

芦田証人 尋問資料

資料 1 (甲 4 5 6 ・ 「意見書」)

意見書

2019年(令和元年)9月1日

氏名 芦田 讓



1. 私の経歴

私は1943年生まれで、1967年3月に京都大学理学部地球物理学科を卒業し、同年4月に石油資源開発(株)に入社しました。石油探査等の業務に20年弱従事し、中国の渤海湾や新潟県岩船沖の油田発見の成果をまとめ、東京大学で工学博士の学位を取得しました。1986年9月に講師として京都大学工学部に戻り、1988年4月に同大学工学部助教授、1996年11月に同大学工学部工学研究科教授となり、2007年3月に定年退職し、同年4月に名誉教授になりました。

私は、研究・教育の傍ら、日本学術会議会員、(社)物理探査学会会長、経済産業省国内石油・天然ガス基礎調査実施委員会委員長、経済産業省二酸化炭素炭層同

資料 2

(伊方 1 号炉についての平成 4 年 1 0 月 2 9 日最高裁判決)

についで、あらかじめ原子力委員会の意見を聴き、これを尊重しなくてはならないと定めているのは、右のような原子炉施設の安全性に関する審査の特質を考慮し、右各号所定の基準の適合性については、各専門分野の学識経験者等を擁する原子力委員会の科学的、専門技術的知見に基づく意見を尊重して行う内閣総理大臣の合理的な判断にゆだねる趣旨と解するのが相当である。

以上の点を考慮すると、右の原子炉施設の安全性に関する判断の適否が争われる原子炉設置許可処分¹の取消訴訟における裁判所の審理、判断は、原子力委員会若しくは原子炉安全専門審査会の専門技術的な調査審議及び判断を基にしてされた被告行政庁の判断に不合理な点があるか否かという観点から行われるべきであって、現在の科学技術水準に照らし、右調査審議において用いられた具体的審査基準に不合理な点があり、あるいは当該原子炉施設が右の具体的審査基準に適合するとした原子力委員会若しくは原子炉安全専門審査会の調査審議及び判断の過程に看過し難い過誤、欠落があり、被告行政庁の判断がこれに依拠してされたと認められる場合には、被告行政庁の右判断に不合理な点があるものとして、右判断に基づく原子炉設置許可処分は違法と解すべきである。

資料 3

(甲 8 7 5 ・ 「三次元探査に関する規則解釈等の抜粋」 ・ 1 頁)

三次元探査に関する規則解釈等の抜粋

1. 「実用発電用原子炉及びその付属施設の位置，構造及び設備の基準に関する規則の解釈」(平成 25 年 6 月 19 日)(乙 4 2 7)

(別記 2)

第 4 条第 5 項四号

①敷地及び敷地周辺の地下構造(深部・浅部地盤構造)が地震波の電波特性に与える影響を検討するため，敷地及び敷地周辺における地層の傾斜，断層及び褶曲構造等の地質構造を評価するとともに，地震基盤の位置及び形状，岩相・岩質の不均一性ならびに地震波速度構造等の地下構造及び地盤の減衰特性を評価すること。なお，評価の過程において，地下構造が成層かつ均質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すること。

②上記①の評価の実施にあたって必要な敷地及び敷地周辺の調査については，地域特性および既往文献の調査，既存データの収集・分析，地震観測記録の分析，地質調査，ボーリング調査ならびに二次元又は三次元の物理探査等を適切な手順と組み合わせで実施すること。

資料 4

(甲 8 7 5・「三次元探査に関する規則解釈等の抜粋」・2頁)

まえがき 5 調査及び調査結果の信頼性

基準地震動及び基準津波の策定等に関する調査にあたっては、調査手法の適用条件および精度等に配慮し、目的に応じた調査手法により実施されることが必要であり、可能な限り、最先端の調査手法が用いられていることが重要である。

I. 1 (3)

基準地震動及び基準津波の策定ならびに地盤の変位の評価にあたって行う調査や評価は、最新の科学的・技術的知見を踏まえていることを確認する。

参考 海上音波探査マニュアル1.(2)

海上音波探査の調査技術は常に進歩しているため、既往の探査記録の調査仕様及び分解能等の特徴をよく理解し、調査目的に応じた適切な仕様による調査が行われていることを確認する必要がある。特に、他機関による調査での測線間隔及び分解能は、調査目的が異なっているため、原子力発電所の耐震安全性の評価に必要十分な仕様でない場合がある。

原子力発電所の耐震安全性の評価に必要な探査記録の仕様は、中期更新世以降の地層が、活動性を評価する上で十分に明瞭であること、浅部から深部への変位・変形の累積性の確認が出来ることが挙げられる。このため、例えば既往資料のエアガンの記録のみでは活動性についての検討が十分実施できない場合や、既往資料のスパーカー等では分解能が十分でないために、活構造かどうかの判断が難しいデータとして不十分な場合等がある。また、調査時期によって測線

資料 5

(甲 8 7 5 ・ 「三次元探査に関する規則解釈等の抜粋」 ・ 3 頁)

同(3)①

地質構造を大局的にとらえるための格子状の測線の他に、敷地に与える影響の大きな断層については、断層の端点、断層の三次元形状及び断層相互の三次元的な位置関係を正確に把握するため、より密な測線配置となっているか、測線が断層に対して直角に近い角度で配置されているか、最新の文献や海底地形図等を用いて測線配置を検討しているかを確認すること。

同(4)②

断層の中期又は後期更新世以降における活動性を評価するためには、分解能の高い音源が用いられ、且つ、SN比に優れたデータ(雑音量(noise)に対する信号量(signal)の比が高いデータ)を得ることが重要であるため、技術的に達成可能な限りこれらが満たされた調査仕様が選定されていることを確認すること。

同③

断層の三次元形状や断層相互の三次元的な位置関係等の断層の幾何学的形状を把握することが重要である。必要に応じて三次元音波探査等適切な探査方が使用されているかを確認すること。

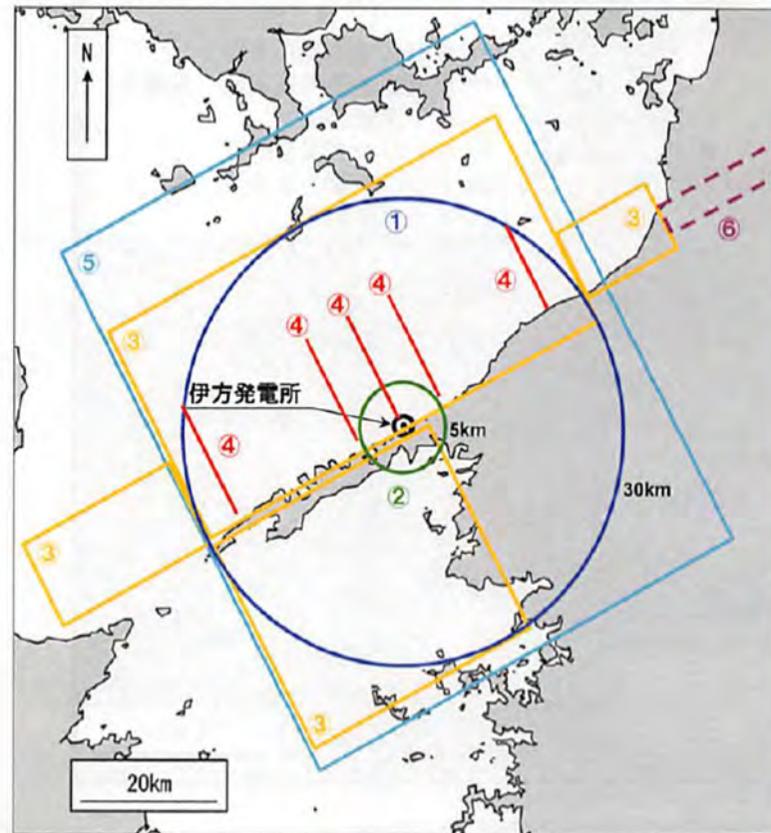
同(解説)

資料 6

(甲 4 6 1 ・ 4 頁)

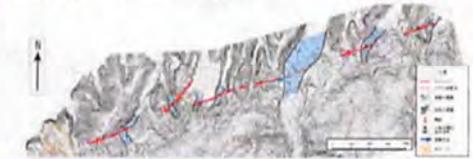
1. 地質調査の概要

地質調査の概要②



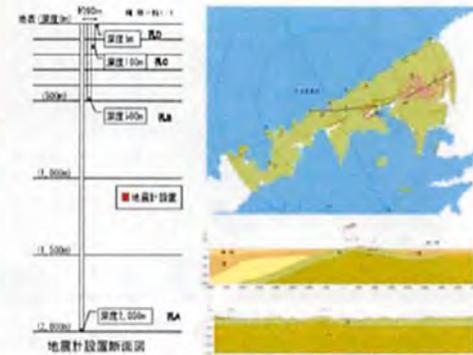
①地形調査

DEMデータの取得、音響測深、変動地形に着目した地形判読



②深部ボーリング調査・地表地質調査

敷地における深さ2,000mまでの深部ボーリングと敷地近傍における地表踏査によって詳細な地下構造を把握



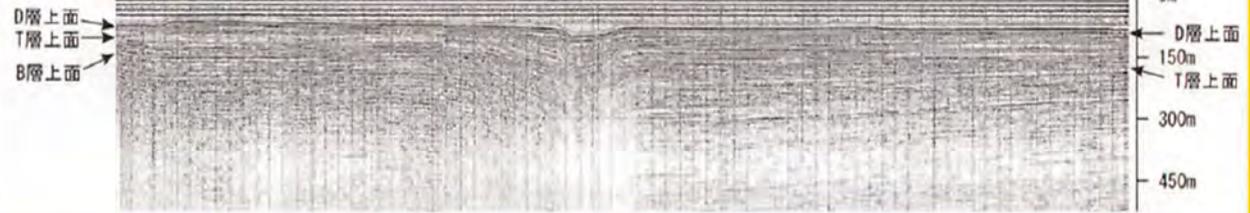
資料 7

(甲 4 6 1 ・ 5 頁)

1. 地質調査の概要

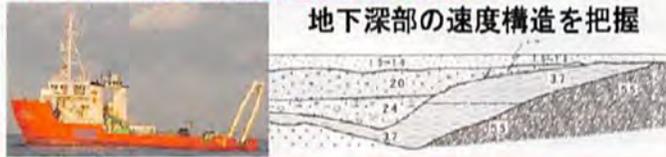
地質調査の概要③

③海上音波探査 海域の詳細な地質・地質構造を把握



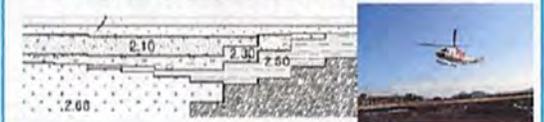
④エアガン海上音波探査, 屈折法探査

地下深部の速度構造を把握



⑤重力測定

地下深部の密度構造を把握

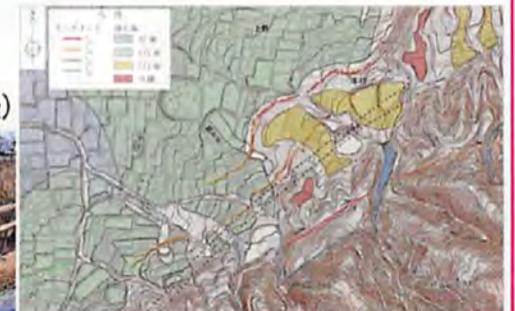


⑥陸域の中央構造線断層帯を対象とする調査

地形調査 (DEMデータの取得, 地形判読)

地表地質調査 (地表踏査, ホーリング調査, トレンチ調査)

地球物理学的調査 (反射法地震探査, 重力測定, MT探査)



資料 8
 (乙D68・41頁)

III. 中央構造線断層帯の評価

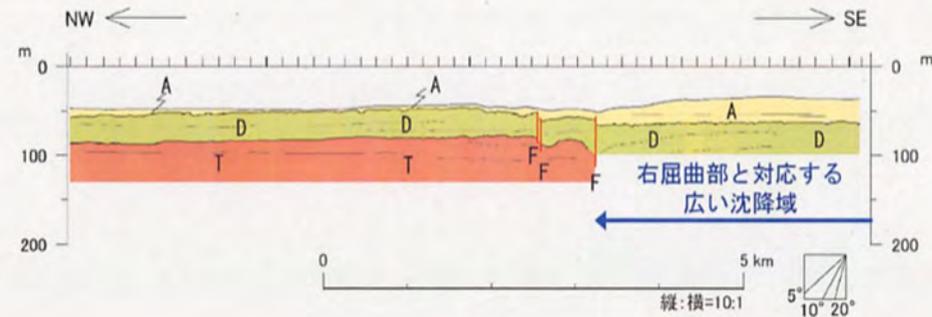
海底地質断面図①<串沖>

平成27年3月20日
 審査会合資料再掲



凡例

沖積層 (A)	基盤岩 (B)
更新統 (D)	背斜軸
上部更新統~ 下部更新統 (T)	向斜軸
断層 (ケハは低下方向)	
拗曲 (円弧は傾斜方向)	
地層境界	



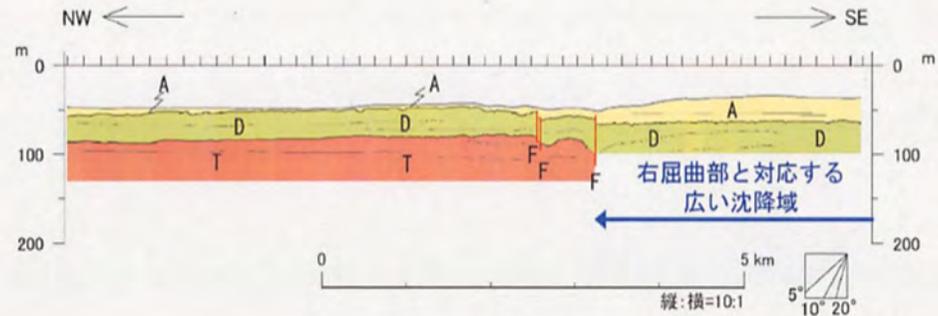
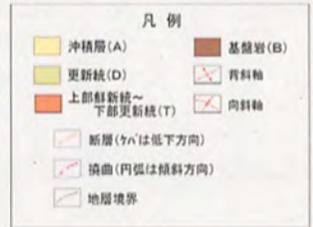
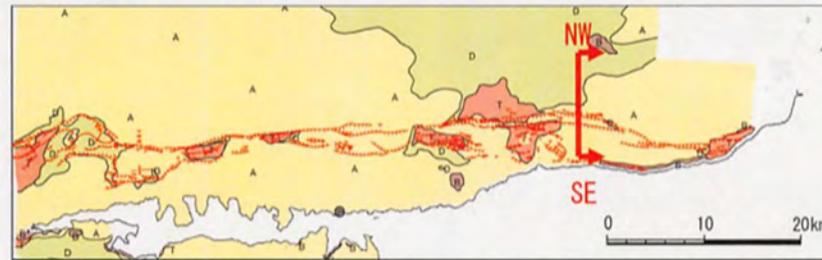
資料 9

(乙D6 8・4 2 頁)

III. 中央構造線断層帯の評価

海底地質断面図①<串沖>

平成27年3月20日
審査会合資料再掲



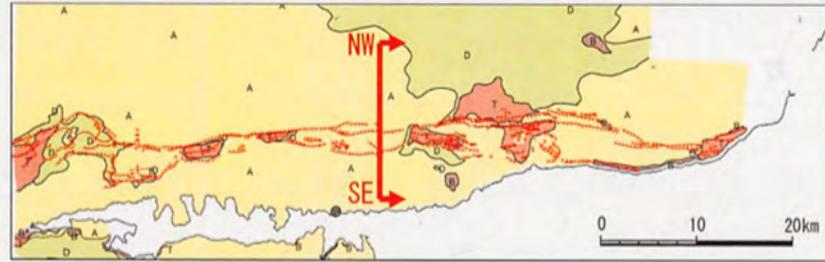
LANDEN

資料 10
 (乙D68・43頁)

III. 中央構造線断層帯の評価

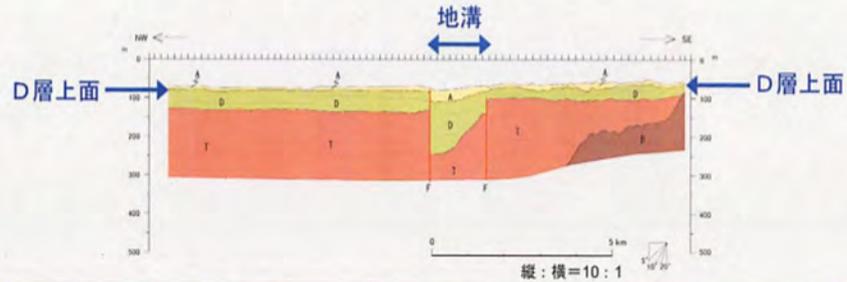
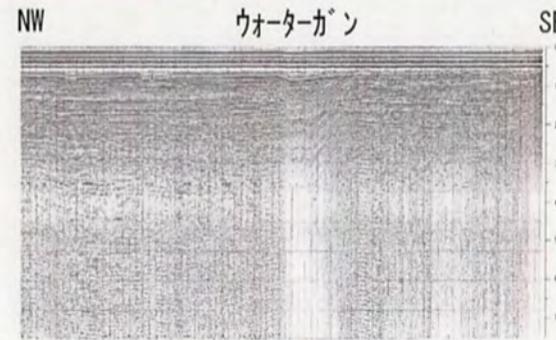
海底地質断面図②<保内沖>

平成27年3月20日
 審査会合資料再掲



凡例

沖積層(A)	基盤岩(B)
更新統(D)	背斜軸
上部更新統~ 下部更新統(T)	向斜軸
断層(矢は低下方向)	
撓曲(円弧は撓斜方向)	
地層境界	

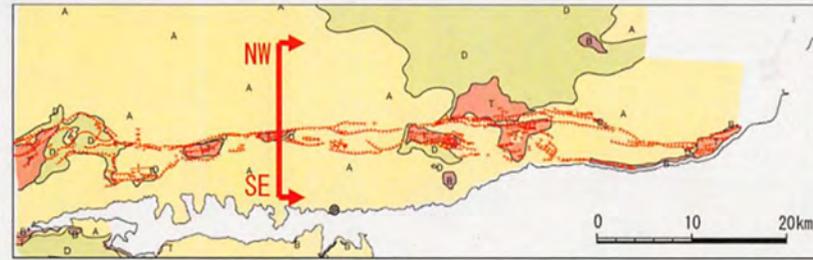


資料 1 1
 (乙D68・44頁)

III. 中央構造線断層帯の評価

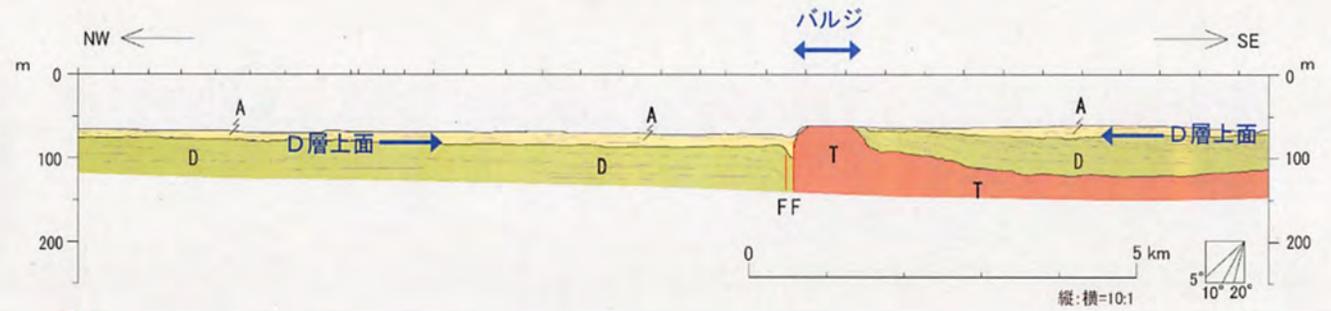
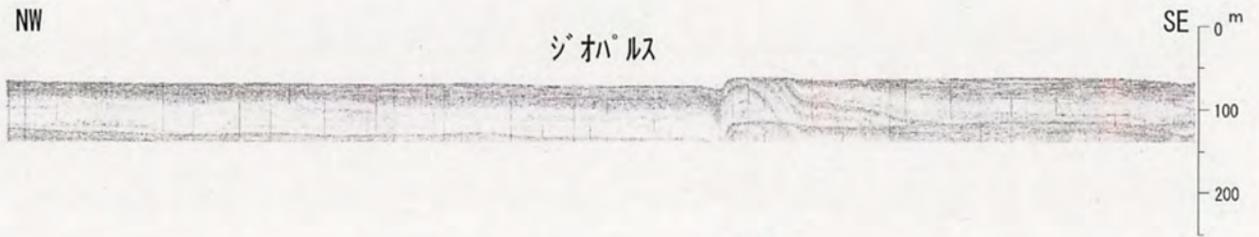
海底地質断面図④<瀬戸沖>

平成27年3月20日
 審査会合資料再掲



凡例

沖積層(A)	基盤岩(B)
更新統(D)	背斜軸
上部更新統~下部更新統(T)	向斜軸
断層(ケハは低下方向)	
褶曲(円弧は傾斜方向)	
地層境界	



資料 1 2

(乙D68・45頁)

III. 中央構造線断層帯の評価

海底地質断面図⑤<三崎沖>

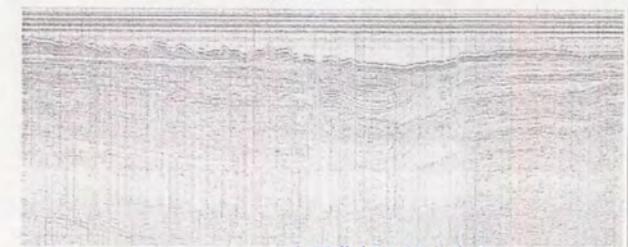
平成27年3月20日
審査会合資料再掲



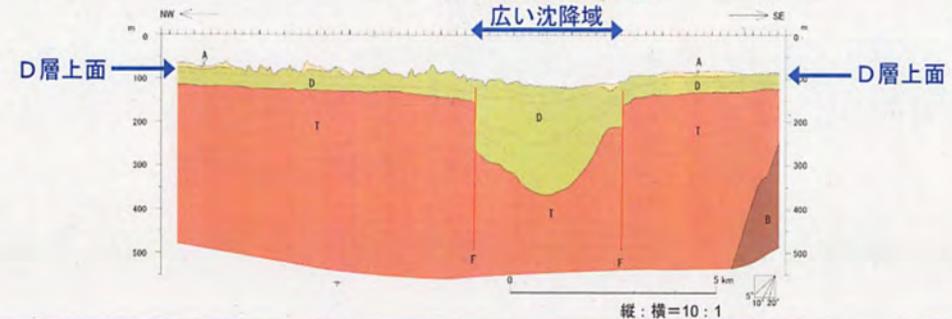
凡例

沖積層(A)	基盤岩(B)
更新統(D)	背斜軸
上部鮮新統~ 下部更新統(T)	向斜軸
断層(矢は低下方向)	
拗曲(円弧は傾斜方向)	
地層境界	

NW ウォーターガン SE



右屈曲部と対応する
広い沈降域

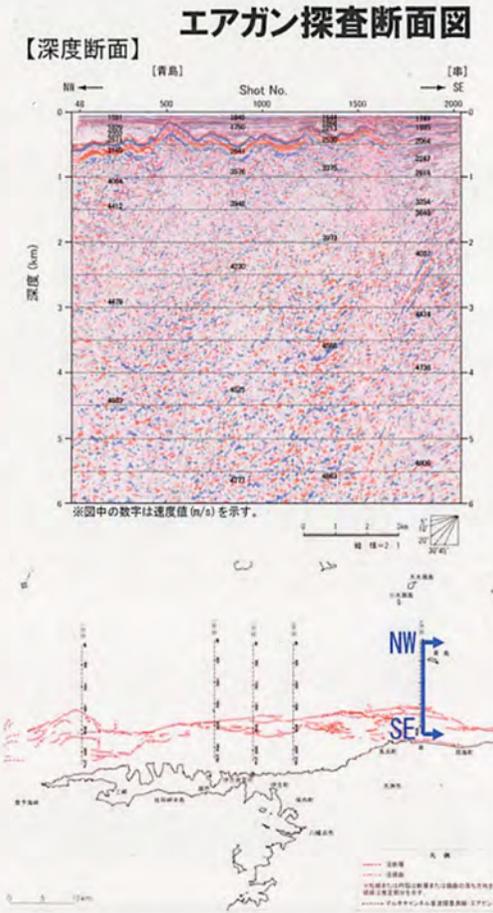
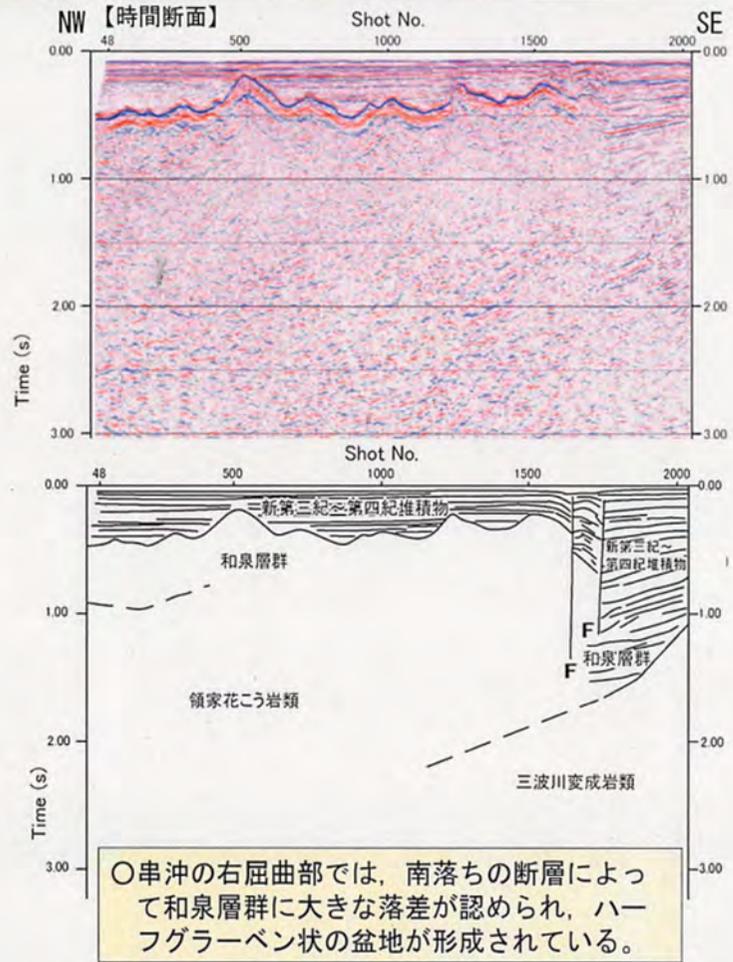


資料 1 3
 (乙D68・46頁)

III. 中央構造線断層帯の評価

エアガンによる探査断面図①<串沖>

平成27年3月20日
 審査会合資料再掲



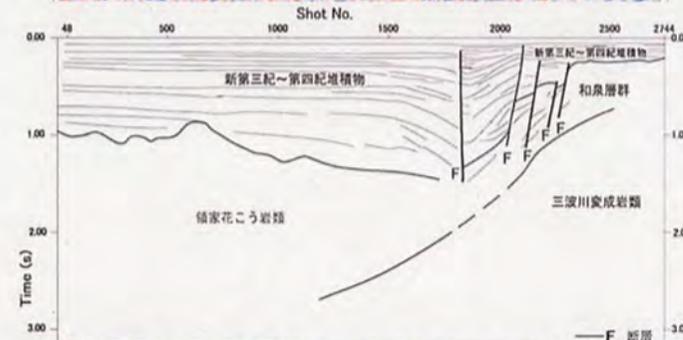
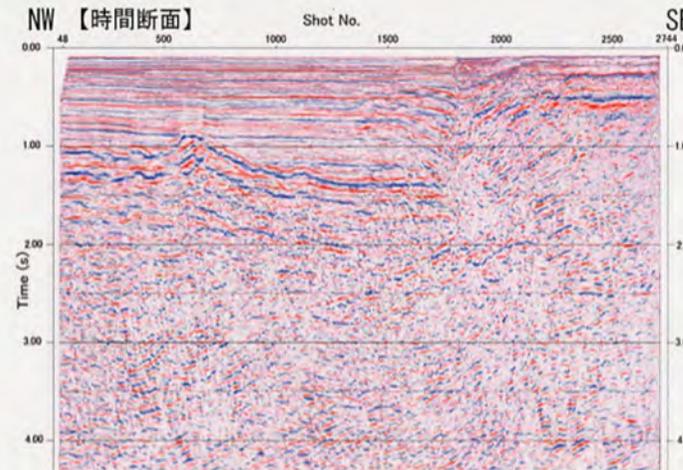
資料 1 4

(乙D68・47頁)

III. 中央構造線断層帯の評価

エアガンによる探査断面図②<保内沖>

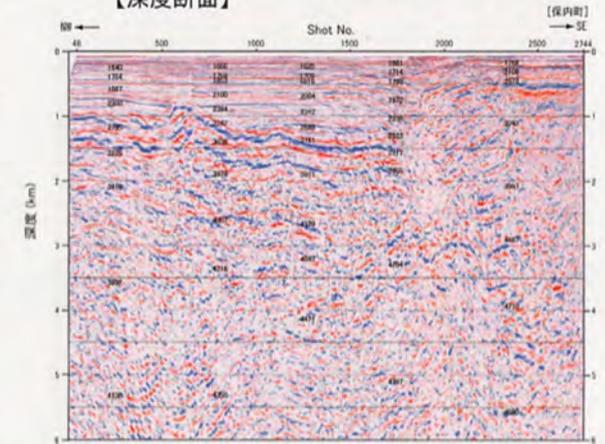
平成27年3月20日
審査会合資料再掲



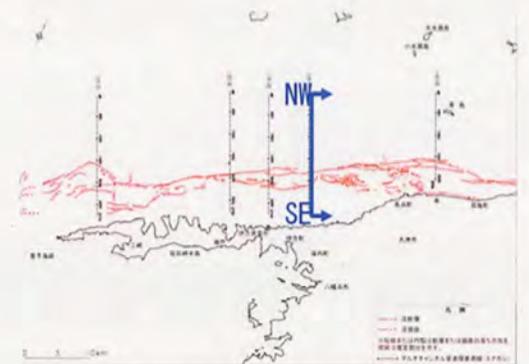
- 伊方沖の右屈曲部と対応して地溝が形成されている。
- 地質境界断層としての中央構造線が北傾斜であることが示唆される。

エアガン探査断面図

【深度断面】



※図中の数字は速度値 (m/s) を示す。

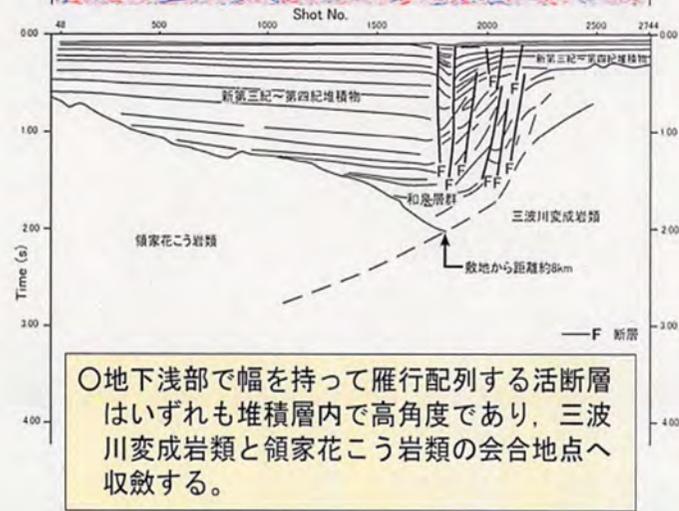
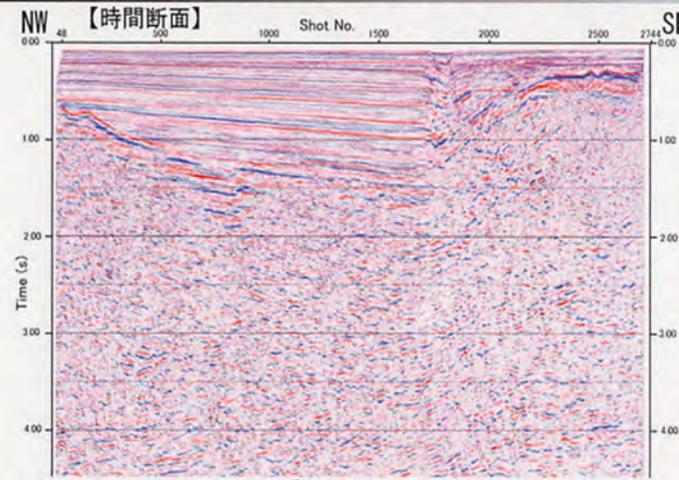


資料 15
(乙D68・48頁)

III. 中央構造線断層帯の評価

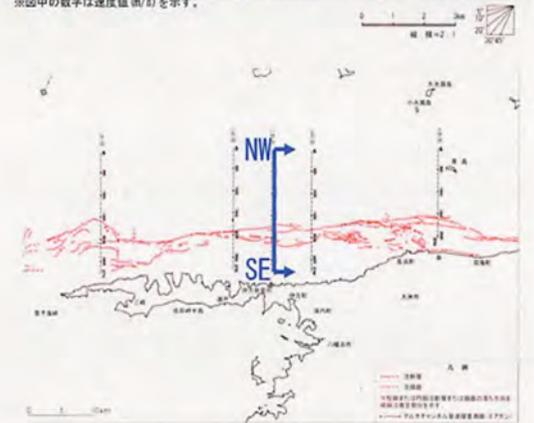
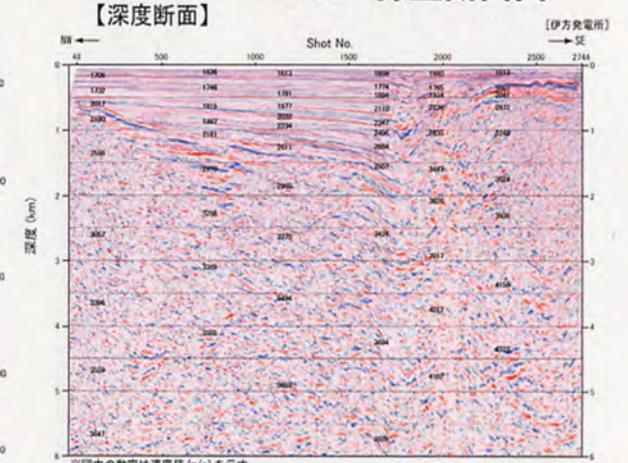
エアガンによる探査断面図③<伊方沖>

平成27年3月20日
審査会合資料再掲



○地下浅部で幅を持って雁行配列する活断層はいずれも堆積層内で高角度であり、三波川変成岩類と領家花こう岩類の会合地点へ収斂する。

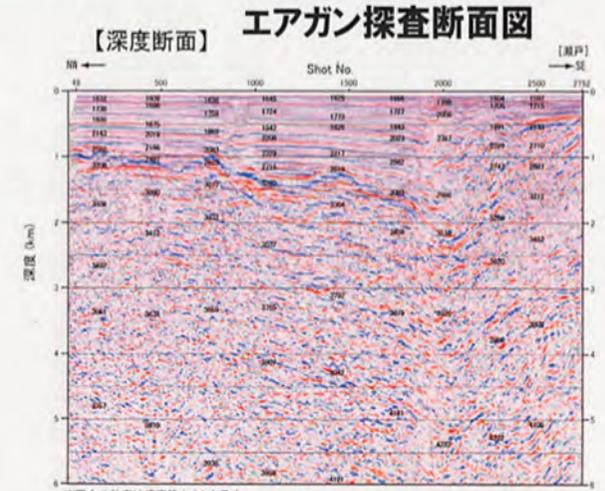
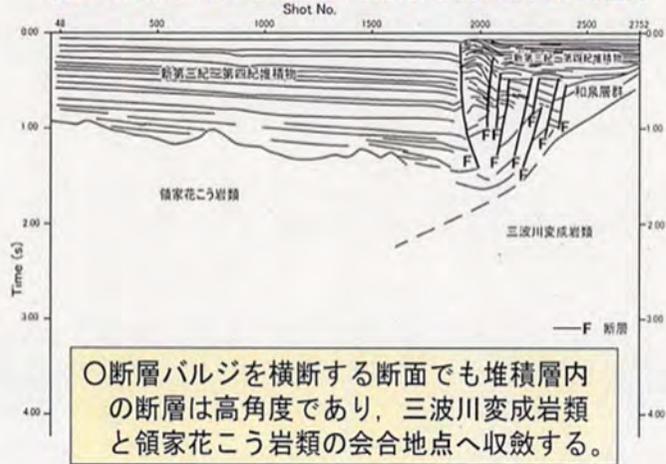
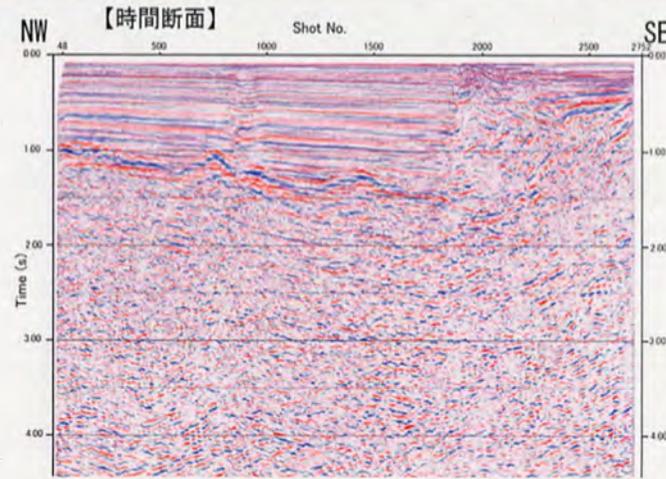
エアガン探査断面図



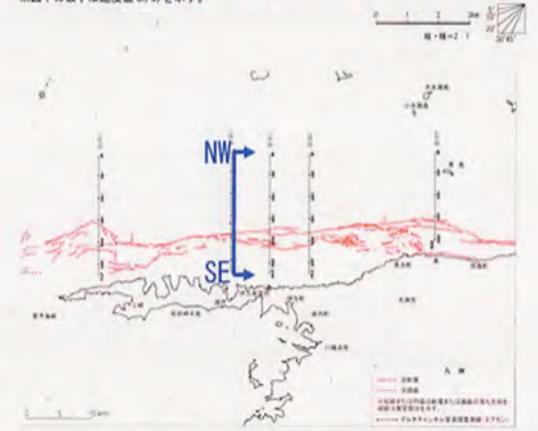
III. 中央構造線断層帯の評価

エアガンによる探査断面図④<瀬戸沖>

平成27年3月20日
 審査会合資料再掲



※図中の数字は速度値 (m/s) を示す。

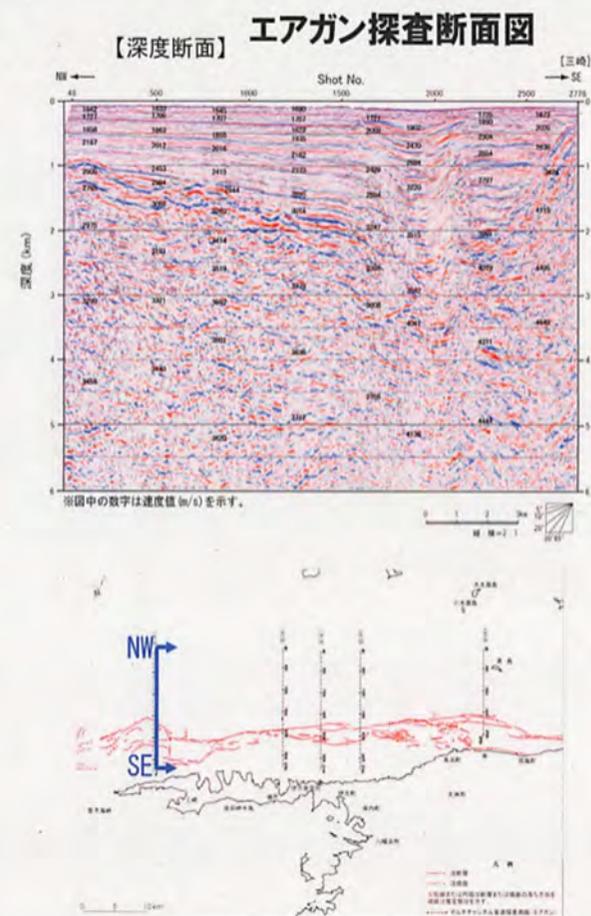
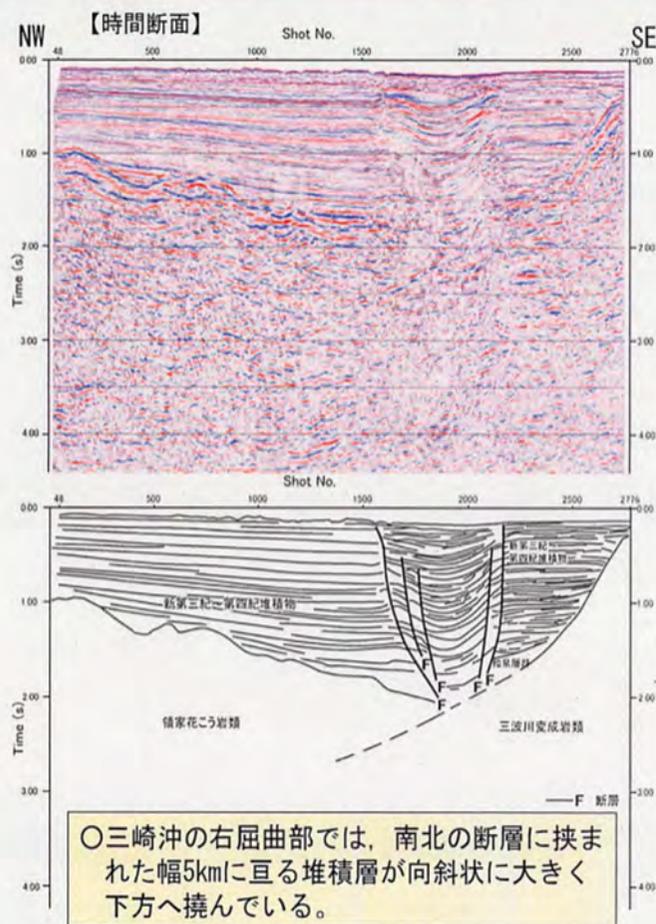


資料 17
(乙D68・50頁)

III. 中央構造線断層帯の評価

エアガンによる探査断面図⑤<三崎沖>

平成27年3月20日
審査会合資料再掲



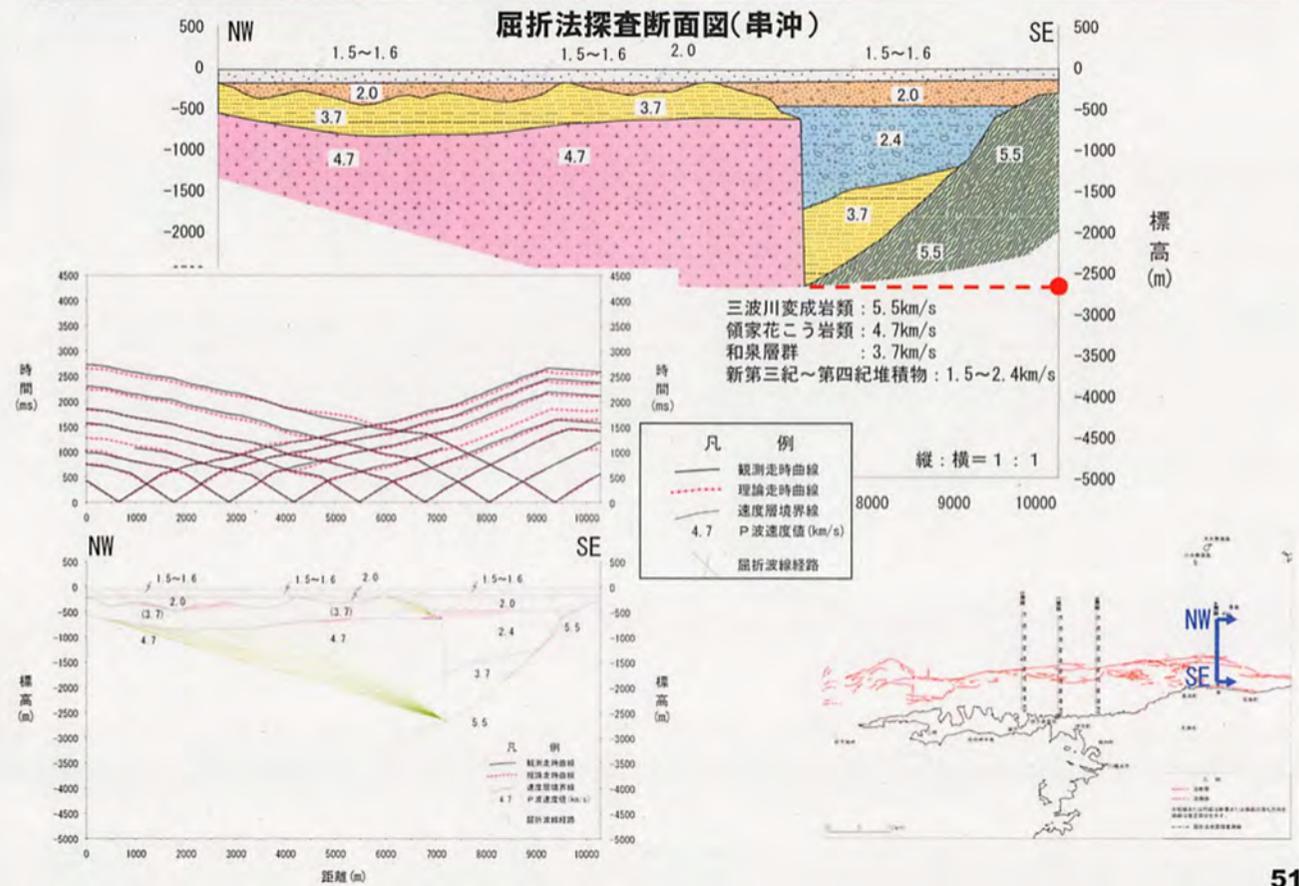
資料 18

(乙D68・51頁)

III. 中央構造線断層帯の評価

屈折法探査断面図①<串沖>

平成27年3月20日
審査会合資料再掲

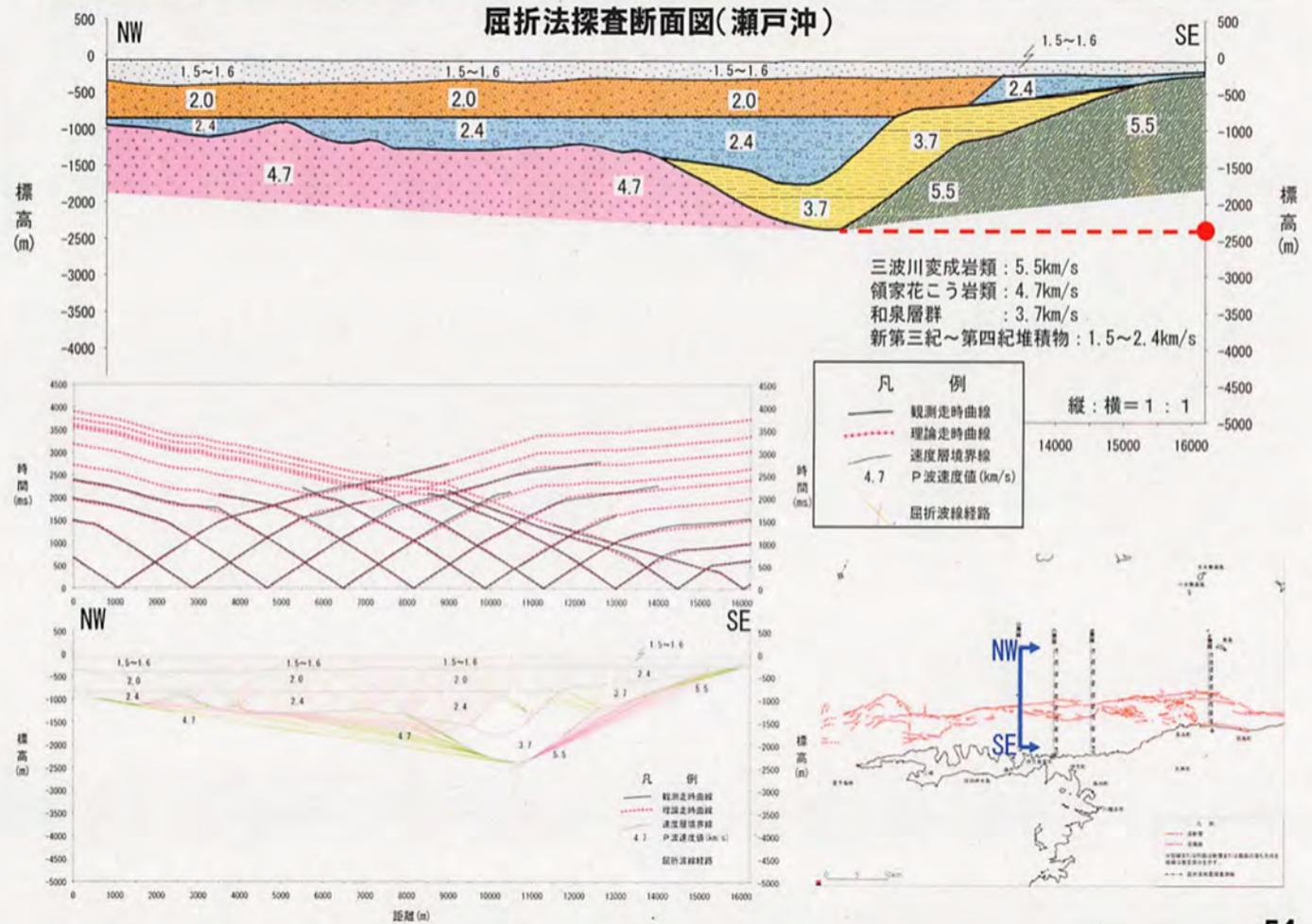


資料 2 1
 (乙D68・54頁)

III. 中央構造線断層帯の評価

屈折法探査断面図④<瀬戸沖>

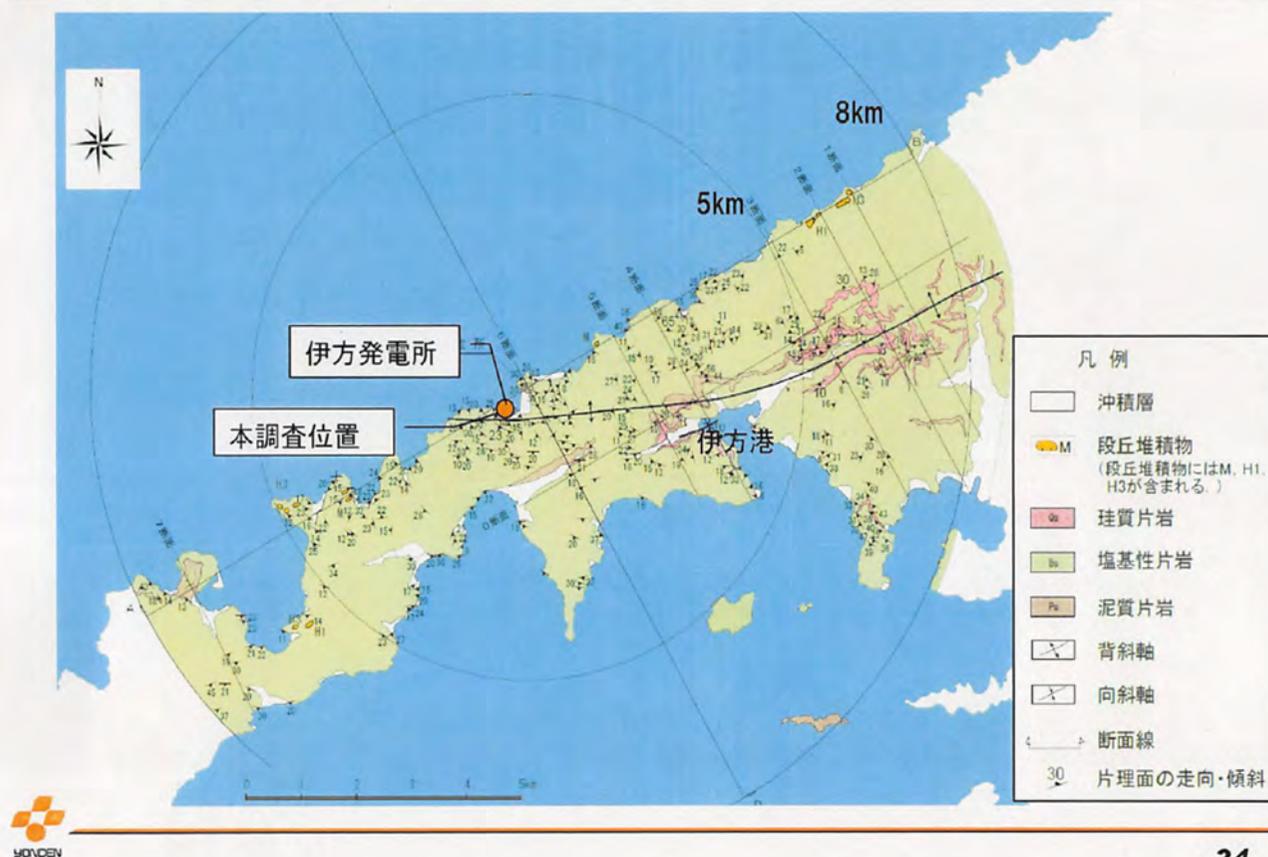
平成27年3月20日
 審査会合資料再掲



資料 2 2
(乙D 2 3 ・ 3 4 頁)

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。

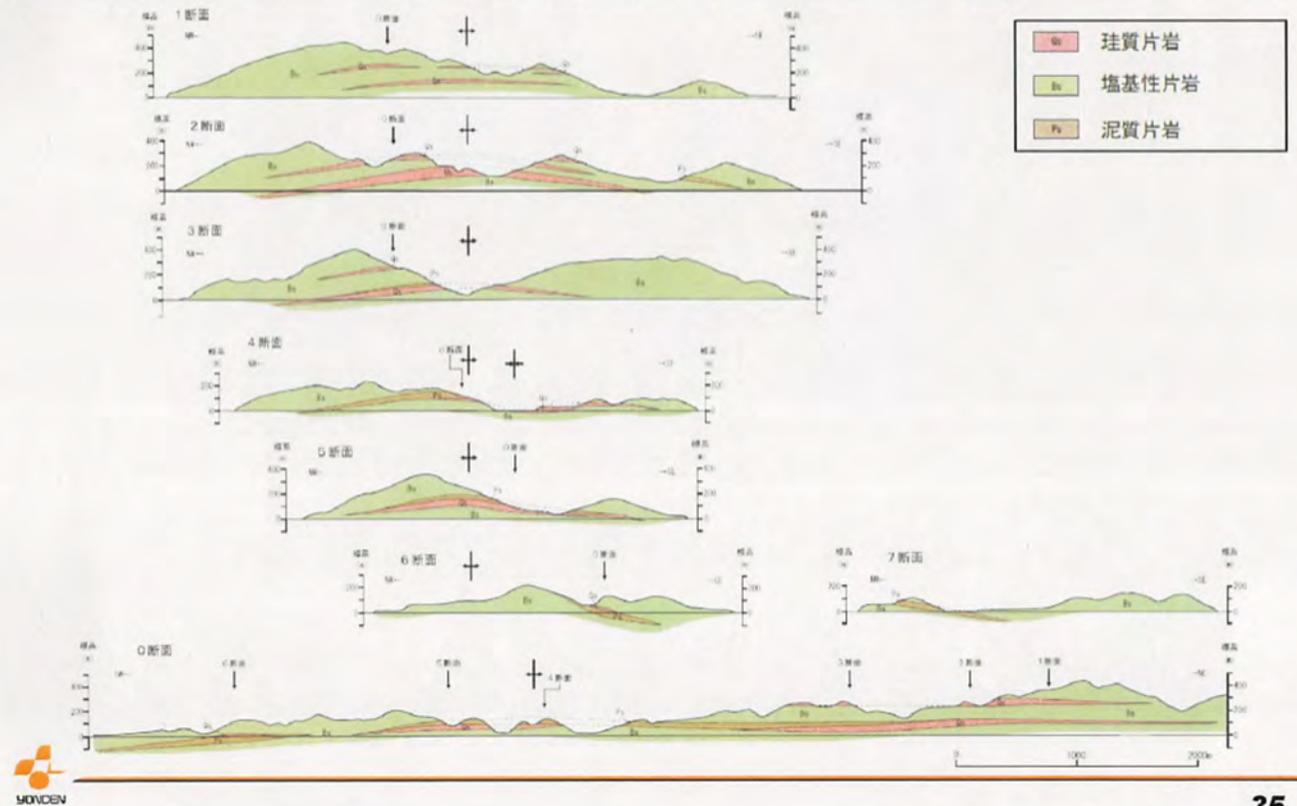


資料 2 3

(乙D 2 3 ・ 3 5 頁)

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。

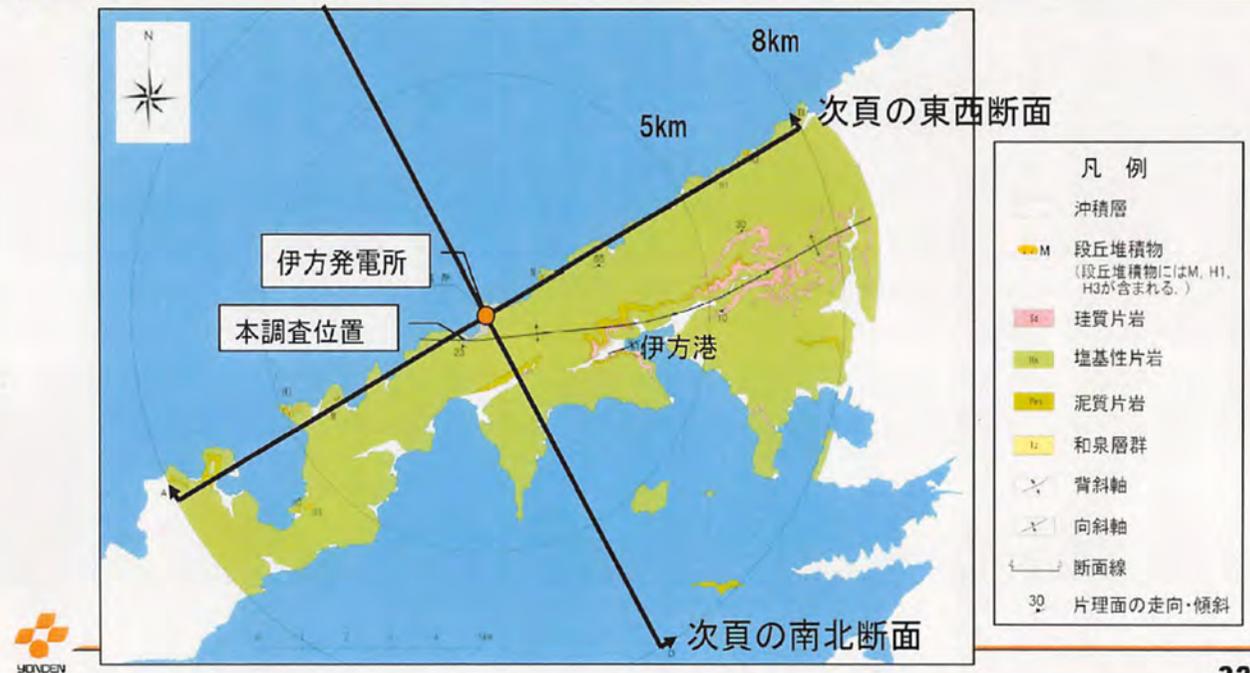


資料 2 4

(乙D 2 3 ・ 3 2 頁)

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。

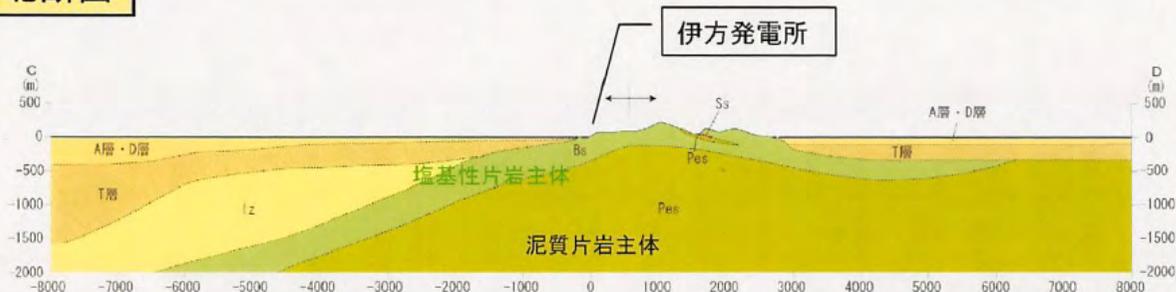


資料 2 5

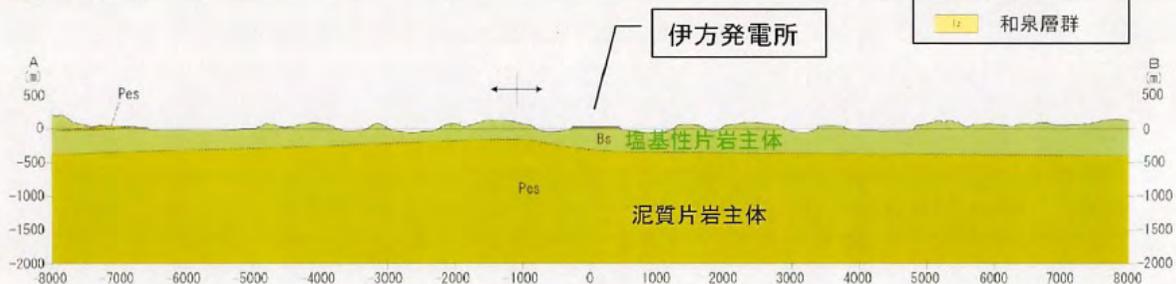
(乙D 2 3 ・ 3 3 頁)

敷地近傍の地質構造(断面図)

南北断面



東西断面



- Ss 珪質片岩
- Bs 塩基性片岩
- Pes 泥質片岩
- Iz 和泉層群



資料 2 6

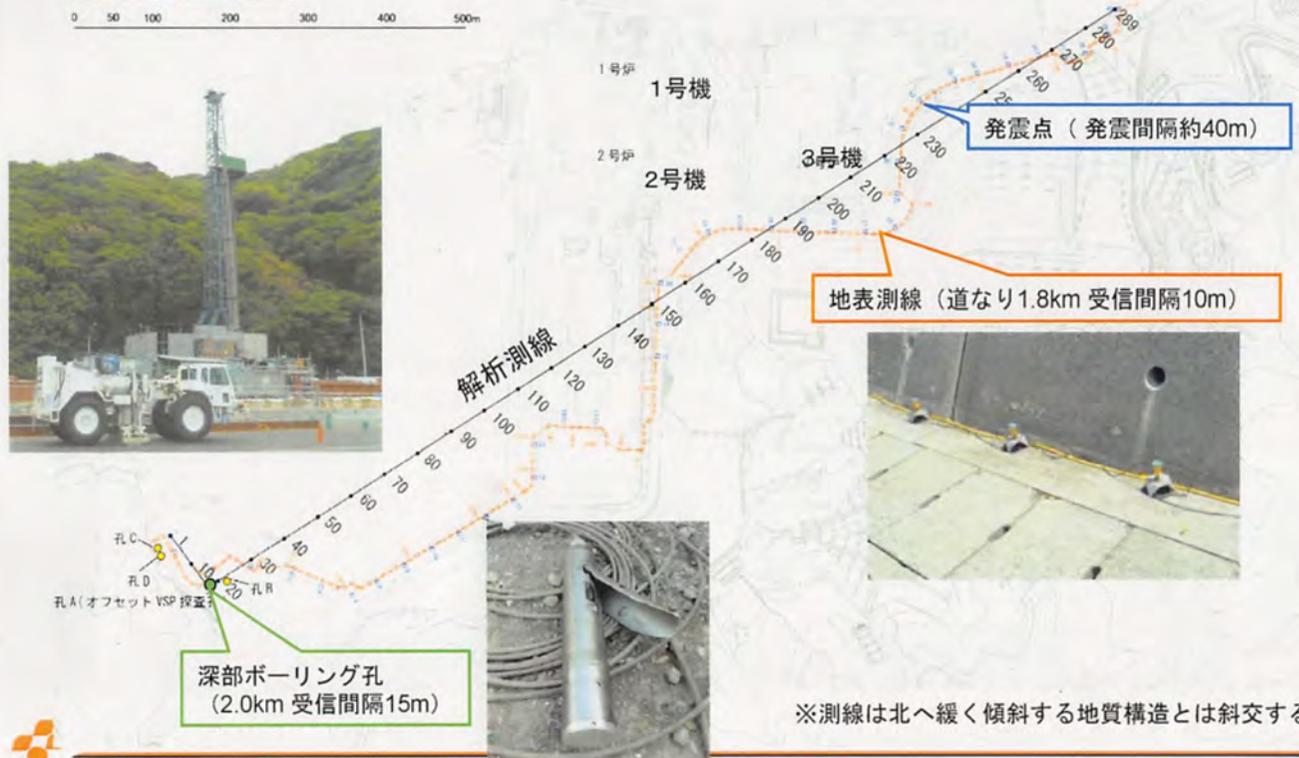
(乙D 2 3 ・ 5 5 頁)

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(Vegetical 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。

凡 例 ● 深部ボーリング調査位置
○ 発震点 □ 発震点

0 50 100 200 300 400 500m

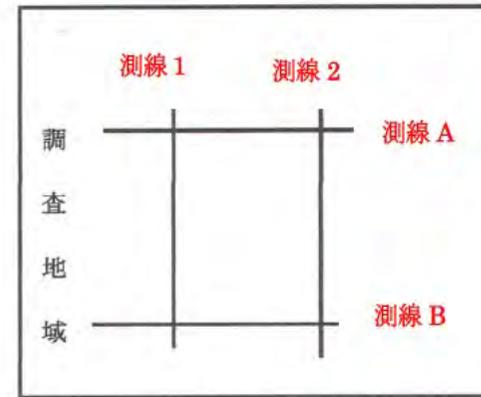


※測線は北へ緩く傾斜する地質構造とは斜交する。

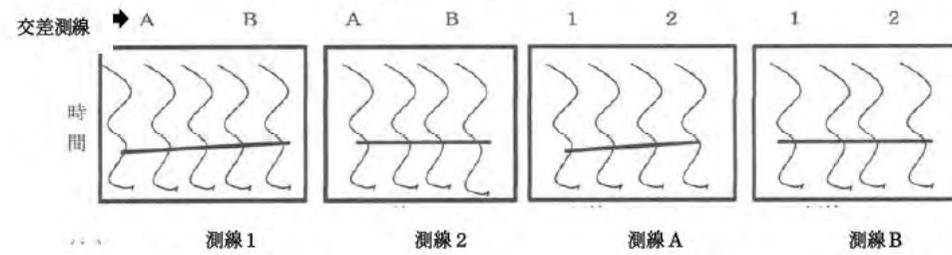


資料 27

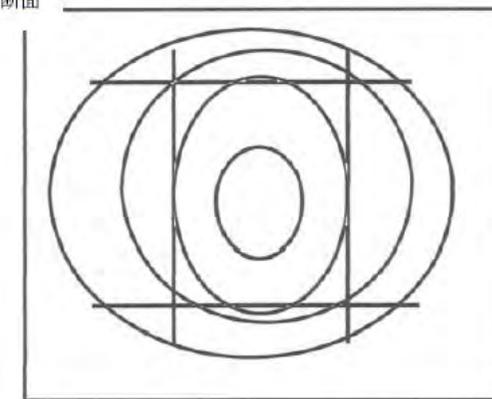
(甲 4 5 6 ・ 「意見書」 ・
4 頁 ・ 図 1)



(a) 調査地域と二次元調査測線



(b) 記録断面



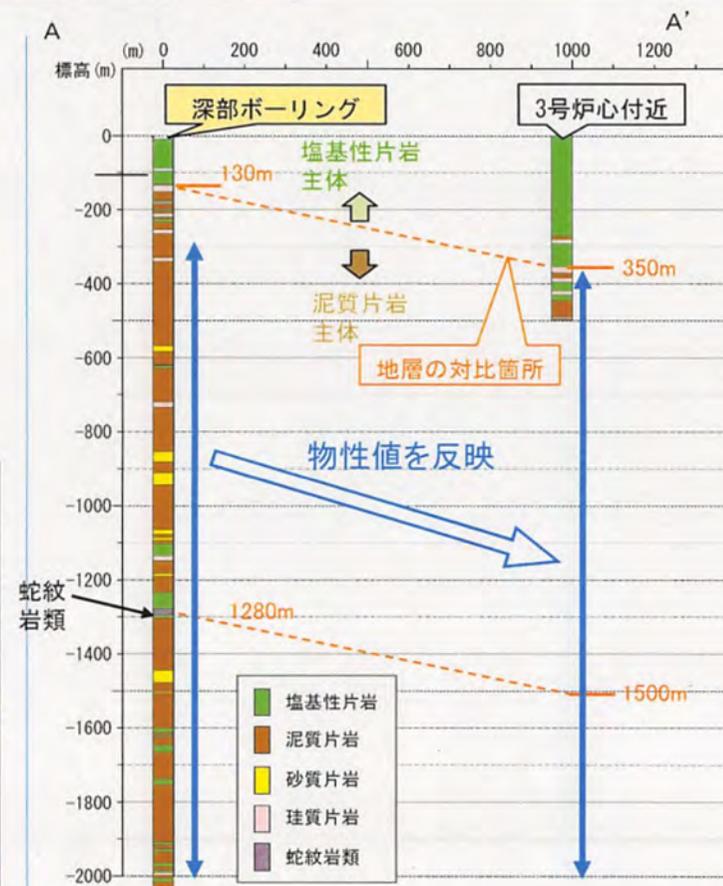
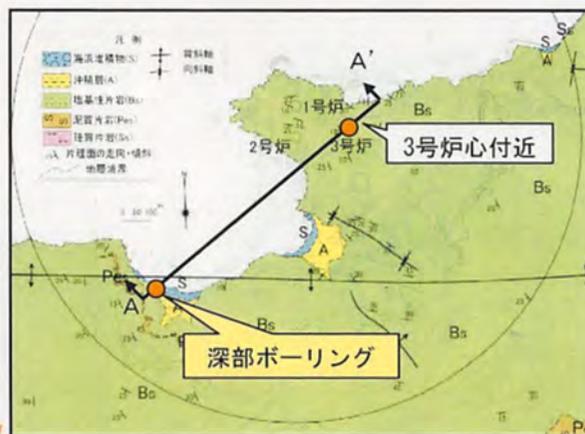
(c) 二次元探査データによる地下構造図

資料 28

(乙D23・48頁)

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。

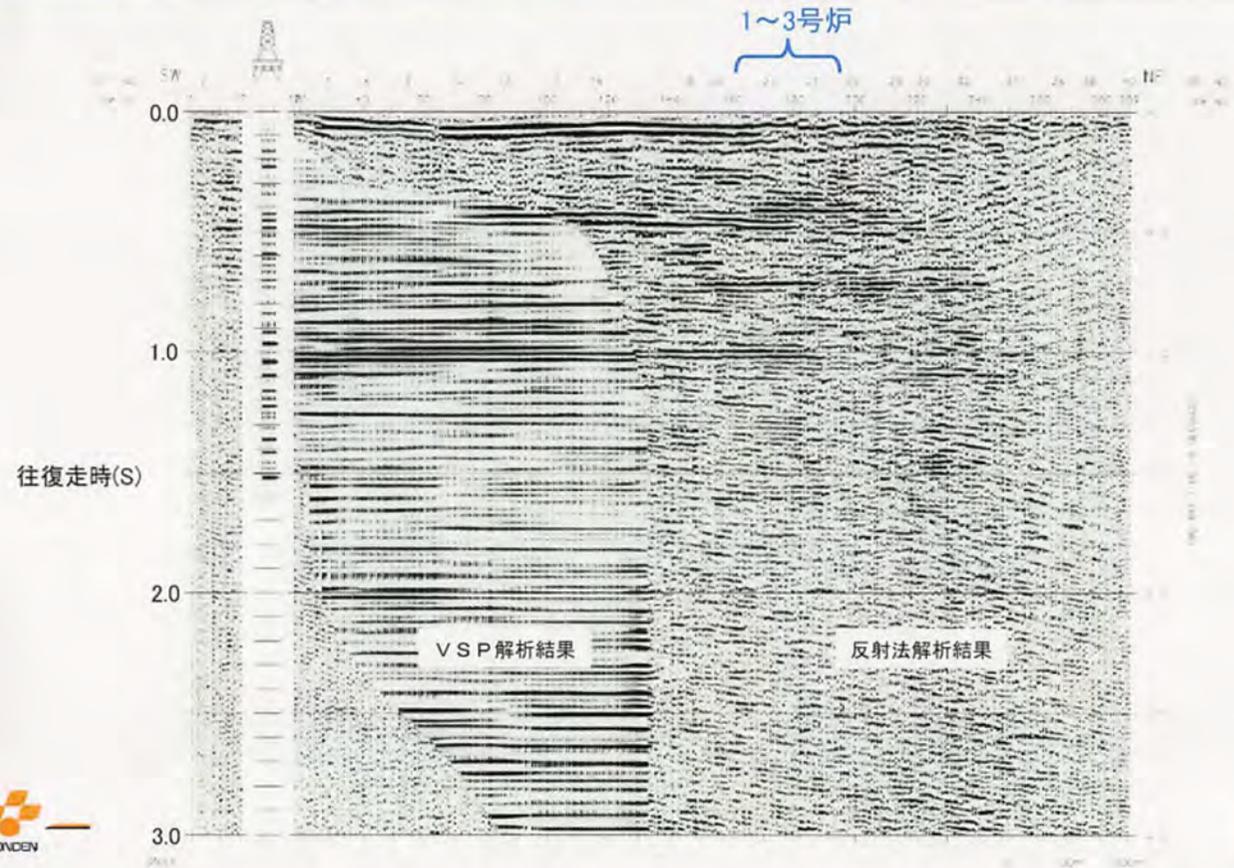


資料 29

(乙D23・56頁)

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。



資料 30

(甲 4 5 6 ・ 「意見書」 ・ 1 4 頁 ・ 図 8)

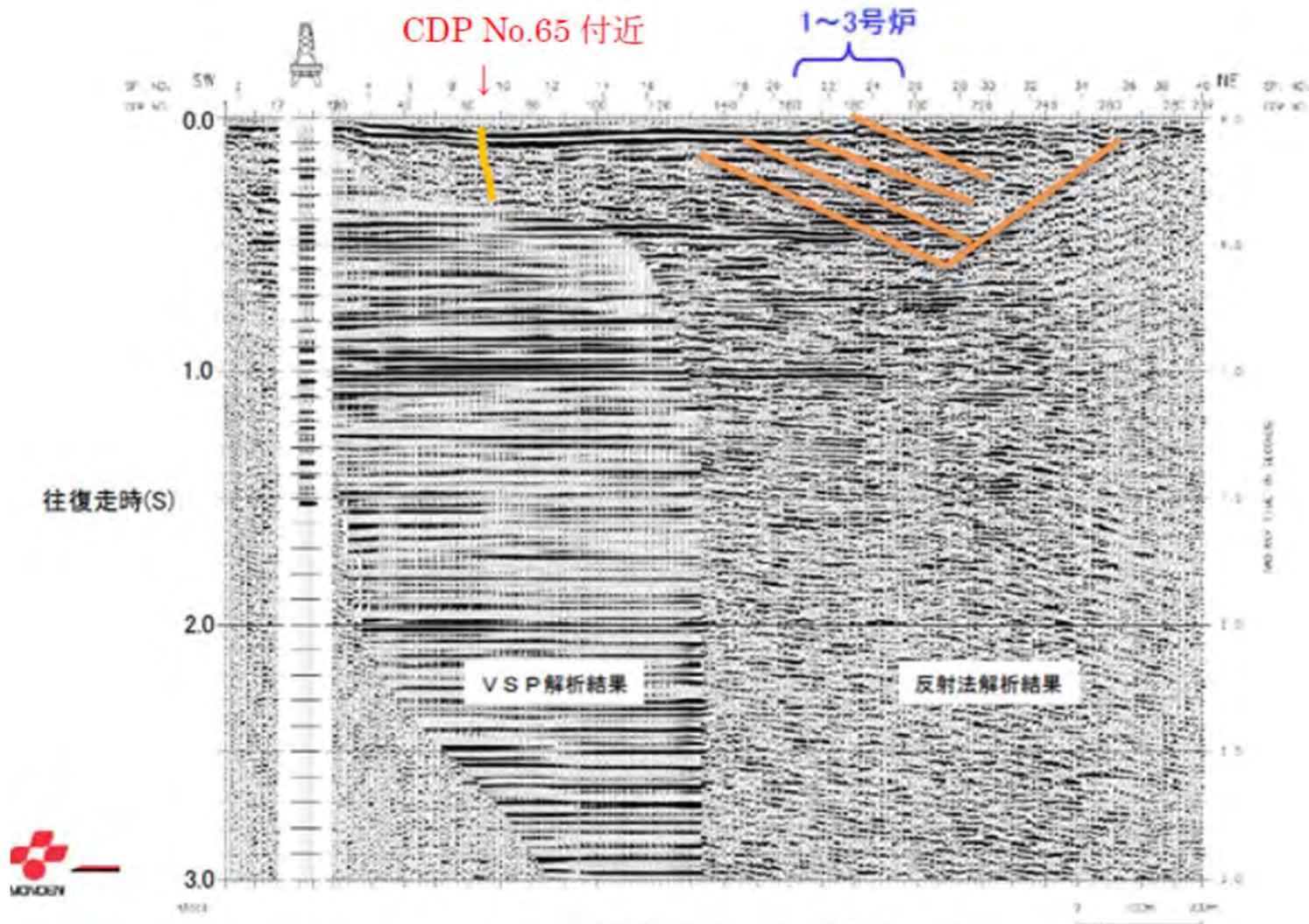
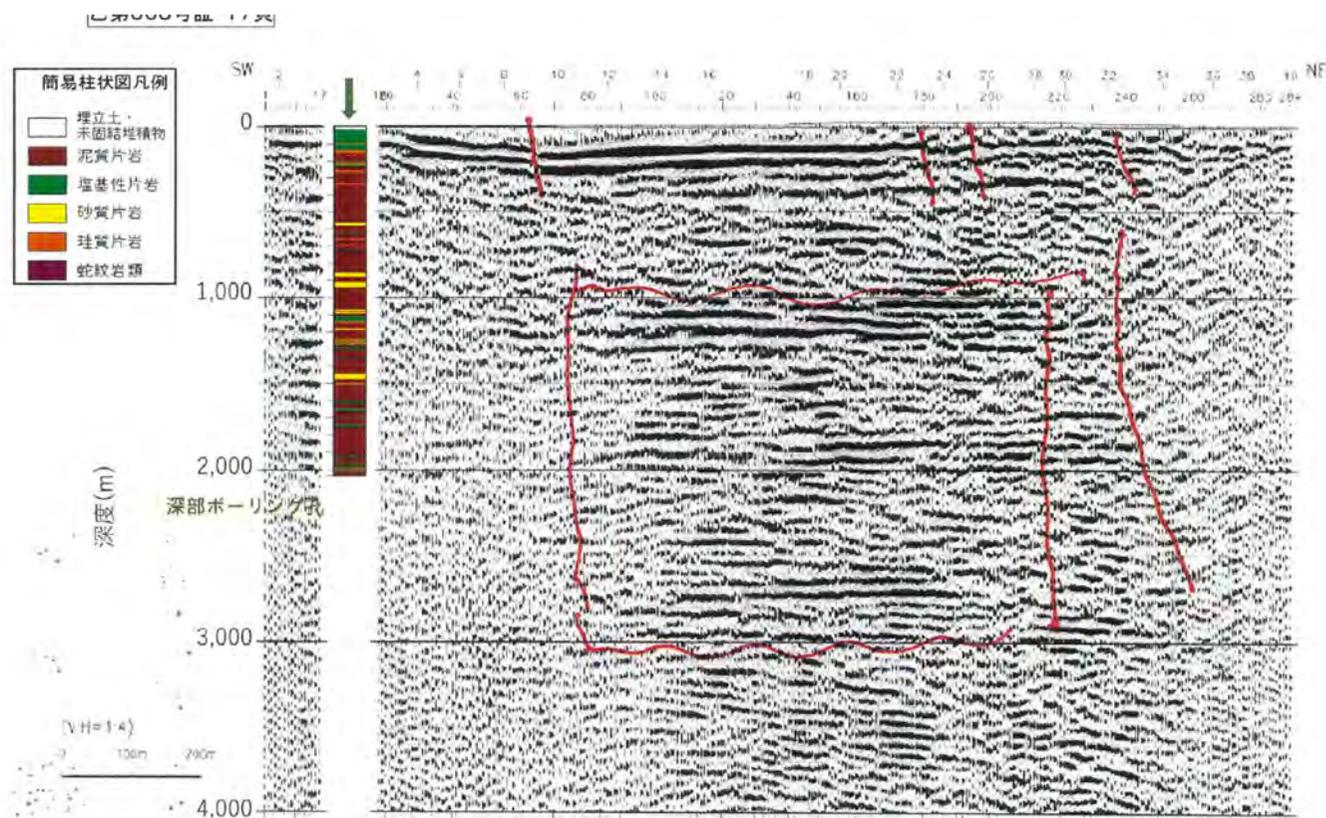


図 8 反射法地震探査記録の解釈

資料 3 1

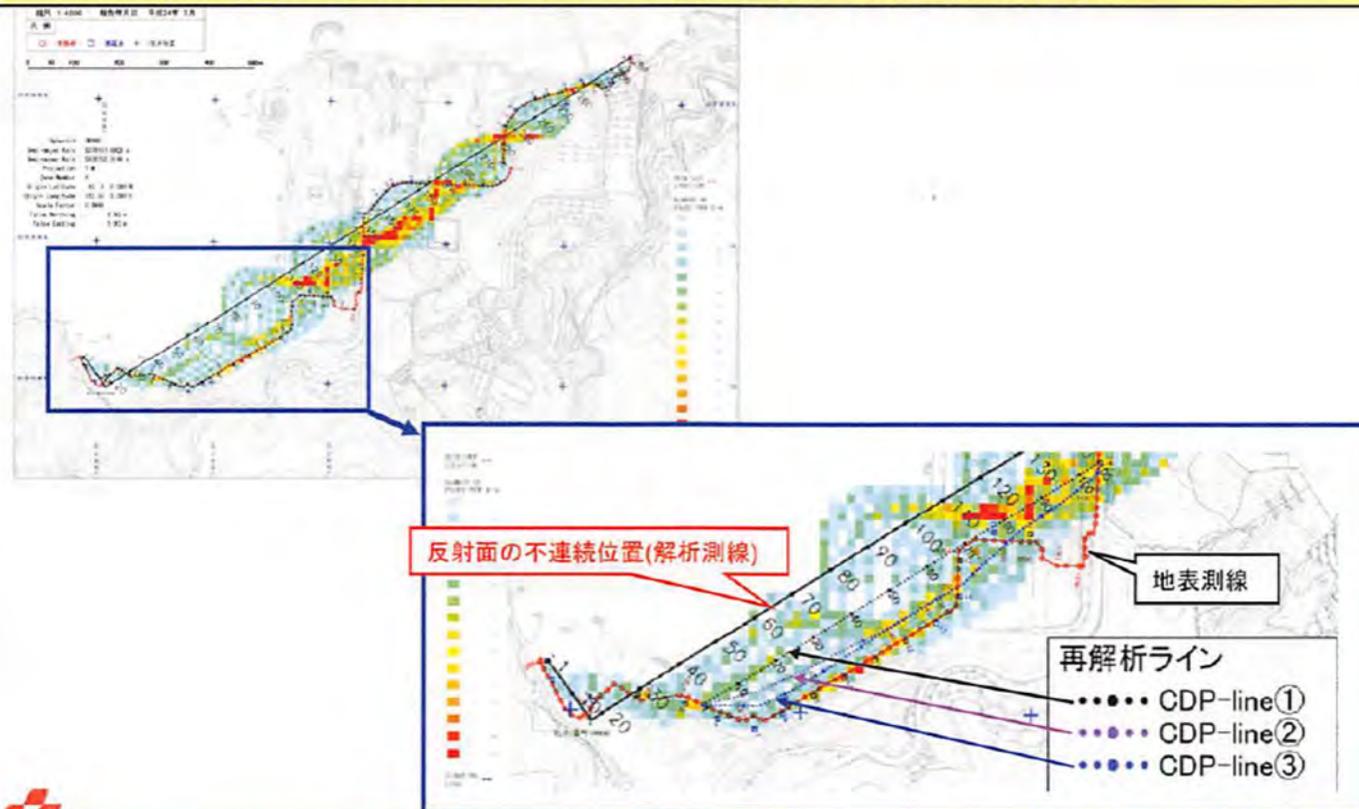
(乙D335・芦田証人尋問調書別紙3)



令和4年10月20日
芦田 謙

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。

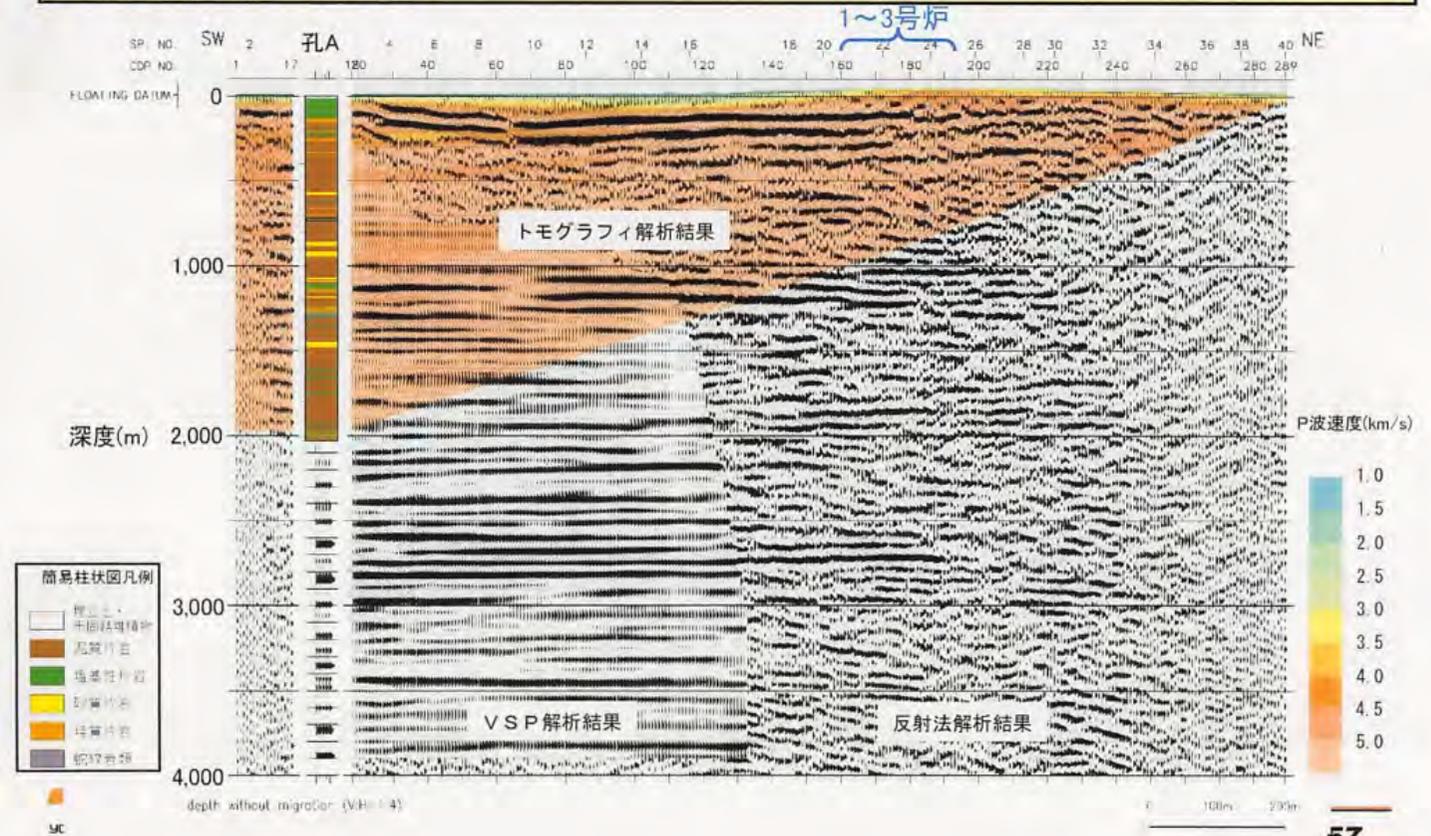


資料 3 3

(乙D 2 3 ・ 5 7 頁)

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。



資料 3 4

(甲 8 6 6 ・ 「地盤調査のための三次元反射法地震探査による詳細地質解析」 ・ 1 頁)

物理探査 第 61 巻第 3 号 (2008) 243-249 頁

BUTSURI-TANSA, Vol. 61, No. 3 (2008) pp. 243-249

地盤調査のための三次元反射法地震探査による詳細地質解析佐々木泰*・浜田憲彦**・藤原八笛^{†3}・鶴旨 純^{†3}・中東秀樹^{†4}

要 旨

二次元反射法地震探査は、調査の目的や対象深度を問わず、ボーリング孔間の地質および地質構造を補間する事を目的として実施されてきた。しかし、二次元反射法地震探査によって得られる情報は、測線直下の地質情報に限られ、面的な連続性に関しては推定の域を出ないのが実情である。

三次元反射法地震探査は、このような欠点を補うために実施されるもので、石油、天然ガスや石炭等の資源探査の分野では、三次元反射法地震探査が通常の探査方法として実施されている (仙石, 1990 ; NEDO, 1990 ; 佐伯ほか, 2006)。しかし、三次元反射法地震探査を構造物を対象とした地質構造の解析に適用した例は国内では皆無と考えられる。

その理由として;

- ① 多チャンネルのデータ収録システムが必要
- ② 費用が割高の感覚がある
- ③ 三次元データ処理ソフトが必要

などが考えられる。

今回の調査では、深度 100m 以浅の詳細な地質構造の解析を目的とするとともに、地質の不連続構造の存在の判定を行うことが容易な 100m 以深も対象に調査計画を立案した。調査対象深度は調査区域の広さ、地質データおよび経済性等を考慮して、探査深度は約 80m~250m 程度とした。本調査実施後に実施された調査坑道での地質調査において、三次元反射法地震探査で推定された落差数 m の不連続面の延長部において小断層を確認したことから、本調査の有効性が示された。本報告では、主として三次元反射法地震探査のデータ取得と解析・解釈について示す。

資料 3 5

(甲 8 6 6 ・ 「地盤調査のための三次元反射法地震探査による詳細地質解析」 ・ 3 頁 ・ 図 2 ・ 図 3)



Fig.2. Index map of geophone(green)and shot(red) lines and bore hole locations.

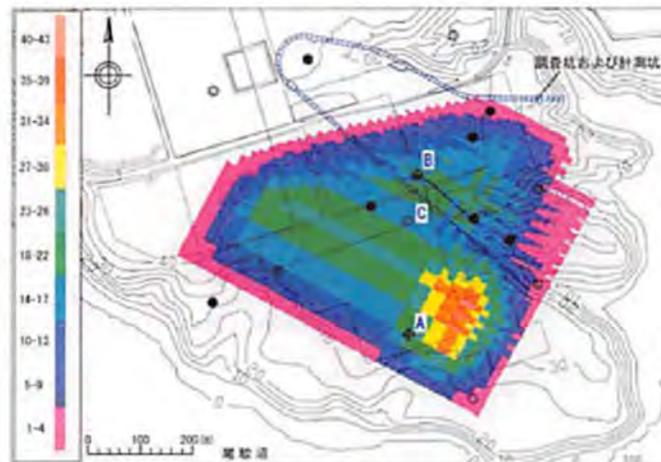


Fig.3. Surface coverage map. Each bin covers 5×5m area.

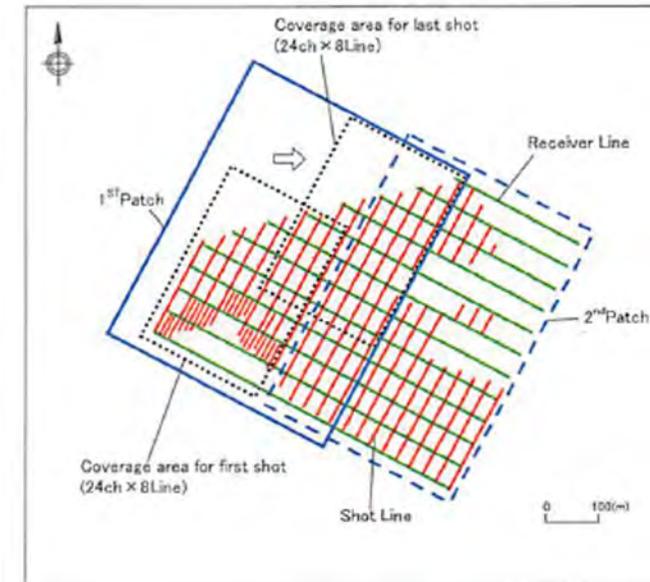
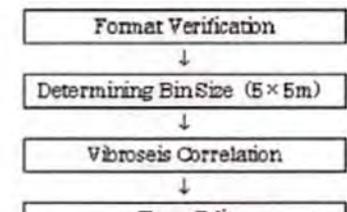
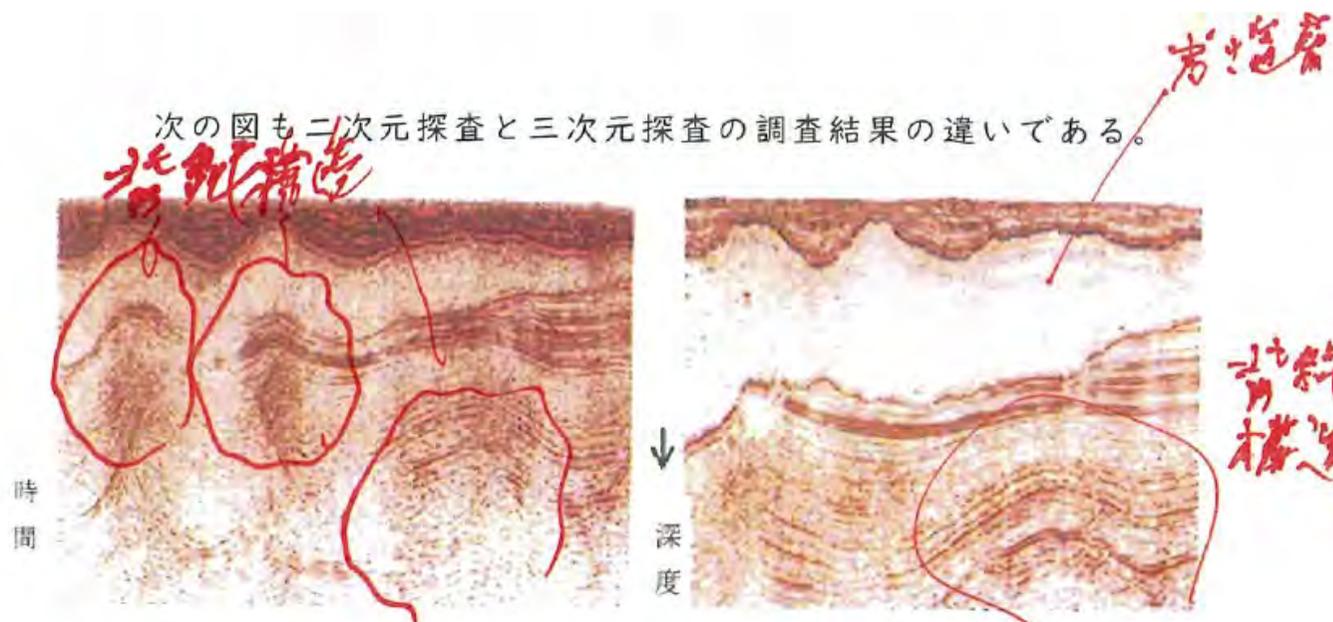


Fig.4. Data acquisition arrangement used with Vibrator a 8 geophone lines(1 patch) . 5 shots between the all geophone lines then moved 30m repeatedly over spread. On the actual acquisition, shot point moves to a southeast direction first and one line moves to a northeast direction next. The shot point leaves for the southeast direction. SE direction is the shot and NE direction is split spread shot.



資料 3 6

(乙D 3 3 5・芦田証人尋問調書別紙 1)



(a) 二次元重合後時間マイグレーション

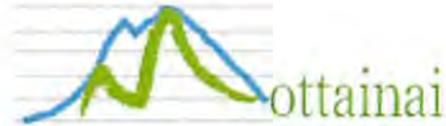
(b) 三次元重合前深度マイグレーション

この図でも地層面のうねり方や、位置は右図のほうが明瞭であることがわかる。より、注目すべきことは、左図の二次元探査で得られた予想図と右図の三次元探査で得られた予想図とで、地層面の深度に大きな違いが生じていることである。仮に活断層が位置する深度が全く誤っていた場合、その活断層を震源とする地震が地表に伝わったとき

資料 37

(甲 8 6 4 ・ 「三次元地震探査の有用性について」 ・ 1 頁)

甲第 864号



An Electronic Journal of The MOTTAINAI Society

もったいない学会 WEB 学会誌 Volume 1, pp. 50-53

Online ISSN 1882-2975

解説

三次元地震探査の有用性について

横田 俊之¹

投稿受付：2007年10月17日 受理日：2007年10月24日 WEB公開日：11月22日

要旨

三次元地震探査は、今まで抽出し得なかった断層まで抽出することができる。これまで、活断層調査に対する適用例は少ないが、その理由は単に費用がかかるためであり、安価な二次元探査で十分満足できる結果が得られる、という判断があったためである。

日本には多数の活断層が存在し、その多くの性状が良く知られていないというのが現状である。活断層は、比較的小規模でも、我々の生活を脅かす直下型地震の原因になり得る。阪神淡路の例を挙げるまでも無く、そのような地震は多大な被害を引き起こすが、原子力発電所のような重要建造物がひとたび地震被害を受けるとその影響は多岐にわたり、たいへん深刻なものとなる。従って、いかに精度よく活断層を抽出するかは非常に重要な問題である。

本稿ではまず、二次元および三次元地震探査の相違点について簡単に説明する。続いて、三次元の地質構造調査に、二次元地震探査を用いた場合、地下構造解釈を誤る可能性の一例を示す。以上により、三次元地震探査の有用性および必要性を論じる。

【キーワード】：三次元地震探査、活断層調査

1. はじめに

が少ないため、その直上の人や建物に多大な

資料 3 8

(甲 8 6 4 ・ 「三次元地震探査の有用性について」 ・ 2 頁)

用いて、まず、二次元および三次元地震探査の相違点について簡単に説明する。続いて、三次元の地質構造調査に、二次元地震探査を用いた場合の、誤った地下構造解釈の一例を示す。以上により、三次元地震探査の必要性をより多くの読者に理解いただくことを主たる目的とする。

2. 二次元地震探査と三次元地震探査の違い

二次元地震探査と三次元地震探査の主たる相違として、

1. データ自体の持つ情報量の違い
2. データ処理の正確さの違い
3. 処理結果の解釈の容易さの違い

等をあげる事ができる。それぞれについて、以下に簡単に説明する。

2.1 データ自体が持つ情報量の違い

地下の情報を知ろうとした場合、知りたい領域内のある測線で二次元探査を行ったとしても、情報が得られるのはその領域のごく一部に限られ、領域内の残り多くの部分に関する情報は得られない。その様子を図 1 および図 2 に示す。それぞれの図とも、直方体全体が知りたい領域で、それぞれの辺が X 方向の距離、Y 方向の距離、Z 方向の距離を表す。

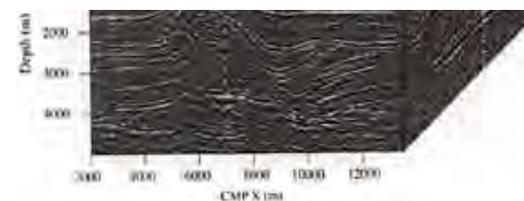


図 2 三次元探査で得られる情報 (Biondi (2007) に一部加筆)。直方体内部全てに情報が有り、任意の断面上の情報を容易に取り出すことが可能である。

各面上に表示している。

図 2 より明らかなように、三次元探査を行う事により、調査領域内全ての場所の情報を得る事ができるため、任意の位置の情報を容易に取り出すことが可能である。

2.2 データ処理の正確さの違い

地震探査を行う場合、震源から出た波はあらゆる方向に三次元的に伝わり、様々な方向に存在する反射点で反射され、受振点へと戻ってくる。しかしながら、二次元地震探査を行った場合、地震波は二次元測線直下に伝わり、反射してくるものと考えて、データ処理を行う。従って、岩塩ドームや断層など、三次元的地下構造が存在すると、データ処理に狂いが生じ、処理結果は真の地下構造を正確に表現しなくなる。その様子を図 3 に模式的

資料 39

(甲 8 6 4 ・ 「三
次元地震探査の有
用性について」 ・
2 頁 ・ 図 1)

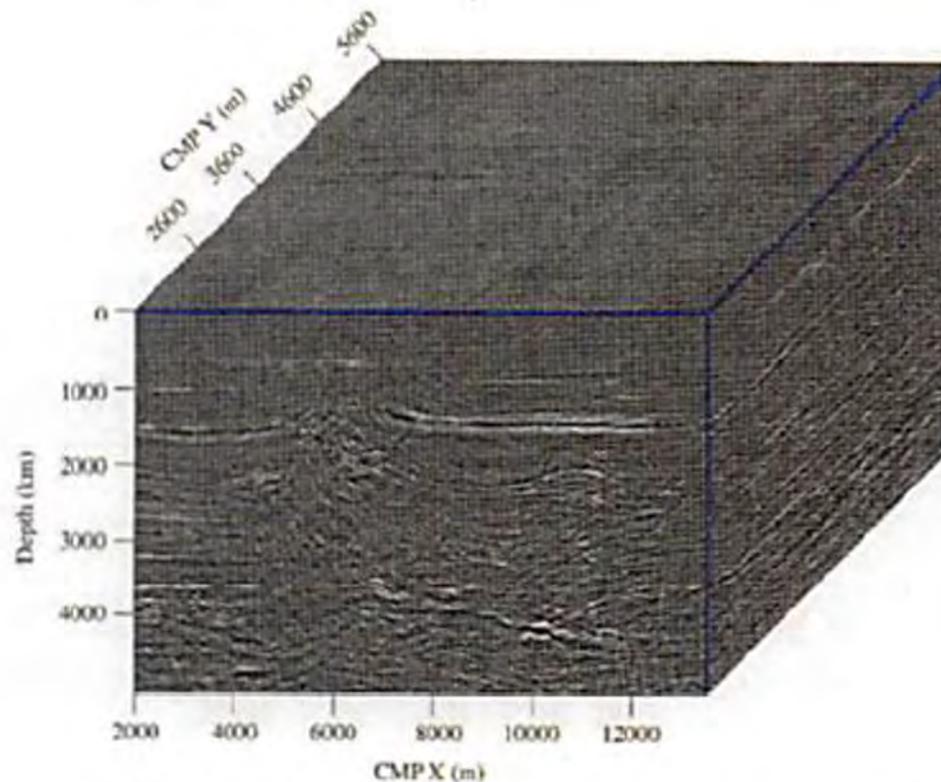


図 1 二次元探査で得られる情報 (Biondi (2007)より引用)。周囲の面上にしか情報が無く、直方体内部には情報が無い。

資料 4 0

(甲 8 6 4 ・ 「三次元地震探査の有用性について」 ・ 2 頁 ・ 図 2)

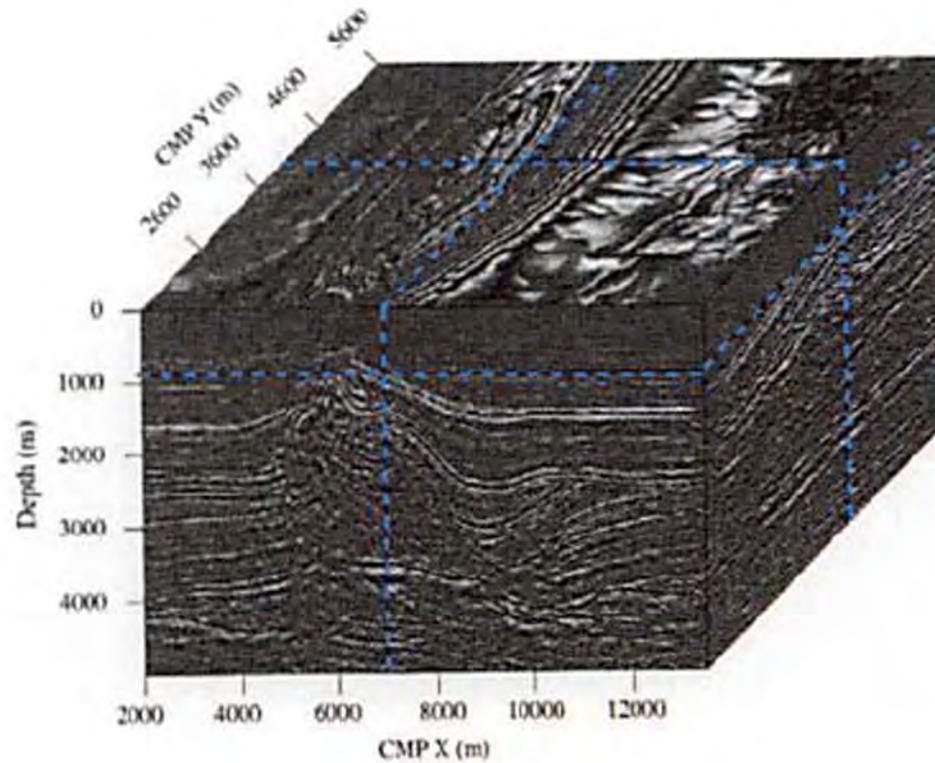


図 2 三次元探査で得られる情報 (Biondi (2007) に一部加筆)。直方体内部全てに情報があり、任意の断面上の情報を容易に取り出すことが可能である。

資料 4 1

(甲 8 6 4 ・ 「三次元地震探査の有用性について」 ・ 3 頁 ・ 図 3)

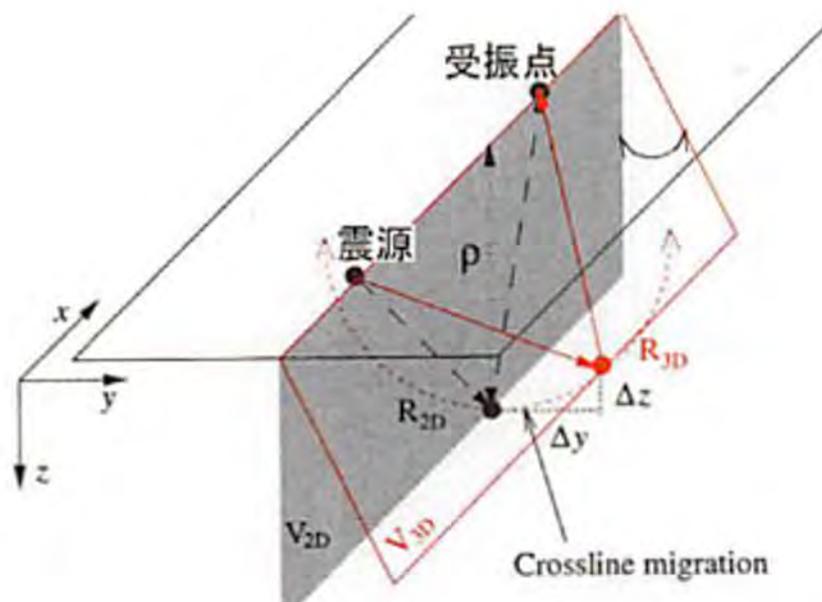


図 3 三次元探査と二次元探査の違いを示す模式図 (Biondi (2007) に一部加筆)。二次元探査の場合、地震波は測線直下のみを移動すると考えるため、地下構造解釈を誤る危険性がある。三次元探査では、地下構造を正確に把握する事が可能である。

資料 4 2

(甲 8 6 3・「三次元反射法地震探査技術の進展がもたらす地質学，とくに堆積学分野へのインパクト」・1頁)

甲第 863号

物理探査 第59巻第3号 (2006) 225-231頁

BUTSURI-TANSA, Vol. 59 No. 3 (2006) pp. 225-231

三次元反射法地震探査技術の進展がもたらす地質学， とくに堆積学分野へのインパクト

高野 修*・荒戸 裕之**・中西 健史*3・松岡 俊文*4・佐伯 龍男*5

要 旨

近年の三次元反射法地震探査技術および二次元可視化技術の進展は、解析手法や概念の観点から、堆積学、構造地質学、岩石学、石油地質学などの地質学関連各分野に対して大きなインパクトを与えている。とくに堆積学分野に与えるインパクトは大きく、三次元地震探査技術によって、これまで推定を必要としてきた河川チャネル、開折谷、深海チャネル、斜面崩壊、海底扇状地、炭酸塩リーフなどの堆積体の三次元形態が詳細に復元可能になってきている。このような技術の進展に伴い、近年、三次元地震探査技術とシーケンス層序学の統合分野として、「seismic geomorphology」もしくは「seismic sedimentology」という新たな学問領域が生まれつつある。Seismic geomorphology の概念と手法は、堆積物の解析、三次元的な堆積過程の解析や定量的貯留層キャラクタリゼーションなどに広く適用されつつある。以上のように、三次元地震探査技術は、効果的、効率的な地球表層現象の解析ツールとして、今後の堆積学になくてはならない技術となるであろう。

キーワード：三次元地震探査技術・seismic geomorphology・地質学・堆積学

1. はじめに

的) 推定」を行うことが必要であったのに対し、三次元地震探査技術が導入されることによって、容易に堆積物

資料 4 3

(甲 8 6 5 ・ 「 3 次元
反射法地震探査による
断層の地下構造調
査」 ・ 表紙)

甲第 865 号証

PNC ZJ7690 96-001

限定資料

3次元反射法地震探査による断層の地下構造調査

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

資料 4 4

(甲 8 6 5 ・ 「 3 次元
反射法地震探査による
断層の地下構造調
査」 ・ 1 4 頁)

地表で確認できる野島主断層の地下への延長がある程度推定できている。主断層の海側では、複雑な断層形態が認められるが、そのひとつひとつの追跡は困難である。

(4) 地表地質と深度断面図

断層の山側で顕著に認められる反射面と地質層序の関係は、直接には調査地域内のボーリングデータとの対比により行われるものである。

同地域の中央部を横断する長い 2 次元測線データが東大地震研（平田他 1 9 9 6）によって取得されており、この 2 次元データは、本調査結果で認められた断層の山側の西傾斜反射面が地表に出現する位置まで延びている。Fig. 4 9 にこの 2 次元データとの対比を示した。

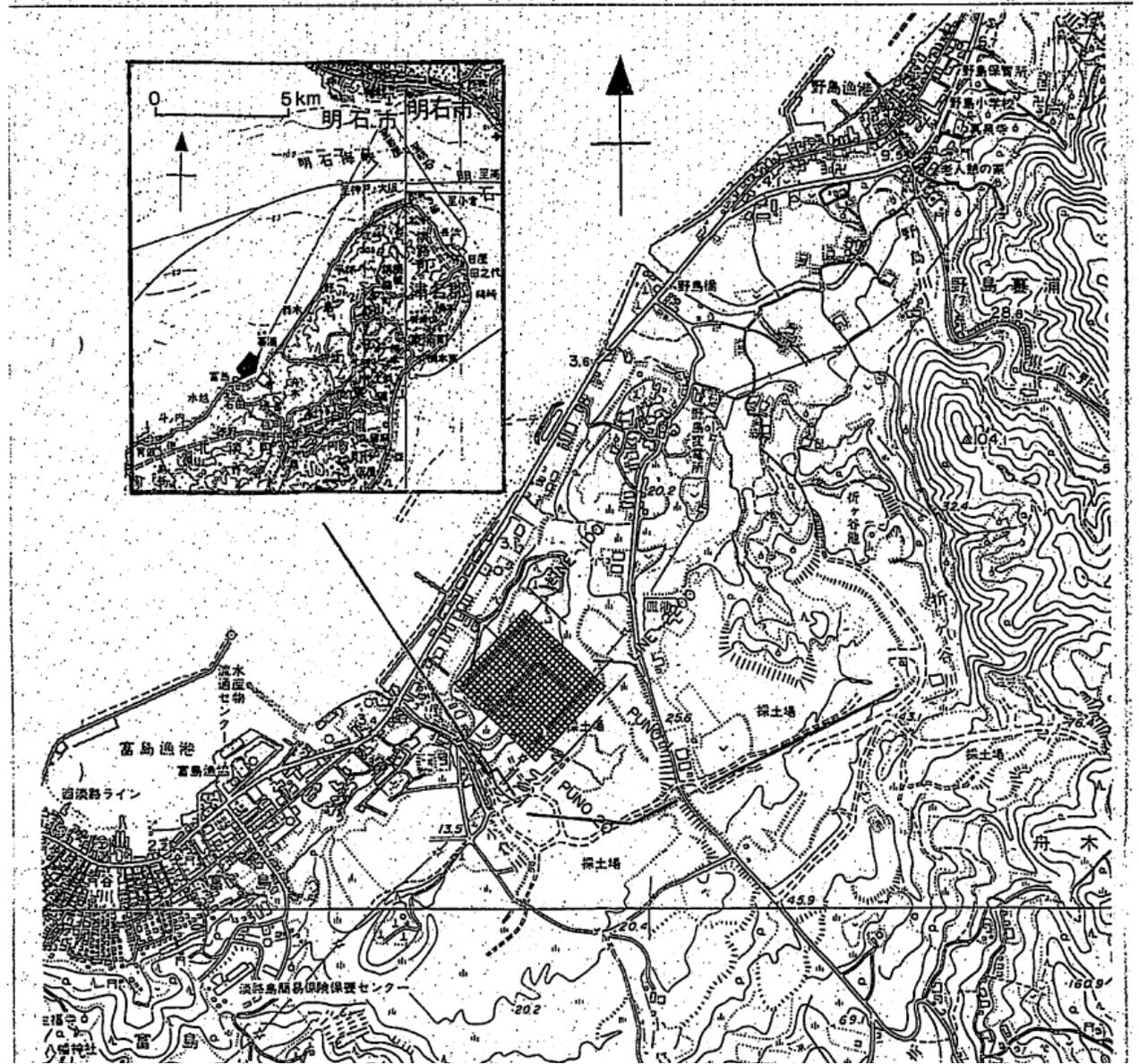
反射面が地表に出現している位置には、地表で均質な泥岩が現れている位置に対応しており、その前後には砂岩層が認められている。従ってこれら反射面は、砂岩層、泥岩層に対応したものと考えられる。

(5) 総合評価

断層周辺での高分解能 3 次元調査により、断層直下の複雑な地質構造形態が明らかになり、3 次元反射法による断層の地下構造調査の有効性が確認できた。

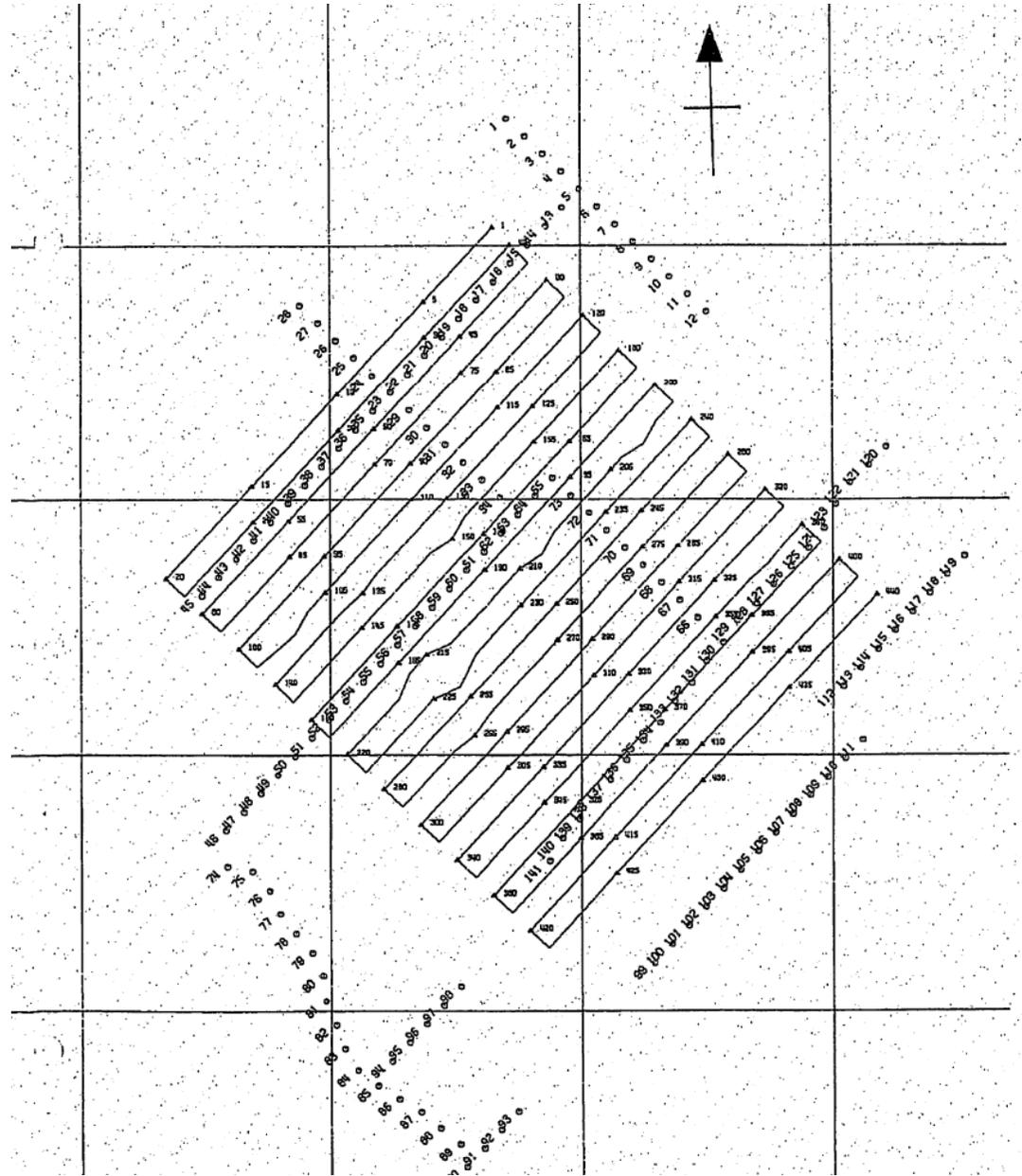
資料 4 5

(甲 8 6 5・「3次元反射法地震探査による断層の地下構造調査」・添付図 1)



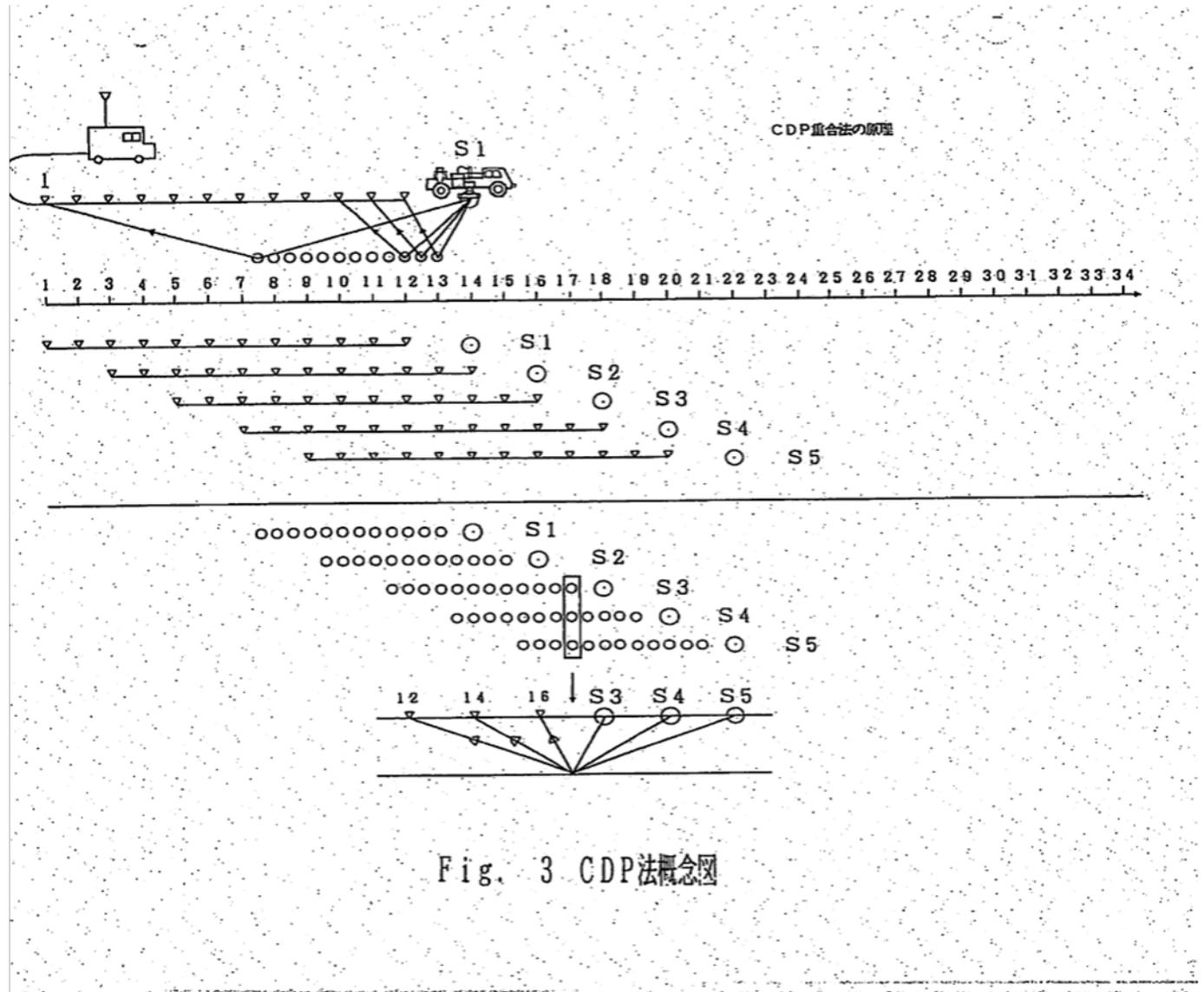
資料 4 6

(甲 8 6 5・「3次元反射法地震探査による断層の地下構造調査」・添付図 2)



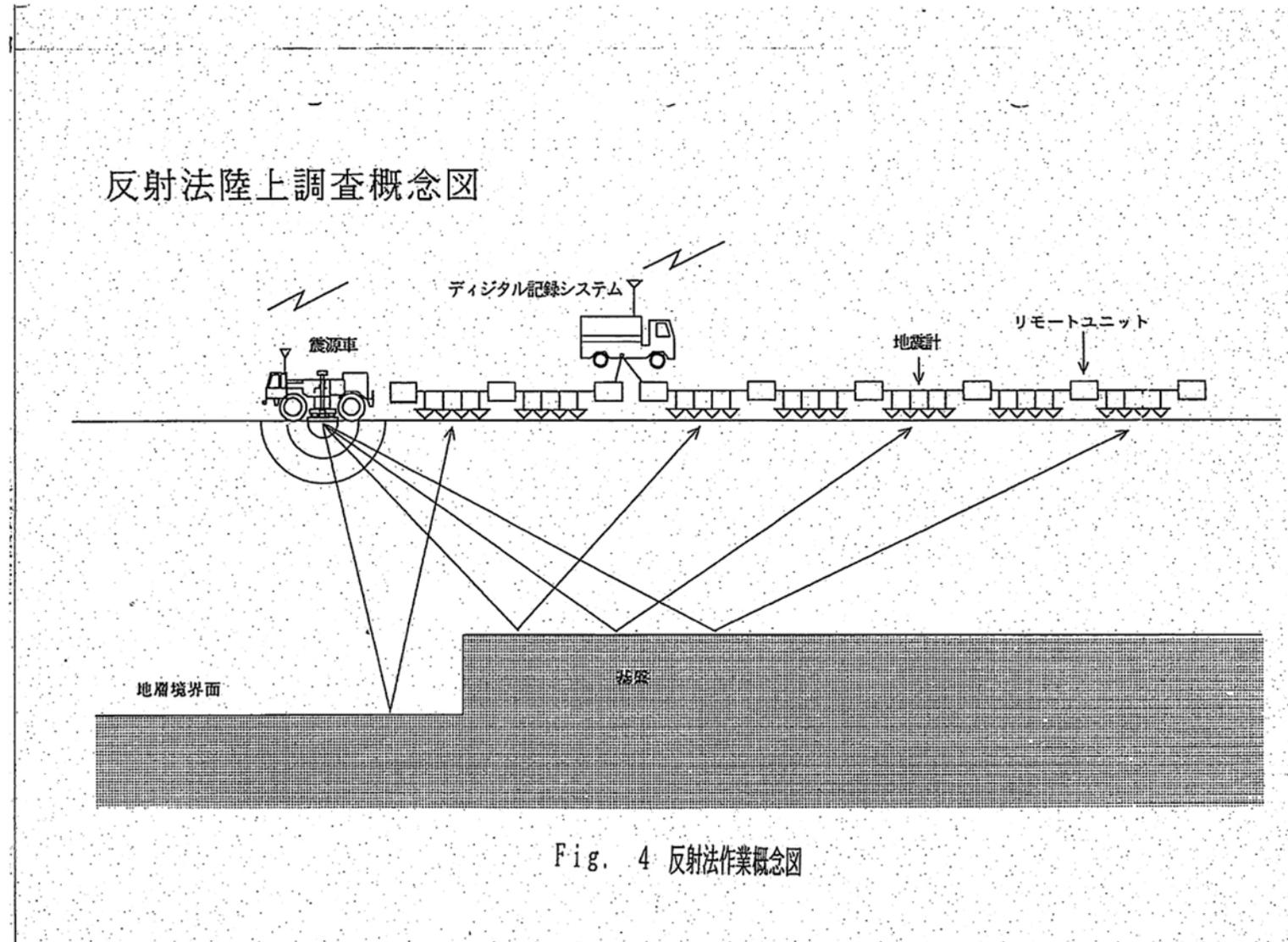
資料 4 7

(甲 8 6 5 ・ 「 3 次
元 反 射 法 地 震 探 査 に
よ る 断 層 の 地 下 構 造
調 査 」 ・ 添 付 図 3)



資料 4 8

(甲 8 6 5 ・ 「 3 次元
反射法地震探査による
断層の地下構造調
査」 ・ 添付図 4)



資料 4 9

(甲 8 6 6 ・ 「地盤調査のための三次元反射法地震探査による詳細地質解析」 ・ 1 頁)

物理探査 第 61 巻第 3 号 (2008) 243-249 頁

BUTSURI-TANSA, Vol. 61, No. 3 (2008) pp. 243-249

地盤調査のための三次元反射法地震探査による詳細地質解析

佐々木泰*・浜田憲彦**・藤原八笛**・鶴旨 純**・中東秀樹**

要 旨

二次元反射法地震探査は、調査の目的や対象深度を問わず、ボーリング孔間の地質および地質構造を補間する事を目的として実施されてきた。しかし、二次元反射法地震探査によって得られる情報は、測線直下の地質情報に限られ、面的な連続性に関しては推定の域を出ないのが実情である。

三次元反射法地震探査は、この様な欠点を補うために実施されるもので、石油、天然ガスや石炭等の資源探査の分野では、三次元反射法地震探査が通常の探査方法として実施されている(仙石, 1990; NEDO, 1990; 佐伯ほか, 2006)。しかし、三次元反射法地震探査を構造物を対象とした地質構造の解析に適用した例は国内では皆無と考えられる。

その理由として;

- ① 多チャンネルのデータ収録システムが必要
- ② 費用が割高の感覚がある
- ③ 三次元データ処理ソフトが必要

などが考えられる。

今回の調査では、深度 100m 以下の詳細な地質構造の解析を目的とするとともに、地質の不連続構造の存在の判定を行うことが容易な 100m 以深も対象に調査計画を立案した。調査対象深度は調査区域の広さ、地質データおよび経済性等を考慮して、探査深度は約 80m~250m 程度とした。本調査実施後に実施された調査坑道での地質調査において、三次元反射法地震探査で推定された落差数 m の不連続面の延長部において小断層を確認したことから、本調査の有効性が示された。本報告では、主として三次元反射法地震探査のデータ取得と解析・解釈について示す。

キーワード：三次元反射法地震探査・パイプレータ震源・地盤調査・小断層・解釈システム

1. はじめに

本調査は、下北半島南部の青森県六ヶ所村に分布する

礫混り砂岩層、粗粒砂岩層等からなり、南北方向へ緩く傾斜した地質構造となっている。また、調査対象地点の中央部には走向が東-西方向、傾斜が中角度、落差数 10m

資料 50

(甲 8 6 6 ・ 「地盤調査のための三次元反射法地震探査による詳細地質解析」 ・ 5 頁 ・ 図 8)

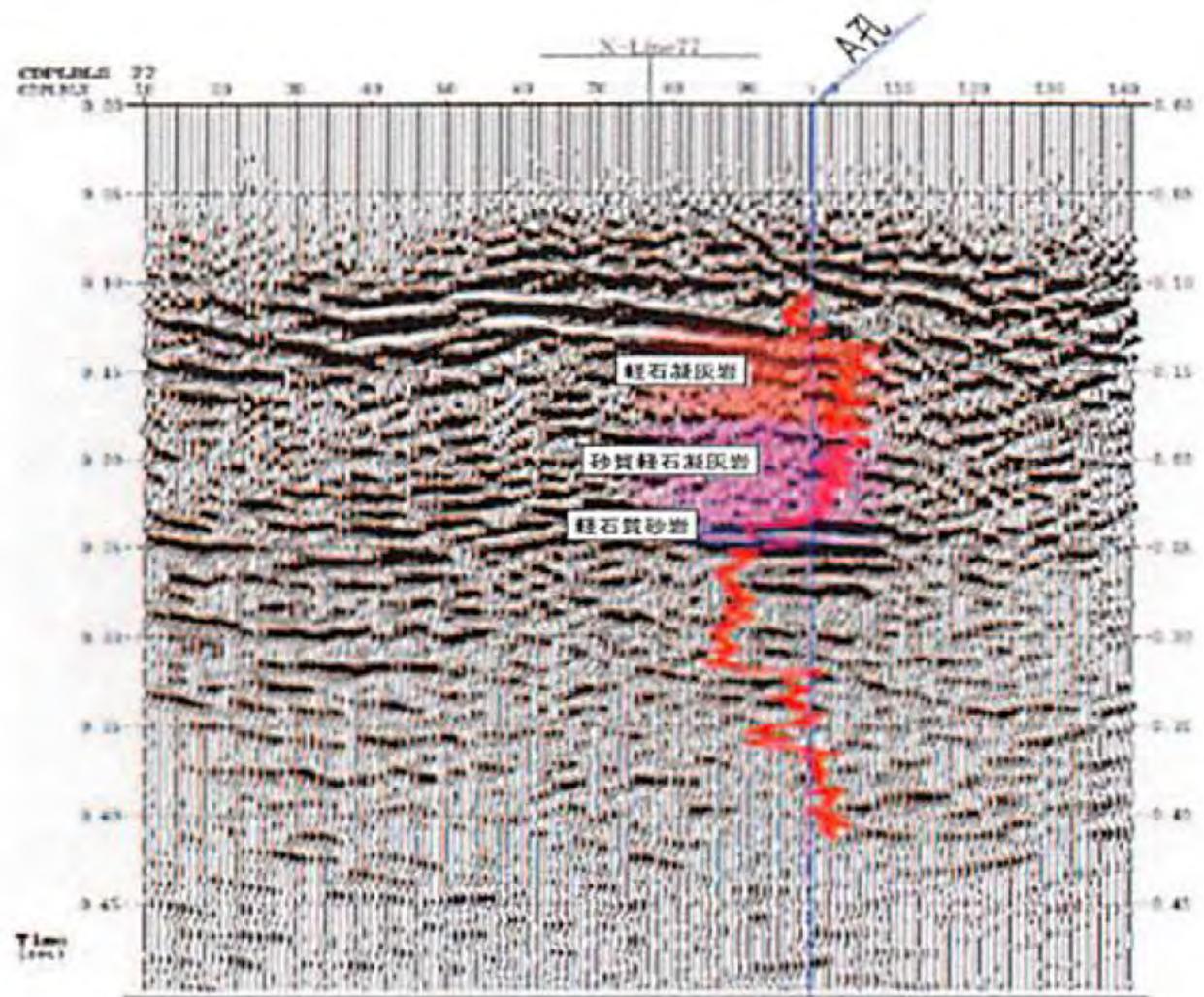


Fig.8. Natural gamma log data at well A on the In-Line22

資料 5 1

(甲 8 6 6 ・ 「地盤調査のための三次元反射法地震探査による詳細地質解析」 ・ 5 頁 ・ 図 9)

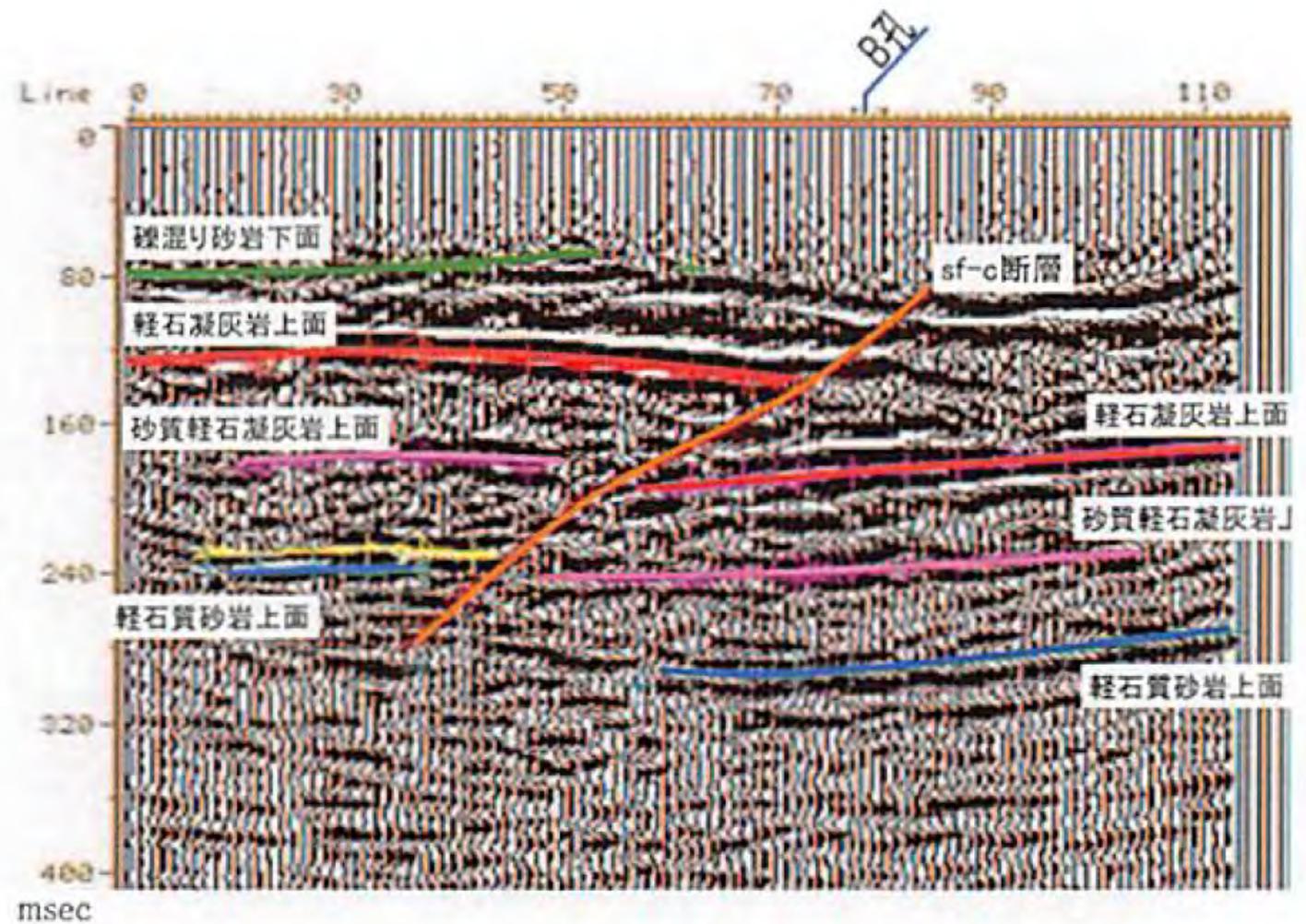


Fig.9. Interpreted section of X-Line77.

資料 5 2

(甲 8 6 6 ・ 「地盤調査のための三次元反射法地震探査による詳細地質解析」 ・ 5 頁 ・ 図 1 0)

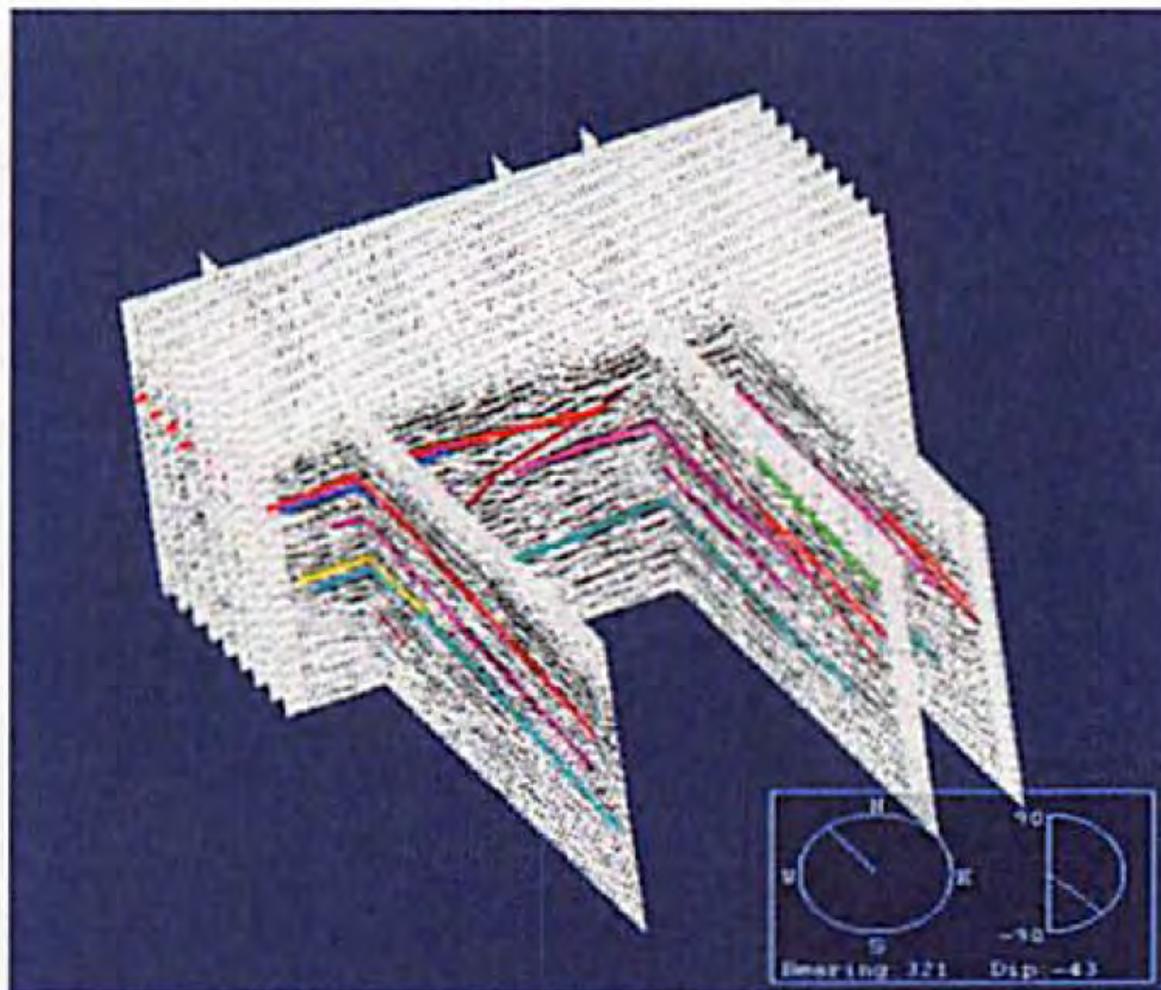


Fig.10. 3D data volume and several In-Line sections.

資料 5 3

(甲 8 6 6 ・ 「地盤調査のための三次元反射法地震探査による詳細地質解析」 ・ 5 頁 ・ 図 1 1)

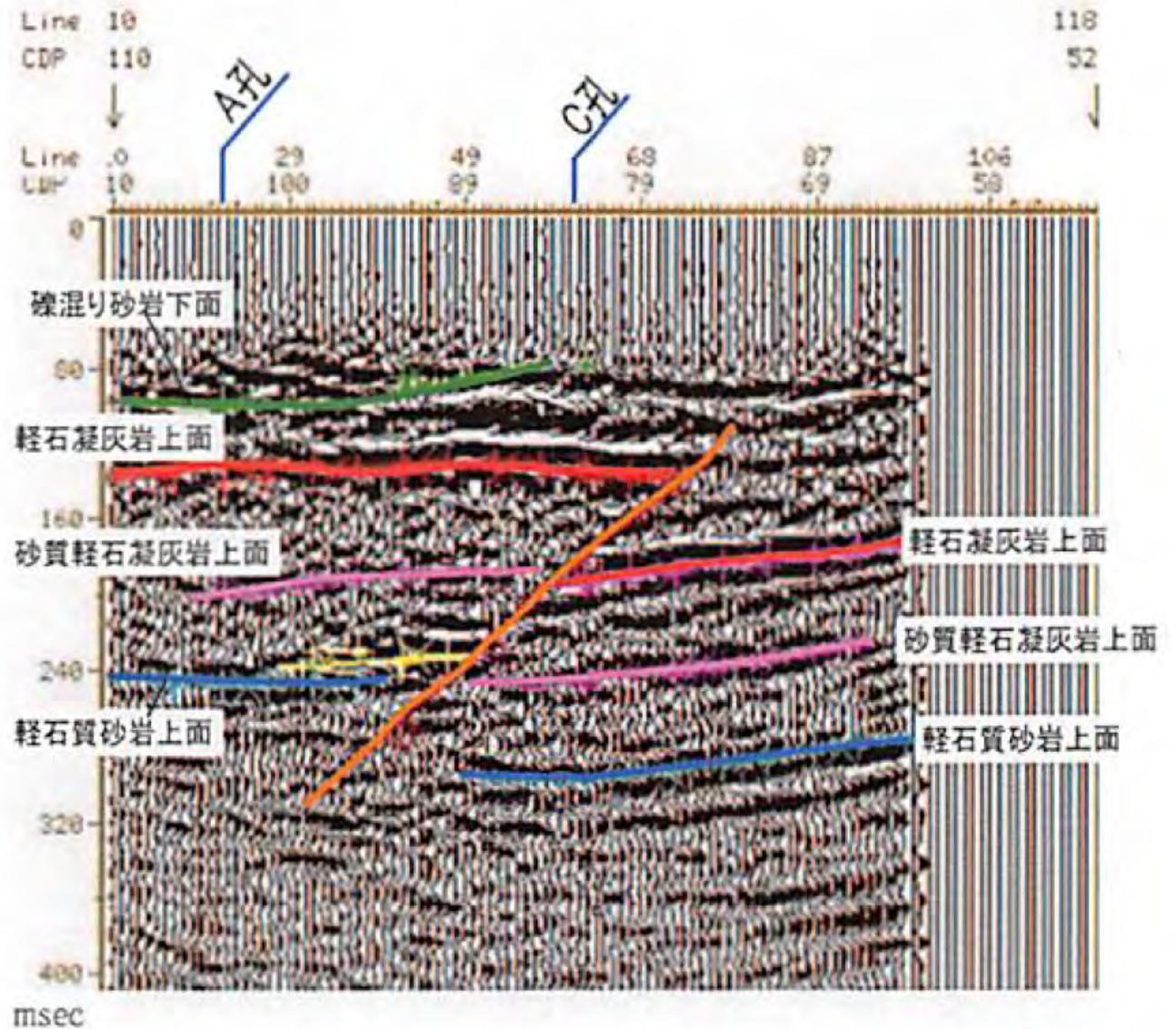


Fig.11. Arbitrary seismic section over 2 wells.

資料 5 4

(甲 8 6 6 ・ 「地盤調査のための三次元反射法地震探査による詳細地質解析」 ・ 6 頁)

Fig.8. Natural gamma log data at well A on the In-Line22 seismic section.

ら、鷹架層堆積後の間もない未固結時に海底地すべりにより形成された断層であると判断されている(石田ほか、2006)。断層の位置は反射断面解釈の結果、調査地域の中央部を連続して直線状に通過する、東西方向の走向を有することがわかった。

Fig.10にX-Line, In-Lineを用いた三次元による反射断面の検討例を示した。検討結果から断層の詳細な分布状況を確認することができた。

三次元反射法地震探査データの特徴の1つである任意の方向の反射断面の作成については、Fig.11に2本のボーリング孔を通過する任意測線の例を示し、反射面および地質構造対比の精度とボーリングデータの確認に利用した。これらの結果からsf-c断層の分布位置と形状が明らかとなった。三次元反射法地震探査を実施した範囲では、sf-c断層以外に規模の大きな不連続面は確認されなかった。今回の調査の目的として、ボーリング調査で断層の分布が推定されていたsf-c断層の分布状況の把握の他に、ボーリング調査では把握できない小規模な断層の分布を把握することにあつた。そのためFig.12に示すような、反射面の分布状況を反射波のピーク値で表現した反射波強度分布図を作成し、不連続面の有無、連続性を詳細に検討した。

その結果、不連続となる線状構造が軽石凝灰岩最上部の反射波において明瞭に確認できた。この不連続な線状構造については、Fig.13 In-Line47に示したように反射断面のsf-c断層上盤側の軽石凝灰岩最上部の反射波(赤)に明瞭に認められ、N50°E走向、落差5ms程度の小断層の存在が推定された。今回実施した三次元反射法地震探査で得られたデータおよびソニック検層による区間速度2,000m/sとして、落差5msのズレを確認できたことからその落差は5m程度であり、反射面の明瞭さから落差5m以下の小断層まで把握できる精度があると考えられる。さらに、この不連続面の北側延長部における三次元反射法地震探査後に掘削された調査トンネルや



Fig.10. 3D data volume and several In-Line sections.

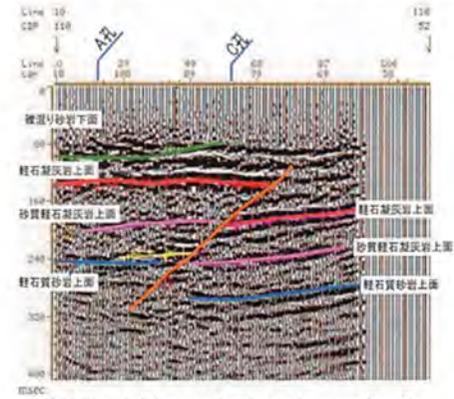


Fig.11. Arbitrary seismic section over 2 wells.

計測トンネルにおいて、Fig.14に示すような鷹架層堆積時に形成されたと考えられる固結・ゆ着した小断層(面なし断層)を確認することができた。

5. 結論

構造物建設のための地盤調査方法として、三次元反射法地震探査による地質構造調査方法を採用した結果、詳細な地質および地質構造の解釈ができた。また二次元反

資料55

(甲866・「地盤調査のための三次元反射法地震探査による詳細地質解析」・6頁)

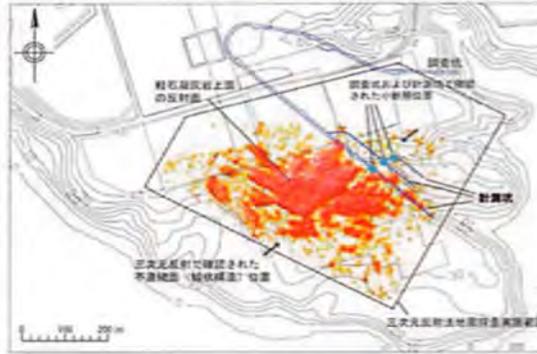


Fig.12. Amplitude anomaly isochron map of top of Pumice-Tuff layer shows linearment(black allows)and Blue circle shows small fault at measurement and test tunnels.

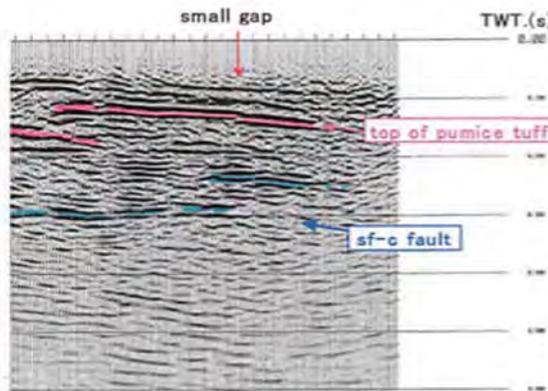
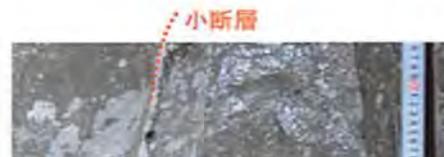


Fig.13. Small gap at top of pumice-tuff layer on the In-Line47.



射法地震探査では不可能であった同一反射面の平面的な振幅分布から、反射波の振幅異常や線状構造の解析が可能となり、5m以内の落差の断層まで把握することができた。

さらにボーリング調査と三次元反射法地震探査の併用により、三次元的な地質および地質構造を解明することができた。その後実施したボーリング調査や調査トンネル等の掘削調査により、三次元反射法地震探査の精度も確認することができた。

今回の調査を同一の共通反射点間隔(5m)による二次元反射法地震探査で行うとすれば、総延長約140kmの測線長で約半年のデータ取得作業量となる。これは三次元反射法地震探査の発震点が833点であるのに対して、二次元反射法地震探査では14,000点の発震点を必要とすることに由来する。さらに三次元反射法地震探査では、任意の垂直または水平反射断面を取得でき、二次元反射法地震探査では不可能である反射面や断層の正確な位置を投影することができる(3Dマイグレーション)等、解析精度に大きな差が出てくる。

以上のことから、三次元反射法地震探査とボーリング調査を併用することにより、結果として地質調査が効率的に実施できると考えられる。今後、三次元反射法地震探査技術は、大規模土木工事や大型建造物のための地盤調査において、適用すべき有用な技術と考えられる。

謝辞

本調査を実施するにあたり、悪条件のなかでのデータ取得とデータ処理・解析を実施した㈱ダイヤコンサルタント ジオエンジニアリング事業本部物理探査解析センターの諸氏、特に土家輝光氏(現アラビア石油㈱)、杉山昌夫氏(元㈱ダイヤコンサルタント)に感謝いたします。また、拙文に対し非常に有益で的確な指摘をいただいた匿名の査読者に謝意を表します。

資料 56

(甲 867・「浅海用高分解能三次元音波探査システムの開発とそれによる駿河湾北部沿岸海域の活断層調査」・1頁)

甲第 867 号証

活断層研究 44号 29~40 2016

論説 Article 29

Active Fault Research, No. 44, P.29-40, 2016



浅海用高分解能三次元音波探査システムの開発とそれによる駿河湾北部沿岸海域の活断層調査

村上文敏*¹・古谷昌明*¹・高智英二郎*¹・丸山かおる*¹
畑山一人*¹・武田伸勝*¹・佐藤正良*¹・馬場久紀*²

Development of the high-resolution three-dimensional seismic survey system for shallow water and the survey of active fault in the nearshore waters of the northern Suruga Bay using the system

Fumitoshi Murakami*¹, Masaaki Furuya*¹, Eijiro Kochi*¹, Kaoru Maruyama*¹,
Kazuto Hatakeyama*¹, Nobukatsu Takeda*¹, Masayoshi Sato*¹ and Hisatoshi Baba*²

Abstract

We developed the high-resolution three-dimensional seismic survey system for shallow water and carried out the survey of the active fault in the nearshore waters of the northern Suruga Bay using the system. The system is designed based on the following concepts, 1) usable system in nearshore waters using a small boat, and 2) acquirable seismic data in small bin size (2 m × 2 m) to image sub-seafloor geological structures in high-resolution. The system consists of onboard data acquisition instruments and towing equipment such as one boomer sound source and four receiver cables. Each receiver cable has 8 channel hydrophone arrays arranged at 2.5 m interval, and is towed behind the survey boat arranged at 8 m interval in the rectangular direction to the survey line.

The boomer was shot at intervals of 1.25 m under ship speeds between 3 and 4 knots.

資料 5 7

(甲 8 6 7・「浅海用高分解能三次元音波探査システムの開発とそれによる駿河湾北部沿岸海域の活断層調査」・2頁)

ネル音波探査システムを使用して行われ、内湾等泥質堆積物の卓越するような場所では効力を発揮してきた。しかし、外洋に面した砂質堆積物の卓越するような場所では音波の散乱等によるエネルギーの減衰が大きいため探査深度が限られ、地質構造解析が可能な断面を得ることはやや困難であった。高分解能マルチチャンネルシステムの開発によって、内湾以外の多くの沿岸海域において信号対雑音比が大きく深度方向に高分解能な音波探査記録断面が得られるようになり、現在では産業技術総合研究所による沿岸海域の地質図作成、文部科学省による海域活断層調査、原子力発電所周辺海域の活断層調査等において高分解能二次元マルチチャンネルシステムが多用されている。

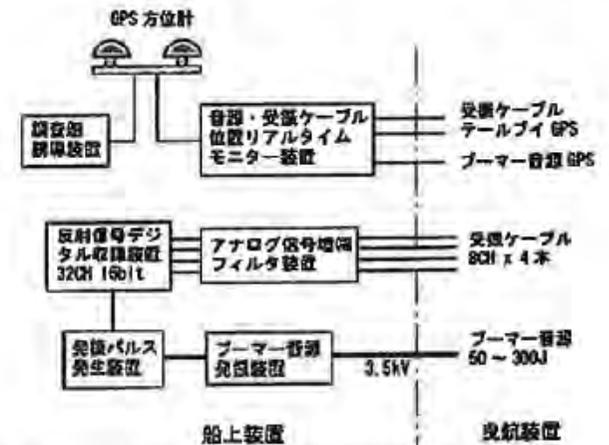
高分解能二次元マルチチャンネルシステムの開発によって、沿岸海域における活断層のより詳細な活動性評価ができるようになってきた。しかし、活断層評価のさらなる進歩のためには、断層端部、屈曲部及び不連続部の三次元構造、並びに潰れ変位量等を明らかにしなければならない。高野ほか(2006)は、三次元地震探査技術がもたらした堆積学や石油地質学への影響についてまとめ、本技術が堆積学分野にとって画期的でパワフルな解析ツールとなることを示した。石油探査分野では、既に三次元地震探査手法が確立され地質構造の三次元表示と様々な解析が行われているが、石油探査に使用されるのは大型船による大規模なシステムであり沿岸海域での適用は困難である。そこで我々は、高分解能二次元マルチチャンネルシステムを基本技術として、沿岸海域で使用できる浅海用高分解能三次元音波探査システムを開発し、海域実験を重ねた結果、実用化に至った。

本報告では、最初に我々が開発した浅海用高分解能三次

元の三次元イメージングのためのピンサイズが2m程度、(4) 数人程度の観測員でデータの取得が可能な4点である。

2.1 浅海用高分解能三次元音波探査システムの構成

第1図に本システムの船上装置等のブロック図を示し、第2図に船幅5 mの調査船を使用した場合の音源と受振ケーブルの配置を示す。船上装置は、プーマー音源用発振装置、32 chの反射信号デジタル収録装置、水平精度0.6 m(メーカーのカタログ上の精度)のディファレンシャルGPS受信機2個を使用したGPS方位計、調査船誘導装置、音源・受振ケーブル位置リアルタイムモニター装置からなる。船の左右両舷からそれぞれ10 m長のブームを張り出し、それに4本の受振ケーブルを固定して曳航する(第3図)、各受振ケーブルの間隔は8 m、受振ケーブルのチャンネル数とチャンネル間隔は、それぞれ8 ch及び2.5 mで



第1図 浅海用高分解能三次元音波探査システムの船上データ収録装置及び曳航装置のブロック図。

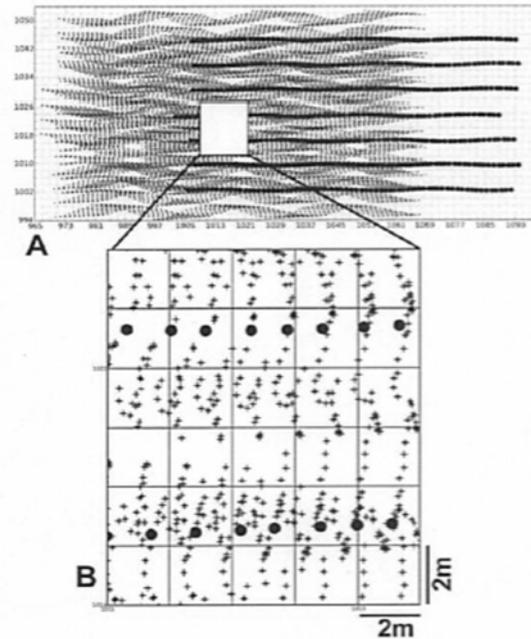
Fig.1 Block diagram of the onboard data acquisition instruments

資料 5 8

(甲 8 6 7・「浅海用 高分解能三次元音波探 査システムの開発とそ れによる駿河湾北部沿 岸海域の活断層調 査」・4頁)

を行わなければならないが、その中で最も重要な点はビン(bin)のサイズである。調査海域はビンと呼ばれる細かい四角形に分割され、探査によってビン内には音源と受振点の中間点(midpoint)に対応する反射点が得られる(第4図)。これらの反射点における反射トレースを重合することによってビンの中点において1本の反射トレースが得られる。

三次元音波探査データ収録後のデータ処理フローを第5図に示す。最初に、重合前処理を測線毎の反射データについて行う。フィルタ及びデコンボリューション処理等の信号処理は、二次元探査の場合と同じである。次のジオメト

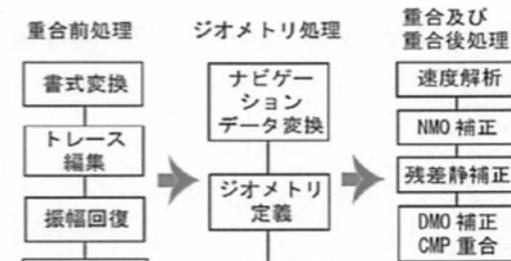


第4図 音源及び受振ケーブル曳航状態のシミュレーションによるビン内の反射点分布図。シミュレーション条件：X-Y方向のビンサイズは2 m、音源と受振ケーブルの配置は第2図に示される、測線間隔は8 m、音源及び受振ケーブルを蛇行させた。音源の発振間隔を1.25 mを中心にランダムに変

反射点のX-Y座標を求める(ジオメトリ定義)。さらに、すべての反射トレースを反射点位置にもとづいて並べ替え、ビン毎の反射トレースギャザーを作成する(ビンニング)。次に、重合及び重合後処理において、同じビン内の反射データを使用して速度解析、NMO補正、残差静補正、DMO補正を行った後、CMP重合処理によって一つのビンに対して一本の反射トレースを得ることができる。マイグレーション処理は、音波伝搬中に海底面あるいは海底下の複雑な地質構造等によって生じる回折波等の影響を取り除き、できるだけ真の地質構造をイメージングするための処理である。以上の処理によって、調査海域内のすべてのビン内の反射トレースからなる三次元サイズミックボリュームデータを得ることができる。

3. 駿河湾北部沿岸海域における高分解能三次元音波探査

2010年6月に駿河湾北部の沿岸海域において高分解能三次元音波探査を行った。使用した調査船は、東海大学所有の「北斗」(20トン)である。使用した調査船及び調査機材の概要を表1に、調査測線及び測線間隔等の概要を表2に示す。本調査では、1台のプーマー音源と4本の受振ケーブルを使用した。音源と受振ケーブルの配置は、第2図に示す通りである。4本の受振ケーブルの末端にブイを取り付け、その上にGPS受信機を装着して1秒毎のテールブイ位置を測定した。本調査時、曳航物のリアルタイムモニターシ



資料 59

(甲 867・「浅海用高分解能三次元音波探査システムの開発とそれによる駿河湾北部沿岸海域の活断層調査」・10頁)

時間面で切断したタイムスライス断面を示す。タイムスライス断面上には、物性の異なる地層境界からの反射波が地層の構造に対応して、様々なパターンとして表示される。反射波の振幅の極性が正の場合は黒色で、負の場合は赤褐色で、振幅ゼロの場合は白色で表示される。水平層からなる地層の場合は、同色の均一パターンで表示される。地層が一様に傾斜している場合には、地層の反射面に対応して濃淡のある黒・白・赤褐色の直線状パターンとして表示され、直線の方向は地層の走向に一致する。ブランチした軸を持つ褶曲構造の場合は放物線状のパターンとして表示される。44 ms断面において、東西にほぼ直線状に延びる振幅の大きい反射面(図中Mで示す)は、海底の多重反射である。断層を境に東側と西側では反射パターンが大きく異なる。東側は振幅の大きい不規則なパターンによって特徴づけられ、B層内の反射面の特徴である小さな起伏を伴う振幅の大きい反射面を反映していると考えられる。西側は、南北性縞状パターン分布域と東西性縞状パターン分布域とに分けられる。前者は神沢隆起帯に相当し、A層内の東傾斜の隆起構造を反映する。後者は神沢隆起帯と蒲原断層との間の凹部に相当し、A層のほぼ水平な構造を反映する。62 ms断面においては、上述の44 ms断面上で見られる海底の多重反射の影響が調査海域南端部に限られ、断層より西側の地質構造のほぼ全容を見ることができる。西側では、C層、B層、A4層及びA3層の傾斜変化に対応する縞状パターンを見ることができる。すなわち、隆起するC層及びB層の東傾斜の構造を反映した密な南北性縞状パターンとそれより緩傾斜のA4層を反映した疎な縞状パターン及びA3層下部のほぼ水平な構造を反映した東西性縞状パターンである。東西性縞状パターンは断層付近で途絶える。80 ms断面では、断層西側の東西性縞状パターンはC層内の構造を示す。本パターンは断層付近で途絶えるが、

場合は精度が悪くなる。これに対して三次元音波探査では、三次元サイミックデータボリュームを使用して海底下を可視化できることから、複雑な埋没地形を精度よく連続的に把握することが可能になる。これによって、複数の時代に形成された埋没地形上の変動地形判読を時系列的に行えると同時に断層の位置や形態変化を三次元的に把握でき、断層の認定技術が向上すると考えられる。そのためには、三次元可視化の分解能が埋没地形上の変動地形を判読するために十分なのか検討する必要がある。

今回、調査海域が狭いため蒲原断層を確認できるのは300m程度にとどまるが、この間の存否・形態を欠落なく、且つ高分解能でみることができ、本断層面が途切れることなく連続していることを確認した。

従来、沿岸海域活断層の活動性評価は、二次元音波探査によって得られる垂直断面上の各反射面の上下変位と地質学的手法によって得られる反射面の地質年代を用いて検討されてきた。二次元音波探査では、測線に沿った垂直断面しか得られないため、測線間隔を非常に狭くしない限り、断層の横ずれ量を求めることはできない。今回の駿河湾北部沿岸海域における高分解能三次元音波探査によって、神沢隆起帯のような堆積層の傾斜構造分布域では、タイムスライス断面上で反射面の縞状パターンが得られ、傾斜の変化が縞状パターンの疎密に反映されることが明らかになった。このような場所において、横ずれ成分を持つ断層が地層の走向と交差する場合、タイムスライス断面上には断層に沿って横ずれを示す縞状パターンが表示され、断層を挟んで対応する縞状パターンを指標として断層の横ずれ量を評価できると考えられる。本調査海域では見られなかったが、横ずれ成分を持つ断層の影響を受けた埋没地形(例えば埋没海底谷)はより明瞭な指標になると考えられる。

上田(2003)は、模型実験により形成した横ずれ断層を

資料 60

(甲 868・「超高分解能三次元地震探査 (UHR3D) 一日奈久断層帯海域部における実施例一」・1頁)

物理探査 第 71 巻 (2018) 33-42 頁

BUTSURI-TANSA, Vol.71 (2018) pp. 33-42

超高分解能三次元地震探査 (UHR3D) — 一日奈久断層帯海域部における実施例 —

猪野 滋*・須田茂幸*・菊地秀邦*・大川史郎*・阿部信太郎**・大上隆史*

要 旨

超高分解能三次元地震探査 (Ultra-high resolution 3D seismic survey : UHR3D) は、これまでの海上三次元地震探査のデータ取得方法を発展させ、高周波数震源による高分解能化 (約 500 Hz 以上)、より高密度の発振間隔および受振点間隔 (共に約 5 m 以下)、クロスライン方向のピンサイズが 5 m 以下、および短いケーブル (約 100 m 以下) を用いて、深度および空間分解能の向上を行う手法である。本稿ではデータ取得およびデータ処理についてその概要を報告する。具体例としては、日奈久断層帯海域部において実施した UHR3D を取り上げる。

2016 年 4 月に発生した熊本地震 (Mj 6.5 および Mj 7.3) で活動した日奈久断層帯の八代海への海域延長部を対象として、2017 年 2 月に 1 km × 2 km の調査域において UHR3D を実施した。

日奈久断層帯海域部 UHR3D においては、震源としてブーマーを用い、独立記録型のストリーマケーブル (Autonomous Cable System : ACS) 4 本を用いた。また、三次元調査に不可欠な航測システムとして ORCA を使用し、リアルタイムで反射点分布を計算し、均質な重合数とするためのインフィルの設定に役立てた。

データ処理は、三次元地下構造を正しくイメージするために入念に行われた。特にフィールドノイズの除去や、潮汐や波浪の補正、不自然なフットプリントの抑制は品質の向上に効果があった。

処理された結果より、海底面下 100 m までの正確な地下構造が判明するとともに、詳細な断層分布を得ることができた。この結果は、今後の日奈久断層帯海域部の研究への貴重なデータとなるであろう。

UHR3D は、トレンチ調査が極めて困難である海域部での横ずれ断層の調査において非常に有効的な手段となることが期待されるとともに、土木工事等で海域での浅層部の構造調査が必要となる場合にも活用できるであろう。

キーワード：三次元地震探査・高分解能・日奈久断層帯・ACS・ブーマー震源

資料 6 1

(甲 8 6 8 ・ 「超高分解能三次元地震探査 (UHR3D) ー 日奈久断層帯海域部における実施例一」 ・ 2 頁)

層の海域延長部では、地震発生以前、様々な機関によって音波探査を主体とした海底活断層調査がなされてきた (例えば菅原ほか、2011)。熊本地震以降は、特に平成 28 年度 (2016 年度) の文科省による総合的な活断層調査の一環として、海上ボーリング (Fig. 1 に示す TNK-1 および TNK-2) や年代測定による活断層評価が進みつつある (阿部ほか、2017a)。本調査もその一環として実施されたものであり、須田ほか (2017)、阿部ほか (2017b)、菊地ほか (2017)、猪野ほか (2017) でその一部が報告されている。

従来の海底活断層調査では二次元測線を約 1-2 km 間隔の格子状に設定して実施されてきたが、格子状の二次元測線だけでは、測線間の断層の空間的なつながりは各測線での断層位置から推測するしかなく、横ずれ断層の変位量の推定も困難である。また、二次元地震探査の断面図では、側方への構造の傾斜が大きい場合、側方からの反射波があたかも測線直下の反射波であるかのごとく現れるので三次元構造の位置や形状を正確には表現できない問題もある。

ここで紹介する UHR3D では、三次元地下構造を正しくイメージするとともに断層の走向および傾斜を空間的かつ詳細に把握するために、(株)地球科学総合研究所が開発した独立型ストリーマケーブル (Autonomous Cable System : ACS)、および Applied Acoustic Engineering 社のブーマー震源 (AA301 型) が用いられた。

2. 調査方法

熊本県八代海の津奈木町沖海域 (Fig. 1) において 2017 年 2 月 5 日から調整を含めて 6 日間にわたりデー

Coast Guard

Fig. 1. Index map of survey area.

タ取得作業を実施した。調査域は長さ 2 km、幅 1 km (2 km²)。水深は回頭範囲を含めて約 8 ~ 40 m であった。ACS ストリーマケーブルを 4 本曳航し、ブーマーを震源とした三次元観測を実施した。当初設定したセイルライン (20 m 間隔で 50 本) を測定したほか、重合数不足域を補充する補間測線 (インフィル) を 10 本測定した。ストリーマケーブルを曳航した観測作業は 日中に行い夜間は作業を実施していない。冬季の調査であったが海況は比較的良好で荒天待機は発生しなかった。

2.1 観測システム

使用した観測システム (Fig. 2) は、パラベインは用いず、観測船後部両舷にクレーンを設置して 4 本の ACS を 10 m 間隔で曳航している。ACS は独立型収録装置 (Fig. 3) とアクティブセクション (Fig. 4、受振器内蔵) で構成されている。アクティブセクションは長さ 80m、受振器間隔 5 m、チャンネル数は 16 chs である。4 本での全チャンネル数は 64 chs である。ACS では、受振された信号を A/D 変換しながら常時連続的に Flash Memory に記録しており、各ショット記録は測定終了後に発振時刻に基づいて切り出すことになる。

高周波数成分を記録するために ACS にフロートを取り付けて浮力を調整して海面下 0.1 m 以内を曳航し、震源は高周波成分を発生できるブーマーを用いた。

ACS は観測船とは単にロープのみで繋がっており、従来のストリーマケーブルのように信号線を船上の観測室に引き込む必要がないのでケーブル投入・揚収のハン

資料 6 2

(甲 8 6 8 ・
「超高分解能三
次元地震探査
(UHR3D) 一日
奈久断層帯海域
部における実施
例一」・ 8 頁・
図 1 5)

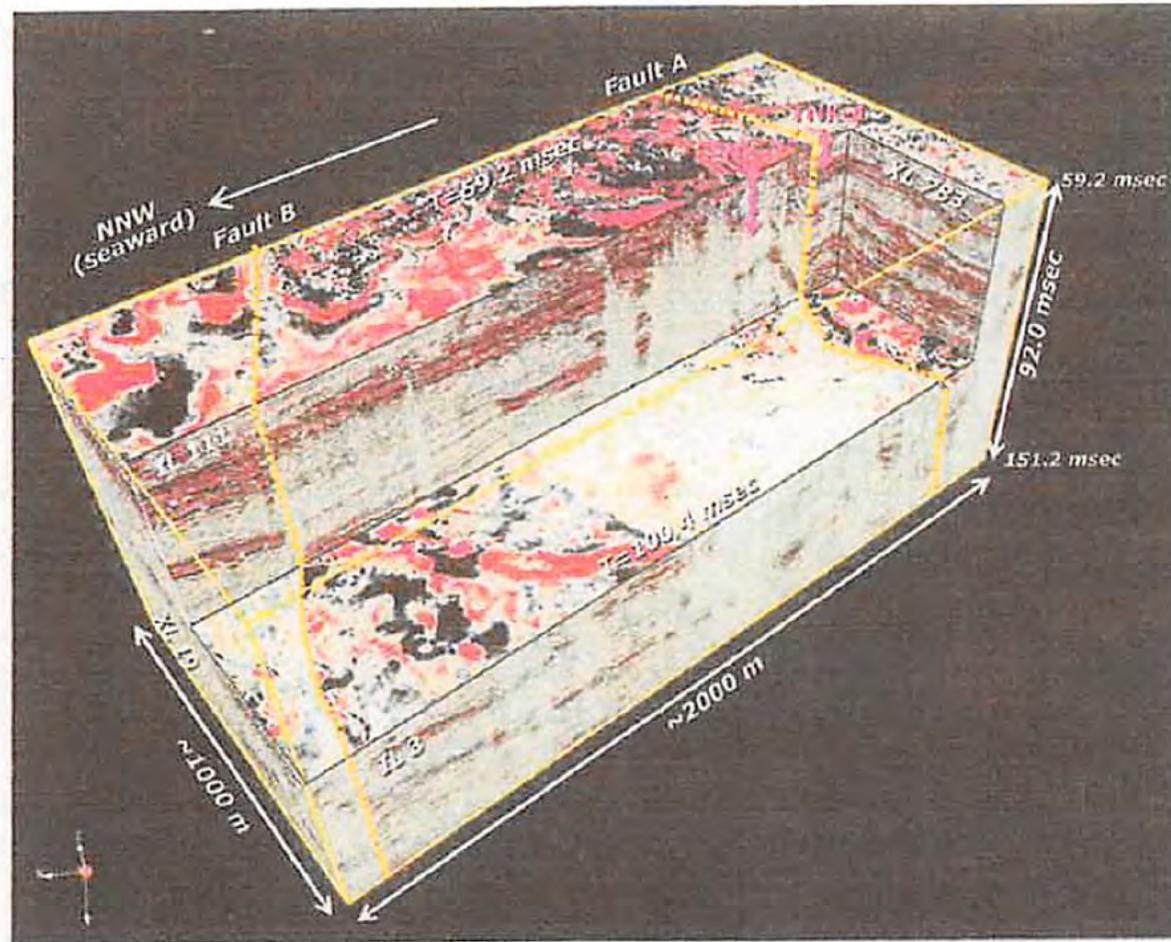


Fig. 13. Chair-cut plot of UHR3D seismic cube with overlays of interpreted faults and well locations.

資料 6 3

(甲 8 6 8 ・ 「超高分解能三次元地震探査 (UHR3D) ー日奈久断層帯海域部における実施例一」 ・ 8 頁 ・ 図 1 5)

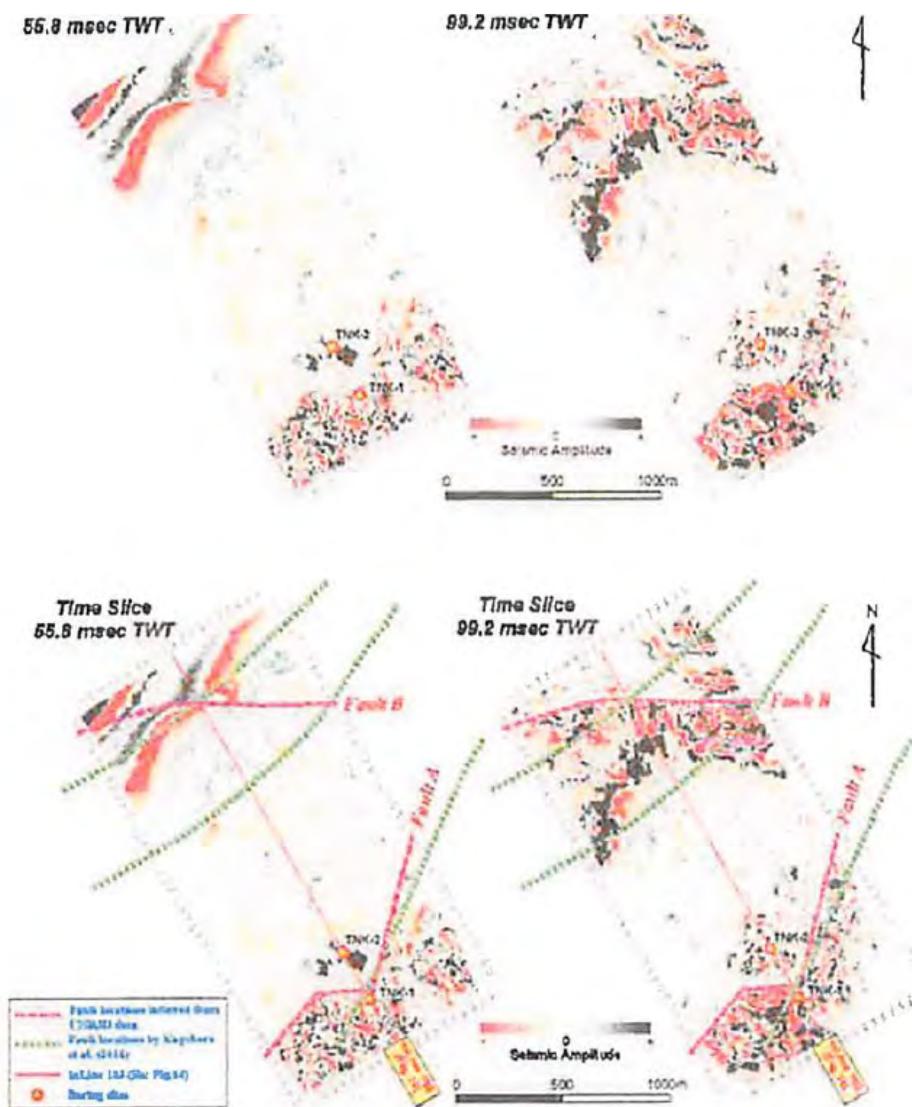


Fig. 15. Time slice sections. Raw (Top) and Interpreted (Bottom).

資料 6 4

(甲 8 6 8 ・ 「超高分
解能三次元地震探査
(UHR3D) 一日奈久
断層帯海域部における
実施例一」 ・ 7 頁)

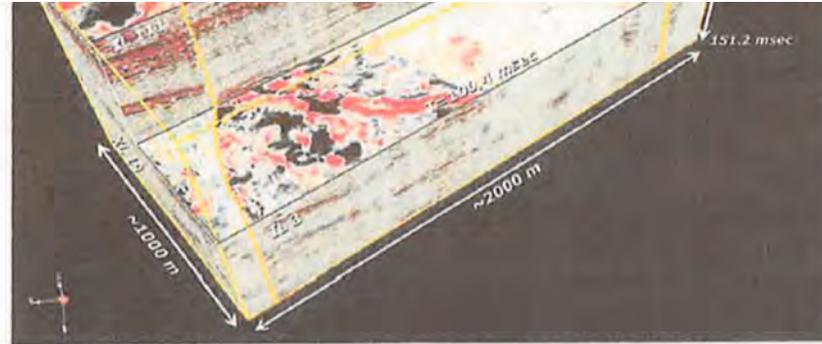


Fig. 13. Chair-cut plot of UHR3D seismic cube with overlays of interpreted faults and well locations.

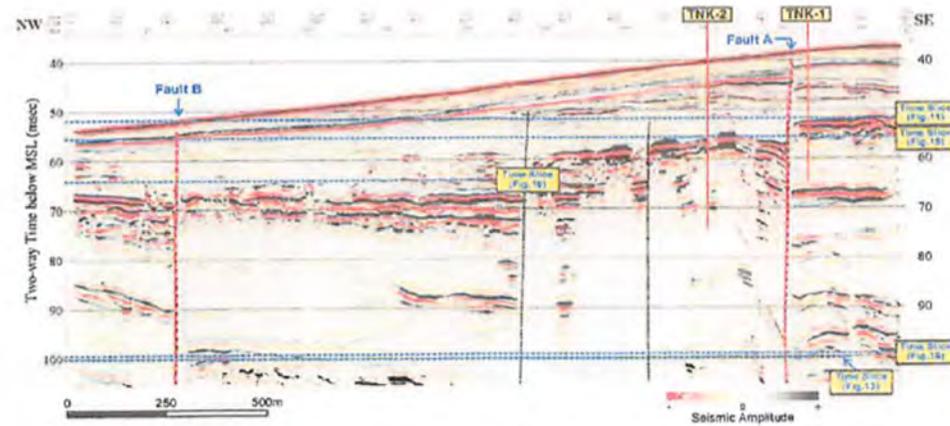


Fig. 14. Section of InLine 103 on which two wells are located (Re: Index map in Fig. 12).

である。海底面直下の反射波は周期がおよそ 1 msec であることが見て取れることから、速度 1500 m/sec を仮定し、垂直方向の分解能を半波長程度とすると、0.5 m 程度の分解能が得られていることが分かる。

Fig. 15 は UHR3D のマイグレーション結果のタイムスライスの一例である。Fig. 15 から調査域の南側で明瞭な断層が認められる。その分布形態はこれまで既存文献に記載されたもの(橋原ほか, 2011)より極めて複雑であ

り、直線状ではなく雁行状になっていることが新たに確認された。北側に認められる断層についても、従来推定されてきた走向とは異なっている。Fig. 16 は北側の断層に沿って見られるチャネル構造を示したものであるが(Time Slice 位置は Fig. 14 参照)、このような過去の堆積環境が明瞭に確認できる。正確な断層走向の解明や、過去の堆積環境を示すチャネル構造のような地質現象の視覚化は、二次元地震探査では困難であり、三次元地震探

資料 6 5

(甲 8 6 8 ・ 「超高分解能三次元地震探査 (UHR3D) ー日奈久断層帯海域部における実施例一」 ・ 9 頁)

査により可能となるものである。

以上のように、本調査においては、今後引き続いてすすめられる日奈久断層帯海域部の活動性評価について、その信頼度向上に資するデータが取得されたと考える。

4. おわりに

ブーマーを震源とする UHR3D について、日奈久断層帯海域延長部を対象として活断層調査を例に、そのデータ取得とデータ処理方法について紹介した。

UHR3D では、海底面下約 100 ~ 150 m 程度までが探査可能と考えられる。既往の高分解能三次元地震探査 (HR3D, 周波数は最大約 200 Hz, 探査深度は海底面下約 1 km まで、例えば猪野ほか, 2016) に比較しても、さらに高分解能なデータ (3 kHz に達する高周波数成分) を取得することが可能である。UHR3D によって高精度な三次元データを取得できることにより、断層分布や地質構造、地層分布を空間的に把握することが可能となる。UHR3D 探査は活断層調査に極めて有益な手法であり、詳細な断層分布や地質構造、構造発達史等の解明に役立つものと期待される。とりわけ、トレンチ調査が極めて困難である海域部での横ずれ断層の調査において、UHR3D 探査が非常に有効的な手段となるであろう。また、UHR3D は土木工事等で海域での浅層部の構造調査が必要となる場合にも活用が期待される。

参 考 文 献

阿部信太郎・大上隆史・八木雅俊・岡村行信・細矢卓志・須田茂幸・向山建二郎 (2017a)：日奈久断層帯海域延長部における海底活断層調査ー海上ボーリングと高分解能マルチチャンネル音波探査に基づく活動性評価一，日本地震学会 2017 年秋学大会予稿集。

阿部信太郎・大上隆史・八木雅俊・岡村行信・向山建二郎・細矢卓志・須田茂幸・大川史郎・菊地秀邦・猪野 滋 (2017b)：海底活断層評価のためのサイスミック・トレンチングを目指してー八代海における海上ボーリングと超高分解能三次元反射法地震探査一，海洋調査技術学会第 29 回研究成果発表会講演要旨集。

猪野 滋・菊地秀邦・浅川栄一・蛭田明宏・大川史郎・松本 良 (2016)：高分解能三次元反射法地震探査ー SoundArray 3D ー新潟県上越沖での実施例，物理探査学会第 135 回学術講演会論文集，117-120。

猪野 滋・須田茂幸・菊地秀邦・大川史郎・阿部信太郎・大上隆史・八木雅俊・岡村行信 (2017)：日奈久断層帯海域部における超高分解能三次元地震探査 (UHR3D) ーデータ処理一，物理探査学会第 137 回学術講演会論文集，13-16。

猪原京子・愛甲崇信・足立幾久・坂本 泉・滝野綾幸・井上直人・北田奈緒子 (2011)：布田川・日奈久断層帯海域部における高分解能マルチチャンネル音波探査，活断層・古地震研究報告，No.11, 273-294。

菊地秀邦・須田茂幸・阿部信太郎 (2017)：日奈久断層帯海域部における超高分解能三次元地震探査 (UHR3D) ーデータ取得一，物理探査学会第 137 回学術講演会論文集，9-12。

Meckel, Timothy A. and Francis J. Muicahy (2016)：Use of novel high resolution 3D marine seismic technology to evaluate Quaternary fluvial valley development and geologic controls on shallow gas distribution inner shelf Gulf of Mexico, *Interpretation*, 4(1), SC35-49。

村上文敏・西村清和・松岡弘和・古谷昌明・丸山かおる・半場康弘・立石雅昭 (2004)：浅海域音波探査用 12 チャンネル受信ケーブルの作成と海域実験結果，海洋調査技術学会第 16 回研究発表会要旨集，45-46。

須田茂幸・大川史郎・菊地秀邦・猪野 滋・阿部信太郎・大上隆史・八木雅俊・岡村行信 (2017)：日奈久断層帯海域延長部における海底活断層調査ー超高分解能三次元探査による断層性状の把握一，日本地震学会 2017 年秋学大会予稿集。

資料 6 6

（甲 8 6 9 ・ 「高分解能三次元地震探査システム実証試験（別府湾での調査例）」 ・ 1 頁）

高分解能三次元地震探査システム実証試験（別府湾での調査例）

寺西陽祐*, 村上文俊, 塚原均, 今野政明, 今野恵, 佐藤紀男, 川崎慎治, 東中基倫, 小澤岳史, 須田茂幸, 猪野滋, 阿部進(地科研), 竹村恵二, 大沢信二(京都大学)

Trial Survey of High Resolution Offshore 3D Seismic System at Beppu Bay, Oita Prefecture

Yosuke Teranishi*, Fumitoshi Murakami, Hitoshi Tsukahara, Masaaki Konno, Kei Konno, Norio Sato, Shinji Kawasaki, Motonori Higashinaka, Takeshi Kozawa, Shigeyuki Suda, Shigeru Ino, Susumu Abe(JGI), Keiji Takemura, Shinji Ohsawa(Kyoto Univ.)

Abstract: High resolution 3D (HR3D) seismic system employing a high-frequency source and a dense array of short streamers represents a significant advance in the field of marine seismic data acquisition. A new HR3D system developed in JGI, Inc. (JGI) has been used for several surveys in Japan. The HR3D survey system has successfully achieved on various challenging issues such as cable weight reduction, cable noise reduction, improvement of positional measurement accuracy and cable control, flip-flop shooting with different types of sources, real-time QC/QA and in-house data processing. A trial HR3D survey was conducted in Beppu Bay, Kyushu, Japan. This paper describes the results of the survey.

1. はじめに

高分解能三次元反射法地震探査法（以下、HR3D）は、海底下浅部の地質構造の詳細把握を目的とし、石油探査用三次元地震探査システムを小型化かつ高分解能化することにより開発された探査技術である。HR3Dではショートストリーマ、小型高周波数震源を使用することに加え、発震・受振点を稠密に展開することにより、ゼロオフセット近傍の地震探査記録を密に取得し、三次元地下構造を高分解能かつ高精度に把握する。卓越した高い分解能を有する HR3D は、石油・天然ガス探査での貯留層評価や堆積層評価だけでなく、二酸化炭素地中貯留（CCS）、貯留層モニタリング、そして海底地盤リスク評価といった多岐にわたる分野において新たな知見を提供できる技術である。

本講演では、実証試験でのデータ取得の概要およびデータ処理で品質向上に寄与した項目について述べる。

2. データ取得

2020年3月に大分県の別府湾東方海域（水深約30～50m）に位置する6km×3km（18km²）の調査域（図1）において、112測線（Prime:81, Infill:31）の発震測線を設定し、9日間に渡りデータ取得を実施した。使用した観測システムを図2に示す。データ取得仕様を以下にまとめる。

表1 データ取得仕様

ストリーマケーブル	Solid Streamer
ストリーマケーブル数	6本
ストリーマケーブル間隔	12.5 m

資料 6 7

(甲 8 6 9 ・ 「高分解能 三次元地震探査システム 実証試験 (別府湾での調 査例) 」 ・ 3 頁)

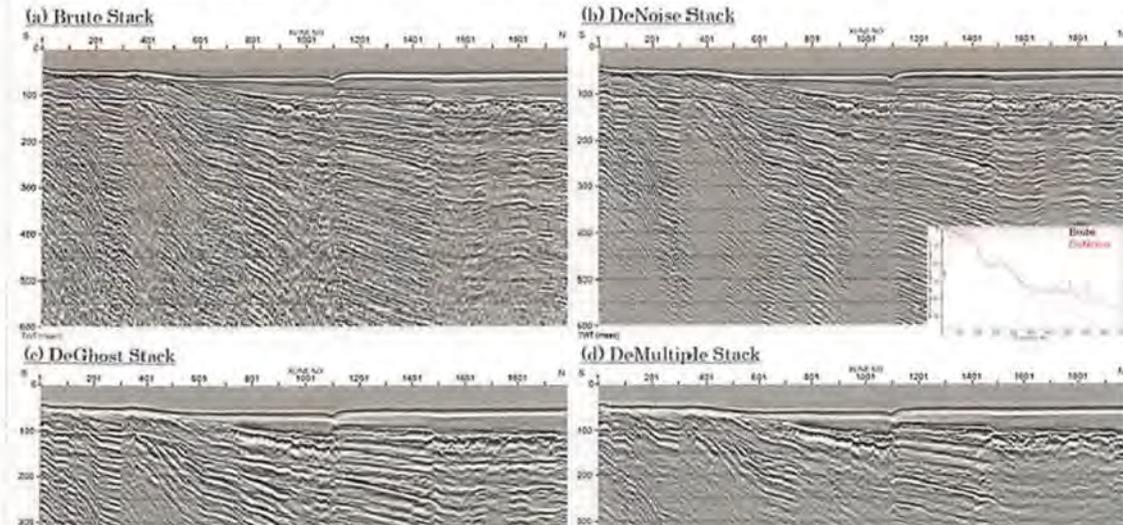
トの要因としては、潮汐補正後に残存する潮汐の影響や Water Column Statics (データ取得時期の違いに起因する各種の時間差)、ケーブル深度の不規則な変化などが考えられる。このようなフットプリントの抑制は、震探記録の時間分解能が向上するほど顕著に現れるため、高分解能探査では重要な処理項目となる(猪野・他, 2018)。上述の要因による反射波走時の時間差を補正し、反射面のがたつき抑制ならびに重合効果向上を目的としたフットプリント抑制処理を適用した。また欠損トレースや不均一な反射点分布(船舶蛇行, ストリーマケーブルのフェザリング, Infill 測線実施に起因)は、マイグレーション処理における偽像の一因となるため、フットプリント抑制後に共通オフセット領域での三次元トレース内挿処理を行い、欠損トレースを内挿するとともに重合数の正規化を実施した。

図 5(a)および(b)に本処理適用前後のタイムスライス図を示す。本処理適用前に見られた同一時刻における波形の歪みが抑制され、反射波の連続性が大きく改善されたことが確認できる。図 6 にマイグレーション結

解能三次元反射法地震探査を実施した。本調査では、6.25 m 間隔 16 チャンネルのストリーマケーブル 6 本を 12.5 m 間隔で曳航し(計 96 チャンネル)、6 km×3 km の調査域にて 112 測線 (Prime:81, Infill:31) の発震測線を設定し、9 日間に渡りデータ取得を実施した。データ処理においては浅海 HR3D の課題となる環境ノイズ、多重反射波、フットプリントに対して、適切な抑制処理を導入し、イメージング品質の向上を図った。これらの解析結果は、HR3D 技術により海底面下浅部において 20 ~ 350 Hz (中心周波数約 150 Hz) の広帯域な 3 次元イメージが取得可能であり、HR3D 技術が地下の三次元的な断層位置、分布形状および変位量分布の詳細な理解に有効であることを示している。

参考文献

猪野滋, 須田茂幸, 菊地秀邦, 大川史郎, 阿部信太郎, 大上隆史(2018). 超高分解能三次元地震探査 (UHR3D) 一日奈久断層帯海域部における実施例一, 物理探査, 71, 33-4.



資料 68
(甲 870)

甲第 870 号証

研究・開発

[小型高分解能音波探査システム](#) [小型高分解能三次元音波探査システム](#) [論文・口頭発表](#)

小型高分解能三次元音波探査システム

沿岸海域の活断層の分布、形態、規模等を明らかにする手法として音波探査が多用されています。音波探査は通常の二次元で行われ、得られた二次元記録断面図をもとに測線間の地質構造を推定していきます。このため、この方法では断層の分布形態や傾斜等を正確に把握することはできません。この問題を解決するには既に石油・天然ガス探査等で使用されている三次元音波探査技術が有効と考えられます。しかし、一般的な三次元音波探査は装置の規模が大きすぎること、記録の分解能が低いことからそのままの適用は困難です。そこで当社は東海大学との共同研究で、短いマルチチャンネル受振ケーブルの実用化、受振ケーブルの適正配置の実用化、船上データ収録装置の小型化、データ処理手法の最適化を目指しこれに成功しました。

- ① 学会口頭発表資料（一部）
- ② 調査船の後方に受振ケーブルを展開中
- ③ 曳航中の発振器、受振ケーブル
- ④ 実験で使用した船内観測装置
- ⑤ 三次元音波探査のポリウムイメージ



業務案内

○ 野外業務

- ▶ 海底面調査
- ▶ 海上音波探査
- ▶ 海底重力探査
- ▶ 海底試料採取

○ 室内業務

- 地質・地質構造解析
- 反射法データ処理
- 地質文献調査
- 各種調査計画立案
- コンサルタント業務

○ 研究・開発

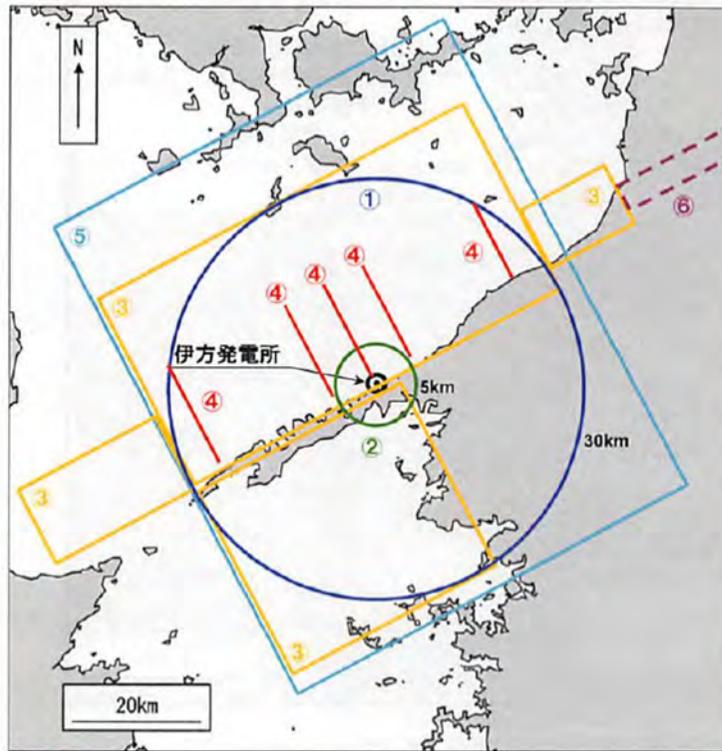
- ▶ 小型高分解能音波探査システム
- ▶ 小型高分解能三次元音波探査システム
- ▶ 論文・口頭発表

資料 6

(甲 4 6 1 ・ 5 頁)

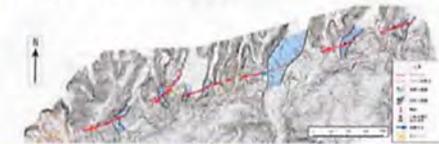
1. 地質調査の概要

地質調査の概要②



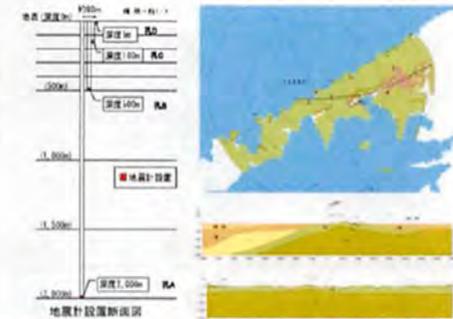
① 地形調査

DEMデータの取得、音響測深、変動地形に着目した地形判読



② 深部ボーリング調査・地表地質調査

敷地における深さ2,000mまでの深部ボーリングと敷地近傍における地表踏査によって詳細な地下構造を把握



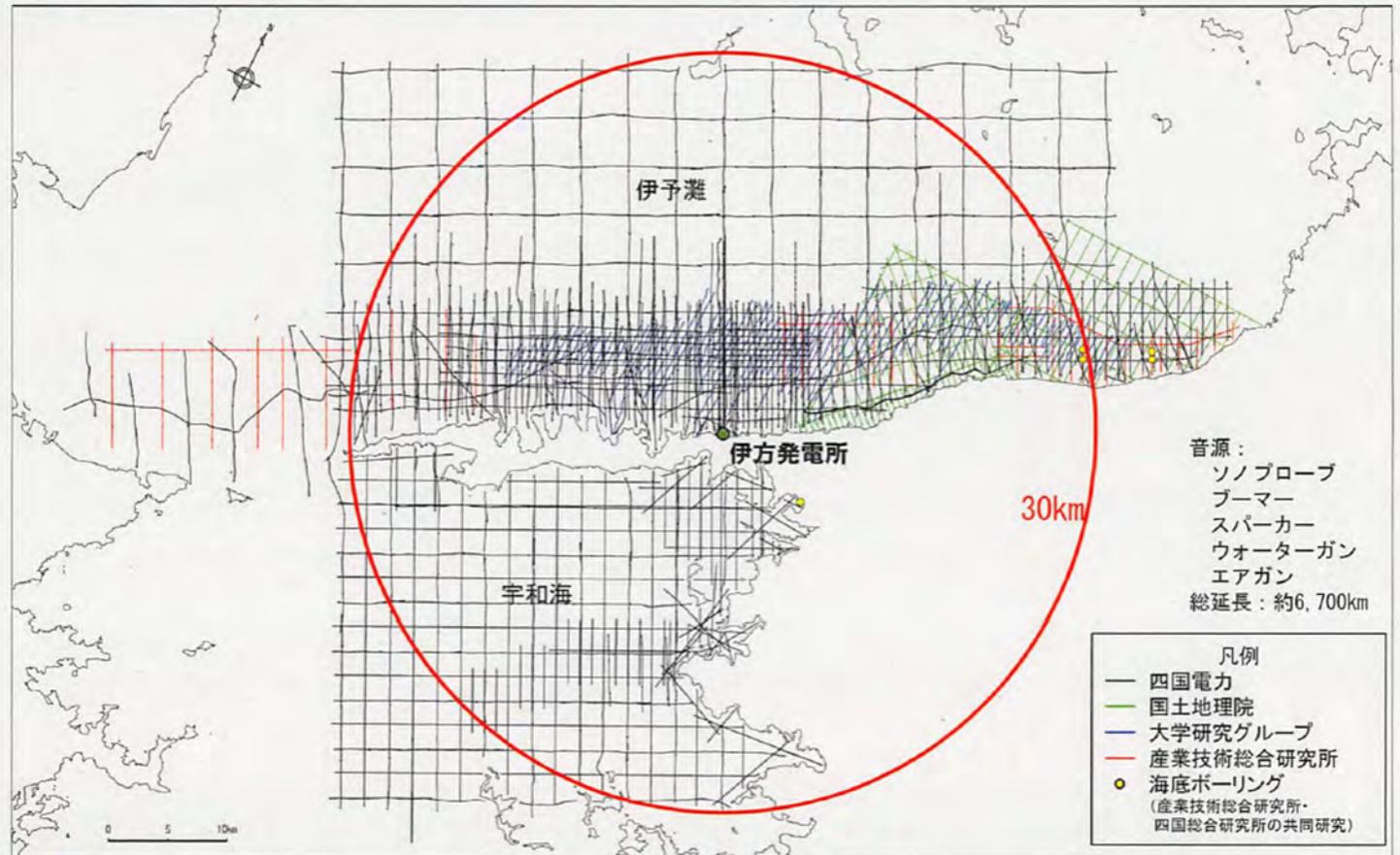
資料 6 9

(乙D68・7頁)

1. 地質調査の概要

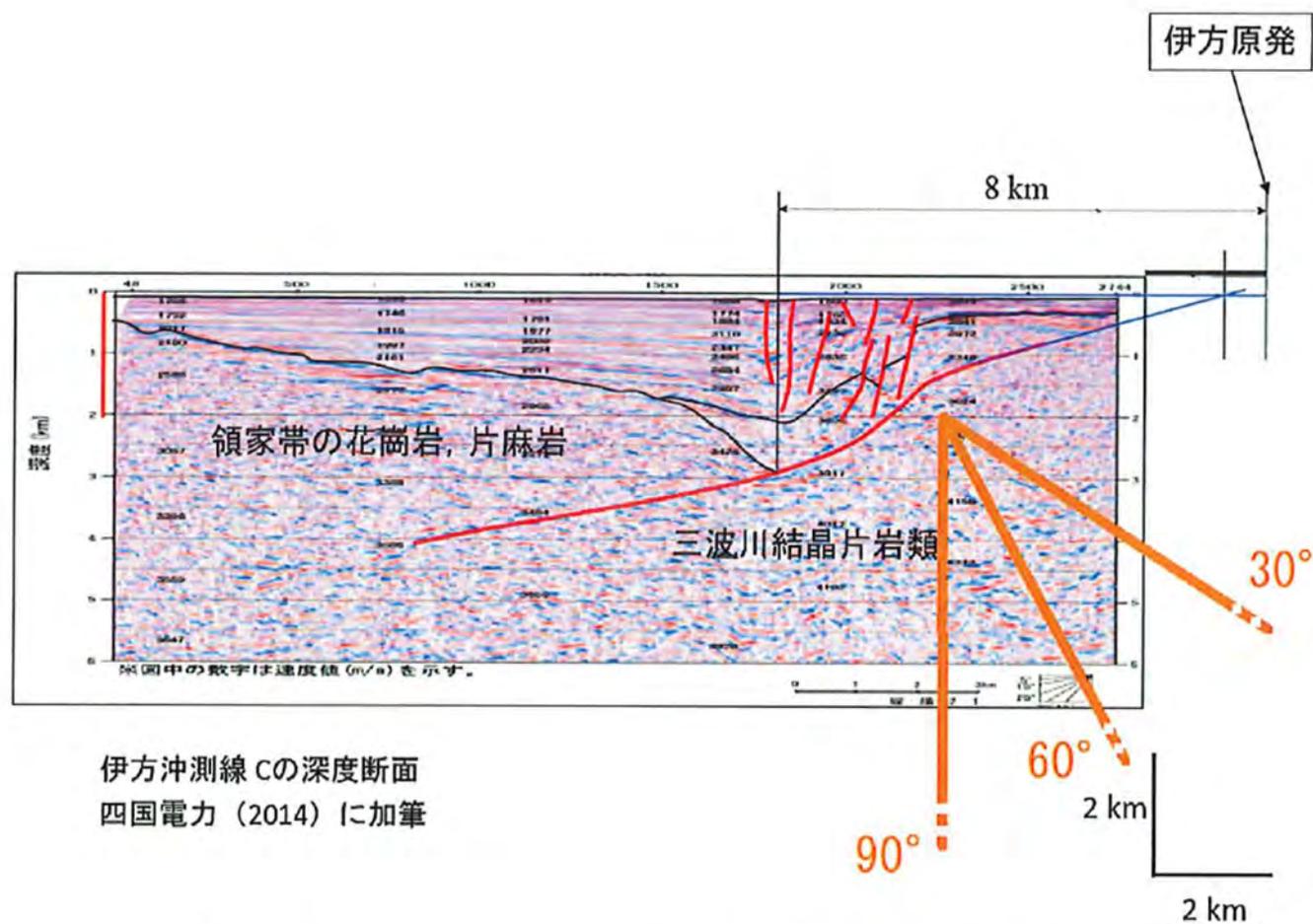
海上音波探査測線図

平成27年3月20日
審査会合資料再掲



資料 70

(甲 8 1 6 ・ 「意見書」 ・ 9 頁 ・ 図 5)



伊方沖測線 C の深度断面
四国電力 (2014) に加筆

図 5 発電所と断層上端の水平距離を 5km としたケース

資料 7 1

(甲 8 1 6 ・ 「意見書」 ・ 8 頁 ・ 図 4)

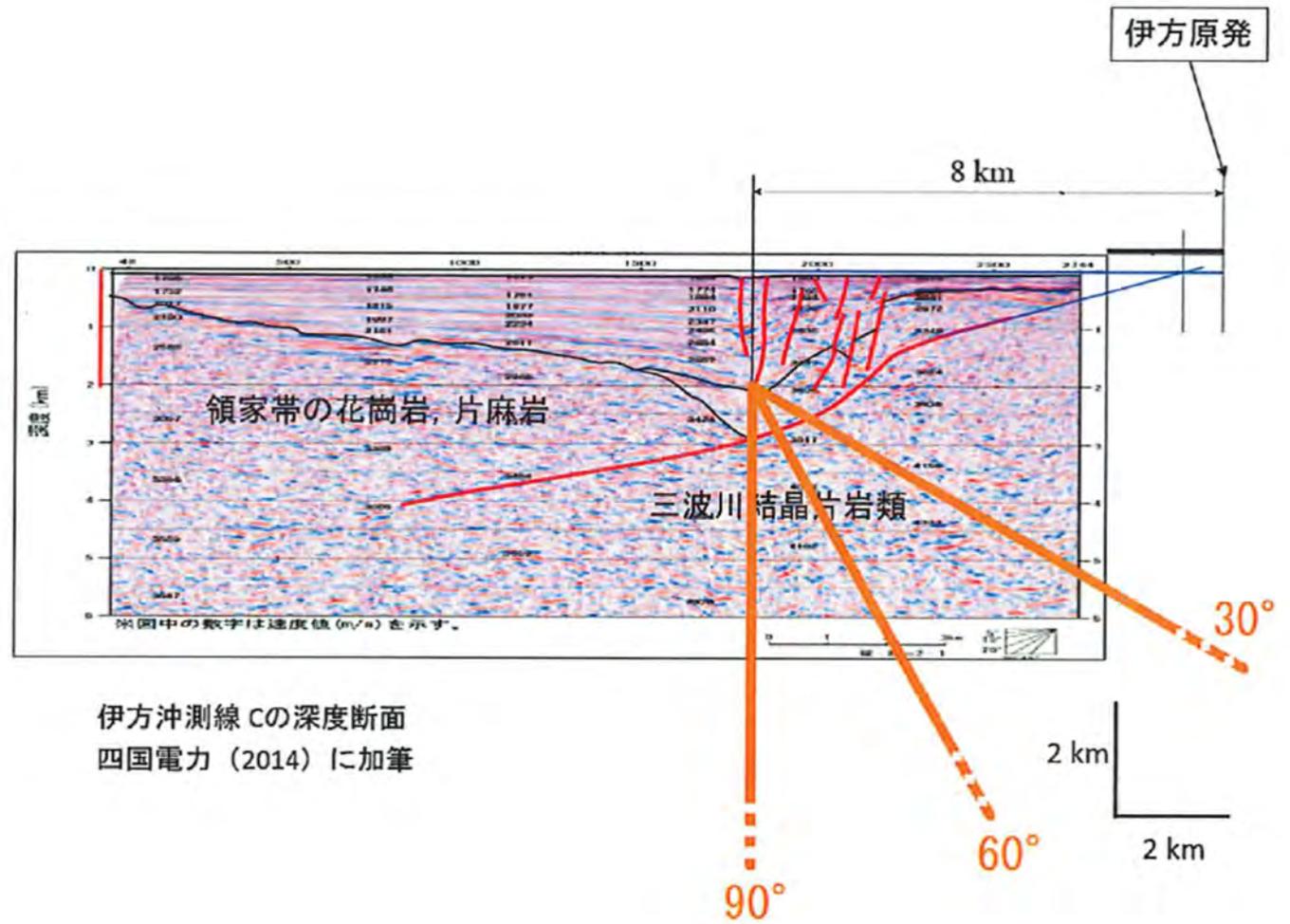


図 4 発電所と断層上端の水平距離を 8km としたケース

資料 2 6

(乙D 2 3 ・ 5 5 頁)

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。

凡 例 ● 深部ボーリング調査位置
○ 発震点 〇 観測点

0 50 100 200 300 400 500m



孔C
孔D
孔A(オフセットVSP探査)
孔R

深部ボーリング孔
(2.0km 受信間隔15m)



1号炉
1号機
2号炉
2号機
3号機

発震点 (発震間隔約40m)

地表測線 (道なり1.8km 受信間隔10m)



解析測線

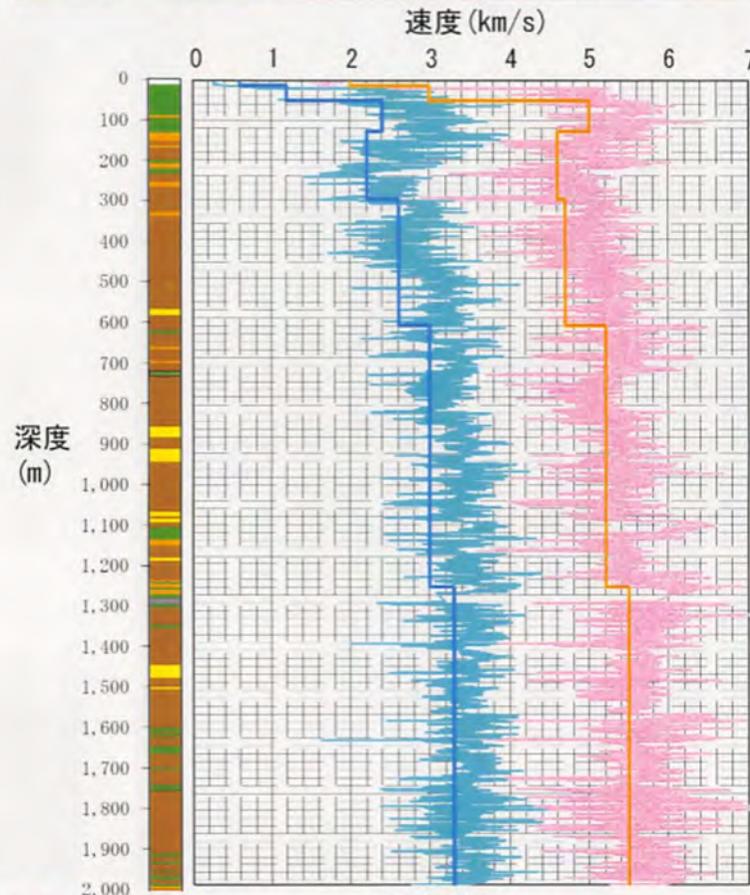
※測線は北へ緩く傾斜する地質構造とは斜交する。



資料 7 2

(乙D 2 3 ・ 4 3 頁)

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 ($V_s=2.2\sim 3.3\text{km/s}$) 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。

— Vp (サスペンション法)	□ 埋立土・未固結堆積物
— Vs (サスペンション法)	■ 泥質片岩
— Vp (ダウンホール法)	■ 塩基性片岩
— Vs (ダウンホール法)	■ 砂質片岩
	■ 珪質片岩
	■ 蛇紋岩類

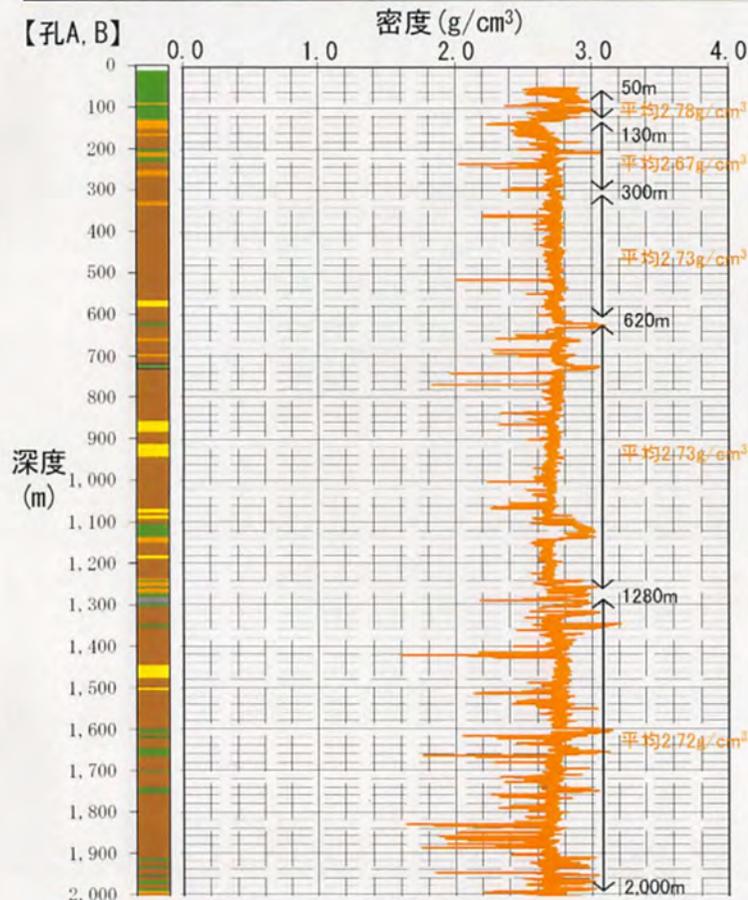


測定結果

(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)

資料 7 3
 (乙D 2 3 ・ 4 5 頁)

密度検層結果



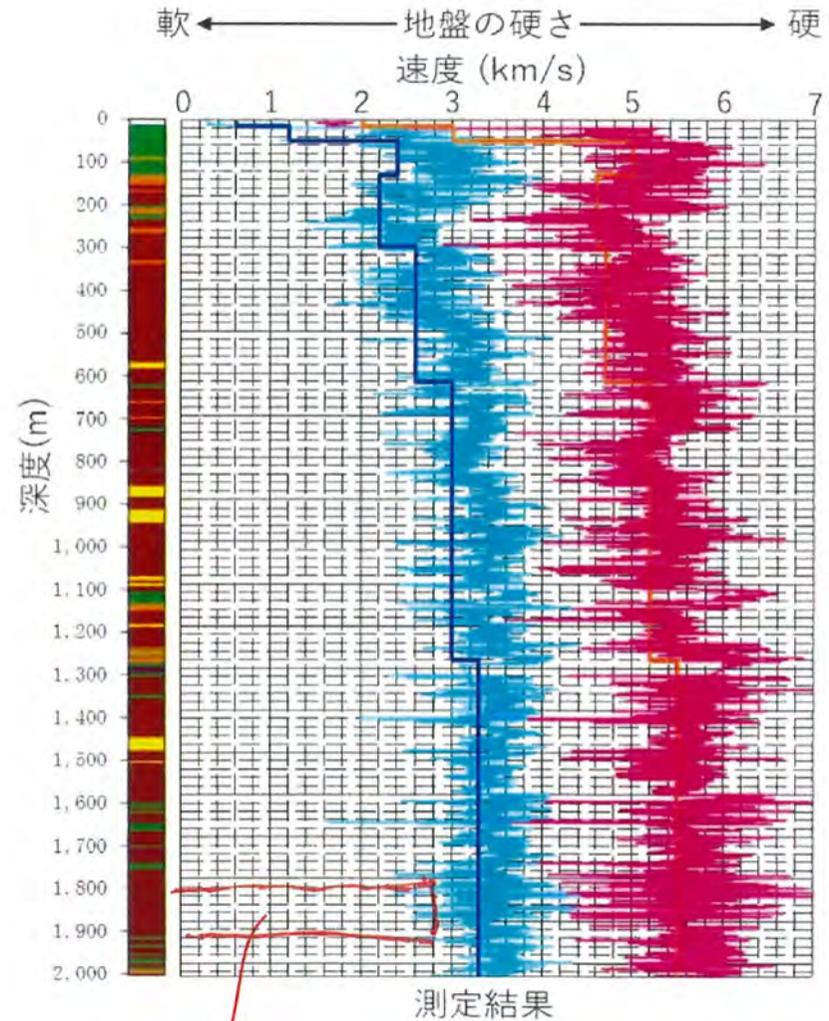
・密度は2.7~3.0g/cm³を示し、岩種に応じてやや変化するものの、深度方向への大局的な増減傾向は認められない。



(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/cm³)

資料 7 4

(乙D 3 3 5・芦田証人尋
問調書別紙 2)

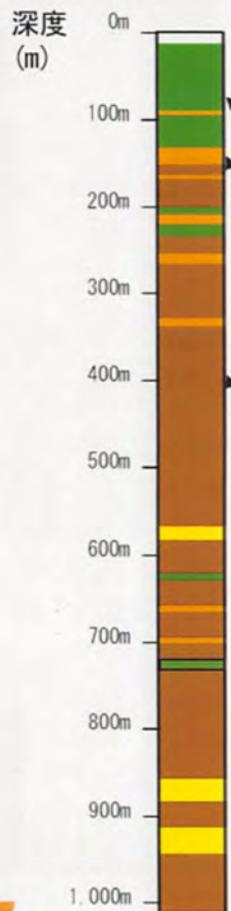


破砕帯 令和4年10月20日

資料 7 5

(乙D 2 3 ・ 2 7 頁)

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)



資料 7 6

(乙D 2 3 ・ 2 8 頁)

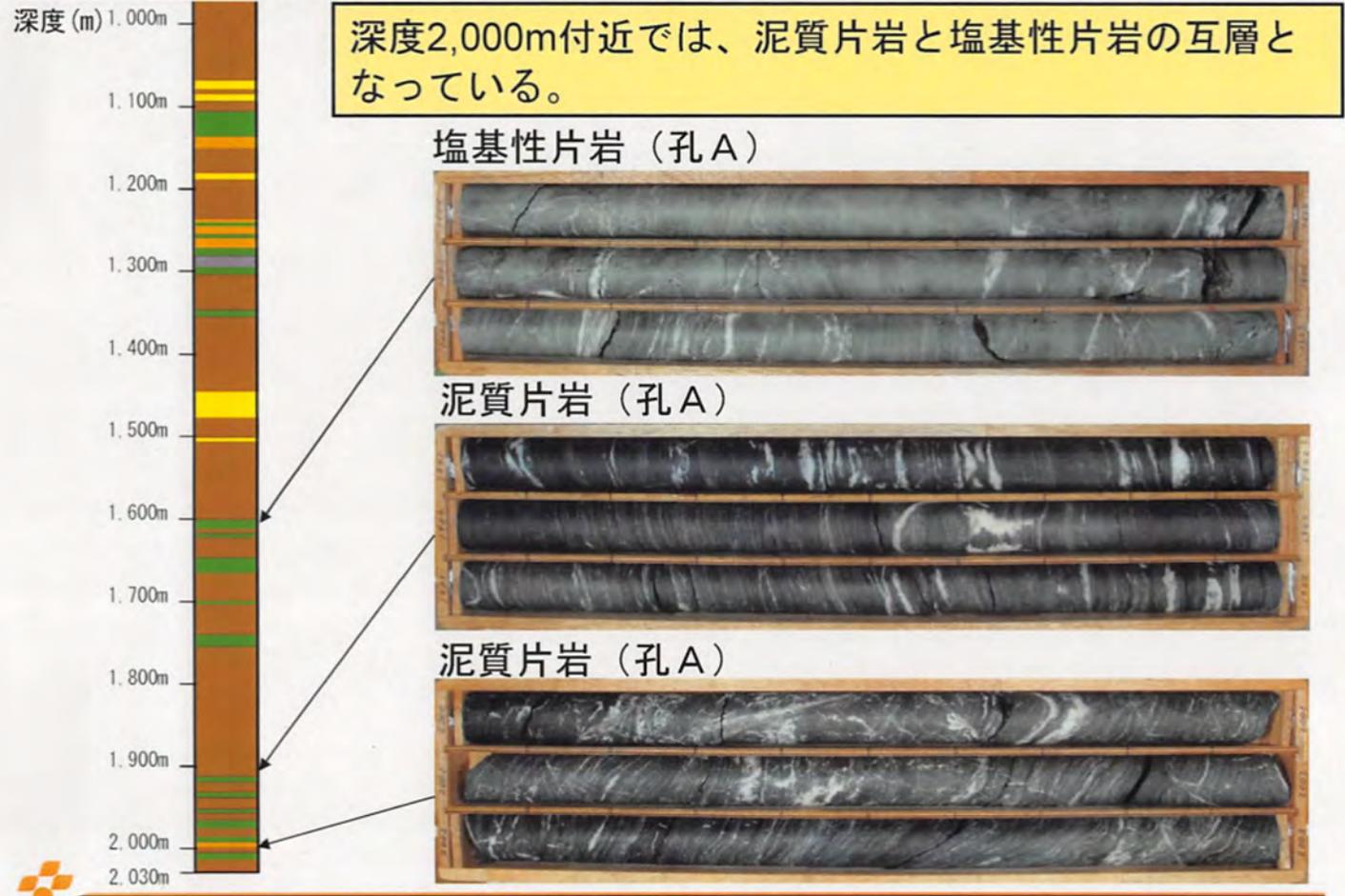
岩石コアの観察結果 (コア写真②)



資料 77

(乙D23・29頁)

岩石コアの観察結果 (コア写真③)



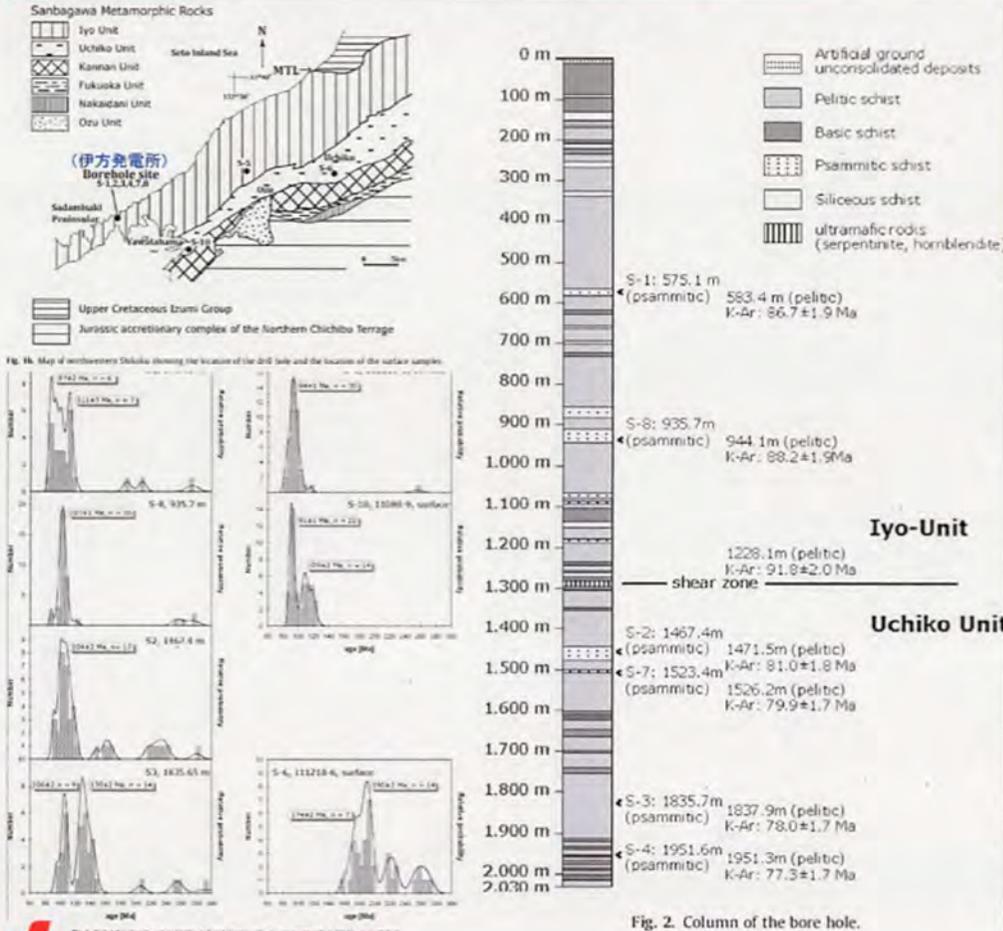
資料 7 8

(乙D68・68頁)

IV. 敷地近傍の地質・地質構造

伊方発電所周辺の深部地質構造(Knittel et al., 2014)

平成27年3月20日
審査会合資料再掲



○Knittel et al. (2014)は、伊方発電所における深部ボーリングコアおよび周辺域の地表サンプルを用いて年代測定を行い、深さ2,000mまで後期白亜紀の三波川変成岩類が分布することを示した。
○地下深部の地質構造に関する研究に取り組んでいる。

【Knittel et al.(2014)より抜粋】
「The Sadamisaki Peninsular and north-western Shikoku, which previously were considered to be part of the Jurassic to Early Cretaceous part of the Sanbagawa Belt (Sanbagawa Metamorphics sensu stricto, Aoki et al., 2011; Otoh et al., 2010; Itaya et al., 2011) are underlain by mafic schists of late Cretaceous age. A review of published age data suggests that most protoliths of the Sanbagawa Metamorphic Belt likewise have Late Cretaceous protolith ages. It is suggested to abandon the subdivision of the Sanbagawa Metamorphic Belt into Sanbagawa Metamorphic Rocks (Sanbagawa Belt sensu stricto) and the Shimanto Metamorphic Rocks as this would place the type locality of the Sanbagawa Metamorphic Belt into the Shimanto Metamorphic Belt. It is recognized that not all Sanbagawa metamorphics have the same protolith age (Tsutsumi et al., 2009; Kiminami, 2010; Tsutsumi et al., 2012) and thus, we suggest to refer to the various units as 'Jurassic Sanbagawa Belt' and 'Early' and 'Late Cretaceous Sanbagawa Belt', respectively. Likewise, the available age data suggest that the Sanbagawa metamorphics have been subjected to metamorphism during a period of time and not at a specific point in time.」



Knittel, U., S. Suzuki, N. Nishizaka, K. Kimura, W.-L. Tsai, H.-Y. Lu, Y. Ishikawa, Y. Ohno, M. Yanagida, Y.-H. Lee, 2014, U-Pb ages of detrital zircons from the Sanbagawa Belt in western Shikoku: Additional evidence for the prevalence of Late Cretaceous protoliths of the Sanbagawa Metamorphics, Journal of Asian Earth Sciences, 96, 148-161.

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。

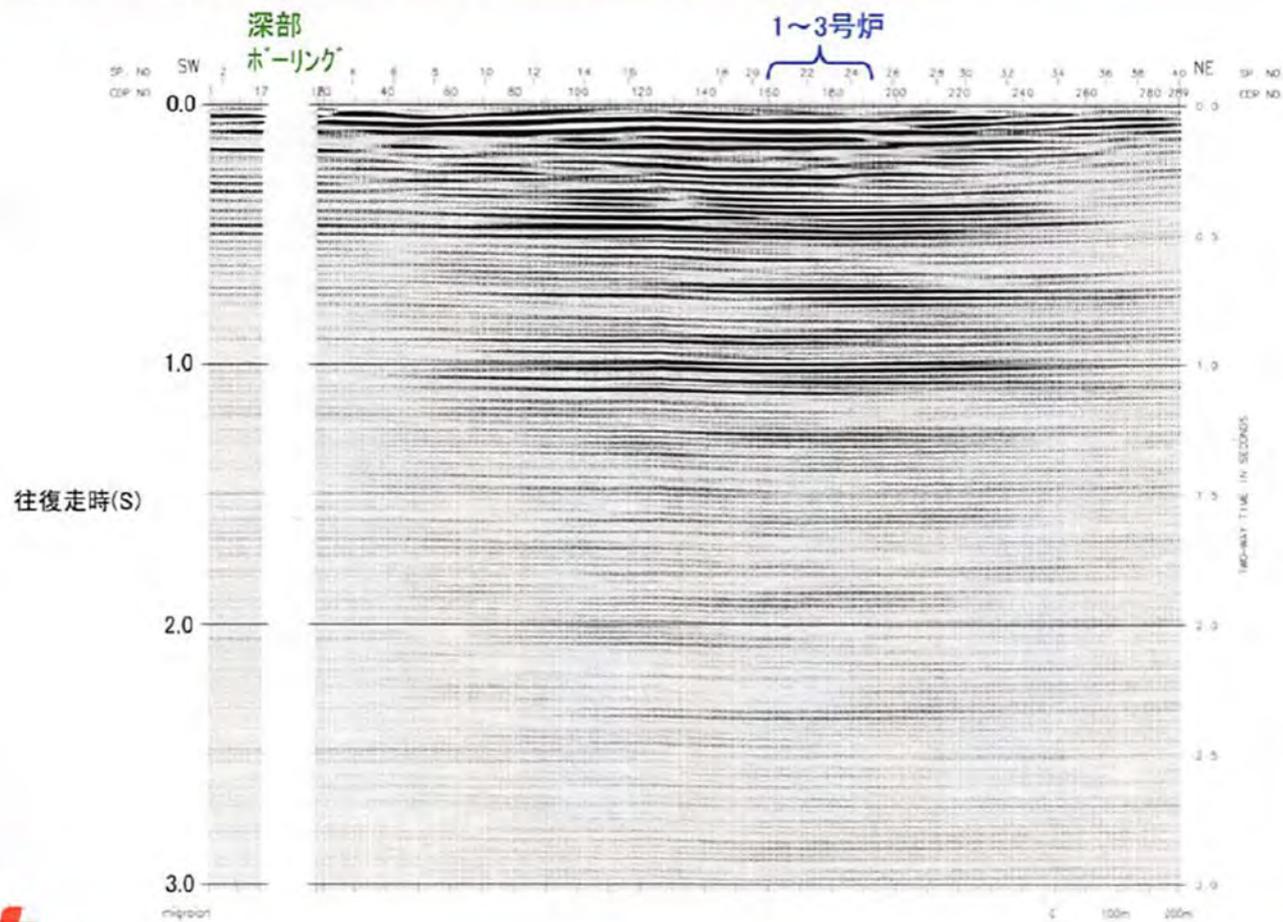
トモグラフィ解析

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。

資料 80

(甲 4 6 2 ・ 7 3 頁)

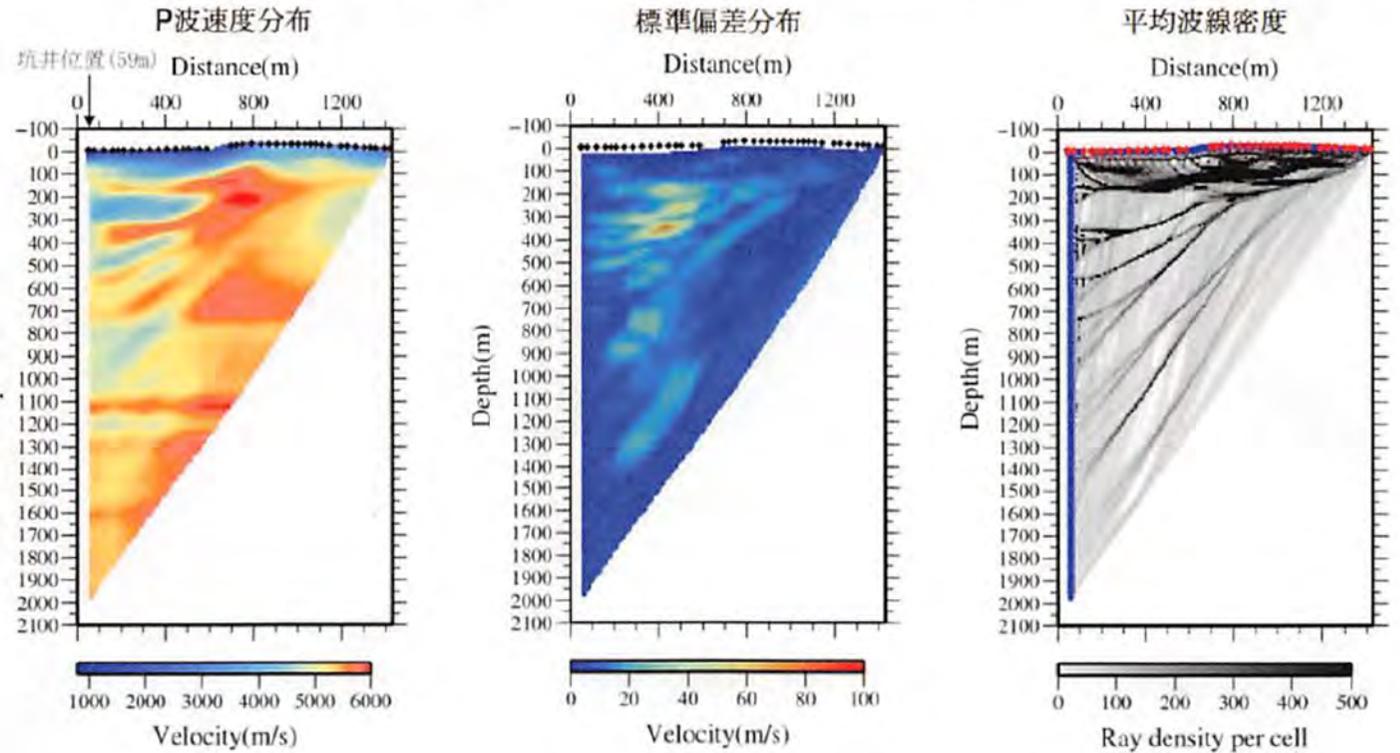
3. 6. 2 (6) マイグレーション時間断面図



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. 4 (3) PS検層 (サスペンション法) 結果【孔C】

