

オフセットVSP及び海上音波探査の 探査・解析手法について

令和4年9月22日
四国電力株式会社

1. 反射法地震探査の概要
2. 被告による陸域の探査
3. 被告による海域の探査

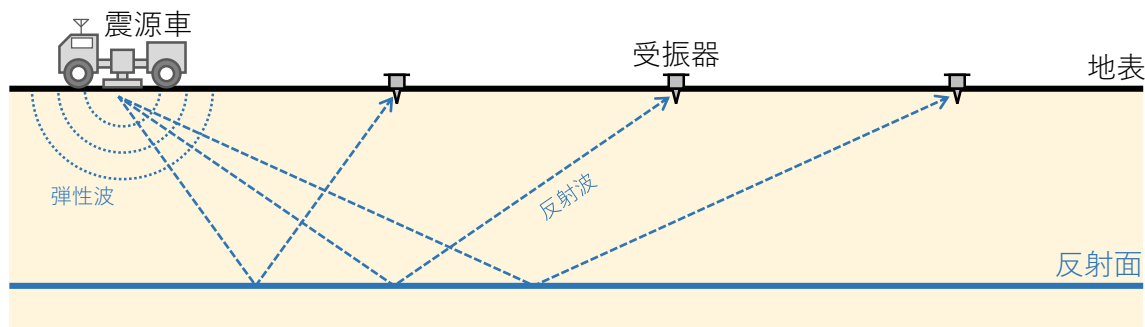
反射法地震探査の概要

■ 反射法地震探査とは

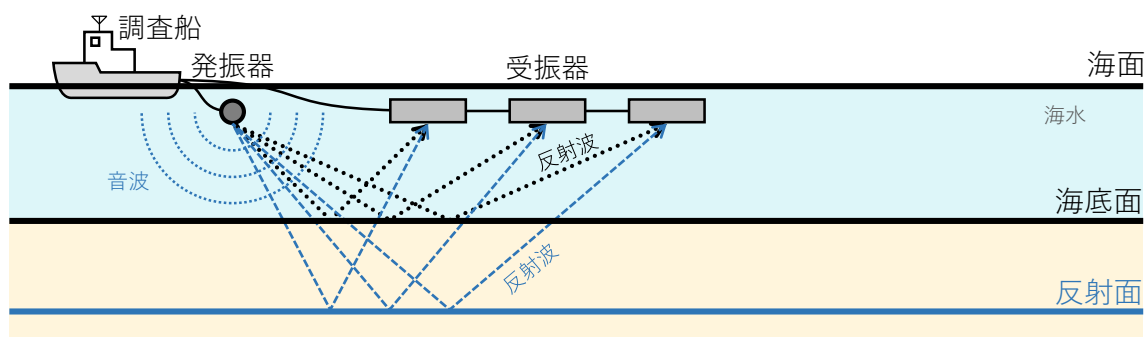
○被告が実施した個別の探査について具体的に説明する前に、被告が陸・海域の両方で実施している**反射法地震探査の探査・解析手法**について概説する。なお、被告が実施した「**オフセットVSP**」（乙322 64頁以下）は**反射法地震探査**，オフセットVSP探査，トモグラフィ解析を総称したものであり，「**海上音波探査**」は，海域で実施する反射法地震探査のことをいう。

○**反射法地震探査**とは，**地表**や**海面**付近で人工的に発生させた**弾性波**または**音波**が，速度と密度が変化する地下の境界面（**反射面**）で跳ね返り，再び地表へ戻ってきたもの（**反射波**）を**受振器**で観測し，その記録を処理・解析することで，**反射面**の分布から地下構造を把握する手法である。

陸域の場合

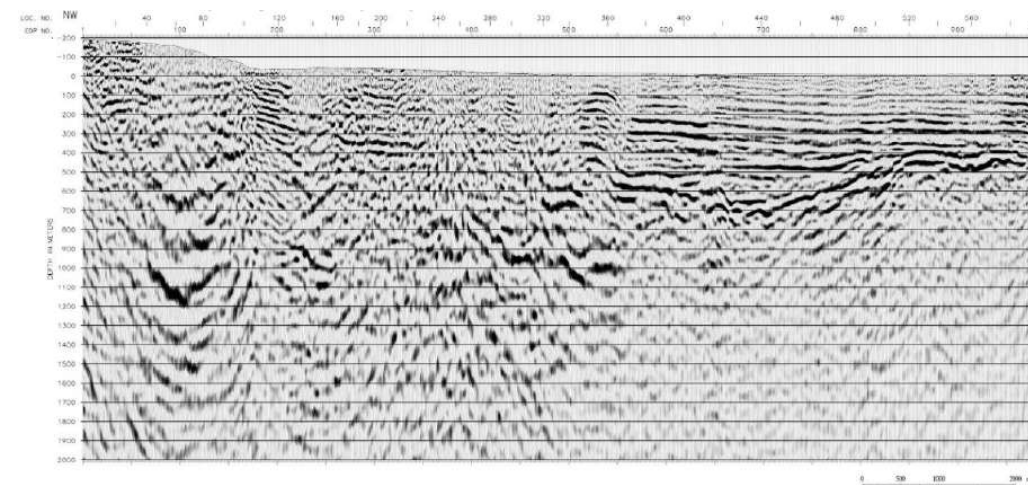


海域の場合



処理・解析

探査結果（断面図）の例



地震本部HPから抜粋

反射法地震探査の概要

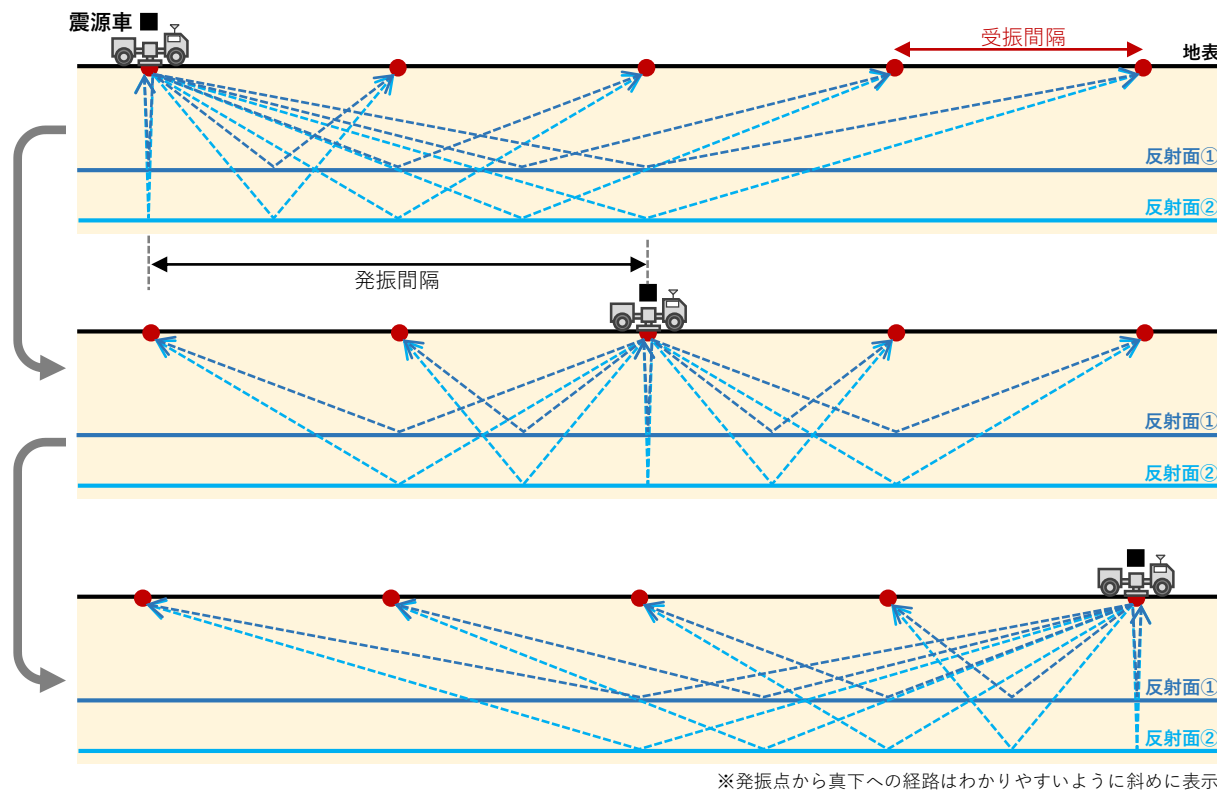
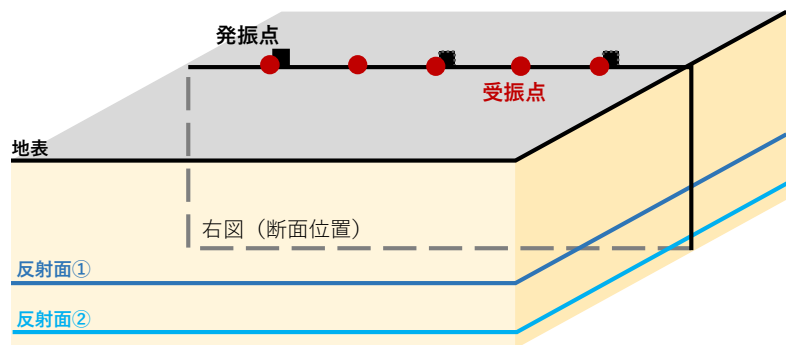
反射法地震探査の流れ

計画

調査地点の地形・地質条件や調査目的（調査対象の構造や深度等）を考慮し、適切な震源（音源）・受振器およびそれらの配置等の探査仕様を決める。

探査

計画に従って、探査を行う。



解析

取得した記録に対して解析（データ処理）を行い、ノイズの低減等によって反射面を読み取りやすくした断面図を出力する。

解釈

調査地点周辺の地形や地質およびそれらの形成史等を理解した上で、上記断面図を解釈する。

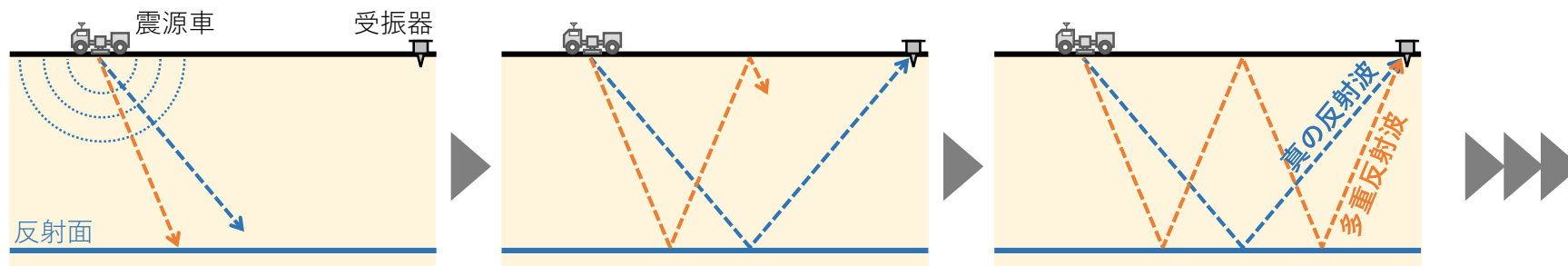
解析（データ処理）

■ 目的

- 取得した記録には、**真の反射波（シグナル）** 以外に**擬似信号（ノイズ）** が含まれる。
- ノイズには、**ランダム・ノイズ**（風雨や車両等の影響によるノイズ）や**多重反射波**（重複反射波）等が挙げられる。
- 解析（データ処理）の目的を大きく分けると、「**真の反射波（シグナル）を強調する**」，「**分解能を上げる**」，「**正しいイメージを作成する**」の3つに分類される。
- 3つの目的のために実施する主な解析は，「**①CMP※¹編集**」，「**②振幅補正**」，「**③デコンボリューション**」，「**④NMO※²補正**」，「**⑤CMP重合**」，「**⑥マイグレーション**」，「**⑦深度変換**」である。
- なお，これらの7つの解析は**代表的なもの**であり，実際にはさらに数多くの解析のプロセスがある。また，それぞれのプロセスでも多数の方法が提案されている。どのような解析をどのような順番で行い，どのようなプロセスや方法を適用するかは，**データの品質**や最終断面図の**使用目的**に応じて**解析技術者が適宜判断**する。

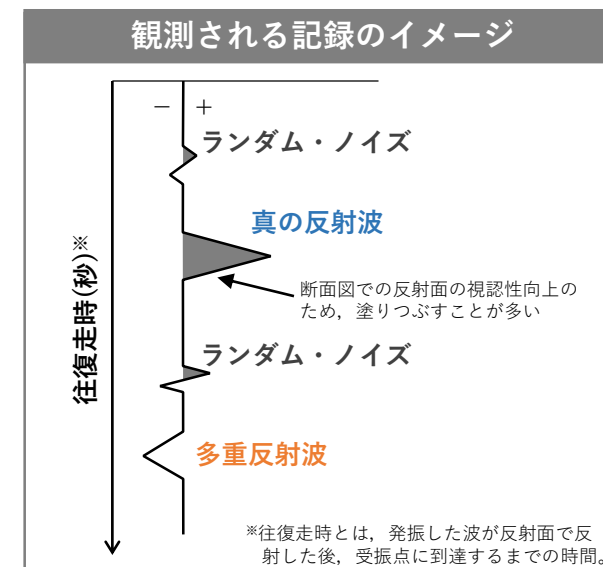
※¹ Common Mid-Pointの略。CDP（Common Depth Point）と呼ぶ場合もある。

※² Normal Move Outの略。



👉 多重反射波とは？

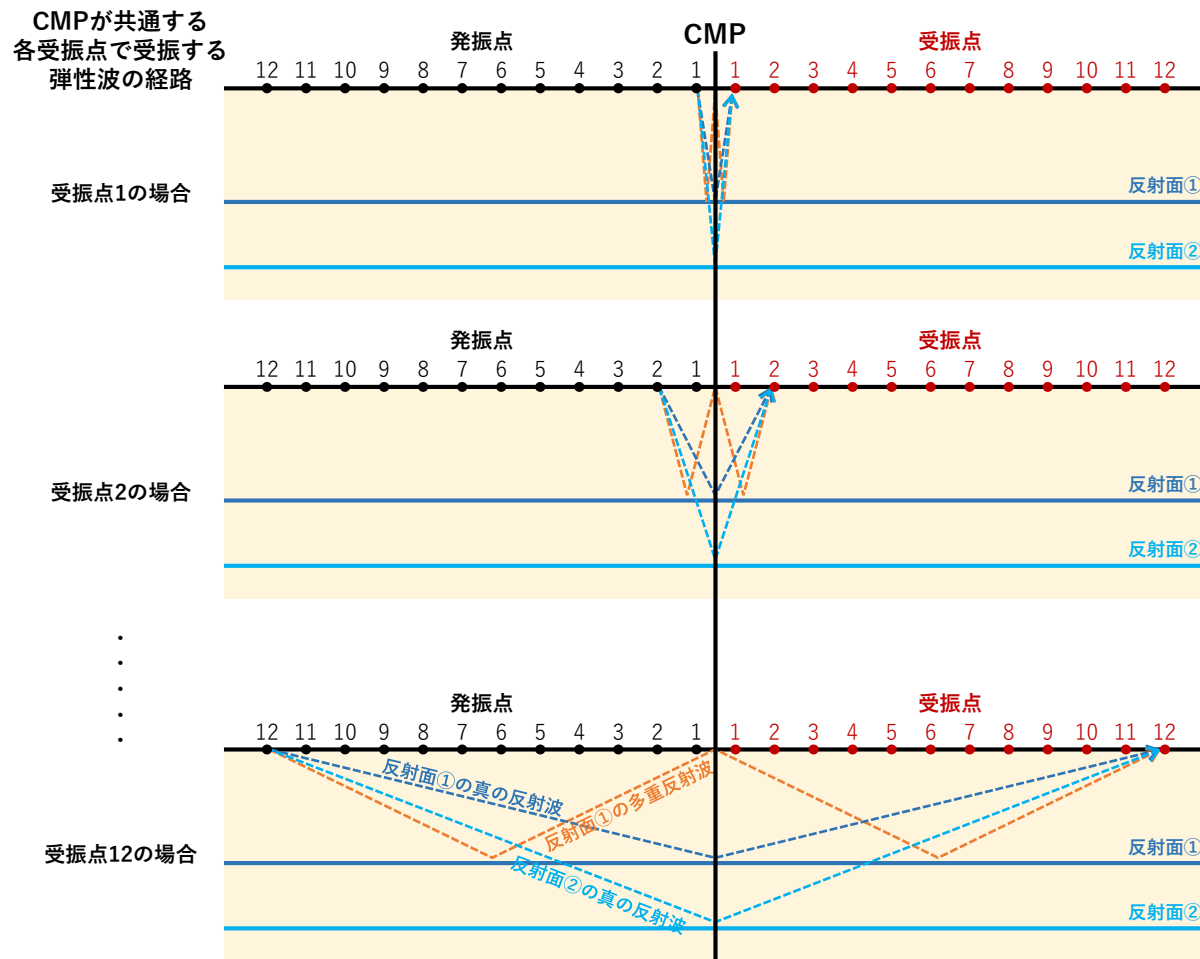
震源（音源）から発振された弾性波（音波）は，地層境界等で反射して受振器に到達する（**真の反射波**）。この時，再び地表（海面）等で反射してもう一度地層境界等で反射したものを**多重反射波**という。



解析（データ処理）

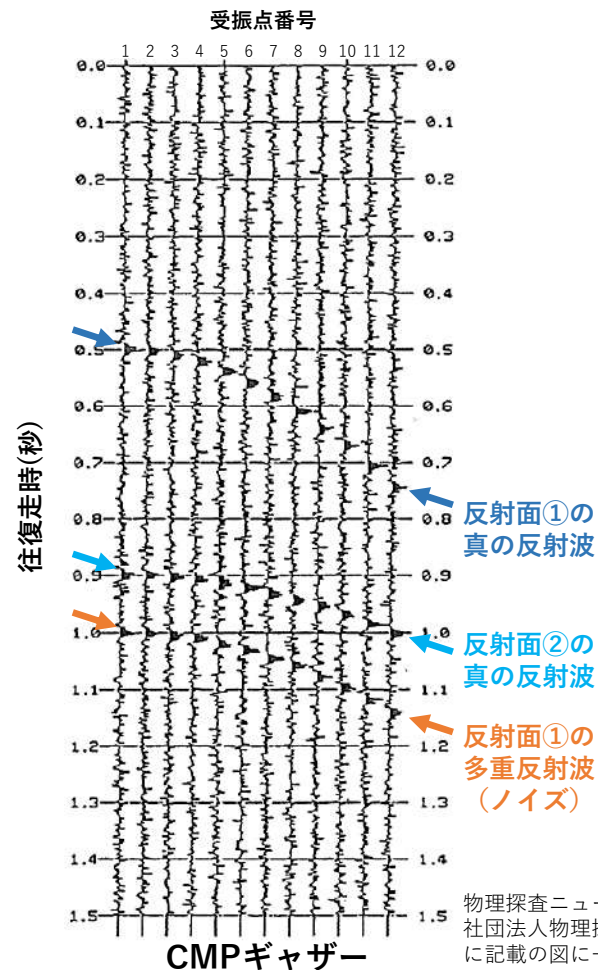
① CMP編集

○取得した記録のうち、発振点（震源または音源）と受振点（受振器）の中点の位置(CMP)が共通となる記録の集まり（CMPギャザー）の作成（CMP編集）を行う。



CMPが共通する主な反射波の経路の概念図

CMP編集

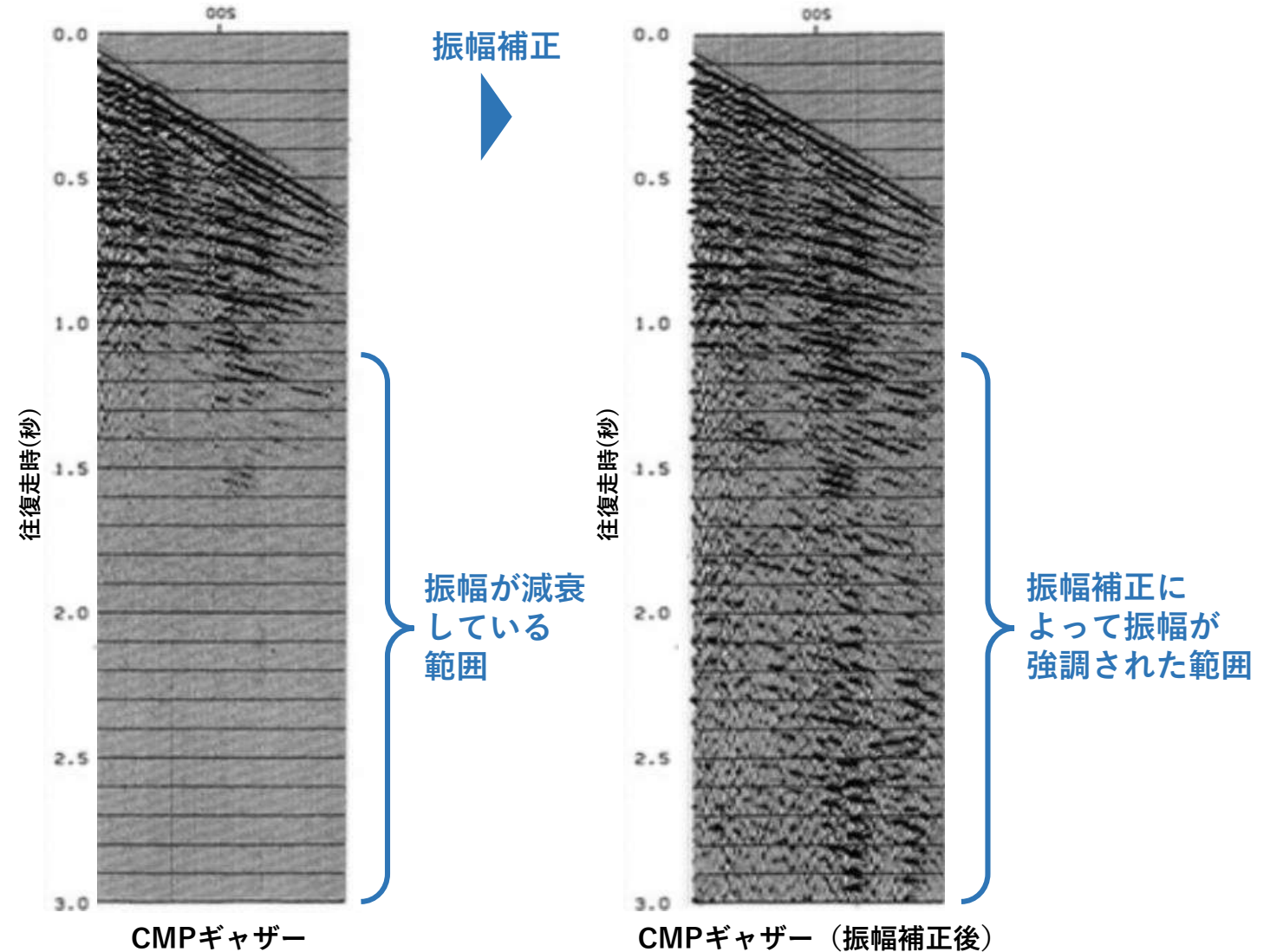


物理探査ニュース (No.32, P3 (公益
社団法人物理探査学会発行。以下同じ。))
に記載の図に一部加筆

解析（データ処理）

■② 振幅補正

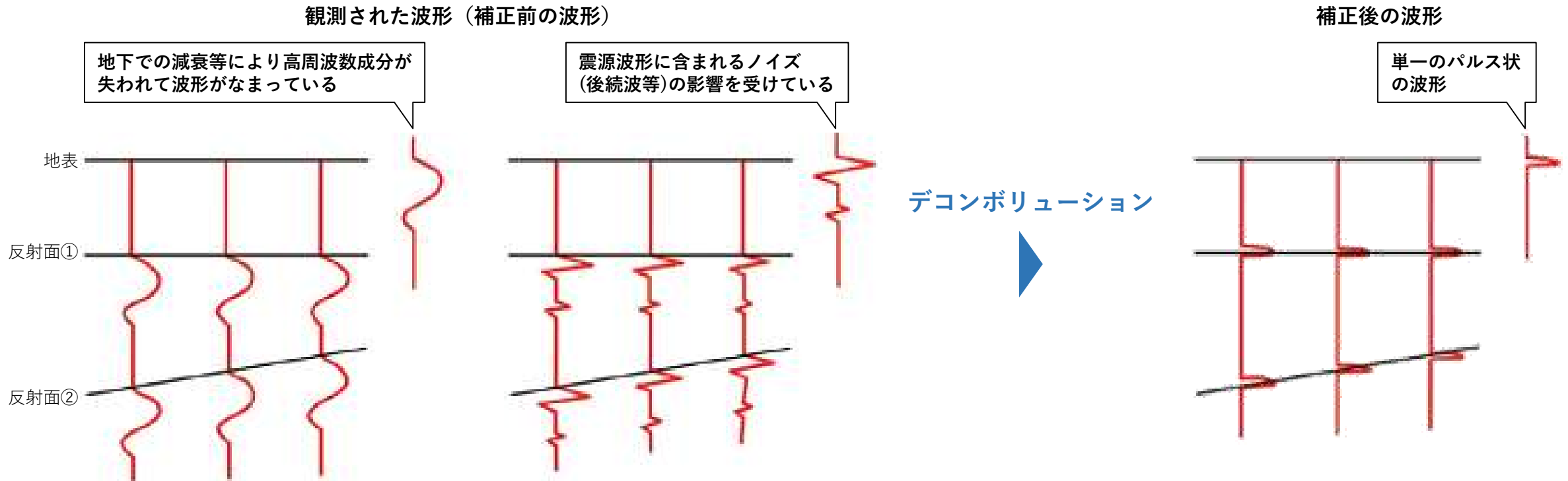
- 震源または音源から発振された弾性波または音波は、地下深部まで伝わるほど減衰するため、減衰前の振幅に回復する補正（**振幅補正**）を行う。
- 振幅補正によって、深部の反射面からの反射波等がより強調される。



解析（データ処理）

■③ デコンボリューション

- 観測された波は地下での減衰による変形や震源波形に含まれるノイズ等の影響を受けているため、こうした変形を取り除いて**単一のパルス状の波形**に変換する補正（デコンボリューション）を行う。
- デコンボリューションによって、**分解能の高い鮮明な記録**となる。



デコンボリューションの概念図

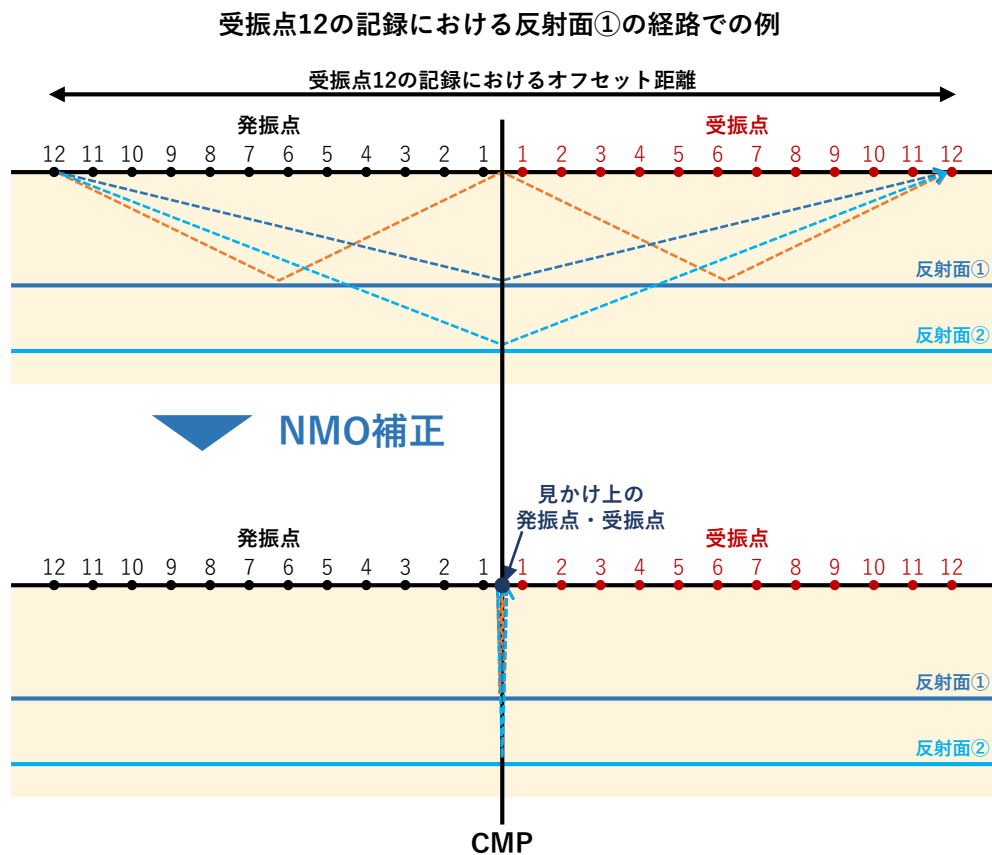
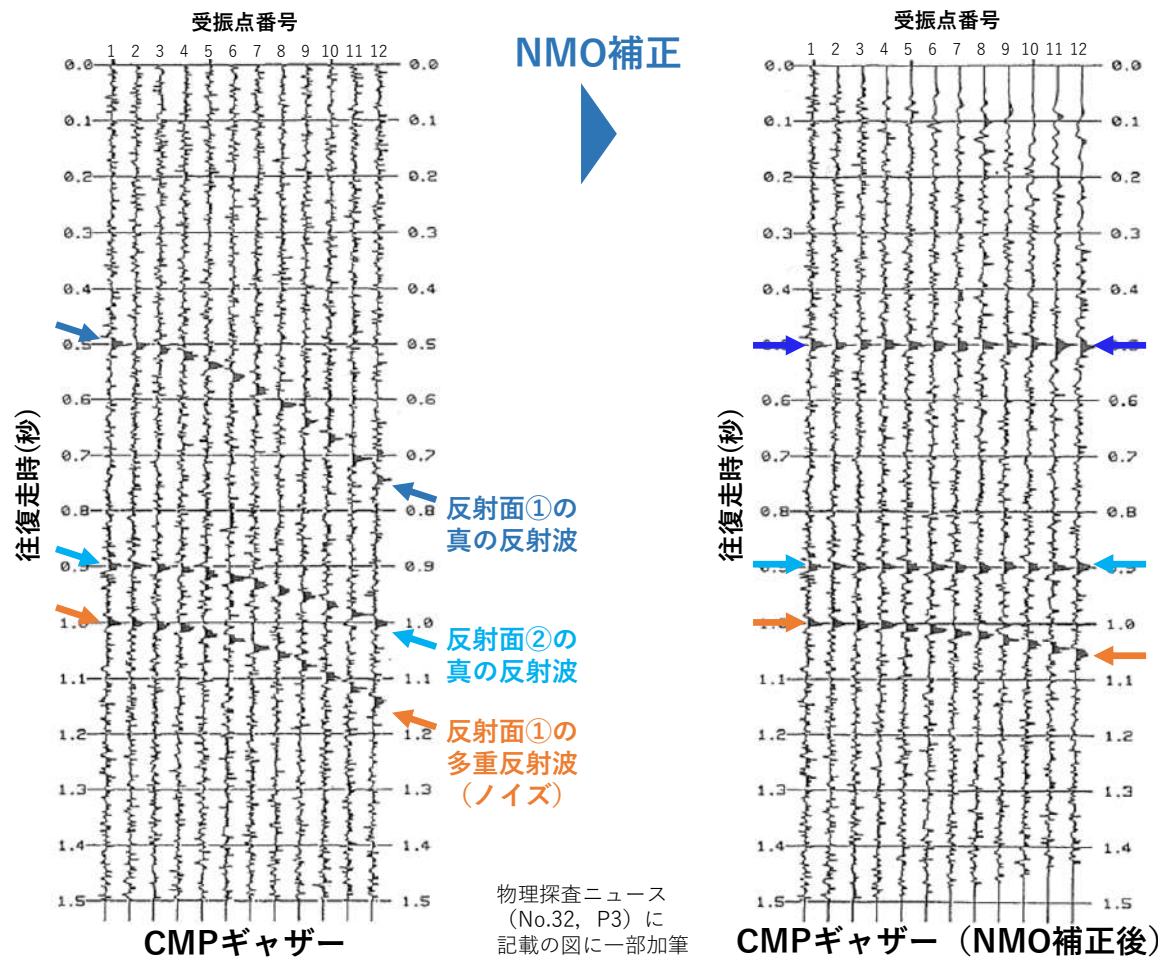
物理探査ニュース（No.40, P4）に一部加筆

解析（データ処理）

④ NMO補正

○CMPギャザーについて、オフセット距離（発振点と受振点間の距離）における走時を、オフセット距離がゼロの場合の走時に補正（**NMO補正**）する。これによって、CMPの位置に見かけ上の発振点と受振点をおいた場合の記録が得られる。

○弾性波は、硬い地盤ほど早く伝わる。このため、一般的に硬い岩盤が分布する地下深部ほど弾性波の速度は増加するが、**多重反射波**は比較的速度が小さい浅部の地層内を繰り返し反射する波であり、真の反射波と仮定した場合に想定される地下深部の経路よりも速度が小さい浅部を通過するため、**十分な補正が行われない**。



※発振点から真下への経路はわかりやすいように斜めに表示

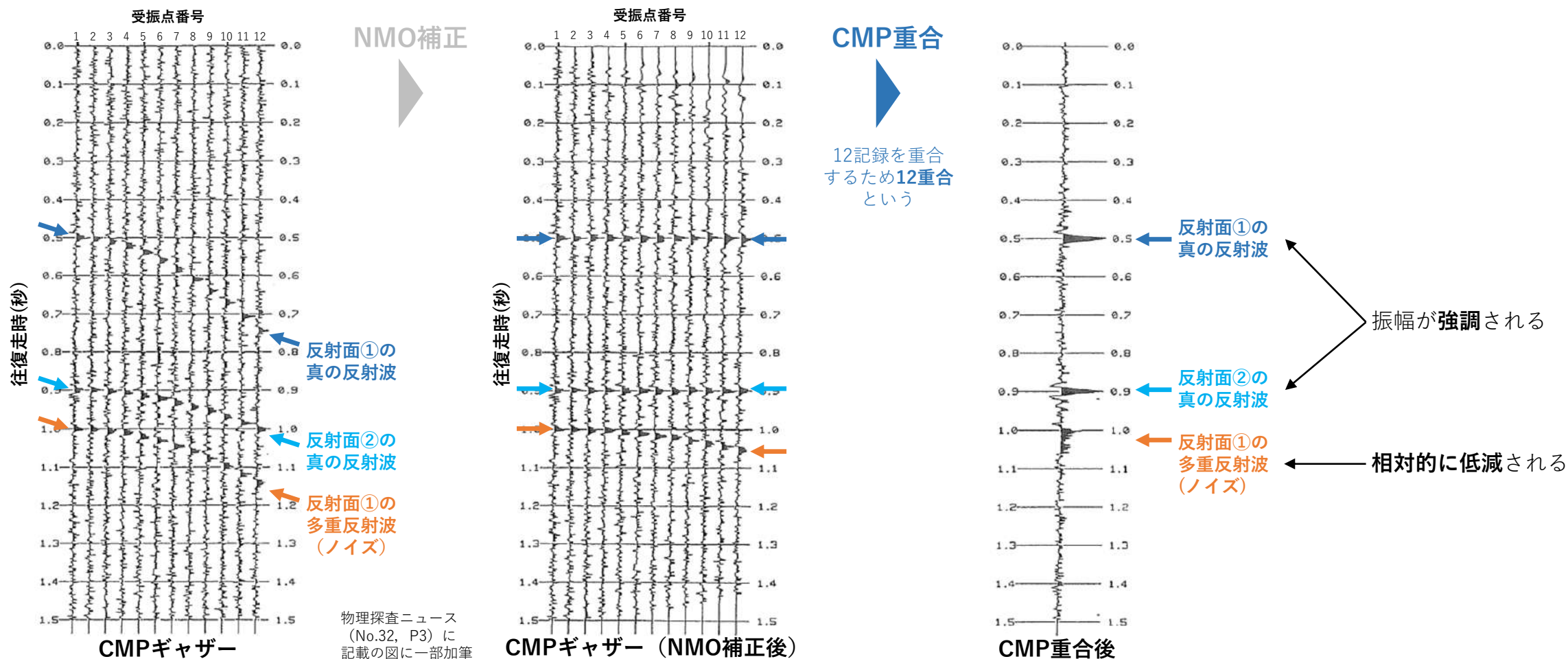
NMO補正の概念図

解析（データ処理）

⑤ CMP重合

○CMPが共通となる各受振点の記録（CMPギャザー）の足し合わせ（**CMP重合**）を行う。

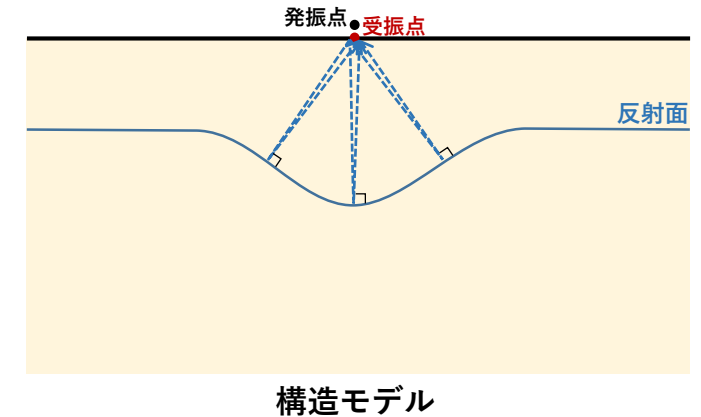
○この処理によって、同一走時に補正された**真の反射波（シグナル）**の振幅は波が重なることで**強調**される。一方、波が重ならない**擬似信号（ノイズ）**は**相対的に低減**される。



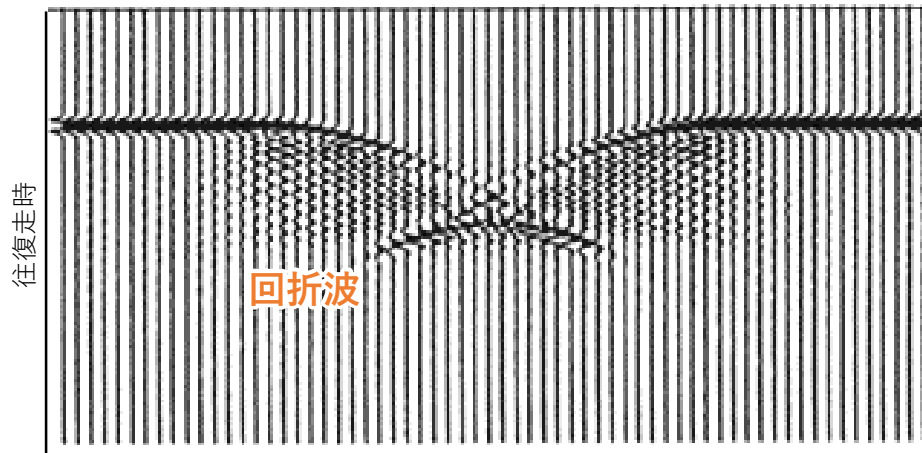
解析（データ処理）

⑥ マイグレーション

- 起伏や傾斜がある所では斜め方向からも反射することで**回折波**と呼ばれる**疑似信号（ノイズ）**が生じる。これを本来の正しい位置に戻す補正（**マイグレーション**）を行う。
- 前述の解析で得られたCMP重合結果を、CMP番号ごとに横方向に並べたものを**時間断面**という。
- マイグレーションによって、回折波が低減され、**真の地形及び地質構造等を反映した断面**が得られる。



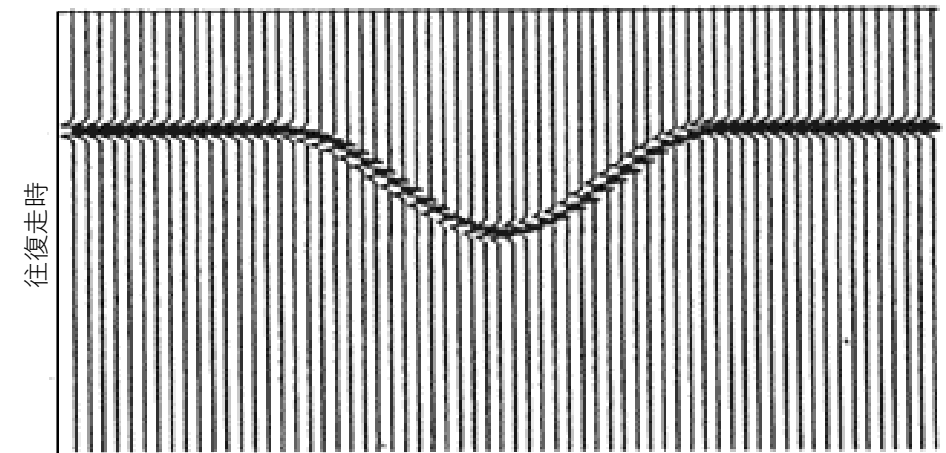
時間断面（マイグレーション前）
CMP番号



マイグレーション



時間断面（マイグレーション後）
CMP番号



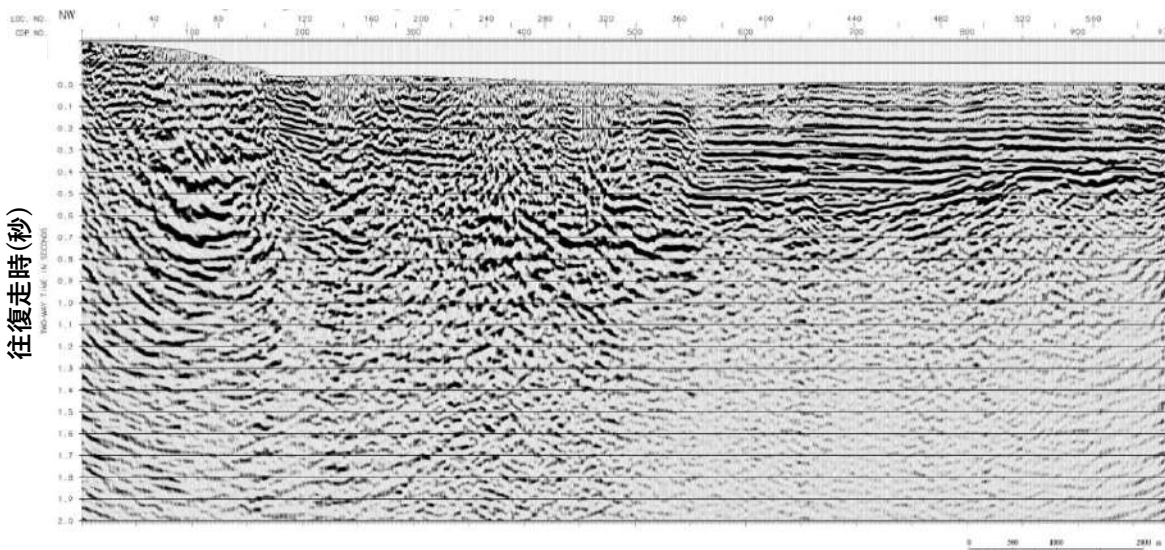
解析（データ処理）

⑦ 深度変換

- 時間断面図を各地層における弾性波（音波）の伝播速度を用いて**深度断面図**へ変換（**深度変換**）する。
- 時間－深度変換の関数を作成して連続的に変換を行う。なお、海底下浅部を対象とした海上音波探査では、速度を1,500m/s（水中の音波の伝播速度）と仮定して深度に変換することが多い。

時間断面

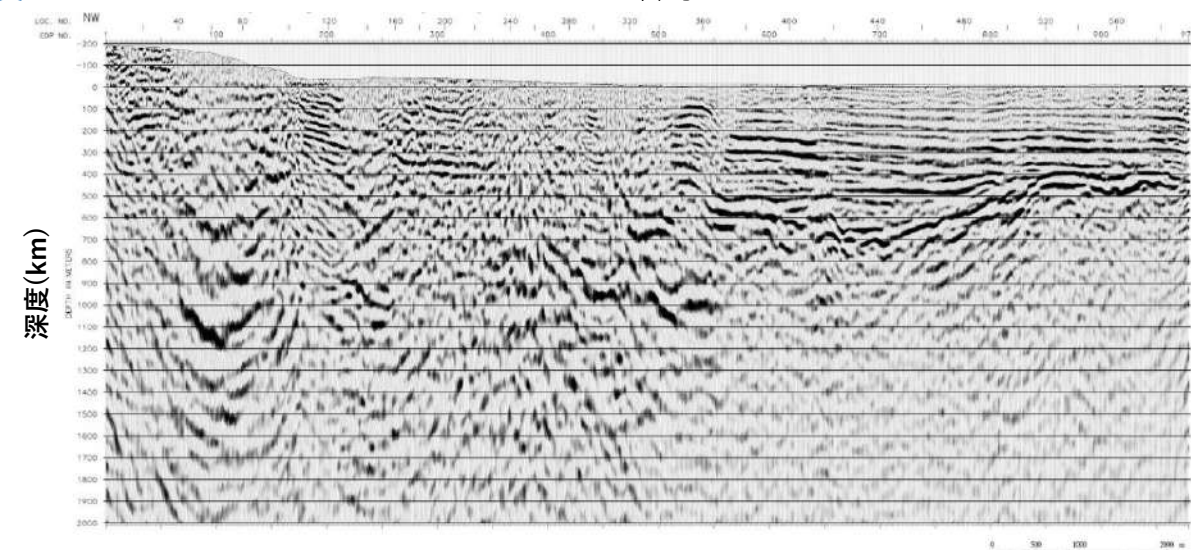
CMP番号



深度変換

深度断面

CMP番号



地震本部HPに一部加筆

解析（データ処理）

■ まとめ

計画

調査地点の地形・地質条件や調査目的（調査対象の構造や深度等）を考慮し、適切な震源（音源）・受振器およびそれらの配置等の探査仕様を決める。

探査

計画に従って、探査を行う。

解析

取得した記録に対し、ノイズの低減等のため、解析（データ処理）を行う。  反射面を読み取りやすくした断面図を出力するため（3頁）

○主な解析（データ処理）は、以下の7つである。

①CMP編集

②振幅補正

③デコンボリューション

④NMO補正

⑤CMP重合

⑥マイグレーション

⑦深度変換

○解析の目的は、大きく分けて3つに分類される。

A. 真の反射波（シグナル）を強調する

①CMP編集

②振幅補正

④NMO補正

⑤CMP重合

B. 分解能を上げる

③デコンボリューション

C. 正しいイメージを作成する

⑥マイグレーション

⑦深度変換

※CMP編集とNMO補正はCMP重合のための事前処理にあたる。

○なお、上記の解析は代表的なものであり、実際にはこれらの他にも数多くの解析のプロセスがある。また、それぞれのプロセスでも多数の方法が提案されている。どのような解析をどのような順番で行い、どのようなプロセスや方法を適用するかは、データの品質や最終断面図の使用目的に応じて解析技術者が適宜判断する。

解釈

調査地点周辺の地形や地質およびそれらの形成史等を理解した上で反射法地震探査結果を解釈する。

1. 反射法地震探査の概要
- 2. 被告による陸域の探査**
3. 被告による海域の探査

被告による陸域の探査

■敷地周辺の地質・地質構造

○伊方発電所付近は、非常に堅硬かつ緻密な結晶片岩からなる三波川変成岩類が広がりをもって分布している。

○したがって、敷地の地質・地質構造は一様であることを踏まえ、後述する反射法地震探査等を計画・実施した。

敷地の地盤

争点整理表 第3の1(1)

○伊方発電所付近には、非常に堅硬かつ緻密な結晶片岩からなる三波川変成岩類が広がりをもって分布しており、敷地近傍の地質・地質構造は長期にわたって非常に安定している。

○また、炉心付近の地盤はS波速度が2.6km/sに達している。

これは、S波速度3km/s以上が目安とされ、それよりも深部では地盤構造が地震動に大きく影響しないとされる「地震基盤」にも相当する非常に堅硬な岩盤であり、敷地の地盤構造が地震動の顕著な増幅が発生するとは考え難いものであることを意味している。



S波速度：地盤及び岩盤中では、縦波(波の進行方向と振動方向が同じ波)及び横波(波の進行方向と振動方向が直角をなす波)との2種類の弾性波が伝わる。地震学では、縦波をP波、横波をS波と呼び、P波、S波の伝播する速度をそれぞれP波速度、S波速度と呼ぶ。一般に、S波速度が概ね700m/s以上であれば硬い岩盤であるとされている。

はじめに

1 地震

1-1 地震動の基礎知識

地震と地震動
周期
応答スペクトル
地域特性

1-2 地震動評価の骨子

(1) 調査で地域特性を知る

ア 震源特性

- ・活断層調査
- ・音源の種類
- ・震源断層の把握
- ・地質境界としての中央構造線
- ・振り返り

イ 伝播特性

- ・分析・評価
- ・振り返り

ウ 増幅特性

- ・地下構造調査の目的
- ・敷地の地盤・速度構造
- ・振り返り

エ 小括

(2) 不確かさを考慮した評価

ア 評価手法

- イ 不確かさの考慮
- ウ 基本震源モデル
- エ 不確かさ考慮モデル
- オ Ss策定結果

1-3 地震のまとめ

2 火山

2-1 火山の基礎知識

2-2 火山評価の骨子

- (1) 立地評価
- (2) 影響評価

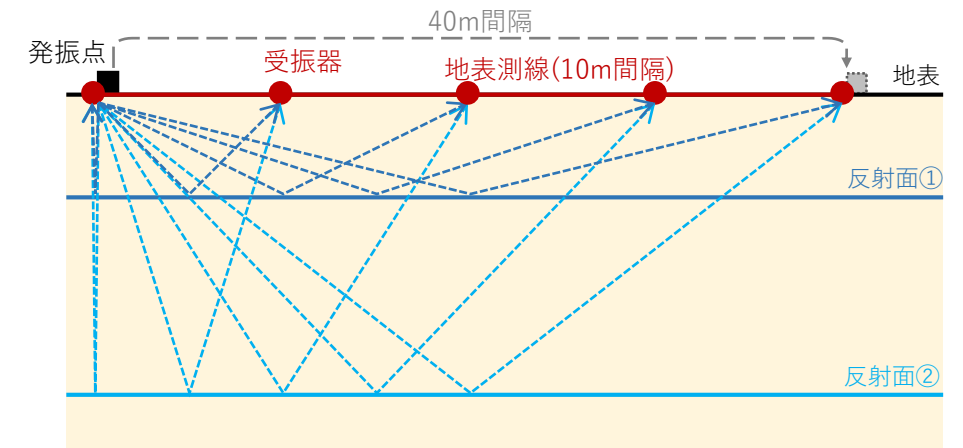
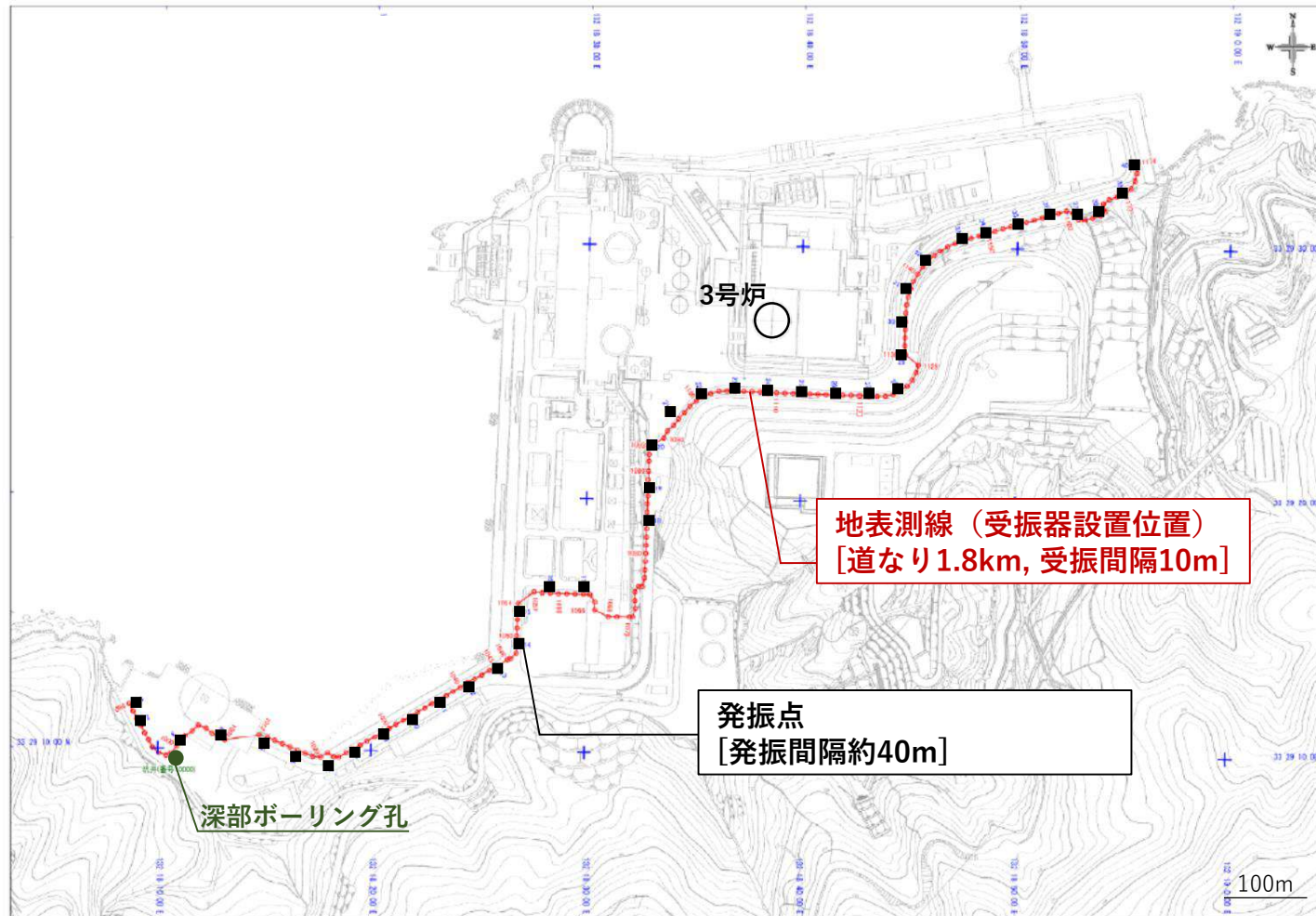
2-3 火山のまとめ

おわりに

被告による陸域の探査

①反射法地震探査の位置

○伊方発電所敷地（陸域）における**反射法地震探査**の調査位置を示す。この探査でも前述の**7つの主な解析**を実施している。

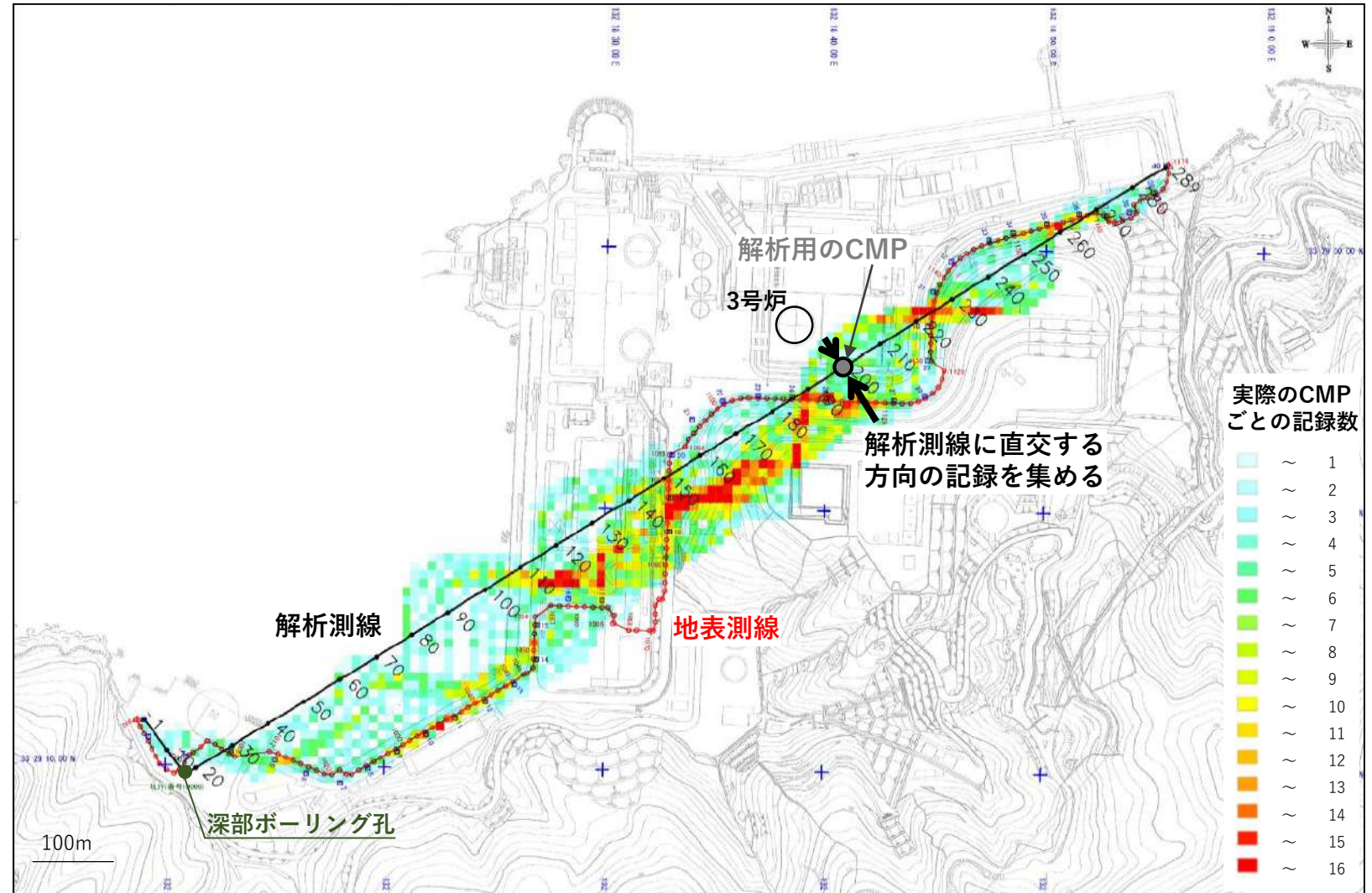


※地表測線(道なり1.8km)上に設置した受振器はデータ取得のためにケーブルでつながっている
※発振点から真下への経路はわかりやすいように斜めに表示

反射法地震探査の概念図

補足 ■ 反射法地震探査の解析の流れ

- 一般に、陸上の反射法地震探査では測線が道路の配置等に制約されて発振点、受振点が直線状に設置できないため、解析用の測線を設定して解析を行う必要がある。
- 右図は反射法地震探査で得られた実際のCMP分布図である。解析測線は深部ボーリング地点を起点に、このCMPの分布や3号炉の位置等を踏まえた上で設定した。
- 解析にあたっては、解析測線に沿った**解析用のCMP**を設定し、**解析測線に直交する方向**に実際のCMPが分布する記録を集めたCMPギャザーを作成した上で、解析を行っている。

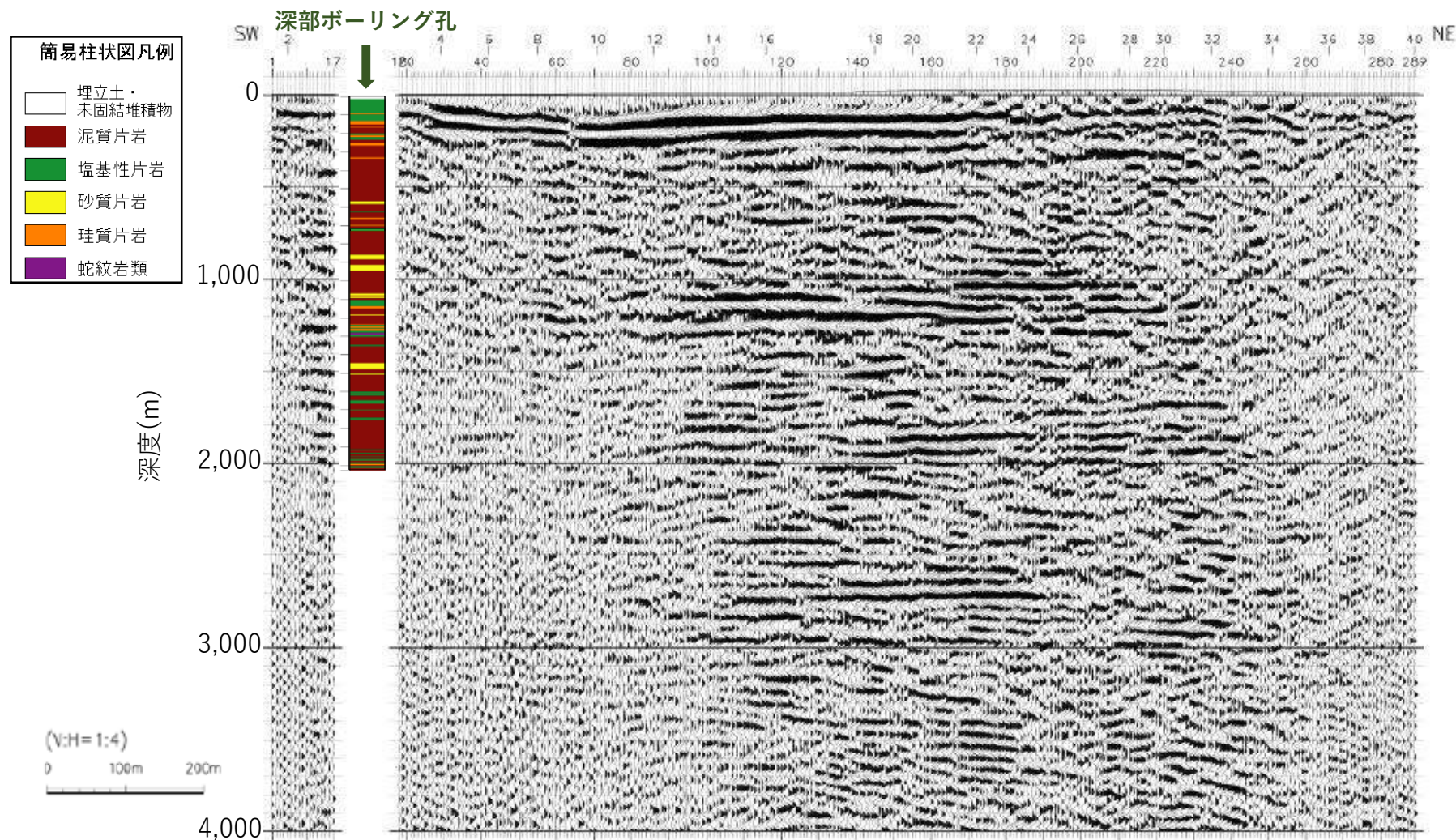


CMP分布図

被告による陸域の探査

① 反射法地震探査の結果

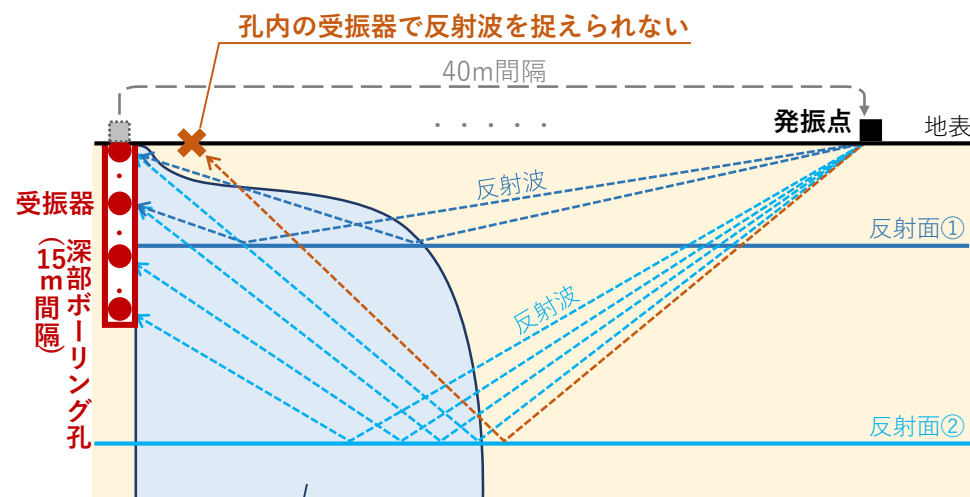
○伊方発電所敷地で実施した反射法地震探査結果を以下に示す。



被告による陸域の探査

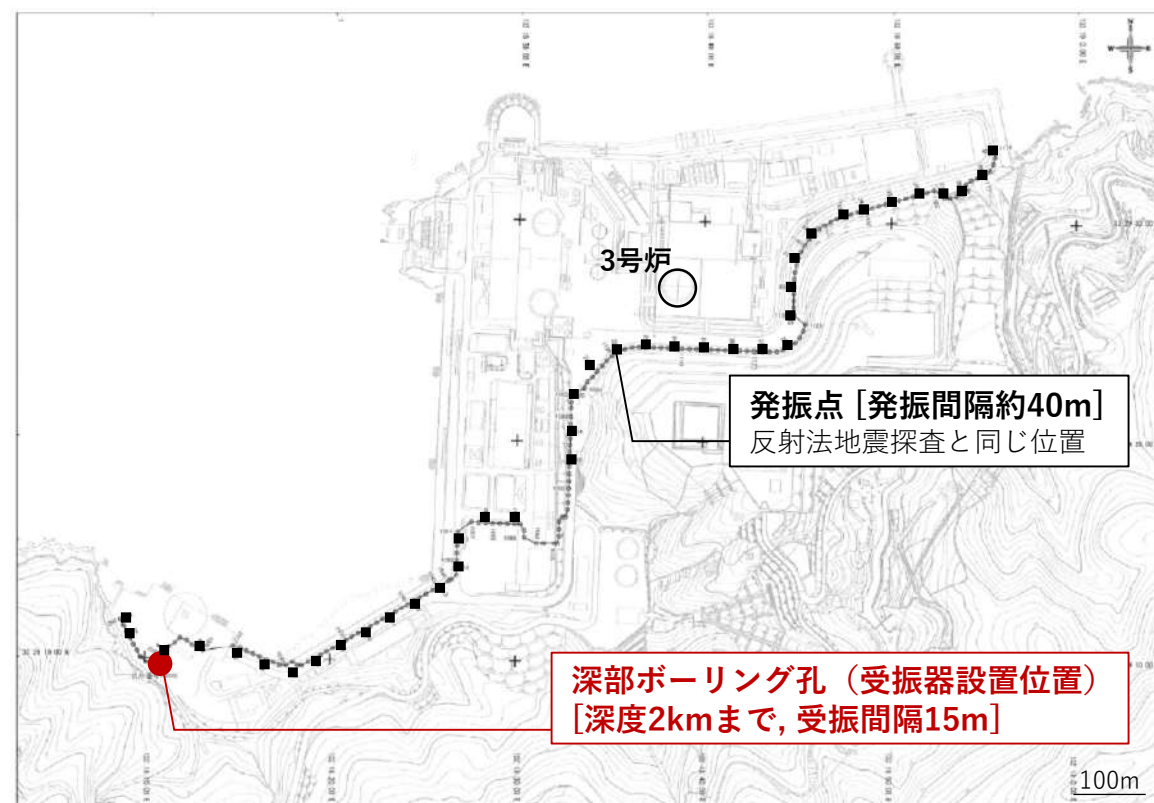
②オフセットVSP探査

- 伊方発電所敷地（陸域）では、**反射法地震探査**に加え、**オフセットVSP**(Vertical Seismic Profiling)探査および**トモグラフィ解析**を実施した。
- オフセットVSP探査**は、地表で発振した弾性波を孔内の受振器で観測する探査手法であり、反射法地震探査と同様の記録（反射面の分布）を得ることができる。
- なお、受振器を反射面の近傍に設置できる（つまり、波が伝わる経路が短くなる）ことなどから、一般に、反射法地震探査と比較して**ノイズが小さく分解能の高い記録**を得ることができる。



反射断面を作成できる範囲
(≒ 反射波を捉えることができる範囲)

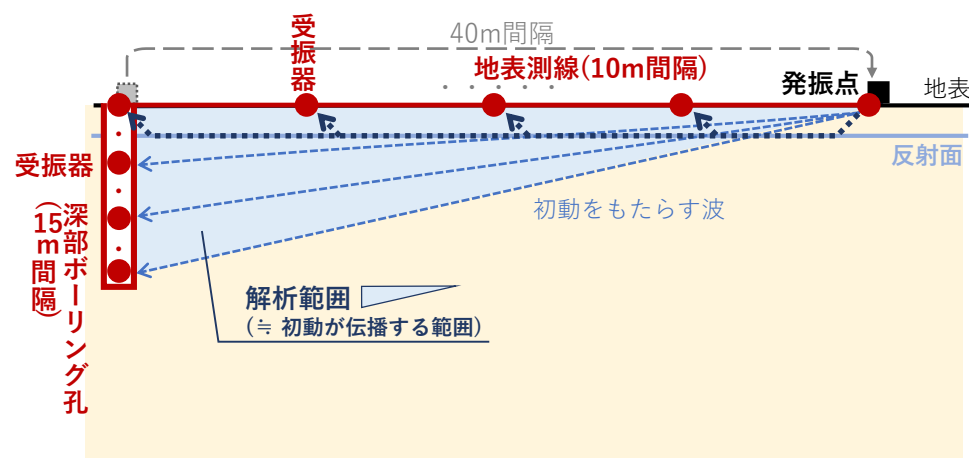
オフセットVSP探査の概念図



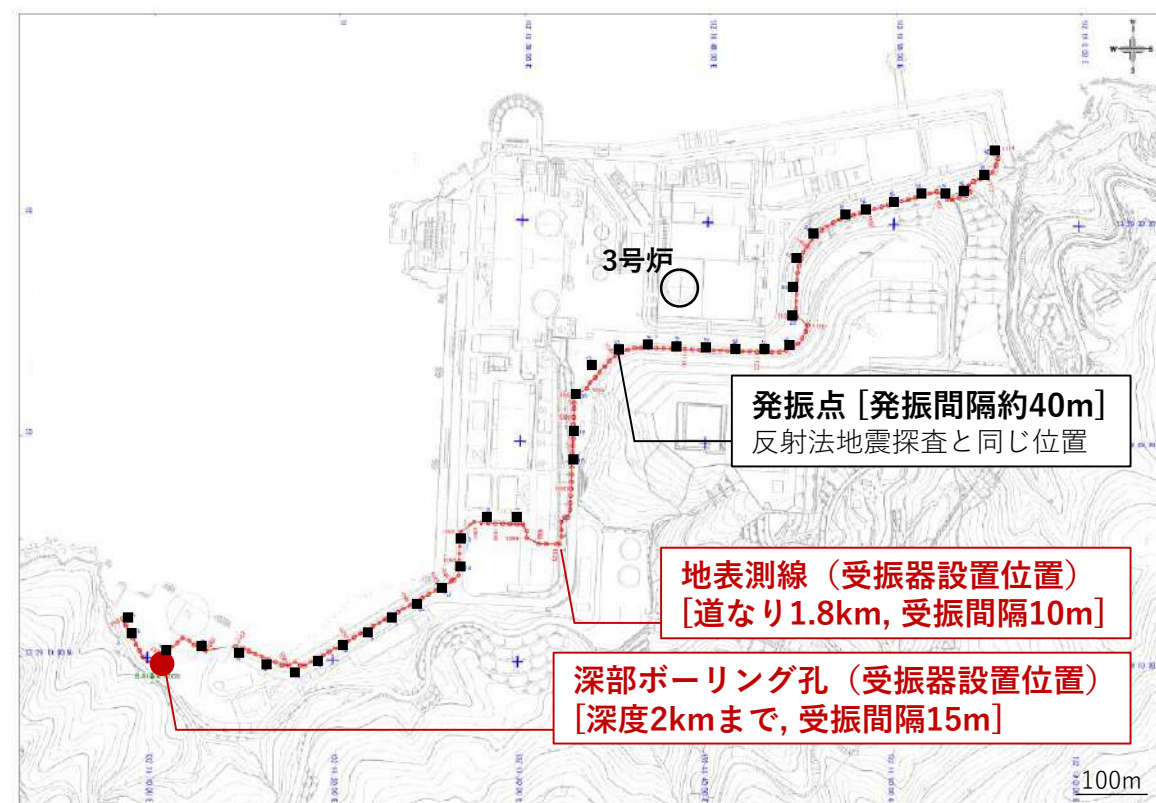
被告による陸域の探査

③ トモグラフィ解析

- **トモグラフィ解析**は、弾性波が発振点から地中を伝播して受振器へ最初に到達するまでの時間（**初動走時**）を基に速度構造を把握する解析手法である。
- 解析にあたっては、深部ボーリング孔内に設置した受振器で受振した**初動**に加え、地表で発振して地表で受振した**初動**も用いた。

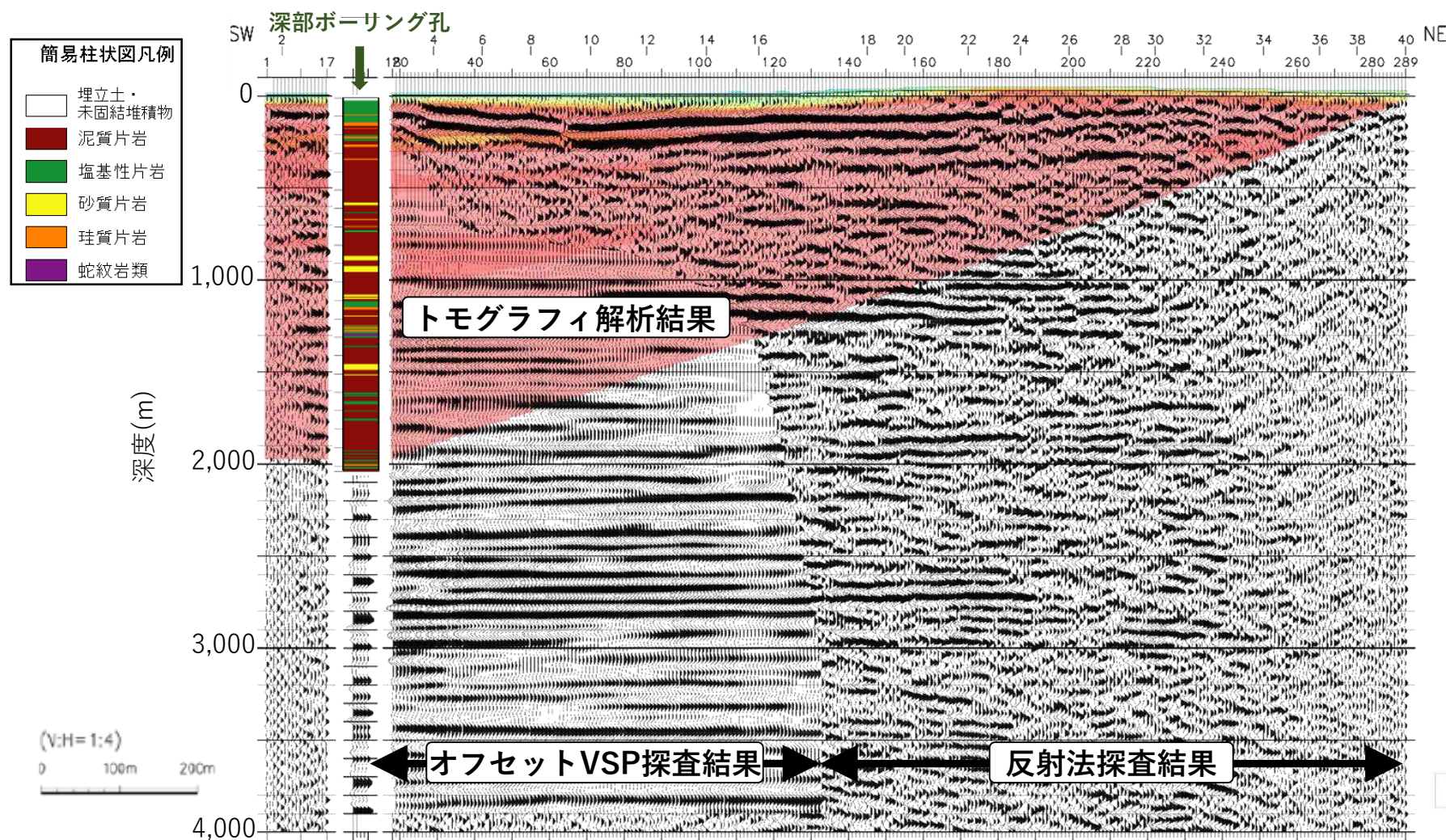


トモグラフィ解析に用いる探査記録の概念図



被告による陸域の探査

■ 探査結果 (① + ② + ③)



○反射法地震探査結果に加え、オフセットVSP探査結果およびトモグラフィ解析結果を示す。

○反射法地震探査、VPS探査やトモグラフィ解析を実施し、それぞれの解析結果を総合することにより、敷地の地下構造を精度良く把握できる。

1. 反射法地震探査の概要
2. 被告による陸域の探査
- 3. 被告による海域の探査**

被告による海域の探査

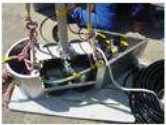
伊予灘における活断層調査

- 伊予灘は、内海で静穏な堆積環境にあり、比較的水平に地層が堆積するため、水平方向への地質・地質構造の変化が少ない。
- 海上音波探査（海域での反射法地震探査）は、音源の周波数によって分解能と探査深度が大きく異なるため、活断層調査に適した音源として海底下100m程度までを高い分解能で探査できるブーマーを主に用いて後述する海上音波探査を実施した。

補足 海域の活断層調査は目的に応じた“音源”を用いる必要がある(1/2)

【乙118「海域における活断層調査の現状と課題」(岡村行信,2013)から抜粋】

- 音波探査(地震探査)は音源の周波数によって、分解能と探査深度が大きく異なる。
- 一般に使用される音源では、エアガン・ウォーターガン・スパーカー・ブーマーの順に周波数が高くなり、分解能が高くなる。さらに周波数が高い装置としてチャープソナー・ソノブローブ・SES2000などの装置も利用されている。
- 活断層の活動間隔は数千年から数万のものが多く、また、1回の断層活動によるずれは1m前後であることが多いことを考えると、エアガンを音源を用いた場合活動イベントを識別することは困難であろう。
ブーマーを音源とすると、活断層を確実に認定できるし、活動履歴を解明することとも可能になってくる。

分解能 : 高 探査深度 : 浅		分解能 : 低 探査深度 : 深				
音源	チャープソナー	ソノブローブ	ブーマー	スパーカー	ウォーターガン	エアガン
送信方法	電圧振動方式 電圧によって圧電セラミックスを振動させて音波を発生させる	磁歪振動式 磁歪によって金属板を振動させて音波を発生させる	電磁誘導方式 電磁誘導によって金属板を振動させて音波を発生させる	水中放電方式 海中で瞬間的に高電圧をかけて海水を蒸発させることによって音波を発生させる	圧縮空気方式 圧縮空気の圧力を利用して、海水をピストンで弾き出して音波を発生させる	圧縮空気方式 圧縮空気を海水中で断続的に開放して衝撃音を発生させる。振幅が大きく周波数の低い音波で発生させる
発信周波数	2000~16000Hz	3000~10000Hz	500~14000Hz	400~600Hz	120~150Hz	5~300Hz
可探深度	海底下25m程度まで	海底下数十m程度まで	海底下100m程度まで	海底下300m程度まで	浅部からやや深部まで	海底下数km程度まで
						

- はじめに
- 1 地震
- 1-1 地震動の基礎知識
- 地震と地震動
 - 周期
 - 応答スペクトル
 - 地域特性
- 1-2 地震動評価の骨子
- (1) 調査で地域特性を知る
- ア 震源特性
 - ・活断層調査
 - ・音源の種類
 - ・震源断層の把握
 - ・地質境界としての中央構造線
 - ・振り返り
 - イ 伝播特性
 - ・分析・評価
 - ・振り返り
 - ウ 増幅特性
 - ・地下構造調査の目的
 - ・敷地の地盤・速度構造
 - ・振り返り
- エ 小括
- (2) 不確かさを考慮した評価
- ア 評価手法
 - イ 不確かさの考慮
 - ウ 基本震源モデル
 - エ 不確かさを考慮モデル
 - オ Ss策定結果
- 1-3 地震のまとめ
- 2 火山
- 2-1 火山の基礎知識
- 2-2 火山評価の骨子
- (1) 立地評価
- (2) 影響評価
- 2-3 火山のまとめ
- おわりに

長谷川修一香川大学名誉教授 (乙310(13頁))

応用地質学及び地域地質の専門家で、中央構造線断層帯に関する研究実績を有する

活断層調査の基本として、上載地層法によって佐田岬半島北岸における活断層の有無を判断する（つまり、第四紀に堆積した地層中に断層を検出する）上では、この深度150m程度までの堆積層（特に約12万年前以降の地層）内部の構造を明瞭に捉えた記録が重要であり、それより深くの古い地質時代の堆積層や岩盤内部の構造を捉えた記録はなくても活動性評価には支障がありません。

佃栄吉氏 (乙115(15~16頁))

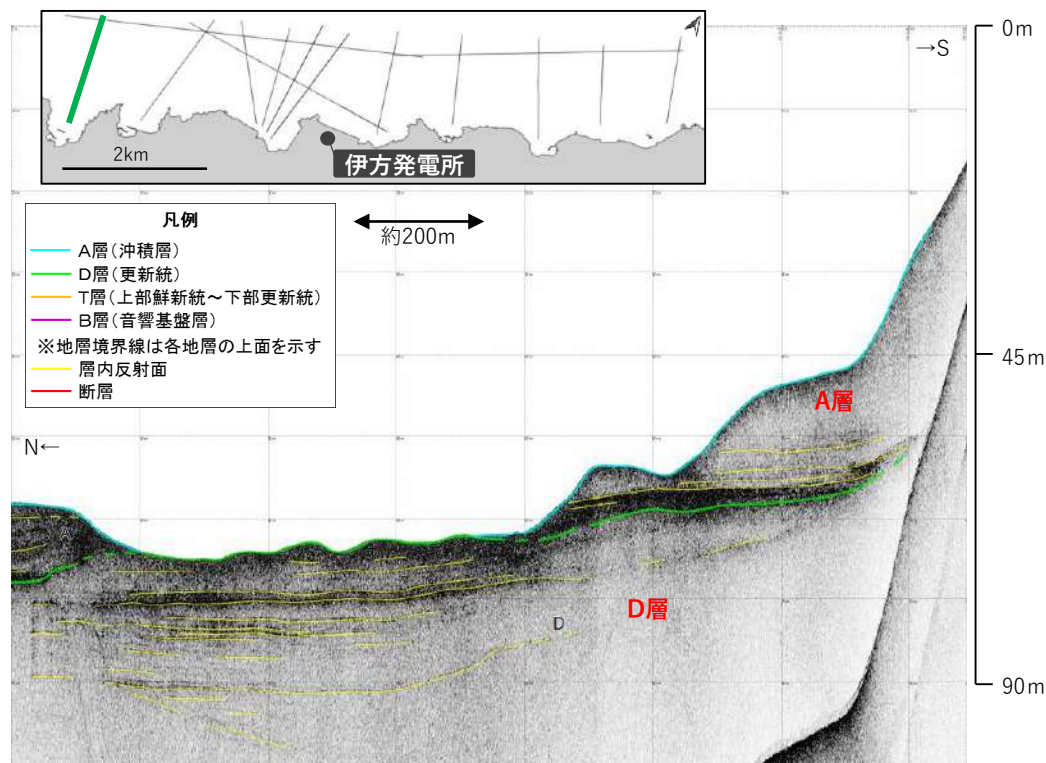
産業技術総合研究所の地質部門全体のトップを務め、伊予灘での活断層調査にも携わってきた

深部構造を対象とするエアガン反射法探査を沿岸まで実施したとしても、そのような深部地下構造を対象とした大出力の探査では堆積層中の構造まで詳細に把握できるだけの解像度はないため、把握した地質境界としての中央構造線の存在を確認するだけにとどまり、それが活断層であるか否かを判断するためにはこれを覆う浅部の堆積層を調査対象とする高解像度の音波探査記録に立ち返って検討する必要があります。・・・佐田岬半島まで接続した深部地下構造の探査は学術的には意義深いかもしれませんが、活断層の有無を確認する上で必要な調査ではありません。

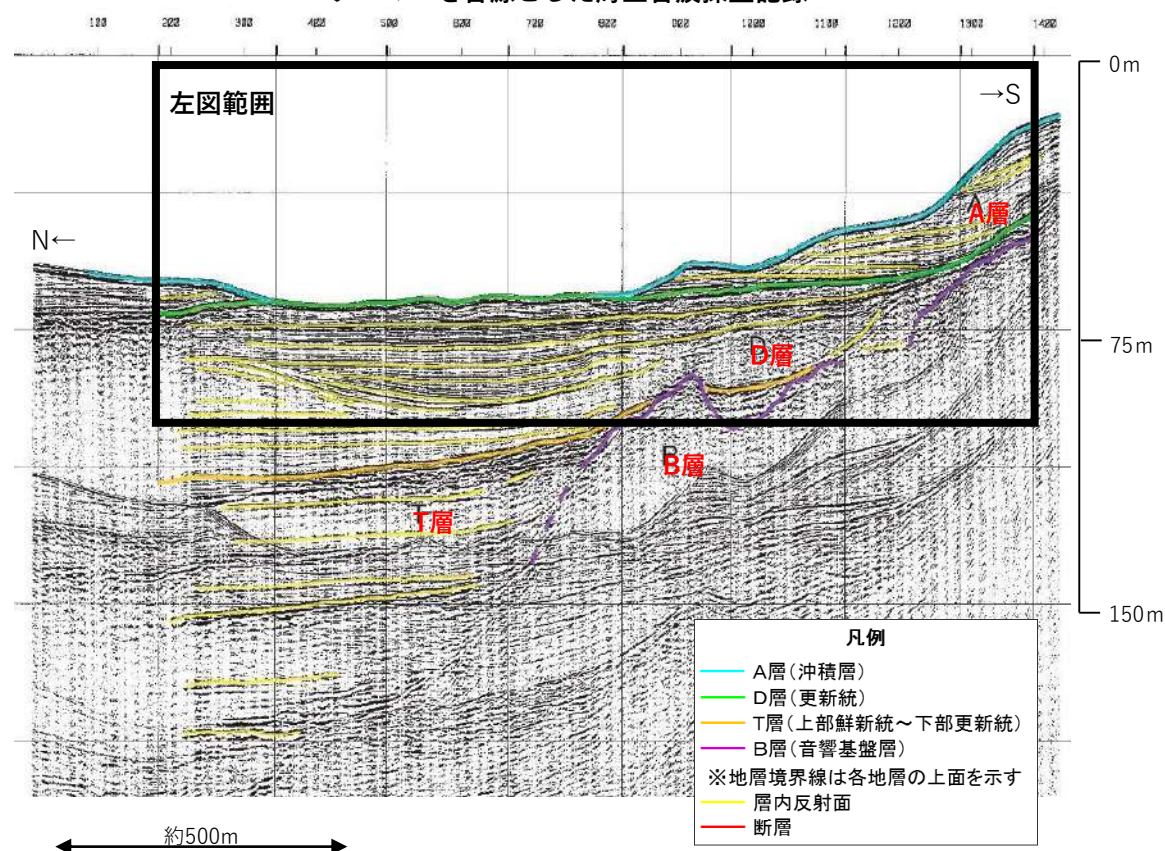
補足 ■ 活断層調査に適した音源(1/2)

- 伊予灘における活断層調査では、海上音波探査により、後期更新世以降の地層（D層上部以浅の堆積物）中に、震源断層の活動痕跡である変位・変形があるか否かの調査・確認が必要であるため、**海底下浅部を高い分解能で捉えることができる音源**を用いる必要がある。
- チャープソナーやソノプローブを音源とした場合、海底下極浅部の分解能は極めて高いものの探査深度が浅くなり、堆積物が粗粒であれば記録の質が低下することなどから、活断層の認定の上では、D層上部を含めた**海底下浅部までを高い分解能で捉えることができるブーマー**が最も適した音源となる。

チャープソナーを音源とした海上音波探査記録



ブーマーを音源とした海上音波探査記録

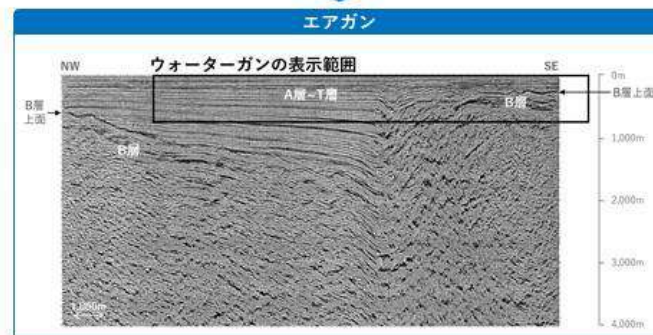
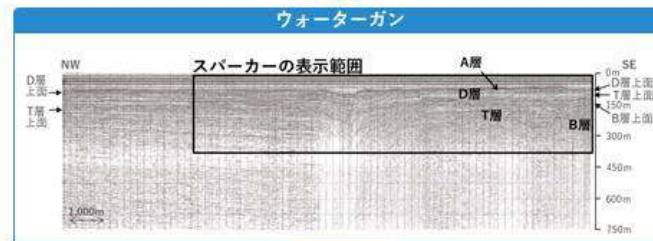
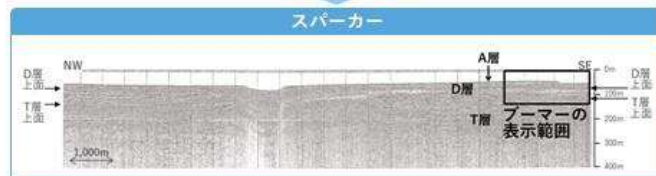
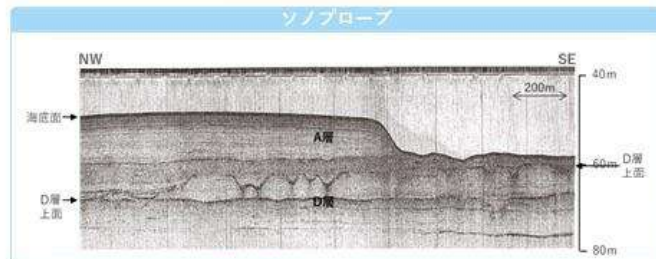


補足 活断層調査に適した音源(2/2)

○また、伊予灘においては、目的に応じて各種音源を用いた探査を実施し、エアガン等を音源とした探査を併用して浅部から深部に至る活断層の性状を把握しており、評価の信頼性は極めて高い。

補足 海域の活断層調査は目的に応じた“音源”を用いる必要がある(2/2)

○伊予灘における音源ごとの海上音波探査記録の代表例を下図に示す。



はじめに

1 地震

1-1 地震動の基礎知識

地震と地震動

周期

応答スペクトル

地域特性

1-2 地震動評価の骨子

(1) 調査で地域特性を知る

ア 震源特性

・活断層調査

・音源の種類

・震源断層の把握

・地質境界としての中央構造線

・振り返り

イ 伝播特性

・分析・評価

・振り返り

ウ 増幅特性

・地下構造調査の目的

・敷地の地盤・速度構造

・振り返り

エ 小括

(2) 不確かさを考慮した評価

ア 評価手法

イ 不確かさの考慮

ウ 基本震源モデル

エ 不確かさ考慮モデル

オ Ss策定結果

1-3 地震のまとめ

2 火山

2-1 火山の基礎知識

2-2 火山評価の骨子

(1) 立地評価

(2) 影響評価

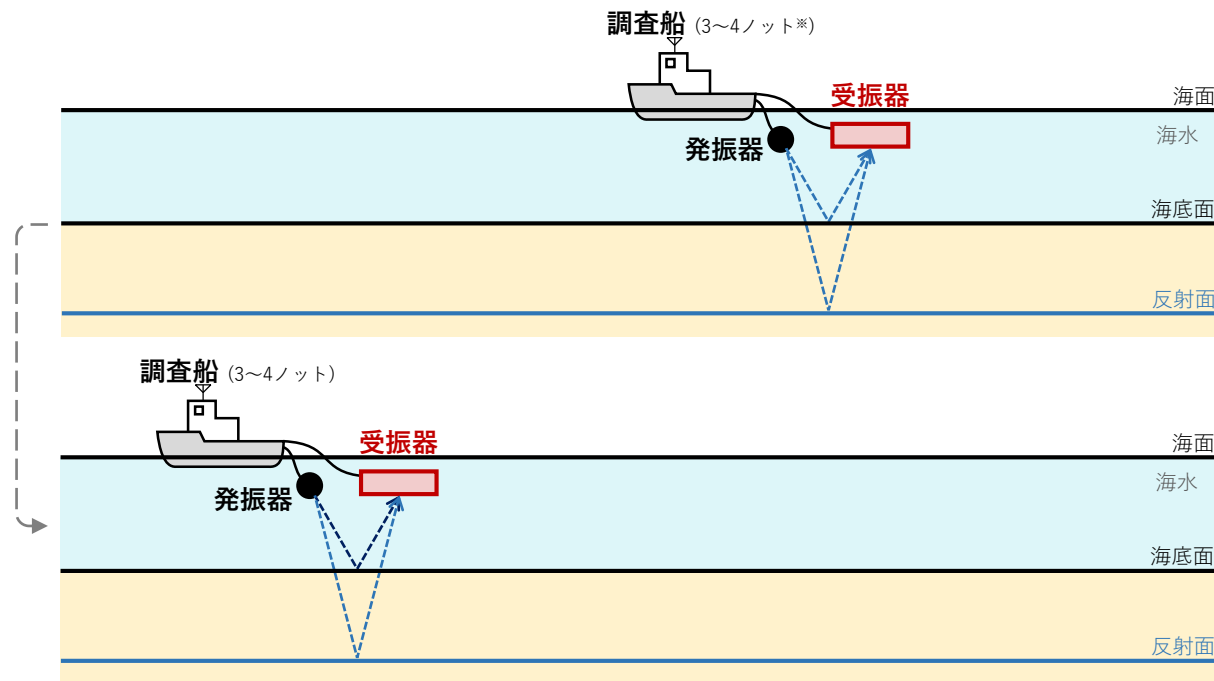
2-3 火山のまとめ

おわりに

被告による海域の探査

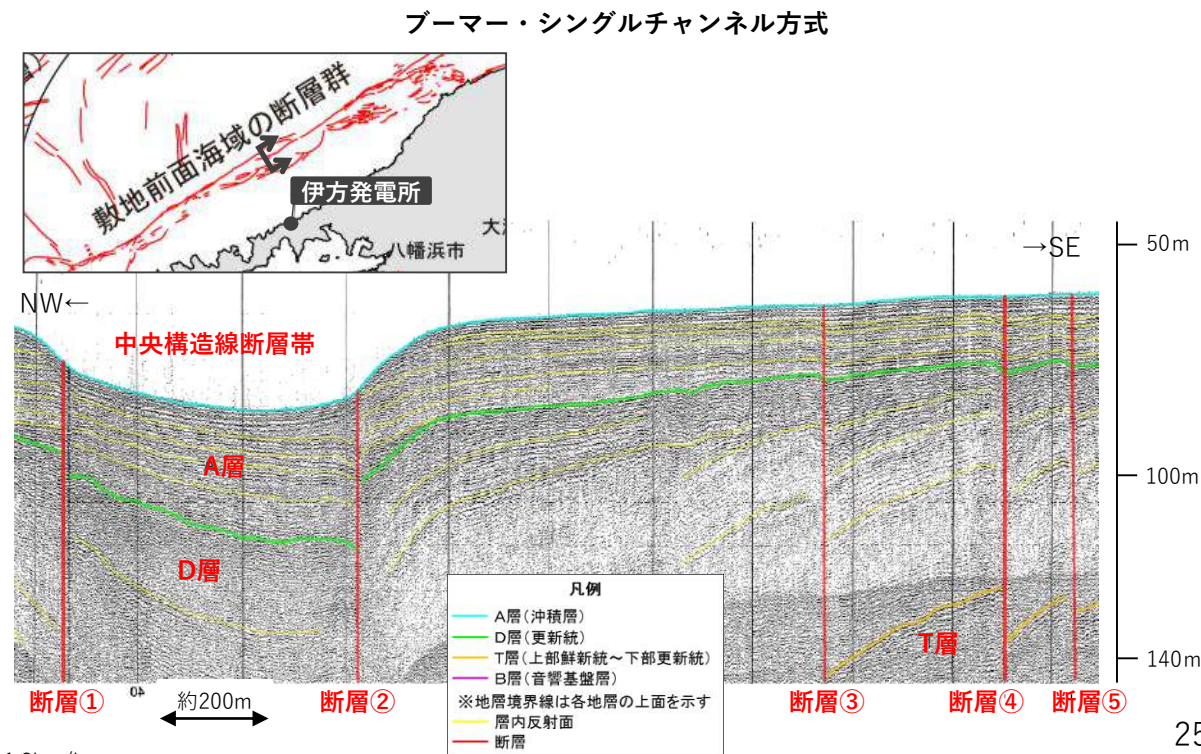
■ シングルチャンネル方式

- 被告が実施した海上音波探査では、一定の速度で進む調査船から発振器と受振器を曳航した。海上音波探査には、反射波を1つの受振器で記録する**シングルチャンネル方式**と複数の受振器で記録する**マルチチャンネル方式**（次頁）がある。前者では1つの受振器で記録した波形をそのまま並べて表示したものが最終的な断面となるため、船上で即座に記録を確認できるなどの利点があり、後者は前述の「⑤CMP重合」等によって真の反射波（シグナル）を強調し、相対的にノイズを低減できるなどの利点がある。
- 右図に中央構造線断層帯を横断した**ブーマー**を用いた**シングルチャンネル方式**の探査結果を示す。内海で静穏な堆積環境にある伊予灘では、複数の受振器の記録を重合するなどの解析でノイズを低減せずとも、シングルチャンネル方式によって**十分な分解能を有する良質な音波探査記録**を得ることができており、断層による地層の変形が明確に確認できる。



シングルチャンネル方式の概念図

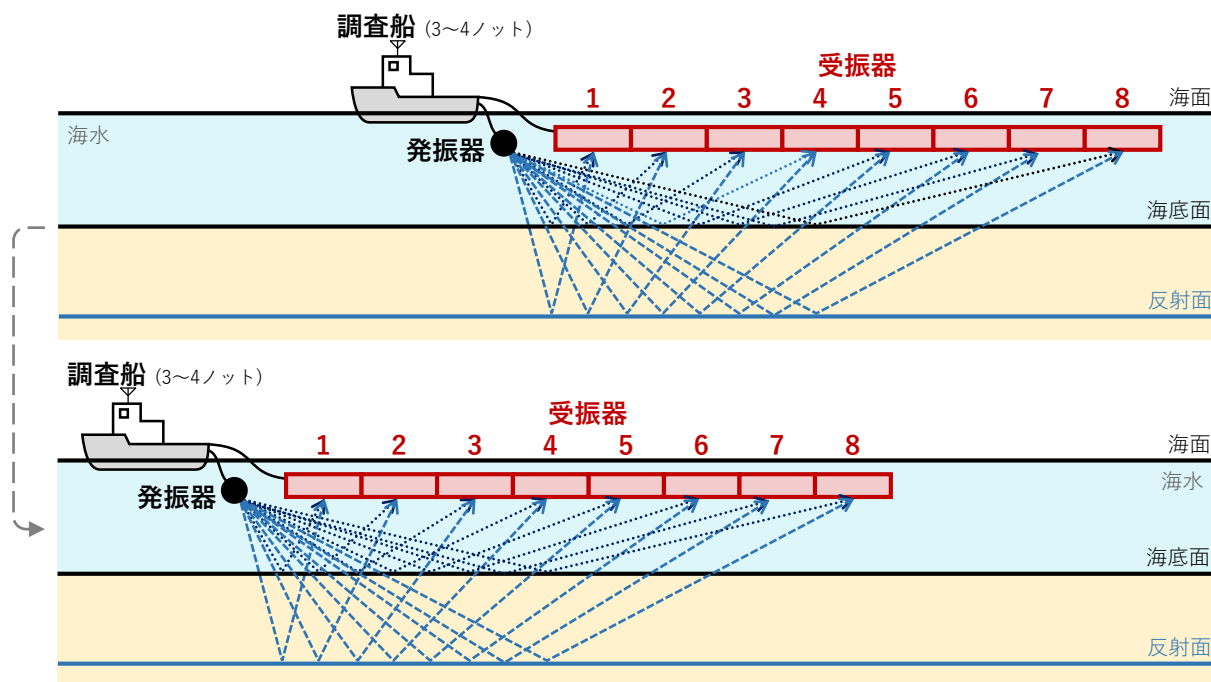
※1ノットは1時間に1海里進む速さ。約1.8km/h。



被告による海域の探査

■マルチチャンネル方式

- 従来のマルチチャンネル方式は、長大なケーブルを曳航して調査するため、沿岸部や内湾での調査が困難であった。最新の調査手法である**ショートマルチチャンネル方式**では、短いケーブル上に複数の受振器を配置することで沿岸部や内湾での調査が可能となった。
- マルチチャンネル方式によって取得した音波探査記録については、前述の**主な7つの解析**を実施している。
- 右図に敷地前面で実施した**ブーマー**を音源とした**ショートマルチチャンネル方式**（受振器は8つ）の探査結果を示す。
- 活断層調査で重要となる後期更新世以降の地層（D層上部）を含めた**比較的浅い地層の内部構造を明瞭に捉えている**。



マルチチャンネル方式の概念図

