JAEA-Research 2012-028



# 研究坑道の掘削工事振動を利用した逆 VSP 探査

Reverse Vertical Seismic Profiling using Vibration during the Construction of Underground Facility

松岡 稔幸 程塚 保行 山田 信人

Toshiyuki MATSUOKA, Yasuyuki HODOTSUKA and Nobuto YAMADA

地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット

Tono Geoscientific Research Unit Geological Isolation Research and Development Directorate

**CPS** 1

November 2012

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2011

## 研究坑道の掘削工事振動を利用した逆 VSP 探査

# 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット

松岡 稔幸, 程塚 保行\*1, 山田 信人\*2

#### (2012年8月7日受理)

独立行政法人日本原子力研究開発機構東濃地科学研究ユニットでは、「地層処分技術に関する 研究開発」のうち、深地層の科学的研究(地層科学研究)の一環として、結晶質岩(花崗岩)を 対象とした超深地層研究所計画を進めている。本計画は、「第1段階:地表からの調査予測研究段 階」,「第2段階:研究坑道の掘削を伴う研究段階」,「第3段階:研究坑道を利用した研究段階」 の3段階からなる約20年の計画であり、現在は、第2段階および第3段階の調査研究を進めている。 超深地層研究所計画は、「深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備」および「深地層 における工学技術の基盤の整備」を第1段階から第3段階までを通した全体目標として定め、この うち第2段階では「研究坑道の掘削を伴う調査研究による地質環境モデルの構築および研究坑道の 掘削による深部地質環境の変化の把握」を段階目標の一つとして調査研究を進めている。この中 で、地下構造物周辺の地質構造を三次元的に把握する技術の整備を目的として、瑞浪超深地層研 究所の研究坑道の掘削工事に伴う振動を利用した逆VSP探査を実施している。本報告書では、取得 した坑道の掘削工事に伴う振動を利用した逆VSP探査データに対して、複数の手法によるデータ処 理・解析を適用し、本探査手法の適用性について検討した。その結果、適用した複数のデータ処 理・解析手法(VSP-CDP変換, VSPマイグレーション、IP変換法, 地震波干渉法)から, 研究坑道 周辺における堆積岩と花崗岩の不整合面などの水平方向に分布する地質構造や高角度傾斜の断層 を抽出することができた。

東濃地科学センター(駐在):〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64

※1 ;技術開発協力員(現所属:株式会社 日本地下探査)

※2 ;技術開発協力員

#### JAEA-Research 2012-028

# Reverse Vertical Seismic Profiling using Vibration during the Construction of Underground Facility

Toshiyuki MATSUOKA, Yasuyuki HODOTSUKA<sup>\*\*1</sup> and Nobuto YAMADA<sup>\*\*2</sup>

Tono Geoscientific Research Unit, Geological Isolation Research and Development Directorate Japan Atomic Energy Agency Akiyo-cho,Mizunami-shi,Gifu-ken

(Received August 7, 2012)

Japan Atomic Energy Agency (JAEA) at Tono Geoscience Center (TGC) is performing the Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) project, which is a scientific study of the deep geological environment as a basis of research and development for geological disposal of high level radioactive wastes (HLW), in order to establish comprehensive techniques for the investigation, analysis and assessment of the deep geological environment in fractured crystalline rock.

The MIU Project has three overlapping phases, Surface-based investigation phase (Phase I), Construction phase (Phase II), and Operation phase (Phase III), with a total duration of about 20 years. The goals of the MIU Project from Phase I to Phase III are to establish techniques for investigation, analysis and assessment of the deep geological environment, and to develop a range of engineering techniques for deep underground application. Currently, the project is under Phase II and Phase III. One of Phase II goals is to develop and revise models of the geological environment using the investigation results obtained during excavation, and to determine and assess changes in the geological environment in response to excavation. On the basis of this policy, Reverse Vertical Seismic Profiling (R-VSP) using vibration during construction of underground facility has been carried out at the MIU construction site to develop the technique that estimate the 3-dimensional geological structure. In this report, we apply plural data processing/analysis methods (VSP-CDP transform, VSP migration, IP transform and Seismic Interferometry) to observed viblation data (blasting data, vibration data during borehole drilling and shaft excavation), and discuss the applicability of the R-VSP.

In this study, geological structures such as unconformities between sedimentary rocks and granite, and steep faults were extracted using applied plural data processing/analysis methods.

Keywords: Mizunami Underground Research Laboratory (MIU), Reverse Vertical Seismic Profiling, Geological Structure

<sup>%1;</sup>Collaborating Engineer (Present affiliation, Nihonchikatansa Co., Ltd.)%2;Collaborating Engineer

# 目 次

1. はじめに	1
2. 瑞浪超深地層研究所周辺の地質概要	3
3. 逆 VSP 探査の概要	6
4. 測定計画	7
4.1 測定頻度	7
4. 2 受振点間隔	. 12
5. データ取得	. 14
5.1 立坑掘削の発破振動データの取得	. 14
5.2 立坑掘削発破以外の雑音信号データの取得	. 22
6. データ処理・解析	. 27
6. 1 VSP-CDP 変換	. 27
6. 2 VSP マイグレーション	. 39
6. 3 IP 変換法	. 44
6. 4 地震波干涉法	. 55
7. 研究坑道の掘削振動を利用した逆 VSP 探査の適用性の検討結果	. 67
8. まとめ	. 68
参考文献	. 69

# CONTENTS

1. Introduction	1
2. Geological setting	3
3. Brief summary of Reverse VSP	6
4. Planning of data acquisitions	7
4. 1 Frequency of data acquisitions	7
4. 2 Receiver interval	2
5. Data acquisitions	4
5. 1 Blasting of shaft excavations1	4
5. 2 Other vibrations during shaft excavations	2
6. Data processing and Analyses	$\overline{7}$
6. 1 VSP-CDP Transform	7
6. 2 VSP Migration	9
6. 3 IP Transform	4
6. 4 Seismic Interferometry5	<b>5</b>
7. Applicability of R-VSP using vibration during the construction of underground facility 6	57
8. Summary	8
References	9

#### 1. はじめに

独立行政法人日本原子力研究開発機構 東濃地科学センターは、原子力政策大綱<sup>1)</sup>に示される 「深地層の研究施設等を活用して、深地層の科学的研究、地層処分技術の信頼性の向上や安全評 価手法の高度化等に向けた基盤的な研究開発、安全規制のための研究開発を引き続き着実に進め るべきである」との方針に基づき、「地層処分技術に関する研究開発」のうち、深地層の科学的研 究を進めている。超深地層研究所計画<sup>2)</sup>は、岐阜県瑞浪市において進めている結晶質岩(花崗岩) を対象とした研究計画である。瑞浪超深地層研究所(以下、研究所)は研究坑道と地上施設から 構成されている。研究坑道は、2本の立坑と深度100m毎に設置される水平坑道群からなり、2012 年7月時点で立坑は深度500mまで掘削が完了し、深度500mステージを建設中である(図1-1)。

超深地層研究所計画は、「深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備」および「深地層 における工学技術の基盤の整備」を全体目標として定め、「第1段階:地表からの調査予測研究段 階」、「第2段階:研究坑道の掘削を伴う研究段階」、および「第3段階:研究坑道を利用した研究 段階」の3段階に区分して調査研究を進めている。現在は、第2段階および第3段階における調 査研究を進めている。

このうち第2段階では、「研究坑道の掘削を伴う調査研究による地質環境モデルの構築および研 究坑道の掘削による深部地質環境の変化の把握」を段階目標の一つとして調査研究を進めている。

これまで、第1段階において、研究所用地周辺を対象に地質構造の三次元分布の把握を目的と して,反射法地震探査やボーリング孔を利用した VSP 探査を実施してきた<sup>3),4)</sup>。反射法地震探査 は、地表に受振点と発震点を配置し、水平方向に展開した測定レイアウトでデータを取得する探 査手法であり、主に水平な地質構造を把握するうえで有効である。また、地表に発震点を配置し ボーリング孔を利用して深度方向に受振点を展開する VSP 探査は、反射法地震探査に比べて対象 とする地下の構造の近傍に受振器を設置できることから、対象となる構造からの S/N 比の高い反 射波を取得することが可能であり、反射波とボーリング孔の地質情報を直接比較し、反射法地震 探査の結果を補うことが可能である
<sup>5)</sup>とともに、反射法地震探査では情報の取得が困難な断層等 の高角度の構造からの反射イベントを捉える事が可能である<sup>60</sup>。ただし、これらの地上発震型の 探査は、使用する震源において制約が生じ、理想のレイアウトでの探査を実施できない場合があ る。一方, VSP 探査とは逆の「孔内発震-地上受振」型のボーリング孔を利用した逆 VSP 探査は、 地上で震源を必要としないことから地上における測定レイアウトに関する制約はより小さくなる と考えられる。また、地下の構造物の建設に伴う発破振動を震源として利用できれば、孔内震源 を利用する場合に比べて、より S/N 比の高い探査の実施が期待できる。そこで、地下構造物周辺 の地質構造を三次元的に把握する技術の整備を目的として、瑞浪超深地層研究所の研究坑道の掘 削工事に伴う振動を利用した逆 VSP 探査を実施した。

本報告書では、取得した研究坑道の掘削工事に伴う振動を利用した逆 VSP 探査データに対して、 複数の手法によるデータ処理・解析を適用した結果を示すとともに、本探査手法の適用性につい て検討した結果について報告する。



(坑道の位置や長さなどは計画であり、地質環境や施工条件などにより決定していく。) 瑞浪超深地層研究所の研究坑道イメージ図

図 1-1 瑞浪超深地層研究所の概要

#### 2. 瑞浪超深地層研究所周辺の地質概要

図 2-1 に既存の調査結果に基づき構築されたサイトスケールの地質構造モデル<sup>7)</sup>の標高 150mの 断層位置を併記した研究所用地周辺の地質概要,図 2-2 に研究所用地周辺の地質断面図を示す。

研究所周辺では,基盤をなす白亜紀後期の花崗岩(土岐花崗岩)を新第三紀中新世の堆積岩(瑞 浪層群)が不整合で覆い,さらに,その上位に固結度の低い中新世後期~更新世の堆積物(瀬戸 層群)が不整合で覆っている<sup>8)</sup>。瑞浪層群は下位より,亜炭を挟む泥岩・砂岩・礫岩からなる土 岐夾炭累層,凝灰質の泥岩・砂岩を主体とする明世/本郷累層,シルト岩・砂岩を主体とする生俵 累層に区分される。土岐夾炭累層および明世/本郷累層の下部には,それぞれ基底礫岩が分布する。 土岐花崗岩は,深度約100~500mに分布する30°以下の低角度傾斜の割れ目が卓越する岩盤(上 部割れ目帯)と,その下位の比較的割れ目密度が低い岩盤(下部割れ目低密度帯)の2つに大別 され,さらに,上部割れ目帯中には低角度傾斜を有する割れ目が集中する領域(低角度傾斜を有 する割れ目の集中帯)が推定されている<sup>3)</sup>。研究所の研究坑道は主として,この地域の基盤をな す土岐花崗岩中に建設されている。

研究所用地周辺の地質・地質構造の特徴としては、土岐花崗岩と瑞浪層群の起伏に富む不整合 面の分布(特に,研究所用地からNW-SE方向へ連続する月吉チャンネル<sup>9)</sup>)が認められる(図 2-3)。 研究所用地周辺の大規模な不連続構造としては、研究所用地北方に南傾斜の逆断層の月吉断層が 分布している(図 2-1)。また、これまでの調査研究の結果、地表地質調査やボーリング調査で複 数の断層の存在が確認されており、物理探査の結果も踏まえて、それらの三次元的な分布形状が 推定されている<sup>3)</sup>。これらの断層の走向は、NNW-SSE、NW-SE および EW が卓越し、いずれも高角 度傾斜である。このうちの一つは、主立坑に沿って確認されており(図 2-2 中の主立坑断層),NW-SE 走向のほぼ鉛直傾斜で分布している。



図 2-1 研究所用地周辺の地質概要(糸魚川, 1980<sup>8)</sup>を一部修正)



図 2-2 研究所用地周辺の地質断面図(SH460\_prov 地質構造モデル <sup>7)</sup>より作成)



図 2-3 研究所用地周辺の土岐花崗岩と瑞浪層群の不整合面標高 (SH460\_prov 地質構造モデル<sup>7)</sup>より作成)

# 3. 逆 VSP 探査の概要

VSPとは、Vertical Seismic Profilingの略で、震源または受振器をボーリング孔内に設置し 反射波を観測する地震探査の一手法である。通常の反射法地震探査では、地表で発震し、地表に 展開した受振器で反射波を観測するので、その走時は地表と反射面までの往復走時となる。一方 、VSP 探査では、ボーリング孔内に震源または受振器の一方を深度方向に展開するため、観測す る反射波は反射法地震探査のほぼ片道走時となり、一般に反射法地震探査と比較して高い分解能 を有する記録を得ることができる。通常の VSP 探査は、地表で振動を発生させてその振動をボー リング孔で受振するのに対して、震源をボーリング孔内に設置し、地表で受振する探査を逆 VSP 探査という。本研究では、ボーリング孔の代わりに立坑を利用する。逆 VSP 探査の概念図を図 3-1 に示す。



- 6 -

#### 4. 測定計画

逆 VSP 探査を実施するにあたり,研究所用地周辺に分布することが確認・推定されている高角 度傾斜の構造(断層)に着目して数値モデルを用いたシミュレーション計算を行い,測定頻度と 地上の受振点間隔について検討した。

#### 4.1 測定頻度

逆 VSP 探査は、立坑掘削のための発破を震源として利用する。測定は立坑掘削にともなって実施することから、探査精度に影響する測定の頻度を事前に検討することが重要である。

研究所周辺の地質は,図 2-2 に示すように花崗岩を堆積岩が被覆していることから,弾性波速 度が深度方向に向かって変化する岩盤を考慮する必要がある。

Witten (1988)<sup>10)</sup> によれば、最適な測定頻度(震源間隔= $\Delta s$ )は、エイリアス波数(k) に対応 する間隔( $\delta$ ) 程度と考えてよい。従って次式により推定が可能である。

$$\Delta s \cong \delta = \frac{2\pi}{2k} = \frac{\pi v}{\pi f} = \frac{v}{f}$$
(4.1.1)

ここで、v は弾性波速度(m/s)、f は周波数(Hz)である。既存のDH-2 号孔におけるゼロオフセット VSP 記録  $^{3),4)}$ をもとにして、周波数(Hz)を後述の数値シミュレーションで用いた 40Hz とし、各層の P 波速度(Vp)から $\Delta$ s(震源間隔)を計算すると表 4.1-1のようになる。

地層・岩相名	Vp(m/s)	震源間隔(m)
明世累層	2, 200	28
土岐夾炭累層	2, 500	31
花崗岩上部	3, 700	46
花崗岩	5, 300	66

表 4.1-1 Vp と震源間隔

その結果,堆積岩と花崗岩の不整合面付近のイメージングにおいて重要となる浅部掘削段階では,例えば,33m間隔(100mあたり3回),あるいは25m間隔(100mあたり4回),花崗岩部については,堆積岩部の1/2程度の頻度が合理的な測定頻度として求められた。

次に、花崗岩中の断層を想定した複数の地質構造モデルと震源間隔を組み合わせて数値シミュ レーションを実施し、断層を探査対象とした場合の花崗岩中の測定頻度に関する検討を行った。 数値モデルは3種類の異なる傾斜角(45度,60度,75度)の断層の2次元モデルを設定した。 数値モデルの大きさは水平方向2km,鉛直方向1kmとし、断層の幅は、いずれも10mとした。設 定した数値モデルのイメージを図4.1-1に、設定した母岩と断層の物性値を表4.1-2にそれぞれ 示す。なお、断層の幅および母岩と断層の物性値は、これまでの研究所用地周辺で実施した地表 からのボーリング調査結果<sup>3)</sup>を参考に設定した。また、数値シミュレーションは、断層を含む場 合と含まない場合の反射波の走時を一致させるために、断層の弾性波速度(VpおよびVs)は母岩 と同じとし、密度値(ρ)に変化を与えることとした(表4.1-2)。



図 4.1-1 数値モデル (上段:45 度モデル,中段:60 度モデル,下段:75 度モデル)

	Vp(m/s)	Vs(m/s)	ho (kg/m <sup>3</sup> )			
母岩	5, 300	2, 500	2, 500			
断層	5, 300	2, 500	1, 500			

表 4.1-2 2次元地下構造モデルの物性値

各数値モデルにおいて、立坑内に震源を設定し、地表に立坑を中心とする両翼に受振点を 5m 間隔で設置して逆 VSP 探査データの数値シミュレーションを行った。

なお,一般に発破の遠方表層上での振動の周波数帯域が 40~50Hz の成分が支配的であること から<sup>11)</sup>,数値シミュレーションの震源モーメントは,中心周波数 40Hz の点震源とした(図4.1-2)。 シミュレーションした波形から反射波を抽出した結果を図 4.1-3 (黒色矢印)に示す。



図 4.1-3 シミュレーション波形 (左:45 度モデル,中:60 度モデル,右:75 度モデル)

反射波を抽出したシミュレーション波形を利用して,2次元の一般ラドン変換法<sup>12),13)</sup>を用いて, 発震点毎に反射イメージング処理を行った。断層の傾斜角度がそれぞれ45度,60度,75度のモ デルについて,立坑内の震源の間隔が25m,50m,75mおよび100mとなる場合の反射イメージング 波形を重合した結果を図4.1-4~図4.1-6に示す。

各数値モデルにおける反射イメージング結果の特徴はそれぞれ以下のとおりである。

・45度モデル(図4.1-4): すべての震源間隔で、良好に断層がイメージされている。

- 60 度モデル(図 4.1-5): 震源間隔 100mの結果(図 4.1-5(d))の深度 900m付近が他の震源 間隔結果と比較してやや振幅が小さい(図中青矢印部分)。
- 75 度モデル(図 4.1-6): 震源間隔 75mと 100mの結果(図 4.1-6(c), (d))の深度 400~800 m付近が他と比較して良好にイメージングされておらず(図中赤矢 印および青矢印),特に 100mの結果がよりその傾向が大きい(図中 赤矢印付近)。



図 4.1-4 イメージング結果(1) -45 度モデルー ((a) 25m 間隔, (b) 50m 間隔, (c) 75m 間隔, (d) 100m 間隔)



図 4.1-5 イメージング結果(2) -60 度モデルー ((a) 25m 間隔, (b) 50m 間隔, (c) 75m 間隔, (d) 100m 間隔)



図 4.1-6 イメージング結果(3) -75 度モデルー ((a) 25m 間隔, (b) 50m 間隔, (c) 75m 間隔, (d) 100m 間隔)

これらを踏まえて,異なる震源間隔毎のイメージング結果の評価を表 4.1-3 にまとめた。その 結果,花崗岩中に分布する断層を探査対象とした場合の合理的な震源間隔は,立坑深度 50m間隔 毎であると判断できる。

			断層の角度	
		45 度	60 度	75 度
	25m	良好	良好	良好
測定頻度 (震源間隔)	50m	良好	良好	良好
	75m	良好	良好	やや不良
	100m	良好	やや不良	不良

表 4.1-3 イメージング結果の評価

以上のことから、実際の逆 VSP 探査での最適な震源間隔を表 4.1-4 のように設定した。

<u> 13</u> 4. 1 4 取	処心反応间隔
地層名	最適な震源間隔
堆積岩	25 <b>~</b> 33m
花崗岩	50m

表 4.1-4 最適な震源間隔

#### 4.2 受振点間隔

下式の Rayleigh の 1/4 波長則<sup>14)</sup>から,4.1の数値シミュレーションの震源モーメント(中心 周波数:40Hz)を用いた時に取得される反射波の分解能は,表4.2-1のようになる。

$$R = \frac{\lambda}{4} \qquad (\lambda : i \xi (m))$$

地層名	Vp(m/s)	分解能(m)
明世累層	2, 200	13. 75
土岐夾炭累層	2, 500	15. 625
花崗岩上部	3, 700	23. 125
花崗岩	5, 300	33. 125

表 4.2-1 Vp と反射波の分解能の関係

受振点間隔は,表4.2-1の分解能以下であることが望ましいことから,4.1の結果を踏まえて, 震源間隔を50m,断層の角度を75度のモデルを用いて,受振点間隔を第1段階で実施した反射法 地震探査<sup>3),4)</sup>の受振点間隔と同じ5mの場合と,10mの場合の2ケースにおいて反射イメージング 処理を実施した(図4.2-1)。

## JAEA-Research 2012-028





図 4.2-1 の結果から,受振点間隔が 5m の場合と 10m の場合には有意な差は確認されなかった。 このことから,受振点間隔は 10m で十分であると判断した。

## 5. データ取得

測定に関する事前検討結果(4.参照)を踏まえて、立坑掘削の発破振動を震源とした逆 VSP 探 査を実施した(5.1参照)。さらに、発破以外の振動の震源としての利用可能性に関する検討のた めに、研究坑道内におけるボーリング掘削振動や発破以外の工事振動などの雑音信号の測定を行 った(5.2参照)。

#### 5.1 立坑掘削の発破振動データの取得

立坑掘削の発破振動データを取得するために,立坑周辺の地表部に測線を設定した。測線は, Hardage (1992)<sup>15)</sup>を参考に,高角度傾斜の構造からの信号(反射波)を捉えたい場合に効果が期待 できる主立坑を中心とした放射状(6 方向)に配置することとし,測線の設置が可能な研究所用 地内山林,市道(No.1 測線~No.4 測線, No.6 測線)および瑞浪市民公園内の地下壕内(No.5 測 線)に10m間隔で受振器を設置した(図 5.1-1,表 5.1-1)。データ取得には表 5.1-2 に示す機器 を使用した。測線により受振器の設置環境が異なることから,測線間の S/N 比のばらつきをでき るだけ抑えるために,山林部では約 1m 程度削孔したうえで受振器を設置した。また,道路上は設 置点の状況に応じて,S/N 比低下の原因となる枯れ草等を取り除いたうえで受振器のスパイクピ ンを強く差して固定した。



図 5.1-1 逆 VSP 探査測線配置

受振ら	気 No.	受振点間隔	受振点数(ch)	測線長(m)
始点※	終点	(m)		
1	22		22	210
23	37		15	140
38	64	1.0m	27	260
65	124	TOIL	60	590
125	154		30	290
155	174		20	190
			174	1680
	受振 始点※ 1 23 38 65 125 155	受振 No. 始点※ 終点 1 22 23 37 38 64 65 124 125 154 155 174	受振点 No.受振点間隔始点※終点(m)1222337386465124125154155174	受振点間隔 的点※         受振点間隔 (m)         受振点数(ch)           1         22         23         37         22           23         37         15         15           38         64         27         60           125         154         30         30           155         174         20         174

表 5.1-1 各測線の仕様

※ 受振点 No は, 主立坑側を始点とする

機器名	型式	規格・	制作会社	数 量	
測定器(1)	DAS-1	入力チャンネル数	144ch	OYO GEOSPACE 社製	1
(データ取得用)		サンプリング間隔	0.03125~4msec		
		A/D 分解能	24 ビット		
測定器(2)	LS-8000SH	入力チャンネル数	4ch	白山工業社製	4
(UTC 時刻取得用)		サンプリング間隔	1~1000msec		
		A/D 分解能	16 ビット		
受振器		固有周波数	40Hz	MARKPRODUCTS 社製	144
		成分数	1 成分(上下動)		
		グルーピング	1ch		
受振器ケーブル		ケーブル長	75m	MARKPRODUCTS 社製	24
		受振器接続間隔	12. 5m		
中継ケーブル		ケーブル長	100m	MARKPRODUCTS 社製	20

表 5.1-2 逆 VSP 探查用使用機器一覧

さらに、地上に多量の受振点を設置する逆 VSP 探査では、地上で行う反射法地震探査と同様に、 取得波形に標高の違いや表層(低速度層)の影響が含まれることから、地上に展開した受振点毎 に静補正(標高補正,表層補正)を行うことが望ましい。このため、受振点毎の静補正値を算出 するために No. 1, No. 2, No. 3 の 3 測線において屈折法弾性波探査を実施した。No. 4 と No. 6 の 2 測 線については、第1段階で実施した反射法地震探査<sup>3,4</sup>の測線のひとつがほぼ同一地点を通過し ていることから、反射法地震探査で取得した静補正値を用いることとした。また、地下壕内では、 表層下の岩盤が露出していたことから、No. 5 測線については表層補正の必要はないと判断し、屈 折法弾性波探査を実施しなかった。

今回の屈折法弾性波探査は、各測線の受振点とほぼ同じ地点において掛矢で地表においた木製の板を打撃し、発震を行った(図 5.1-2)。板叩きによる発震は、測定器のノイズモニターでノイズ状況を見ながらノイズの少ない瞬間に行い、最大 30 回の垂直重合を行った。

静補正は,第1段階で実施した反射法地震探査<sup>3),4)</sup>の基準面標高補正に用いた補正速度(2,040m/sec)をすべての測線の補正に用いて,基準面標高は200mとした。



図 5.1-2 屈折法弾性波測定の概要図

逆 VSP 探査のデータ取得は、主立坑の掘削工事の進捗に合わせて、立坑掘削のために通常行う 段発発破とともに逆 VSP 探査用として単発発破(孔数1孔,装薬量200g)を実施し、4.1 で検討 した測定頻度をもとに合計8 深度分のデータ取得を行った(表 5.1-3)。なお、瑞浪市民公園内の 地下壕内の No.5 測線における測定については、地下壕内での作業効率や安全性の観点から、第2 回からデータの取得を開始し、第5回をもって測定を終了した。

立坑掘削工事における発破には,防爆のため非電気式雷管が用いられていることから,測定デ ータと発破時刻を同期させるために,別途,正確な発破時刻を取得する必要がある。この発破時 刻は,(a)主立坑切羽に発破時刻測定のための受振器を設置し,UTC時刻取得用の測定器と接続し て発破の瞬間の振動を記録し,(b)地表の受振器のひとつをデータ取得用の測定器とUTC時刻取得 用の測定器に並列接続することで算出することとした。

データ取得時の主な作業の流れは、以下のとおりである。

- 1. 測量した地点に受振器を配置し,受振器と測定器の間を受振器ケーブルと中継ケーブルを 用いて接続
- 2. 主立坑切羽に受振器を設置し、研究坑道内に UTC 時刻取得用の測定器を設置
- 3. 発破の秒読みに合わせて、データ取得用の測定器のトリガスイッチを手動で入力し、デー タを取得
- 4. データの品質を測定器のモニター画面上で確認

取得した単発発破のデータ記録を図 5.1-3~図 5.1-10 に示す。

測定 回	測定日	装薬量 (kg)	発破深 度(m)	装薬深度 (m)	発破地点 の岩種	備考	記録長 (sec)	サンプリ ング間隔 (msec)
午1回	2005年2月28日	0. 2	52.8	1.0	世建山	単発	2.0	
弗「凹	2005年2月28日	14. 5	52.8	1.0	堆惧石	段発	20. 0	
年の回	2006年4月27日	0. 2	80. 9	1.0	堆挂些	単発	2.0	
<b>弗∠</b> 凹	2006年4月27日	46.8	80. 9	2.5	堆惧石	段発	20. 0	
	2006年7月13日	0. 2	106.5	1.0	141主山	単発	2.0	
第3回-	2006年7月13日	51.7	106.5	2.6	堆槓右	段発	20. 0	
	2006年8月25日	0. 2	135.8	1.0	世建山	単発	2.0	
<b>弗</b> 4回	2006年8月25日	72. 9	135.8	2.3	堆惧石	段発	20.0	1.0
	2006年9月15日	0. 2	152. 0	1.0	世建山	単発	2.0	
<b>弗</b> 5回	2006年9月15日	34	152. 0	1.3	堆慎石	段発	20.0	
年の同	2008年1月11日	0. 2	200. 0	1.0	龙出出	単発	2.0	
弗 0 凹	2008年1月14日	55.0	200. 0	1.3	化尚石	段発	20.0	
<b>笠</b> 7回	2008年5月21日	0. 2	253.6	1.0	龙岗岩	単発	2.0	
弗 / 凹	2008年5月21日	52.6	253.6	1.6	16両右	段発	20. 0	
<b>笠</b> 0回	2009年4月8日	0. 2	301.3	1.0	龙岗岩	単発	2.0	
おり凹	2009年4月9日	55.5	301.3	1.6	16回石	段発	20.0	

表 5.1-3 データ取得情報

※No.5測線のみ第2回~5回までの測定で終了。

※段発発破は参考データとして取得。









図 5.1-6 測定データ(第4回 発破深度:135.8m, 単発)







# 5.2 立坑掘削発破以外の雑音信号データの取得

# 5.2.1 ボーリング掘削振動データの取得

測線長が最も長い No. 4 測線 (図 5.2-1) を利用して,研究坑道内のボーリング掘削作業 (06MI02 号孔および 06MI03 号孔の掘削作業) に伴う振動データの取得を行った。測定仕様を表 5.2-1 に, 測定時間帯と研究坑道内のボーリング掘削状況を表 5.2-2 に示す。測定は,1回あたり1時間の 記録を合計 21 回(合計 21時間)実施した。

データ取得時の主な作業の流れは以下のとおりである。

- 1. 逆 VSP 探査 No. 4 測線に受振器を配置し、受振器と測定器の間を受振器ケーブルと中継ケ ーブルを用いて接続
- 2. 研究坑道内のボーリング掘削作業状況にあわせて, すべての受振器の接続状況を確認して, データ取得用の測定器のトリガスイッチを手動で操作し, データを取得



図 5.2-1 ボーリング掘削振動測線配置

表 5.2-1 測定仕	土様
-------------	----

			仕様
受振	最点位置および	間隔	地表 1 測線 (逆 VSP 探査 No. 4 測線: 10m 間隔、60ch)
受	振	器	固有周波数 40Hz 1 成分,シングル
震		源	立坑工事振動(主にボーリング掘削振動)
記	録	長	1 時間(合計21時間測定)
サ :	ンプリング	間 隔	1msec

口吽	<b>佐</b>	午前			午後											
口吋		9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
2006/8/2( <i>1</i> K)	振動測定								001	• •	002					
	主立坑ボーリング掘削								-		-					
	換気立坑ボーリング掘削															
2006/8/3(木)	振動測定			003	0	04	005		006	00	7	008				
	主立坑ボーリング掘削										-					
	換気立坑ボーリング掘削															
2006/8/4(金)	振動測定		00	9-[	010	011	]	012		013	014	](	015	01	6	
	主立坑ボーリング掘削															
	換気立坑ボーリング掘削															
2006/8/5(土)	振動測定			017	018		019	0	20	021	•					
	主立坑ボーリング掘削															
	換気立坑ボーリング掘削															

表 5.2-2 測定時間帯および研究坑道内のボーリング掘削状況

測定データの一例としてデータ006(表5.2-2)の波形記録の一部を図5.2-2に示す。図5.2-2から,取得したデータには,地表の様々な雑音(飛行機や車の騒音,定常的な電気ノイズなど)が 混入している。

実際に両立坑で実施していたボーリング掘削に伴う振動が測定されているかどうかを確認する ために、データ001およびデータ006の記録(表5.2-2中の灰色表示部)についてスペクトル解析を 行った。なお、データ001では主立坑においてのみ10分間程度のボーリング掘削が行われており、 データ006では主立坑および換気立坑で連続してボーリング掘削が行われている状況にあった。デ ータ001とデータ006は平日の同じ時間帯の記録であり、両データにおいて地表の騒音が同じであ ると仮定すれば、スペクトル解析結果の違いは、研究坑道内のボーリング掘削の振動に起因して いるものと考えられる。

スペクトル解析の結果,研究坑道内で集中的にボーリング掘削作業が行われたデータ006のほう がデータ001に比べて,30~80Hz付近の周波数帯で振幅の増加が認められ(図5.2-3中の青色点線 内),ボーリング掘削に伴う振動がデータとして取得できているものと考えられる。



図5.2-3 データ001,006の雑音信号のスペクトル解析

## 5.2.2 その他の工事振動データの取得

5.2.1のボーリング掘削振動データと同様の手順で,逆 VSP 探査測線のうち測線 No.4 測線および No.6 を利用して(図 5.2-4),立坑内で発生するボーリング掘削時の振動以外の工事によって 発生する振動(以下,工事雑振動という)を取得した。測定仕様を表 5.2-3 に,測定時間帯および立坑内のボーリング掘削状況を表 5.2-4 に示す。



図 5.2-4 ボーリング掘削振動測線配置

表 5.2-3 測定仕様

			仕様					
受振点位置および間隔			地表 2 測線(逆 VSP 測線 No. 4, No. 6:10m 間隔, 80ch)					
受	振	器	固有周波数 40Hz 1 成分,シングル					
震		源	立坑工事振動					
記	録	漸	1 時間(合計20時間測定)					
サ :	ンプリング間	隔	1msec					

表 5.2-4 測定時間帯および立坑内工事状況

口味	<i>佐</i> <del>坐</del>		午	前		午後						
口吋	1F未	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
2008/1/16(水)	工事振動測定											
	立坑内掘削工事											
0000 (1 (17(+)	工事振動測定											
2008/1/17(本)	立坑内掘削工事								••		•	
2008/1/18(金)	工事振動測定		•									
	立坑内掘削工事											
2008/1/19(土)	工事振動測定		_									
	立坑内掘削工事											
2008/1/21(月)	工事振動測定											
	立坑内掘削工事											

━━ 掘削ズリ出し

■■■■ 掘削ズリ出し以外の支保工・裏面排水、コンクリート打設、吹付コンクリート作業

測定データの一例を図 5.2-5 に示す。取得したデータには、車の振動と考えられる見掛け速度の遅い傾きのある波形が確認できるものの、その他の特徴は確認されなかった。



# 6. データ処理・解析

5. で取得した逆 VSP 探査データに対して複数の手法によるデータ処理・解析を実施した。適用 したデータ処理・解析手法は、VSP 探査データに対して一般的に適用される VSP-CDP 変換および VSP マイグレーションに加えて、高角度傾斜の断層抽出を目的とした IP 変換法、および地上の受 振器群で記録した振動データに対して相互相関処理を行い、通常の反射法地震探査を実施した場 合と同等の波形データを合成することが可能な地震波干渉法を適用した。以降に、適用した4つ のデータ処理・解析とその結果について示す。

### 6.1 VSP-CDP 変換

# 6.1.1 データ処理

地上の受振位置が立坑からオフセット距離を持つ場合には、地下の反射点も立坑から水平方向 に離れた位置に分布する。このような反射点に対し、受・発震点が反射点直上にあるような時間 及び位置補正を行えば、反射法地震探査と同様の VSP 反射記録を得ることができる。このような イメージング処理を VSP-CDP 変換という<sup>50</sup>。VSP-CDP 変換は、主に水平な地質構造を可視化の対 象とする。

VSP-CDP 変換による逆 VSP 探査データ処理は,逆 VSP 探査測線で取得された立坑掘削の発破振動データを用いて図 6.1-1 の手順で実施した。



図 6.1-1 逆 VSP 探査データ処理フロー

#### ①発波時刻補正・データ長調整

通常は発火器や発破点からの電気信号を測定器に直接入力し、それをトリガー信号として測 定開始(タイムゼロ)を決定するが、5.で述べたように、本測定は発破に非電気式雷管を用い ているため、以下の手順のデータ補正を行った。

- (1) 立坑内の発破点近傍に設置した受振器(a) およびそれと並列接続した地表の受振器(b) で 得られたデータから、それぞれ、初動時刻(UTC 時刻)を読み取る
- (2) 読み取った2つの初動時刻の差を計算する
- (3)データ取得用の測定器で得られたデータのうち,(b)の受振器で得られたデータの初動時 刻を読み取る
- (4)(3)の時刻から(2)の時刻を差し引いた時間を補正量として、データ取得用の測定器で得られた全測定点のデータをタイムシフトする

#### ②測定配置定義

測量結果から得られている受振点,発震点の XYZ 座標値を全データのトレースヘッダーに入力した。

③測線毎ソート

測線単位で処理を進めていくため、測線毎にトレースの並べ替えを行った。

④静補正

表層の低速度層の影響による反射波の走時のばらつきを抑制するため,静補正を実施した。 静補正値は,5.1で示した通り,基準面標高はすべての測線で標高200mに,表層から基準面ま での補正速度は5.1で述べた2,040m/secを設定して計算した。

#### ⑤波形処理(前処理)

取得された測定データは、測定時間とともに振幅が減衰する。この減衰を補正するために振幅回復を適用した。また、振幅回復による記録中のノイズの振幅の増大を抑えるため、初動を ミュートによって除去した後、振幅調整として AGC<sup>16)</sup>を適用した。さらに、特定の周波数成分 をもつ波動だけを抽出させるためにバンドパスフィルタ、多重反射波のような繰り返しノイズ の除去や分解能の向上のためにデコンボリューションフィルタ<sup>17)</sup>を適用した。また、発破振 動が断層等の反射面へ入射する際に発生する反射波は、解析の対象となるP波反射波だけでな く、S波反射波等も含むが、これらはノイズとみなせるため、速度フィルタ<sup>18)</sup>を適用して除去 することとした。各種波形処理の詳細を表 6.1-1 に、波形処理適用前後のデータを図 6.1-2~ 6.1-9 にそれぞれ示す。

表 6.1-1 波形処理パラメータ

処理項目	パラメータ							
振幅回復	・球面発散補正 ・マニュアルの回復関数補正 100msec-0dB, 250msec-10dB, 500msec-30dB, 1000msec-40dB							
AGC(振幅調整)	・ゲート長:300ms							
バンドパスフィルタ	通過帯域:20Hz,24db/0ct.~150Hz,48db/0ct.							
速度フィルタ	<ul> <li>・除去する見かけ傾斜:単位 ms / tr</li> <li>・測線1 -10 ~ -4,4 ~ 10</li> <li>・測線2 -10 ~ -4,2 ~ 10</li> <li>・測線3 -10 ~ -4,2.5~ 10</li> <li>・測線4 -10 ~ -4,4 ~ 10</li> <li>・測線5 -10 ~ -3,4 ~ 10</li> </ul>							
デコンボリューション フィルタ	<ul> <li>・オペレータ長 : 60msec</li> <li>・予測距離 : 21msec</li> <li>・ホワイトノイズ : 10 %</li> </ul>							





図 6.1-3 静補正および前処理適用前後の比較(発破深度 80.9m,上:適用前,下:適用後)




図 6.1-5 静補正および前処理適用前後の比較(発破深度 135.8m,上:適用前,下:適用後)



図 6.1-6 静補正および前処理適用前後の比較(発破深度 152.0m,上:適用前,下:適用後)





/ 主立坑 No.1 測線 No. 2 測線 No.6 測線 No.3 測線 No.4 測線 受振点 No. 70 80 90 110 120 130 140 60 100 10 20 40 50 30 0.00 0.05 0.10 Time (sec) 0.15 0. 20 0.25 0.30 受振点 No. 70 80 60 80 100 110 120 130 10 20 30 40 50 90 140 0.00 0.05 0.10 Time(sec) 0.15 0. 20 0.25 0.30 ※受振点は 10m間隔

図 6.1-8 静補正および前処理適用前後の比較(発破深度 253.6m,上:適用前,下:適用後)



#### ⑥反射イメージング処理

波形処理を実施した各発破データに対して VSP-CDP 変換を実施した。実施に際しては変換時の 波形伸びが大きくなるファーオフセット部を適宜ミュートした。

⑦重合

各測線ごとにイメージングされた結果を重合した。この際,重合によって S/N 比の低下が無い ことを確認しながら作業を行った。

#### ⑧深度断面

重合結果に対して深度変換を行った。本地域では土岐花崗岩上面を境界として P 波速度が大き く変化しており<sup>3),4)</sup>,既存のデータを参考にして,深度変換に使用する P 波速度として,瑞浪層 群を 2,300m/sec,それ以深の土岐花崗岩部を 5,000m/sec として深度変換を行った。

以上のデータ処理の結果,得られた各測線の VSP-CDP 変換による時間断面を図 6.1-10~6.1-12 に示す。

いずれの断面においても,往復走時100ms~200ms付近において強振幅で水平方向に連続性の良い反射イベントを確認できる。

#### 6.1.2 考察

得られた VSP-CDP 変換結果を評価するために, 逆 VSP 探査の No. 4 測線上に位置するボーリング 孔データ(図 6.1.13, DH-2 号孔位置:図 5.1-1)との比較を行った(図 6.1-14)。VSP-CDP 変換 結果と DH-2 号孔の物理検層データから合成した合成地震波形記録は互いに整合的であり,100ms ~200ms に確認されていた強振幅で水平方向に連続性の良い反射イベントは花崗岩上面に相当し ていることが確認できる。

一方, DH-2 号孔で確認されている花崗岩内の割れ目の卓越したゾーンに対応する合成地震記録

上の反射イベント(図 6.1-13 中の①~③)は VSP-CDP 変換結果においては①の反射イベントを除 いて明瞭ではない。合成地震記録上の①~③の反射イベントに対応する区間の割れ目のうち、① の区間の割れ目については低角度傾斜が卓越し、②および③の区間の割れ目については高角度傾 斜が卓越している(図 6.1-13 中のシュミットネット参照)。VSP-CDP 変換は通常の反射法地震探 査と同様、水平構造を前提としたデータ処理であることから、低角度傾斜の割れ目が卓越してい る場所については反射イベントが明瞭に抽出されているのに対して、高角度傾斜の割れ目が卓越 している場所については、反射イベントが明瞭でないという結果は妥当であると考えられる。図 6.1-14 において、堆積岩内、花崗岩上面、ならびに花崗岩内の反射イベントをそれぞれ、黄緑色 線、赤色線、青色線で示した。

図 6.1-15~図 6.1-17 に深度断面結果を示す。前述のボーリングデータとの比較結果を参考に, 他の測線についても,堆積岩内の反射イベント,花崗岩上面の反射イベント,ならびに花崗岩内 の反射イベントを抽出した。花崗岩内に認められる低角度傾斜の反射イベントについては,概ね 花崗岩上面から深度 100m 程度の区間で確認されている。既存情報(三枝ほか(2007)<sup>3)</sup>など)か ら花崗岩の上部割れ目帯を形成する低角度傾斜の割れ目が卓越した領域からの反射イベントが抽 出されているものと考えられる。



図 6.1-10 時間断面(右: No.1 測線, 左: No.2 測線)





図 6.1-13 DH-2 号孔データ



図 6.1-14 時間断面(右:No.1 測線, 左:No.4 測線)とDH-2 号孔データの比較



図 6.1-15 深度断面(右:No.1 測線,左:No.4 測線)



図 6.1-16 深度断面(右: No.2 測線, 左: No.5 測線)



図 6.1-17 深度断面(右:No.3 測線,左:No.6 測線)

## 6.2 VSP マイグレーション

### 6.2.1 データ処理

マイグレーションは、傾斜した反射面を地下の真の位置に戻し、断層面等から発生する回折波 を一点に集めることにより、より鮮明でピントのあった地下イメージングを得る手段である<sup>19)</sup>。 VSP マイグレーションは、高角度傾斜の断層等の抽出を目的として適用した。データ処理は、

図 5.1-1 の逆 VSP 探査測線で取得された,主立坑深度 52.8m, 80.9m, 106.5m, 135.8m, 152.0m, 200.0m, 253.6m の 7 回の立坑掘削発破振動データを用いて図 6.2-1 の手順で実施した。一連の処理手順の中で,発震時刻補正~波形処理(前処理)までは,6.1 の VSP-CDP 変換と同じである。 測線単位で前処理までの波形処理を行った後のデータを用いて,断層等の高角度傾斜の構造検出 に適した 2 次元の一般ラドン変換法<sup>12),13)</sup>を用いた VSP マイグレーションを実施し,VSP マイグレ ーション後の各発破深度の断面を重合した。VSP マイグレーションのための速度パラメータは, 6.1 の VSP-CDP 変換と同様に,瑞浪層群を 2,300m/sec に,それ以深の土岐花崗岩部を 5,000m/sec とした。



図 6.2-1 VSP マイグレーションのデータ処理フロー

測線の方向が南北方向となる No.1 測線と No.4 測線,北東-南西方向となる No.3 測線と No.6 測線について,重合処理した結果を図 6.2-2 および図 6.2-3 に示す。各断面とも CDP 番号は主立 坑を中心として南方(または西方)から 10m 間隔で付けている。両断面ともに,往復走時 1sec 程度までになんらかの振幅の強いイベントを確認することができる。



図 6.2-2 南北方向重合断面(No.1 測線, No.4 測線)



図 6.2-3 北東-南西方向重合断面(No.3 測線, No.5 測線)

### 6.2.2 考察

南北方向重合断面(図 6.2-2)と北東-南西方向重合断面(図 6.2-3)のそれぞれにおいて,全体的に不鮮明ではあるが,往復時間 0.0~0.2sec までの区間で主立坑方向(CDP No.100 方向)に 傾斜した比較的振幅の強いイベント(それぞれ,図 6.2-4 および図 6.2-5 中の緑色破線)が認め られる。これらのイベントは,既存の反射法地震探査(測線位置:図 6.2-6,断面図:図 6.2-7) や 6.1の VSP-CDP 変換結果(往復走時 100ms~200ms 付近の強振幅で水平方向に連続性の良い反射 イベント)との比較を踏まえると,花崗岩上面(堆積岩と花崗岩の境界)からの反射イベントに 相当するものと考えられる。一方で、両断面の往復走時0.2sec 以降においても振幅の強いイベン ト(それぞれ、図6.2-4 および図6.2-5 中の青色破線)が確認できることから、花崗岩内の断層 や割れ目帯などの地質構造情報がVSP マイグレーションによって抽出されている可能性が考えら れる。ただし、得られたVSP マイグレーションの結果は、複数の震源によるデータを重合した結 果であるものの、主立坑を中心とする同心円状のイベントが優位に発達しており、この結果のみ から、個々のイベントについて、円弧の接点(反射体)を特定し地質構造解釈することは難しい。 これは、花崗岩内からの反射波そのもののシグナルが弱く振幅回復処理によって相対的にノイズ 振幅も強調されてしまっている可能性や、測線と高角度傾斜の構造が必ずしも直交していない場 合があること、および花崗岩と堆積岩のP波速度に2倍程度の差があるのに対して花崗岩を被覆 する堆積岩の層厚が空間的に大きく変化していることなどが影響して、重合効果が十分に得られ ていない可能性が考えられる。これらの影響については、数値シミュレーションで確認すること ができると考えられるが、実際の改善策のひとつとしては、データ処理に6.3で述べる IP 変換法 を加えて、データそのもののS/N 比を向上させたうえで VSP マイグレーションを適用してみるこ とが考えられる。ただし、その場合も、「花崗岩と堆積岩の P 波速度に2 倍程度の差があるのに対 して花崗岩を被覆する堆積岩の層厚が空間的に大きく変化する」の影響は残る。



図 6.2-4 南北方向重合断面(No.1 測線, No.4 測線)



図 6.2-5 東西方向重合断面 (No.3 測線, No.5 測線)



図 6.2-6 逆 VSP 探査測線位置



図 6.2-7 既存の反射法地震探査結果

#### 6.3 IP 変換法

IP 変換とは、以下のようなものである。ここでは図 6.3.1 に示す逆 VSP 配置で説明する。孔 軸にそってく軸を、孔口で孔軸と直交する方向にを軸をとる。媒体の速度が均質で、反射面が 平面である場合を想定すると、震源で射出され反射面 P で反射して受振点に達する弾性波の走 時は、発震点の P に対する鏡像点で射出されて受振点に直達する仮想的な弾性波の走時に等し い (図 6.3.1)。Cosma et al. (2003)<sup>6</sup>は、この鏡像点を IP (Image Point) と呼んで注目し、 異なる座標軸への投影関数である一般ラドン変換を用いて、(オフセット距離 x) - (走時 t) 領域の共通発震点ギャザーを (IP の水平座標  $\xi$ ) - (原点から IP までの距離  $\rho$ )領域のギャ ザーに変換することを考えた。これを IP 変換という。

IP 変換は、次式によって行える。

$$\Gamma(\xi,\rho) = \int dxg(x,t=t_r(\rho,\xi;x))$$
(6.3.1)

ここで, g(x, t)はもとの共通発震点ギャザーにおける各サンプル値であり, 走時  $t_r$ は IP の孔 軸に沿っての鉛直距離  $\zeta$  を用いて

$$t_r = \sqrt{(x-\xi)^2 + \zeta^2} / c = \sqrt{\xi^2 + \zeta^2 - 2x\xi + x^2} / c$$
(6.3.2)

と書けるが, ρ を用いると次式となる。

$$t_r = \sqrt{\rho^2 + x^2 - 2x\xi} / c \tag{6.3.3}$$

 $\xi \cdot \rho$  領域での IP の座標は、震源と反射面の位置が既知であれば幾何学的に決定され、共通発 震点ギャザーに対しては同一点となる。従って  $\xi \cdot \rho$  領域では、同一反射面からの反射波を重合 したり、それ以外の波を除去したりすることが容易に行える。

これまでに逆VSP型レイアウトのシミュレーションデータ(表6.3-1,図6.3.2,)を用いてIP変換の特徴について確認し<sup>20)</sup>, IP変換軸( $\xi$ 軸)が反射面(この図では断層として設定)に対して 直交する方向に設定された場合においてのみ,複数の測線データによるIPの $\xi$ 値が一致すること がわかっている(図6.3.3)。このことは,複数の測線データについて断層に直交する方向に $\xi$ 軸 をとってIP変換すれば,( $\xi$ ,  $\rho$ )領域での重合が有意に行えること,および任意の方向に多数の  $\xi$ 軸を設定してIPスペクトルを観察することにより,反射波と反射のもととなる構造の走向方向 に関する情報を抽出できることを意味している(以下,この方法を仮想測線重合法という)。

一方で, 震源S (0, s)とIP (ξ, ζ)の座標が明らかになれば, それらの中点 (Xm, Zm)(以下, IP中 点)が次式によって決定される<sup>21)</sup>(図6.3.4)。

$$(Xm, Zm) = (\frac{\xi}{2}, \frac{(\zeta+s)}{2}) = (\frac{\xi}{2}, \frac{(\sqrt{\rho^2 - \xi^2} + s)}{2})$$
 (6.3.4)

IP中点は断層面上に分布することから、複数の震源データについて任意の反射面についてのIP中 点を求めれば、その反射面の傾斜に相当する情報を取得できる<sup>21)</sup>。

本報告書では、数値シミュレーションと実際の逆VSP探査データに対してIP変換法を適用し、以 上のIP変換の適用性について検討を行った。



図 6.3-1 IP (Image Point)の概念図

表 6.3-1 数値モデルパラメータ

地山の P 波速度	5,000m/s
断層部分の P 波速度	4,500m/s
断層の走行	東西方向
断層の傾斜	70° S
観測配置	放射状に6本(12アーム)
測線長	3,000m(500m×6本)
受振点間隔	10m
震源の深度	100m
震源波形	ピーク周波数 100Hz の リッカーウェーブレット



図 6.3-2 数値モデルの概要



縦軸: ξ軸(原点から IP までの水平距離),横軸:ρ軸(原点から IP までの距離) ξab:Line-a での測定データを Line-b の方向に変換した場合のξ値



図 6.3.4 IP 中点

# 6.3.1 数値シミュレーション

数値計算用の速度構造モデルは、研究所用地周辺の地質構造の特徴を踏まえて、①堆積岩と花 崗岩を想定した水平2層構造、②高角度傾斜を有する断層を想定、③花崗岩上部に水平の割れ目 を想定した構造を付加といった3つの条件を加味した3次元速度構造モデルとした。図6.3-5に 作成した速度構造モデルを示す。これらのモデルに対して、立坑を中心として放射状にE-W方向、 SW-NE方向、SE-NW方向の3測線(受振:10m間隔,各100ch)を設定し、立坑の深度100mごとに 震源を設置した場合の波動計算を実施して3次元シミュレーションデータを作成した。作成した 震源深度100m、200m、300mにおける3次元数値シミュレーションの波形データを図 6.3-6~図 6.3-8に示す。



図 6.3-5 3次元速度構造モデル立体図



図 6.3-6 数値シミュレーション波形 (震源深度 100m)



図 6.3-7 数値シミュレーションの波形 (震源深度 200m)



図 6.3-8 数値シミュレーションの波形 (震源深度 300m)

作成された3次元シミュレーションデータ(図 6.3-6~6.3-8)を用いて仮想測線重合法のデ ータ解析を実施した。前述したように,IP変換に関しては変換軸(ξ 軸)である仮想の測線が 断層の走行方向と直交する場合においてのみ,IPスペクトル上で反射波の重合効果が得られる ことがわかっている<sup>20)</sup>。このことは,任意の方向に多数のξ 軸を設定してIPスペクトルを観 察することにより,反射波と反射のもととなる構造の走向方向に関する情報を抽出できること を意味している。そのため,図 6.3-9 に示すように,作成した震源深度 100m~300m のシミュレ ーションデータに対して,立坑を原点として立坑を中心に2度毎の仮想測線を設定して,それ ぞれ 90 断面(180 度÷2 度)の IPスペクトル断面を求めた。

図 6.3-10 に速度構造モデルの断層に直交する東西方向の仮想測線に IP 変換後, IP 中点をマ ッピングした結果を示す。前述したように, 断層の走向と直交する方向の仮想測線上の IP 領域 では, IP 中点が断層面上に分布することが確認されており<sup>21)</sup>, 図 6.3-10 の IP 中点のマッピン グ結果はその理論計算上の位置と整合的であることが確認できる。さらに複数の震源データに 基づく IP 中点の位置からは, 断層の走向のみならず傾斜に関する情報も抽出可能である。この ことから, 高角度傾斜の断層等の地質構造を精度よく抽出する手法として IP 変換法は有効な手 法であると考えられる。



図 6.3-9 仮想測線配置



図 6.3-10 IP 中点マッピング結果

### 6.3.2 実際のデータを使用したデータ処理

IP 変換法のデータ処理は、図 5.1-1 の逆 VSP 探査測線で取得された,主立坑深度 52.8m,80.9m, 106.5m,135.8m,152.0m,200.0m,253.6m,301.3mの8回の立坑掘削発破振動データを用いて図 6.3-11 の手順で実施した。図 6.3-11 のデータ処理フローに示す一連の処理の中で、発震時刻補 正~波形処理(前処理)は6.1のVSP-CDP 変換と同様の処理内容である。また、イメージング処 理(IP 変換)の際に使用した速度モデルは、深度 0~170m は堆積岩(VP=2,300m/sec)を、深度 170m 以深は花崗岩(Vp=5,000m/sec)を想定した2層モデルを使用した。



図 6.3-11 IP 変換法のデータ処理フロー

仮想測線 90 断面に対して, IP 変換を実施し IP 中点マッピングを行った結果を三次元で表示した, IP 中点の 3 次元イメージング結果を図 6.3-12 に示す。なお, 実際の逆 VSP 探査データでは, 抽出したい反射波以外のノイズや地質構造の不均質に起因する IP 変換の誤差(速度構造の誤差) などの様々な影響が含まれていると考えられることから, 図 6.3-12 には振幅が相対的に強いもののみを表示している。



※グループ A, B は, IP 中点の集まり(IP 中点群)を示す

図 6.3-12 IP 中点マッピング結果

### 6.3.3 考察

図 6.3-12 から, IP 中点の集まり(以下, IP 中点群)は, 主に立坑近傍の深度 300m 付近(図 6.3-12 のグループ A)および深度 100m(図 6.3-12 のグループ B)に集中して認められる。また, 6.3.1の数値シミュレーション結果と同様に震源深度の違いに応じて深度方向に IP 中点群が規則的に並んで分布していることから,それぞれの IP 中点群が同一の高角度傾斜の断層を捉えているものと考えられる。これらの IP 中点群の空間分布を基に断層面を推定した結果,図 6.3-13 に示す以下の 2 つの断層面の走向傾斜の情報を抽出した。

• Fault1 : N35°W79°E

• Fault2 : N33°W76°E

これらの推定した 2 つの断層面に直交する IP 中点マッピング断面と既存の地質構造モデル (Stage300m)を対比した(図 6.3-14)。その結果,これらの IP 中点群は地質構造モデルの IF\_S200\_13 断層に相当する反射面がイメージングされたものと推定される。

IP 中点群のうち, A グループは花崗岩内で発破されたデータ(主立坑深度 200.0m, 253.6m, 301.3m) を用いた IP 中点群であり, B グループは堆積岩内で発破されたデータ(主立坑深度 52.8m, 80.9m, 106.5m, 135.8m, 152.0m)を用いた IP 中点群である。これらの推定断層の分布位置の差異は,同 断層の派生断層が堆積岩中に存在する可能性も考えられるが,イメージング処理に使用した水平 2 層構造を仮定した速度構造モデルと実際の堆積岩と花崗岩の不整合面の起伏の差異による可能 性も考えられる。

一方, IP 中点マッピング結果には、これらの IP 中点群以外に同振幅程度の IP 中点の集中が表

れていないことから、立坑周辺数百mの範囲には、図 6.3-14 に示す IF\_S200\_13 断層より規模の 大きな(母岩との音響インピーダンスの差が大きい)断層が存在する可能性は小さいと考えられ る。ただし、逆 VSP 探査の測定ジオメトリでは立坑から遠ざかるような方向に傾斜する断層から の反射波を検出することは不可能であることから、そのような断層については今回の探査の対象 外であること、および IF\_S200\_13 断層の背後(南西側)に断層が分布するような場合には、 IF\_S200\_13 断層で多くの信号エネルギーが反射し断層を透過するエネルギーが小さくなること から、その背後の断層で反射するエネルギーはより微弱になるため、結果的にその反射振幅を検 出できていない可能性もあることに留意する必要がある。



図 6.3-13 IP 中点マッピング解釈結果



図 6.3-14 地質構造モデル (Stage300m) と IP 中点マッピング結果の対比

#### 6.4 地震波干涉法

地震波干渉法は、地中からの様々な振動を地表に設置された受振器群で受動的に測定したデー タに対して相互相関処理を行い、地上の反射法地震探査を実施した場合と同等の波形データを合 成する手法である(図 6.4-1)。

観測された波形データ(地中からの透過波)と相互相関計算後の擬似データ(反射波記録)との関係式は以下のように表すことができる。<sup>22)</sup>

$$R\left(\mathbf{x}_{A}, \mathbf{x}_{B}, t\right) + R\left(\mathbf{x}_{A}, \mathbf{x}_{B}, -t\right) = \delta\left(\mathbf{x}_{H,A} - \mathbf{x}_{H,B}\right)\delta(t) - \sum_{i} T\left(\mathbf{x}_{A}, \mathbf{x}_{i}, -t\right) * T\left(\mathbf{x}_{B}, \mathbf{x}_{i}, t\right)$$

$$(6.4.1)$$

ここで、 $T(\mathbf{x}_A, \mathbf{x}_i, \vartheta \geq T(\mathbf{x}_B, \mathbf{x}_i, \vartheta)$ は、地表の点 $\mathbf{x}_A$  (図中 A) および $\mathbf{x}_B$  (図中 B) においてそれ ぞれ観測された、地中の震源 $\mathbf{x}_i$  (図中 source) からの透過波応答を表し、 $R(\mathbf{x}_A, \mathbf{x}_B, \vartheta)$ は点 $\mathbf{x}_B$  に 震源を置いた場合に観測される点 $\mathbf{x}_A$ における反射波応答を表している。この関係式から、地表の 異なる点で観測された透過波データの相互相関関数を計算することにより、擬似的な反射波デー タを合成できることがわかる。



図 6.4-1 地震波干渉法の概要

この手法では、反射法地震探査で必要とされる探査測線上の規則的な震源を必要としないこと から、震源の設置位置等の制約によって計画する反射法地震探査を実施することが困難な場合に おいて反射法地震探査を補完する技術としての利用が期待できる。逆 VSP 探査は、反射法地震探 査と同様に地表に受振器群を設置して測定を行うことから、取得データに対し地震波干渉法解析 を適用することが可能である。本報告書では、逆 VSP 探査レイアウトの測定に対して、数値シミ ュレーションと実際の逆 VSP 探査データに対して地震波干渉法を適用し、その適用性について検 討を行った。

### 6.4.1 数値シミュレーション

地質構造が解析結果へ与える影響を把握することを目的として,数値シミュレーションを実施 した。

数値シミュレーションは、研究所用地周辺の地質構造の特徴を踏まえて、図 6.4.2~図 6.4-4 に示す、①堆積岩と花崗岩の水平2層構造モデル、②堆積岩と花崗岩の湾曲2層構造モデルおよ び③水平2層構造+割れ目帯モデルの3種の数値計算用の速度構造モデルを作成し、表 6.4-1 に 示した波形シミュレーション仕様により実施した。

震源波形の計算にあたってはパルス震源としては中心周波数 100Hz のリッカーウェーブレット

を用い,水平二層構造の境界深度は 180m に設定した。また,堆積岩の P 波速度を 2,200m/s,花 崗岩の P 波速度を 5,500m/s,また花崗岩中の割れ目帯を想定した低速度帯の P 波速度を 2,200m/s とした。震源深度は地表から-100m,-200m,-300m とした。

各速度構造モデルを用いて,逆 VSP 探査レイアウトの地中震源・地表受振による波形シミュレ ーションを行った後,地震波干渉法の相互相関処理を適用して地表発震・地表受振の擬似反射法 地震探査記録を得た。その後,得られた擬似反射法地震探査記録に対して通常の反射法地震探査 のデータ処理(図 6.4-5)を実施して反射断面を得た。



図 6.4-2 水平 2 層構造モデル



図 6.4-3 湾曲 2 層構造モデル



図 6.4-4 水平構造の低角度割れ目帯モデル

表 6.4-1 波形シミュレーション仕様

波形シミュレーション仕様	
震源仕様	リッカーウェーブレット
震源周波数	100(Hz)
受振器間隔	10(m)
受振器数	61ch(0 <b>~</b> 600m)
震源位置(水平方向)	340(m)
震源深度	-100(m),-200(m),-300(m)



図 6.4-5 地震波干渉法解析フロー

### (1) 水平2層構造モデル

図 6.4-2 に示す水平 2 層構造の速度構造モデルを用いた数値シミュレーションにより得られた 波形に地震波干渉法を適用して反射断面を作成した(図 6.4-6~図 6.4-8)。

図 6.4-7 の相互相関処理を適用後の波形を見ると、震源深度が GL-100m の波形には、震源深度 を GL-200m、-300m とした場合には存在しない、偽像と考えられる多重反射のような繰り返しの波 形が確認できる。これは、白石ほか(2008)<sup>23)</sup>などで指摘されている震源位置が反射面(ここで は堆積岩と花崗岩の境界)よりも上方に存在することに由来する偽像であると考えられる。この 偽像は、図 6.4-8 の反射断面においても、真の反射面(図 6.4-8 中の 0.17 sec 付近)より振幅自 体は小さいものの確認することができ、震源深度が堆積岩と花崗岩の境界よりも下方に位置する 震源深度 200m および 300m の結果と比較して、堆積岩と花崗岩の境界よりも浅部の品質に影響を 与えている。このことから、地震波干渉法には、反射面より深部に位置する震源を利用すること で反射断面の精度が向上すると考えられる。





図 6.4-7 水平 2 層構造の相互相関処理適用後の波形例 (左:震源深度 100m, 中央:震源深度 200m, 右:震源深度 300m)



図 6.4-8 水平2 層構造の地震波干渉法による反射断面 (左:震源深度 100m, 中央:震源深度 200m, 右:震源深度 300m)

### (2) 湾曲2層構造モデル

図 6.4-3 に示す湾曲 2 層構造の速度構造モデルを用いて数値シミュレーションを実施し,得られた計算波形に地震波干渉法を適用して反射断面を作成した(図 6.4-9~図 6.4-11)。

湾曲2層構造の相互相関処理適用後の波形(図 6.4-10)は、(1)の水平2層構造のケースに比べて多数の偽造が発生しており、特に震源が湾曲内(堆積岩と花崗岩の境界より上方に位置している震源深度-100m,-200mの記録において、偽像の発生頻度が顕著である。

震源深度-100m, -200m および-300m の反射断面(図 6.4-11)を比較すると,震源深度が反射面 より下方に位置する震源深度-300m の反射断面が最も鮮明にイメージされていることが確認でき る。震源深度が-100m, -200m の場合には,(1)の水平 2 層構造のケースと同様に偽像が認められ, 湾曲構造の場合においても震源深度が堆積岩と花崗岩の境界より上方にある場合には,反射断面 に偽像が発生することが確認された。一方,図からは震源と堆積岩と花崗岩の境界との相対的な 位置関係によって異なる偽像が発生していることも確認できる。このことは,複数の震源データ を組み合わせることで,偽造を抑制し,反射断面の精度が向上すると考えられる。



図 6.4-9 湾曲 2 層構造の数値シミュレーション波形例 (左:震源深度 100m, 中央:震源深度 200m, 右:震源深度 300m)



図 6.4-10 湾曲 2 層構造の相互相関処理適用後の波形例 (左:震源深度 100m, 中央:震源深度 200m, 右:震源深度 300m)



図 6.4-11 湾曲 2 層構造の地震波干渉法による反射断面 (左:震源深度 100m, 中央:震源深度 200m, 右:震源深度 300m)

#### (3) 水平構造の低角度割れ目帯モデル

図 6.4-4 に示す水平構造に低角度割れ目帯構造を加えた速度構造モデルを用いて数値シミュレーションを実施し、得られた計算波形に地震波干渉法を適用して反射断面を作成した(図 6.4-12 ~図 6.4-14)。

相互相関処理適用後の波形(図 6.4-13)において、震源位置が堆積岩と花崗岩の境界より上方にある場合(震源深度-100m)に偽像が発生している点は前項までの結果と同様であるが、震源位置が花崗岩中で低角度割れ目帯よりも上方にある場合(震源深度-200m)、および低角度割れ目帯よりも下方に存在する場合(震源深度-300m)においても、多重反射に起因すると考えられる偽像が多く出現していることが確認できる。

震源深度-100m, -200m および-300m の反射断面(図 6.4-14),ならびに震源深度-300m の反射断 面に対する反射イベント解釈図(図 6.4-15)から,震源深度が-200m および-300m の場合には, 堆積岩と花崗岩の境界および低角度割れ目帯(図 6.4-15の低速度帯)上端の反射面は良好にイメ ージングできているのに対し,低角度割れ目帯(図 6.4-15の低速度帯)下端に相当する反射面は 振幅が小さく,低速度帯に起因する多重反射による偽像が発生している。ただし,震源深度が-200m の場合は,震源深度が-300m の場合に比べて,低速度帯下端の反射面の振幅が比較的大きいのが 確認できる。この特徴について検討するため,多層構造で深部に向かって速度逆転層の存在しな い地質モデルを用いた数値シミュレーションを実施し,得られた計算波形に地震波干渉法を適用 して反射断面を作成した(図 6.4-16)。作成した反射断面では,前述の水平構造の低角度割れ目 帯モデルに存在するような偽像が発生しておらず,各層の層境界が良好にイメージングされてい ることが確認できる。したがって,図 6.4-14の反射断面の偽像は,多層構造であることが原因で はなく,速度逆転層によって出現しているものと考えられる。このことから,花崗岩内部に存在 する低速度の割れ目帯は,偽像の発生という形で地震波干渉法の反射断面の精度を低下させる要 因となりうると考えられる。



図 6.4-12 水平構造の低角度割れ目帯構造の数値シミュレーション波形例 (左:震源深度 100m, 中央:震源深度 200m, 右:震源深度 300m)



図 6.4-13 水平構造の低角度割れ目帯構造の相互相関処理適用後の波形例 (左:震源深度 100m, 中央:震源深度 200m, 右:震源深度 300m)



図 6.4-14 水平構造の低角度割れ目帯構造の地震波干渉法による反射断面 (左:震源深度 100m, 中央:震源深度 200m, 右:震源深度 300m)



図 6.4-15 震源深度-300mの地震波干渉法結果断面の反射イベントの解釈



図 6.4-16 速度逆転層の存在しない地質構造モデル結果断面 (左:地質構造モデル図(震源深度-300m),右:地震波干渉法結果断面)

## 6.4.2 実際のデータを使用したデータ処理

データ処理は、取得データに相互相関処理を行った後、通常の反射法地震探査と同じ手順によるデータ処理を行なった(図 6.4-17)。なお、静補正のパラメータについては、既存の第1段階で実施した反射法地震探査<sup>3,4)</sup>で取得された値を使用した。



図 6.4-17 立坑掘削発破振動データデータ処理フロー

使用したデータは, No.1 および No.4 測線の立坑掘削の発破振動データ,ボーリング掘削振動および工事雑振動のそれぞれの取得データ(5.参照)である。

それぞれ作成した反射断面とその解釈をそれぞれ図 6.4-18~図 6.4-21 に示す。各測線ともに CDP の No.100 地点に DH-2 号のボーリング孔が位置していることから(図 5.1-1), DH-2 号孔の 物理検層結果から合成地震記録を作成して各断面に併記した。



図 6.4-18 堆積岩中の発破を用いた結果断面(左)と解釈断面(右)









図 6.4-21 工事雑振動記録を用いた結果断面(左)と解釈断面(右)

## 6.4.3 考察

DH-2 号孔の合成地震記録と既存の反射法地震探査の結果<sup>3),4)</sup>(図 6.4-22, 測線位置は図 6.2-6 参照)を指標に,各断面から反射イベントの抽出を行うとともに(図 6.4-18~図 6.4-21),そ れぞれの反射断面の品質について評価した。なお,それぞれの解釈断面上,緑色波線は堆積岩 中の反射イベント,赤色実線は花崗岩上面からの反射イベント,桃色破線は花崗岩中の反射イ ベントを示す。



図 6.4-22 既存の反射法地震探査結果断面(左)と解釈断面(右)

堆積岩(深度106.5m)および花崗岩(深度253.6m)の発破振動データを利用した反射断面(図 6.4-18と図6.4-19)を比較すると、いずれの反射断面も、既存の反射法地震探査の結果と比べ て反射イベントの側方連続性は良くないものの、堆積岩(深度106.5m)の発破振動を用いた結 果より花崗岩(深度253.6m)の発破振動を用いた結果のほうが、DH-2号孔の合成地震記録にお ける反射面との対応は良く(例えば、図 6.4-19 中の赤丸部)、個々の反射イベントの連続性も 良好である。6.4.1のシミュレーション結果でも、震源が地層境界よりも浅部に存在する場合に は、地層境界からの反射波と直達波の干渉によるゴースト反射波(相互相関によって出現する 偽の反射波)が合成波形記録上に短い間隔で現れ、それらの影響により反射断面上の地層境界 より浅部に虚像が生じていることから、同様に、実際のデータを使用した結果においても境界 面より浅部に生じた虚像が原因しているものと考えられる。したがって、地震波干渉法では、 地中の複数深度における震源データを取得することが精度の高い反射イメージを得る上で効果 的であると考えられる。

また、ボーリング掘削振動を利用した反射断面(図 6.4-20)では、既存の反射法地震探査の 結果で確認されている堆積岩中の反射イベントや花崗岩上面の反射イベントが、発破振動を利 用した反射断面(図 6.4-18 と図 6.4-19)に比べて振幅が強く(例えば、図 6.4-20 中の赤丸部)、 連続性も良好である。これは、ボーリング掘削振動が発破振動に比べて微弱ではあるものの長 時間に及んで信号を取得していること、このボーリング掘削が堆積岩と花崗岩の不整合面より も深い場所で掘削されていたことなどから、単発の発破振動と比べて S/N 比がより高くなった ものと考えられる。したがって、ボーリング掘削振動などの長時間の振動を複数の深度で継続 的に取得することで、反射断面は大きく改善できるものと考えられる。

一方,工事雑振動を利用した反射断面(図 6.4-21)については,既存の反射法地震探査の結果で確認されている堆積岩中の反射イベントや花崗岩上面の反射イベントが,前述の二つの反射断面と比較してかなり不明瞭である。これは,発破やボーリング掘削以外の振動が前述の 2 つの振動と比較して,微弱でかつ継続的でない(振動が不規則である)ことによると考えられる。

以上の結果から,立坑掘削工事振動を利用した地震波干渉法では,ボーリング掘削振動と発 破振動を複数深度にわたって測定し利用することが反射断面の精度を向上させる上では効果的 であると考えられる。
## 7. 研究坑道の掘削振動を利用した逆 VSP 探査の適用性の検討結果

瑞浪超深地層研究所の研究坑道の掘削工事に伴う様々な振動(立坑掘削発破振動,ボーリング 掘削振動,工事雑振動)を利用して逆 VSP 探査を実施した。測定は,研究所用地周辺の地表に, 立坑を中心とする放射状に6つの測線を展開して行った。立坑掘削の発破振動データに対して, VSP-CDP 変換, VSP マイグレーションおよび IP 変換によるデータ処理・解析を適用した。また, 発破振動,研究坑道内におけるボーリング掘削振動および工事雑振動データに対して,地震波干 渉法によるデータ処理・解析を適用した。その結果,水平方向に分布する構造の抽出を目的とし た VSP-CDP 変換では,堆積岩中の地層境界および花崗岩上面に相当する反射イベントを抽出でき た。また,花崗岩内において,ボーリング孔で低角度傾斜の割れ目が卓越してみられる場所に一 致して水平に分布する反射イベントが確認できた。このことから,発破振動を利用した逆 VSP 探 査において,水平方向に分布する構造の抽出を目的とする場合に,VSP-CDP 変換は適用できると 考えられる。

VSPマイグレーションは、主に高角度傾斜の断層等の抽出を目的として実施し、花崗岩内の断層や割れ目帯などに対応する可能性のある振幅の強いイベントを確認することができた。しかし、 その結果は、立坑を中心とする同心円状のイベントが優位に発達するものであり、この結果のみ から、個々のイベントについて地質構造を解釈することは困難であった。これは、花崗岩内から の反射波そのもののシグナルが弱く振幅回復処理によって相対的にノイズ振幅も強調されてしま っている可能性や、測線と高角度傾斜の構造が必ずしも直交していない場合があること、および 花崗岩と堆積岩のP波速度に2倍程度の差があるのに対して花崗岩を被覆する堆積岩の層厚が空 間的に大きく変化していることなどが影響している可能性がある。そのため、とくに本地域と同 様の地質環境下での適用に際しては、震源や受振点の数を増やして測定の密度を高めて重合数を 増やすことや、事前のデータ処理に IP 変換法を加えて S/N 比を向上させることが、良好な結果を 得るために重要であると考えられる。

IP 変換法は、VSP マイグレーションと同様に、高角度傾斜の断層等の抽出を目的として実施し、 IP 中点の三次元マッピング結果から研究坑道周辺に分布する断層の位置およびその走向傾斜の 情報を抽出することができた。抽出された断層の情報は既存の地質構造モデルにおける断層分布 と一致することから、発破振動を利用した逆 VSP 探査において、花崗岩中の高角度傾斜の断層等 の抽出を目的とする場合に、IP 変換法は適用できると考えられる。

一方,地震波干渉法は,逆 VSP 探査で測定した発破振動,ボーリング掘削振動および工事雑振 動データに対して実施し,それぞれ得られた反射断面を比較した結果から,発破振動とボーリン グ掘削振動を利用した反射断面において良好な結果が得られた。このことから,これらの振動デ ータを複数深度にわたって測定し利用することが反射断面の精度を向上させる上で効果的である と考えられる。地震波干渉法は,何らかの制約により地表における震源や受振器の設置が制限さ れ,理想とするレイアウト(例えば測線の三次元配置など)で反射法地震探査が実施できないケ ースにおいて,補足的に地質情報を取得する目的での利用が期待される。したがって,このよう なケースにおいては,坑道の掘削振動を利用した逆 VSP 探査で得られたデータを地震波干渉法を 用いて解析することには意味があるものと考えられる。

以上の結果を踏まえれば、地下構造物周辺の地質構造を三次元的に把握するためには、坑道の 掘削工事に伴う様々な振動を利用して逆 VSP 探査を実施し、得られたデータに対して特徴の異な る複数のデータ処理・解析手法を適用することが重要であると考えられる。

## 8. まとめ

地下構造物周辺の地質構造を三次元的に把握する技術の整備を目的として、瑞浪超深地層研究 所の研究坑道の掘削工事に伴う様々な振動(立坑掘削発破振動、ボーリング掘削振動、工事雑振 動)を利用した逆 VSP 探査を実施し、同探査手法の適用性について検討した。以下に得られた主 な結果を示す。

- ・逆 VSP 探査で取得した立坑掘削の発破振動データに対して適用した VSP-CDP 変換の結果から, 堆積岩中の地層境界および花崗岩上面に相当する反射イベントを抽出できた。水平方向に分布 する構造の抽出を目的とする場合に, VSP-CDP 変換は適用できることを確認した。
- ・同様に、立坑掘削の発破振動データに対して適用した VSP マイグレーションの結果から、花崗 岩内の断層や割れ目帯などに対応する可能性のある振幅の強いイベントを確認することができ たが、その結果は、立坑を中心とする同心円状のイベントが優位に発達するものであり、この 結果のみから個々のイベントについて地質構造を解釈することは困難であった。
- ・立坑掘削の発破振動データに対して適用した IP 変換法による IP 中点の三次元マッピング結果 から,研究坑道周辺に分布する断層の位置およびその走向傾斜の情報を抽出することができ, 花崗岩中の高角度傾斜の断層等の抽出を目的とする場合に, IP 変換法が適用できることを確認 した。
- ・逆 VSP 探査で測定した発破振動,ボーリング掘削振動および工事雑振動データに対して適用した地震波干渉法による反射断面の比較検討結果から,発破振動とボーリング掘削振動を利用した場合に良好な結果が得られ,これらの振動データを複数深度にわたって測定し利用することが反射断面の精度を向上させる上で効果的であることを確認した。
- ・以上の結果を踏まえれば、地下構造物周辺の地質構造を三次元的に把握するためには、坑道の 掘削工事に伴う様々な振動を利用して逆 VSP 探査を実施し、得られたデータに対して複数のデ ータ処理・解析手法を適用することが重要である。

- 1) 原子力委員会: "原子力政策大綱 (平成 17 年 10 月 11 日)", (2005).
- 日本原子力研究開発機構: "超深地層研究所地層科学研究基本計画", JAEA-Review 2010-016(2010).
- 3) 三枝博光,瀬野康弘,中間茂雄,鶴田忠彦,岩月輝希,天野健治,竹内竜史,松岡稔幸,尾上博則,水野崇,大山卓也,濱克宏,佐藤稔紀,久慈雅栄,黒田英高,仙波毅,内田雅大,杉原弘造:"瑞浪超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階(第1段階)研究成果報告書",日本原子力研究開発機構,JAEA-Research 2007-043 (2007).
- 4) 松岡稔幸,石垣孝一: "花崗岩分布地域における地球物理学的手法を用いた地質構造調査一反 射法弾性波探査およびマルチオフセット VSP 探査の適用一",核燃料サイクル開発機構,JNC TN7410 2005-003 (2007).
- 5)物理探査学会:"物理探査ハンドブック",14章, pp.713-746 (1998).
- 6) Cosma, C., Heikkinen, P., and Keskinen, J.: "Multi-azimuth VSP for rock characterization of deep nuclear waste disposal sites in Finland", SEG publication Hardrock seismic exploration, pp. 207-226 (2003).
- 7) 國丸貴紀,見掛信一郎,西尾和久,鶴田忠彦,松岡稔幸,竹内竜史,三枝博光,水野崇,丹野剛男,尾方伸久,濱克宏,池田幸喜,山本勝,島田顕臣,松井裕哉,伊藤洋昭,杉原弘造:"超深地層研究所計画 年度報告書(2010 年度)",日本原子力研究開発機構,JAEA-Review 2012-020(2012).
- 8) 糸魚川淳二: "瑞浪地域の地質", 瑞浪市化石博物館専報, No1, pp. 1-50 (1980).
- 9)核燃料サイクル開発機構:"東濃地域における地質環境特性に関する調査研究―地表からの調査研究の考え方と進め方―"、核燃料サイクル開発機構、JNC TN7410 2002-008(2002).
- 10) Written, A. and Molyneux, J.E.: "Geophysical imaging with arbitrary source illumination", IEEE trans. Geosc. And Rem. Sens, pp. 409-419 (1988).
- 11) 平田篤夫,石山宏二,金子勝比古: "掘進発破振動のスペクトル特性",資源と素材,108, 199-205 (1992).
- 12) 土家輝光: "一般ラドン変換法マイグレーション(I)",物理探査学会第84回学術講演会講演 論文集,pp.56-61 (1991).
- 13) 土家輝光: "一般ラドン変換法マイグレーション(Ⅱ)",物理探査学会第86回学術講演会講演 論文集,pp.44-49 (1992).
- 14) 物理探査学会: "物理探査ハンドブック", 1章, pp. 20-24 (1998).
- 15)Hardage, B.A.: "CROSSWELL SEISMOLOGY & REVERSE VSP", GEOPHYSICAL PRESS LTD., Vol.1, 79-101 (1992).
- 16)物理探査学会:"物理探査ハンドブック",1章, pp.57 (1998).
- 17) 物理探査学会: "物理探査ハンドブック", 1章, pp. 57-61 (1998).
- 18)物理探査学会:"物理探査ハンドブック",1章, pp.72 (1998).
- 19)物理探査学会:"物理探査ハンドブック",1章, pp.65-72 (1998).
- 20) 李昌鉉, 松岡稔幸, 石垣孝一, 田上正義, 成田憲文, 李鐘河, 小島正和, 山口伸治, 土家輝光, 松岡俊文: "IP 変換による3 次元 VSP イメージングの基礎的検討", 物理探査学会第112回学 術講演会論文集, pp. 44-47 (2005).
- 21)Lee, C., Park, K.G., Matsuoka, T, Matsuoka, T.: "Fracture imaging using Image Point transform and midpoint imaging of RVSP data", Geosciences Journal, Vol.14, No.4,

pp. 393-401 (2010).

- 22) Wapenaar, C. P. A.; Synthesis of an inhomogeneous medium from its acoustic transmission response: Geophysics, 68, 1756-1759(2003).
- 23) 白石和也, 松岡俊文, 松岡稔幸, 田上正義, 山口伸治: "逆 VSP データに対する地震波干渉法の適用", 物理探査, 第61巻, 第2号, pp.111-120 (2008).

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例 表1. SI 基本単位

甘木県	SI 基本単位			
基个里	名称	記号		
長さ	メートル	m		
質 量	キログラム	kg		
時 間	秒	s		
電 流	アンペア	Α		
熱力学温度	ケルビン	Κ		
物質量	モル	mol		
光 度	カンデラ	cd		

组立量		SI 基本単位	
和立里		名称	記号
面	積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体	積五	立法メートル	m <sup>3</sup>
速さ,速	度 >	メートル毎秒	m/s
加速	度 >	メートル毎秒毎秒	$m/s^2$
波	数每	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度,質量密	度 =	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面 積 密	度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比 体	積ゴ	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密	度フ	アンペア毎平方メートル	$A/m^2$
磁界の強	さフ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> ,濃	度刊	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>

第一の「「濃度」」の「ホルー」」の「加加」」 豊度 (a)、濃度 モル毎立方メートル mol/m<sup>3</sup> 量濃度 キログラム毎立法メートル  $g^{\dagger}$  加加/m<sup>3</sup> 度 カンデラ毎平方メートル cd/m<sup>2</sup>折率 (b) (数字の) 1 1 透磁率 (b) (数字の) 1 1 質 輝 屈 透磁 比

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのこと を表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

## 表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

	SI 組立単位					
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方		
平 面 角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m		
立 体 角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	$sr^{(c)}$	1 <sup>(b)</sup>	$m^{2}/m^{2}$		
周 波 数	(ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>1</sup>		
力	ニュートン	Ν		m kg s <sup>"2</sup>		
圧力,応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>		
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>		
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	$m^2 kg s^{-3}$		
電荷,電気量	クーロン	С		s A		
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>		
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{2} kg^{1} s^{4} A^{2}$		
電 気 抵 扩	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$		
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$		
磁床	(ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^1$		
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>		
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$		
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K		
光 束	[ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd		
照良	ルクス	lx	$lm/m^2$	m <sup>-2</sup> cd		
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>		
吸収線量,比エネルギー分与,	グレイ	Gv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>		
カーマ		C, j	0/11g	111 0		
線量当量,周辺線量当量,方向 地線量当量,個人線量当量,	シーベルト (g)	Sv	J/kg	$m^2 s^2$		
融 表 活 州	カタール	kat		e <sup>-1</sup> mol		
RX 215 10 1		nat		5 1101		

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
(o)剤光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス選びを大しに使用される。セルシウス度とケルビンの 単位の大きさは同一である。したかって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば認った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト(PV,2002,70,205)についてはCIPM勧告2(CI-2002)を参照。

表4. 単位の	中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	S. S.	I 組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
表 面 張 九	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	$rad/s^2$	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	$W/m^2$	kg s <sup>'3</sup>
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{-2} K^{-1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> sA
表 面 電 荷	クーロン毎平方メートル	$C/m^2$	m <sup>-2</sup> sA
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> sA
誘 電 卒	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透磁 卒	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^{2} kg s^{2} K^{1} mol^{1}$
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 s^{-3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{2} kg s^{3} = m^2 kg s^{3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	$m^{3} s^{1} mol$

表 5. SI 接頭語								
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号			
$10^{24}$	ヨ タ	Y	$10^{-1}$	デシ	d			
$10^{21}$	ゼタ	Z	$10^{.2}$	センチ	с			
$10^{18}$	エクサ	Е	$10^{-3}$	ミリ	m			
$10^{15}$	ペタ	Р	$10^{-6}$	マイクロ	μ			
$10^{12}$	テラ	Т	$10^{-9}$	ナノ	n			
$10^{9}$	ギガ	G	$10^{\cdot 12}$	ピョ	р			
$10^{6}$	メガ	М	$10^{.15}$	フェムト	f			
$10^{3}$	キロ	k	$10^{\cdot 18}$	アト	а			
$10^{2}$	ヘクト	h	$10^{.21}$	ゼプト	z			
$10^{1}$	デ カ	da	$10^{-24}$	ヨクト	У			

表 6. SIに属さないが、SIと併用される単位				
名称	記号	SI 単位による値		
分	min	1 min=60s		
時	h	1h =60 min=3600 s		
日	d	1 d=24 h=86 400 s		
度	۰	1°=(п/180) rad		
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad		
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad		
ヘクタール	ha	1ha=1hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>		
リットル	L, l	1L=11=1dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>		
トン	t	1t=10 <sup>3</sup> kg		

## 表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

表される数値が実験的に得られるもの						
名称				記号	SI 単位で表される数値	
電	子 オ	、ル	Ч	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J	
ダ	ル	ŀ	$\sim$	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg	
統-	一原子	質量単	〔位	u	1u=1 Da	
天	文	単	位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m	

	表8.SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位							
	名称		記号	SI 単位で表される数値				
バ	_	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 <sup>5</sup> Pa				
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa				
オン	グストロ・	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m				
海		里	М	1 M=1852m				
バ		$\sim$	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm)2=10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>				
1	ツ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s				
ネ		パ	Np	ロ光伝しの粉はめた眼接は				
ベ		ル	В	51単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。				
デ	ジベ	ル	dB -	X19X ± 17 AC44 (19 A 11 6				

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位							
名称	記号	SI 単位で表される数値					
エルク	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J					
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N					
ポアフ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s					
ストークフ	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$					
スチルフ	sb	1 sb =1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>					
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm $^{2}$ 10 <sup>4</sup> lx					
ガル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{-2} = 10^{-2} \text{ ms}^{-2}$					
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$					
ガウジ	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$					
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe ≜ (10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>					
(a) 3 元系のCCS単位系とSIでけ直接比較できかいため 笙母 [ △							

3元系のCGS単位系とSI Cは は対応関係を示すものである。

			表	10.	SIに 属	属さないその他の単位の例
	3	名利	К		記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
$\nu$	$\sim$	ŀ	ゲ	$\sim$	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				ĸ	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
$\nu$				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガ		$\boldsymbol{\nu}$		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	r		ル	i.		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	ートル	系	カラゞ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力	Ц		IJ	_	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J(「熱化学」カロリー)
ŝ	ク			$\sim$	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$

この印刷物は再生紙を使用しています