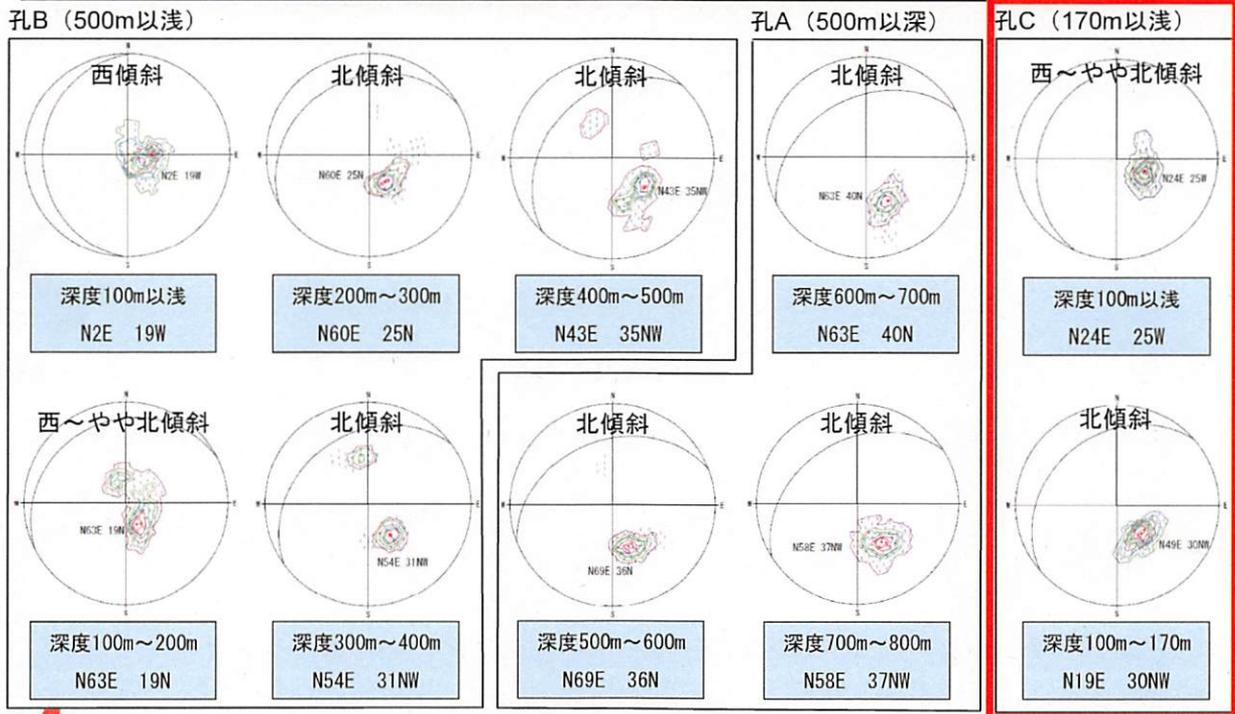
・孔Bと孔Cの岩相分布を詳細に対比した結果、孔Cにおける塩基性片岩主体層の下端は深度約180mと評価される。



28

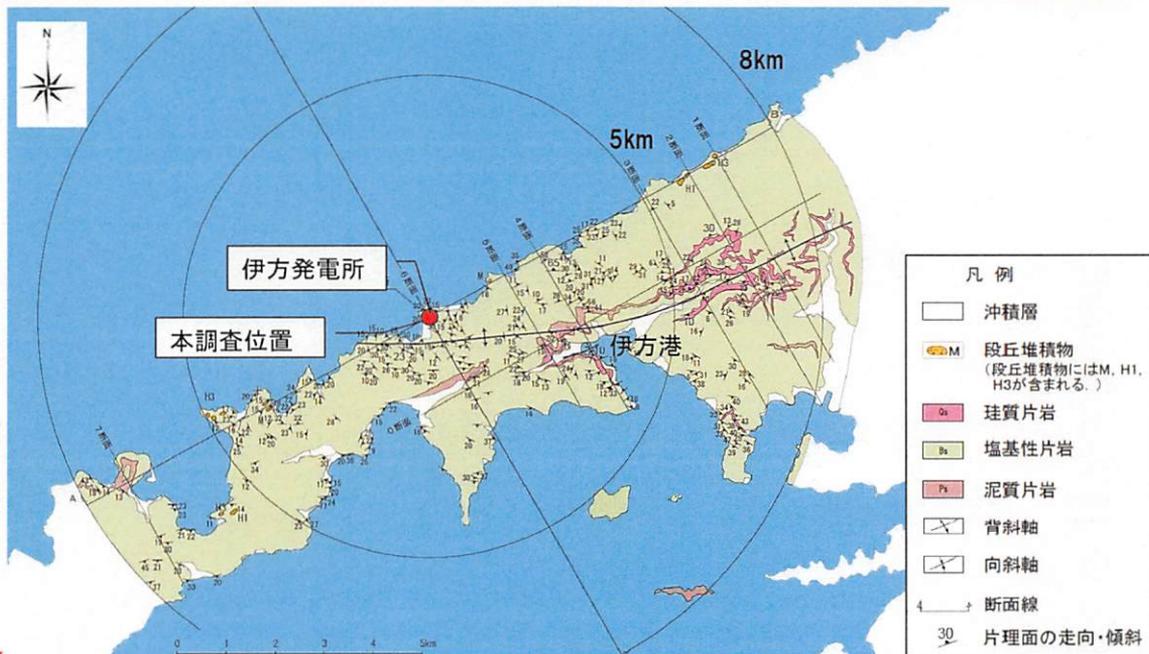
2.6(5) 敷地近傍の地質構造(背斜軸根拠⑤)

・本調査における各深度の片理面傾斜のコンターダイアグラムを示す。



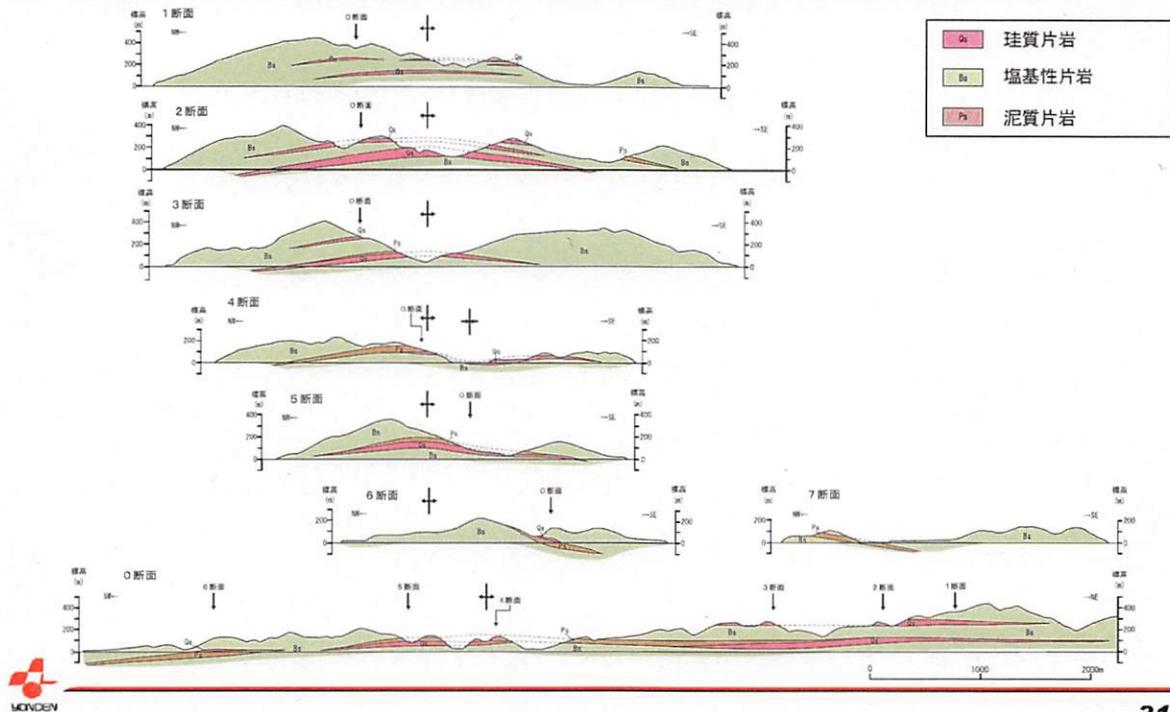
2.6(6) 敷地近傍の地質構造(平面図 詳細)

・以下に示す測線の地質断面図を作成した上で、敷地近傍の地質構造について検討を行った。



2.6(7) 敷地近傍の地質構造(断面図 詳細)

・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。

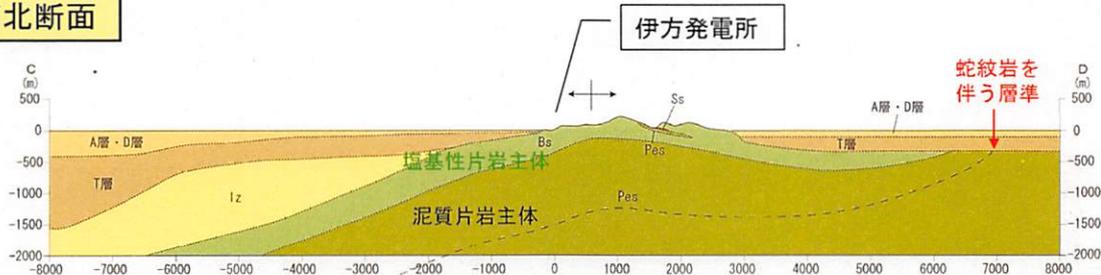


31

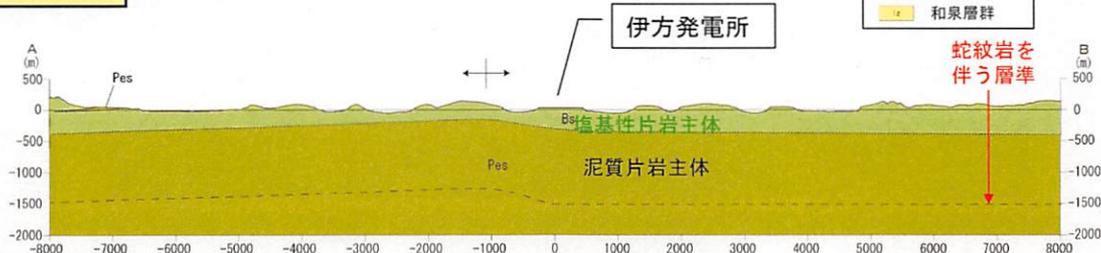
2.6(8) 敷地近傍の地質構造(蛇紋岩位置①)

・孔Aの深度約1,300mに分布する蛇紋岩は、大局的に、南北方向には緩く北傾斜し、東西方向にはほぼ水平に分布すると考えられる。

南北断面



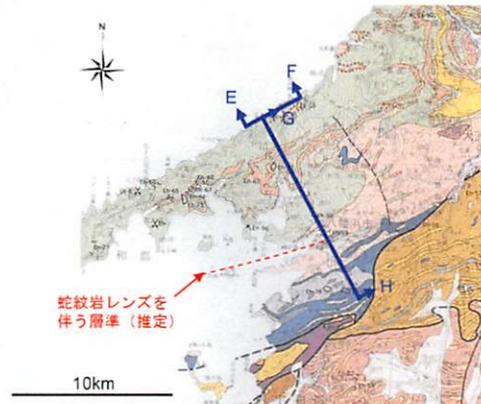
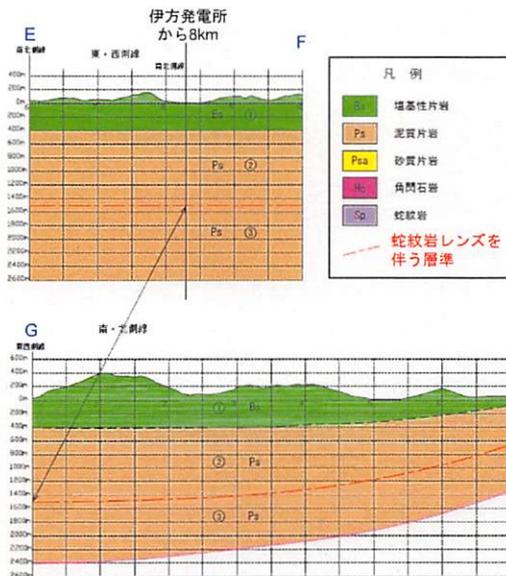
東西断面



32

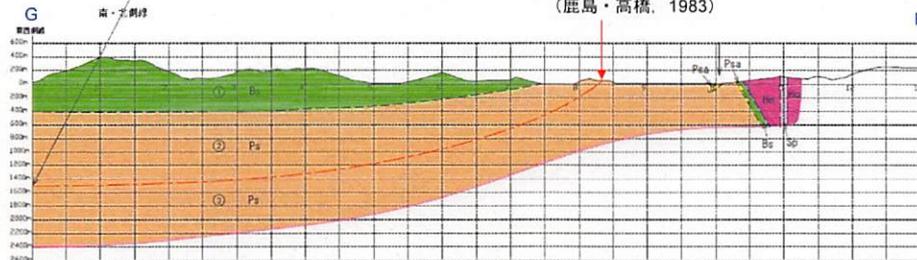
2.6(9) 敷地近傍の地質構造(蛇紋岩位置②)

・孔Aの深度約1,300mに分布する蛇紋岩は、八幡浜付近で確認される蛇紋岩と対比される。



「四国地方土木地質図」四国地方土木地質図編纂委員会、1998

蛇紋岩レンズが分布 (鹿島・高橋, 1983)



33

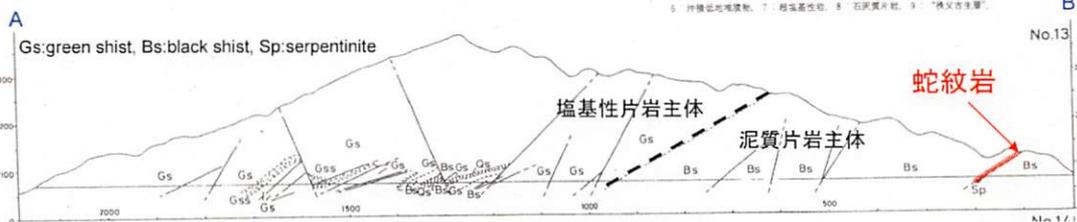
2.6(10) 敷地近傍の地質構造(蛇紋岩位置③)

・鹿島・高橋 (1983) によると、八幡浜付近の隧道の坑壁観察から、泥質片岩の中に、北傾斜の蛇紋岩が確認される。



図2 愛媛県八幡浜付近地質図No.27(南平川隧道位置部)

1 塩質片岩、2 緑色片岩、3 黒色片岩、4 黒色片岩、5 角閃石岩、6 片麻岩、7 蛇紋岩、8 石灰質片岩、9 「機文石主層」



34

2.6(11) 敷地近傍の地質構造(伊予灘①)

エアガンによる探査の観測条件

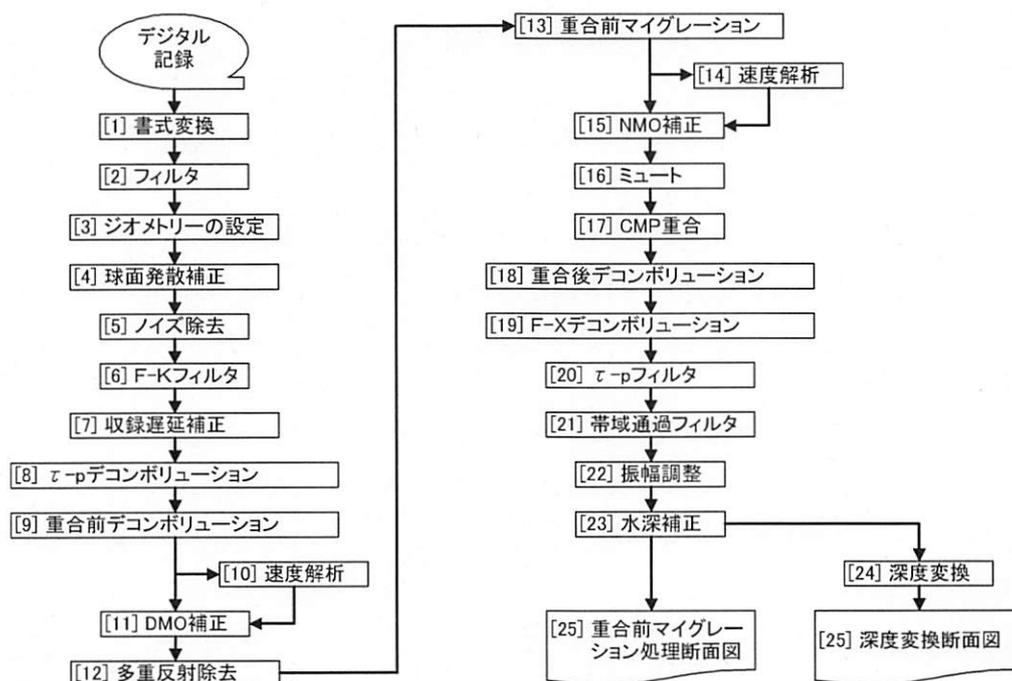
項目		設定値
記 録 部	サンプル間隔	1.0 msec
	記録長	5.0 sec
	収録周波数	Out～約400 Hz
	記録方式	磁気テープ(DLTおよび8 mm)
	収録フォーマット	SEG-Y
送 信 部	音源の種類	エアガン
	発振間隔	25 m
	空気室容量	500 in ³
	空気室圧力	120 kg/cm ²
	発振エネルギー	約150,000 J
受 信 部	音源深度	5.0 m
	受波器	48チャンネル
	チャンネル間隔	12.5 m
	ニア・オフセット距離	75 m
	ファー・オフセット距離	662.5 m
	受波器深度	約10 m
	受波器の長さ	600 m
調査船の平均速度		約3.0ノット



35

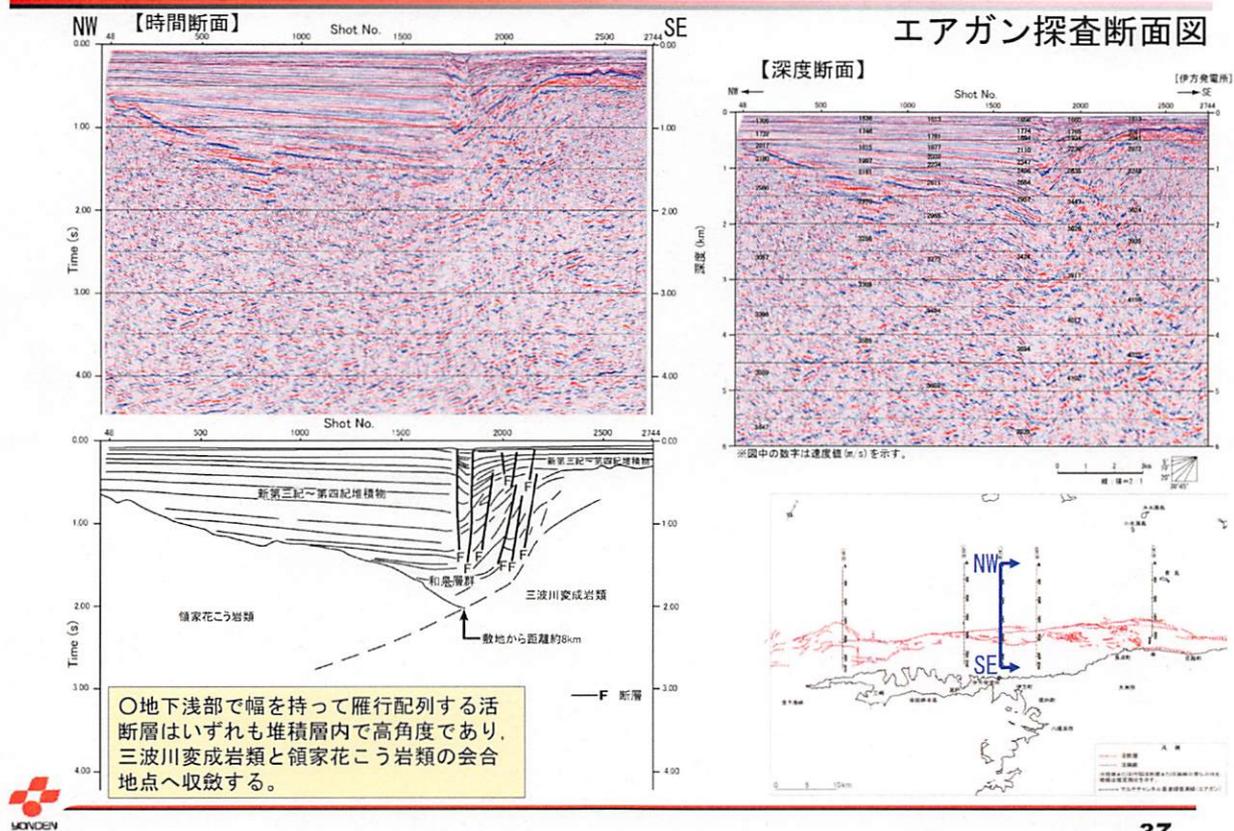
2.6(12) 敷地近傍の地質構造(伊予灘②)

エアガンによる探査のデータ処理



36

2.6(13) 敷地近傍の地質構造(伊予灘③)



2.6(14) 敷地近傍の地質構造(伊予灘④)

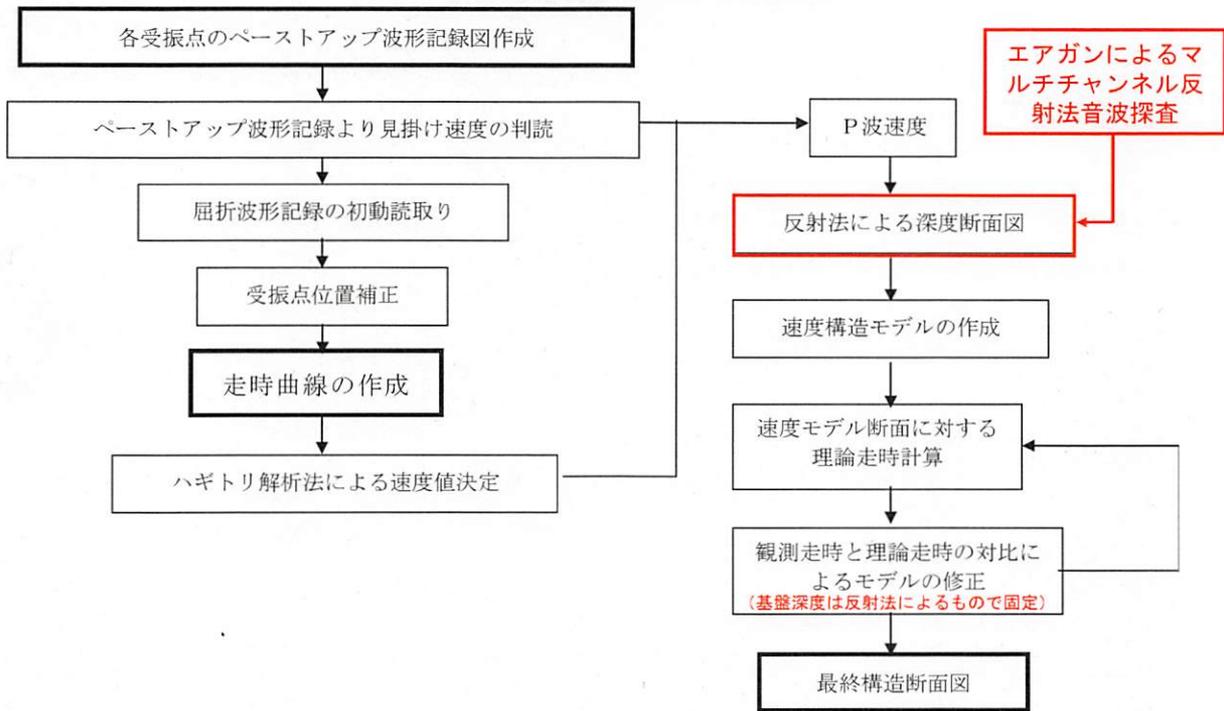
屈折法探査の観測条件

項目		設定値
送信部	音源の種類	エアガン
	発振間隔	25 m
	空気室容量	500 in ³
	空気室圧力	120 kg/cm ²
	発振エネルギー	約150,000 J
	音源深度	5.0 m
受信部・記録部	受振器個数(1箇所当たり)	1個
	受振器設置箇所数	9~10箇所
	受振器設置間隔	約1,100 m~約1,700 m
	受振器深度	海底
	サンプリング周波数	1,000 Hz

※受信器は海底地震計ではなく、小型で投入・回収が容易なハイドロフォンを使用

2.6(15) 敷地近傍の地質構造(伊予灘⑤)

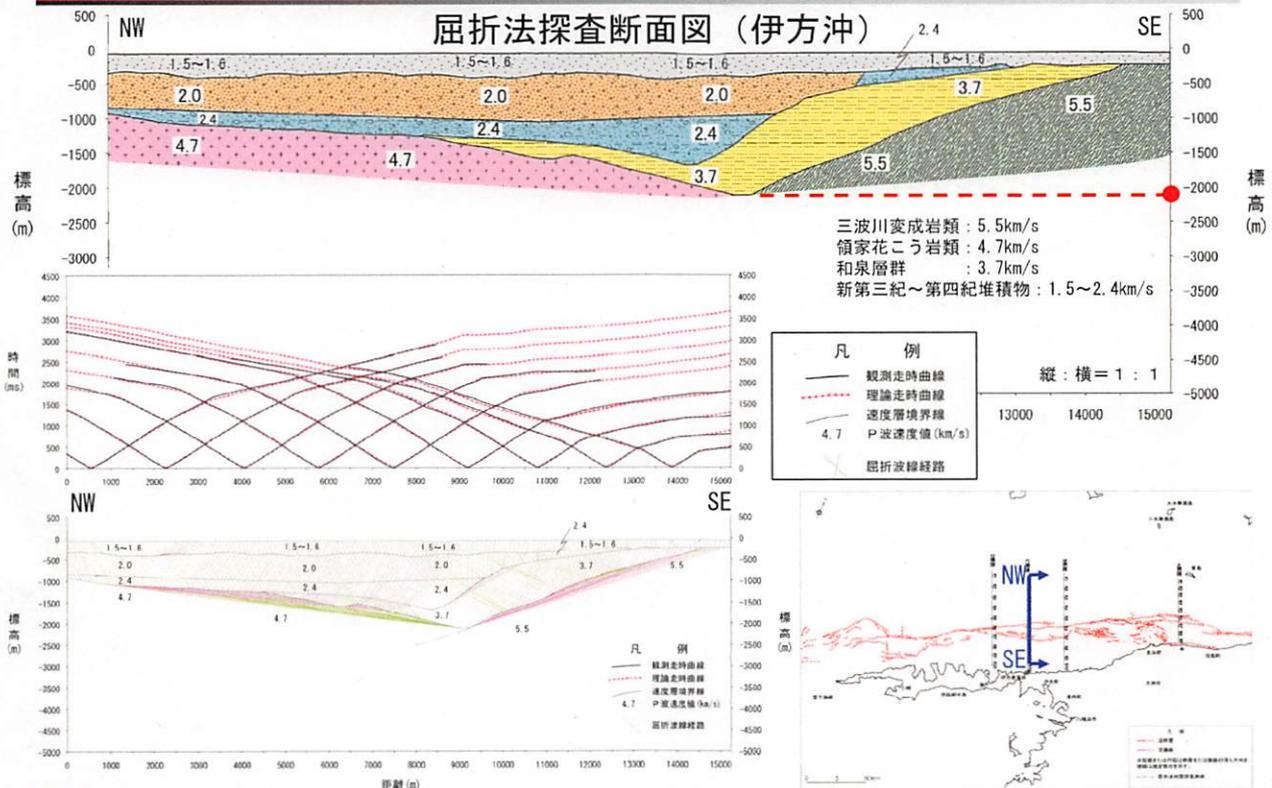
屈折法探査のデータ処理



39

2.6(16) 敷地近傍の地質構造(伊予灘⑥)

屈折法探査断面図 (伊方沖)



40

2.6(17) 敷地近傍の地質構造(宇和海①)

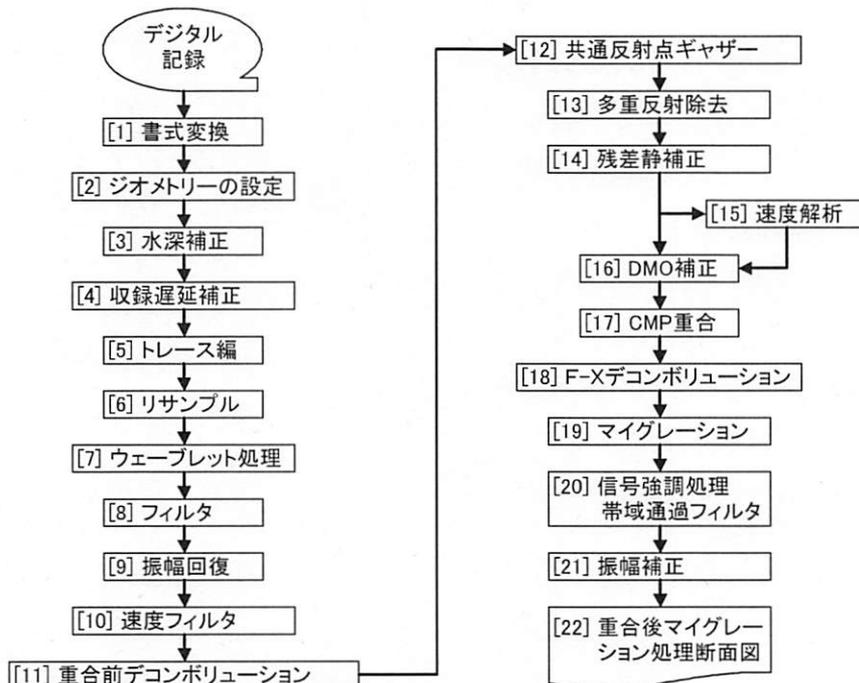
エアガンによる探査の観測条件

項目		設定値
記録部	サンプル間隔	1.0 msec
	収録時間	4.0 sec
送信部	発振間隔	12.5 m
	発振器の深度	3.0 m
	空気室容量	80 in ³
	空気室圧力	120 kg/cm ²
受信部	チャンネル数	48 ch(一部24ch)
	チャンネル間隔	12.5 m
	ニア・オフセット距離	90 m
	ファー・オフセット距離	690 m(一部390m)
	受波器深度	5~10 m
	受波器の長さ	600 m(一部300m)
調査船の平均速度		2.5~3.0ノット

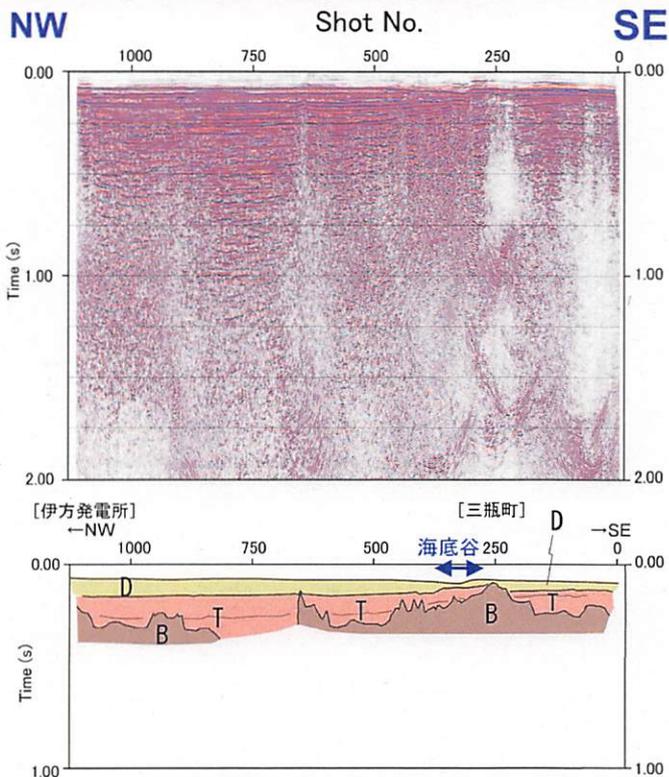


2.6(18) 敷地近傍の地質構造(宇和海②)

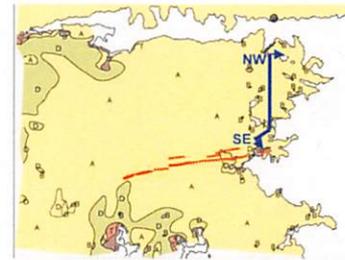
エアガンによる探査のデータ処理



2. 6 (19) 敷地近傍の地質構造(宇和海③)



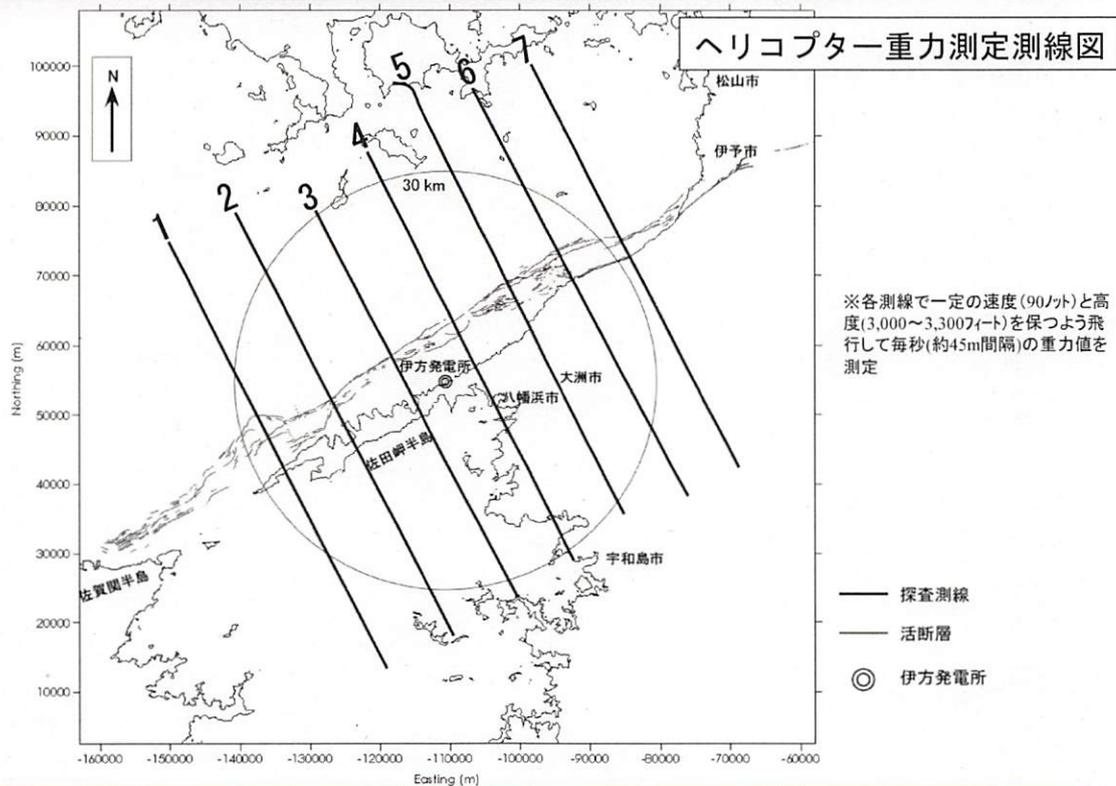
エアガン探査断面図



伊方発電所南方に断層は認められない。
宇和海では基盤岩の深度が全般に浅い。



2. 6 (20) 敷地近傍の地質構造(重力測定①)



ヘリコプター重力測定測線図

※各測線で一定の速度(90ノット)と高度(3,000~3,300フィート)を保つよう飛行して毎秒(約45m間隔)の重力値を測定

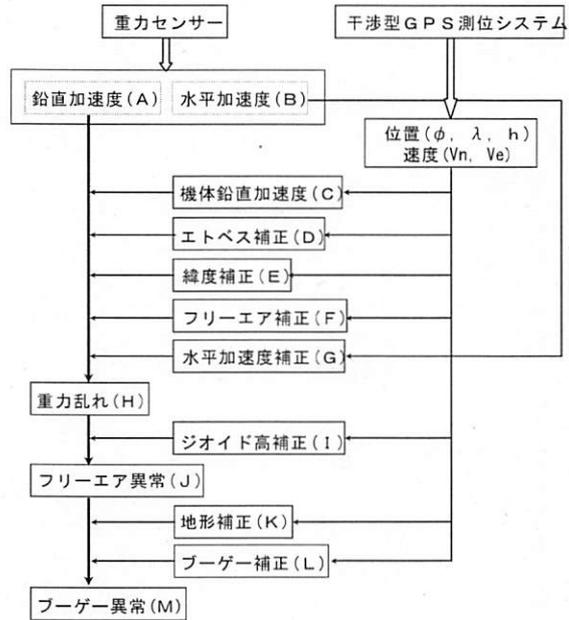
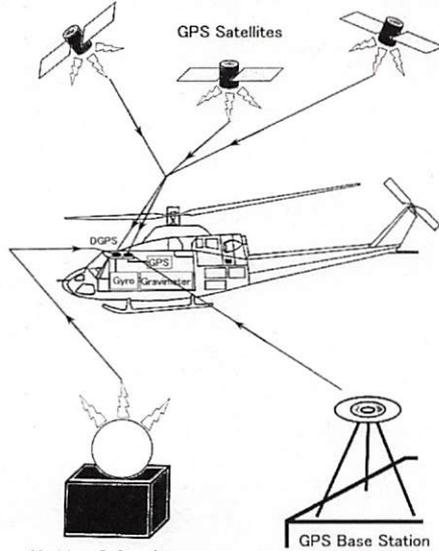
- 探査測線
- 活断層
- ◎ 伊方発電所



2.6(21) 敷地近傍の地質構造(重力測定②)

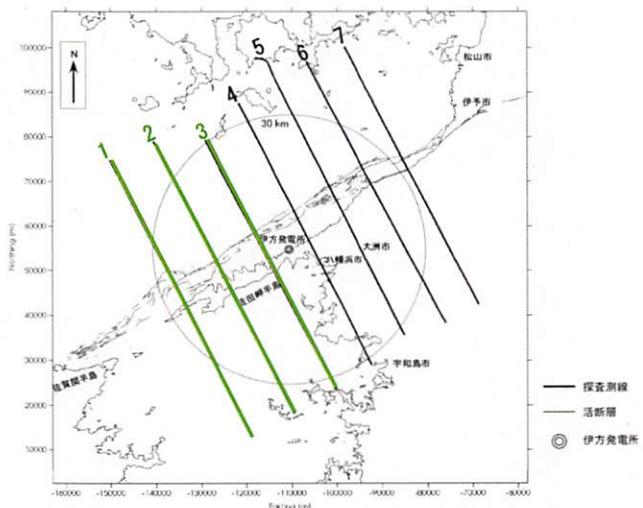
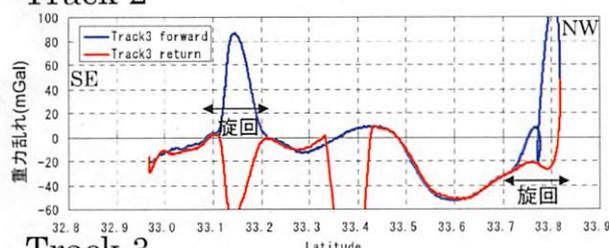
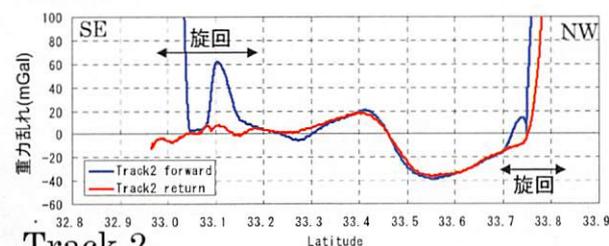
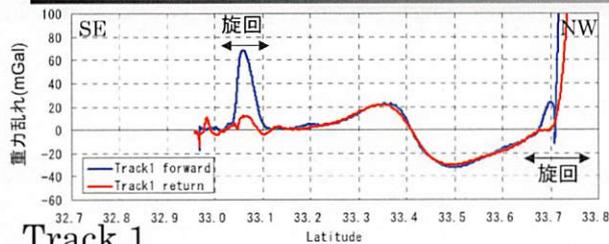
○飛行時にはヘリコプターの位置をリアルタイムDGPS測位によって毎秒±1mの精度で測定。
○GPS干渉測位をDGPSとは独立に行い、飛行後の後処理によって毎秒±5cmの精度でヘリコプター位置を測定。データ処理後に得られる重力は±2mGalの精度。

ヘリコプター重力測定データの処理

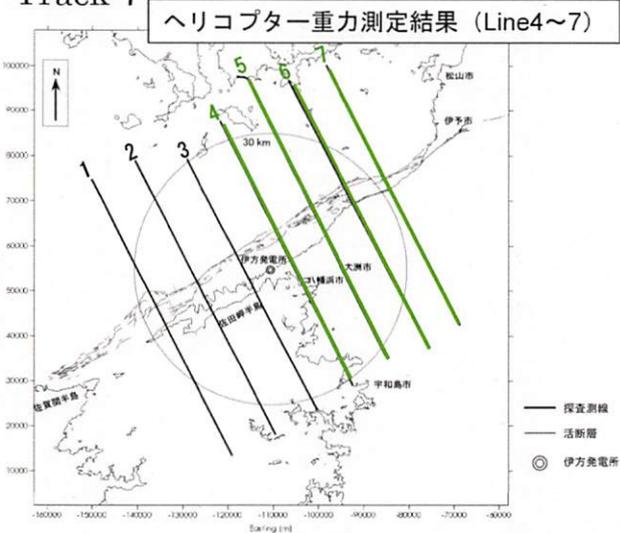
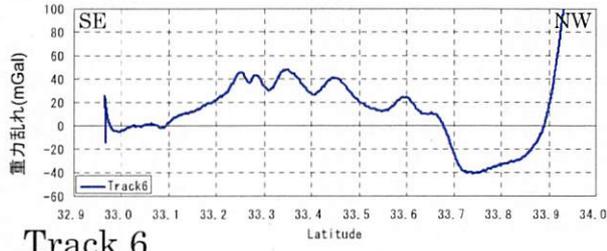
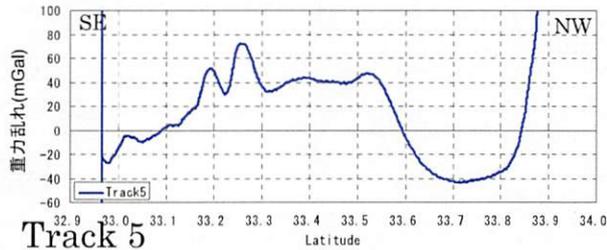
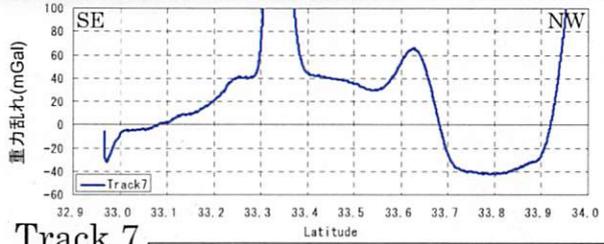
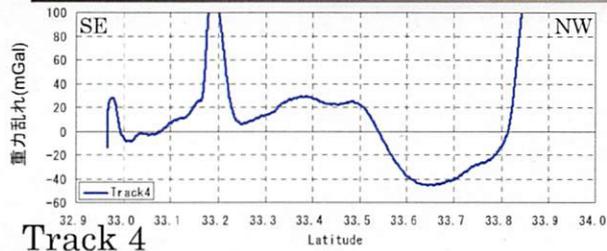


2.6(22) 敷地近傍の地質構造(重力測定③)

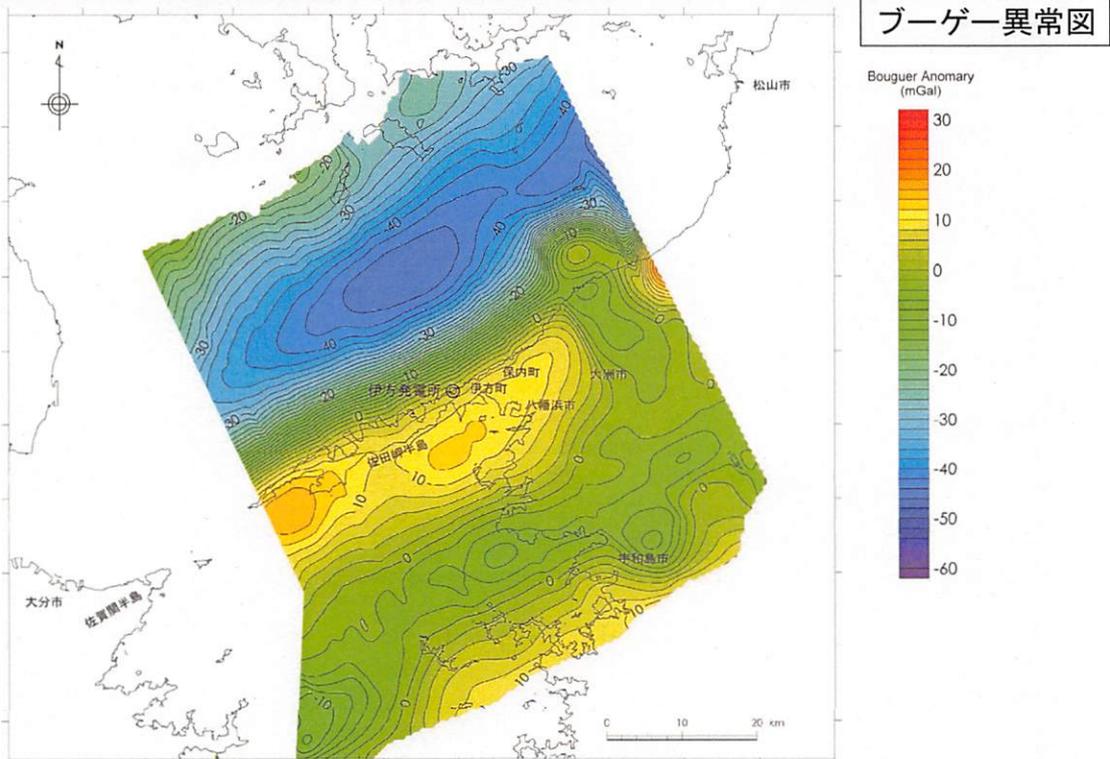
ヘリコプター重力測定結果 (Line1~3)



2. 6 (23) 敷地近傍の地質構造(重力測定④)



2. 6 (24) 敷地近傍の地質構造(重力測定⑤)



3. 地盤物性



3.1 3号耐震バックチェックモデル

・伊方発電所の地盤構造モデルでは、地震動の増幅のない地震基盤($V_s > 3.5\text{km/s}$)の上面を深度2,000mに設定している。

<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 (m)	Vp (km/s)	Vs (km/s)	ρ (g/cm ³)	Q値	区分
	0~10	5.3	2.6	3.0	50	上部地殻
	10~200	5.5	2.7	3.0	50	
	200~2000	5.7	2.8	3.0	190	
地震基盤 →	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



3.2 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。

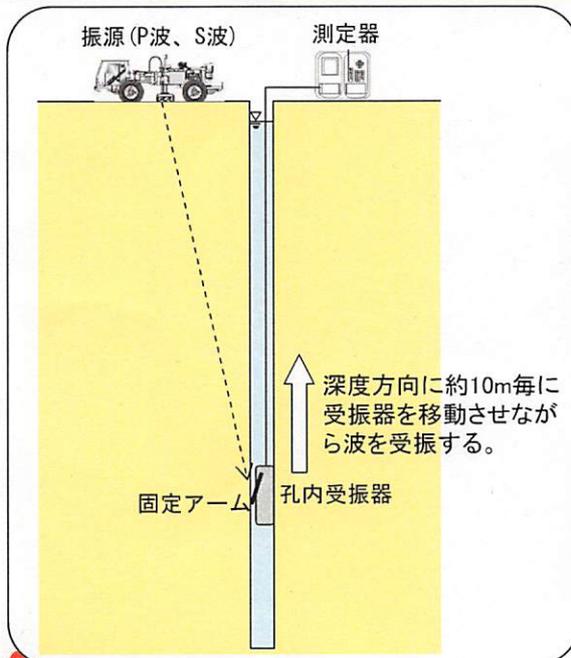
物性	測定方法	算出手順
P波・S波速度	PS検層 (ダウンホール法)	地表からの発振に対して孔内で受振を行い、長い区間の平均速度を算出する。
	PS検層 (サスペンション法)	測定器を孔内に挿入して発振、受振を行い、短い区間の平均速度を算出する。
密度	密度検層	測定器を孔内に挿入し、孔内の地層密度の変化を連続的に測定する。
P波速度 (速度構造)	オフセット VSP探査	地表を移動しながら発振し、孔内および地表に展開した受信器で取得したデータから敷地の速度構造(2次元)を求める。
Q値	PS検層 (ダウンホール法)	PS検層(ダウンホール法)の取得波形を解析して減衰特性(Q値)を算出する。



51

3.3 (1) 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。



※減衰特性(Q値)は3.7に示す。

起振器 (全景)

受振器



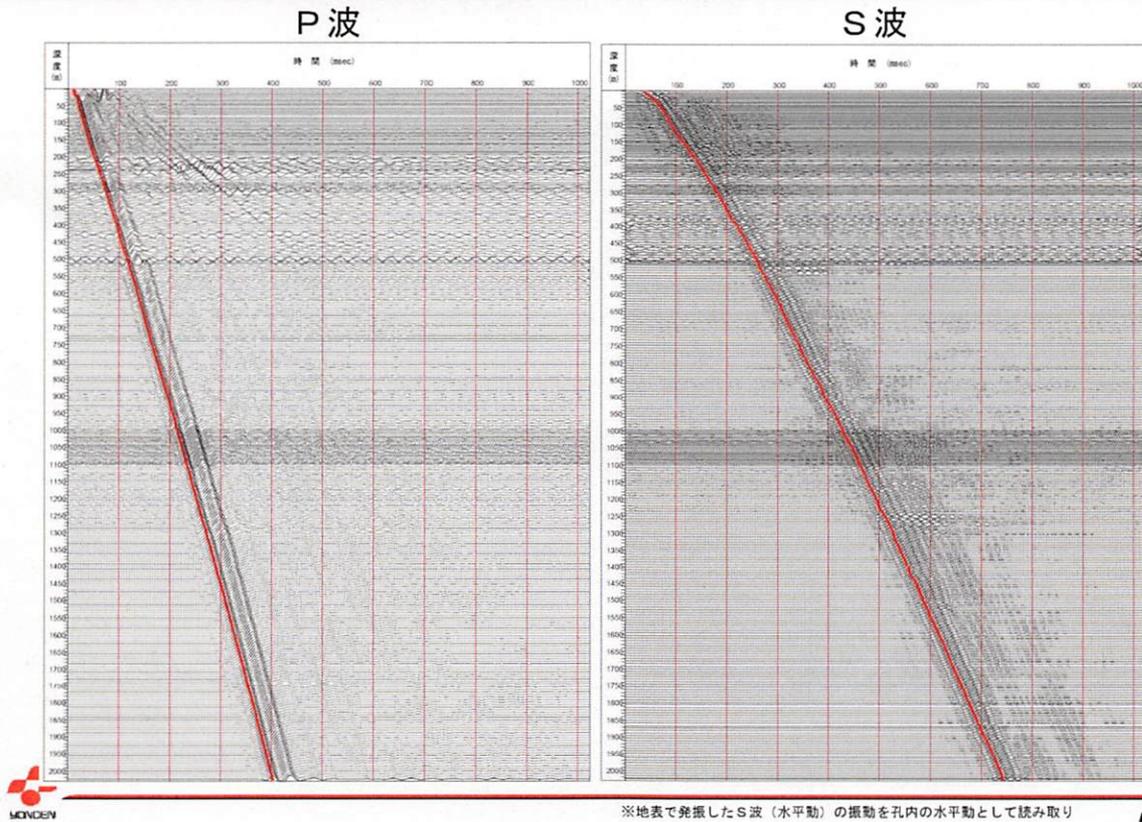
P波起振器

S波起振器



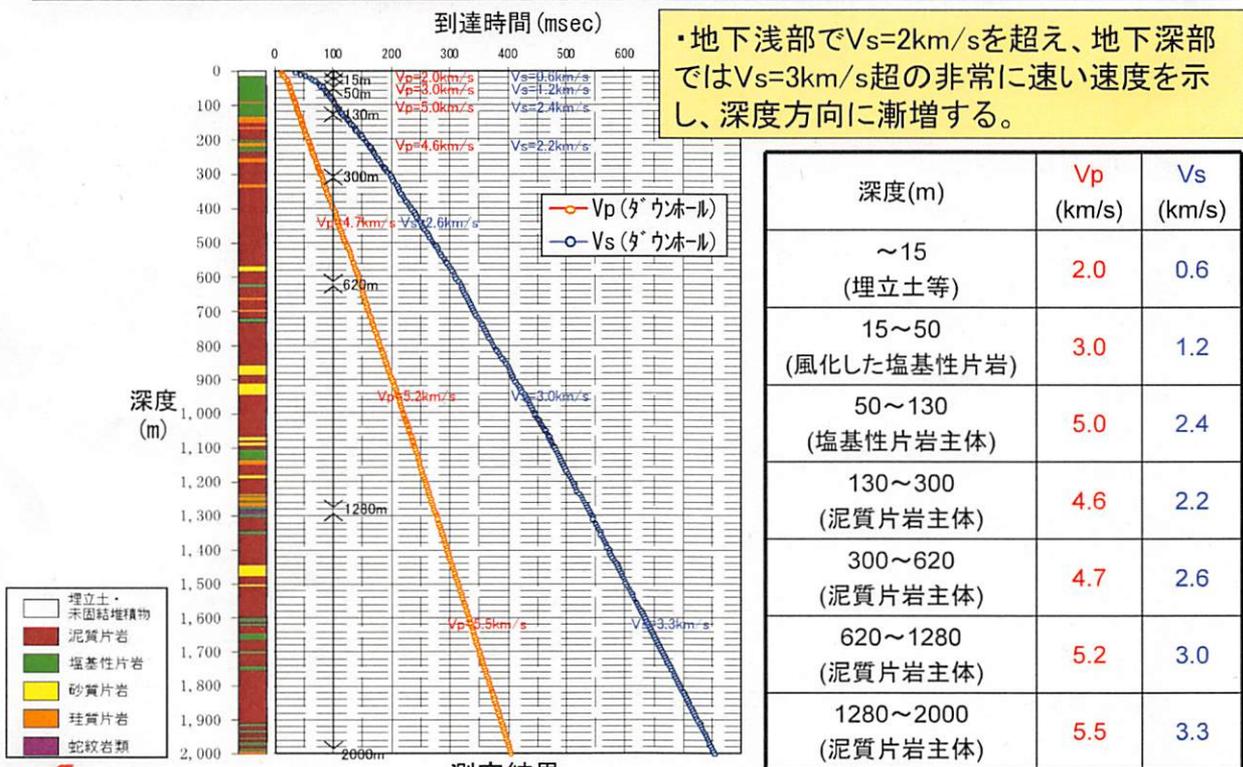
52

3. 3 (2) PS検層 (ダウンホール法) 結果【孔A,B】(波形)



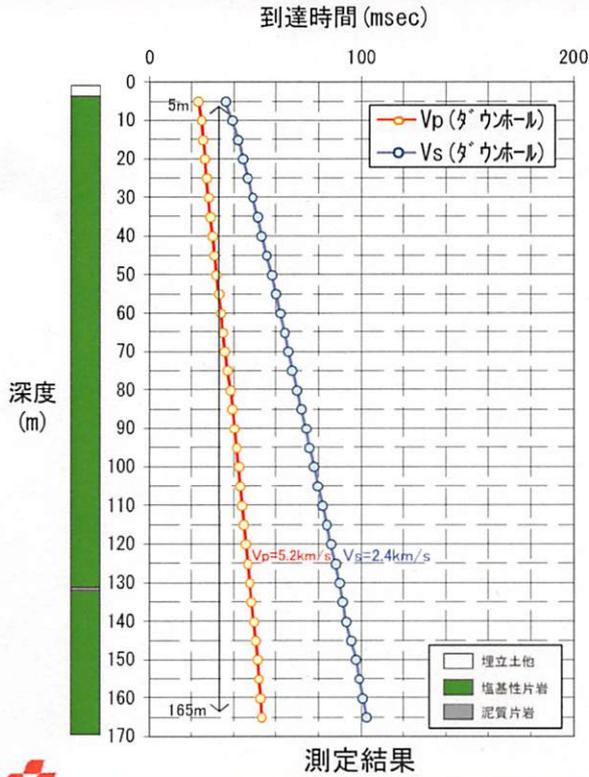
※地表で発生したS波（水平動）の振動を孔内の水平動として読み取り

3. 3 (3) PS検層 (ダウンホール法) 結果【孔A,B】



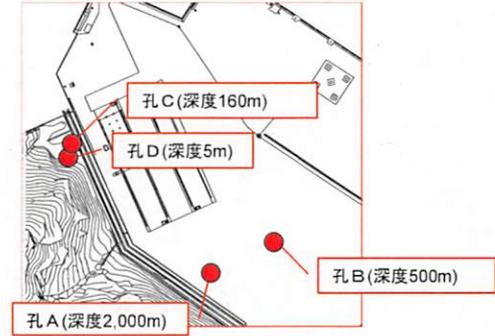
・地下浅部でVs=2km/sを超え、地下深部ではVs=3km/s超の非常に速い速度を示し、深度方向に漸増する。

3. 3 (4) PS検層 (タウンホール法) 結果【孔C】



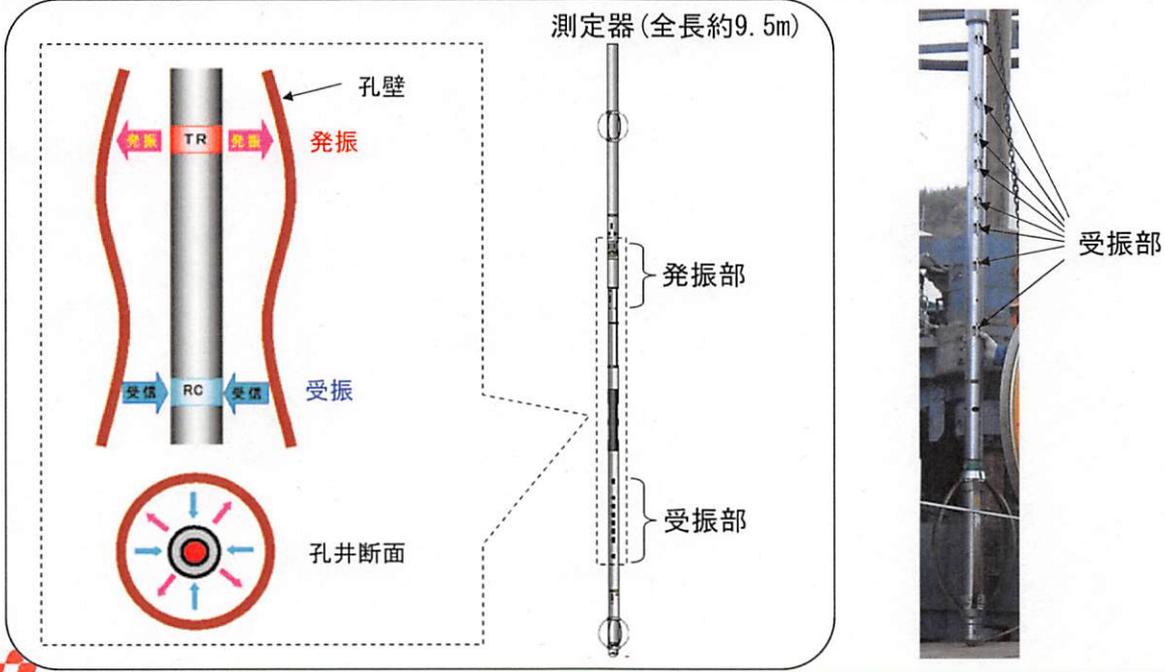
・浅部からVs=2.4km/sの堅硬な塩基性片岩が連続して分布する。

深度(m)	Vp (km/s)	Vs (km/s)
5~165 (塩基性片岩主体)	5.2	2.4

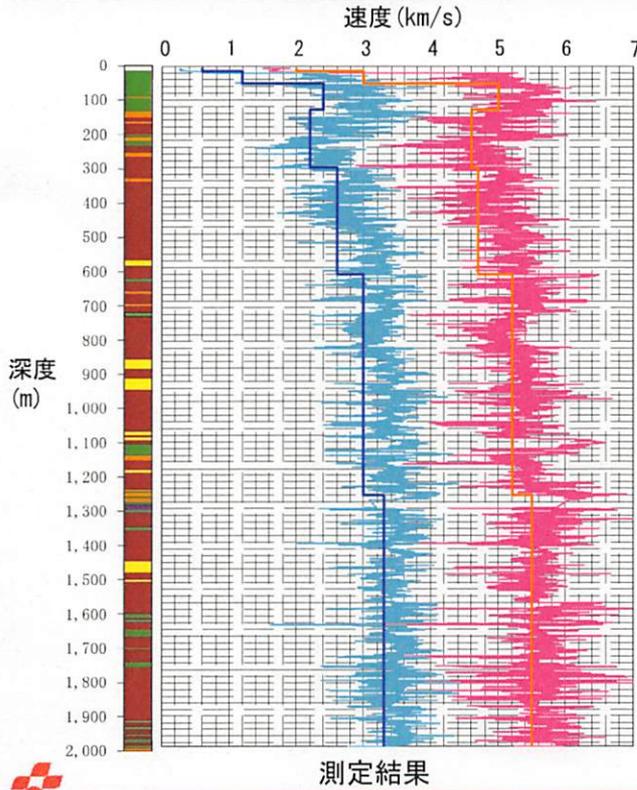


3. 4 (1) PS検層 (サスペンション法) の概要

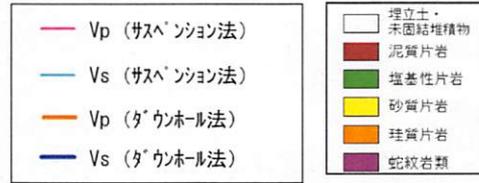
・発振器と受振器が組み込まれた測定器を用いて、孔内のP波速度、S波速度の孔壁に沿った微細な変化を連続的に取得する。



3. 4 (2) PS検層 (サスペンション法) 結果【孔A,B】



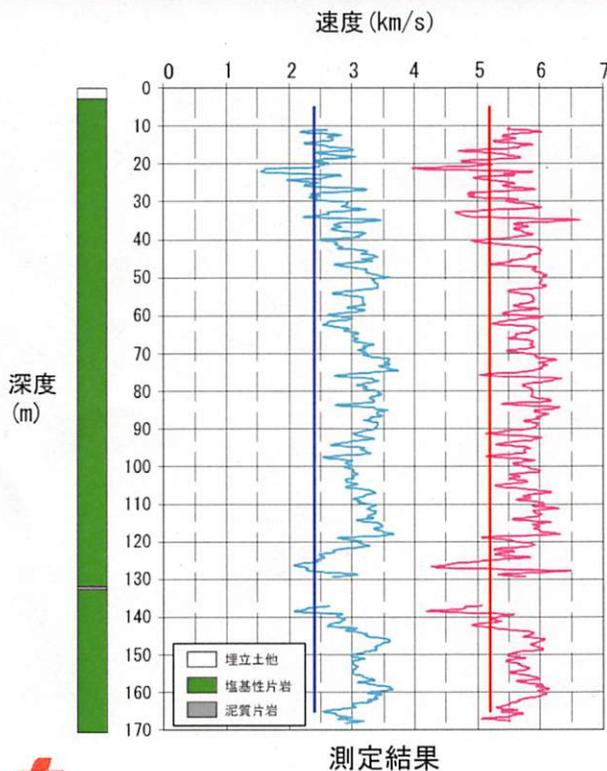
- ・ダウンホール法およびサスペンション法による速度値はほぼ同等である。
- ・地下浅部から地下深部まで非常に速い速度 ($V_s=2.2\sim 3.3\text{km/s}$) を示し、深度方向に漸増するものの、地震動増幅の要因となるインピーダンス比は小さい。
- ・深度2,000mは地震基盤 ($V_s=3.5\text{km/s}$) に相当する。



(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)

57

3. 4 (3) PS検層 (サスペンション法) 結果【孔C】



- ・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。
- ・浅部から $V_s=2\text{km/s}$ 以上の堅硬な塩基性片岩が連続して分布する。

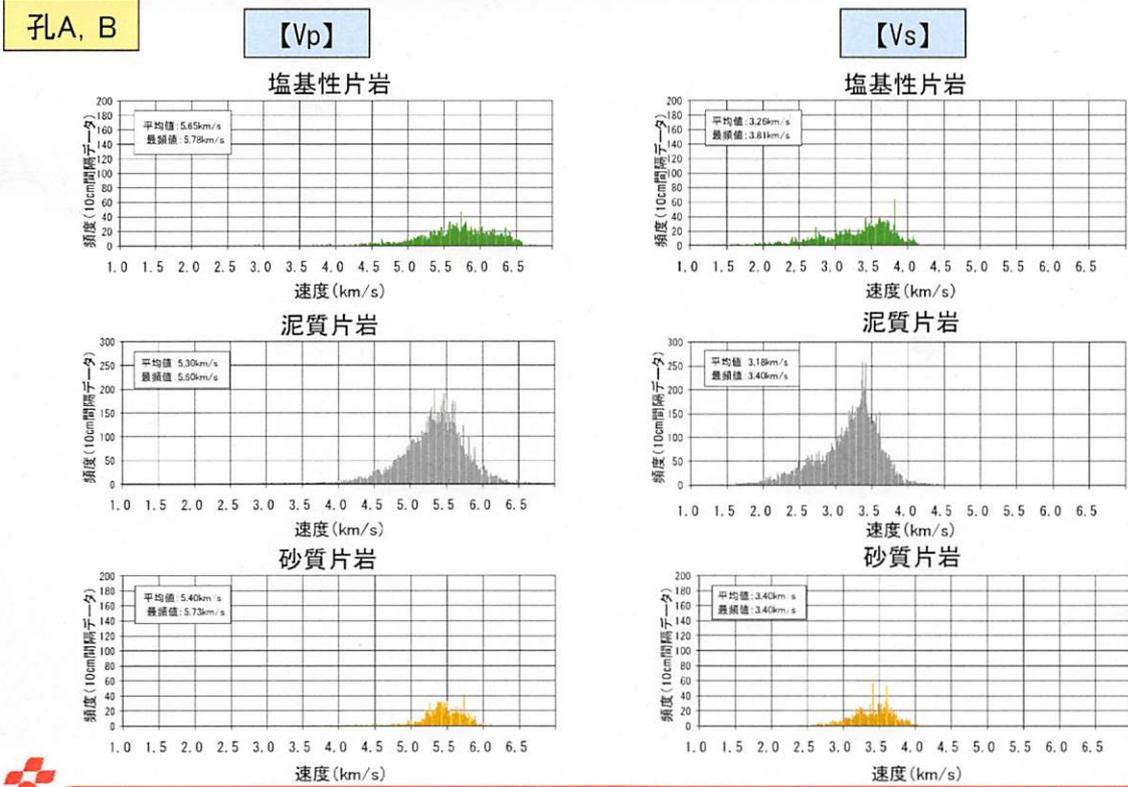


} 孔曲がりを補正するためにセメンチングを行った区間

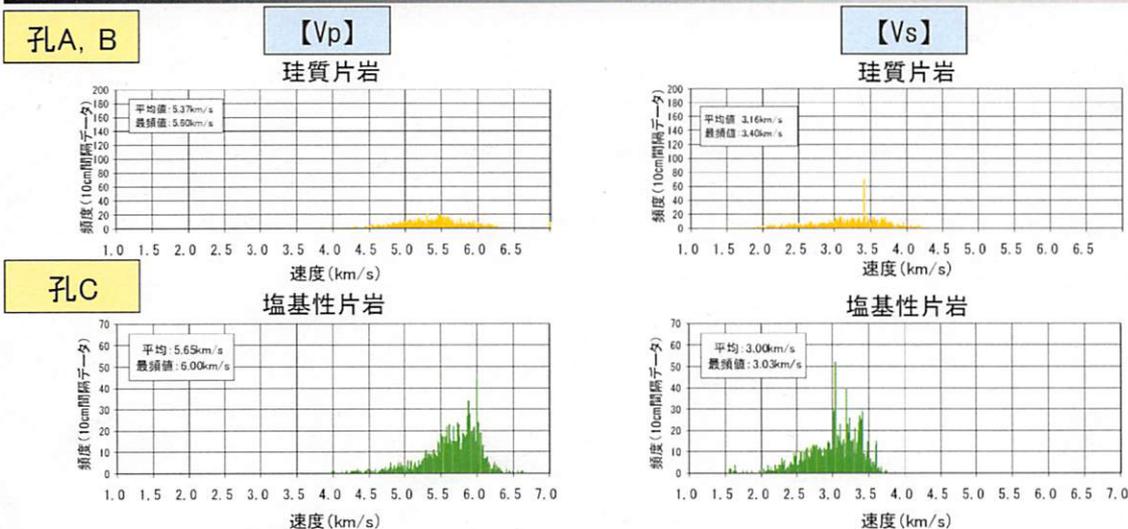


58

3. 4 (4) PS検層 (サスペンション法) 結果 (岩種別①)



3. 4 (5) PS検層 (サスペンション法) 結果 (岩種別②)



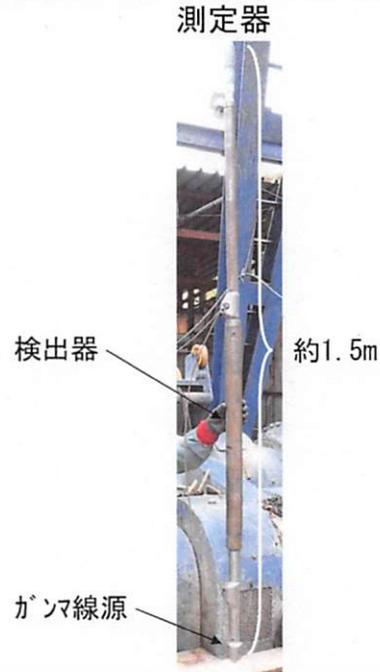
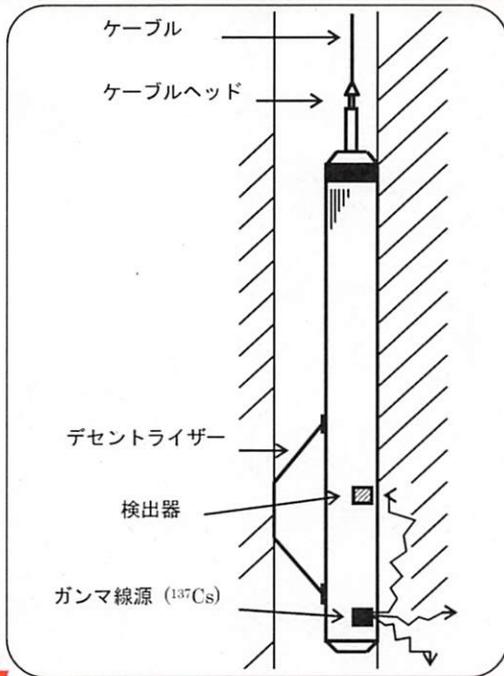
岩種	孔	平均Vp(km/s)	平均Vs(km/s)
塩基性片岩	孔A,B	5.65	3.26
	孔C	5.65	3.00
泥質片岩	孔A,B	5.30	3.18
砂質片岩	孔A,B	5.40	3.40
珪質片岩	孔A,B	5.37	3.16

泥質片岩は塩基性片岩よりP波速度がやや小さいが、S波速度はほぼ同等である。

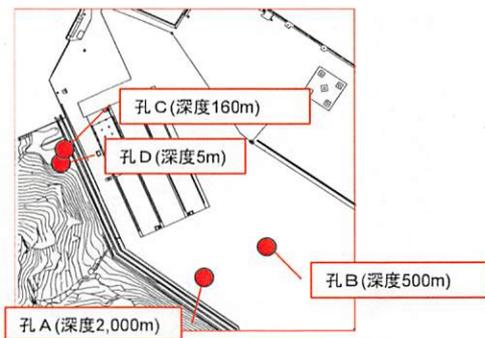
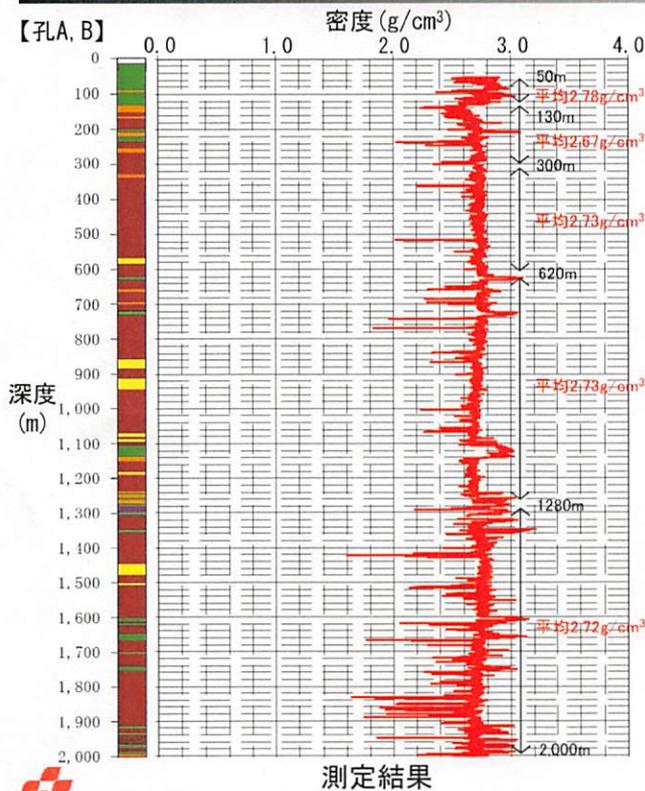


3.5(1) 密度検層の概要

・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。



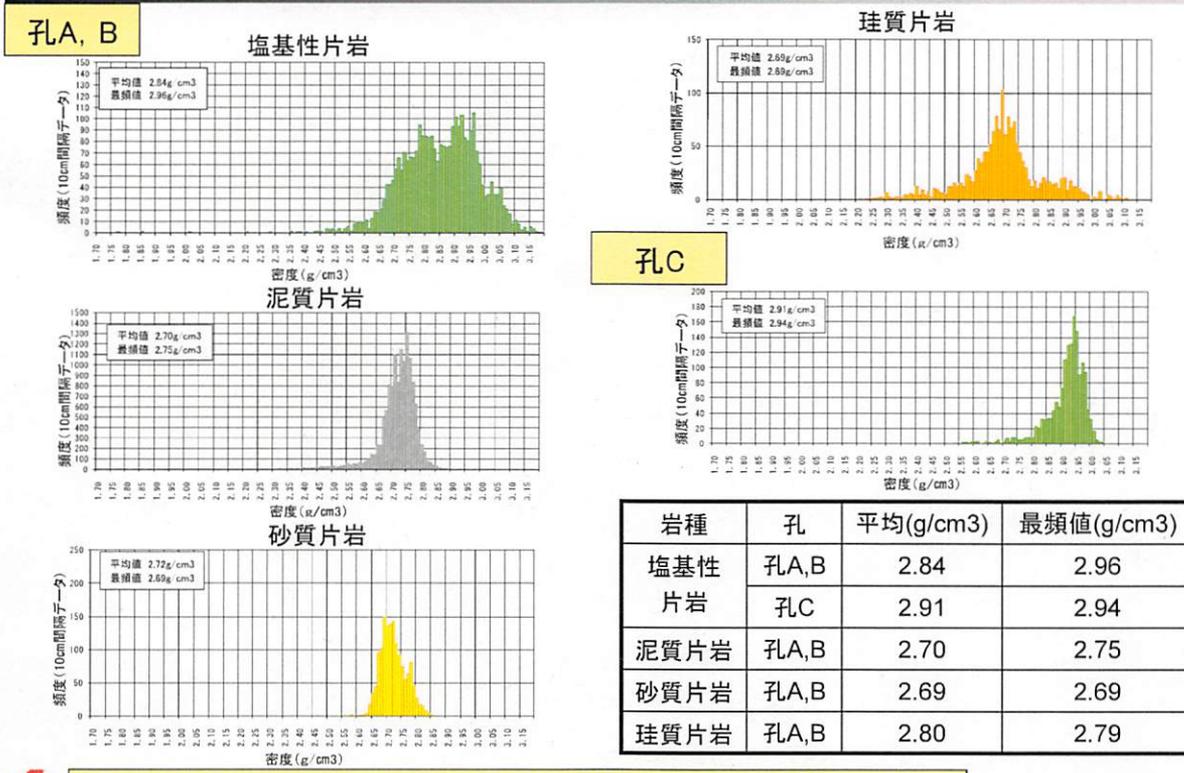
3.5(2) 密度検層結果



・密度は2.7~3.0g/cm³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。



3.5(3) 密度検層結果(岩種別)



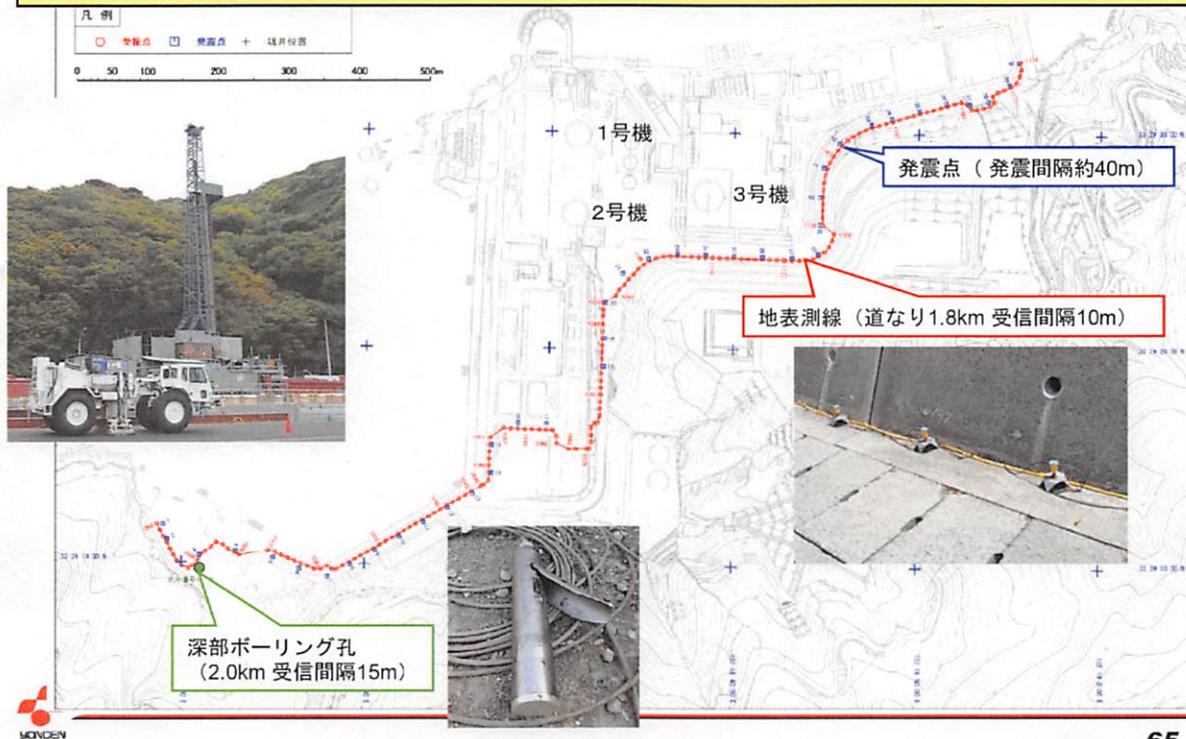
塩基性片岩は約2.9g/cm³、泥質片岩は約2.7g/cm³である。

3.6 オフセットVSP探査

- 3.6.1 調査方法
- 3.6.2 反射法解析
- 3.6.3 VSP-CMPマッピング解析
- 3.6.4 トモグラフィ解析
- 3.6.5 総合結果
- 3.6.6 まとめ

3. 6. 1 (1) 調査平面図

・孔A(深度2,000m)と3号炉心付近とを結ぶ測線で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。



65

3. 6. 1 (2) 調査機器および観測条件

探査項目	反射法、屈折法探査 (地表)	VSP探査 (孔内)
発震器	震源	P波パイプロサイス
	型式	Y-2400
	最大荷重	13.6t
	製作所	(米) IVI/FAILING
受震器	受震器	速度型地震計 (上下動成分)
	型式	SM-7
	固有周波数	10Hz
	製作所	(米) ION
データ収録装置	探鉱機	デジタル・レイト型
	型式	GDAPS-4A (RSU)
	性能	24ビットAD変換
	製作所	(株)地球科学総合研究所
発震周波数範囲	6~50Hz	
発震点間隔 (m)	約40m (地表)	
受震点間隔 (m)	10 (地表)	15 (孔内)
標準同時収録チャンネル数 (ch)	185	51 (17×3成分)
総発震点数	40	40
総受震点数	179	133
収録時間 (sec)	5 (コリレーション後)	5 (コリレーション後)
収録時サンプリングレート (msec)	2	1
受信フィルター (周波数)	all-pass	all-pass
標準水平重合数 (CDP重合数)	1~59重合 (平均約21重合)	—
垂直重合数 (スタック回数)	40回 (VP1~4のみ45回)	5回
データ処理時サンプリングレート (msec)	2	1
調査測線長 (m)	1,780	1,980
解析 (重合) 測線長 (m)	孔A~東端=1362、孔A~孔C側=81	1,980

66

3. 6. 1 (3) 解析方法

反射法解析

地表のP波反射法記録に対して標準的な反射法データ処理を行い、重合時間断面図、マイグレーション時間断面図、深度断面図を作成。

VSP-CMPマッピング解析

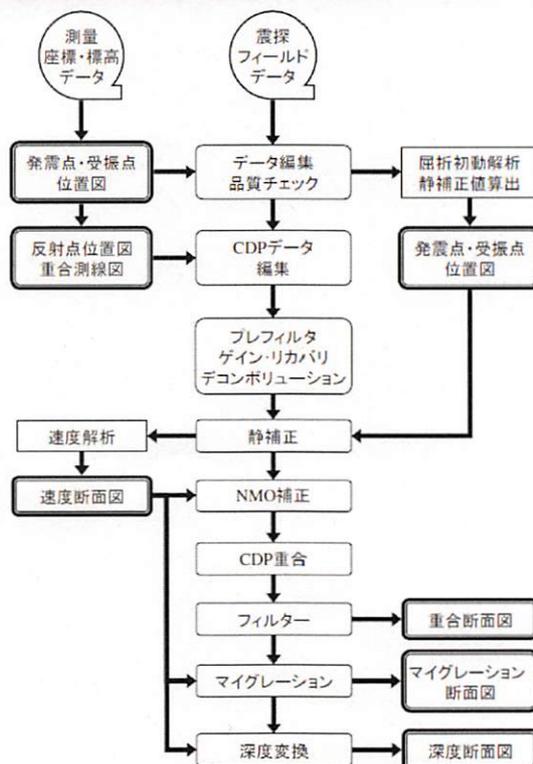
オフセットVSP記録(反射波)を用いて、孔近傍におけるP波反射断面を求める。オフセットVSP記録を地下の反射点に投影して2次元的な擬似反射断面を作成するVSP-CMPマッピング法を用い、重合時間断面図、深度断面図を作成。

トモグラフィ解析

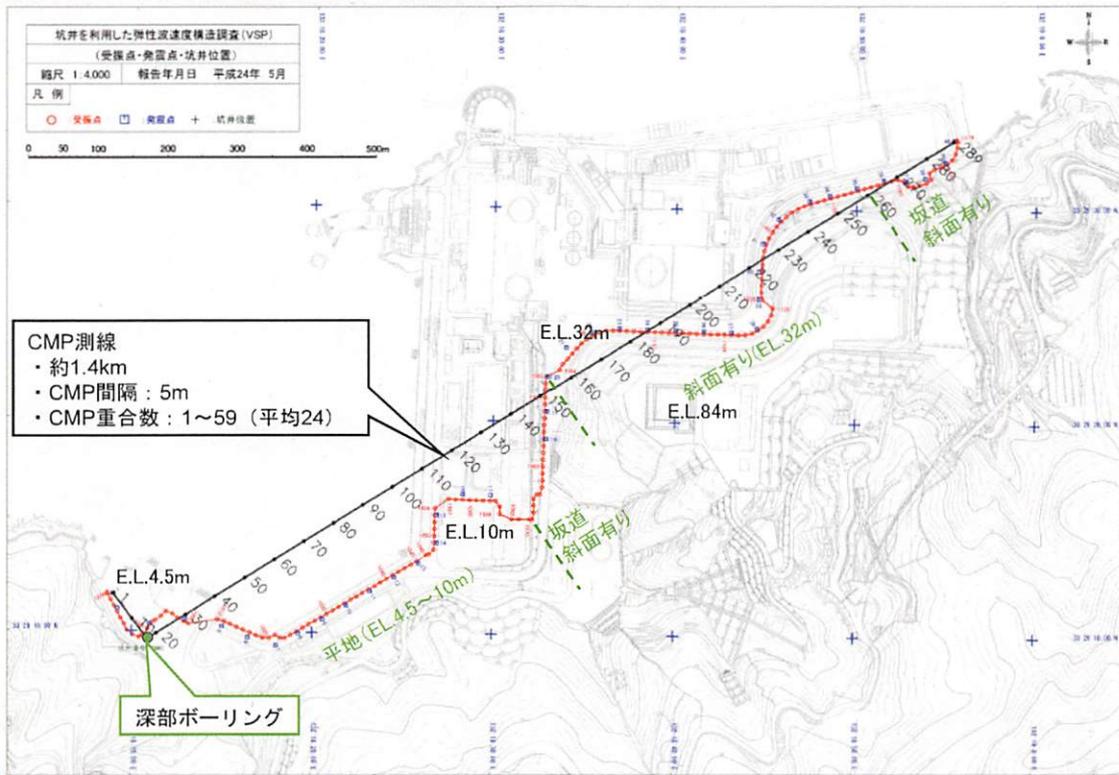
オフセットVSP記録(直接波)と地表で得られた屈折波記録を用いて初動走時ピッキングを行い、孔近傍におけるP波速度構造を求める。初期モデル依存性を取り除くため複数の初期モデルでトモグラフィックインバージョンを実施。ゼロオフセットVSP結果を拘束条件に使用。P波速度、解析誤差、波線密度の分布図を作成。



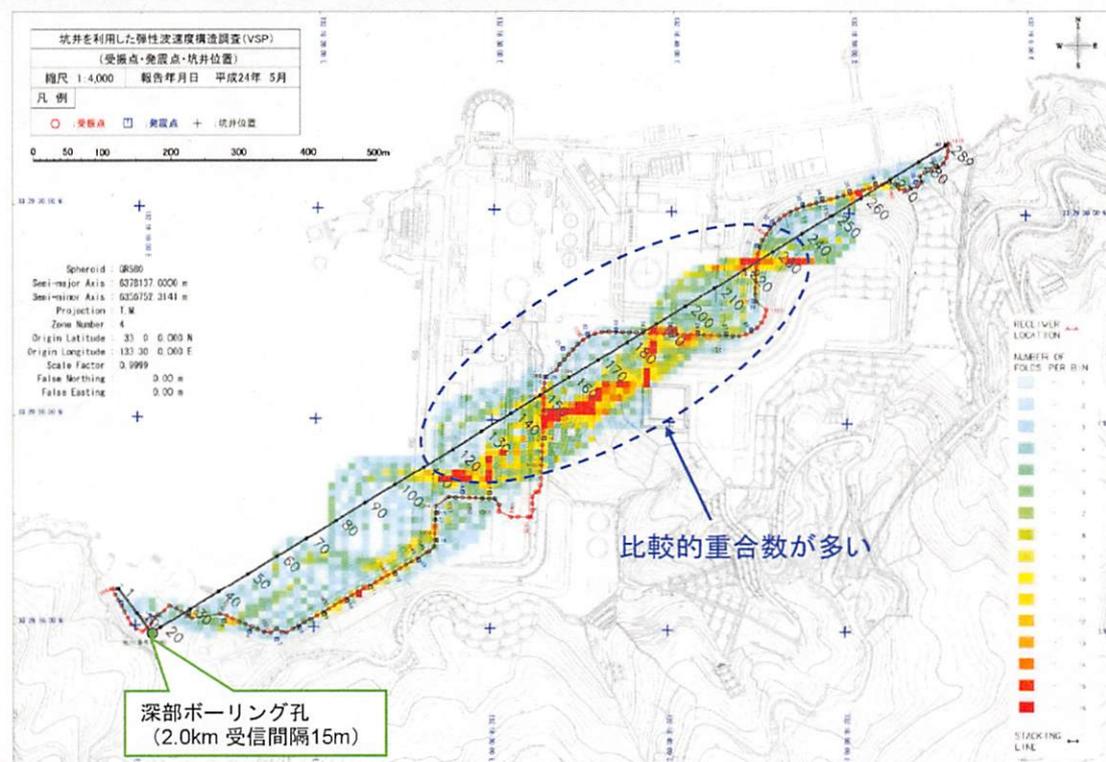
3. 6. 2 (1) 反射法解析の流れ



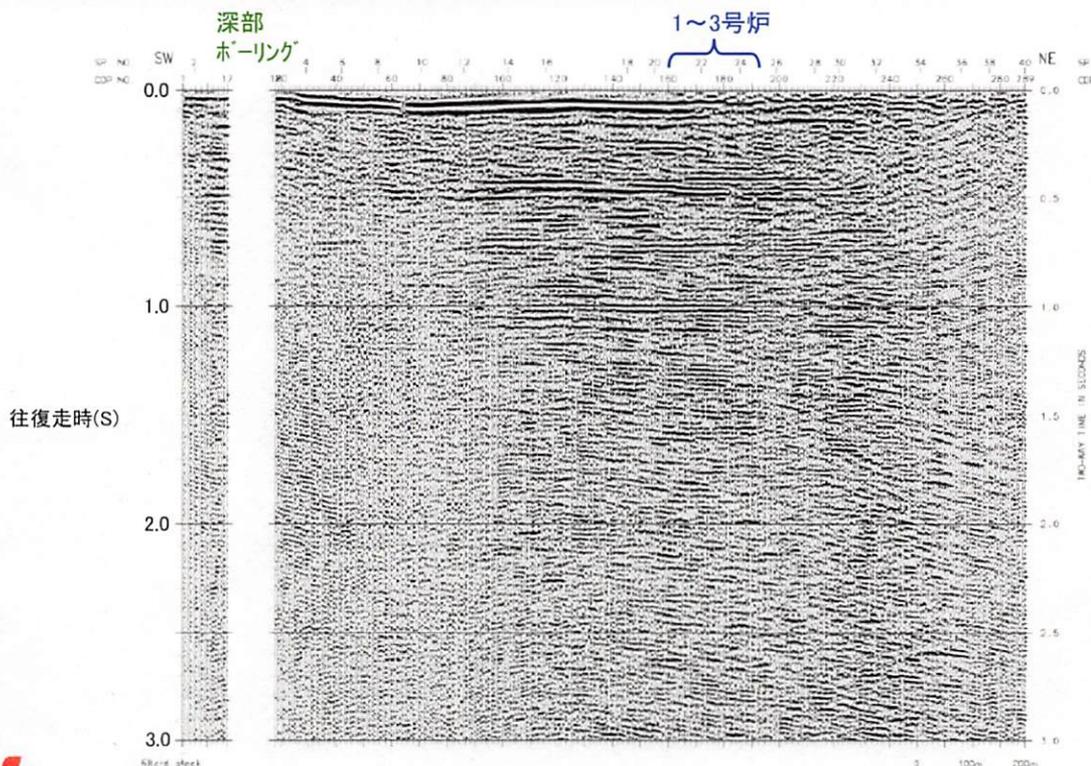
3. 6. 2 (2) CMP測線図



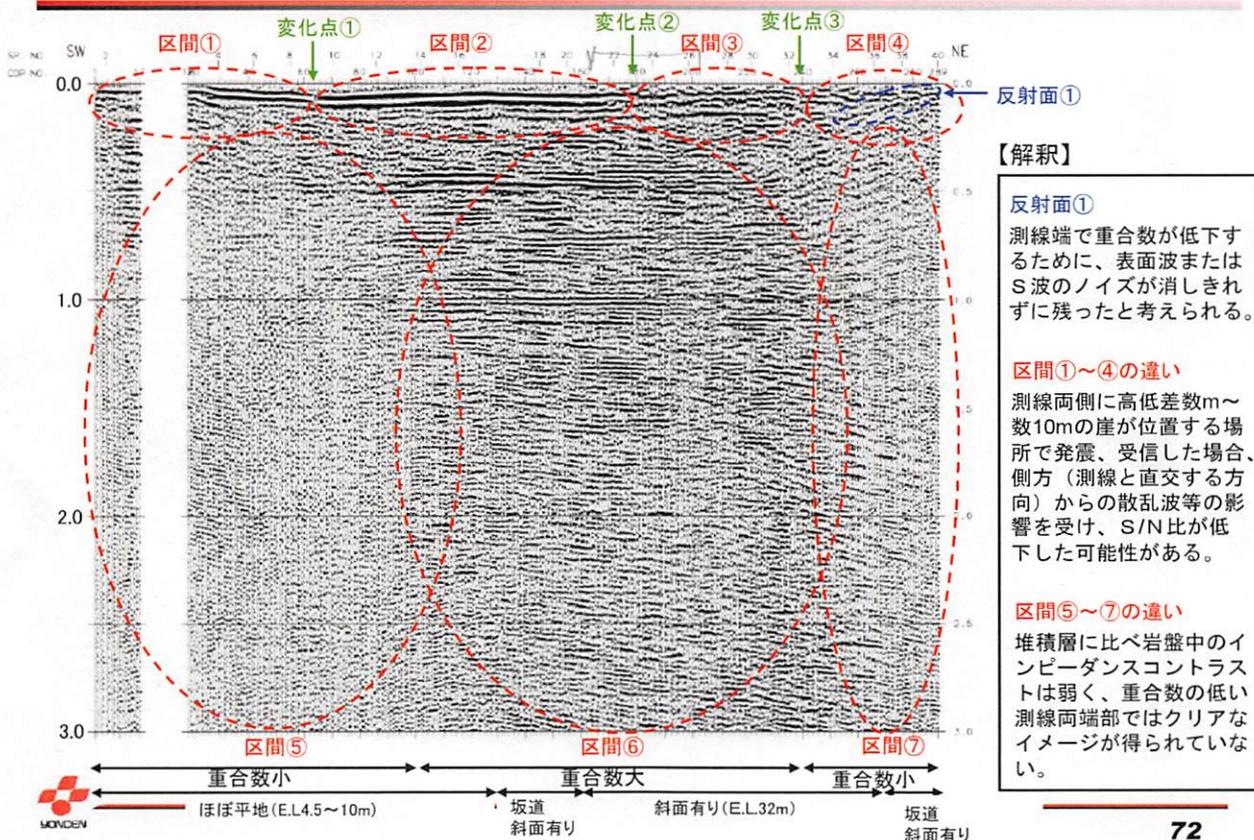
3. 6. 2 (3) CDP重合分布図



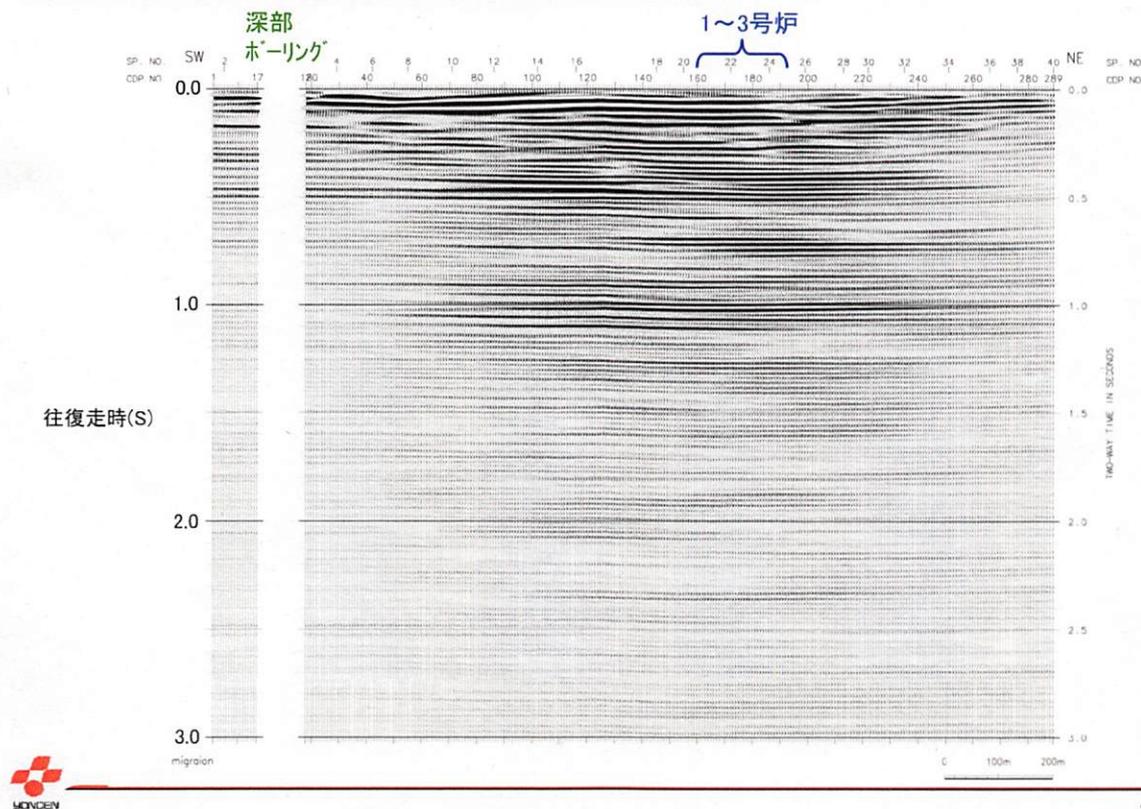
3. 6. 2 (4) 重合時間断面図



3. 6. 2 (5) 重合時間断面図(反射面の特徴の解釈)

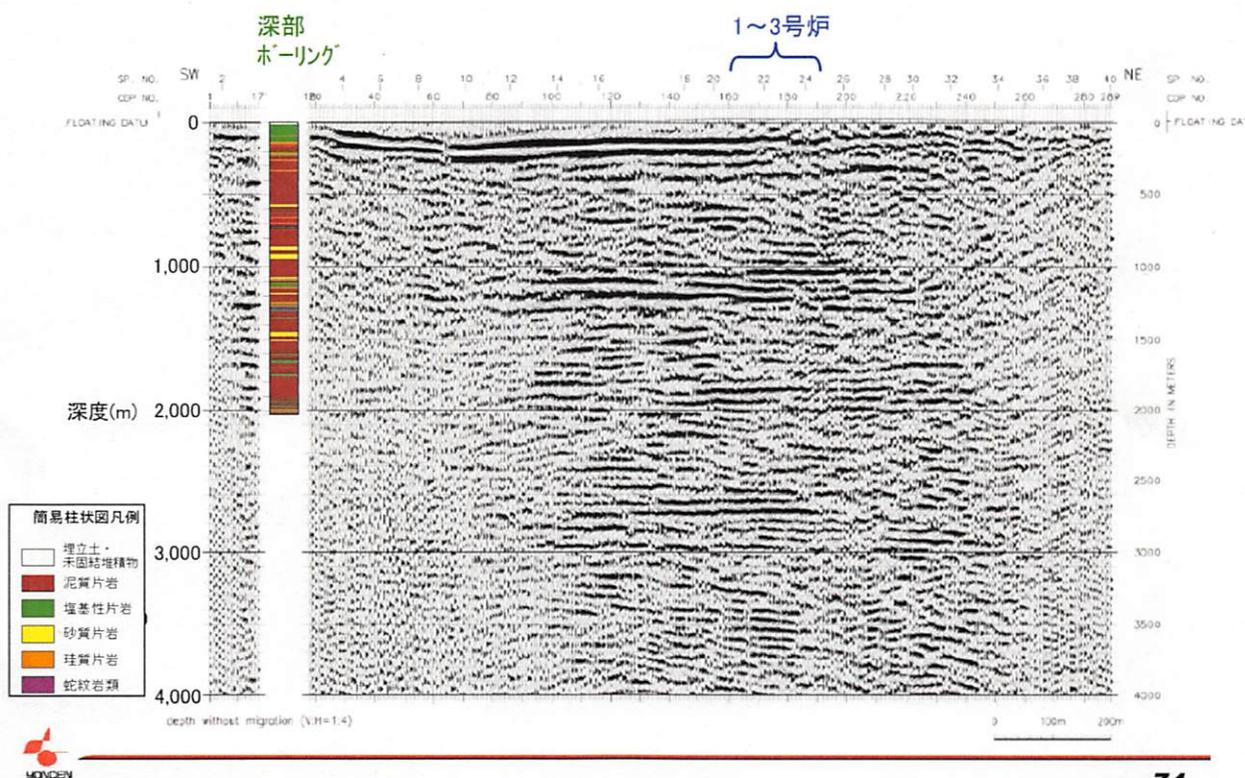


3. 6. 2 (6) マイクレーション時間断面図



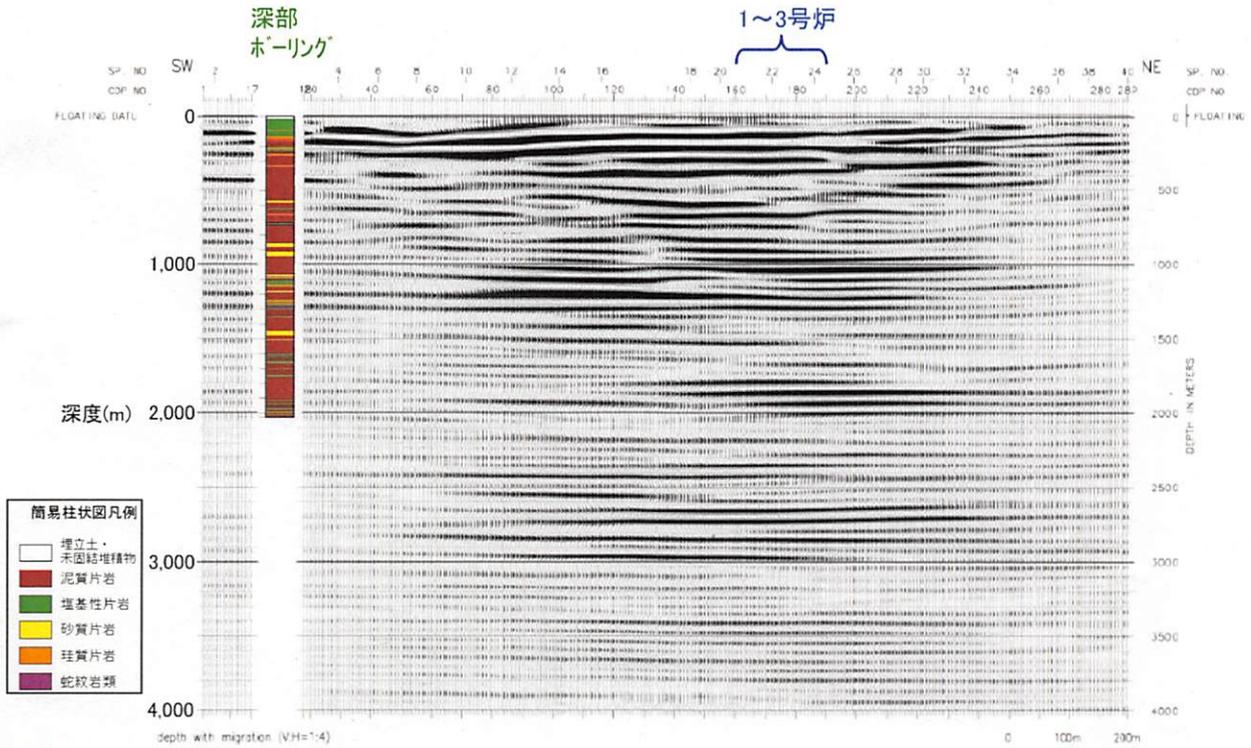
73

3. 6. 2 (7) 深度断面図 (マイグレーション適用なし)

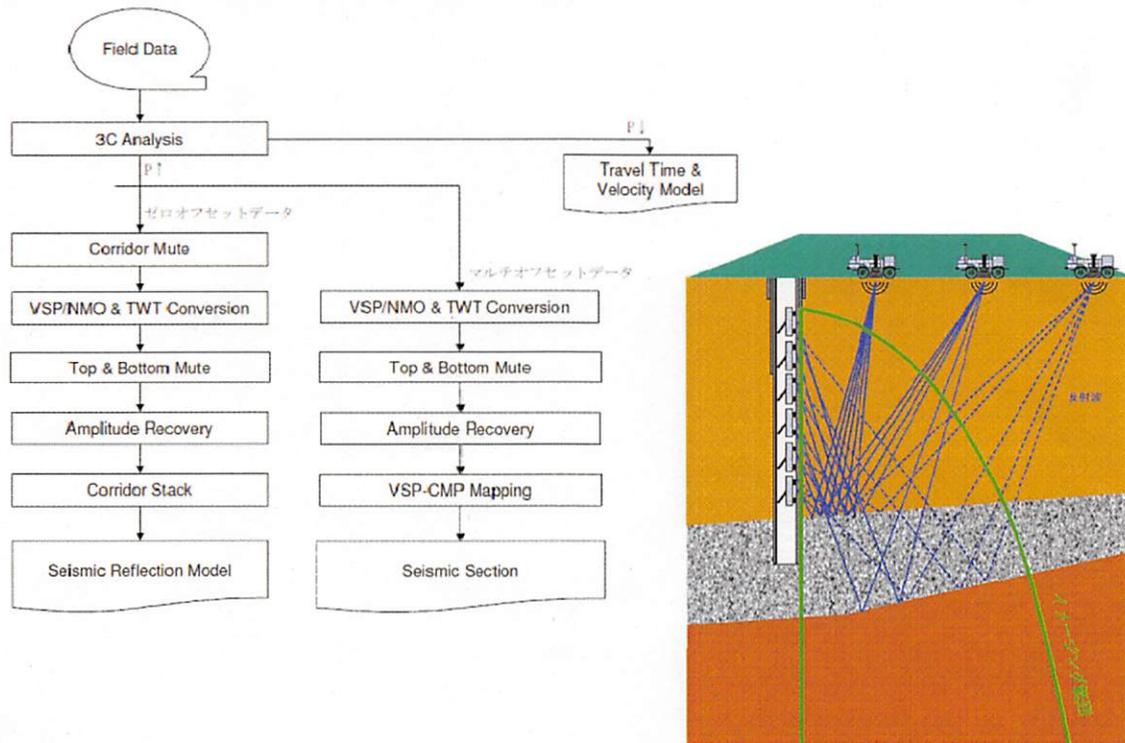


74

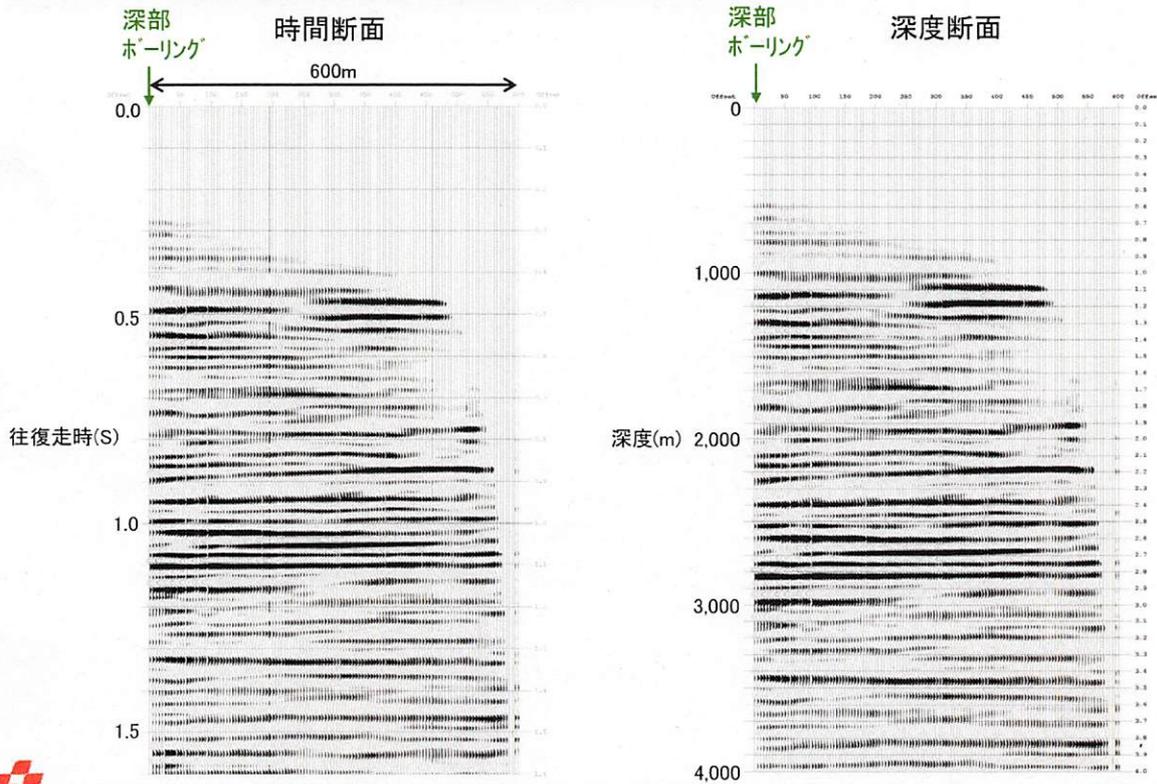
3. 6. 2 (8) 深度断面図 (マイグレーション適用後)



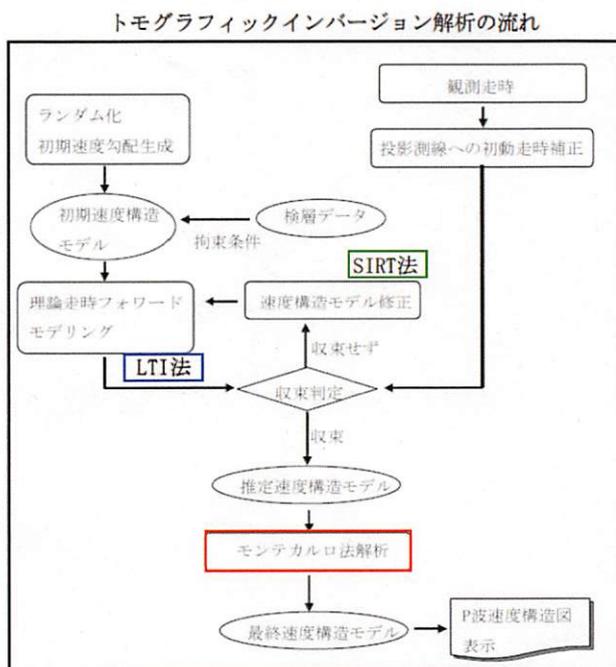
3. 6. 3 (1) VSP-CMPマッチング解析の流れ



3. 6. 3 (2) VSP-CMPマッピング



3. 6. 4 (1) トモグラフィ解析の流れ



トモグラフィックインバージョン解析

- ・ 屈折法データから読み取った初動走時を用いてトモグラフィックインバージョンによりP波・S波速度構造の逆解析モデリングを行う。
- ・ 初期速度構造モデルに対し、LTI法により計算した理論走時を用いて、観測走時との差が最小となるようSIRT法により速度構造モデルを修正する。
- ・ 誤差が収束するまで反復することにより、最終速度構造モデルを得る。

LTI法 (Asakawa and Kawanaka, 1993) 理論走時の計算

- ・ モデル領域の各格子をさらに細かく分割
- ・ 隣接する格子上の分割点を結ぶ波線の走時を計算
- ・ 得られた走時の組を用いて走時が最小になるよう波線を補間

SIRT法 繰り返し計算におけるモデルの修正

- ・ 波線経路に沿った格子に、走時の観測値と計算値の差を速度の修正値として割り振る。
- ・ SIRT法においては全波線で速度の修正値を計算して平均を取った値により、同時に修正を適用する。

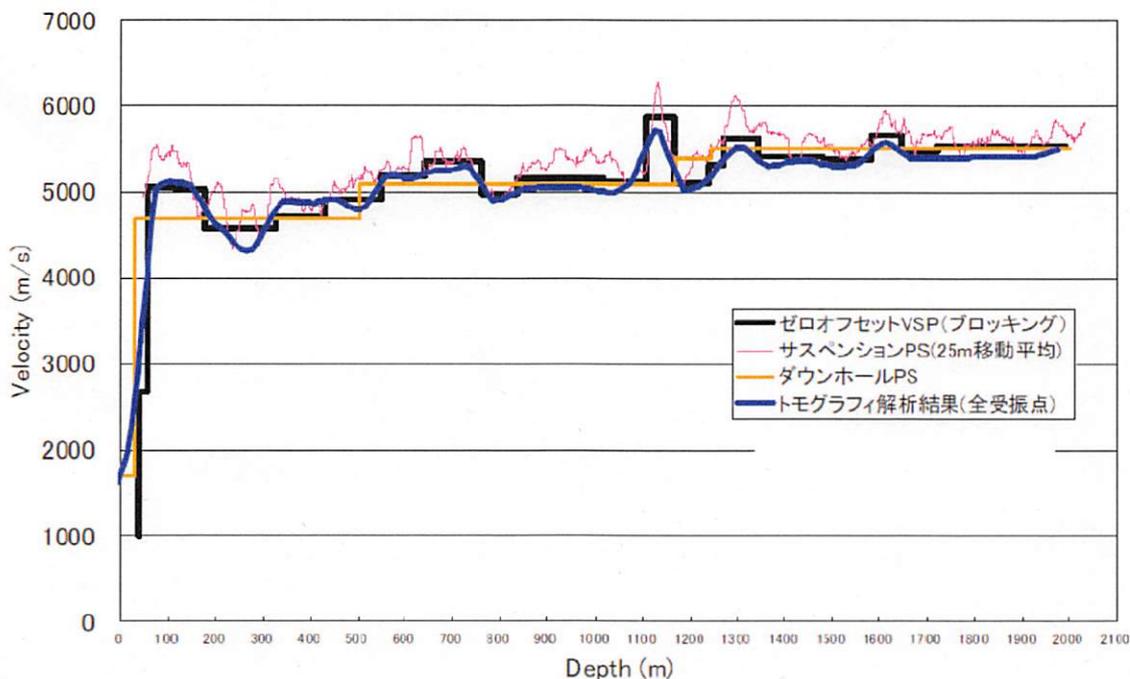
モンテカルロ法解析 解の信頼性検証(標準偏差分布) (初期モデルランダム化によるモンテカルロ不確実性解析)

- ・ ランダムに生成した多数の初期モデルに対してトモグラフィック解析を実施し、すべての結果を平均した速度分布およびその平均値からのバラつきを示す標準偏差分布を得る。
- ・ それら二つの情報は、それぞれ、トモグラフィック解析による速度構造モデル解とその確からしきの指標として提供できる。



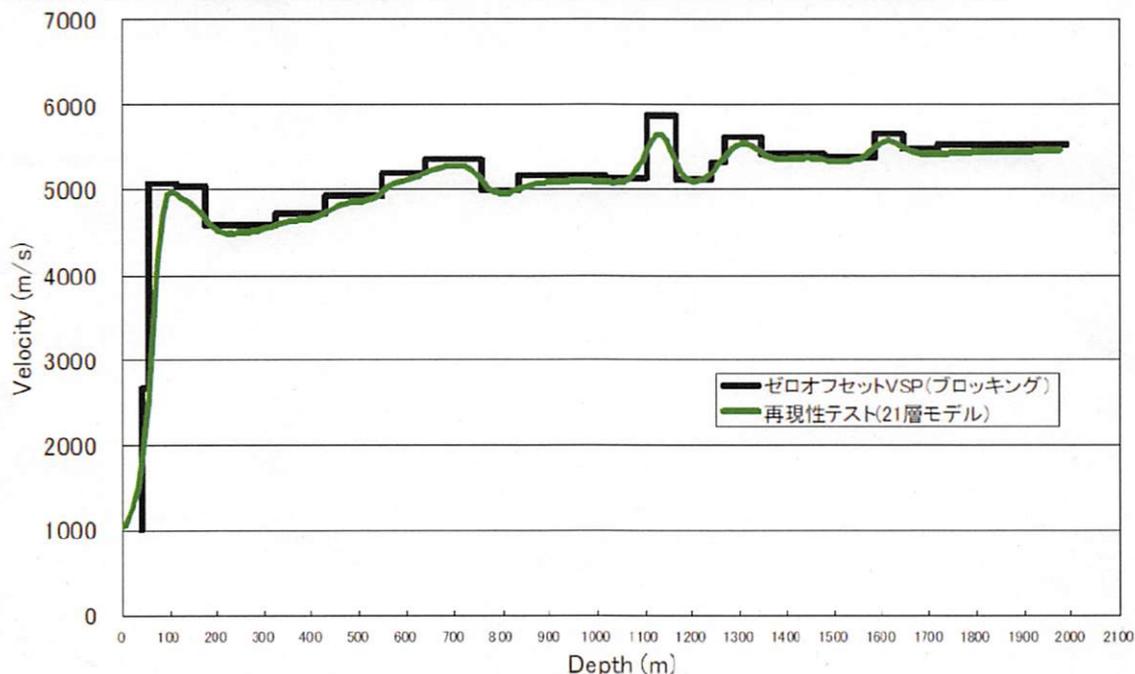
3. 6. 4 (2) 孔近傍の速度プロファイルの比較

トモグラフィックインバージョンの結果(孔位置で深さ方向に切り出したもの)は、ダウンホールPS検層結果等と整合的である。

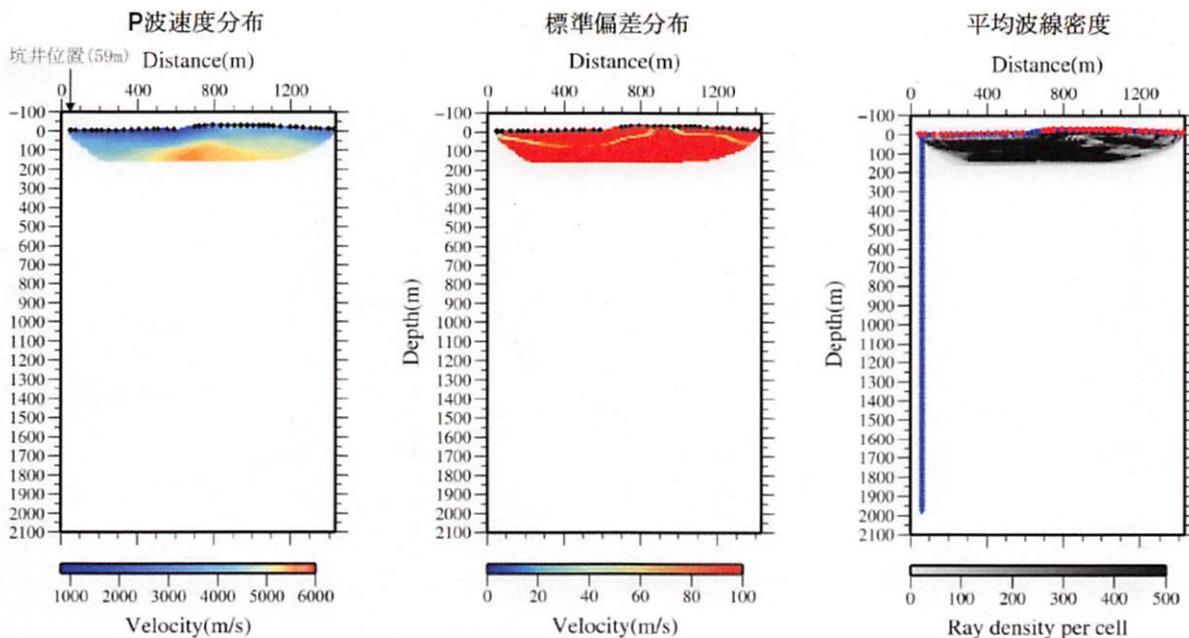


3. 6. 4 (3) 再現性に関するテスト(解析プログラム検証)

ゼロオフセットVSP解析より得られた21層の速度構造モデルを用いて理論走時を計算し、その理論走時を用いてトモグラフィ解析(再現性テスト)を行った結果、ゼロオフセットVSP解析で得られた速度構造モデルが精度良く再現され、インバージョンプログラムの妥当性が確認された。

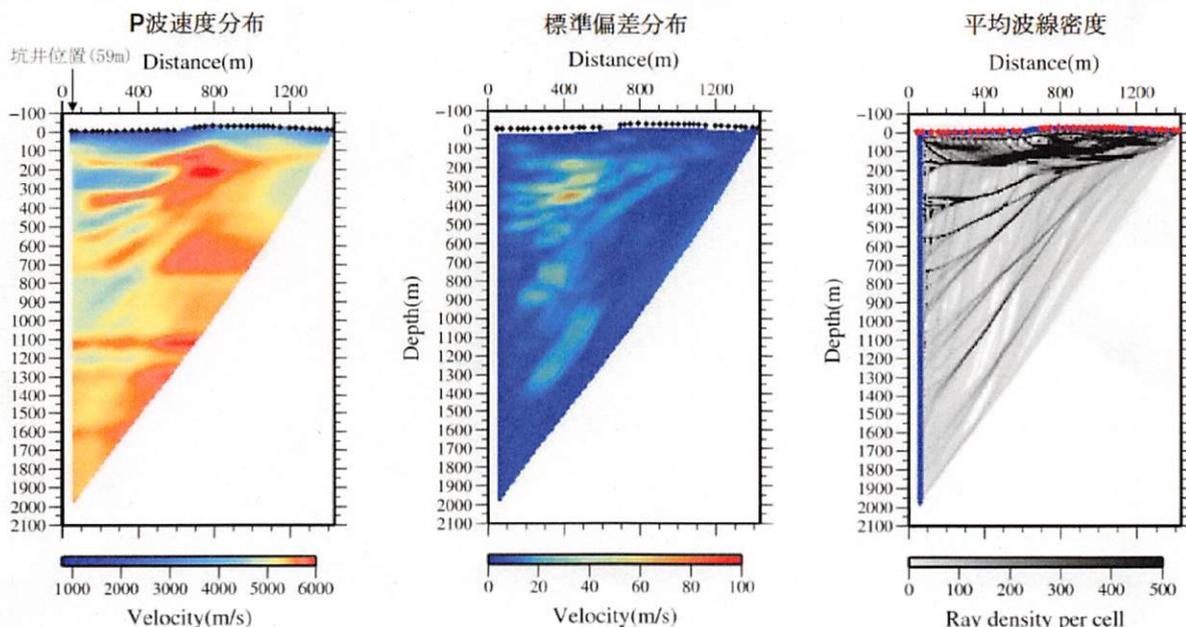


3. 6. 4 (4) トモグラフィ解析結果 (地表受信点のみ)



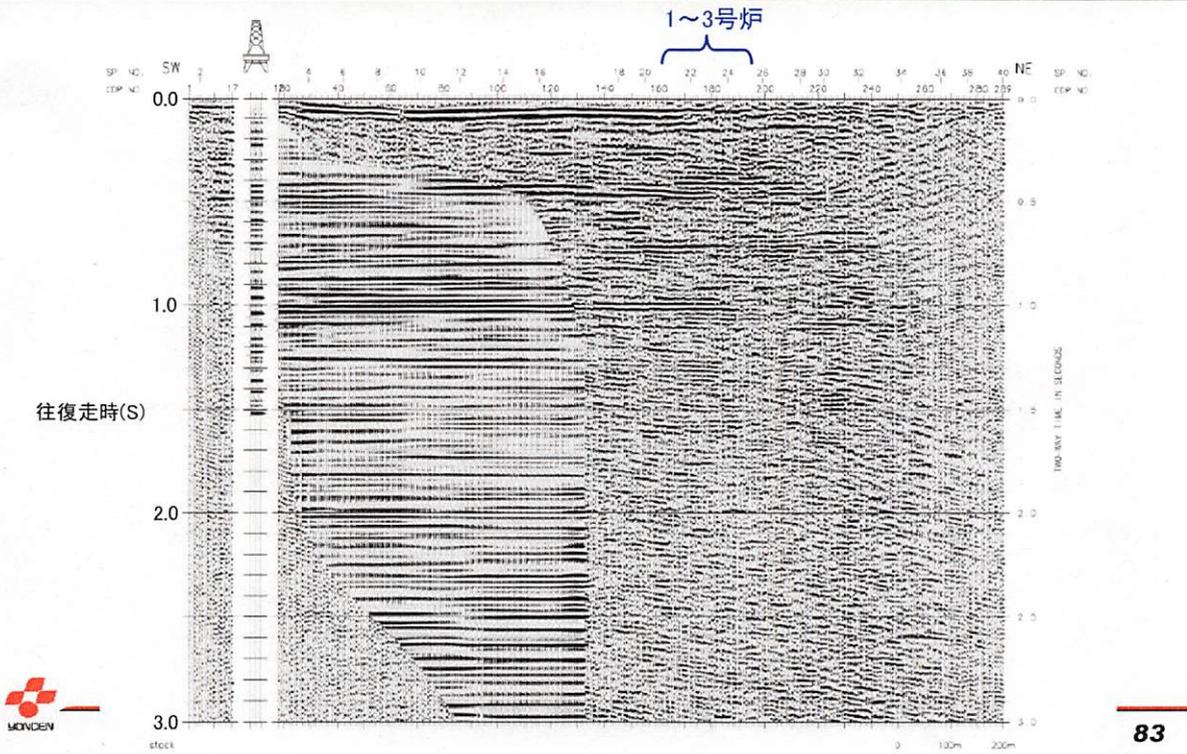
3. 6. 4 (5) トモグラフィ解析結果 (全受信点)

P波速度は深度約100m以深で概ね5km/sを上回る。
深部におけるP波速度分布の速度コントラストは、平均波線密度の影響を受けている可能性がある。

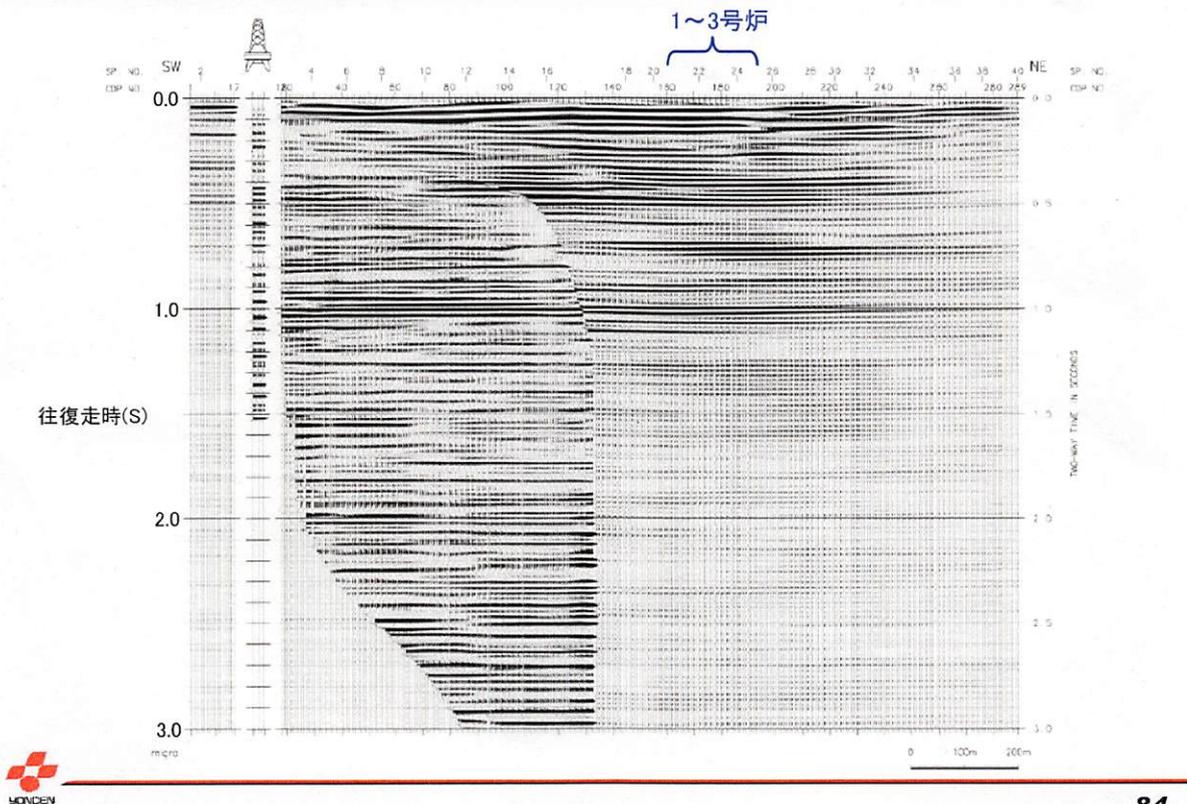


3. 6. 5 (1) VSP+反射法(時間断面 マイグレーションなし)

・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。

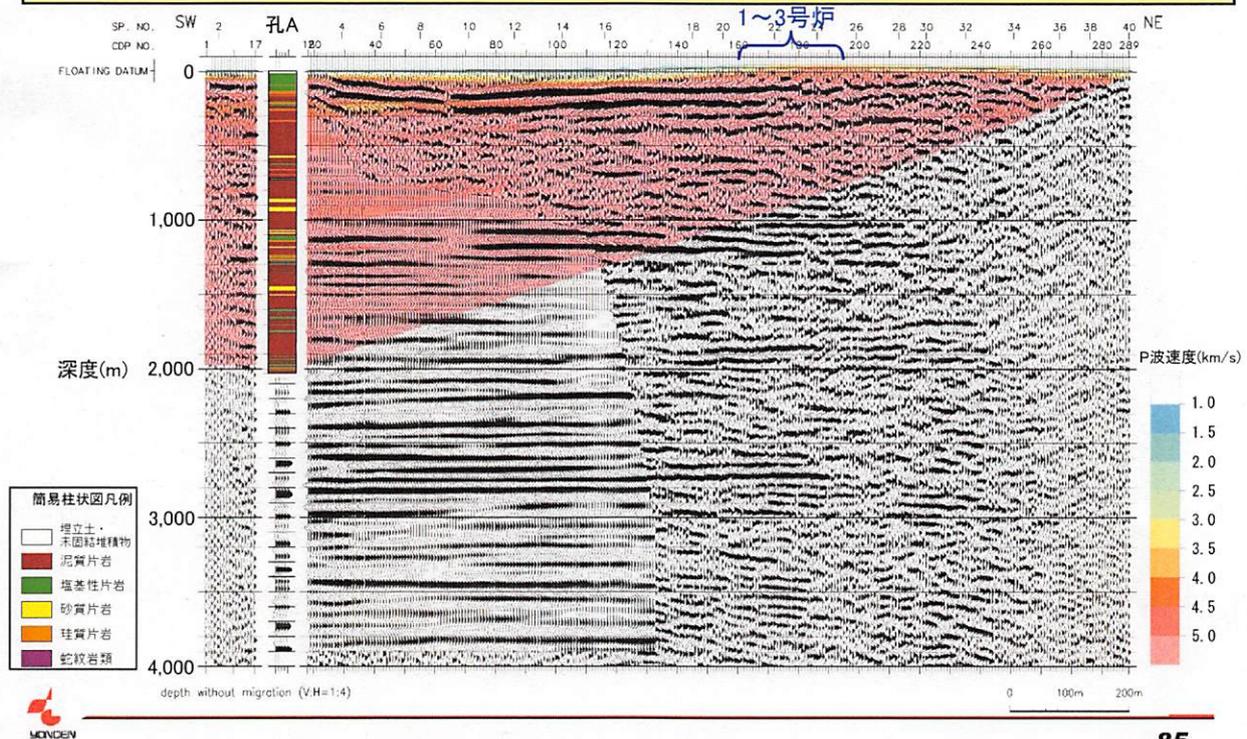


3. 6. 5 (2) VSP+反射法(時間断面 マイグレーション適用)



3. 6. 5 (3) VSP+反射法+トモグラフィ(マイグレーションなし)

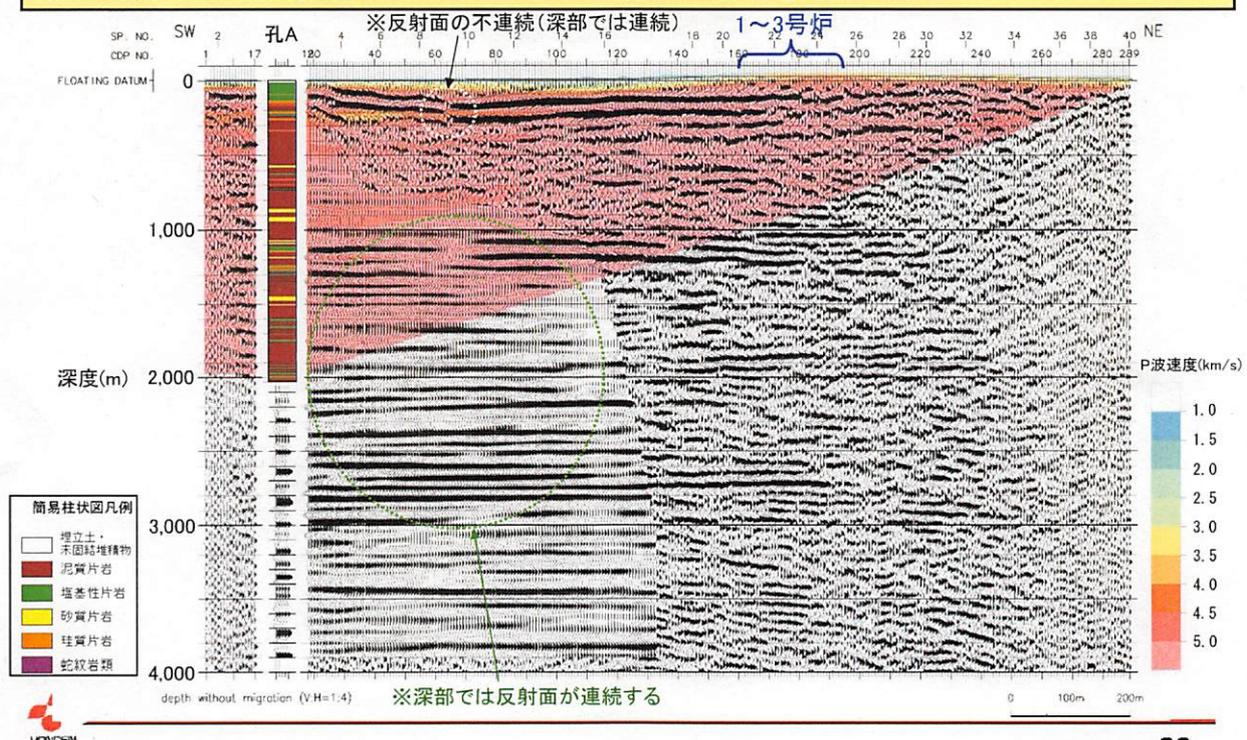
・敷地の地盤は極浅部を除けば $V_p=5\text{km/s}$ を上回る。地震動の特異な増幅の要因となる低速度域及び褶曲構造は認められず、敷地の地盤の速度構造は成層かつ均質と評価される。



85

3. 6. 5 (4) 反射面不連続部の追加解析

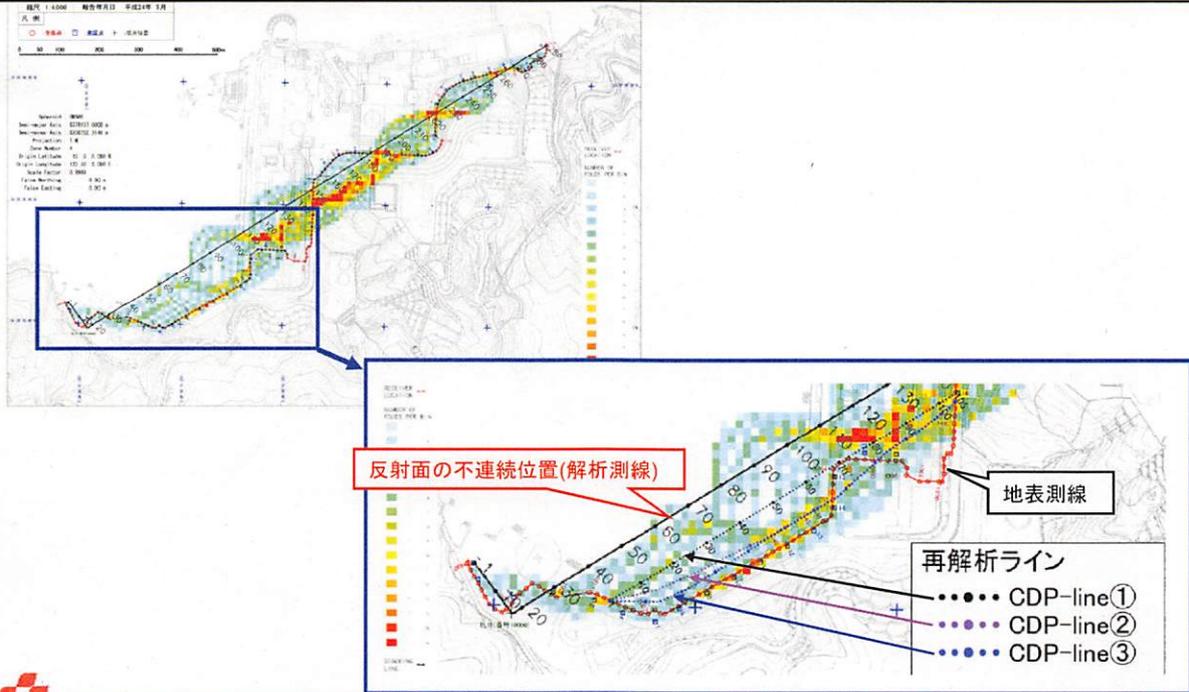
・孔LAから距離約300m、深度200m付近の反射断面に、反射面の不連続(白点線内)が認められる。その深部において反射面は連続するが、その不連続部の分析を実施した。



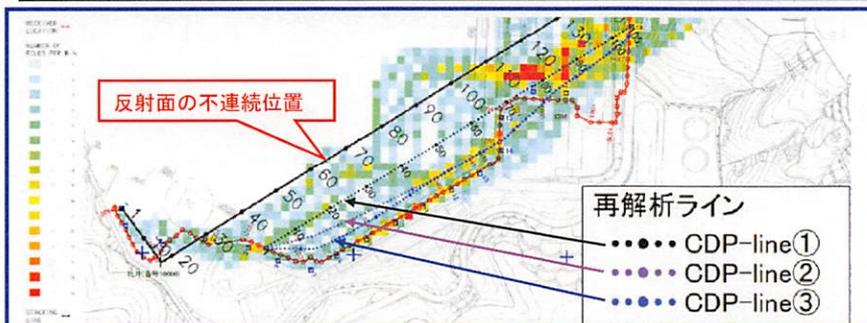
86

3. 6. 5 (5) 反射面不連続部の分析方法

・図に示す位置で確認された反射面の不連続について、解析測線と受信測線の位置が異なる影響および、速度フィルターの影響に着目した分析を実施。



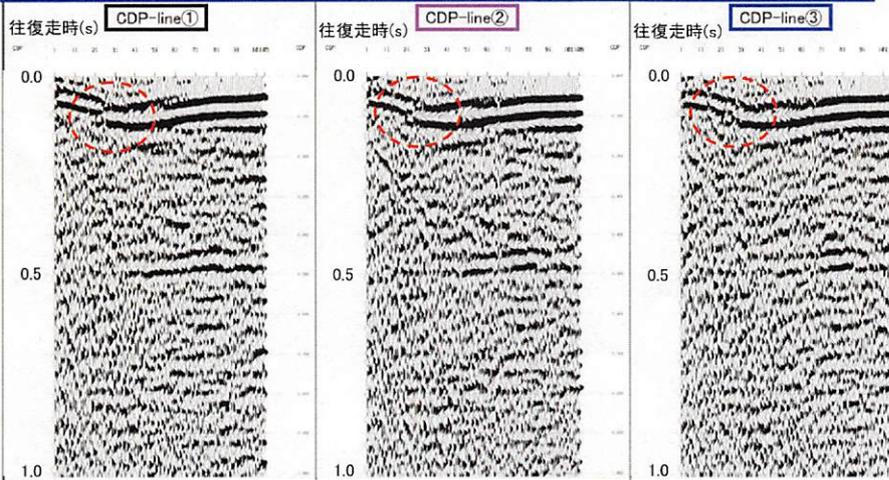
3. 6. 5 (6) 解析測線の設定位置による影響検討



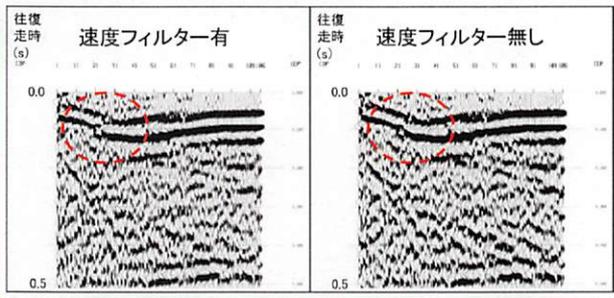
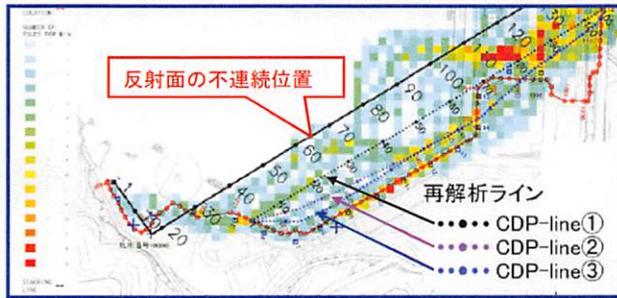
解析測線が受信測線に近づくに従い、不連続箇所が目立たなくなる。

CDP1~60付近では、解析測線と受信測線との角度が著しく変化し、重合される範囲も変化していることから、それらの変化に応じて反射イベントの形状に若干の違いが生じた可能性がある。

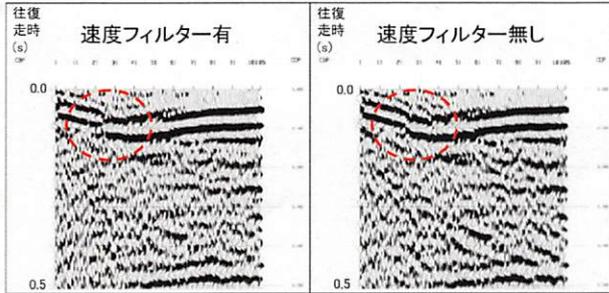
上記より、解析測線と受信測線がやや離れていることが影響していると考えられる。



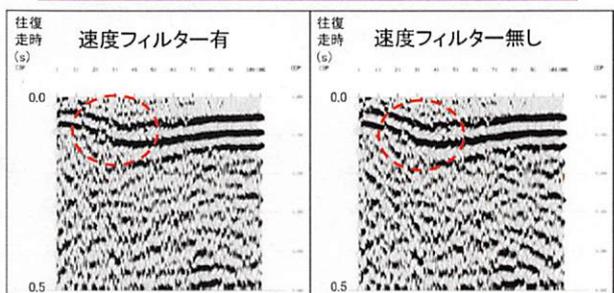
3. 6. 5 (7) 速度フィルターによる影響検討



CDP-line② (左: 速度フィルター有, 右: 速度フィルター無し)



CDP-line① (左: 速度フィルター有, 右: 速度フィルター無し)



CDP-line③ (左: 速度フィルター有, 右: 速度フィルター無し)

- ・既存処理では、見かけ速度が-1500~1500m/sの範囲は、速度フィルターによって反射波として現実的でない角度を有するとみなして除去していたが、速度フィルターを外した解析では不連続部が目立たなくなった。
- ・不連続部付近の反射イベントの傾斜が、速度フィルターで除去した見かけ速度と一部が一致したため、反射面の連続性が悪くなったと考えられる。

MONDEN

3. 6. 5 (8) 速度フィルターについて(補足)

- ・速度フィルターとは、反射法解析においてノイズを低減する目的で一般的に使用されるフィルターである。ここでの「速度」とは、あくまで時間断面上の(距離/往復走時)から算出した「みかけ速度」であり、地盤の地震波速度を示すものではない。
- ・今回の解析では、みかけ速度-1,500m/s~1,500m/sの範囲の波を除去したが、これは、地盤のP波速度が5,000m/sであった場合、約59°以上の傾斜を示す波を除去することを意味する。

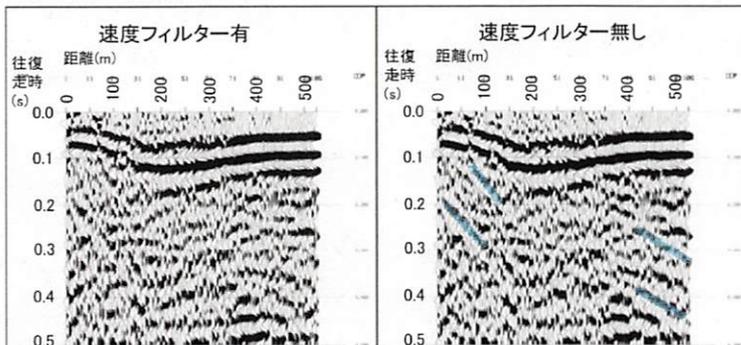
※P波速度=4,000m/sの場合は約53°、3,000m/sの場合は約45°となる。

-1500m/s ~ 1500m/s



速度フィルターの適用範囲

速度フィルターによって除去された部分の例



CDP-line③ (左: 速度フィルター有, 右: 速度フィルター無し)

MONDEN

【補足】

地盤の弾性波速度をVとすると、

$$\text{往復走時} = \text{距離(縦軸)} \times 2 / V \quad \text{①}$$

傾斜角を θ とすると、①より、

$$\begin{aligned} \tan \theta &= \text{距離(縦軸)} / \text{距離(横軸)} \\ &= \text{往復走時} \times V / \text{距離(横軸)} \times 2 \\ &= V / (\text{みかけ速度} \times 2) \quad \text{②} \end{aligned}$$

みかけ速度=1,500m/sでV=5,000mとすると、②より

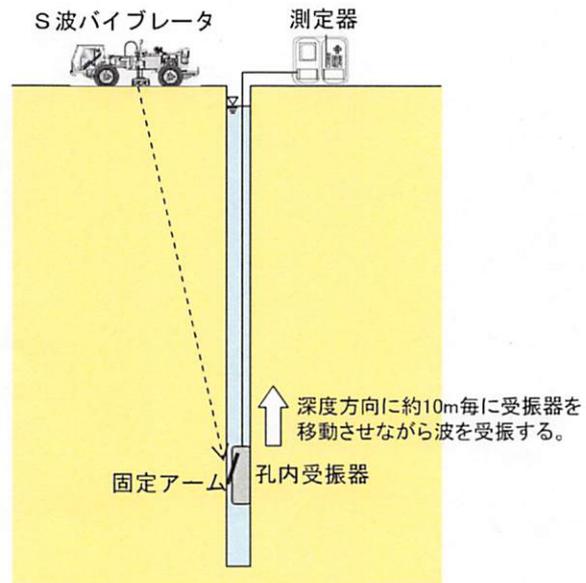
$$\begin{aligned} \theta &= \tan^{-1}(5,000 / (1,500 \times 2)) \\ &\approx 59 \end{aligned}$$

3.7(1) Q値(減衰特性)算定手法①

・S波バイブレータ震源を用いたPS検層(ダウンホール法)の記録を用いて、伝播距離と振幅(振幅スペクトル)との関係から、2種類の方法でQ値(減衰特性)を算定した。

【①最大振幅法】

- ・波形データから抽出した初動の最大振幅を用いてQ値を算定
- ・商用電源ノイズ等を除去するため、10～30Hzのバンドパスフィルタを適用。



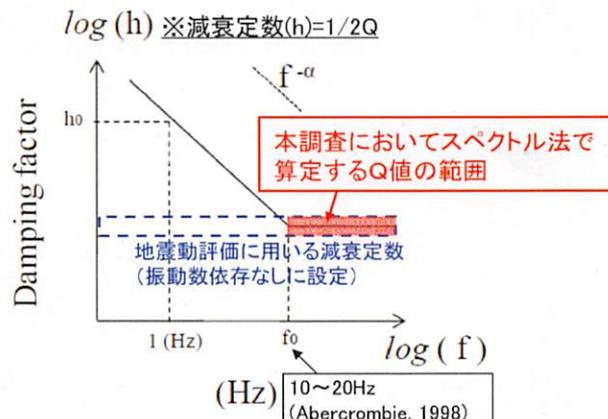
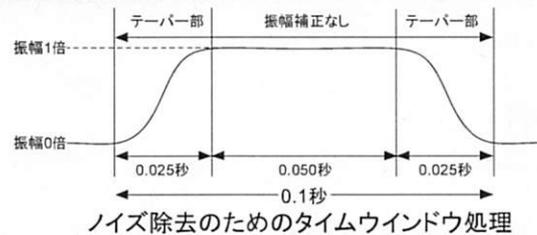
データ取得の模式図



3.7(2) Q値(減衰特性)算定手法②

【②振幅スペクトル法】

- ・周波数毎の振幅スペクトルを用いて周波数毎のQ値を算定。
- ・後続波等のノイズを除去するため、コサイン型テーパを付けて切り出したタイムウインドウ0.1秒の波形を使用。
- ・減衰のバイリニア型周波数依存モデル(佐藤ほか, 2006)に照らすと、スペクトル法で算定するQ値は、全周波数帯における評価値を包括した値(Q値の上限)である。

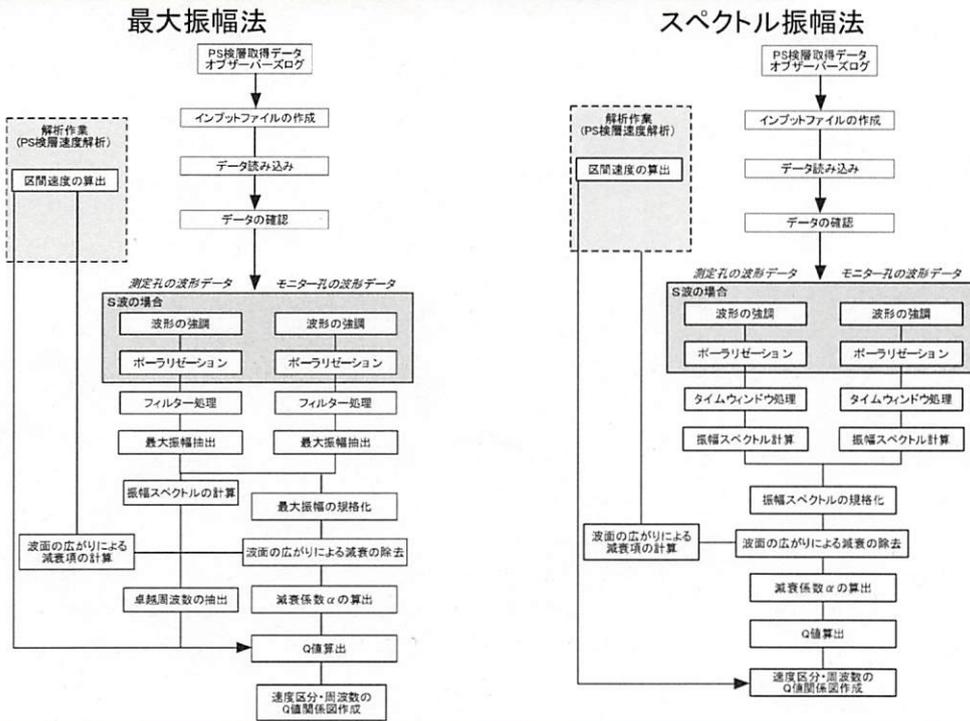


減衰のバイリニア型周波数依存モデルの概念図(佐藤ほか, 2006に追記)



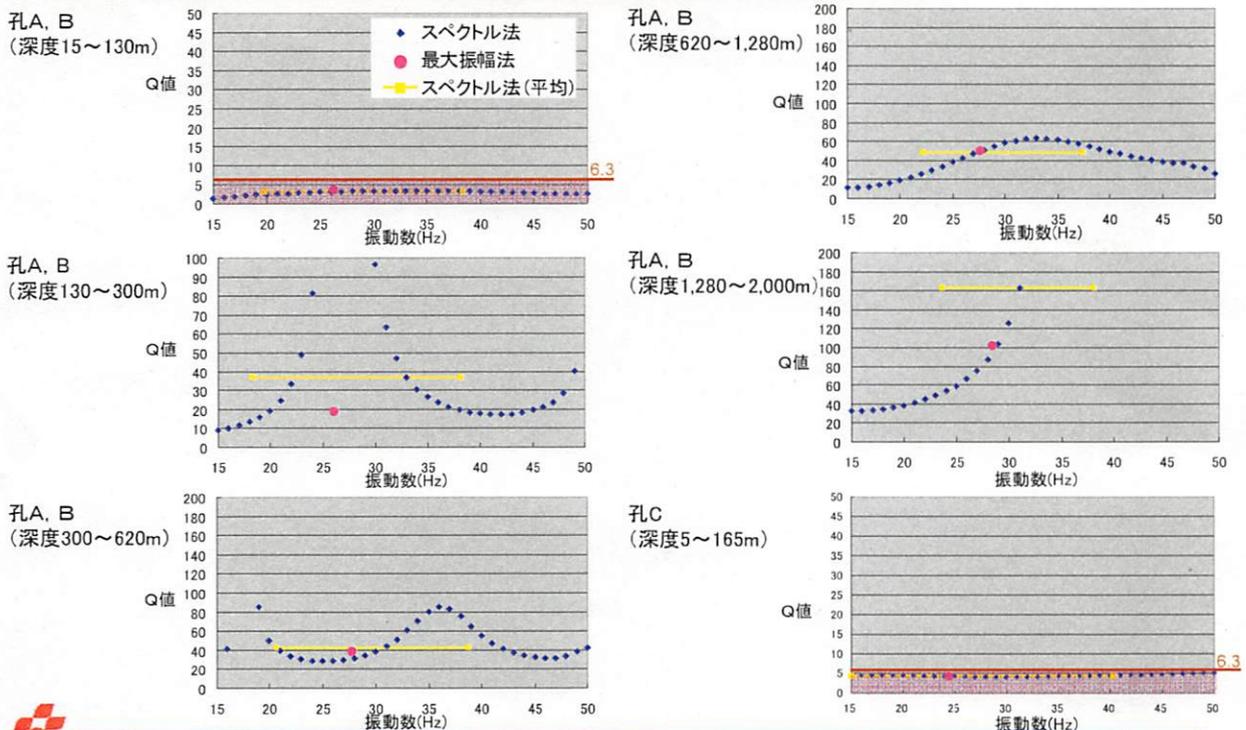
3.7(3) Q値(減衰特性)算定フロー

・最大振幅法およびスペクトル振幅法による解析フローを示す。



3.7(4) Q値(減衰特性)算定結果①

・最大振幅法およびスペクトル振幅法による解析結果を示す。



※データの信頼性を確保するため、スペクトル法の平均値および最大値は、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で評価した。

3. 7 (5) Q値(減衰特性)算定結果②

・最大振幅法およびスペクトル振幅法による解析結果を示す。

孔	深度(m)	Q値			卓越周波数	スペクトル法 評価に用いた 周波数範囲
		最大振幅法	スペクトル法 最大値	スペクトル法 平均値 ^{※1}		
C	5~165	6.3 ^{※2}	6.3 ^{※2}	6.3 ^{※2}	24.4	15~40
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 α 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。



4. 地盤増幅特性



4.1 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Vs=3.5km/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した。

＜3号耐震バックチェックにおける地盤構造モデル＞

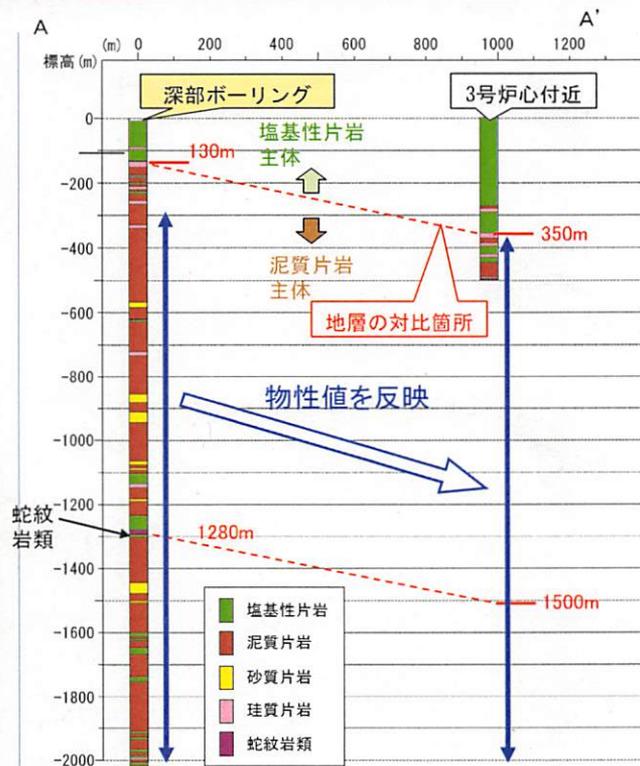
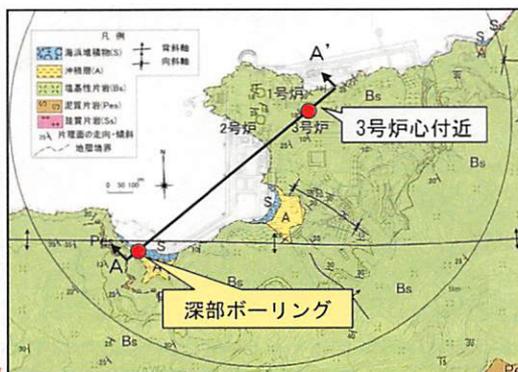
地表	深度 (m)	Vp (km/s)	Vs (km/s)	ρ (g/cm ³)	Q値	区分
	0~10	5.3	2.6	3.0	50	上部地殻
検討範囲 →	10~200	5.5	2.7	3.0	50	
地震基盤 →	200~2000	5.7	2.8	3.0	190	
	2000~16000	6.1	3.5	3.0	230	下部地殻
	16000~40000	6.7	3.87	2.8	400	
	40000~42000	6.6	3.82	2.8	400	海洋性地殻1
	42000~46000	6.7	3.87	2.9	400	海洋性地殻2
	46000~	8.0	4.62	3.2	1200	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



97

4.2 地盤モデル妥当性確認の考え方

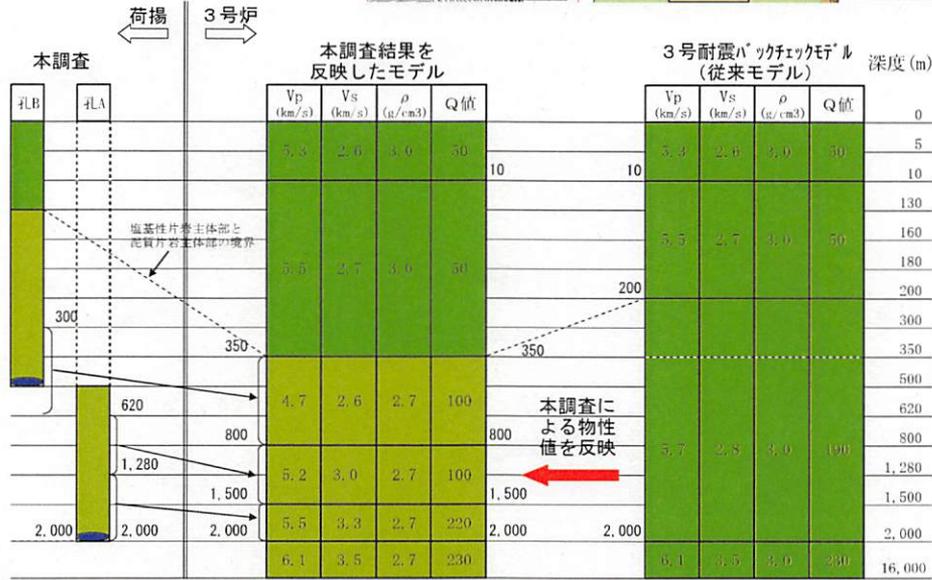
- ・本調査で得られた泥質片岩主体層におけるVp、Vs、密度およびQ値を3号地点の深度350~2000mに反映した場合の地盤増幅特性を検討し、既存の地盤構造モデルの妥当性を検証する。



98

4.3 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。



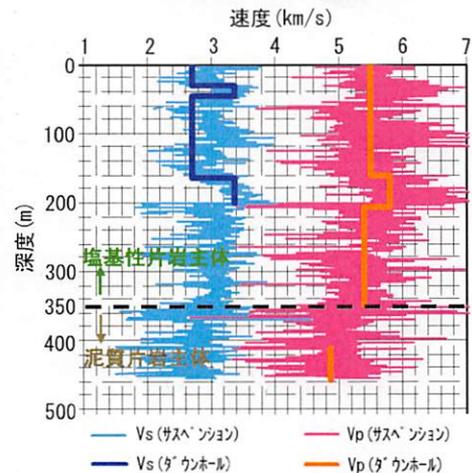
4.4 P波速度、S波速度の設定の考え方

- ・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: 試験坑における測定値 Vs: "
10~350	5.5	2.7	Vp: Vsと ρ (動弾アソビ) より算定 Vs: 原位置のPS検層 (ダウホール法) 測定値
			上記の10~200mの物性値を採用 Vp: 原位置のPS検層 (ダウホール法) 測定値と整合的 Vs: 原位置のPS検層 (サベソソ法) 測定値と整合的
350~800	4.7	2.6	本調査による深度300~620mのPS検層 (ダウホール法) による測定値を採用 Vp: 原位置のPS検層 (ダウホール法) 測定値と整合的 Vs: 原位置のPS検層 (サベソソ法) 測定値と整合的
800~1,500	5.2	3.0	本調査による深度620~1,280mのPS検層 (ダウホール法) 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 (ダウホール法) による測定値を採用

3号炉心PS検層結果



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



4.5 密度値の設定の考え方

- ・ 深度350m以浅の塩基性片岩主体層については、3号炉心付近で取得した岩石コアの密度を基に設定。
- ・ 深度350m以深の泥質片岩主体層については、本調査における密度検層結果から設定した。

【補足】

・ 本調査において、地表付近の堆積物および風化層が薄い孔C,Dの塩基性片岩のデータを用いて、密度検層結果と室内での密度試験結果を比較すると、前者がやや小さい傾向が認められる。

・ 密度検層は孔内で割れ目を含む地盤の密度を測定しているため、実際の地盤により近い値が得られていると考えられる。

・ これらを考慮し、3号地盤構造モデルにおける350m以浅の緑色片岩主体層の密度を再検討し、従来の設定値である3.0が妥当であることを確認した。

本調査結果反映モデル

地表からの深度 (m)	密度 (g/cm ³)	設定根拠
0~10	3.0	3号炉心付近のコアを用いた室内試験の測定値
10~350	3.0	本調査における密度検層の測定値と室内試験の測定値の対比から妥当性を確認
350~800	2.7	本調査の密度検層の測定値から設定
800~1,500	2.7	
1,500~2,000	2.7	

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

	室内試験による密度 (平均値)	原位置での密度検層値 (平均値)	地盤モデル設定値 (g/cm ³)
3号機地点 (深度約100m以浅)	3.01 (40試料)	2.96 (※)	3.0
本調査 (孔C, D) (深度170m以浅)	2.96 (13試料)	2.91 (原位置測定値は小さくなる傾向)	—

※本調査で得られた室内試験と密度検層による密度差 (0.05) を3号機地点に反映



101

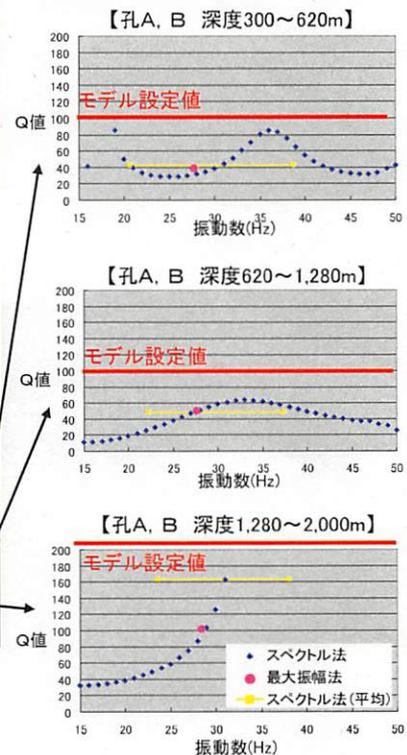
4.6 Q値の設定の考え方

- ・ 深度350m以浅の塩基性片岩主体層については、3号炉心位置におけるPS検層 (ダウンホール法) を基に設定。
- ・ 深度350m以深の泥質片岩主体層については、本調査におけるPS検層 (ダウンホール法) からQ値を算出し、安全側 (大きめ) に設定。

地表からの深度 (m)	Q値	設定根拠
0~10	50	原位置のPS検層 (ダウンホール法) から設定
10~350	50	10~200 原位置のPS検層 (ダウンホール法) から設定
		200~350 原位置のPS検層 (ダウンホール法) から設定
350~800	100	本調査のPS検層 (ダウンホール法) から設定 【参考】 本調査のPS検層 (ダウンホール法) 孔C 深度5~165m スペクトル法の最大値：4.6 最大振幅法の最大値：4.4
800~1,500	100	本調査のPS検層 (ダウンホール法) から設定 ※孔A, B スペクトル法の最大値：85.6 最大振幅法の最大値：38.7
1,500~2,000	220	Vs 115から設定 ・ スペクトル法は30Hz以上で値が発散、平均値163 ・ 最大振幅法：101.8

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

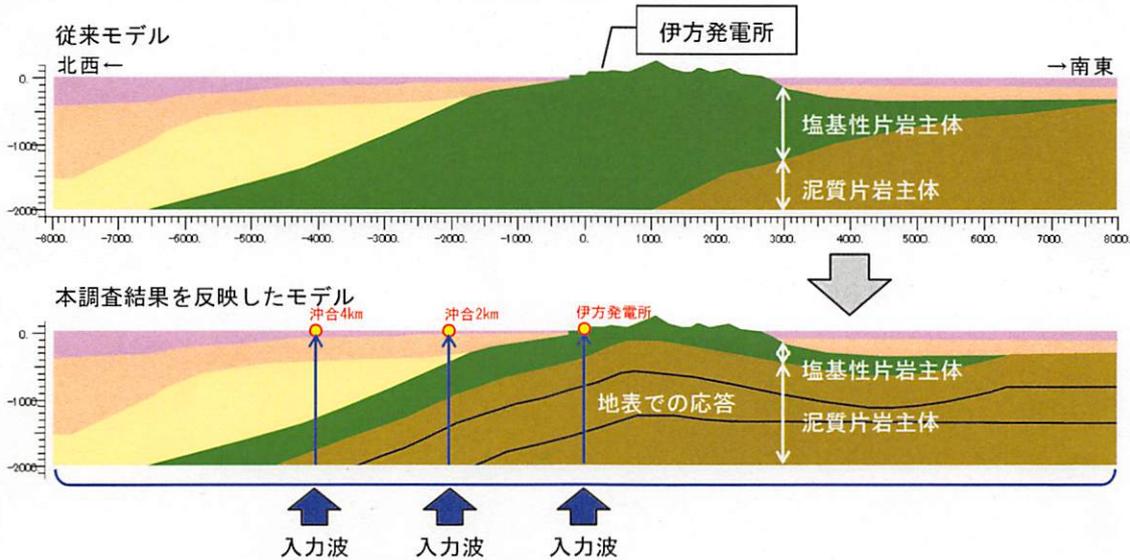
※データの信頼性を確保するため、スペクトル法の平均値および最大値は、卓越周波数における振幅スペクトルの1/√2以上の振幅スペクトルを示す周波数範囲で評価した。



102

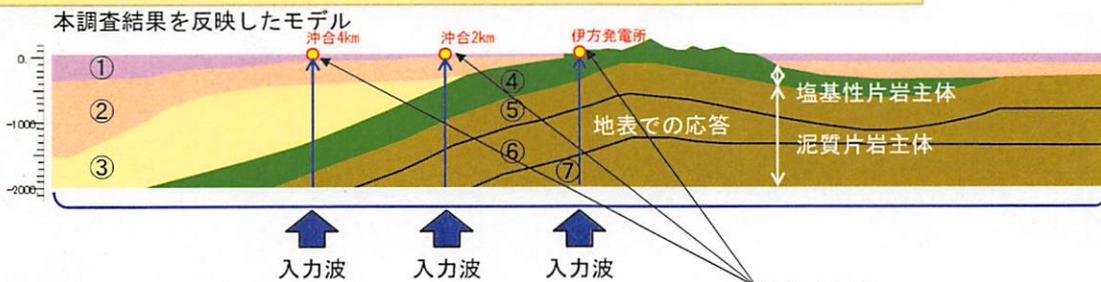
4.7 2次元地盤構造モデル

・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。



4.8 2次元地盤構造モデル(物性値の設定)

・本調査結果を反映した2次元地盤構造モデルの物性値を示す。



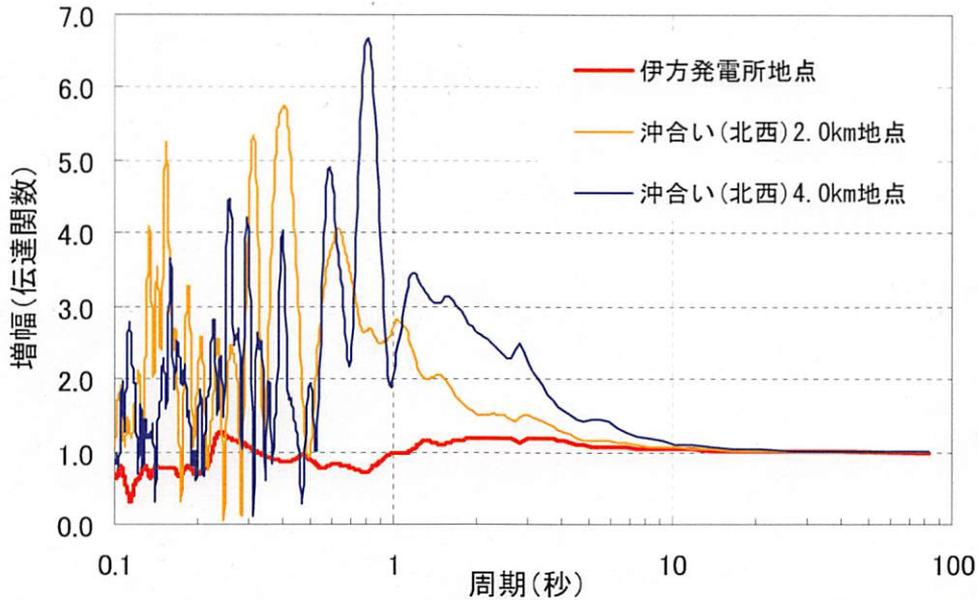
	単位体積重量 ρ (t/m ³)	S波速度 V_s (m/s)	P波速度 V_p (m/s)	Q値	減衰定数 h	せん断剛性係数 G_0 (t/m ²)	ポアソン比 ν	最大メッシュ (高さ×幅) (m)	透過振動数 (Hz)
①	1.75	500	1600	50	1.000E-02	4.46126E+4	0.446	(12.5×12.5)	8.0
②	2.30	1200	2400	50	1.000E-02	3.37730E+5	0.333	(25.0×25.0)	9.6
③	2.50	1800	3700	50	1.000E-02	8.25970E+5	0.345	(25.0×25.0)	14.4
④	3.00	2700	5500	50	1.000E-02	2.23012E+6	0.341	(50.0×50.0)	10.8
⑤	2.70	2600	4700	100	5.000E-03	1.86119E+6	0.280	(50.0×50.0)	10.4
⑥	2.70	3000	5200	100	5.000E-03	2.47791E+6	0.251	(50.0×50.0)	12.0
⑦	2.70	3300	5500	220	2.273E-03	2.99827E+6	0.219	(50.0×50.0)	13.2
2.0km以深	2.70	3500	6100	230	2.174E-03	3.37271E+6	0.255	-	-

・2次元FEMモデル
 ・側面境界条件：エネルギー伝達境界
 ・底面境界条件：粘性境界
 ・1波長5ポイントを目安に層分割
 (最大メッシュ高さ12.5m～50.0mでモデル化)



4.9 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地点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伝達関数はこれら沖合い地点の伝達関数を大きく下回っており、地震動の顕著な増幅は認められない。

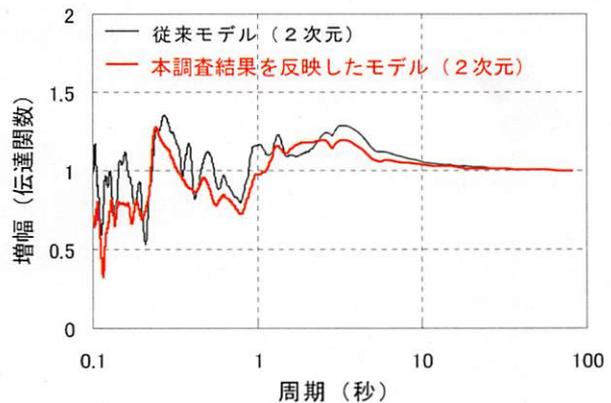
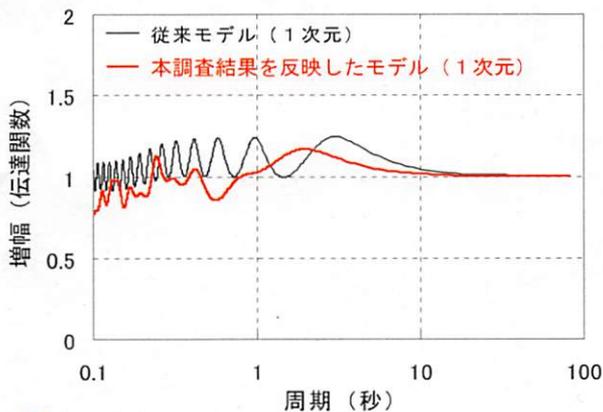


4.10 地盤増幅特性②

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。

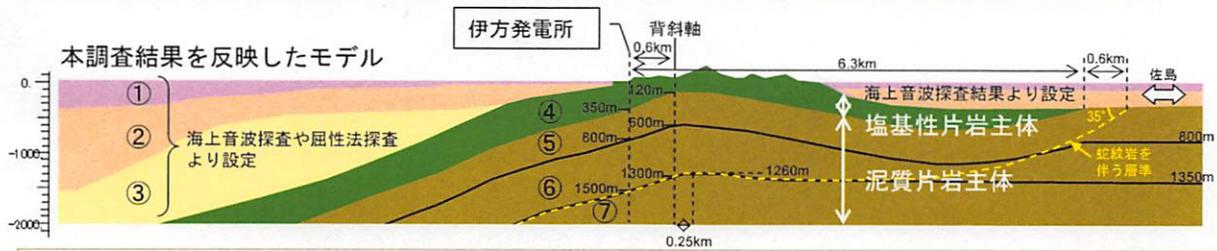
1次元および2次元いずれのモデルにおいても、本調査結果を反映したモデルの伝達関数は、全般に従来モデルの伝達関数と比較してほぼ同等またはそれ以下である。

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。



4.11 2次元地盤構造モデル(作成の考え方①)

・本調査結果を反映した2次元地盤構造モデルの設定根拠(その1)を示す。



【背斜軸の位置】

・コア観察による片理面傾斜方向等から、背斜軸は東西方向で、地表では孔Bのすぐ北、孔Cの南、孔Aの北を通り、南に約80度傾斜すると評価。モデル断面では伊方発電所(2号炉)の南590m(モデル上は600m)とした。

【泥質片岩上面の背斜トップの深度、位置】

・孔Bの泥質片岩上面深度130mと、背斜軸の位置、深度、孔Aの掘削ズリから、背斜軸における泥質片岩上面深度は120mと評価。軸は南に約80度傾斜すると考えられるものの、深度が浅いため軸位置は地表から変更しない。

【伊方発電所地点の泥質片岩上面深度】

・3号炉心ボーリングより深度350mに設定。

【泥質片岩⑥、⑦境界の背斜トップの深度、位置】

・孔Aの深度1300m付近で蛇紋岩が北傾斜というデータを考慮すると、⑥、⑦境界の背斜トップは地表の背斜軸よりやや南側に位置すると考えるのが合理的。南傾斜約80度と考えると、⑥、⑦境界の背斜面トップは地表の背斜軸位置より南に約240m。モデル上は250mとした。

・背斜トップ深度は、泥質片岩の上面の形状も考慮し、軸部の南側の境界線を滑らかに引くことを考慮して1260mに設定。

【伊方発電所地点の泥質片岩⑦上面深度】

・泥質片岩トップの形状に合わせて深度1500mと設定。

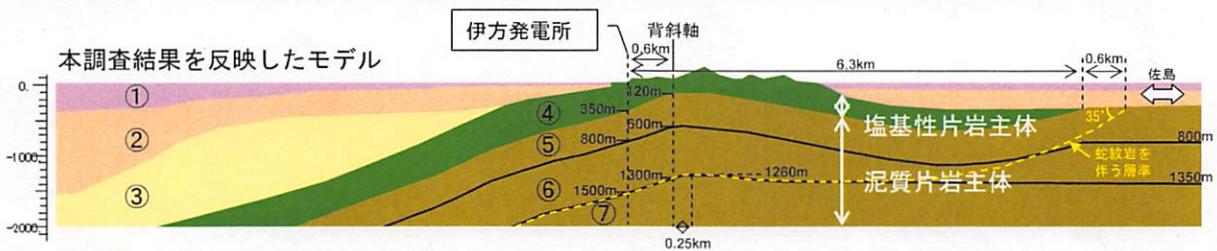
【泥質片岩⑤、⑥の境界】

・深部ボーリング地点では深度620mで層区分しており、背斜トップ位置では、深部ボーリング地点と同様に深度620m(モデル上は600m)で区分。伊方発電所地点では、泥質片岩のトップの形状に合わせて深度800mに設定。

107

4.12 2次元地盤構造モデル(作成の考え方②)

・本調査結果を反映した2次元地盤構造モデルの設定根拠(その2)を示す。



【伊方発電所から北側の境界深度】

・伊方発電所地点における各層の深度方向の厚さを一定とし、そのまま北方に延長する。

【背斜軸から南側の塩基性-泥質境界位置、形状】

・孔Aの深度1300mの蛇紋岩は、地層分布から、八幡浜の蛇紋岩に対応すると評価。

・佐島(宇和海)の泥質片岩は蛇紋岩以深の層準に対応するものと評価し、蛇紋岩は八幡浜の蛇紋岩から佐島の北端(海中)を通過し、モデル上では伊方発電所(2号炉)から南に6.9km地点(T層下面における境界線の位置)とした。

・塩基性片岩の南端について、鹿島ほか(1983)の南予用水のトンネル観察断面図では、蛇紋岩と塩基性片岩の水平距離が700m程度と示されている。八幡浜港北側の塩基性片岩の分布南限とその南に位置する蛇紋岩との関係が、解析断面においてもほぼ平行と想定し、蛇紋岩との水平距離を600mとして発電所から南に6.3kmの地点とした。

・鹿島ほか(1983)によると、八幡浜付近の塩基性片岩/泥質片岩境界の解析断面方向の傾斜角が約35度であることから、解析断面においても境界の傾斜角を約35度とした(ただし、深部に向かうにつれて低角化)。

【背斜軸から南側の泥質片岩⑤、⑥、⑦の境界】

・⑤、⑥の境界については、佐田岬半島の背斜軸位置から⑤の層厚を一定で南へ延長する(南端深度800m)。地質層序のみを参考とした場合は南方へ浅くなるものの、深度による封圧が物性に及ぼす影響を考慮して設定した。

・⑥、⑦の境界については、佐田岬半島南側の蛇紋岩の向斜軸位置からそのまま深度一定で南へ延長する(南端深度1350m)。地質層序のみを参考とした場合は南方へ浅くなるものの、深度による封圧が物性に及ぼす影響を考慮して設定した。

108

5. まとめ



5. まとめ

- ・深度2000mまでの深部ボーリング調査等により、伊方発電所付近には地下深部まで堅硬かつ緻密な結晶片岩類が分布することを確認した。地下浅部で塩基性片岩主体、地下深部では泥質片岩主体である。
- ・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（ $V_s=2.2\sim 3.3\text{km/s}$ ）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。
- ・密度は $2.7\sim 3.0\text{g/cm}^3$ 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。
- ・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。
- ・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。