

# 岩芯を用いた応力測定と掘削振動計測による 掘削影響領域の評価に関する基礎的研究

(共同研究)

Fundamental Study on Evaluation of an Excavation Disturbed Zone by  
Measurement of Stress using Cores and Measurement of Vibration Caused Drilling  
(Joint Research)

及川 寧己 相馬 宣和 當舎 利行 松井 裕哉  
平野 享 丹野 剛男 引間 亮一

Yasuki OIKAWA, Nobukazu SOMA, Toshiyuki TOSHA, Hiroya MATSUI  
Toru HIRANO, Takeo TANNO and Ryoichi HIKIMA

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

February 2011

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

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 (<http://www.jaea.go.jp>)  
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

岩芯を用いた応力測定と掘削振動計測による掘削影響領域の評価に関する基礎的研究  
(共同研究)

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  
及川 寧己\*1、相馬 宣和\*1、當舎 利行\*1、松井 裕哉、平野 享\*2、丹野 剛男\*、引間 亮一\*

(2010年11月24日受理)

地下深部で掘削した坑道の周辺では、岩盤に加わる力の変化や発破の影響などで新たな亀裂が発生し、岩盤の性質が変化する。この性質が変化した領域を「掘削影響領域」と呼んでいる。掘削影響領域の範囲や性質の変化は、処分場の性能評価や地下施設の設計に大きな影響を及ぼすため、その調査や評価が必要となっている。しかし、現状の掘削影響領域の調査では、実際の坑道において、専用機器等を用いた大がかりな調査を行うことから、多大な時間とコストを費やしている。そこで、掘削影響領域を簡便かつ安価に調査するための手法の開発を目的として、ボーリング掘削のみで得られる情報（本研究では、ボーリングによって採取した岩芯およびボーリング時の振動）を最大限に活用する手法の開発に必要な基礎的研究を行った。

本報告書は、2008年度～2009年度の2年間で実施した共同研究の成果をまとめたものである。第1章では、研究内容とその背景を概括した。第2章では、原子力機構の瑞浪超深地層研究所、深度200mボーリング横坑で行われたボーリング掘削で採取された岩芯を用いて Acoustic Emission / Deformation Rate Analysis 法 (AE/DRA 法) により周辺岩盤の応力状態の把握を試みた。第3章では、瑞浪超深地層研究所、深度200mボーリング横坑で行われたボーリング掘削振動を取得し、弾性波伝搬速度推定法と反射イメージング法により空洞周辺の地質構造評価を試みた結果を報告した。

---

本研究は、産業技術総合研究所と日本原子力研究開発機構との共同研究に基づいて実施したものである。

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

※ 技術開発協力員

\*1 産業技術総合研究所

\*2 西松建設株式会社（元 技術開発協力員）

Fundamental Study on Evaluation of an Excavation Disturbed Zone by Measurement of  
Stress using Cores and Measurement of Vibration Caused Drilling  
(Joint Research)

Yasuki OIKAWA\*<sup>1</sup>, Nobukazu SOMA\*<sup>1</sup>, Toshiyuki TOSHA\*<sup>1</sup>, Hiroya MATSUI,  
Toru HIRANO\*<sup>2</sup>, Takeo TANNO\*<sup>\*</sup> and Ryoichi HIKIMA\*<sup>\*</sup>

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

(Received November 24, 2010)

In excavating a gallery or a shaft in deep underground, an excavation disturbed zone (EDZ) develops around the opening with new cracks due to both stress redistribution and excavation induced damage. The investigation and the evaluation of an EDZ are needed because the changes in rock properties and the EDZ development influence performance assessment of geological disposal and design of the underground structures. However, the in situ investigation of an EDZ is time consuming and costly because investigations are large-scale and required specialized equipment. We conducted a fundamental study for the development of an EDZ investigation method that is easy and inexpensive using the information obtained from only drilling.

This report describes the results of the joint research carried out in fiscal year 2008 and fiscal year 2009. In Chapter 1, we provide the overview and the background of this study. In Chapter 2, we discuss the estimation of stress state around the research gallery at a depth of 200m in Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) by Acoustic Emission / Deformation Rate Analysis (AE/DRA) method using rock cores obtained from the drilling. In Chapter 3, results of the evaluation of geological structure around the research gallery at a depth of 200m in MIU based on Seismic While Drilling (SWD) method using the vibrations caused by the drilling are described.

*Keywords: EDZ, Acoustic Emission / Deformation Rate Analysis (AE/DRA), Seismic While Drilling (SWD)*

---

This work has been performed by Advanced Industrial Science and Technology and Japan Atomic Energy Agency under contract.

※ Collaborating Engineer

\* 1 Advanced Industrial Science and Technology

\* 2 Nishimatsu Construction CO., LTD (Former Collaborating Engineer)

目 次

1. はじめに .....	1
1.1 目的.....	1
1.2 内容.....	1
2. 岩芯試料を用いた坑道周辺岩盤の応力測定.....	2
2.1 概要.....	2
2.2 測定方法 .....	2
2.2.1 岩芯試料および試験片 .....	2
2.2.2 測定の概要 .....	5
2.3 測定結果の解析方法 .....	6
2.3.1 AE 法.....	6
2.3.2 DRA 法.....	7
2.3.3 AE/DRA 法.....	8
2.3.4 応力場インバージョン .....	8
2.4 測定結果および考察 .....	10
2.4.1 AE 法.....	10
2.4.2 DRA 法.....	13
2.4.3 AE/DRA 法.....	15
2.4.4 3次元応力の評価 .....	19
2.5 まとめ .....	23
3. 岩芯採取時振動を用いた地質構造評価.....	24
3.1 概要.....	24
3.2 掘削振動を用いた地質構造評価方法 .....	24
3.2.1 基本概念.....	24
3.2.2 弾性波伝搬速度推定法 .....	25
3.2.3 反射イメージング法.....	28
3.3 瑞浪超深地層研究所の深度 200m ボーリング横坑内における適用結果 .....	29
3.3.1 掘削振動観測の概要.....	29
3.3.2 取得された掘削振動信号の基本特性.....	32
3.3.3 弾性波伝搬速度分布推定の試み .....	36
3.3.4 空洞周辺の反射イメージング.....	38
3.4 まとめ .....	43
4. おわりに ～掘削影響領域の評価の観点から～ .....	44
参考文献.....	45

CONTENTS

1. Introduction.....	1
1.1 Purpose of this study.....	1
1.2 Content of this report.....	1
2. Measurement of stress using rock cores from around the research gallery .....	2
2.1 Outline .....	2
2.2 Testing method .....	2
2.2.1 Core samples and specimens .....	2
2.2.2 Outline of Testing method.....	5
2.3 Analysis method .....	6
2.3.1 AE method.....	6
2.3.2 DRA method.....	7
2.3.3 AE/DRA method .....	8
2.3.4 Stress inversion .....	8
2.4 Results and discussion.....	10
2.4.1 AE method.....	10
2.4.2 DRA method.....	13
2.4.3 AE/DRA method.....	15
2.4.4 Estimation of three dimensional stress state .....	19
2.5 Summary .....	23
3. Evaluation of geological structure using the vibrations caused by the drilling .....	24
3.1 Outline .....	24
3.2 Evaluation of geological structure using the vibrations .....	24
3.2.1 Concept.....	24
3.2.2 Seismic velocity method .....	25
3.2.3 Reflection imaging method .....	28
3.3 Results of application at the research gallery .....	29
3.3.1 Measurement of drilling vibration .....	29
3.3.2 Basic characteristics of vibration signals.....	32
3.3.3 Distribution of seismic velocity around the research gallery.....	36
3.3.4 Reflection imaging around research gallery .....	38
3.4 Summary .....	43
4. Conclusion .....	44
Reference .....	45

図目次

図 2.1 岩芯採取地点	2
図 2.2 試験片の切り出し方向	4
図 2.3 岩芯から試験片を切り出している様子	4
図 2.4 载荷試験中の試験片まわりの様子	4
図 2.5 载荷試験時の载荷パターン	5
図 2.6 DRA 法の差ひずみ曲線の解析例	7
図 2.7 リファレンス試験時の AE 解析例 (M1-I18022)	10
図 2.8 応力計測試験時の AE 解析例 (M1-L4511)	11
図 2.9 応力計測試験時の AE 解析例 (M3-I18021)	11
図 2.10 応力計測試験時の AE 解析例 (M3-L022)	12
図 2.11 応力計測試験時の AE 解析例 (M1-A12)	12
図 2.12 リファレンス試験時の DRA 解析例 (M2-A1)	13
図 2.13 応力計測試験時の DRA 解析例 (M2-I9012)	14
図 2.14a AE/DRA 法による解析 (08MI14 孔手前)	16
図 2.14b AE/DRA 法による解析 (08MI14 孔中間)	16
図 2.14c AE/DRA 法による解析 (08MI14 孔奥)	16
図 2.14d AE/DRA 法による解析 (08MI15 孔手前)	17
図 2.14e AE/DRA 法による解析 (08MI15 孔中間)	17
図 2.14f AE/DRA 法による解析 (08MI15 孔奥)	17
図 2.14g AE/DRA 法による解析 (08MI16 孔手前)	18
図 2.14h AE/DRA 法による解析 (08MI16 孔中間)	18
図 2.14i AE/DRA 法による解析 (08MI16 孔奥)	18
図 2.15 インバージョンにより求めた主応力方向とその大きさ	20
図 3.1 掘削振動を用いる地質構造評価方法の概念図	25
図 3.2 本研究における適応フィルタリング構成の概念図	27
図 3.3 P-SV 面での 3 次元粒子運動ベクトルの模式図	28
図 3.4 地下空洞内における掘削された孔跡、3 成分弾性波検出器 (センサ) の位置、およびデータを記録した掘削ビット位置の模式図	30
図 3.5 地下空洞内での水平孔ボーリング掘削の様子	31
図 3.6 3 成分弾性波検出器	31
図 3.7 08MI14 孔孔口真上付近をハンマーで叩いた際の記録波形例 (中央下) と、それに対応する時間帯 (波形の赤色部分) の 3 次元粒子運動軌跡、および 3 成分弾性波検出器座標系 (右)	32
図 3.8 ボーリング掘削振動の観測波形例	33
図 3.9 観測波形のパワースペクトル例 (3 成分)	34
図 3.10 観測波形の 3 次元ホドグラム解析例	35
図 3.11 掘削振動の生観測波形による相互相関関数の計算結果例	37
図 3.12 信号処理を施した場合の相互相関関数の計算結果	37
図 3.13 掘削振動を用いて推定した岩盤の弾性波伝搬速度と震源とした掘削の掘進長に対する変化	38

図 3.14 掘削振動による 3 次元反射イメージング結果の例	39
図 3.15 掘削振動によって推定した 08MI15 孔沿いの反射率分布（中）と孔内観察に基づく亀裂分布の評価結果 <sup>3)</sup> の比較	40
図 3.16 08MI14 孔口上下 1m の水平面内における掘削振動で推定された反射率分布	42
図 3.17 08MI14 孔口上下 1m の水平面内における掘削振動で推定された反射率分布	42
図 3.18 掘削振動で推定された反射率分布と 3 孔から推定される亀裂分布の比較	42

表目次

表 2.1	応力測定対象の岩芯を採取したボーリング孔と採取地点	3
表 2.2	各岩芯の原位置における方向決定に用いた不連続面の方位傾斜	3
表 2.3	リファレンス試験一覧	10
表 2.4	各岩芯から作成し計測実施した試験片数と結果的に応力計測可能だった試験片数	15
表 2.5	各地点における計測結果の概要	22

This is a blank page.

## 1. はじめに

### 1.1 目的

地下深部で掘削した坑道の周辺では、割れ目の発生・進展、応力状態の変化あるいは間隙水圧の変化が生じる。この性質が変化した領域を「掘削影響領域」と呼んでいる。掘削影響領域の範囲や性質の変化は、処分場の性能評価や地下施設の設計に大きな影響を与えられられるため、その調査や評価が必要となっている。しかし、現状の掘削影響領域の調査では、実際の坑道において、専用機器等を用いた大がかりな調査を行うことから、多大な時間とコストを費やしている。そこで、掘削影響領域を簡便かつ安価に調査するための手法の開発を目的として、ボーリング掘削のみで得られる情報（本研究では、ボーリングによって採取した岩芯およびボーリング時の振動）を最大限に活用する手法の開発に必要な基礎的研究を行った。

### 1.2 内容

本研究では、掘削影響領域を局所的な応力分布の把握により検討するという観点から、複数の岩芯試料に対して、Acoustic Emission / Deformation Rate Analysis 法（以下 AE/DRA 法）による 3次元応力計測を行い、本手法の精度向上を目指した。また、掘削影響領域を含めた地下空洞周辺の地質構造評価を目的として、ボーリング掘削時にその掘削振動計測を実施し、地下空洞周辺の地質構造評価を実施した。具体的には瑞浪超深地層研究所の深度 200m レベルに掘削したボーリング横坑（換気立坑側）において、日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構と称す）が実施した初期応力測定用ボーリングの岩芯を用いた AE/DRA 法による応力測定およびボーリング掘削時に取得した振動データによる弾性波伝搬速度推定法と反射イメージング法による解析を行った。

## 2. 岩芯試料を用いた坑道周辺岩盤の応力測定

### 2.1 概要

AE/DRA法は、ボーリングによって採取した岩芯から切り出した試験片に対し実験室で繰返し軸載荷試験を行い、そこで認められるカイザー効果等から、載荷軸方向で受けていた元の岩盤内の応力を評価する計測法である。元々独立した計測法であるAE法<sup>1)</sup>とDRA法<sup>2)</sup>を同時に同じ試験片に適用し、結果の相互比較も行えるという効率的な概念で、岩芯が得られれば実験自体は室内試験であるため、原位置での応力測定に比べて簡便・低コストである利点を有する。ここでは、岩盤内に空洞を開削した際の掘削影響領域を局所的応力分布の把握により検討するという観点から、その前提となる本手法の精度向上を目的として、原子力機構の瑞浪超深地層研究所、深度200mレベルに掘削されたボーリング横坑（換気立坑側：幅4m、高さ6.5m）の周辺岩盤の応力状態の把握を試みた。

### 2.2 測定方法

#### 2.2.1 岩芯試料および試験片

応力測定に用いた岩芯は、深度200mボーリング横坑内において2008年11月～12月に実施した力学調査研究を目的に掘削されボーリングから採取したものである（図2.1）。ボーリング孔は図2.1および表2.1に示す3孔で、岩芯の直径は主に約63mm、岩種は土岐花崗岩である。岩芯の採取は、掘削影響を検討できるように、坑道の壁面又は底面からの距離を変えて1孔あたり3カ所とし、原位置で岩芯を観察してなるべくインタクトなところを選定した。表2.1に各孔の岩芯採取地点を示す。なお、08MI15孔奥地点では連続した岩芯が採取できず、表2.1に示すように1m程離れた上下2区間の岩芯を合わせて1地点と考えた。実験実施時期は、原位置でのボーリング直後に実施した第1期とその半年後に実施した第2期の二つに分かれる。待機中の岩芯は外部環境の変化による影響を少なくするためにラップに包んで保管した。

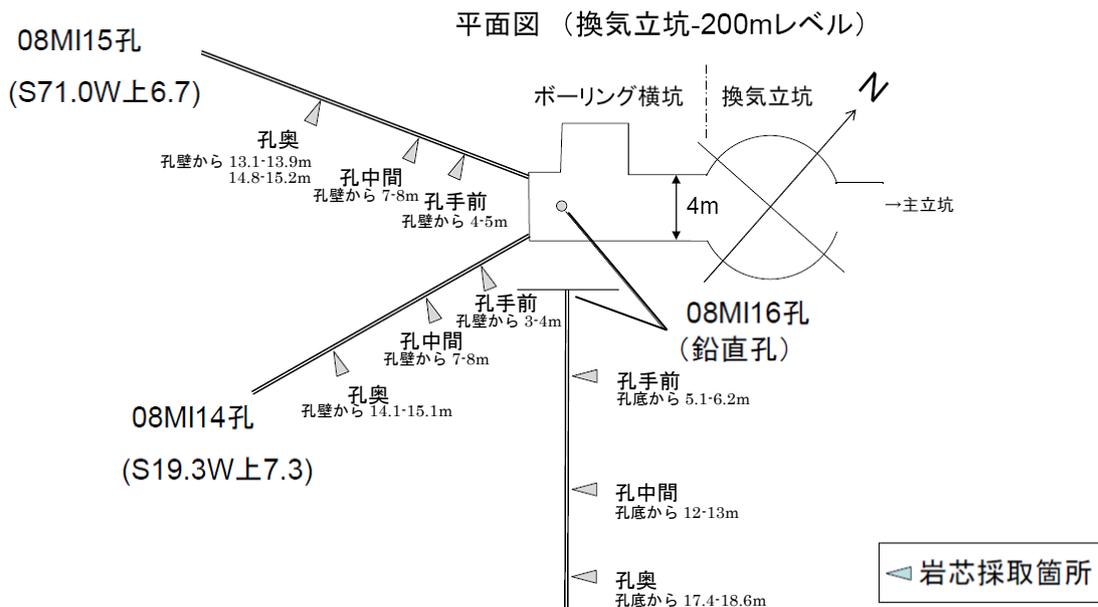


図 2.1 岩芯採取地点

表 2.1 応力測定対象の岩芯を採取したボーリング孔と採取地点

孔井名	掘削方位	掘削傾斜	掘削長	地点名	岩芯試料採取場所の掘削深度 (坑壁又は坑底面からの距離)	実験実施 時期	最大載荷 応力
08MI14	S19.3W	上向き7.3°	20.0m	08MI14孔手前	3.0-4.0m	第2期	30MPa
				08MI14孔中間	7.0-8.0m	第2期	30MPa
				08MI14孔奥	14.1-15.1m	第1期	21MPa
08MI15	S71.0W	上向き6.7°	22.3m	08MI15孔手前	4.0-5.0m	第2期	30MPa
				08MI15孔中間	7.0-8.0m	第2期	30MPa
				08MI15孔奥	13.1-13.9m及び14.8-15.2m	第1期	21MPa
08MI16	鉛直孔	鉛直孔	19.5m	08MI16孔手前	5.1-6.2m	第2期	30MPa
				08MI16孔中間	12.0-13.0m	第1期	21MPa
				08MI16孔奥	17.4-18.6m	第1期	21MPa

\*第1期: 岩芯ボーリングから2週間以内, 第2期: 岩芯ボーリングから半年後

表 2.2 各岩芯の原位置における方向決定に用いた不連続面の方位傾斜

地点名	岩芯試料採取場所の掘削深度 (坑壁又は坑底面からの距離)	不連続面データ		
		番号	中間深度	方位傾斜
08MI14孔手前	3.0-4.0m	8	5.57m	N24W86E
		9	5.64m	N35W82SW
08MI14孔中間	7.0-8.0m	21	8.54m	N9W78W
		51	13.75m	N12W88E
08MI14孔奥	14.1-15.1m			
08MI15孔手前	4.0-5.0m	4	4.04m	N69W85S
08MI15孔中間	7.0-8.0m	19	5.99m	N28W64E
08MI15孔奥	13.1-13.9m	38	13.28m	N70W70S
		40	15.02m	N14W88E
08MI15孔奥	14.8-15.2m			
08MI16孔手前	5.1-6.2m	11	5.14m	N87W75N
08MI16孔中間	12.0-13.0m	74	13.71m	N47W80SW
08MI16孔奥	17.4-18.6m	74	13.71m	N47W80SW

3次元応力場を評価するためには各岩芯の3次元的方向を知る必要がある。具体的には、各孔の方位・傾斜は既知であるので、水平孔である08MI14孔と08MI15孔では岩芯の下方向を、鉛直孔である08MI16孔では岩芯の水平面内方位を確定させる必要がある。ここでは岩芯上に認められる明瞭な亀裂の走向・傾斜を基に各岩芯の3次元的方向を決定した。個々の亀裂の走向・傾斜にはボーリング孔掘削後のボアホールカメラによる坑壁調査のデータ<sup>3)</sup>を用いた。各岩芯の方向決定に用いた坑壁上の不連続面(亀裂)とその走向傾斜を表2.2に示す。08MI14孔手前のように、用いた岩芯上と坑壁上の不連続面に方向決定に足る明瞭な亀裂の合致がない場合は、隣接する試験に供していない部分の明瞭な亀裂から基準線を延ばす方法で方向を決定した。特に08MI16孔奥では、基準となる不連続面からの距離が4m近くになっているが、この距離が長くなるほど方向に関して大きい誤差を含む可能性がある。また08MI14孔手前では、ボアホールカメラによる坑壁調査で得られた近接する明瞭な2つの亀裂方向の差が岩芯上の観察では認められなかったため、両者の中間の値を元の岩盤中の方向として用いることとした。そのため2つの亀裂のデータを示している。

AE/DRA法では、1つの試験片から、載荷軸方向の直応力が評価できる。3次元応力状態を評価する場合、応力テンソルの未知数は6個であるから、岩芯からそれぞれ独立な少なくとも6方向以上の載荷軸方向の試験片を切り出す必要がある。ここでは方向に偏りがないように、図2.2に示すような独立な6方向を含む計9方向の載荷軸の試験片を準備した。具体的には、1つの場所における岩芯上にある基準方向(リファレンス方向)を設定し、それを基に図2.2に示すような方向を設定している。さらに、各方向につきなるべく2個以上の試験片を用意し、それぞれの方向毎に測定結果の比較検討ができるようにした。ただし、08MI15孔奥では試験片切り出し時

の基準方向の設定に問題が生じ、この場所のみ上下2区間の岩芯の基準方向を合わせることができなかつたため、各方向における比較検討は困難であった。なお、他の場所では連続した岩芯を用いているため、このような問題は生じていない。

上述したように9方向で各2個ずつであるから、1つの計測場所あたり18個前後の試験片を作成することになる。ここでは1地点の応力計測に必要な岩芯長を約1mに設定した。試験片の切り出しには、実験室内のボーリング機を用いた。切り出しの様子を図2.3に示す。

岩芯から切り出した試験片は直径30mmの円柱形に整形した。整形には実験室内の平面研削盤を用いた。高さは切り出し後の状況に応じて40~60mmに整形した。なお高さ40mmを下回るとAEセンサの取り付けが難しくなる。AE法のためのAEセンサは、主に共振周波数が約400kHzの直径5mm程度の小型のものを用い、岩石試験片に、試験片高さ方向の中心からの距離が約15mmの上下2レベルに、円周上に120度間隔でそれぞれ3個ずつ、合計6個をワックスで貼り付け使用した。また、DRA法のためのクロス型の箔ひずみゲージ(ゲージ長10mm)は側面に対向して貼り付けた。図2.4に実験中の試験片まわりの様子を示す。

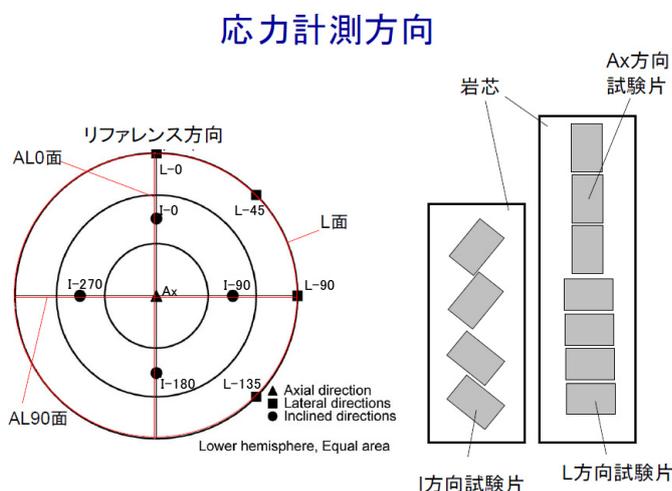


図 2.2 試験片の切り出し方向

図 2.3 岩芯から試験片を切り出している様子

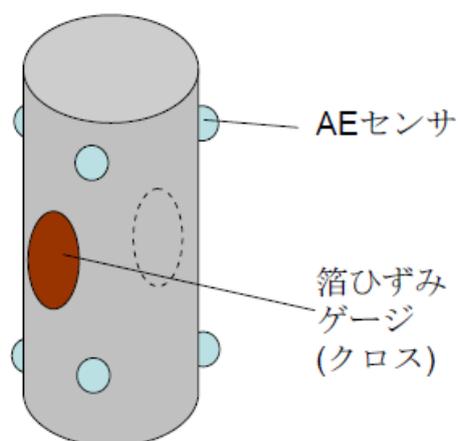


図 2.4 载荷試験中の試験片まわりの様子

## 2.2.2 測定の概要

AE/DRA 法は、その測定原理から試験片を巨視的に破壊しない程度に荷重を加え、その荷重範囲内で最大初期応力  $\sigma_{max}$  (カイザー効果が認められると予想される応力) を探すため、荷重のピーク応力  $\sigma_a$  は、最大初期応力  $\sigma_{max}$  を超え、また、同時に試験により巨視的破壊が開始する応力  $\sigma_f$  を超えてはならない。今回用いた試験片の一軸圧縮強さ  $\sigma_f$  は 140MPa 程度あり、これは既存調査結果<sup>5)</sup>における深度 200m の最大初期応力  $\sigma_{max}$  約 12MPa に比べて十分に大きい。そのため、応力計測における荷重方法は一軸圧縮によるものとした。試験機は容量 500kN の油圧サーボ式材料試験機とし、荷重制御で応力増加率一定の定速度荷重を行った。図 2.5 に示すように各試験片の軸応力を 0.5MPa から荷重のピーク応力  $\sigma_a$  (21MPa または 30MPa) まで 5 分間で増加させ、ピークホールドせずに 30 秒で 0.5MPa まで減少させることを 4 回繰り返すものとした。実験は岩芯採取直後に実施した第 1 期とおよそ半年後に実施した第 2 期とに分けられるが、荷重時のピーク応力  $\sigma_a$  は表 2.1 に示すように第 1 期の 4 カ所分の岩芯では 21MPa、第 2 期の 5 カ所分の岩芯では 30MPa とした。当初は全ての岩芯で所定応力を 21MPa とする予定だったが、第 1 期の岩芯の応力測定結果からは、10 数 MPa と計測前の予想よりもかなり大きい応力値が計測される場合があったため、孔口との距離が小さくなる第 2 期では、主応力比のコントラストがさらに大きくなる可能性を考えて、第 1 期よりも所定応力を大きく設定し、20MPa を越えるような応力が原位置で生じていた場合に備えた。

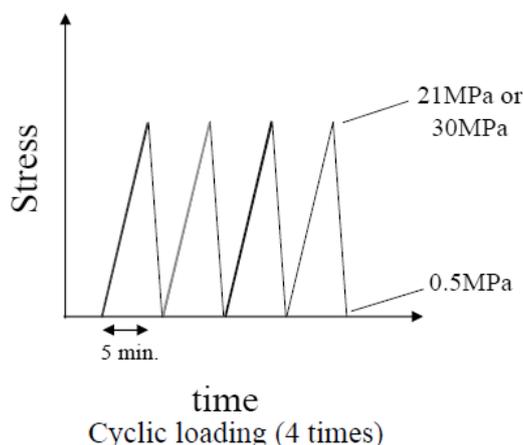


図 2.5 荷重試験時の荷重パターン

原位置の応力評価のための試験とは別に、実験に供した岩石試料が荷重した応力の影響をどのように受けるのかを調べるためのリファレンス試験も、岩芯から切り出した試験片を用い実施した。これは、実験室で所定応力の半分程度の定荷重荷重を 12 時間以上行い、その後原位置応力評価のための実験と全く同じ方法でデータ採取・解析を行うものである。前述の実験室荷重により記憶した応力は既知であるので、後述する解析パラメータ等をこの応力値が得られるように適切に設定することで、原位置応力評価の解析精度が保証できることになる。ただし、人工的に記憶させた応力が原位置での応力と近い場合は、互いの影響で変化点が明瞭でなかったり変化点の生ずる応力が上下したりすることがある。

AE 計測においては、試験片に貼り付けた小型 AE センサからの信号をドイツ Vallen Systems 社の AMSYS-5 という AE 計測装置に入力した。AE センサからの信号は、プリアンプで 49dB 増幅し、高周波ノイズ除去のためのローパスフィルターを適用した後にサンプリング周波数 10MHz で離散化して Windows PC のハードディスク上に直接記録した。本システムは書き込み速度が十分に速く、ほとんどの場合において AE 発生に関するイベントデータと個々の波形デー

タの両方を同時に記録することができる。なお記録は基本的に各载荷の応力上昇時のみとした。また材料試験機からの機械ノイズの混入を抑制するため、材料試験機の動作油圧を標準圧の 1/3 程度に下げるとともに、試験片を材料試験機にセットする際には試験片の上下に薄いプラスチックフィルムを挟んでいる（図 2.4 右写真参照）。ひずみ計測においては、1/4 ブリッジで試験片左右の各軸ひずみ・横ひずみを 10Hz のサンプリング速度で繰り返し载荷開始から終了までの全体を計測した。

## 2.3 測定結果の解析方法

### 2.3.1 AE 法

AE 法は岩石コアを用いる地下応力測定法の一つである。AE 法は、その原理・メカニズムに未解明な部分が残されているが、基本的な概念としては岩石中のマイクロクラックの挙動を利用していると考えられる。岩石に応力を载荷し徐々に応力値を増加させていくと、その岩石がもともと原位置で受けていた先行応力（原位置の地下応力）までは内在するマイクロクラックが安定的に滑り変形し AE があまり発生しないのに対して、先行応力以上の载荷レベルになると新たなすべり破壊が生じ AE が多数発生すると考えられることから（カイザー効果と呼ばれる）、AE 発生状況の急増点によって先行応力を測定することができる<sup>6)</sup>。よって AE 法では、AE 測定を行いながら岩石の一軸圧縮試験を行い、試験結果から载荷応力と AE カウント（発生数）の関係図を作成し、応力-AE カウント図から AE 急増点を読み取り、この点に対応する応力値（急増応力）をその岩石試験片の载荷軸方向の先行応力の推定値とする。実際の試験において AE は先行応力よりも低い载荷応力レベルでも散発的に発生することがあり、どの時点で活発になったかを判断する必要がある。つまり AE 法においては、応力-AE カウント図から AE 急増点を読み取る判断基準が重要である。なお、複数回の一軸载荷を行った場合は、各载荷における AE 急増点の相互比較等も行い総合的に評価する。

上述のように、AE 法においては AE 発生急増点の読み取り値がそのまま応力の推定値になるため、その読み取り方法は極めて重要である。これまでいくつか提案されているが、判断基準としてリファレンス試験に基づく瀬戸らの方法<sup>7)</sup>は、発生率を正規化した上でしきい値を用いるので、AE 発生曲線の形状の違いの影響を弱めて比較的精度良く応力値を推定でき、客観性の観点からも優れている。当初本研究においても同様の方法を採用する予定でいたが、この方法は载荷に応じて単調に応力増分当たり（単位時間当たり）の AE の発生数が増加していくことを前提にしている。後述するが今回は応力計測試験において AE 発生が単調に増加せず、発生率の一時的な増減や、ピーク応力手前での AE 発生率の減少など、リファレンス試験で得られる AE 発生曲線の傾向と大きく異なる場合が多く見られたため、リファレンス試験で得られたしきい値を単純に適用することには問題があると考えられた。この理由は不明であるが、新調した AE 計測システムが低ノイズ高感度であり過去の研究に比べて遥かに微弱な AE を取得できていること、リファレンス試験時には直前の人工载荷によって微小応力領域で発生する AE 数が現場応力計測試験時よりも十分に少なくなっていることなどが影響していると考えている。そこで、一定の载荷応力範囲内において AE 累積発生曲線の幾何学的な変化度を評価し、AE 発生状況全体と比較しながら変化の大きい箇所を候補点として 3~4 点選び出す方法を採用した。候補点が複数となるため結果の一意性については劣るものの、AE 発生数の増加が単調ではない場合においても、先行応力推定値を定めることができた。なお後述のインバージョンにおいては候補点の中から変化の大きさと AE 累積発生曲線全体の傾向を総合的に考えて順位付けを行い第 1 候補と第 2 候補を解析に用いた。

### 2.3.2 DRA 法

DRA 法は、AE 法と同じく岩石中のマイクロクラックの挙動を利用している。AE 法が AE 急増点から先行応力を測定するのに対し、DRA 法は多数の微小破壊が蓄積した結果生じる全体の變形率の変化、すなわち差ひずみの屈曲点から先行応力を測定する<sup>6)</sup>。具体的には、岩石試験片に繰返し一軸荷重を行って応力上昇時の任意の応力における各荷重間の差ひずみを求め、応力-差ひずみ曲線の傾きが大きく変化する応力（屈曲点）をその岩石試験片の荷重軸方向の原位置応力と評価する。屈曲点の特定には差ひずみの変化率を正規化した上でしきい値を用いる瀬戸らの方法<sup>7)</sup>を適用した。しきい値はリファレンス試験で予め荷重した応力が得られるように定めた。差ひずみとしては、1 回目の荷重と 2 回目の荷重の差ひずみ(1-2)および 1 回目の荷重と 3 回目の荷重の差ひずみ(1-3)を用いて解析を行った。以下では、(n-m)の標記で n 回目と m 回目の差ひずみであることを表す。これらの差ひずみについて応力-差ひずみ曲線を描き、屈曲点を正規化した差ひずみの変化率としきい値から求め、その点の応力が試験片の荷重軸方向の現場における岩盤応力であると考えた。なお、応力-差ひずみ曲線の生データにはノイズ成分が含まれているため、デジタルフィルター（遮断周波数 0.008Hz）を用いて滑らかな曲線に変換した上で曲線の傾きを求めた。解析例を図 2.6 に示す。右下がりの 2 本の太線がフィルターをかけた後の差ひずみ曲線であり、差ひずみ(1-2)、差ひずみ(1-3)共に応力 8MPa 程度のところに屈曲点が見られる。それぞれの傾きを曲がり点前後の最大最小値で正規化すると図 2.6 の細線のようになり、リファレンス試験で求めたしきい値をそれぞれ適用すると、差ひずみ(1-2)では 6.8MPa、差ひずみ(1-3)では 7.1MPa が原位置で荷重軸方向に作用していた応力と評価できる。

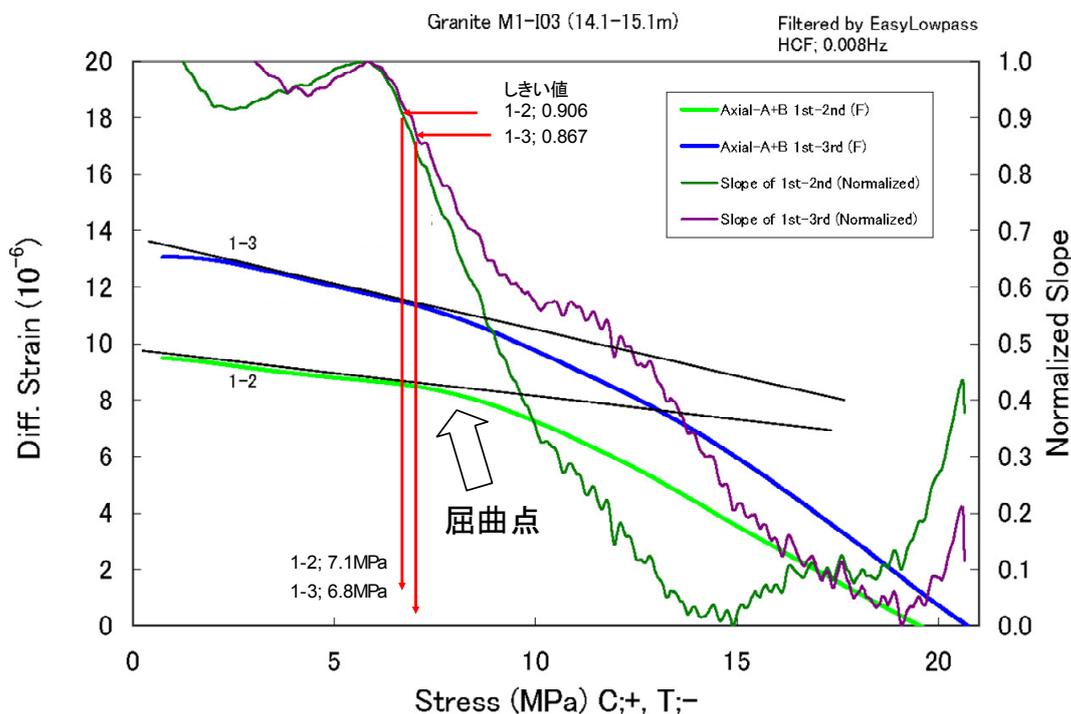


図 2.6 DRA 法の差ひずみ曲線の解析例

### 2.3.3 AE/DRA 法

AE/DRA 法は、岩石のマイクロクラックの挙動に基づく反応を観測する AE 法と DRA 法の結果の相互比較により計測の信頼性を高める方法で、それぞれの計測に問題がなければ同じ試験片からは同じ応力値が得られるという前提に基づいている。例えば AE 法と DRA 法の計測値が近ければ応力値として採用し、計測値が大きく異なればどちらかに何らかの問題があったとして両者共に棄却するような解析の方法が考えられる。上述したように本研究においては、AE 法の計測において 1 つの試験片から先行応力推定値の候補が複数得ることができる解析法を採用しているため、例に示したシンプルな評価法の適用は難しい。そこで本研究では、AE 法の計測からの有力候補 2 点と DRA 法の計測値を用いて、その計測誤差を±1MPa 程度と考えて各試験片の載荷軸方向ごと各応力値データの差が 2MPa 以内となるもの同士を組み合わせたデータセットを構成することとした。このデータセットは異なる試験片の AE 法同士、異なる試験片の DRA 法同士、AE 法と DRA 法の 3 通りの組み合わせ方が考えられる。複数の応力値データの中で 2MPa 以内の合致が得られないデータは棄却されることになる。ただし全くデータセットが構成されない場合も見られ、その場合は優先順位がつけられない。その場合はその方向の全てのデータを棄却するという考え方もあるが、本研究では何らかの理由によりデータセットを構成するには至らないものの、得られた応力値には意味があると考え、その方向の全データを活かすように解析を行っている。なおこの AE/DRA 法に準じた解析・インバージョンは次節の応力場インバージョンにおけるデータの絞り込み方法 3 が対応している。

### 2.3.4 応力場インバージョン

AE 法および DRA 法によって得られた応力値は、各試験片に付きそれぞれ一つだけではない。AE 法では区間を区切って解析するため、候補応力値の間にある程度の差が生じる。DRA 法の場合はひずみデータが良好であれば差ひずみ(1-2)と差ひずみ(1-3)から得られる応力値は本来一致するはずであるが、そうならない場合も見受けられ、また屈曲点が複数見られる場合や片方もしくは両方の差ひずみカーブに屈曲点が見られない場合もあった。ここでは各方向について可能な限り複数の試験片を準備したが、得られた応力値が AE 法と DRA 法の間でもしくは同手法間でも異なるなど応力測定としてはばらつきの多い結果となった。

これらの応力値データから 3 次元応力場をインバージョンにより再構成するわけであるが、上記のような計測結果を考慮して、AE 法では発生率の変化が大きい第 1 候補と第 2 候補の応力値を、DRA 法では得られた応力値全てを基にしてインバージョンを行うこととした。ただしインバージョンにあたっては値のばらつきに対処して精度を上げるためにデータの絞り込みを行うこととし、絞り込み方法を変えて下記 3 通りのインバージョンを試みた。

方法 1：全体インバージョン後の各計測方向の直応力と各応力値データの残差を求め、残差の大きいものから機械的に順に除外しながら、平均残差が 2MPa 以下になるまでインバージョン～除外を繰り返す。データのばらつきが大きい場合には除外する順番で最終結果がデータ全体を使った場合と異なる可能性が生じる。

方法 2：方法 1 と同様に残差の大きいものを除外するが、どのデータを除外するかの判断はデータのばらつき具合を見ながら測定者が行う。得られた応力値データ群から 1 個だけ大きく外れるようなデータのみを除外していくようなアルゴリズムとなる。3 つの方法の中では最も使用データが多く、データ全体を使った場合に近い結果が得られることが期待される。

方法 3 : AE/DRA 法によって得られたデータセット単位でそれまでのデータセット全体からデータセットを 1 組だけ除外した場合のインバージョンを行い、平均残差が最も小さくなるように除外するデータセットを選択する。データセットの除外は平均残差が 2MPa 以下になるか、データセットの除外によって平均残差が逆に増加する直前までインバージョン～除外を繰り返す。なおデータセットが構成できなかった方向については、そのまま計測した全データを用いることとし、データの除外も行わない。なお DRA 法の計測で同一試験片で近い値が得られた場合は、データセットを構成する場合は相手により近い値を、データセットを構成しない場合は差ひずみ(1-3)の値を用いることとした。これは DRA 法ではそもそも差ひずみ(1-2)と差ひずみ(1-3)からは原理的に近い値が得られ易いため、インバージョンにおいて見かけ上 DRA 法の重みが大きくなることを緩和するためである。この方法は AE/DRA 法本来の狙いである応力データの相互検証を用いた場合に相当するが、データセットが成立する方向においてはセットを構成しないデータを除外するため使用データ数は 3 つの中で最も少なく、そのために最終結果がデータ全体を使った場合の傾向と異なる可能性が高い。

いずれもデータ全体を使うインバージョンからスタートして、ある方向のインバージョン後の直応力とその方向の試験片で計測した応力の差の絶対値（残差）の大きいものを除外するという基本的な考え方の基で行った。

インバージョンにおいては、ある基準直交座標軸 (X, Y, Z) と応力の 6 成分を設定して、それとある計測方向のなす方向余弦( $l_i, m_i, n_i$ )とその方向の計測した直応力  $\sigma_i$ を表す応力の座標変換公式 (下式) を基に、インバージョンマトリクスを構成する方法を用いた。

$$\sigma_i = (l_i^2 \quad m_i^2 \quad n_i^2 \quad 2l_i m_i \quad 2m_i n_i \quad 2n_i l_i)(\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yz} \quad \tau_{zx})^t \quad (2.1)$$

ここで、 $l_i, m_i, n_i$ はある計測方向と直交軸の各正方向 (X,Y,Z) の間の方向余弦、 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ は基準直交座標軸における応力テンソルの 6 成分、 $()^t$ は転置行列を表す。

この式を、計測した応力データ数分並べて観測方程式を構成し、右辺左側の方向余弦行列の逆行列を両辺の左側からかけることによる最小自乗法で、計測した応力データからもととの基準直交座標軸における応力テンソルを求めることができる。応力テンソルが定まった後に、各主応力方向とその大きさを数値解法により求めた。その後基準直交座標系から実座標系への変換を行っている。

## 2.4 測定結果および考察

### 2.4.1 AE 法

#### (1) リファレンス試験

AE 急増点の読み取り方法の決定などのために、一定時間人工応力を载荷した試験片を用いてリファレンス試験を実施した。リファレンス試験は DRA 法と合わせて実施した (表 2.3)。図 2.7 は、10kN の人工载荷をした試験片 (M1-I18022) を用いたリファレンス試験の結果の例である。AE 発生曲線は、AE 取得時の AE 振幅が AE 計測装置上で 40dB 以上のものについてのみ抽出し、累積 AE カウントを正規化して作成した。本図では、载荷直後にも一定数の AE の発生があるが、その後 10kN 付近から曲線の傾きが変化し始め 12kN 付近より AE が急増する。人工载荷の値が岩石試験片に記録され、その検出が十分行えていることが分かる。図中の桃色線は、前述した AE 発生曲線の幾何学的な変化度を表したもので、あらかじめ载荷した 10kN 付近に最も大きな変化度を示すところがあり、2 番目に大きな変化度を示すところが 12kN 付近にある。このことから発生率の変化を捉える方法でも AE 発生曲線上の急増点を評価可能であることが分かる。最も大きな変化度を示す荷重の読み取り値は 9.74kN となり、記憶させた荷重よりもやや低い値ではあるが、ほぼ記憶荷重を検出できていると考えられる。

表 2.3 リファレンス試験一覧

地点名	岩芯試料採取場所の掘削深度 (坑壁又は坑底面からの距離)	実験実施		リファレンス試験		DRA法 しきい値
		時期	試験片名	記憶荷重	記憶応力	
08MI14孔手前	3.0-4.0m	第2期	M1-L022	10.0kN	14.3MPa	◎(0.906, 0.876)
		第2期	M1-L9022	10.0kN	14.3MPa	△(0.743, 0.925)
		第2期	M1-I18022	10.0kN	14.3MPa	○(0.883, 0.924)
08MI14孔中間	7.0-8.0m	第2期	M1-I9011	10.0kN	14.4MPa	×
08MI14孔奥	14.1-15.1m	第1期	M1-I902	7.5kN	10.4MPa	×
08MI15孔中間	7.0-8.0m	第2期	M2-I27012	10.0kN	14.4MPa	×
08MI15孔奥	13.1-13.9m	第1期	M2-A1	9.9kN	13.7MPa	◎(0.906, 0.867)
08MI16孔中間	12.0-13.0m	第1期	M3-A13	10.0kN	13.8MPa	×
08MI16孔奥	17.4-18.6m	第1期	M3-A3	7.5kN	10.3MPa	×

\*しきい値の左側は差ひずみ(1-2)、右側は差ひずみ(1-3)のしきい値を示す。

◎、○、△、×は、しきい値としての良好度を示す。(◎:採用)

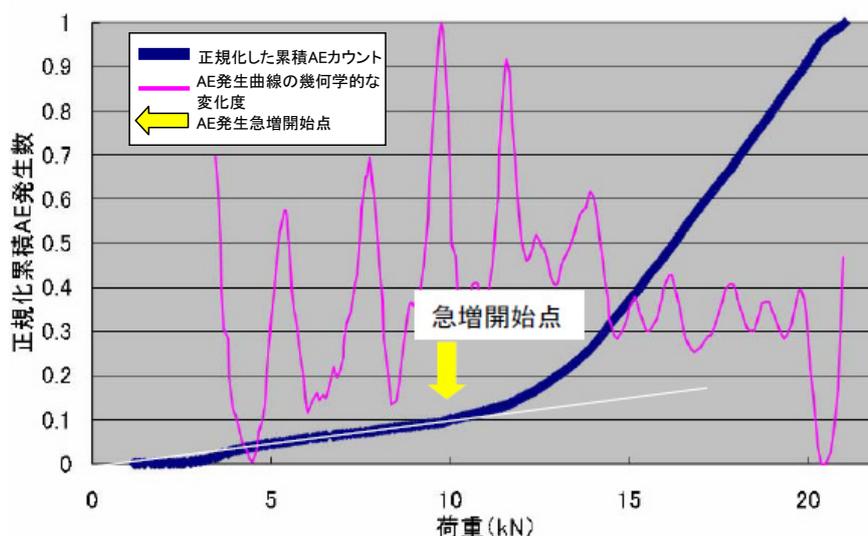


図 2.7 リファレンス試験時の AE 解析例 (M1-I18022)

(2) 原位置応力計測

図 2.8 にリファレンス試験に AE 発生数の増加状況が比較的近く、AE 発生曲線の急増開始点も比較的明瞭に見られる例（試験片 M1-L4511）を示す。桃色線は傾き変化度を表す。AE 発生曲線全体の傾向から見て、7.25kN もしくは 4.98kN が候補としてふさわしいと考えられる。このような AE の発生挙動であればリファレンス試験のしきい値を用いる方法でも解析は可能と考えられる。

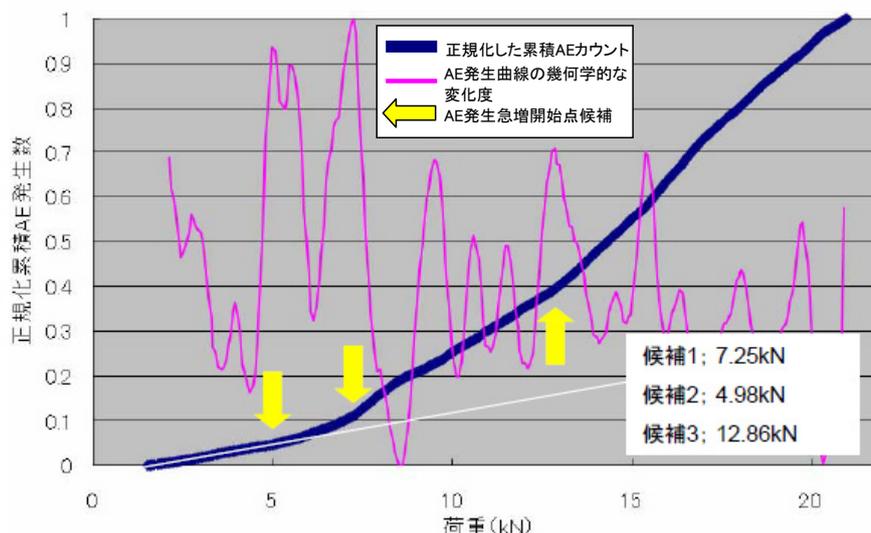


図 2.8 応力計測試験時の AE 解析例 (M1-L4511)

図 2.9 に荷重直後から AE が多く発生し、しばらくしてから傾きが変化する例（試験片 M3-I18021）を示す。低い荷重でも AE の発生率が高いのが特徴で 10kN 付近から 13kN 付近にかけて遷移的にさらに発生率が上昇する。桃色線は傾き変化度を表し、10.17kN が最も傾きの変化が大きく、候補 2~4 にかけては傾きの変化は大差ない。AE 発生曲線全体の傾向から見てこの 10kN 付近から 13kN の範囲が先行荷重として最もふさわしいと考えられるが、リファレンス試験のしきい値を用いる解析では、この試験片のような場合は低い荷重領域でも AE の発生率が高いので、低い荷重でしきい値を越えてしまうため先行荷重を過小評価してしまうことになる。

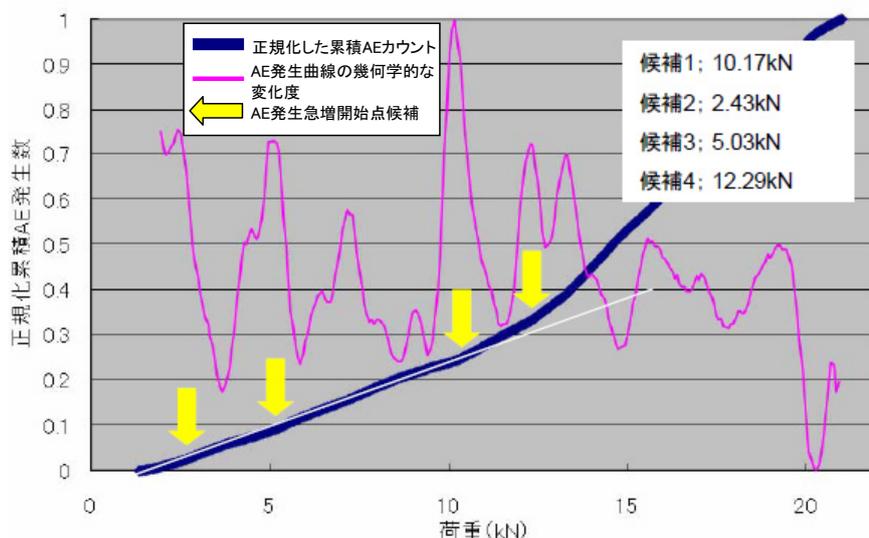


図 2.9 応力計測試験時の AE 解析例 (M3-I18021)

図 2.10 に AE 発生数増加における急増点が複数見られる例（試験片 M3-L022）を示す。5kN 付近および 12.5kN 付近の 2 箇所に発生数増加点が認められる。桃色線は傾き変化度を表し、それぞれの荷重に変化度の最大点と次点に対応していることが分かる。この図のように明らかな増加点が複数見られる場合は、どちらがふさわしいかの判断はこの試験片のみでは難しい。リファレンス試験のしきい値を用いる解析では、低い方の荷重のみを検知して高い方の増加点を全く無視してしまうことになるであろう。

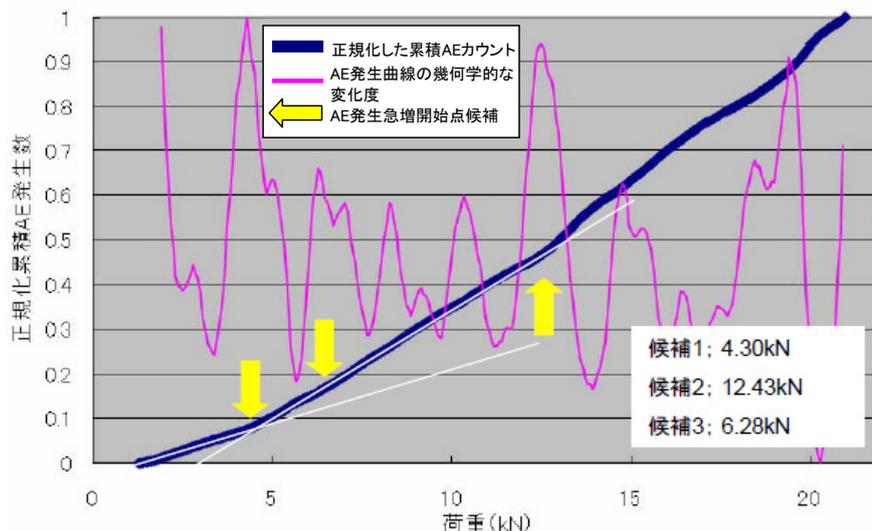


図 2.10 応力計測試験時の AE 解析例（M3-L022）

図 2.11 に AE 発生曲線が全体にやや上に凸になる例（試験片 M1-A12）を示す。15kN 以下の領域で AE の発生率が増減を繰り返しており AE 発生曲線が緩いステップ状になっていることも特徴的である。桃色線は傾き変化度を表し、傾きの変化度を用いる方法では各ステップからの立ち上がりを候補として捉えることができる。最も変化度の大きい 9kN 付近が有力候補と考えられるが AE 発生曲線全体の挙動からは判断が困難である。リファレンス試験のしきい値を用いる解析では、AE の発生率が単調に増加することを前提としているため、このような AE 発生挙動の場合はそもそも適用が困難と考えられるし、無理に適用しても AE の急増点に対応した値である保証はない。

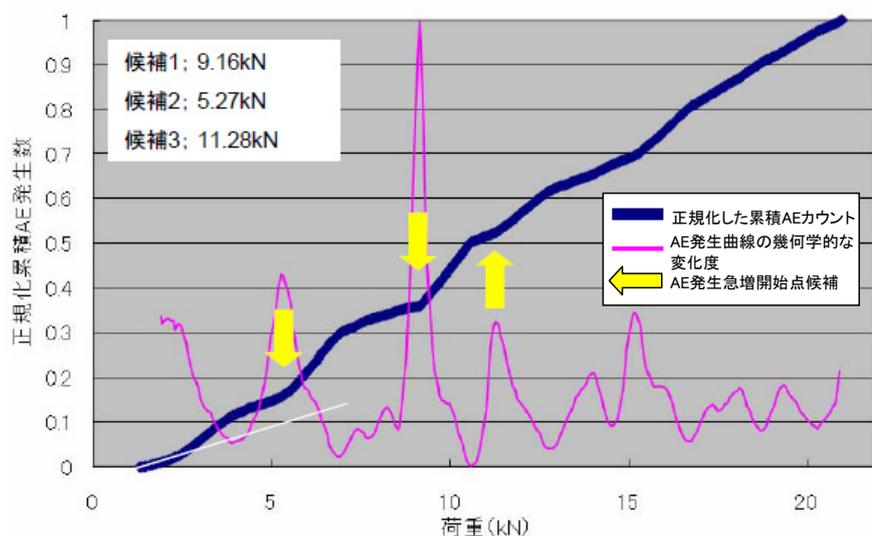


図 2.11 応力計測試験時の AE 解析例（M1-A12）

これまで示したように原位置応力計測の試験片の結果では、傾き変化度を計算することによって、リファレンス試験と大きく傾向の異なる AE 発生状態でも応力（候補）値を決めることが可能である。しかしながら、図 2.10 や図 2.11 のように複雑な曲線になる場合が多数あり、計算で変化度を求めても、AE 発生曲線全体として見たときの傾き変化の大きいところと一致しない場合や、曲線自体の傾き変化も不明瞭で判断が容易ではない場合なども多数あった。そこで、応力計測のとりまとめでは、DRA 法とあわせた解釈を行って応力値を決めることとし、AE 法では傾き変化度の大きさと AE 発生曲線全体の挙動を総合的に判断して順位を決め、候補点として 1 位から 3 位程度までを提示することとした。

## 2.4.2 DRA 法

### (1) リファレンス試験

リファレンス試験は第 1 期 4 個、第 2 期 5 個の合わせて 9 個の試験片について実施した。実験室での長時間定荷重载荷の影響自体は各試験片に明瞭に認められるものの、屈曲点が加えた応力値から相当ずれていたり、差ひずみ(1-2)と差ひずみ(1-3)の屈曲点が揃わなかったりと、基準としては良好ではない試験片も多く見られた。比較的良好と考えられる結果の中から、しきい値の近い 2 個の試験片の結果をそれぞれ第 1 期と第 2 期の基準しきい値として選んだ（表 2.3）。例として良好なデータが得られた M2-A1 試験片（第 1 期）を図 2.12 に示す。人工的に载荷した 13.7MPa よりやや大きい 14MPa 程のところに差ひずみの屈曲点がみられ、それよりも応力の低いところにリファレンス試験に特徴的な直線の差ひずみ増加部が見られる。応力-差ひずみの傾きを正規化すると、差ひずみ(1-2)ではしきい値 0.906、差ひずみ(1-3)ではしきい値 0.867 のところが、ちょうど 13.7MPa となる。このしきい値を用いて第 1 期の 4 ヶ所分の岩芯の現場応力の評価を行う。なお、第 2 期のリファレンス試験では、M1-L022 試験片から得られた、差ひずみ(1-2)でのしきい値 0.906、差ひずみ(1-3)でのしきい値 0.876 を用いて解析を行った。

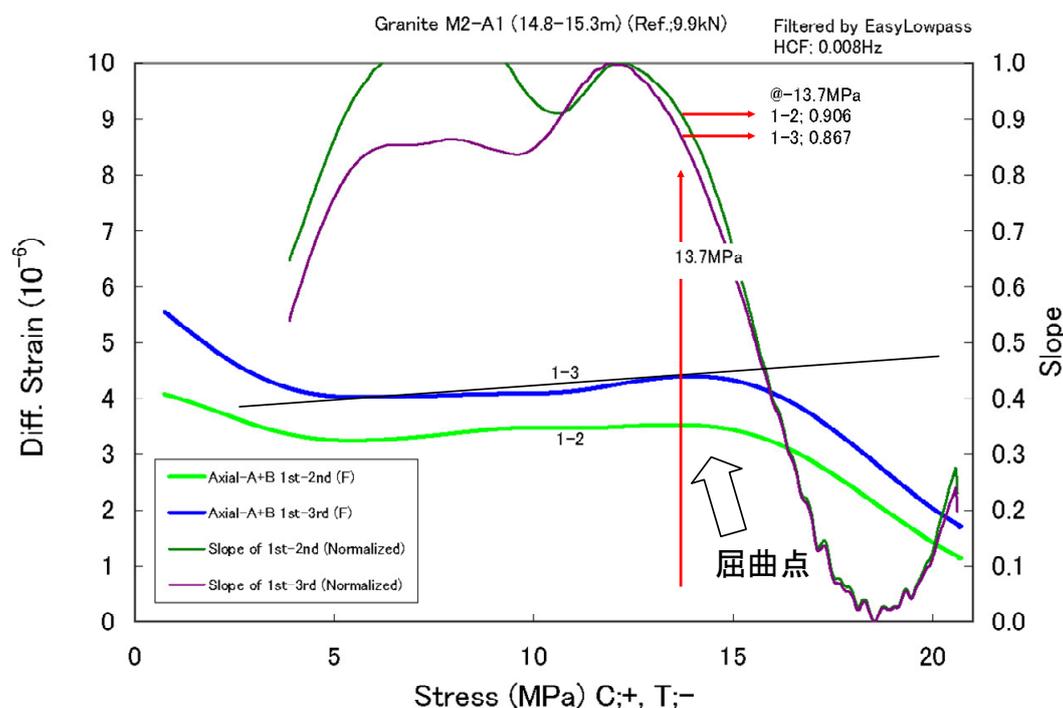


図 2.12 リファレンス試験時の DRA 解析例 (M2-A1)

(2) 原位置応力計測

例として第2期に実施した M2-I9012 試験片 (08MI15 孔中間) の解析結果を図 2.13 に示す。差ひずみ(1-2)でも差ひずみ(1-3)でもほぼ同じ応力のところに屈曲点があり、しきい値を用いた評価でもそれぞれ 10.9MPa、11.2MPa とほぼ同じ応力値が得られた。表 2.4 に各岩芯の計測実施試験片数と応力評価可能だった試験片数、計測効率を示す。計測効率とは、応力評価可能だった試験片数を計測実施試験片数で除したものである。試験片の中には良好な差ひずみ挙動を示さないものいくつか見られた。例えば、差ひずみ(1-2)と差ひずみ(1-3)の屈曲点を生じる応力値が大きく異なっているもの、屈曲点が明瞭でないもの、屈曲点が同じ曲線上に複数あるもの、屈曲点が逆方向に折れ曲がっているもの等である。後段の応力解析においてデータ不足にならないように、僅かでも屈曲点が見られればそれをデータとして用いることとし、ここでデータ採取できなかった試験片とは、全く応力値として評価できなかったもの、即ち差ひずみ(1-2)と差ひずみ(1-3)が共に屈曲点が明瞭でないか屈曲点が逆方向に折れ曲がっているものを示す。表 2.4 によると総じて奥の岩芯の方で計測効率が良く、坑壁に近いところでは計測効率が悪くなっている。これは、坑壁に近いところでは2次応力場の乱れや坑道掘削時のダメージの影響を岩芯が受けていることを示している可能性がある。孔毎では 08MI15 孔の効率が良い。計測時期に関しては 08MI16 孔中間のように岩芯採取直後でも効率の悪いもの、08MI15 孔中間のように半年後でも効率の良いものがあり一概には言えない。また 08MI14 孔手前や 08MI16 孔中間のように岩芯によって端的に計測効率が下がるものがあり、全体では 82%とやや低い計測効率となった。

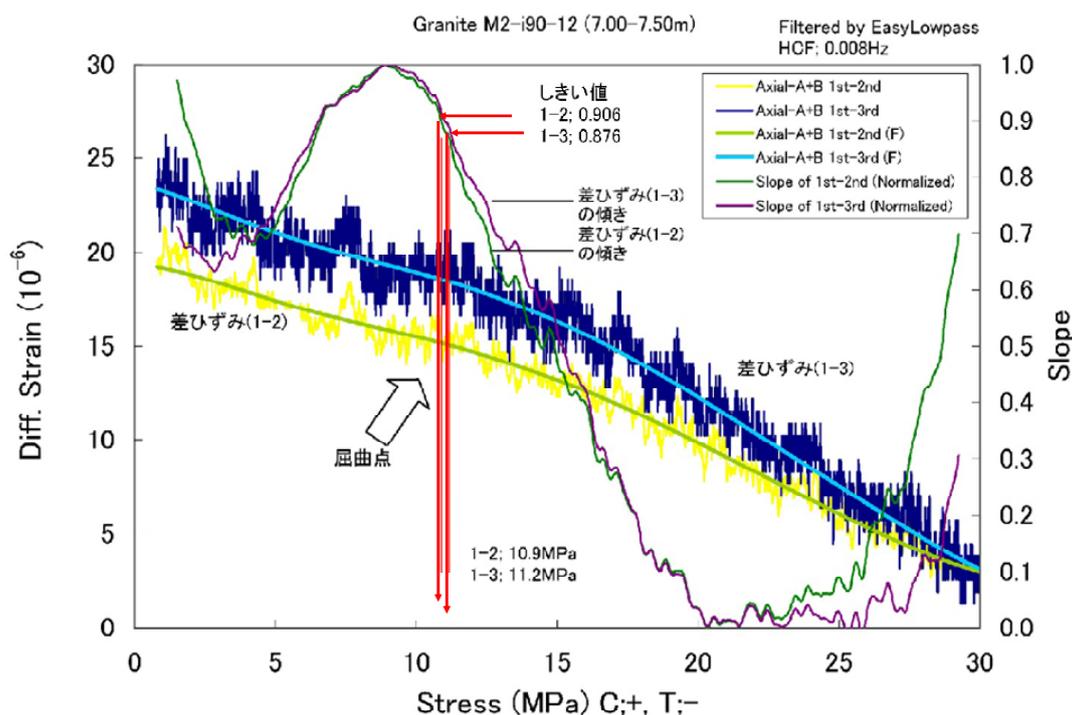


図 2.13 応力計測試験時の DRA 解析例 (M2-I9012)

表 2.4 各岩芯から作成し計測実施した試験片数と結果的に応力計測可能だった試験片数

地点名	岩芯試料採取場所の掘削深度 (坑壁又は坑底面からの距離)	実験実施 時期	試験片数	計測可能 試験片数	計測 効率
08MI14孔手前	3.0-4.0m	第2期	18	10	56%
08MI14孔中間	7.0-8.0m	第2期	17	15	88%
08MI14孔奥	14.1-15.1m	第1期	15	14	93%
08MI14孔			50	39	78%
08MI15孔手前	4.0-5.0m	第2期	13	11	85%
08MI15孔中間	7.0-8.0m	第2期	16	15	94%
08MI15孔奥	13.1-13.9m及び14.8-15.2m	第1期	18	17	94%
08MI15孔			47	43	91%
08MI16孔手前	5.1-6.2m	第2期	12	9	75%
08MI16孔中間	12.0-13.0m	第1期	16	10	63%
08MI16孔奥	17.4-18.6m	第1期	16	14	88%
08MI16孔			44	33	75%
全体			141	115	82%

### 2.4.3 AE/DRA 法

各ボーリング孔の各測定地点の AE 法と DRA 法の計測結果の比較を図 2.14a~i に示す。各地点の岩芯からの試験片切り出し時に設定した方向別に、複数の試験片があればまとめて比較して表示しているが、図 2.14f の 08MI15 孔奥では試験片切り出し方向の揃っていない 2 個の岩芯を用いているため方向数が多くなっている。例えば図 2.14a (08MI14 孔手前) を見ると M1-A21 試験片と M1-A22 試験片の計測結果からは、各試験片の AE 法の第 1 候補データ同士で 5MPa 前後に良い一致が見られる (黄色枠) と共に、DRA 法では 15MPa 前後に M1-A21 試験片の差ひずみ(1-3)を用いた結果と M1-A22 試験片の差ひずみ(1-2)と差ひずみ(1-3)を用いた結果の良い一致が見られる (黒色枠)。AE/DRA 法では 11~16MPa の範囲に先に述べた DRA 法のデータを含む各データと AE 法の第 2 候補による一致がみられる (赤色枠)。なお、図中のエラーバー付桃色丸印は前記の応力場インバージョンの方法 3 によるデータ絞り込み、つまり AE/DRA 法に準じた解析・インバージョンの結果を示したものであり、その絞り込みにより黄色枠のデータセット (AE 法の第 1 候補データ同士) は最終インバージョン結果の計算では除外されている。またある方向の試験片から得られた各データが全くばらついた場合は、同図の試験片 M1-L9023 の载荷軸方向の様にデータセットが構成できないこともある。AE/DRA 法の狙いから考えると、AE 法の第 1 候補と DRA 法の差ひずみ(1-2)と差ひずみ(1-3)を用いた値が合致することが期待されるが、そのような場合は全体を見ても少なく、図 2.14a では M1-L021 と M1-L023 の 9.5MPa 前後の赤色枠と M1-L13521 と M1-L13522 の 14MPa 前後の赤色枠の 2 方向分しかない。しかしながら AE 法を第 2 候補まで広げると M1-A21 と M1-A22 のように良い合致が得られる場合が見られ、AE/DRA 法のデータセットを表す赤色枠は全部で 5 方向まで増える。

全体的な傾向として見ると、同一方向の試験片が複数有る場合には AE/DRA 法の合致が最も多く、次いで AE 法同士、DRA 法同士の順になっている。また AE/DRA 法では試験片作成上の問題で同一方向の試験片が少ない 08MI15 孔奥 (図 2.14f) のような場合でもデータセットを構成できる利点がある。またデータのばらつきとしては、ある値の前後にデータが集中する M1-I011、M1-I012 試験片 (図 2.14b) のような場合のみならず、M1-L13511、M1-L13512、M1-L13513 試験片 (図 2.14b) の様に比較的大きい値と小さい値の二極にデータが集まる場合もよく見られた。AE 法において AE 発生率の一時的な増減が見られることや、坑道掘削に伴う応力場の変化を考慮すると、複数の応力値の記憶 (例えば 1 次応力場と 2 次応力場) が生じている可能性も考えられる。

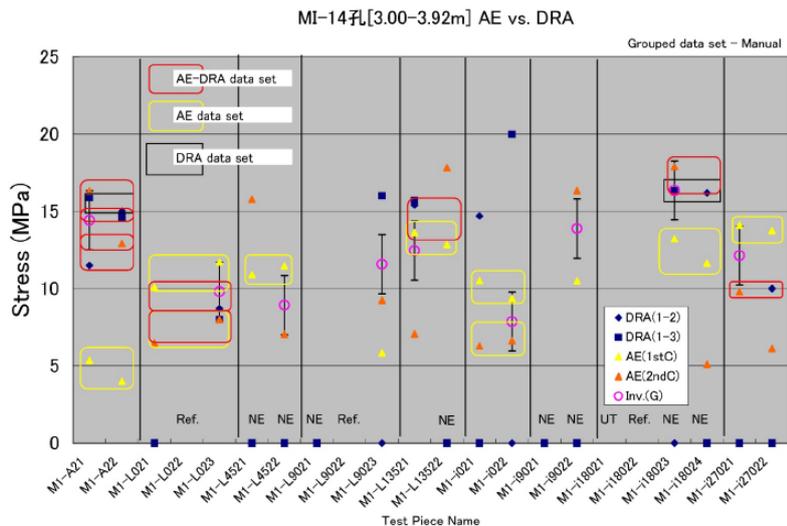


図 2.14a AE/DRA 法による解析 (08MI14 孔手前)

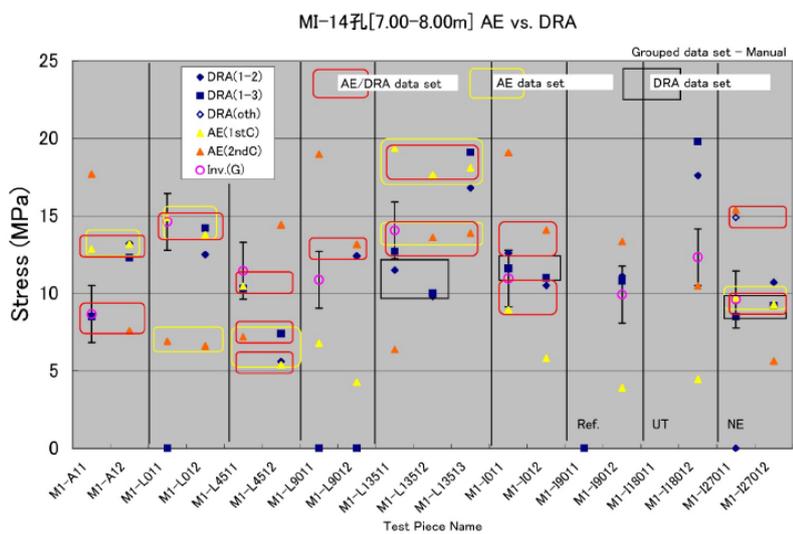


図 2.14b AE/DRA 法による解析 (08MI14 孔中間)

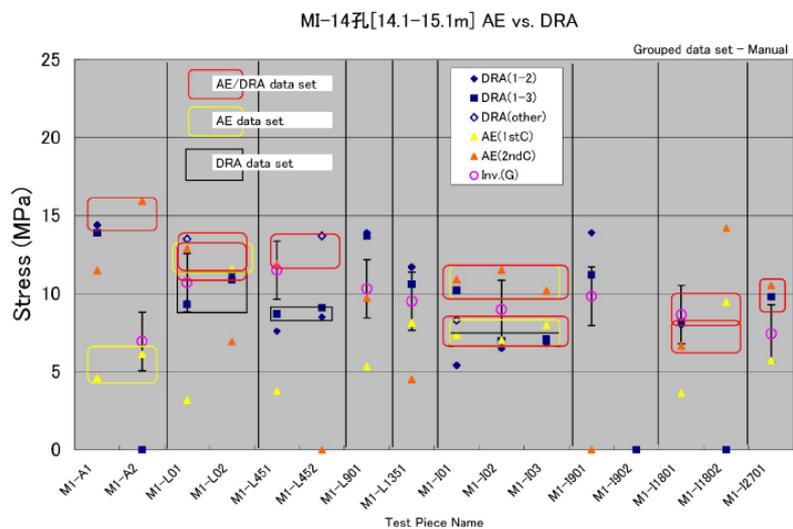


図 2.14c AE/DRA 法による解析 (08MI14 孔奥)

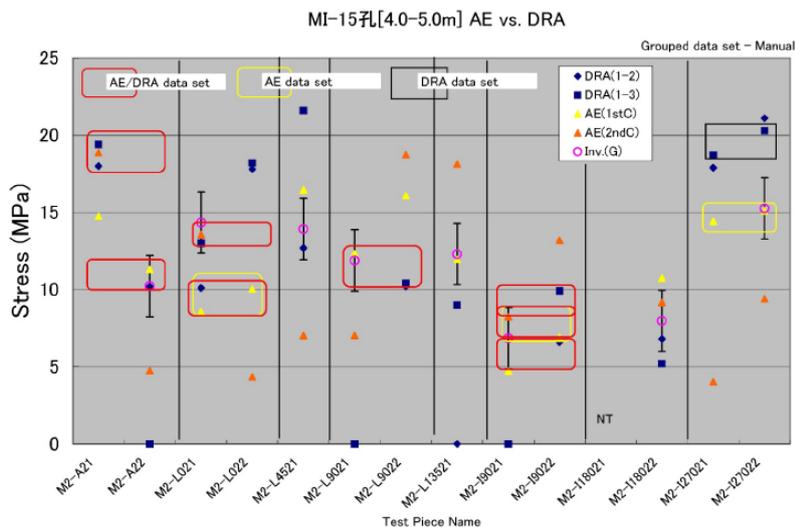


図 2.14d AE/DRA 法による解析 (08MI15 孔手前)

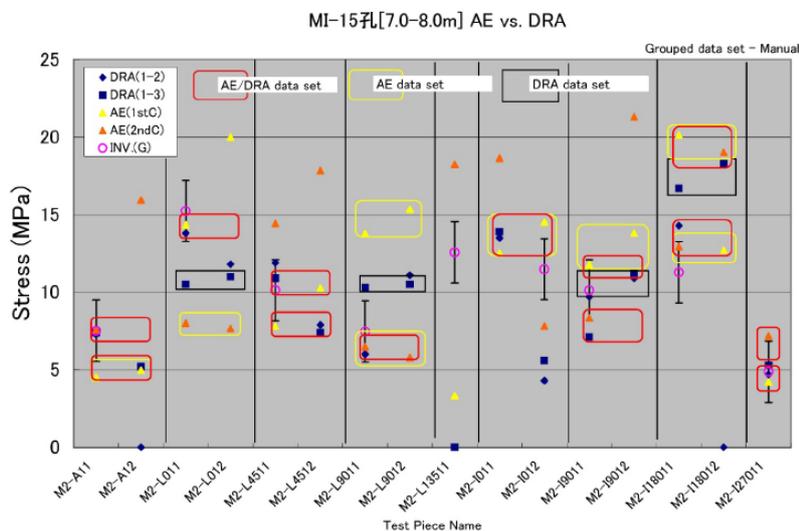


図 2.14e AE/DRA 法による解析 (08MI15 孔中間)

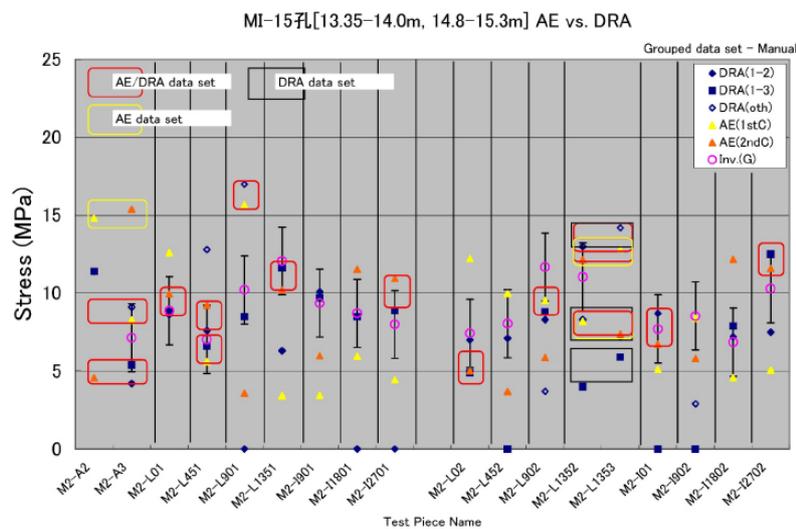


図 2.14f AE/DRA 法による解析 (08MI15 孔奥)

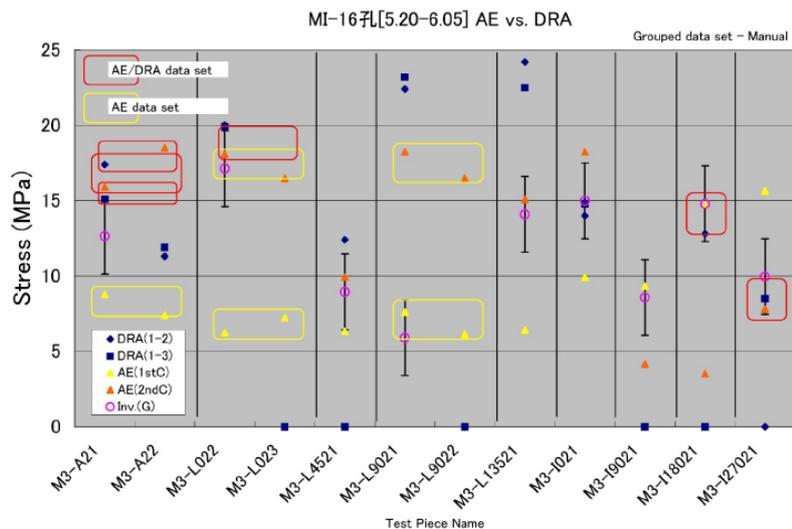


図 2.14g AE/DRA 法による解析 (08MI16 孔手前)

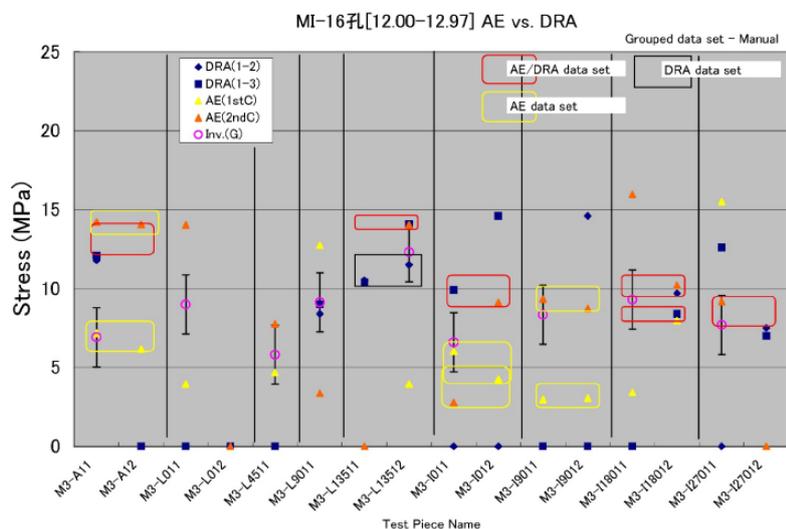


図 2.14h AE/DRA 法による解析 (08MI16 孔中間)

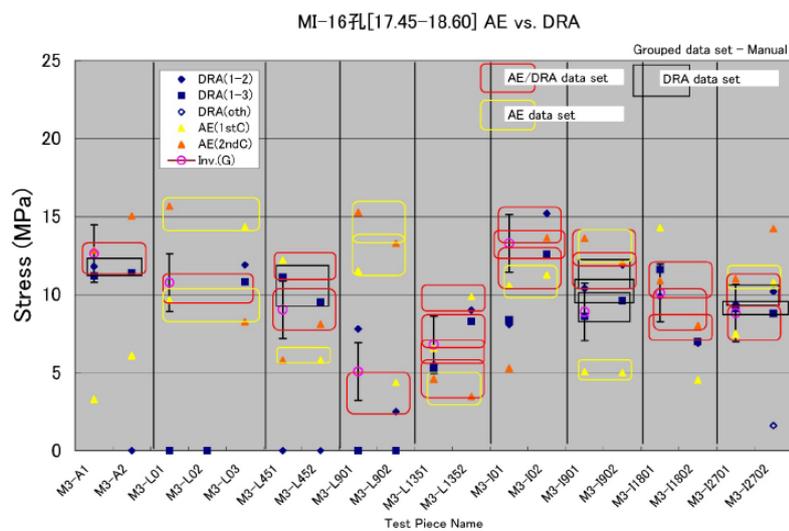


図 2.14i AE/DRA 法による解析 (08MI16 孔奥)

### 2.4.4 3次元応力の評価

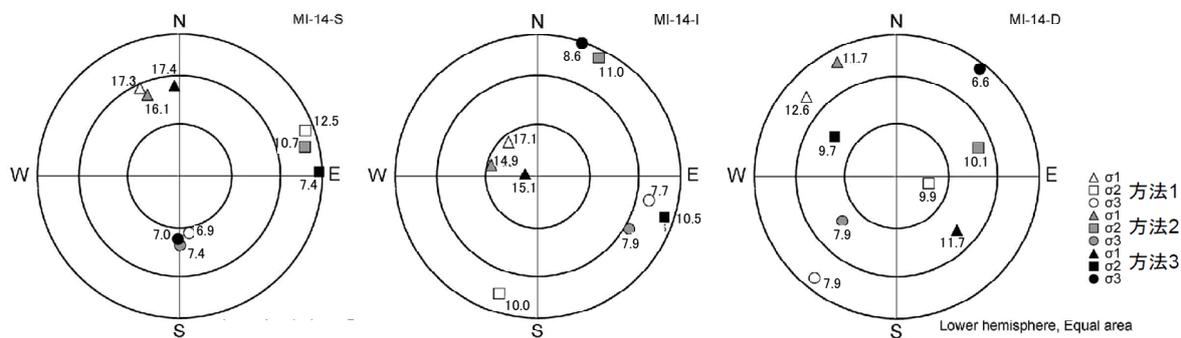
#### (1) データの絞り込み方法による違い

各孔の各地点ごとに3つの絞り込み方法によるインバージョン結果を、ステレオネット下半球投影の各主応力表示で図 2.15(a)~(i)に示す。図中の数値は応力値 (MPa) に対応する。主応力方向に関しては絞り込み方法による違いは総じて大きくなかったが、08MI14 孔奥 (図 2.15(c)) では全体にややばらついたり、08MI14 孔中間 (図 2.15(b)) では最大主応力 ( $\sigma_1$ ) 方向は揃っているが、方法 3 における中間主応力 ( $\sigma_2$ ) 方向と最小主応力 ( $\sigma_3$ ) 方向が他の 2 つによる方法の各方向と入れ替わっていたり、08MI16 孔中間 (図 2.15(h)) では  $\sigma_3$  方向は揃っているが、 $\sigma_1$  方向と  $\sigma_2$  方向についてはややばらついたりといった結果のばらつきも見られた。これは主にインバージョンに用いた応力値データ数の違い (方法 2 が最も多く方法 3 が最も少ない) と、同じ方向のデータでもばらつきにより大きい値と小さい値の二極になっていた場合でも、方法 1 と方法 3 では絞り込みによってどちらかを外す場合があったことによると考えられる。なお、08MI15 孔奥 (図 2.15(f)) についても方法 3 による  $\sigma_2$  方向と  $\sigma_3$  方向の他の 2 つによる方法の各方向との入れ替わりが見られるが、これは  $\sigma_2$  と  $\sigma_3$  の値が 7.1MPa と 6.8MPa とごく近く、応力場としては面内等方応力場に近いと考えられることから、この場合の  $\sigma_2$  と  $\sigma_3$  の区別には余り意味はないとも考えられる。各主応力値については方法 1 と方法 3 によるものが、方法 2 のものよりも主応力値間のコントラストが強くなる場合がみられるが、これも上記の絞り込みによるインバージョンに用いた応力値データの相対的な数の違いを反映しているものと考えられる。

#### (2) 主応力方向

孔別に見ると 08MI14 孔ではいずれの地点においても下半球の北西面に  $\sigma_1$  方向があり、その意味で全体的な傾向としては北西-南東方向の応力が大きい応力場と考えられるが、08MI14 孔中間では 9 地点中唯一  $\sigma_1$  方向が鉛直に近く評価されるなど各地点間のばらつきは大きい。08MI15 孔では奥から手前にかけて  $\sigma_1$  方向が南北低角から北西-南東低角を經由して東西低角へと回転するような傾向が見られる。換気立坑から比較的距離がある 08MI14 孔と 08MI15 孔の全体の傾向から見ると、初期応力場は  $\sigma_1$  方向が北西-南東で低角を示すと考えられる。特に 08MI14 孔奥と 08MI15 孔中間では、いずれも  $\sigma_1$  方向が北西-南東で低角、 $\sigma_2$  方向が鉛直に近く、 $\sigma_3$  方向が北東-南西で低角とほぼ同じ横ずれ断層型の主応力方向を示す。これらのばらつきを持つ北西-南東方向の応力が大きいという応力場は、水圧破碎法による応力計測<sup>9)</sup>によって得られた、深度 200~300m の水平面内最大主応力方向 ( $\sigma_H$ ) が、北西-南東を中心にばらつきのある結果と、ばらつきのある範囲も含めて整合的ではある。08MI14 孔中間では唯一  $\sigma_1$  方向が鉛直に近く評価されているが、主応力軸の一つ (方法 1 と 2 の  $\sigma_2$ 、方法 3 の  $\sigma_3$ ) がボーリング孔掘削軸方向付近に標定されており、岩芯を回転させれば  $\sigma_1$  方向が北西-南東で低角にもなることから、岩芯方位の決定に問題があった可能性もある。また、08MI15 孔奥では  $\sigma_1$  方向が南北方向中角で、 $\sigma_2$  の値が他の地点と比較して小さく、 $\sigma_2$  と  $\sigma_3$  の値が近い面内等方的な応力場の傾向が見られる。面内等方的な応力場はこの岩芯のみであり、測定地点近傍に比較的大きな不連続面があるなどの地質構造的な要因も考えられる。

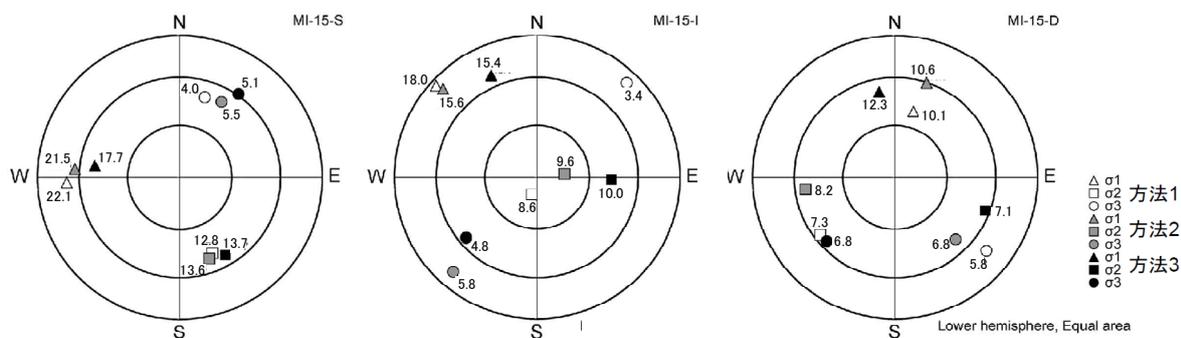
08MI16 孔では奥と中間において  $\sigma_1$  方向は東西方向で低角~中角、 $\sigma_3$  方向は南北方向低角を示すが、手前では  $\sigma_1$  方向は北西-南東で低角、 $\sigma_3$  方向は北東-南西方向低角へと東回りに 45 度ほど変化しており、孔口に近い地点の応力場が孔口から遠い 2 地点での応力場と異なるという特徴がある。奥と中間における主応力方向は 08MI14 孔・08MI15 孔とやや異なっており、換気立坑空洞の影響かどうか、また孔口に近い地点の主応力方向の回転がボーリング横坑空洞の影響かどうかを今後詳細に検討する価値がある。



(a) 08MI14 孔手前

(b) 08MI14 孔中間

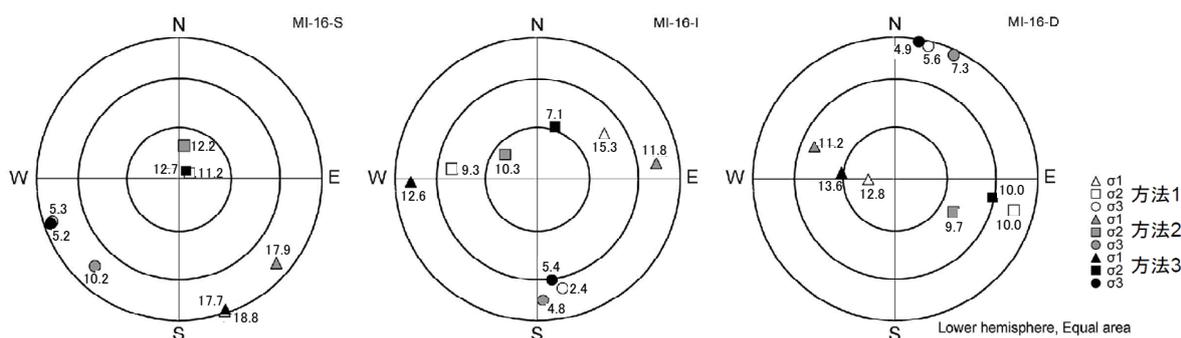
(c) 08MI14 孔奥



(d) 08MI15 孔手前

(e) 08MI15 孔中間

(f) 08MI15 孔奥



(g) 08MI16 孔手前

(h) 08MI16 孔中間

(i) 08MI16 孔奥

図 2.15 インバージョンにより求めた主応力方向とその大きさ

### (3) 主応力の大きさ

表 2.5 に各地点における計測結果の概要を示す。なお表中の主応力方向については最も使用データ数が多く基になるデータセット全体の傾向に近いと考えられる絞り込み方法 2 を基準に、絞り込み方法 1 と 3 については各主応力方向が絞り込み方法 2 に近いデータセットのみを表示している。主応力の大きさについては、絞り込み方法 2 で比較すると、08MI14 孔では  $\sigma_2$  が 10.5MPa 前後、 $\sigma_3$  が 7.7MPa 前後とほぼ変わらないのに対して  $\sigma_1$  は奥から手前にかけて値が大きくなる傾向が見られる。08MI15 孔では  $\sigma_1$  が奥から手前にかけて値が大きくなる傾向は 08MI14 孔と同様であるが、各地点間の応力差が 5MPa 以上と応力変化の程度が大きい。08MI15 孔では  $\sigma_2$  も奥から手前にかけて値が増加し、 $\sigma_3$  は逆に奥から手前にかけて若干値が減少する。08MI16 孔では  $\sigma_1$  が奥と中間で 11.5MPa 前後とほぼ変わらないのに対して手前では 17.9MPa と急増する。 $\sigma_2$  についても奥と中間では 10MPa 前後の値が手前では 12.2MPa と若干大きくなる。 $\sigma_3$  は奥と中間で値にやや差があるが、やはり手前の値が若干大きくなる。08MI14 孔と 08MI15 孔では奥から手前にかけて特に  $\sigma_1$  が増加する傾向が見られる。08MI16 孔では手前の主応力値が全体に大きく特に  $\sigma_1$  は 50%以上も急増する。各孔で孔口に近い方の地点で応力値が大きくなっている傾向は坑道の影響の可能性が示唆される。ただし応力値は深度 200m 近辺の土被り圧から予想される値 4.1MPa<sup>4)</sup>を大きく越える最大 21.5MPa の応力値が得られている。一方で水圧破砕法による応力計測のデータ<sup>5)</sup>によると水平面内最大主応力方向 ( $\sigma_H$ ) は 12MPa 前後、水平面内最小主応力 ( $\sigma_h$ ) は 7MPa 前後と考えられることから、08MI14 孔奥や 08MI16 孔奥の値はそのデータと整合的である。

表2.5 各地点における計測結果の概要

地点名	岩芯試料採取場所の掘削深度 (坑壁又は坑底面からの距離)	全応力 データ数	データの 絞り込み	使用 データ数	平均残差			主応力値			平均 応力 (MPa)	主応力方向		
					(MPa)	$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_2$ (MPa)	$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_2$ (MPa)		$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_1$ 方位/傾斜	$\sigma_2$ 方位/傾斜
08MI14孔手前	3.0-4.0m	46	方法1	37	1.95	17.3	12.5	6.9	12.2	N24W/33D	N70E/7D	N171E/56D		
			方法2	41	2.65	16.1	10.7	7.4	11.4	N22W/38D	N77E/11D	N180E/50D		
			方法3	33	1.91	17.4	7.4	7.0	10.6					
08MI14孔中間	7.0-8.0m	63	方法1	48	1.99	17.1	10.0	7.7	11.6	N40W/74D	N162W/14I	N103E/21D		
			方法2	60	2.97	14.9	11.0	7.9	11.3	N76W/62D	N27E/7D	N120E/27D		
			方法3	29	1.83	15.1	10.5	8.6	11.4					
08MI14孔奥	14.1-15.1m	55	方法1	48	1.99	12.6	9.9	7.7	10.1	N49W/26D	N78E/71D	N141W/9D		
			方法2	49	2.24	11.7	10.1	7.9	9.9	N27W/10D	N71E/39D	N129W/49C		
			方法3	37	1.87	11.7	9.7	6.6	9.3					
08MI15孔手前	4.0-5.0m	46	方法1	33	1.96	22.1	12.8	4.0	13.0	N87W/22D	N157E/42C	N17E/41D		
			方法2	42	2.94	21.5	13.6	5.5	13.5	N86W/27D	N160E/39D	N28E/39D		
			方法3	23	1.98	17.7	13.7	5.1	12.2					
08MI15孔中間	7.0-8.0m	60	方法1	47	1.97	18.0	8.6	3.4	10.0	N47W/4D	N163E/80C	N43E/9D		
			方法2	56	2.85	15.6	9.6	5.8	10.3	N46W/10D	N82E/74D	N139W/12C		
			方法3	35	1.97	15.4	10.0	4.8	10.1					
08MI15孔奥	13.1-13.9m及び14.8-15.2m	72	方法1	59	2.00	10.1	7.3	5.8	7.7	N15E/50D	N128W/34I	N129E/19D		
			方法2	66	2.45	10.6	8.2	6.8	8.5	N18E/30D	N97W/37D	N136E/39D		
			方法3	40	2.18	12.3	6.8	7.1	8.7					
08MI16孔手前	5.1-6.2m	39	方法1	26	1.85	18.8	11.2	5.3	11.8	N161E/11C	N62E/83D	N109W/7D		
			方法2	38	4.36	17.9	12.2	10.2	13.4	N131E/11C	N8E/70D	N136W/16C		
			方法3	21	2.51	17.7	12.7	5.2	11.9					
08MI16孔中間	12.0-13.0m	42	方法1	31	1.97	15.3	9.3	2.4	9.0					
			方法2	41	2.92	11.8	10.3	4.8	9.0	N83E/17D	N53W/67D	N177E/15D		
			方法3	26	1.87	12.6	7.1	5.4	8.4	N91W/12D	N18E/58D	N172E/29D		
08MI16孔奥	17.4-18.6m	66	方法1	57	1.99	12.8	10.0	5.6	9.5					
			方法2	66	2.65	11.2	9.7	7.3	9.4	N68W/39D	N120E/51C	N25E/4D		
			方法3	49	1.84	13.6	10.0	4.9	9.5	N84W/59D	N101E/31C	N10E/2D		

方位は下向き方向の水平面内投影  
傾斜xxDは水平面からの下向きの角度を示す

## 2.5 まとめ

坑道周りの応力場計測を坑道からの距離や位置関係を変えて 3 孔 9 地点分について AE/DRA 法を適用し実施した。AE 法では AE の発生状況が複雑であったため、AE の発生曲線の傾きの変化から AE の急増点を調べ曲線全体の傾向もふまえて複数の候補値を抽出する方法で応力値の算出を行った。DRA 法では差ひずみ曲線の屈曲点前後の傾きを正規化してしきい値を用いる方法が適用可能であったが、差ひずみ曲線の屈曲が弱い等、試験片の中には良好な差ひずみ挙動を示さないものが見られ、全体の計測効率は 80%強と必ずしも高くない。このように岩石試料の応力の記憶が弱いともとれるような傾向は、坑道掘削そのものも含めて発破やグラウト注入等の坑道掘削に伴う諸作業による岩盤状況の変化にともなうものである可能性が考えられる。結果として、岩芯から作成した個々の試験片において得られた応力値のばらつきが大きかったものの、AE/DRA 法により十分な数の応力値データが得られたため、インバージョンを含めた解析法を工夫することにより個々の計測地点においては概ね安定して三次元応力場のデータを得ることに成功した。 $\sigma_1$  方向については 08MI14 孔中間を除いて東西～（北西－南東）～南北の範囲に評価され、ばらつきも含めて概ね水圧破碎法のデータと整合的な結果が得られた。08MI14 孔では奥から手前にかけて $\sigma_1$  方向で東回りに 45 度、08MI15 孔では奥から手前にかけて $\sigma_1$  方向で東回りに 90 度の方向変化が見られた。これについてはほぼ同一深度の水圧破碎法のデータもばらついていることから、いわゆる掘削影響領域に関わるものであるかどうかは判然としないが、少なくとも孔口近くの地点の応力場が中間地点・奥地点とは異なるという結果は得られた。08MI16 孔においては孔口近くの地点と中間地点・奥地点の主応力方向の傾向が異なり坑道の影響をうかがわせる。こちらは今後モデル等で検討することにより坑道掘削との関係を明らかにすることも可能と考えられる。主応力の大きさについては、08MI14 孔奥や 08MI16 孔奥のように水圧破碎法と比較して妥当な値が得られているものもあるが、各孔とも孔口近くの地点が主応力間のコントラストが強くなる傾向が見られた。こちらも坑道掘削の影響をうかがわせるものの、全体的に被りの割に高めの主応力値が得られており、孔口近くの値の増加が坑道掘削の影響として妥当かどうかの検討が必要である。以上のように掘削影響領域に関わる応力変化の傾向を捉えている可能性があるデータを得たが、その確度に関しては今後モデルによる検討が必要である。

### 3. 岩芯採取時振動を用いた地質構造評価

#### 3.1 概要

ボーリング掘削時の振動を地下構造把握に用いることは、石油や地熱を対象とする物理探査の分野で **Seismic While Drilling (SWD)** 法と称され、トリコーン・ビットと呼ばれる全断面掘削ビットを用いることを前提に、規模の大きな掘削を対象にして 1990 年前後より検討されている<sup>8,9)</sup>。これらの研究では従来法に近い良好な探査成功事例もいくつか報告されているものの、その多くが一般の反射法地震探査と同じように、広大な送受信点展開面積が必要な多点観測方式を採用し、対象とする掘削の規模の大きさとも相まって、高レベル放射性廃棄物の処分施設のような大深度かつ広範囲に小規模な地下空洞を展開した施設で活用することは不可能であった。そこで、**SWD** 法を大深度かつ広範囲に小規模な地下空洞を展開した施設で活用するための技術基盤の構築を目指した研究として、**SWD** 法の極小規模掘削への適用、コア掘削方式への適用、堆積軟岩掘削時の振動データの利用、掘削方式の違いの影響評価、極少数点孔内観測方式の高精度化のための信号処理法の開発、掘削振動による岩盤弾性波伝搬速度推定の試みなどが行われている<sup>例えば10,11,12)</sup>。これらの研究では、高レベル放射性廃棄物の処分施設で想定されている大深度かつ広範囲に小規模な地下空洞を展開した地下の施工環境下でも、**SWD** 法を使って地下空洞周辺の地質構造状況を一定レベルで把握できる可能性がある知見が得られている。**SWD** 法からの地質構造の知見と、他の情報、例えば地下応力評価やモデリング手法などと組み合わせれば、地下空洞の長期安定性評価法を構築できる可能性も高い。

以上の背景を踏まえ、本研究では大深度地下に坑道が掘削されている瑞浪超深地層研究所を実験サイトとし、**SWD** 法による地下空洞安定性評価に資する地下情報抽出の可否を検討した。本章では、瑞浪超深地層研究所の深度 200m レベルに掘削したボーリング横坑内で行われたコアボーリングにおいて掘削振動を取得し、空洞周辺の地質構造評価を試みた結果を報告する。

#### 3.2 掘削振動を用いた地質構造評価方法

##### 3.2.1 基本概念

本手法の一番の特徴は、一般の弾性波を用いる物理探査手法とは異なり、計測評価対象地域周囲において何らかの作業活動で発生する振動や自然に発生する振動を受動的に取得し、それを弾性波震源として活用することにある。このことは、(i)人工震源および受信点の広大な展開が困難な小規模な地下空洞内部での実施可能性、(ii)他目的の作業活動の波及的利用による低コスト性、(iii)長期間連続観測や送受信点配置に応じた広い範囲の評価が比較的容易に行える、などの観点で高レベル放射性廃棄物の処分施設で想定されるような大深度かつ広範囲に小規模な地下空洞を展開した施設での有用性が高いと考えられる。本手法は基本的にどのような弾性波震源であっても信号処理を行うことで活用することが可能であるが、本研究では、発生位置をある程度特定することが可能でエネルギーも比較的大きく、実際の地層処分施設建設時には多くの地点で実施されると考えられるボーリング掘削時の振動に注目している。対象として考えられる掘削行為は、主立坑や横坑の施工時に行われる穿孔ボーリング、地質や力学調査あるいは水理試験研究のためのボーリングなどがある。また、主立坑や横坑掘削時の発生振動も利用可能な震源の一つである。前述のように、従来の **SWD** 法では規模の大きなトリコーン・ビットによる全断面掘削方式のみが利用されてきたが、本研究では、それと比較して極めて規模の小さい力学調査用岩芯採取のためのコアボーリングを対象としている。これについては、発生エネルギーが小さいこと、主たる

振動発生位置が不明瞭であることなど、従来よりも震源としての利用が容易ではないことが明らかになっており<sup>13)</sup>、その対策は研究課題の一つである。

掘削振動の観測については、観測用ボーリング孔に3成分弾性波検出器を設置する孔内多成分観測の形態を採用する。これは、地表面にジオフォンを多数設置する一般的な地震探査の観測方法に比べると、(i)少ない観測点数（理論的には1点以上）で3次元的な地下イメージングが可能である、(ii)観測点数が相対的に少ないため、観測自体は簡便で低コストである、(iii)力学試験や水理調査など他の目的で掘られたボーリング孔を利用することができる、(iv)空洞表面から離れた岩盤内部に観測器を設置するため、空洞内の作業騒音等の影響を受けにくく、高SN比の振動取得が期待できる、(v)狭い空洞内部を占有する面積が少なく他の作業との両立が容易であり、長期間の連続観測も実現し易い、などの長所を有している。

掘削振動を弾性波震源として利用する場合、震源の違い以外には基本的には通常の物理探査手法に近い観測システムの適用が可能である。ここでは、地下空洞の安定性評価に資することを目的に、岩盤の弾性波伝搬速度の推定と空洞周辺の反射イメージングによる掘削影響領域を含む地質構造評価を試みる。弾性波伝搬速度は、岩盤の劣化の程度などを簡便に把握する方法として広く用いられており、地下空洞周辺の掘削影響領域もこのパラメータで評価できることが知られている。掘削振動の蓄積により、地下空洞周辺の弾性波伝搬速度の空間的な分布を知ることができれば、岩盤の力学物性分布の把握という観点で有用性は高い。さらに、反射イメージングは、空洞周辺の亀裂や地層境界等の不連続構造の抽出に適しており、空間的に広がりのある空洞安定性評価モデル等の構築に資することができる。図 3.1 には、地層処分施設を想定した掘削振動を用いる地質構造評価方法の概念図を示す。

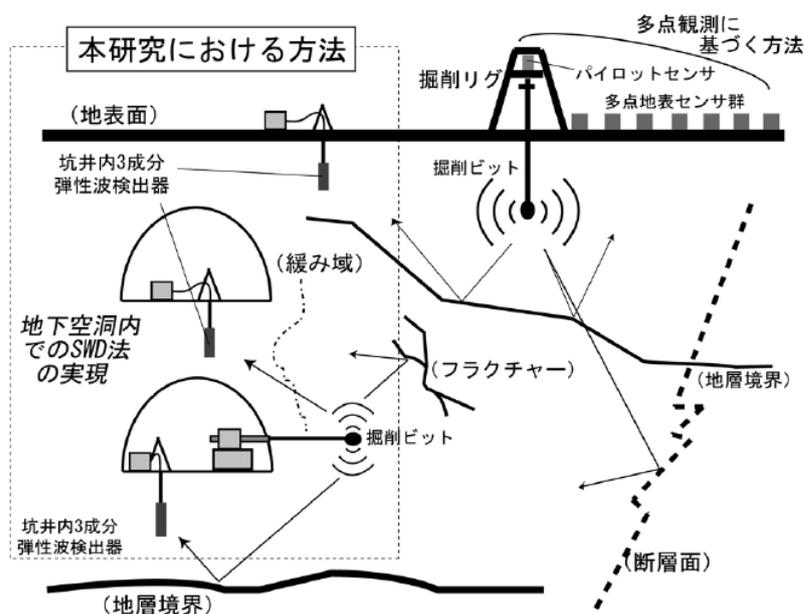


図 3.1 掘削振動を用いる地質構造評価方法の概念図

### 3.2.2 弾性波伝搬速度推定法

掘削振動の伝搬経路上における弾性波伝搬速度は、掘削ビット自体の振動成分（リファレンス）と離れた位置の観測点での受信振動成分（透過波）との相互相関解析により求められる時間遅れと、両者の位置関係により推定が行える。ここで理想的には、リファレンス振動としては掘削ビット自体の振動を得ることが最適であり、その目的で掘削ビット直上に無線通信装置や記録メモ

りを搭載した振動記録ツールをセットしたり、特徴的な振動特性を持つ掘削ビットを開発した事例も報告されているが、本研究において主張する簡便低コストという特長と背反する方向性になるため、ここでは採用しない。本研究では、掘削装置の掘削ロッドの地上側端部付近（スイベルと呼ばれる）に加速度センサを設置し、掘削ロッドの材質の弾性波速度で時間補正したものをリファレンス波形として使用した。ここで、補正のための弾性波速度は鉄またはステンレス材料を想定した上でやや遅めの 5500 m/s としたが、掘削ロッド長さが孔間距離に比べて十分小さいため時間補正值は極小さな値となり、岩盤の弾性波伝搬速度の分布傾向を調べる上ではその影響は小さいと考えられた。

ある経路で岩盤中を伝わる弾性波の平均的な弾性波伝播速度  $V$  は、以下の式により推定できる。

$$V = \frac{L_{12}}{\tau_{\max}} \quad (3.1)$$

ここで、 $L_{12}$  は掘削孔と観測孔の間の距離、 $\tau_{\max}$  は掘削装置上センサの受信信号  $s_1$  と観測孔での受信信号  $s_2$  の間のディレイ（時間差）である。

2 信号  $s_1$ 、 $s_2$  の相互相関関数  $C_{12}(\tau)$  は、

$$C_{12}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s_1(t) s_2(t + \tau) dt = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{S}_{12}(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (3.2)$$

と定義される。ここで、 $T$  は信号の時間区間、 $\tau$  はディレイ（時間差）、 $t$  は時間、 $\mathbf{S}_{12}(\omega)$  は 2 信号  $s_1$ 、 $s_2$  のクロススペクトル、 $\omega$  は角周波数、 $i$  は虚数単位である。(3.2) 式のように、時間領域で時間遅れ  $\tau$  ずらして積の時間平均を取る演算は、周波数領域ではクロススペクトルの逆フーリエ変換として定義される。掘削装置上センサと観測孔からの記録波形との相互相関関数を(3.2) 式で計算することにより、両者の時間遅れが検出でき、伝搬経路上の弾性波伝搬速度を推定することができる。

これまでの研究で、コアボーリング掘削では従来のトリコーン・ビットによる全断面掘削に比べて周期的なノイズ成分が重畳し易いことが分かっている<sup>13)</sup>。相互相関の計算においては、取り扱う信号が特定周期成分の卓越した特性の場合には、計測対象の真の地下構造とは無関係に周期成分に対応したピークが強く現れてしまう。そこで本研究では信号状況に応じて、周波数特性の影響を低減する SCOT 法と呼ばれる一般化相互相関計算手法<sup>例えば、14)</sup>と、予測可能な周期ノイズ成分を除去できる適応フィルタ処理<sup>例えば、15)</sup>を施すこととする。

SCOT 法による相互相関関数  $C_{12\_scor}(\tau)$  は、

$$C_{12\_scor}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\mathbf{S}_{12}(\omega)}{\sqrt{\mathbf{S}_{11}(\omega)\mathbf{S}_{22}(\omega)}} e^{i\omega\tau} d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} coh12(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (3.3)$$

で定義される。ここで、 $\mathbf{S}_{12}(\omega)$  は 2 信号  $s_1$ 、 $s_2$  のクロススペクトル、 $\mathbf{S}_{11}(\omega)$ 、 $\mathbf{S}_{22}(\omega)$  はそれぞれ信号  $s_1$ 、 $s_2$  のパワースペクトル、 $coh12(\omega)$  は 2 信号のコヒーレンス関数を意味する。本式のように、SCOT 法では 2 信号のコヒーレンス関数の逆フーリエ変換により相互相関関数が算出される。コヒーレンス関数は、2 信号の振幅の大小に関わらずに周波数成分毎の線形性（≒類似性）の程度を

反映するため、特定の周波数成分に強くノイズが重畳していても2信号に類似成分として存在していなければ、その影響を受けずに、相関性の高い周波数成分の寄与のみによって2信号間の時間差を正確に推定することができる。

一方、電氣的ノイズの混入や振動源自体が周期的である場合などには、2信号中に同じ周期成分が存在することになり、SCOT法のみでのノイズの影響除去は困難なことが予想される。その場合には、適応フィルタにより予測可能成分を抽出して周期信号成分を除去することができる。図3.2に適応フィルタの概念図を示す。適応フィルタの係数を $w_j$ とすると、入力信号 $x_j$ に対する出力 $y_j$ は、

$$y_j = \sum_{n=1}^M w_N x_{j-n} \tag{3.4}$$

ここで、 $j$ は時間についての添字 ( $j=1, 2, 3, \dots, N$ )、で表される。適応フィルタでは、出力信号 $y_j$ と目的とする信号 $d_j$ との比較を行って、誤差 $e_j$

$$e_j = d_j - y_j \tag{3.5}$$

のパワーを最小とするように自分自身のフィルタ特性を修正していく。本研究では、適応フィルタ最適化の目的信号として掘削音の観測信号自身を用いることによって線形予測器を構成し、過去のデータにより予測可能な成分と適応フィルタによる予測が困難なランダムな白色成分とに分離する。ビットから放出される掘削音がランダムな予測困難成分であると考え、線形予測の誤差 $e_j$ をビットからの掘削音成分であるとみなし、周期成分の影響を抑圧した掘削振動信号として解析に使用する。

これらの信号処理を用いることで、掘削振動が正常に伝搬して受信されていれば、弾性波伝搬速度の推定結果の分布は岩盤の特性を反映したものとなることが期待できる。過去の研究における硬岩小トンネルでの適用結果では、信号レベルが微弱であったものの、空洞壁面近傍に弾性波速度の分布の分散が大きくなり奥に進むにつれて速度推定結果が安定してくるという結果が得られている<sup>16)</sup>。

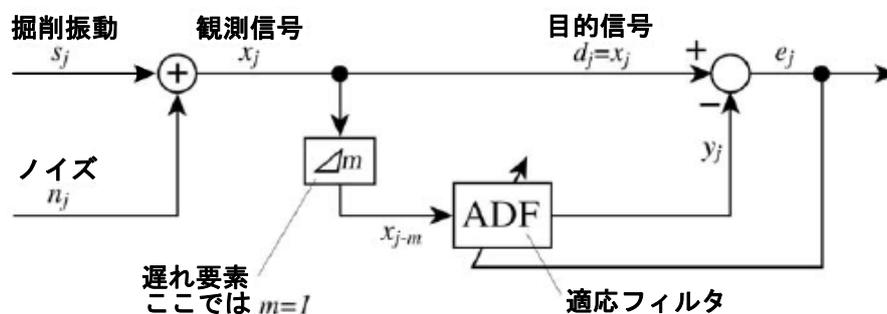


図 3.2 本研究における適応フィルタリング構成の概念図

### 3.2.3 反射イメージング法

極少数観測点での孔内 3 成分弾性波観測に基づく SWD 法による反射イメージング法は、浅沼らにより 3 軸 VSP 法<sup>8)</sup>と称して提案されており、これまでは主に規模の大きな地熱開発等の掘削に対して実績を挙げている。本手法は、掘削振動の 3 次元粒子運動軌跡 (3 次元ホドグラム) の時空間相関解析により反射波の検出を行い、地下構造を推定する手法である。通常、震源が掘削ビットであり地盤内部に位置するため、送受信点の位置関係が逆 VSP 法と類似になることから“VSP 法”と呼称されている。これまでの研究において、高レベル放射性廃棄物の処分施設で想定されるような大深度かつ広範囲な地下施設を対象とした 3 軸 VSP 法の適用を検討し、小型化や堆積岩部への適用など一定の成果が得られている。

3 軸 VSP 法の解析の流れを概説する。まず本方法は、弾性波受信時に高精度な 3 次元粒子運動軌跡が記録できることを前提としており、用いる弾性波センサが直線位相特性および十分小さな感度差とクロス感度を満足していることが必須である。このような条件下では、観測される 3 次元振動信号をベクトル情報として取り扱うことが可能になる。簡単のため図 3.3 のように 2 次元で考えると、震源 (掘削ビット) からの直接波と反射体からの反射波が存在しそれらが平面波でモード変換が存在せず減衰が小さく媒質が均質である (ただし散乱点を含む) と仮定するとき、P-SV 面での 3 次元粒子運動の離散時系列ベクトルは以下の式のように表すことができる。

$$\vec{O}(nT) = \vec{P}(nT) + \vec{SV}(nT - \tau_S) + \sum_{i=1}^m k_{Pi} A_i \vec{P}_i(nT - \tau_{Pi}) + \sum_{i=1}^m k_{Si} A_i \vec{SV}_i(nT - \tau_{Si}) \quad (3.6)$$

ここで  $\vec{P}(nT)$ 、 $\vec{SV}(nT)$ 、 $\vec{P}_i(nT)$ 、 $\vec{SV}_i(nT)$  は、それぞれ直達 P、SV 波および反射 P、SV 波の粒子運動ベクトル、 $\tau_S$ 、 $\tau_{Pi}$ 、 $\tau_{Si}$  は直達 P 波に対する直達 SV 波および  $i$  番目の反射 P、SV 波の時間遅れ、 $k_{Pi}$ 、 $k_{Si}$  は  $i$  番目の反射 P、SV 波の反射係数、 $A_i$  は  $i$  番目の相対方向  $\zeta_i$  に関する回転行列、 $n$  はサンプリング数、 $T$  はサンプリング周期、 $m$  は反射波の数を意味する。

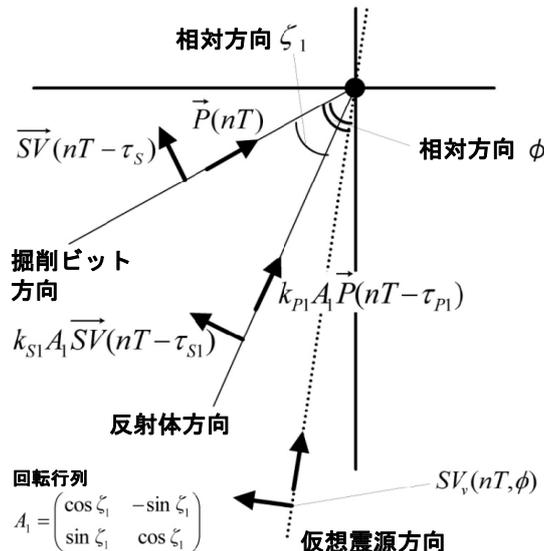


図 3.3 P-SV 面での 3 次元粒子運動ベクトルの模式図

十分に正確に 3 次元ベクトル場が記録されているとみなせるとき、任意の振動方向の波形成分の合成が可能であり、これにより仮想的にある到来方向を設定した反射波成分と直接波成分との相関解析が可能となる。例えば、仮想反射波到来方向  $\phi$  (直接波方向との相対角度) からの SV

波成分は次のように記述できる。

$$SV_v(nT, \phi) = P(nT)(-\sin\phi) + SV(nT - \tau_s) \cos\phi + \sum_{i=1}^m k_{pi} P(nT - \tau_{pi})(-\sin(\phi - \zeta_i)) + \sum_{i=1}^m k_{si} SV(nT - \tau_{si}) \cos(\phi - \zeta_i) \quad (3.7)$$

このとき掘削ビットからの直接波成分は  $\phi=0$  の場合にあたり  $SV_v(nT, 0)$ 、相対方向  $\phi$  からの反射 SV 波成分は  $SV_v(nT, \phi)$  のように記述できる。相対方向  $\phi$  を連続的に変化させて合成した仮想反射波成分を用いることにより、直接波成分と反射波成分に関してディレイと方向に関する 2 次元の相関関数  $C_{dv}(\tau, \phi)$  が計算可能であることが分かる。

$$C_{dv}(\tau, \phi) = \frac{1}{mT} \sum_{n=1}^m SV_v(nT, 0) SV_v(nT + \tau, \phi) \quad (3.8)$$

2次元の時空間相関関数  $C_{dv}(\tau, \phi)$  は、ディレイと相対方向が真の反射波のそれらと一致した時 ( $\tau = \tau_{si}$  および  $\phi = \zeta_i$  の時) に極大となる。岩盤の反射率は、2次元相関関数を直接波成分のエネルギーで正規化することによって次式のように定められる。

$$R_{dv}(\tau, \phi) = \frac{C_{dv}(\tau, \phi)}{C_{dv}(0, 0)} \quad (3.9)$$

式(3.6)～(3.9)の 3 軸 VSP 法の定式化は、方位角  $\Psi$  を加えることによって容易に 3 次元に拡張できる<sup>12,16,17)</sup>。また、注目する振動方向と弾性波速度を変えることにより、P 波の利用も簡単に行える。

実際の時空間相関関数の計算は、式(3.2)のように、FFT 法を用いたスペクトル解析により周波数領域で行う。ここで、相関解析によって正しくディレイを推定するためには、対象とする掘削振動信号ができるだけ広い周波数帯域（理想的には全周波数帯域）に渡って等しいパワーとランダムな位相を有する信号（白色信号）である必要がある。しかしながら現実には、受信信号には偏った周波数特性があったり周期的なノイズ成分の重畳などがあることが多々ある。そこで本研究では、このような場合には、前述のような SCOT 法による相互相関の計算や適応フィルタの適用などにより対策を講じることとしている。

### 3.3 瑞浪超深地層研究所の深度 200m ボーリング横坑内における適用結果

#### 3.3.1 掘削振動観測の概要

ボーリングコア採取時の掘削振動の観測は、原子力機構・瑞浪超深地層研究所の深度 200m レベルボーリング横坑内において 2008 年 11 月～12 月に実施した。坑道内からのボーリングは力学調査研究を目的に掘削されたものであり、岩芯試料は前章の AE/DRA 法応力測定に利用されている。ボーリング孔は、2 つのほぼ水平孔と鉛直孔の計 3 本が掘削されたが、初めの水平孔（08MI14 孔）が掘削された時点でそれを観測孔として利用し、残り 2 孔の掘削時の振動データ

を取得した。図 3.4 に観測孔および掘削孔等のレイアウトを、図 3.5、3.6 に掘削状況および観測状況の写真を示す。3 成分弾性波検出器は、壁面から深度 18.7m までロッドで押し込み設置し、2 か所 4 本の電動固定アームで孔壁に強固に固定した。本検出器は、圧電素子による 3 軸加速度センサを内蔵し、十分な感度 (3.0V/g) と低感度差、低クロス感度を有しており、人工震源を用いたキャリブレーション試験によって周波数 900Hz 付近までの広帯域で正確な 3 次元粒子運動軌跡の検出が可能であることが確認されている<sup>10)</sup>。今回の観測器の水平設置では内臓の電気コンパスが無効となるため、3 成分弾性波検出器の X-Y-Z 軸方向については、ハンマーで観測孔口上部付近を打撃しその際に記録された 3 次元粒子運動軌跡の主軸方向を推定して定めている。観測器の固定位置に関しては、当初は良好な地質構造推定結果を得るために、設置場所を頻繁に変え様々な波線経路のデータを取得することを構想していたが、実際にはボーリング掘削施工作業に干渉する恐れが強いことが分かったため、観測期間を通して上記位置一ヶ所に固定したままにした。また、当初 3 番目の掘削の際にはもう一つの弾性波検出器を用いた孔内 2 点観測の実施も計画していたが、08MI15 孔からの湧水量が当初想定を上回り準備した止水器具では孔内設置が困難であったため断念した。そこで、2 つ目のセンサは地下空洞底盤端の側溝内に固定し補助的な振動データの取得を行ったが、設置状況から信号特性が大きく異なったため、現状ではその解析は行っていない。なお、岩盤の弾性波伝搬速度の推定のために掘削ビット自体の振動を把握する目的で、ボーリングマシンの掘削ロッド地上側端部 (スイベル) 付近と掘削装置の側面に 3 軸加速度計も設置した。

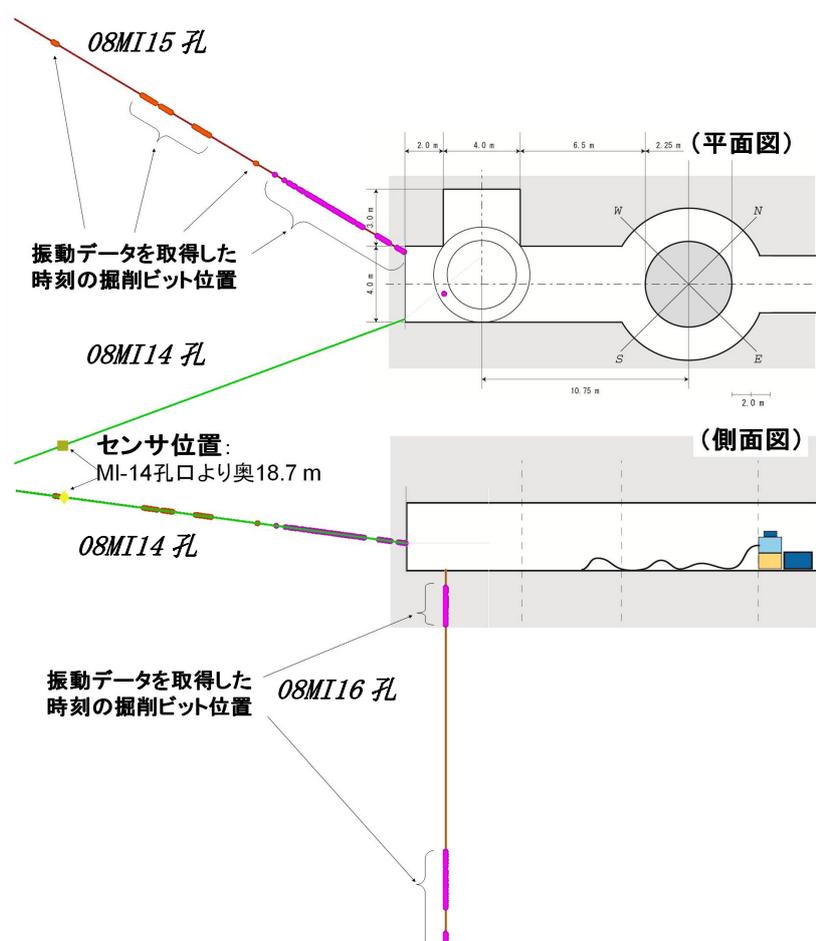


図 3.4 地下空洞内における掘削された孔跡、3 成分弾性波検出器 (センサ) の位置、およびデータを記録した掘削ビット位置の模式図

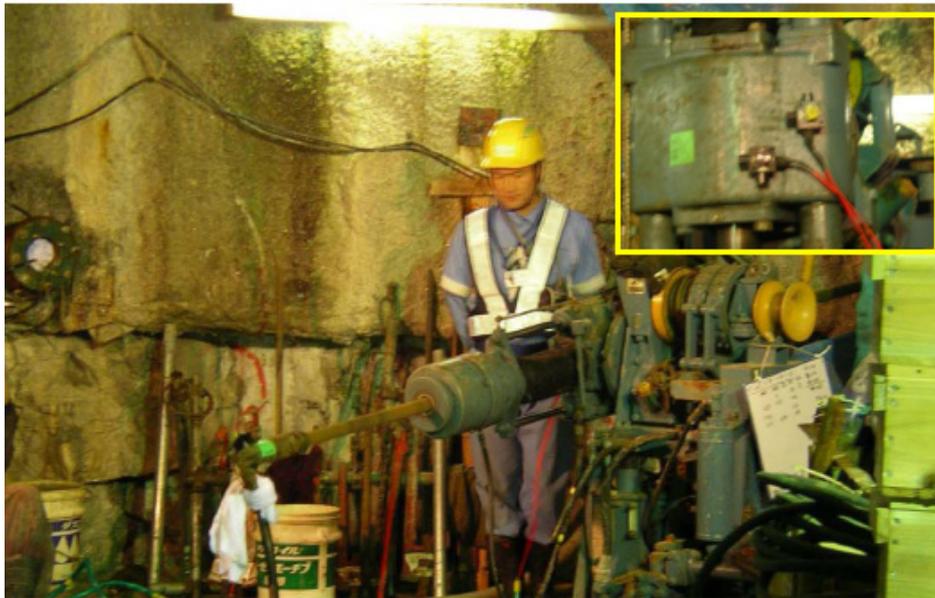


図 3.5 地下空洞内での水平孔ボーリング掘削の様子  
(掘削装置の回転ロッド部分端の緑テープの箇所に加速度計が設置されている。  
左側の孔口が観測孔 08M114。右上写真は鉛直孔掘削時の掘削装置上の加速度計の設置状況)



図 3.6 3 成分弾性波検出器  
(3 成分弾性波検出器 (下)、設置状態の孔口の状況 (上左)、  
孔内カメラにて撮影された 3 成分弾性波検出器の孔内固着状況 (上右))

掘削振動データは、観測用ボーリング孔の3成分弾性波検出器から高張力信号ケーブルを介して同じ空洞内の観測地点まで伝送し、コントロールユニットで60dBの増幅と1kHzのローパスフィルター処理を行ってデータレコーダーに入力した。ボーリングマシン上の加速度計からは、掘削地点付近にプリアンプを設置して増幅とフィルタ処理を加え、BNCケーブルを這わせてデータレコーダーまで伝送した。データ記録は停電時などの確実さから8mmビデオテープをメディアとした連続記録のデジタルレコーダーを用い、サンプリング周波数12kHzで離散化して記録した。3成分弾性波検出器や加速度計のプリアンプ、データレコーダー等は、可能なものについては12Vバッテリー駆動とし、それ以外には再整流タイプの無停電電源を挿入するなどして、ボーリングマシンと同一空間で電源を取ることに起因するノイズ影響を最小限にする対策を行った。データ取得は、基本的にはデータレコーダー操作者が居る時間帯の掘削装置運転時に限ったため、日程上の都合や施工作业との時間差などで一部記録空白時間が生じたが、各ボーリング孔掘削の孔口近傍から孔底付近にかけ広い範囲で概ねデータを記録することができた。最終的には、約60時間以上の量の掘削振動データが得られた。なお、空洞内は特に湿度が非常に高く、除湿剤による防湿対策を施したものの電子機器の動作が不安定になることが時々あり、今後の対策は課題の一つである。

### 3.3.2 取得された掘削振動信号の基本特性

今回の観測器の設置状況におけるX-Y-Z軸方位は、08MI14孔孔口真上付近を打撃した波形の3次元ホドグラム解析により、Y軸方向が鉛直から約32度程度反時計回りに回転してセットされていると推定することができた(図3.7)。以降の解析では、基本的にこの角度を回転変換した掘削振動波形を利用している。

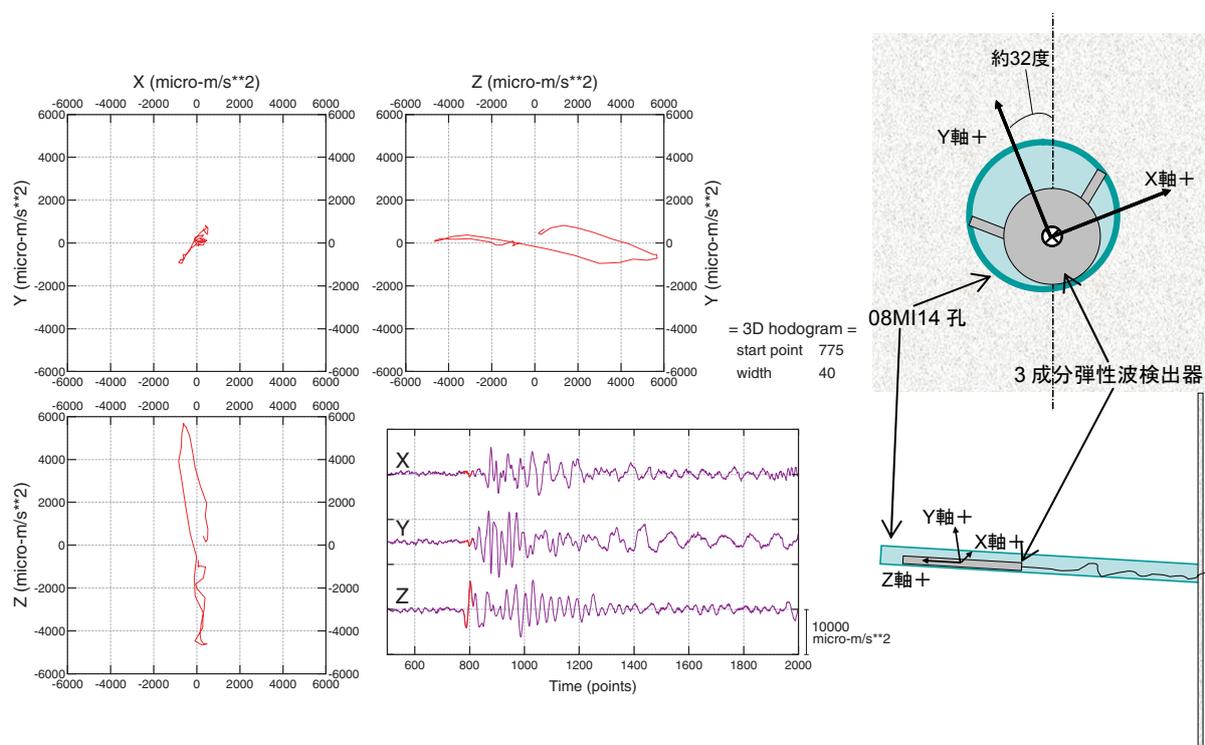


図 3.7 08MI14 孔孔口真上付近をハンマーで叩いた際の記録波形例 (中央下) と、それに対応する時間帯 (波形の赤色部分) の 3 次元粒子運動軌跡、および 3 成分弾性波検出器座標系 (右)

図 3.8 に、08MI14 孔内の 3 成分弾性波検出器で取得した掘削振動の 3 成分観測生波形の例を示す。本図のように、掘削振動波形はランダムノイズのような連続波形である。本例では、約 8 秒付近からボーリングマシンが稼働し始め、それに伴って受信波形の振幅も増加しており、微弱な掘削に伴う弾性波が受信できていることが分かる。

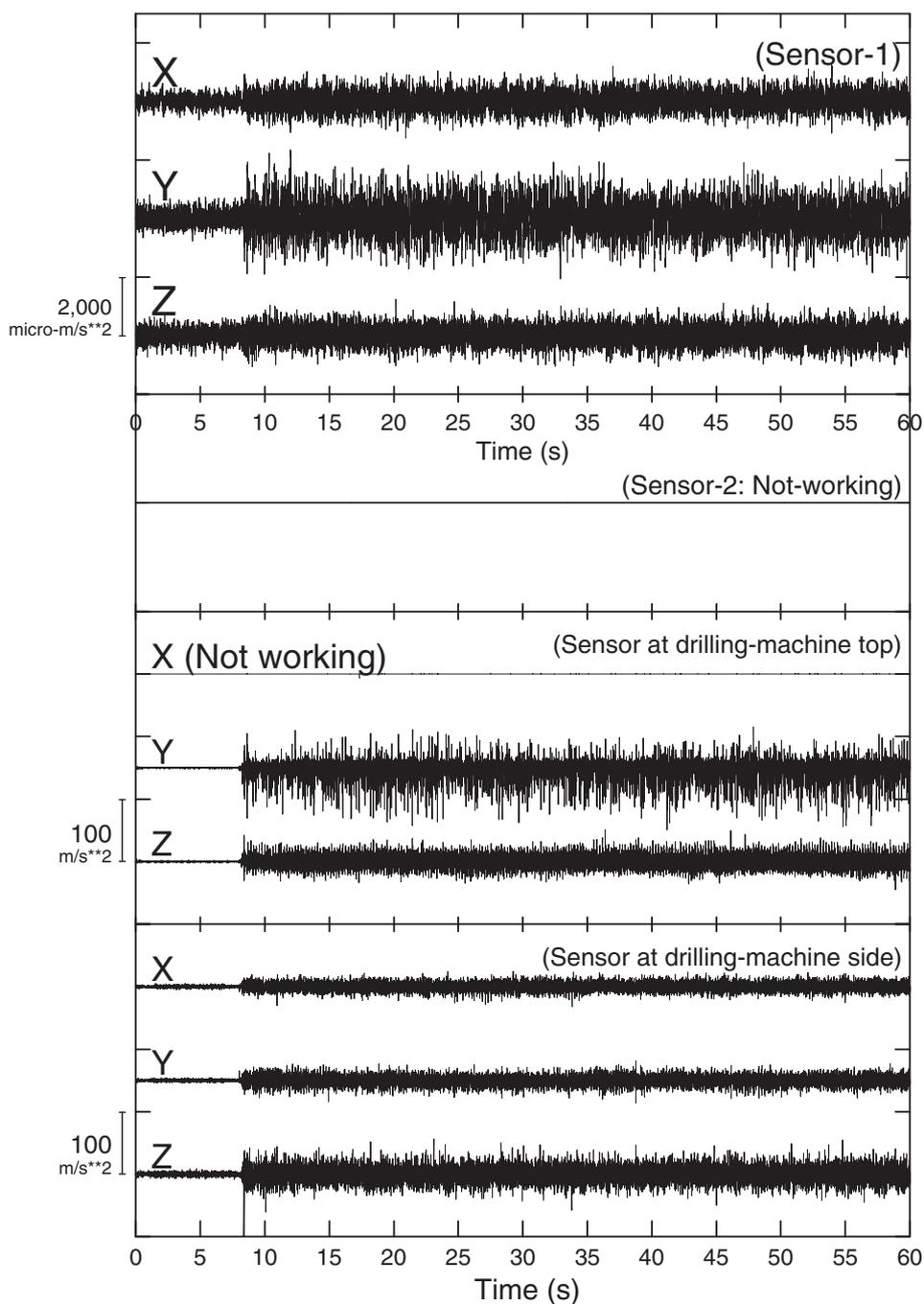


図 3.8 ボーリング掘削振動の観測波形例

(上から、観測孔内の 3 成分弾性波検出器の受信波形 3 成分、停止中の 2 番目の弾性波検出器、掘削装置上の加速度センサ 3 成分 (本図の時点で x 成分が破損している)、掘削装置側面の加速度センサ 3 成分)

掘削振動波形のパワースペクトルを図 3.9 の赤線で示す。図中の黒線は、掘削装置が動いていないバックグラウンドノイズのパワースペクトルである。掘削振動受信時には 50Hz 以上のほぼ全帯域でエネルギー増加が見られ、80~800Hz 付近においては 5~20dB 程度以上の明瞭なエネルギー増加が確認できた。しかしながら、バックグラウンドノイズのパワースペクトルは不安定で変動が大きく、800Hz 以上ではボーリングマシン稼働時のエネルギー増加が不明瞭であり、2kHz 以上でバックグラウンドノイズ時の受信エネルギーの方が大きくなる現象も時折見られる場合があった。これは、今回の観測地点が地下空洞内部でボーリング掘削作業位置とも近接していたため、観測用ボーリング孔孔口から混入する音波の影響も受けていることが考えられる。また、空洞内にはエレベーターがありその動作時にはサイレンが大きな音量で鳴ることや、100m 下のレベルでの作業音も伝わってきていたことなど、全体的に音として混入したノイズは小さくなかった。しかしながら、周波数帯域を 2kHz 以下に制限することや伝搬速度の違いなどによって、実際の解析での影響は小さくできると考えられる。

次に、掘削振動として得られている弾性波の主たるモード (P 波、SV 波、SH 波) の推定を、3 次元粒子運動軌跡 (3 次元ホドグラム) の観察によって検討した。図 3.10 に、バックグラウンドノイズ時と掘削装置稼働時の受信信号の 3 次元ホドグラムの比較を示す。本図では、バックグラウンドノイズ時のホドグラムもやや楕円的であり、ランダムノイズ受信時に理想的に想定される球状ホドグラムとは差異があるが、このデータを用いて掘削時のエネルギー増加方向の傾向を評価する受信モードを推定した。3 次元ホドグラムの変化によると、掘削時のエネルギー増加は等方的であり特定モードの卓越を確認することができない。従って、特定のモードが卓越している可能性は小さく、むしろ全てのモードが同時に存在している可能性を否定することができない。

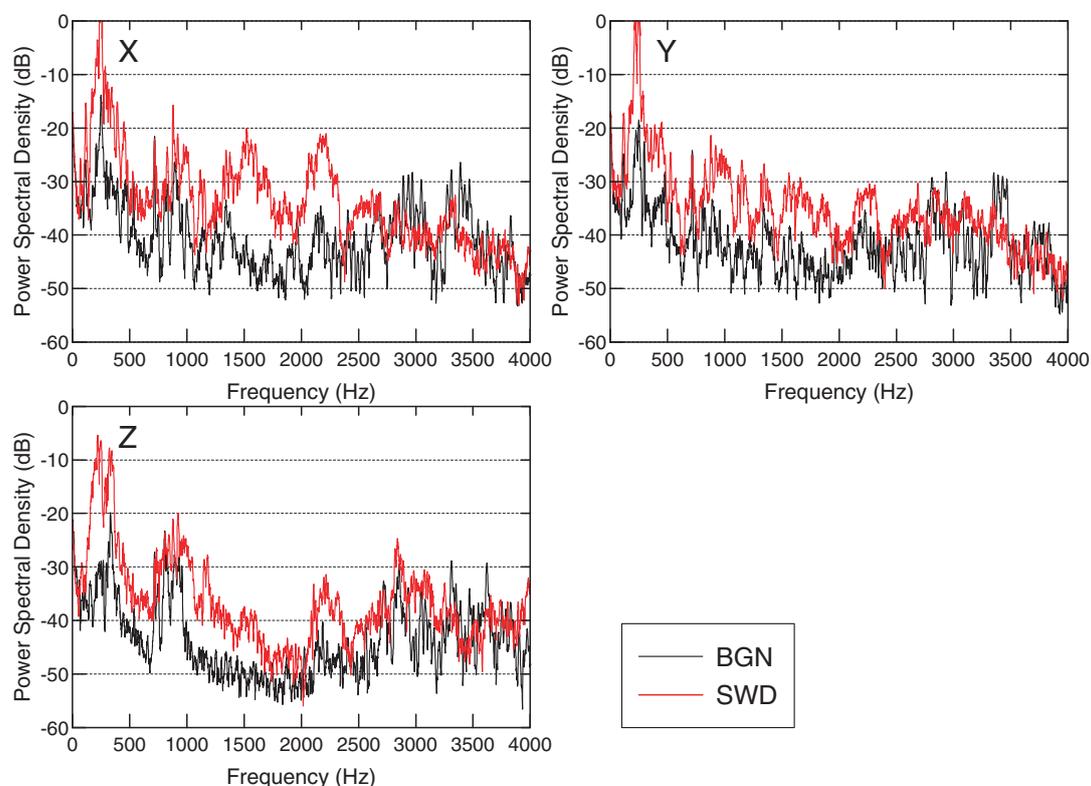


図 3.9 観測波形のパワースペクトル例 (3 成分)  
(赤線は掘削中の、黒線はバックグラウンド時のパワースペクトルをそれぞれ表す)

これは比較的近い送受信点間距離であることや、掘削時の騒音ノイズも含めて受信されているエネルギーが大きいことと調和的であると考えられる。また、掘削振動を発生する主たる位置についても不明確であった。

以上、観測波形観察、パワースペクトル評価、3次元ホドグラム観察を総合すると、今回取得した掘削振動波形の特徴および解析の指針は次のようにまとめられる。

- ボーリングマシンの動きに伴う受信波形の振幅変化が確認でき、ボーリングマシンの動きに対応した弾性波が放出されている。
- 受信された掘削振動のエネルギーは5~20dBと比較的大きく、周波数帯域も広帯域であった。しかしながら、高周波成分では騒音ノイズの影響を強く受けている可能性があった。パワースペクトルの分布状況や弾性波検出器の周波数特性を考慮すると、80~800Hzの帯域に着目するのが妥当であると考えられる。
- 受信されている弾性波は特定モードの卓越が明確でなく、全モードが混在している状態と考えられる。
- 掘削振動の発生位置は主たる振動方向の評価からは確認することはできなかった。しかし、ボーリングマシンの動作への反応から、主震源位置が掘削ビットであると仮定することには妥当性がある。

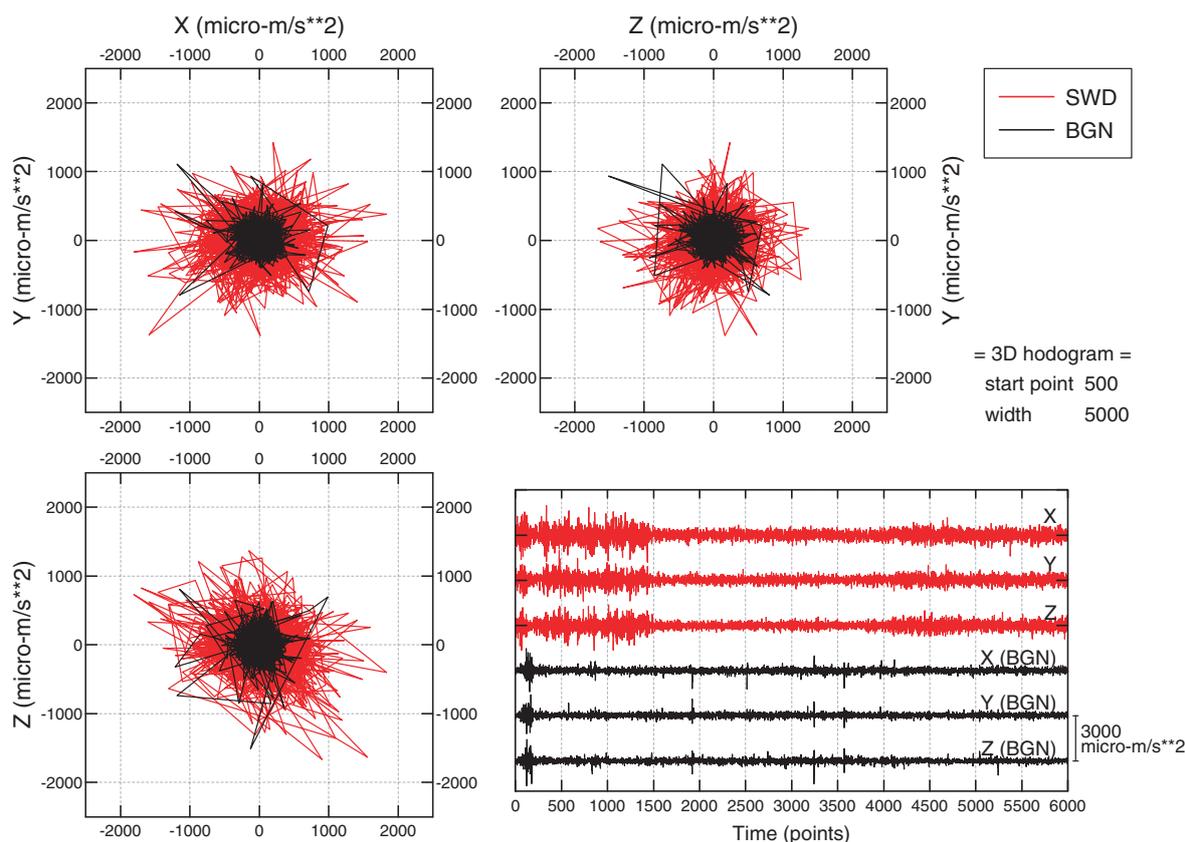


図 3.10 観測波形の3次元ホドグラム解析例

(赤線は掘削中の、黒線はバックグラウンド時のパワースペクトルをそれぞれ表す)

### 3.3.3 弾性波伝搬速度分布推定の試み

弾性波伝搬速度は、08MI15 孔の掘削振動を震源と考えて、ボーリングマシン上センサと 08MI14 孔の 3 成分弾性波検出器の観測波形の相互相関により推定した。対象とした掘進長は掘削開始直後の約 1m から約 21m までであり、観測点は固定されているものの、図 3.4 から類推できるように 08MI14 孔と 08MI15 孔で囲まれる領域の大半がカバーできる。

通常、掘削装置上に取り付けたセンサには、掘削ロッドの回転に伴い周期成分が強く記録される。また、掘削ロッド先端部のビット付近が主震源になる場合にも、掘削ロッド中を往復する共振モードの波が発生することが知られている<sup>9)</sup>。このようなことから、相互相関の計算の前に、掘削装置に取り付けたセンサの記録波形については適応フィルタを施し、周期成分を除去することにした。また、SCOT 法を行い、2 信号の類似性の高い送受信点間を伝搬した可能性の高い周波数成分の影響を強調して相互相関の計算を行うことにした。

図 3.11、3.12 は、同一の観測波形を用いたもっとも単純な時間領域における相互相関関数の計算結果と、適応フィルタと SCOT 法を用いた相互相関関数の計算結果である。図 3.11 はリファレンス信号と観測された xyz 成分との 3 つの相互相関関数であるが、周期成分の影響が強く、有意な時間遅れに相当するピークを見つけることができない。一方、適応フィルタおよび SCOT 法を適用した図 3.12 においては、相関関数の値の大きくなる範囲は 30msec 以下に集中し、比較的明瞭にピークを見つけることができる。

図 3.12 のような相互相関関数を解析対象の全波形データに対して行い、最大ピーク時間を抽出し送受信点間距離に対する速度を計算することによって、掘進長に対する弾性波伝搬速度の分布を推定することができる。図 3.13 に示す弾性波伝搬速度分布の推定結果は、全体に推定結果のばらつきが大きく、掘削長さ 20m 全体では速度分布に何らかの物理的意味を見つけることは困難である。前半の掘進長 7m 以下のデータ範囲においては、SV 波の伝搬速度が空洞壁面近く（2m 以下）で遅くなっている傾向が見られており、これが掘削影響領域を反映している可能性がある。一方、孔奥に行くにつれて速度が安定的に速くなるような傾向は見られず、10～15m 区間では P 波の速度が花崗岩の一般的な速度に比べて遥かに遅くなる傾向がある。全体に推定分散が非常に大きいこと、掘削の影響が少ないと考えられる孔奥の方についても弾性波速度が収束する傾向がないことなどから、現状では、孔全体を通しては、本結果によって弾性波伝搬速度分布に関する解釈を行うことは困難であると考えている。この原因は明らかではないが、一つの可能性としては、対象岩盤が亀裂に富んでおり、観測点位置の関係から伝搬経路上の亀裂の影響が避けられず、大局的な地下応力変化の反映である掘削影響領域の効果は現れ難かったのではないかと考えられる。

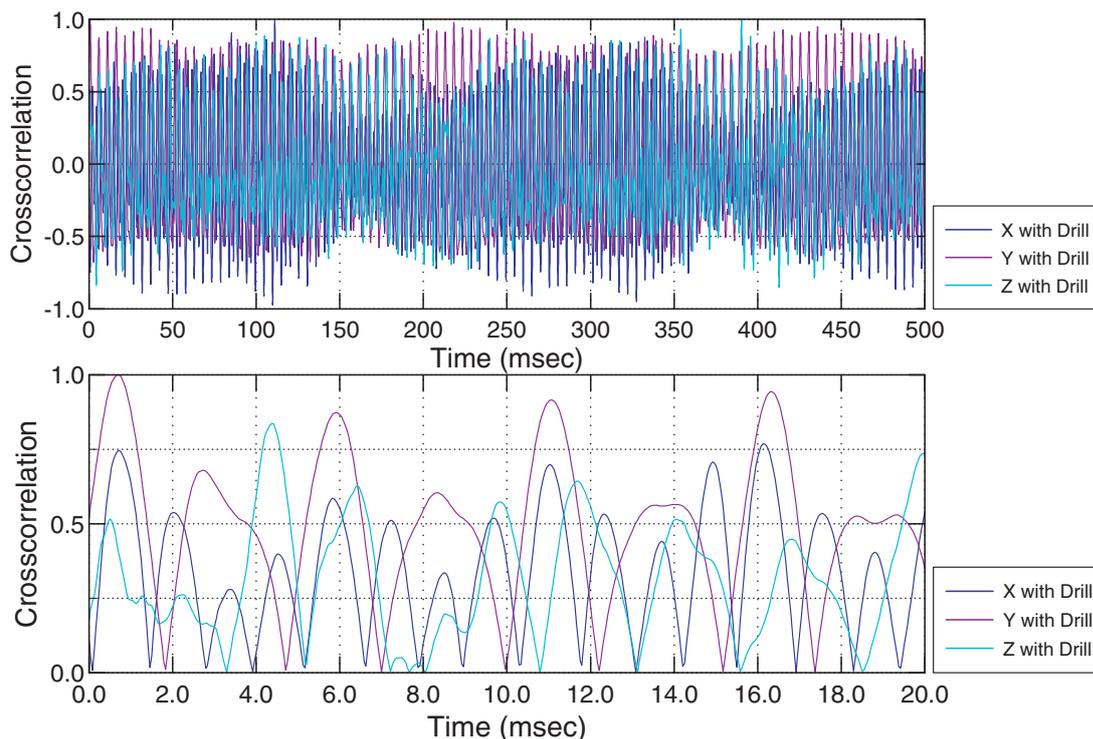


図 3.11 掘削振動の生観測波形による相互相関関数の計算結果例  
 (掘削装置上の掘削ロッド軸方向の振動と3成分観測波形の相互相関関数であり、  
 下段は0msec付近の絶対値を拡大表示したものである)

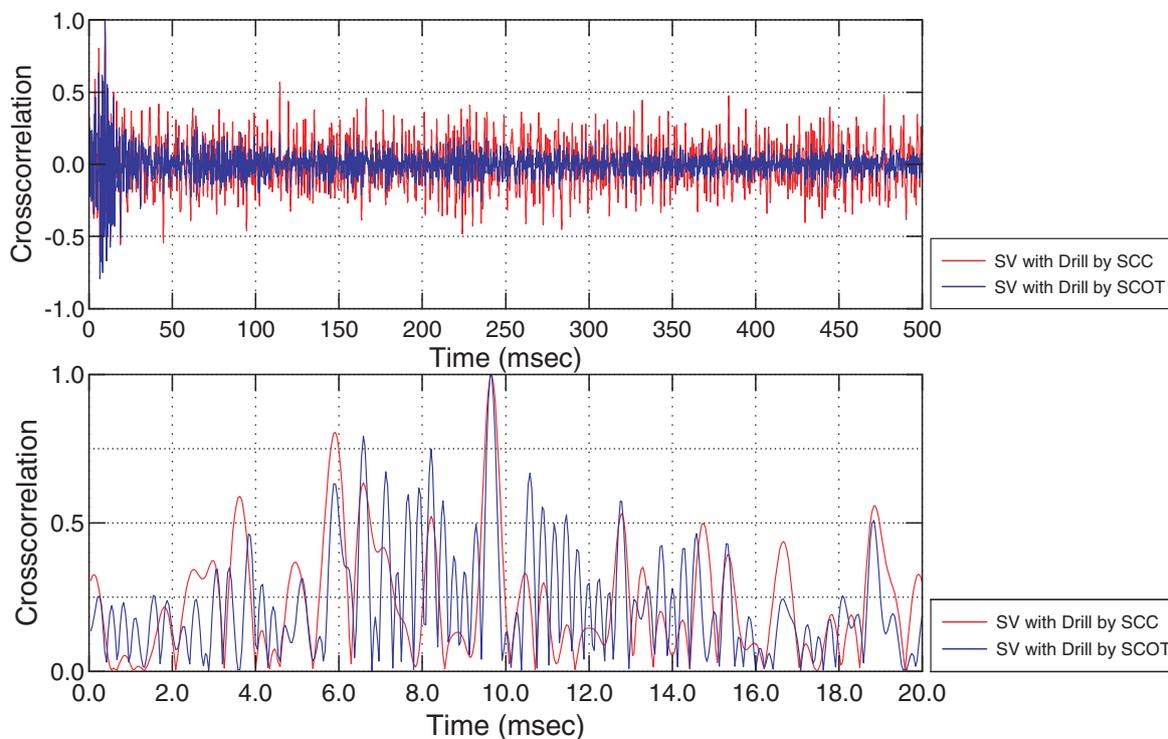


図 3.12 信号処理を施した場合の相互相関関数の計算結果  
 (赤は適応フィルタを適用し単純な相互相関計算を行った場合、青は適応フィルタとSCOT法の  
 両方を適用した場合。下段は0msec付近の絶対値を拡大表示したものである)

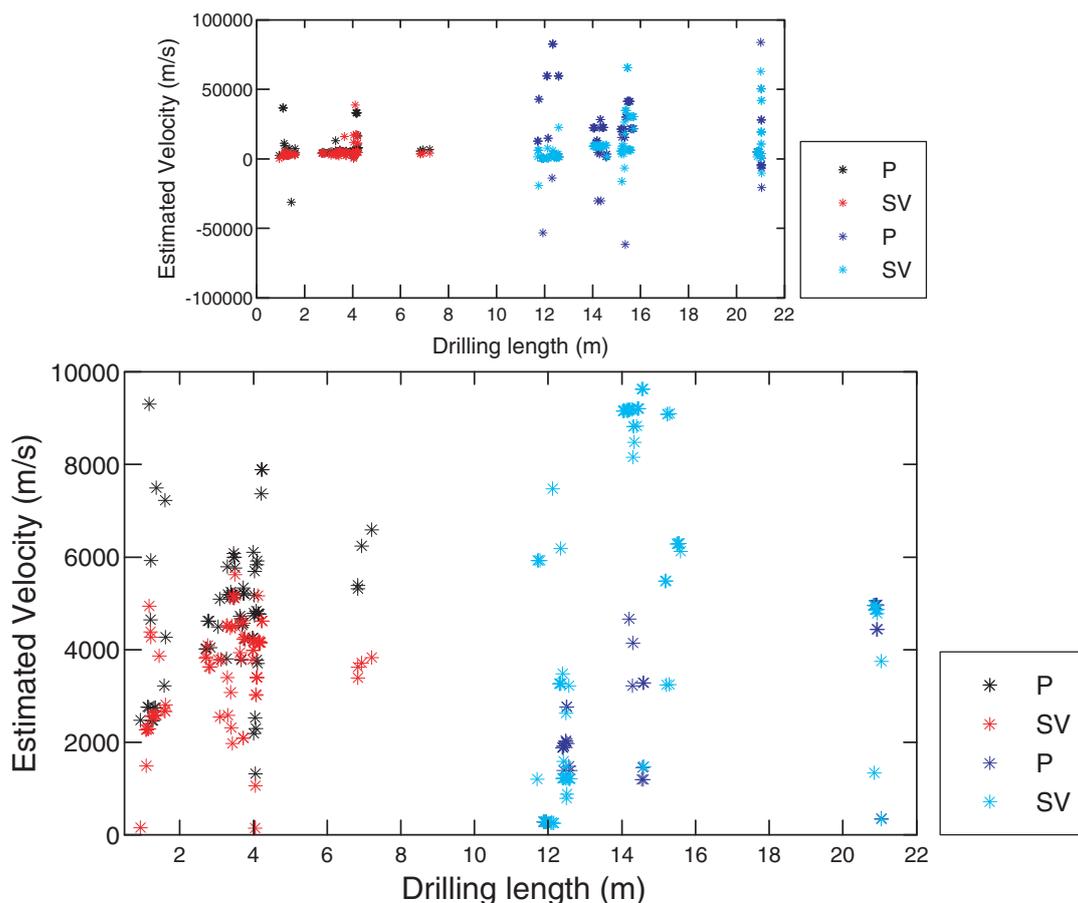


図 3.13 掘削振動を用いて推定した岩盤の弾性波伝搬速度と震源とした掘削の掘進長に対する変化

(上段は計算結果全体、下段は10km/以下についての拡大表示。黒・赤は取得データ前半部のPおよびS波速度、青・水色は取得データ後半部(半自動記録時)のPおよびS波速度である。上段でマイナスの速度が現れている箇所は、掘削機振動と観測孔での受信信号の時間遅れの関係が正負反転して検出されてしまう箇所であり、掘削振動データの放出状況や受信状態が良好でなかったためと考えられる)

### 3.3.4 空洞周辺の反射イメージング

掘削振動を用いる反射イメージングは、08MI15孔と08MI16孔の両方の掘削振動データを全部で約4時間分を用いて、等方均質速度モデルを仮定して実施した。また、掘削振動波形のモードについては、全てのモードが含まれる可能性があることと、これまでの実績ならびに亀裂構造への感度の良さが期待できることから、今回はSV波の反射を仮定して取り扱うこととした。S波伝搬速度は、前述のように掘削振動解析自体からは安定した結果が得られなかったため、一般的な文献値を参考に、今回は暫定的に $V_s=3000\text{m/s}$ と仮定している。3軸VSP法の計算で想定される分解能は、計算グリッドサイズ1m、角度ステップ1度、波形データのサンプリングレート0.04msec、相互相関関数計算の周波数帯域80~2000Hzなどから、理想的には空間分解能1.5m程度以下と考えることができる。3軸VSP法の計算は個々の掘削振動波形データ毎に行い、それぞれから生成される推定反射率分布の3次元ボリュームデータを解析に使用した全波形データに渡って積算することで、最終的な3次元イメージング結果を求めた。図3.14に反射イメージング結果の3次元表示の例を示す。このような反射率分布の3次元の推定結果から、任意の地点の反射率や任意の孔跡、任意の断面の反射イメージを得ることができる。

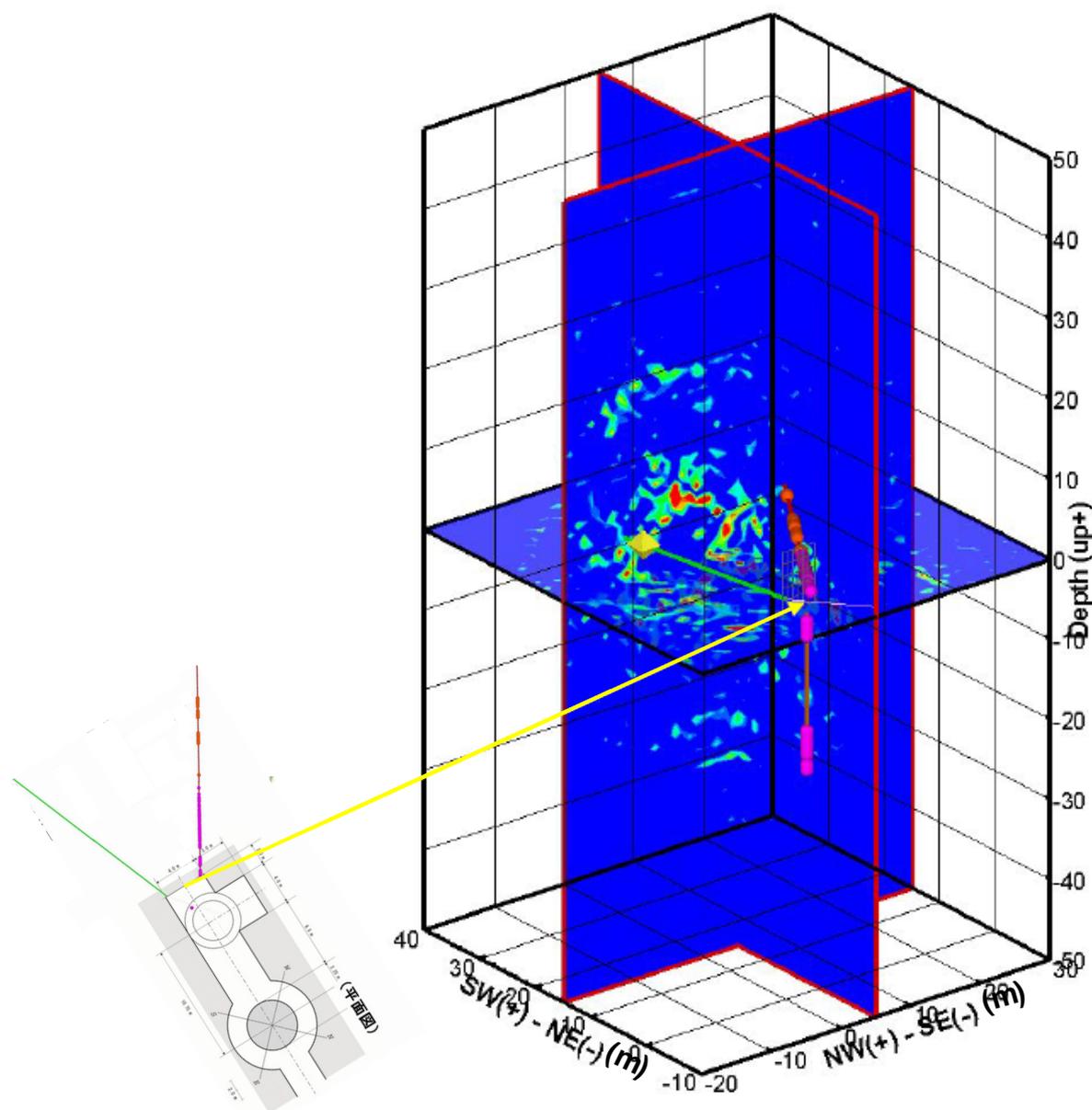


図 3.14 掘削振動による 3 次元反射イメージング結果の例

(3次元ボリュームデータとして得られる反射率分布について、3つの断面でスライスした表示である。コンターマップの赤系色が高い反射率を表し、橙色および桃色点が解析に使用した掘削振動データの掘削ビット位置の投影、黄色点が3成分弾性波検出器位置の投影を意味する。本図、右側が北方向である)

これまでの研究では、掘削振動によるイメージングで現れる SV 波の高反射率は、地層境界がない地点においても、亀裂や亀裂帯と関係していた<sup>10,11)</sup>。今回の結果でも高反射率と亀裂の対応があり得るのか、孔内亀裂観察の結果<sup>3)</sup>と孔沿いの掘削振動による反射率分布とを比較して検討した。08MI15 孔沿いの掘削振動による反射率分布と孔内観察に基づく亀裂分布とを比較すると(図 3.15)、亀裂の数については掘進長 5m 付近、15m 付近は比較的調和的に見えるが、掘進長 10m 付近の亀裂数の多い地点は反射率分布では僅かな変化に留まっている。これは掘進長 10m

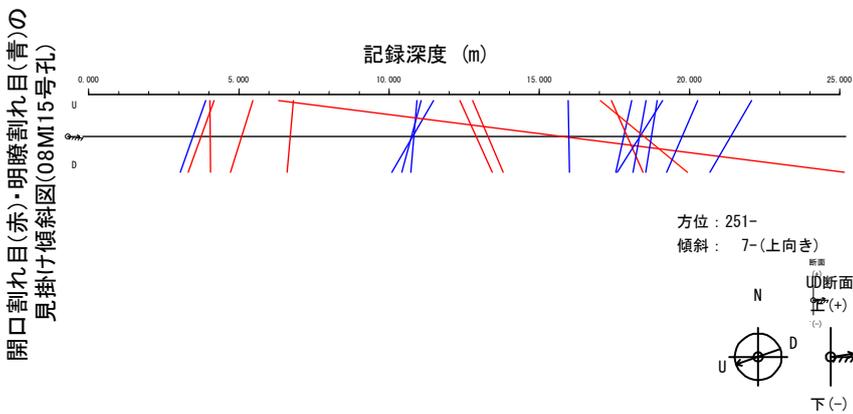
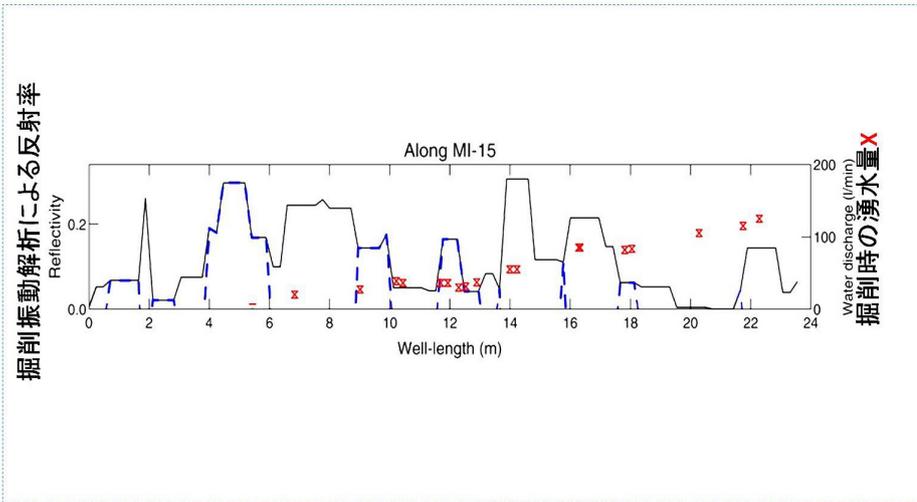
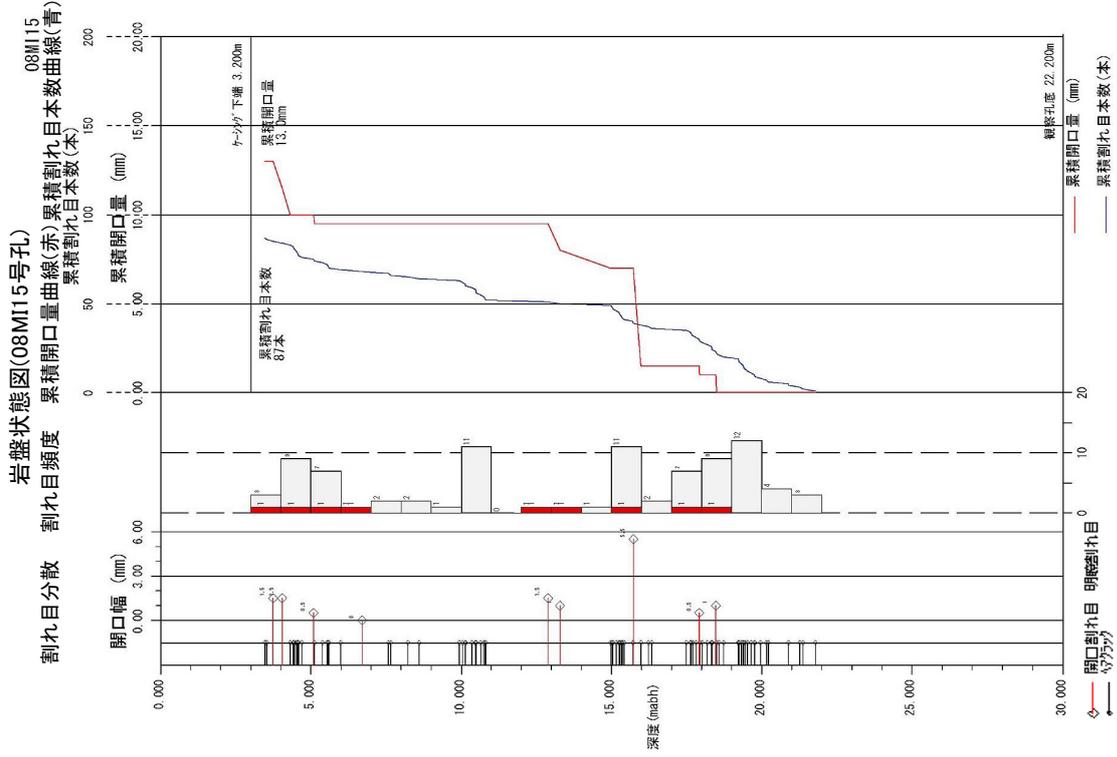


図3.15 掘削振動によって推定した08MI15孔沿いの反射率分布(中)と孔内観察に基づく亀裂分布の評價結果<sup>3)</sup>の比較

付近の亀裂が、頻度があっても開口幅を持たないへアークラックのような亀裂であり、弾性波の伝達に影響が少なかったためと考えられる。湧水のあった亀裂数（図中右の棒グラフ内の赤い範囲）との対応で見ると、掘削振動による反射率分布は比較的良く対応しているように見える。掘削振動で求められる反射率変化は、基本的にはこれまでの研究のように岩盤中の亀裂と関連を持つが、今回の事例ではどちらかと言うと湧水を伴うような、ある程度規模の大きな亀裂の存在が良好に検出できていると考えられる。全体で見ると反射率と亀裂分布の完全な対応付けは困難ではあるが、高い反射率が亀裂の存在に関係することは妥当であると考えて反射イメージングの解釈を行うこととした。

図 3.16 は、08MI14 孔口を基準としその上下 1m を通る水平面内において反射率分布を表示した結果である。前述のように観測位置が 1 か所のみで固定された解析結果であるが、通常そのような場合には円弧状トレンドが強く現れるのに対して、本図では反射イメージング結果としては比較的そのような虚像の少ない直線的な像が得られている。これは、震源とした 2 孔の位置関係が適当であったことや、十分に多くの量の掘削音データが利用できたこと、SCOT 法などを用いた信号処理が効果的に機能した結果と考えられる。しかし、それでも今回の送受信点位置関係に応じて地質構造を見ることができるとは自然な限界があるが、高反射率の連続性に注意して見ればある程度の構造解釈が可能である。図 3.17 は、掘削振動による反射イメージング結果の解釈の一例である。得られた反射体を亀裂構造と考えると、北-南方向の構造、北東-南西方向、北西-南東方向などの亀裂構造の存在が比較的明確に推定できる。一方、図 3.18 は、3 孔で報告されている明瞭および開口亀裂について、その位置と走向傾斜のデータを用いて外挿して作成した面構造の投影を反射イメージング結果に重ねて表示したものである。まず図 3.18 では、例えば、北東-南西方向の亀裂面が高反射率と調和的に見える。反射イメージングには見ることが難しい領域（掘削ビットや観測器の極近傍、反射のパスが考えにくい場所など）があり、厳密には孔内観察の結果は孔跡位置付近にだけ信頼性は限られることなどがあるが、全体的な傾向としては、いくつか高反射率と亀裂の対応がみられる箇所が存在している。さらに、図 3.18 と図 3.17 を比較すると、反射イメージングの解釈で導き出された線構造は、孔内亀裂を外挿して推定できる亀裂構造と、厳密な位置や方向は一致しないものの、大局的な構造は似通っていると考えられる。これは、反射イメージングが対象地域の亀裂構造の状態を比較的良く反映したものになっていることを意味している。もともと反射イメージングは仮定の S 波速度で実施しており、孔内情報との不一致も起こりえるものであることから、絶対位置の違いは細部の調整である程度改善可能な要素と斟酌して考えれば、高レベル放射性廃棄物の処分施設で想定されるような大深度かつ広範囲な地下施設を対象とした掘削振動を用いる地質構造評価方法の適用性自体は有望なものであると結論付けることができる。

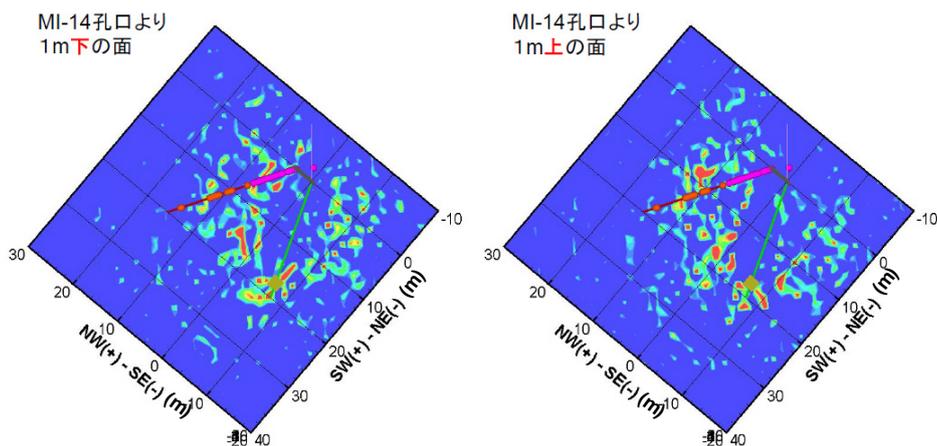


図 3.16 08MI14 孔口上下 1m の水平面内における掘削振動で推定された反射率分布  
(コンターマップの赤系色が高い反射率を表し、橙色および桃色点が解析に使用した掘削振動データの掘削ビット位置の投影、黄色点が3成分弾性波検出器位置の投影を意味する。本図、上方が北方向である)

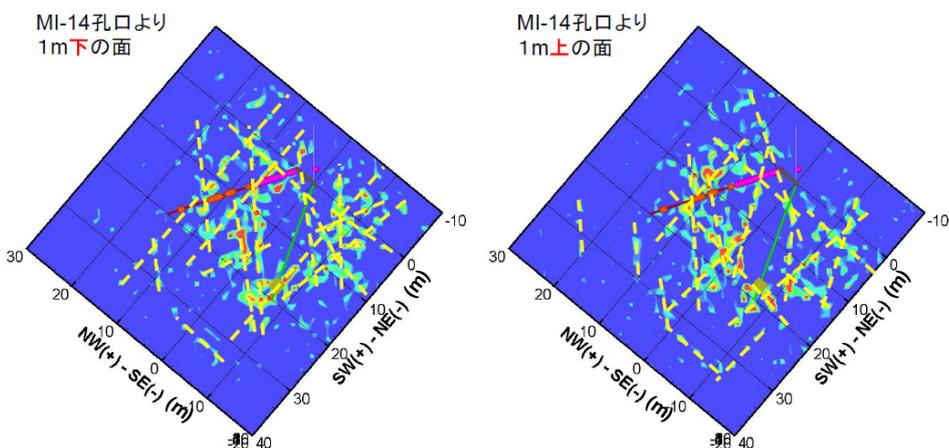


図 3.17 08MI14 孔口上下 1m の水平面内における掘削振動で推定された反射率分布  
(黄点線は、高反射率の連続性などを考えてイメージ上で引いた解釈線である。本図、上方が北方向である)

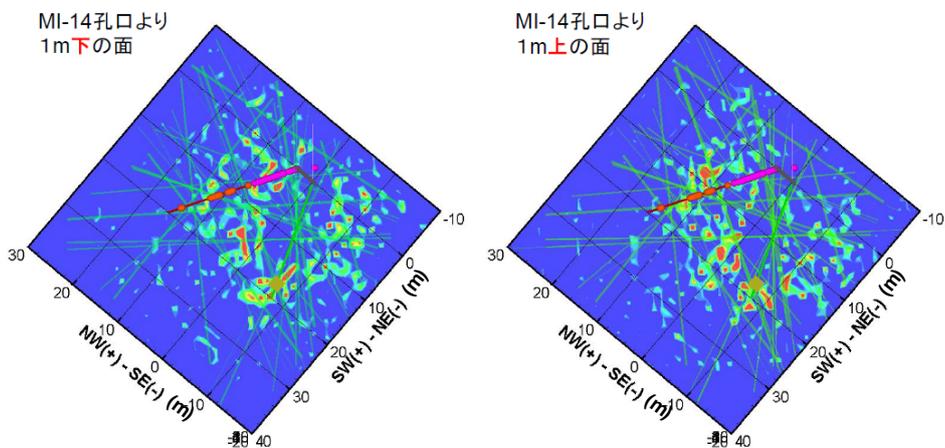


図 3.18 掘削振動で推定された反射率分布と3孔から推定される亀裂分布の比較  
(緑線は、3孔で観察された明瞭および開口亀裂の位置、走向、傾斜を基に、外挿して作成した平面を投影したものである。本図、上方が北方向である)

### 3.4 まとめ

本研究においては、岩芯採取時などのボーリング掘削振動を用いる地質構造評価方法（SWD法）に着目し、長期空洞安定性評価などに資する地下情報抽出手段として有効に活用できるようにすることを目的に、高レベル放射性廃棄物の処分施設で想定されるような大深度かつ広範囲な地下施設の実施工況に近いと考えられる原子力機構の瑞浪超深地層研究所、200m レベルボーリング横坑を実験サイトにして、掘削振動データの取得と地下空洞周りの構造評価のための諸検討を行った。その結果、岩芯採取の施工に干渉せずに掘削振動データを取得でき、振動エネルギーの受信に成功し、弾性波伝搬速度推定法と反射イメージング法を適用することができた。弾性波伝搬速度については壁面から 2m 以下に掘削影響領域との関連もあり得るような SV 波速度の低下が検出できたものの、岩盤状況などの影響から全体分布には有意な傾向を見出すことができなかった。一方、反射イメージングについては、空洞周りの亀裂構造を反映していると考えられる構造を抽出することができた。以上より、高レベル放射性廃棄物の処分施設で想定されるような大深度かつ広範囲な地下施設を対象とした場合の、掘削振動を用いる地質構造評価方法の有効性を示すことができた。

今後は、反射イメージングの改善に努めるとともに弾性波速度と掘削影響領域との関連についても再検討し、地下応力測定からの知見などと総合して、地下空洞の長期安定性評価に SWD 法からの情報を反映させる方法論を検討する予定である。

#### 4. おわりに ～掘削影響領域の評価の観点から～

本研究では掘削影響領域を含む岩盤の計測・評価手法の構築を目指し、AE/DRA法による応力計測とボーリング時の掘削音を利用した地質構造評価を実施した。

応力計測では計測値のばらつきという困難があったものの評価自体は概ね成功し、空洞壁面からの距離に応じて変化する応力場が得られている。計測の妥当性については今後の検証が必要であるが、掘削影響領域を含む空洞近傍で2次応力場と推定される応力状態を評価したという点でAE/DRA法の適用性の向上に寄与する結果が得られたと考えられる。掘削影響領域そのものの評価については、離散的に実施した今回の計測からは簡単には結論づけられないが、同手法を用いて3次元応力場を評価する場合は、1地点あたり岩芯が1m程の長さが必要になることから、直接計測するというよりは数値モデル等と組み合わせると解析評価するのが有効と考えられる。

掘削音を利用した地質構造評価では、坑道壁面近傍の弾性波速度評価において、空洞壁面近くで掘削影響領域との関連もあり得るようなSV波速度の低下が検出できたものの、岩盤状況とのかねあいから全体的な速度分布には有意な傾向を見出すことができなかった。なお解析を行った08MI15孔では、応力計測の結果も $\sigma_1$ が奥から手前にかけて南北から東西へと回転するような計測結果となっていることや、ボーリング掘削時に大量に出水するなど幾つかの亀裂を貫通していると考えられることから、弾性波速度の変化で掘削影響領域の評価を行うにはあまり良い条件ではなかったとも考えられる。一方、反射波を用いた解析では、ボーリング孔からやや離れた領域における不連続面と思われる亀裂構造の検出に成功しており、ボーリング孔間を埋めるような地質構造評価法としても有用と考えられる。掘削影響領域の評価については、空洞壁面近くだけではあるがSV波速度の低下が検出できたことから今後も研究を継続する価値はあると思われる。また、掘削影響領域内でも反射波を用いた解析は何ら問題なく実施可能であり、解析で得られた反射構造も岩芯調査等で得られた亀裂構造と符合するものであったことから、低コストで実施可能な地質構造調査手法としても有用であると考えられる。

## 参考文献

- 1) 金川忠, 林正夫, 仲左博裕: “岩石における地圧成分の Acoustic Emission による推定の試み”, 土木学会論文報告集, vol.258, pp.63-75(1977)
- 2) Yamamoto, K.: “The rock property of in-situ stress memory: Discussions on its mechanism”, Proc. of Int. Workshop on Rock Stress Measurement at Great Depth, pp.46-51 (1995)
- 3) ジオテクノス株式会社: “瑞浪超深地層研究所換気立坑側 GL-200m 横坑における初期応力測定及び室内物理・力学試験”, 日本原子力研究開発機構契約業務報告書(2009)
- 4) 平野享, 瀬野康弘, 松井裕哉: “瑞浪超深地層研究所計画 (岩盤力学に関する調査研究) 深度 200m における岩盤力学ボーリング調査”, JAEA-Research 2010-013 (2010)
- 5) 平野享, 中間茂雄, 山田淳夫, 瀬野康弘, 佐藤稔紀: “超深地層研究所計画 (岩盤力学に関する調査研究) MIZ-1 号における岩盤力学調査”, JAEA-Research 2009-031(2009)
- 6) 相馬宣和, 瀬戸政宏, 松井裕哉, 前田信行: “封圧環境下における AE 法による原位置初期地圧測定法の開発”, 資源と素材, vol.118, pp.546-552(2002)
- 7) 瀬戸政宏, 相馬宣和, 前田信行, 松井裕哉, Ernesto Villaescusa, 勝山邦久: “AE 法と DRA による地下応力測定試験方法とケーススタディ”, 資源と素材, vol.117, pp.829-835(2001)
- 8) Asanuma, H., Niitsuma, H. and Chubachi, N.: “An Analysis of Three Dimensional AE Lissajou Pattern during Well-drilling and Estimation of Source Direction”, Progress in Acoustic Emission-5, pp. 436-443(1990)
- 9) Rector III, J. W. and Marion, B. P.: “The use of Drill-Bit Energy as a Downhole Seismic Source”, Geophysics, Vol. 56, pp. 628-634(1991)
- 10) 相馬宣和, 歌川学, 瀬戸政宏, 長秋雄, 浅沼宏: “小型軽量坑井内 3 成分弾性波検出器による坑井掘削音の観測と地下構造推定法の検討”, 土木学会論文集, 757-III-66, pp.177-187(2004)
- 11) Soma, N., Utagawa, M., Seto, M., Cho, A. and Asanuma, H.: “Identification of subsurface structures using the seismic-while-drilling technique”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 41, pp.165-173(2004)
- 12) 相馬宣和, 及川寧己, 當舎利行, 松井裕哉, 平野享: “大深度立坑における岩芯採取時振動を用いた地質構造評価”, 資源・素材学会平成 21 年度秋季大会(2009)
- 13) 相馬宣和, 大野哲二, 中島貴弘, 中間茂雄, 浅沼宏: “コア採取ボーリング削孔時の掘削振動の多成分信号処理法と地下構造推定法の検討”, 土木学会論文集 C, 63-4, pp.1020-1034(2007)
- 14) 金井浩, 日本音響学会編: “音・振動のスペクトル解析”, コロナ社(1990)
- 15) 添田喬, 中溝高好, 大松繁: “信号処理の基礎と応用”, pp. 202-218, 日新出版(1979)
- 16) 相馬宣和, 及川寧己, 竹原孝, 浅沼宏: “受動的掘削振動観測の長期空洞安定性評価のための活用に向けた試み”, 土木学会平成 20 年度全国大会(2008)
- 17) Asanuma, H., Liu, H., Niitsuma, H. and Baria, R.: “Discrimination of polarization of reflected waves in the triaxial drill-bit VSP and imaging of subsurface structure at Soultz, France”, SEG 2000 Annual Mtg., CD-ROM(2000)

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	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	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	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	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の) 1	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の) 1	1

(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

組立量	SI組立単位			
	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 <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		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 <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷, 電流量	クーロン	C		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 <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	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	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照度	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
放射線量	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> cd
放射線種の放射能 <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, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
線量当量, 周辺線量当量, 方向線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

(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。  
 (c) 測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、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、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、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、しばしば誤った用語で「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

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
体積エネルギー	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>
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> kg s <sup>-2</sup>
電荷密度	ジュール毎平方メートル	J/m <sup>2</sup>	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
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> s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	y

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	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)′=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=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
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=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
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

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
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> cd m <sup>-2</sup>
ファ	ph	1 ph=1 cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx
ガル	Gal	1 Gal=1 cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe ≐ (10 <sup>3</sup> /4π) A m <sup>-1</sup>

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≐」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 f=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 <sup>-6</sup> m

