



**超深地層研究所計画（岩盤力学に関する調査研究）  
深度 300m ステージでのコア法による初期応力測定**

Mizunami Underground Research Laboratory Project - Rock Mechanical Investigations  
In Situ Stress Measurements using Core-based Methods on the - 300 m Stage

真田 祐幸 引間 亮一 丹野 剛男 松井 裕哉  
佐藤 稔紀 加藤 春實

Hiroyuki SANADA, Ryoichi HIKIMA, Takeo TANNO, Hiroya MATSUI  
Toshinori SATO and Harumi KATO

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

January 2012

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

超深地層研究所計画(岩盤力学に関する調査研究)  
深度 300 m ステージでのコア法による初期応力測定

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  
真田 祐幸、引間 亮一<sup>\*</sup>、丹野 剛男<sup>\*</sup>、松井 裕哉、佐藤 稔紀、加藤 春實<sup>\*</sup>

(2011 年 11 月 8 日受理)

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目標とする研究プロジェクトであり、「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 段階から構成されている。本計画における岩盤力学に関する調査研究では、第 1 段階で構築した初期応力や物理・力学データの分布を表現した岩盤力学モデルの妥当性確認及び坑道周辺岩盤の挙動評価などを通じ、第 1 段階で適用した調査・解析・評価手法の有効性を確認している。瑞浪超深地層研究所の研究坑道の深度 300 m ステージにおけるコア法による初期応力測定は、深度 300 m ステージの初期応力状態の把握を目的とし、深度 300 m ステージで掘削されたボーリング孔(08MI13 号孔、09MI20 号孔)から採取されたコアを用い、コア法の一種である Differential Strain Curve Analysis(以下、DSCA)を実施した。また、コア法の結果の補完のために、DSCA 試験で採取したコア近傍の岩石を多面体に整形し三次元弾性波速度測定を実施した。本調査で得られた知見は、第 1 段階で得られた初期応力測定結果の妥当性確認のために活用される。本調査の結果を以下に記す。

- i. 主応力の方向について、08MI13 号孔と 09MI20 号孔の結果を比較すると、08MI13 号孔における、最大主応力の方向は概ね北西－南東方向に分布するという傾向が見られた。この傾向は、今まで実施してきた第 1, 2 段階での初期応力測定で得られた最大主応力方向と調和的だった。一方で、09MI20 号孔については、08MI13 号孔の結果に比べ、バラツキが大きく系統的な分布傾向を見出すことが難しかった。08MI13 号孔付近の初期応力状態は、第 1 段階での調査結果と同様に、主応力の方向が北西－南東方向に分布すると予想される。
- ii. クラックパラメータから推定される主応力比は、応力比の範囲および平均値ともに 08MI13 号孔と 09MI20 号孔では同等の結果が得られた。具体的には、深度 300 m ステージの初期応力状態は、2 以下の主応力比を示すと予想される。
- iii. 08MI13 号孔の三次元弾性波速度の主値と DSCA 試験のクラックパラメータの比較をした結果、主値の方向・傾斜は一致しなかった。一方で、09MI20 号孔での比較では、弾性波速度の主値の内、最小速度と DSCA 試験の最大主値の方位・傾斜が一致した。

---

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

※技術開発協力員

\*明間ボーリング

Mizunami Underground Research Laboratory Project - Rock Mechanical Investigations  
In Situ Stress Measurements using Core-based Methods on the - 300 m Stage

Hiroyuki SANADA, Ryoichi HIKIMA<sup>※</sup>, Takeo TANNO<sup>※</sup>,  
Hiroya MATSUI, Toshinori SATO and Harumi KATO<sup>\*</sup>

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

(Received November 8, 2011)

The Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) Project has been implemented to establish techniques for investigation, analysis and assessment of the deep geological environment and to develop a range of engineering techniques for application deep underground. In this report, results of Differential Strain Curve Analysis (DSCA) and elastic wave measurements using polyhedral specimens from the 08MI13 and 09MI20 boreholes on -300 m Stage at the MIU are described. The objectives of this work are to understand in situ stress condition around -300 m Stage and confirm validity of *in situ* stress measurements during the surface-based investigation phase. The results are summarized as follows;

- i. The maximum principal stress is distributed in a NW-SE direction in the 08MI13 borehole. This result corresponds with *in situ* stress measurement results obtained during the surface-based investigation and construction phases. However the maximum principal stresses determined in the 09MI20 borehole have such a wide range that a consistent interpretation is difficult.
- ii. The ranges and averages of the principal stress ratios are almost equivalent and show less than two in the 08MI13 and 09MI20 boreholes.
- iii. Principal values from the DSCA and elastic wave measurements using polyhedral specimens from the 08MI13 and 09MI20 boreholes are compared. Although consistency of principal value for 08MI13 borehole isn't observed, results for 09MI20 come out the opposite of 08MI13.

Keywords: Mizunami Underground Research Laboratory Project, Rock Mechanical Investigation, *In Situ* Stress, DSCA

---

※Collaborating Engineer

\*Akema boring

目次

1. はじめに	1
2. DSCA 法の測定原理と調査仕様	2
2.1 DSCA 法の測定原理	2
2.2 調査仕様	3
3. DSCA 試験の結果	7
3.1 圧力-差ひずみ曲線	7
3.2 载荷中の差ひずみの主値の方向の変化	12
3.3 算定されたクラックパラメータ	15
4. 多面体供試体を用いた弾性波速度測定	19
4.1 弾性波速度測定	19
4.2 計測結果	20
5. 深度 300 m ステージの初期応力状態および第 1 段階の初期応力測定結果との対比	23
6. まとめ	25
参考文献	26

CONTENTS

1. Introduction .....	1
2. Measurement principal and experimental detail of DSCA .....	2
2.1 Measurement principal of DSCA .....	2
2.2 Experimental detail .....	3
3. Results of DSCA .....	7
3.1 Pressure-differential strain curve .....	7
3.2 Variation of principal value of differential strain during loading .....	12
3.3 Crack parameters .....	15
4. Measurement of elastic wave velocity using polyhedral specimens .....	19
4.1 Measurement of elastic wave velocity .....	19
4.2 Results .....	20
5. In situ stress condition around -300 m Stage and comparison with in situ stress during Phase I .....	23
6. Conclusions .....	25
References .....	26

図目次

図 2.1.1	岩石の圧力-ひずみ曲線の模式図	2
図 2.2.1	瑞浪超深地層研究所の研究坑道のレイアウトと 08MI13 号孔と 09MI20 号孔の位置図	3
図 2.2.2	ひずみゲージ接着前の 08MI13 号孔と 09MI20 号孔の供試体写真	5
図 2.2.3	供試体に接着したひずみゲージの配置	5
図 2.2.4	DSCA 試験の装置模式図	6
図 3.1.1	各試験の圧力-差ひずみ曲線	7
図 3.2.1	08MI13 号孔の载荷中の差ひずみの主値の変化	13
図 3.2.2	09MI20 号孔の载荷中の差ひずみの主値の変化	14
図 3.3.1	クラックパラメータの走向・傾斜	16
図 3.3.2	クラックパラメータ ( $\beta^1, \Delta\beta, \Delta\beta/\beta^1, \eta_0$ ) の下半球投影図	17
図 4.1.1	試験に使用した多面体供試体の写真	19
図 4.2.1	08P の三次元弾性波速度分布と 08A の DSCA 試験結果	21
図 4.2.2	09P の三次元弾性波速度分布と 09D の DSCA 試験結果	21
図 5.1	第 1 段階で掘削したボーリング孔の位置図	23
図 5.2	MIZ-1 号孔と深度 100 m, 200 m での初期応力測定結果の比較	24

表目次

表 2.2.1	DSCA 試験に使用した供試体の採取深度等	4
表 2.2.2	DSCA 試験の仕様	4
表 2.2.3	測定機器の一覧	6
表 3.3.1	算定されたクラックパラメータ	15
表 4.1.1	弾性波速度測定に使用した供試体の深度	19
表 4.1.2	多面体供試体を用いた弾性波速度測定の仕様	19
表 4.2.1	求められた速度成分	22

## 1. はじめに

超深地層研究所計画<sup>1)</sup>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目標とする研究プロジェクトであり、「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 段階から構成されている。本計画における岩盤力学に関する調査研究では、第 1 段階で構築した初期応力や物理・力学データの分布を表現した岩盤力学モデルの妥当性確認および坑道周辺岩盤の挙動評価などを通じ、第 1 段階で適用した調査・解析・評価手法の有効性を確認している。

瑞浪超深地層研究所の研究坑道の深度 300 m ステージにおけるコア法による初期応力測定は、深度 300 m ステージの初期応力状態の把握を目的とし、深度 300 m ステージで掘削されたボーリング孔 (08MI13 号孔、09MI20 号孔) から採取されたコアを用い、コア法の一つである Differential Strain Curve Analysis (以下、DSCA) を実施した。また、コア法の結果の補完のために、DSCA 試験で採取したコア近傍の岩石を多面体に整形し三次元弾性波速度測定を実施した。本調査で得られた知見は、第 1 段階で得られた初期応力測定結果<sup>2)</sup>の妥当性確認のために活用される。

第 2 章では、DSCA 試験の測定原理・試験仕様および解析方法を記述した。第 3 章では、DSCA 試験を実施した全供試体の圧力-差ひずみ曲線および算定されたクラックパラメータを記述した。第 4 章では、多面体供試体を用いた弾性波速度測定の試験仕様と結果を記述した。第 5 章では、本調査結果から予想される深度 300 m ステージの初期応力状態を示すとともにそれらと第 1 段階で得られた初期応力測定結果との対比を記述した。第 6 章では、結言として本調査で得られた知見を記述した。

## 2. DSCA 法の測定原理と調査仕様

### 2.1 DSCA 法の測定原理

DSCA 法は、Strickland and Ren (1980)<sup>3)</sup>などによって開発されてきた初期応力測定方法の一つである。この方法は、ボーリング掘削により採取した岩石コアの微小亀裂分布を計測し、その微小亀裂分布と初期応力とを幾つかの仮定の基で関連付けて応力が評価される。その仮定を以下に示す<sup>3,4)</sup>。

- ① ボーリングなどによって地圧が解放されると岩石が膨張し、それに伴って初期主応力方向に垂直に微小クラックが発生する。
- ② 発生する微小クラックの量は初期(有効)主応力の大きさに比例する。
- ③ 応力解放以前に存在していた微小き裂は無視できる。

図 2.1.1 に岩石を静水圧载荷させた際の岩石の圧力-ひずみ曲線の模式図を示す。岩石を静水圧载荷すると、図 2.1.1 に示すように岩石に含まれる微小亀裂が徐々に閉鎖することにより、圧力-ひずみ線図の接線勾配の低下が見られる。その後、岩石内部に微小亀裂が完全に閉鎖することにより、接線勾配が一定になる。この図に示した圧力-ひずみ線図の初期の接線勾配 $\beta_0$ 、ひずみ変化率が一定になった際の接線勾配 $\beta^1$ 、ひずみ変化率が不変になった際の圧力-ひずみ線図の接線とひずみ軸が交わった点 $\eta_0$ はクラックパラメータと呼ばれ、応力解析の際に使用される。

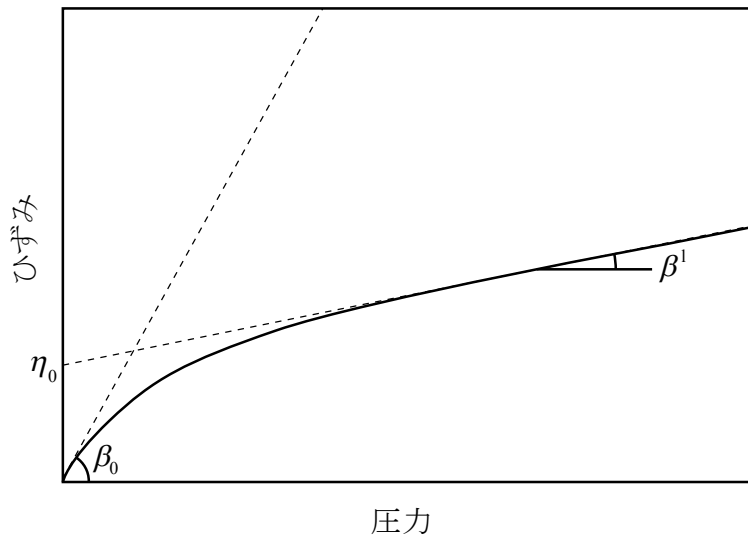


図 2.1.1 岩石の圧力-ひずみ曲線の模式図

Strickland and Ren (1980)<sup>3)</sup>は、クラックパラメータの内 $\beta_0$ と $\beta^1$ を使用した応力解析方法を提案している。解析は、静水圧载荷中に測定された独立な 6 方向以上のひずみから $\Delta\beta$ が求められる。この $\Delta\beta$ は岩石内部のクラックの密度量に関する情報を含む<sup>4)</sup>。 $\Delta\beta$ は次式で表される。

$$\Delta\beta = \beta_0 - \beta^1 \quad (2.1.1)$$

6 方向以上の $\Delta\beta$ の計測結果から最小二乗法を用い、最確のひずみテンソルが求められる。その求められたひずみテンソルから、ひずみの主値が算定される。その後、松木他(1995)<sup>4)</sup>によって、 $\beta^1$ の異方性の

影響を低減するために、 $\Delta\beta$ を $\beta^1$ で除した“ $\Delta\beta/\beta^1$ ”を Strickland and Ren (1980)<sup>3)</sup>によって提案された“ $\Delta\beta$ ”の代わりに解析に使用する方法が提案された。また、Dey and Brown (1986)<sup>5)</sup>は、亀裂が閉口した後の線圧縮率を元に、亀裂開口量“ $\eta_0$ ”を用い、 $\eta_0$ が主ひずみに比例すると見なし、主応力比と方向を求めている。

## 2.2 調査仕様

試験は、深度 300 m ステージにおける 08MI13 号孔(水平ボーリング孔、掘削長:62.5 m)、09MI20 号孔(水平ボーリング孔、掘削長:100 m)のそれぞれ 5 深度で採取したコアを用い実施した。図 2.2.1 に 2 本のボーリング孔の位置図を示す(図 2.2.1 (a):全体図、図 2.2.1 (b):平面図)。試験には、方向が特定されたコアを用いる必要がある。方位の特定は、ボアホールテレビ(BTV)画像に記録された深度・走向・傾斜が既知の天然亀裂と、同一深度のコアと交差する天然の亀裂との照合によって決定した。各ボーリング孔の方位・傾斜・深度等を表 2.2.1 に、DSCA 試験の仕様を表 2.2.2 に示す。供試体名の最初の 08 と 09 は、それぞれ 08MI13 号孔および 09MI20 号孔のコアから採取されたことを意味し、08・09 に続くアルファベットの順に採取深度は孔口から遠くなる。採取深度はボーリング孔軸と直交する供試体平面のうち孔口に近い方の端面の深度と一致する。採取の場所については、深度 300 m ステージの初期応力分布を平面的に把握できるように、採取位置を一地点に集中せず、広範囲にわたるようにサンプリングした。具体的には、サンプリング個所は 10~10 数 m 程度の離間がある。なお、岩石の風化および変質が認められず、かつ亀裂の近傍を避け選定した。

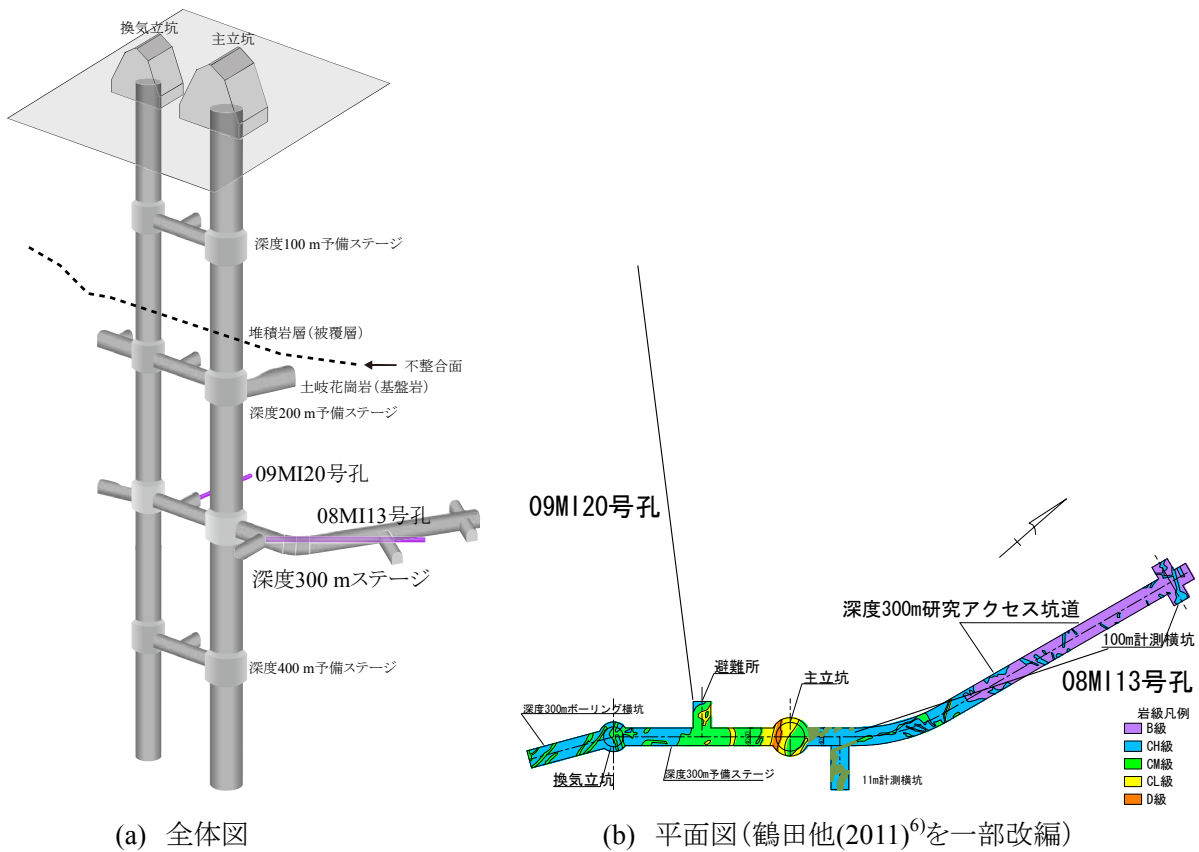


図 2.2.1 瑞浪超深地層研究所の研究坑道のレイアウトと 08MI13 号孔と 09MI20 号孔の位置図

表 2.2.1 DSCA 試験に使用した供試体の採取深度等 (mabh: meter along borehole)

ボーリング孔名	供試体名	採取深度(mabh)	岩種	岩盤等級
08MI13 号孔 (N19.6E, -1°)	08A	28.70	中～粗粒黒雲母花崗岩	B
	08B	36.50	中～粗粒黒雲母花崗岩	CH
	08C	46.20	中～粗粒黒雲母花崗岩	B
	08D	54.60	中～粗粒黒雲母花崗岩	CH
	08E	58.50	中～粗粒黒雲母花崗岩	B
09MI20 号孔 (N303E, -3°)	09A	27.50	中粒黒雲母花崗岩	CH
	09B	57.30	中粒黒雲母花崗岩	CH
	09C	73.60	中粒黒雲母花崗岩	CH
	09D	73.64	中粒黒雲母花崗岩	CH
	09E	90.80	中粒黒雲母花崗岩	CH

表 2.2.2 DSCA 試験の仕様

試験項目	使用機器、試験体寸法など
DSCA 法による初期応力測定	使用機器 圧力容器 クロムモリブデン鋼製、耐圧 180 MPa 試験体 一辺 35 mm の立方体

供試体は、図 2.2.2 に示すような一辺 35 mm の立方体を、上述したボーリングコアから新たな亀裂が生じないように成形した。図中の X・Y 軸は孔口から孔底を見た時の水平方向 (3 時の方向) が X 軸、ボーリング孔軸が Z 軸を意味する。供試体の作成手順を下記に示す。

- 1) 採取した岩石コアから巨視的な亀裂のない部分を肉眼で選定し、ダイヤモンドカッターで一辺約 40 mm の立方体試料を切り出す。このとき、試験片には切り出した方向がわかるように印をつける。
- 2) 平面研削盤により供試体端面の成形を行い、一辺約 35 mm の立方体試料に仕上げる。
- 3) 成形した試料を空气中で乾燥させた後、45°C に設定した恒温槽内で試料の重量が一定になるまで計量しながら乾燥する。本試験では、試料の重量がほぼ一定になるまで 6 日間乾燥させた。乾燥が終了した試料はデシケータ中で保存する。
- 4) 作成した立方体試験片の互いに直交する 3 面に合計 12 枚のひずみゲージ (ゲージ長 10 mm) を貼付する (図 2.2.3)。接着剤は、試料中の亀裂に接着剤が浸透することをできるだけ防止するために、比較的粘性の高い 2 液混合型ポリエステル系接着剤 (PC-12、共和電業製) を用いた。ひずみゲージ貼付後、ゴム板を介したウエイトにより加圧し、約 0.04 MPa の荷重を 24 時間以上加え放置する。
- 5) 圧力媒体 (油) が岩石試料中に浸透するのを防ぐために、岩石試料の全面をシリコン樹脂で被覆する。



図 2.2.2 ひずみゲージ接着前の 08MI13 号孔と 09MI20 号孔の供試体写真

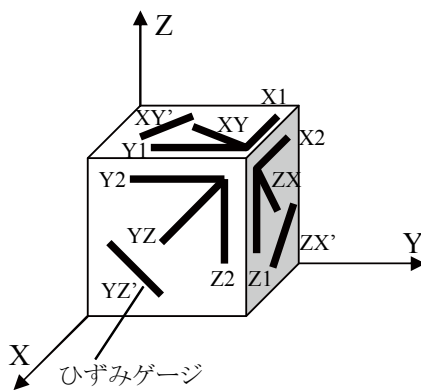


図 2.2.3 供試体に接着したひずみゲージの配置

試験装置の模式図を図 2.2.4 に示す。試験装置は圧力容器(耐圧 180 MPa、クロムモリブデン鋼製)、静水圧を加えるための高圧ポンプと圧力変換器(容量 200 MPa)、データ取得および記録のためのデータアキュイジションコントローラおよびパーソナルコンピュータの 4 部分により構成されている。圧力容器は、高さ 380 mm、外径 274 mm の円筒形で、内部空間は内径 60 mm、高さ 140 mm である。ひずみゲージからの信号を取り出すために圧力容器の上蓋部分に、同時に 32 本のリード線を取り出すことのできるリード線取り出し用金具が取付けられた。表 2.2.3 は、本試験で使用する測定機器の一覧である。

試験手順としては、 $\beta_0$  の圧力範囲を精度良く求めるために、静水圧 7 MPa までは約 0.1 MPa 毎にステップ状に静水圧を加え、静水圧が 7 MPa を越えると約 0.5 MPa 毎に静水圧を加えて、30 分程度で 150 MPa まで高めた。载荷中、岩石試料と熔融石英のひずみを計測しデータアキュイジションコントローラを介してコンピュータに入力した(熔融石英はリファレンス用)。測定は各試料について 3 回繰り返し、初期応力の評価には、3 回目の測定結果<sup>4)</sup>を用いた。

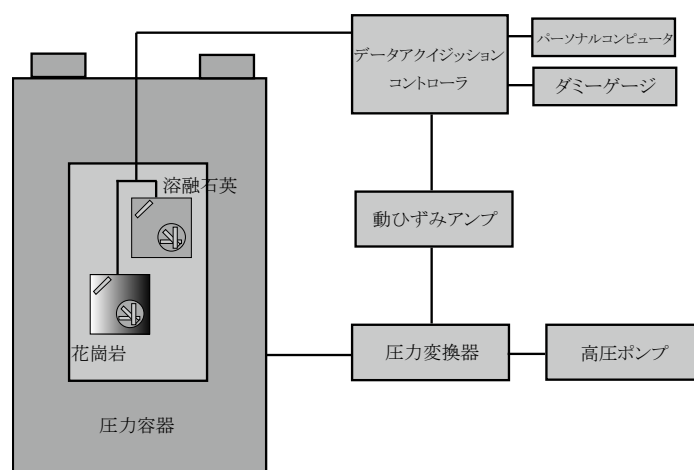


図 2.2.4 DSCA 試験の装置模式図

表 2.2.3 測定機器の一覧

測定機器	メーカー
データアキュイジションコントローラ 7V14	San-ei
動ひずみアンプ、DPM-712B	共和電業(株)
圧力変換器、PG-2TH	共和電業(株)
高圧ポンプ、RIKEN POWER MODEL No.UP-22	RIKEN SEIKI Co., LTD
パーソナルコンピュータ、EPSON PC-386LLR	エプソン

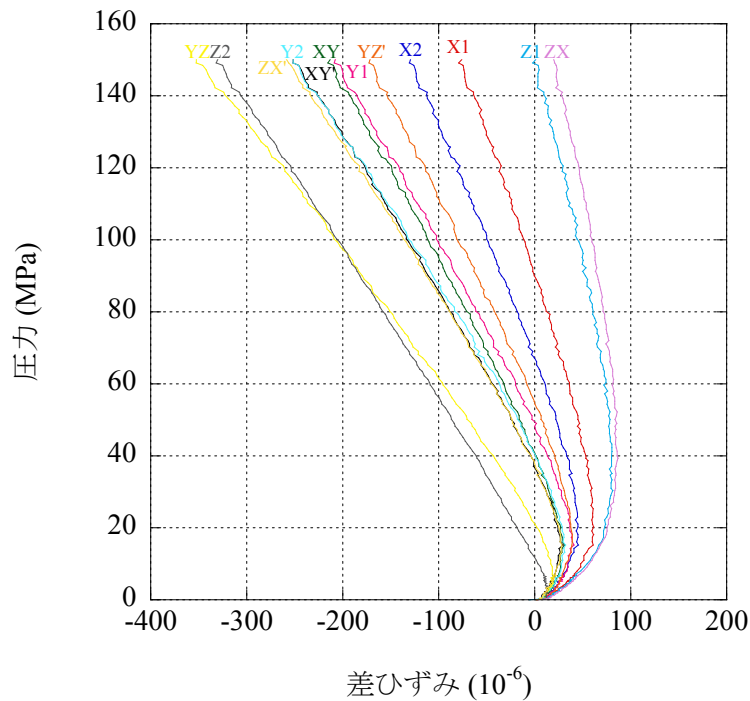
解析は、各方向の $\beta_0$ ,  $\beta^1$ ,  $\Delta\beta$ ,  $\Delta\beta/\beta_0$ ,  $\eta_0$ を算出し、その後ひずみテンソルを算定した。その際、6 個の独立な成分に対して 12 個の計測値があるため、最小二乗法により決定した。ひずみテンソルの主値(主ひずみ)、主ひずみ軸(主ひずみの作用する方向)は、ヤコビ法を用いて求めた。

### 3. DSCA 試験の結果

#### 3.1 圧力—差ひずみ曲線

図 3.1.1 に圧力—差ひずみ曲線を示す。これらは供試体に対して実施した 3 回の繰り返し载荷における 3 回目の結果である。凡例は図 2.2.3 に示したひずみゲージの配置に対応している。09A と 09E の XY' は 3 回目の载荷で断線し、09C の Y1 は、载荷開始直後の低圧領域で差ひずみの勾配が負から正に変動しクラックパラメータの算定が難しかったので、解析に使用しなかった。

図 3.1.1 に示した各供試体の圧力—差ひずみ曲線によると、低圧力領域ではクラックの存在によって非線形挙動を示したが、圧力の増加に伴い圧力—差ひずみ曲線の勾配が一定になり、上記に示した一部の不良点(09A と 09E の XY', 09C の Y1)を除いて、初期応力の算定に必要なクラックパラメータを算定することができた。



(a) 08A

図 3.1.1 各試験の圧力—差ひずみ曲線(1/6)

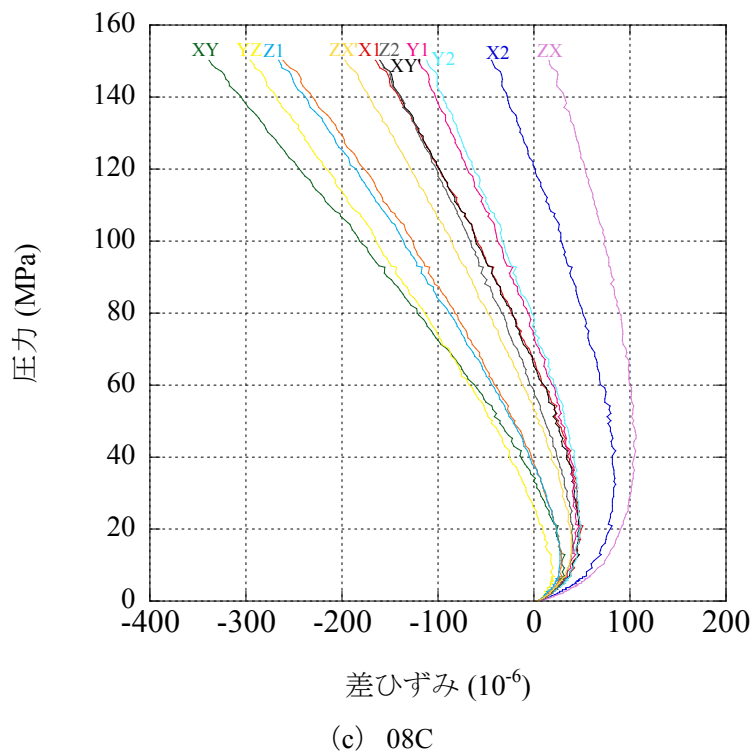
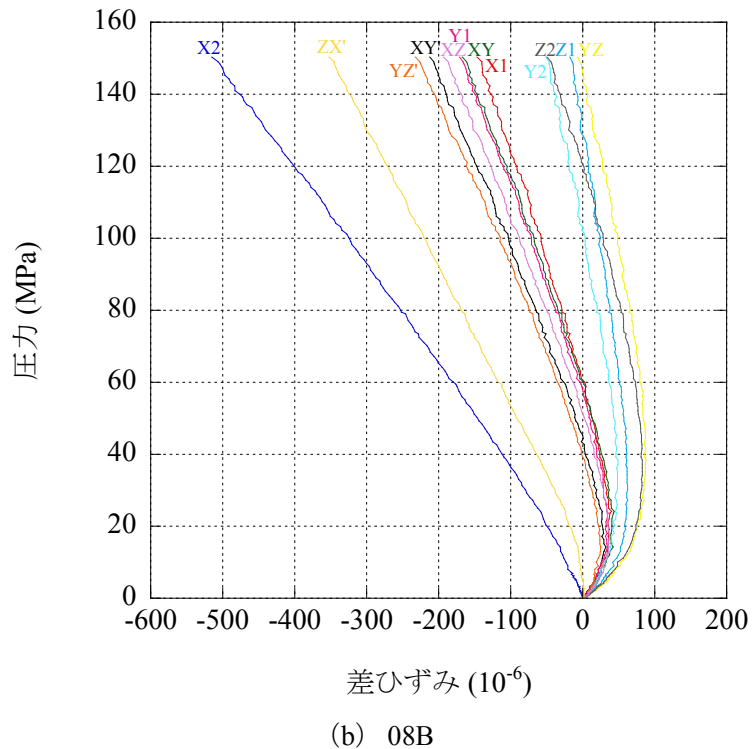
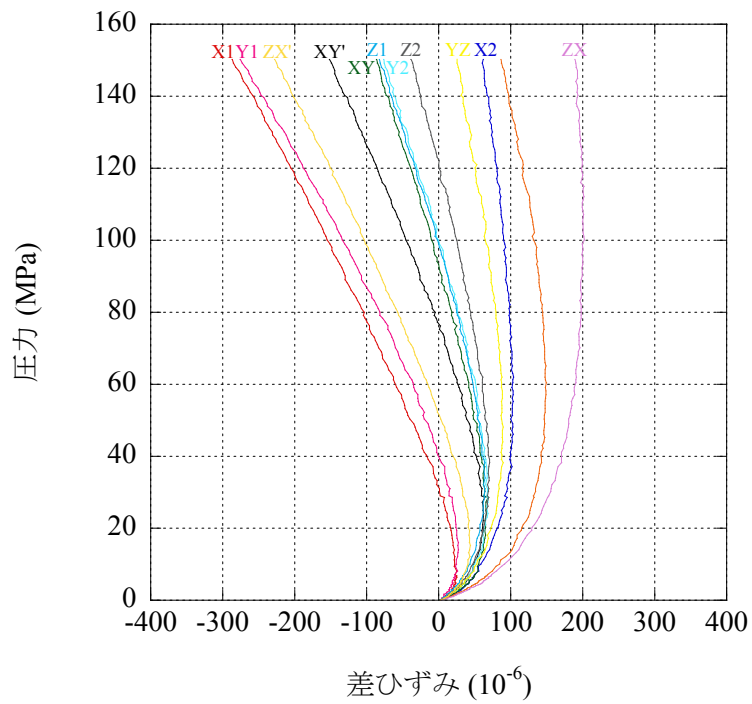
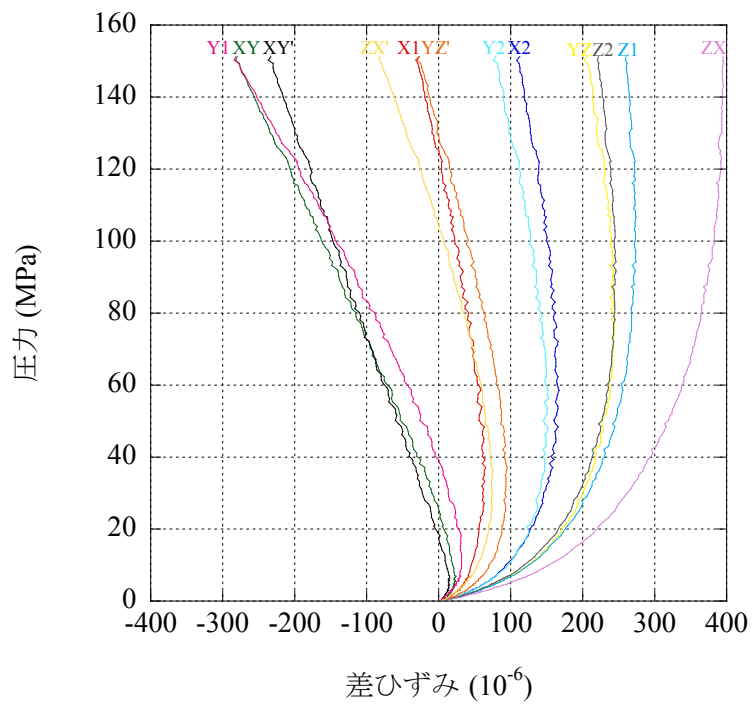


図 3.1.1 各試験の圧力—差ひずみ曲線 (2/6)

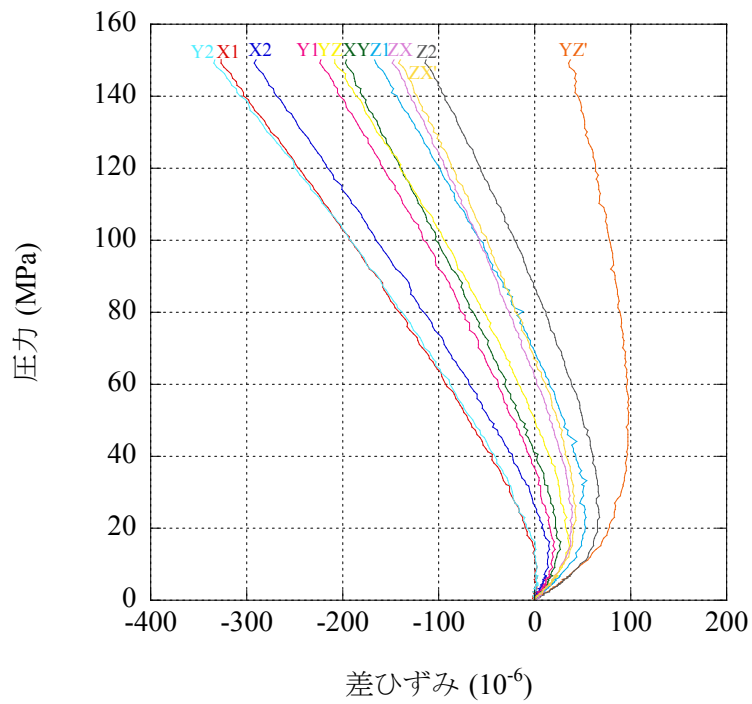


(d) 09D

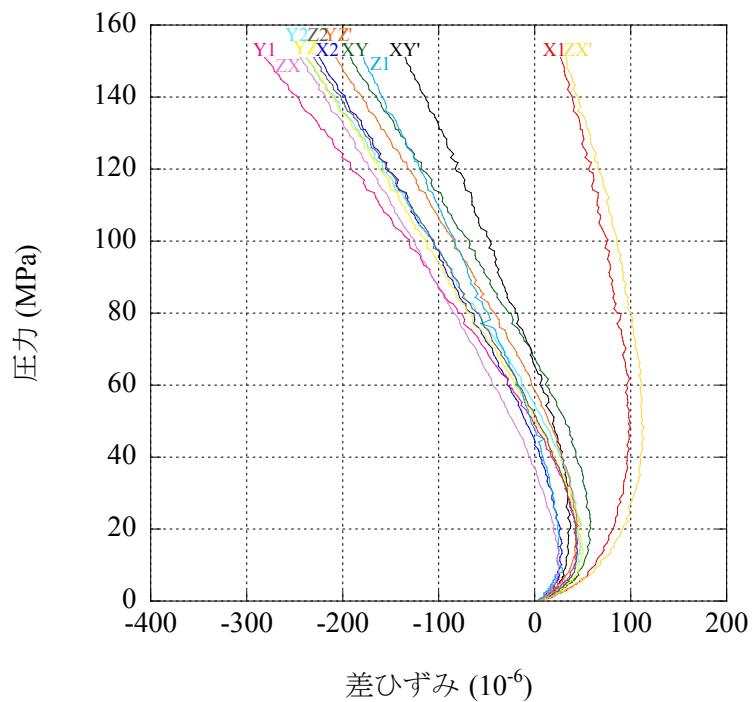


(e) 08E

図 3.1.1 各試験の圧力—差ひずみ曲線 (3/6)



(f) 09A



(g) 09B

図 3.1.1 各試験の圧力—差ひずみ曲線 (4/6)

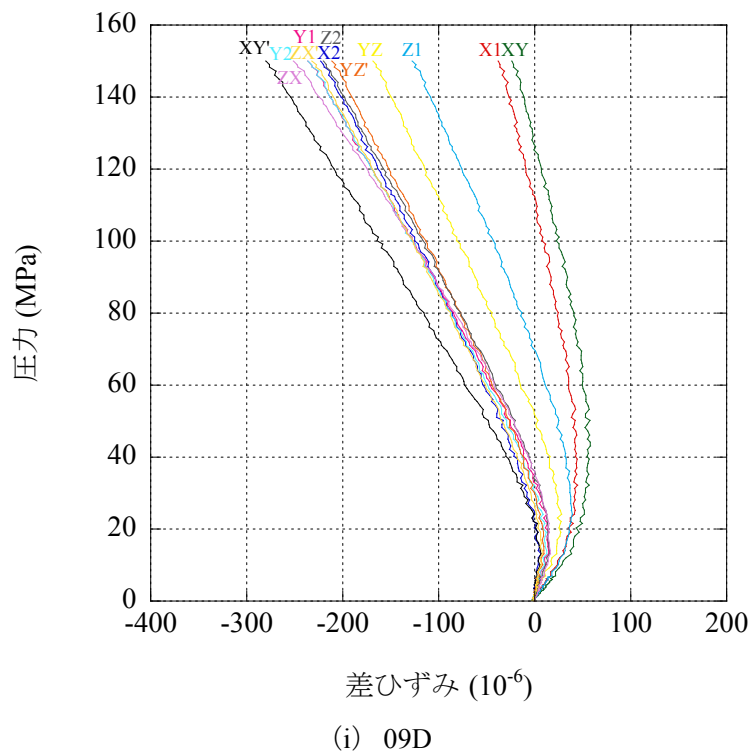
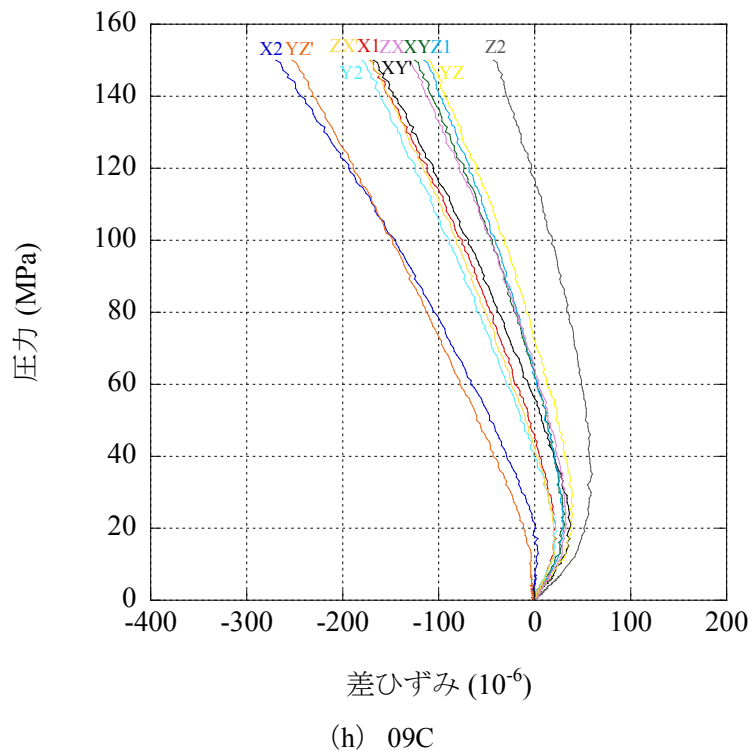


図 3.1.1 各試験の圧力—差ひずみ曲線 (5/6)

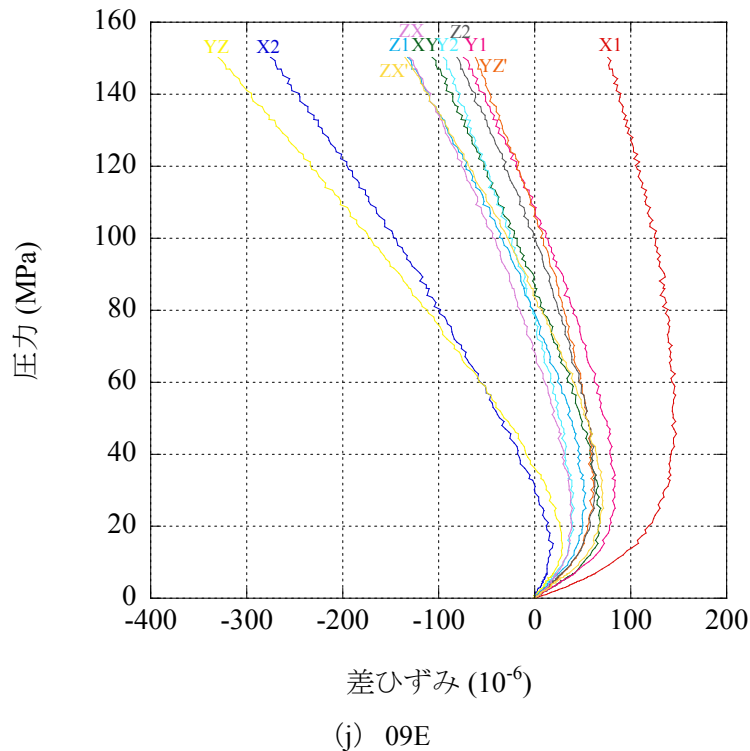


図 3.1.1 各試験の圧力-差ひずみ曲線 (6/6)

### 3.2 载荷中の差ひずみの主値の方向の変化

図 3.2.1、図 3.2.2 に 08MI13 号孔、09MI20 号孔で得られた载荷中における差ひずみの主値の方向の変化を下半球等角投影網にプロットした図を示す。図中の○、△、□はそれぞれ最大、中間、最小の主値の方向を示す。図 3.2.1 と図 3.2.2 を比較すると、圧力の増加に伴う主値の方向の変動は、08MI13 号孔で採取された試料の方が小さく見える。及川他(1995)<sup>7)</sup>は、载荷中における差ひずみの主値の方向の変化を下記の 3 タイプに分類している。

タイプ A: 低周圧時から高周圧時まで主応力の方向はほぼ安定

タイプ B: ごく低周圧時またはごく高周圧時のみ主応力の方向が回転し、中間の周圧区間では安定

タイプ C: ある一つの主応力方向のみが安定し、その方向を中心に残りの 2 方向が回転

そして、及川他(1995)<sup>7)</sup>は、周圧の変化に対する主応力の方向が大きく変化し続ける現象を次に述べる 2 つのように解釈している。

- i. 応力解放時に生じた亀裂よりそれ以外の亀裂の影響が大きく、複数の亀裂系が競合する状態が周圧を大きくしても解消されない。
- ii. 最大・中間および中間・最小主応力の値が近い。

上述したタイプ C は上記の 2 つのいずれかの現象が大きく関与していると考えられ、初期応力の決定が難しいようである<sup>7)</sup>。

このような既存研究の解釈に基づくと、周圧の増加に伴う差ひずみの主値の方向変化が大きく変動した 09MI20 号孔は、上述した i), ii) のような現象が関与していた可能性がある。

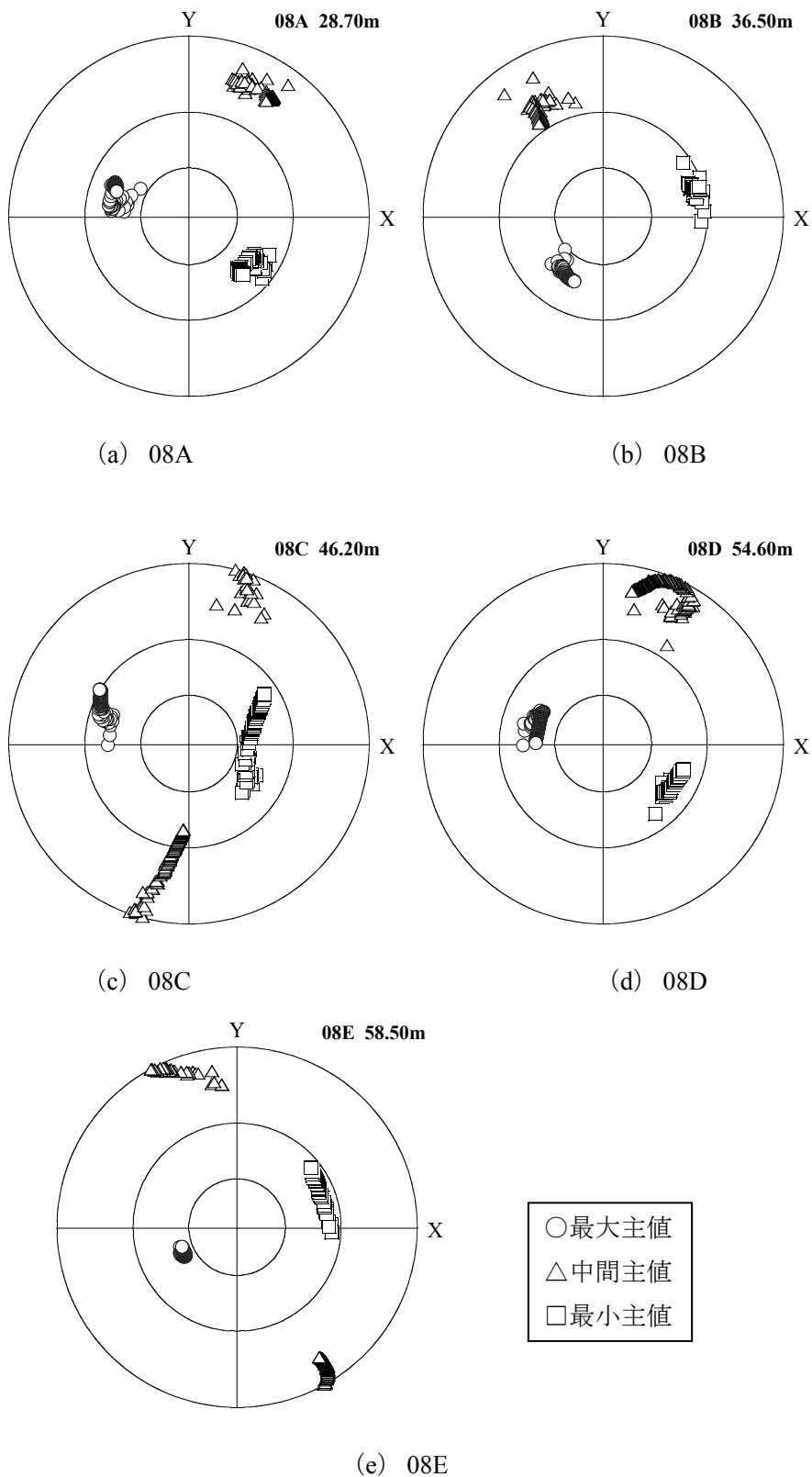


図 3.2.1 08MI13 号孔の载荷中の差ひずみの主値の変化

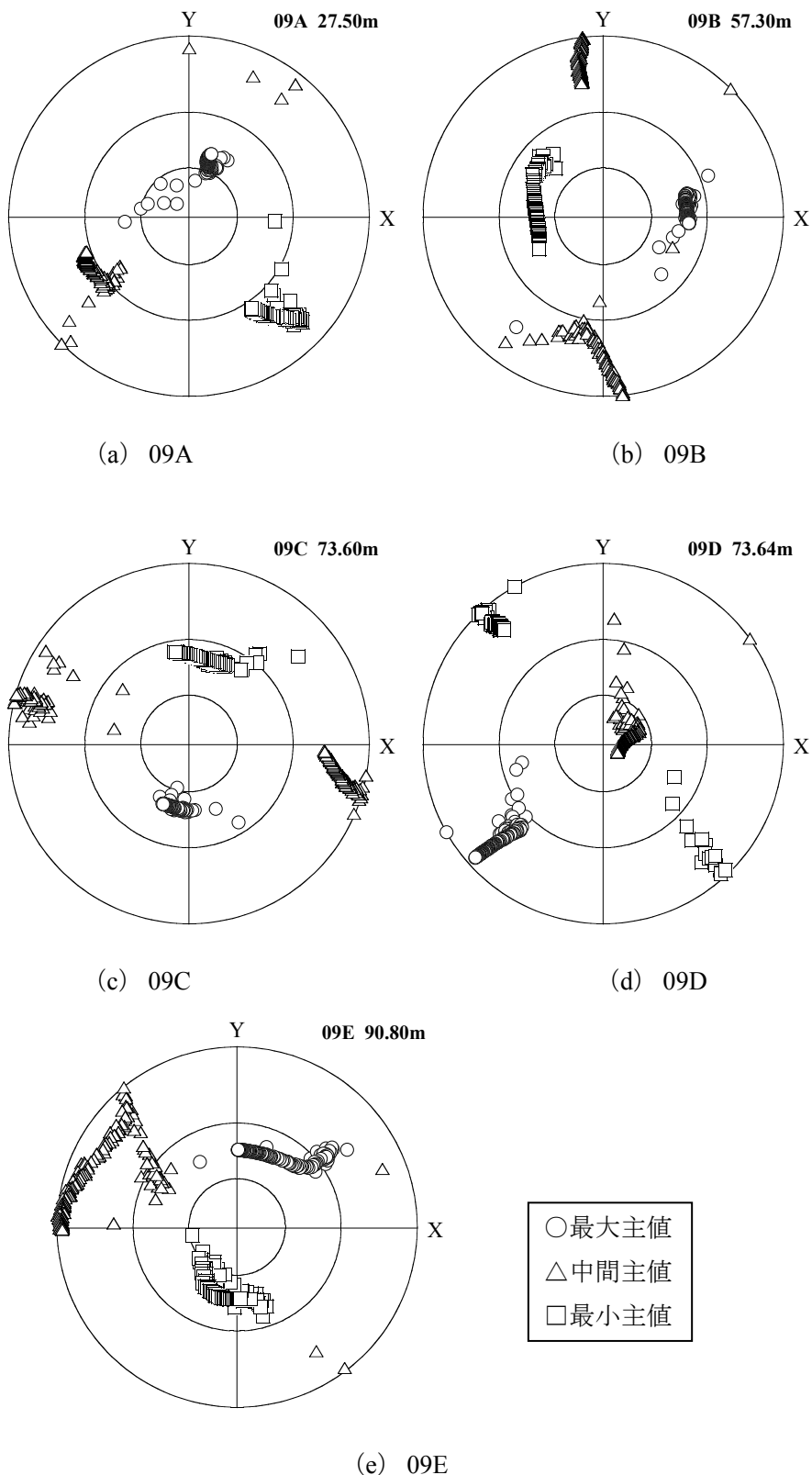


図 3.2.2 09MI20 号孔の载荷中の差ひずみの主値の変化

### 3.3 算定されたクラックパラメータ

表 3.3.1 にクラックパラメータの一覧を示す。表 3.3.1 の一覧表中の走向/傾斜は図 3.3.1 に示すような方向で記述した。また、図 3.3.2 にクラックパラメータの主値の方向の下半球ウルフ投影(等角投影)図を示す。図 3.3.2 の方位は試料に設けた真北基準での東西南北を示している。図中の○・△・□印は、各パラメータの最大・中間・最小主値の方位・傾斜を表し、プロットの傍に記した“08A”などは試料名を表す(表 2.2.1)。結果の解釈は、第 1 段階で得られた初期応力測定結果との対比も加え、第 5 章にて記述する。

表 3.3.1 算定されたクラックパラメータ(1/2)

(a) クラックパラメータ  $\beta^1$  の一覧

深度 (mabh)	番号	$\beta^1(10^{-6}/\text{MPa})$ , 走向/傾斜			$\sigma_1/\sigma_3$	$\sigma_2/\sigma_3$	
		最大主値	中間主値	最小主値			
08MI13 号孔	28.70	08A	8.60, 118°/84°	7.42, 22°/46°	6.42, 215°/45°	1.3	1.2
	36.50	08B	8.58, 261°/46°	7.36, 87°/44°	6.61, -6°/87°	1.3	1.1
	46.20	08C	8.08, 141°/56°	7.27, -93°/49°	6.57, 27°/60°	1.2	1.1
	54.60	08D	9.25, -71°/80°	7.52, 48°/20°	6.76, 196°/73°	1.4	1.1
	58.50	08E	9.64, -76°/86°	7.95, -170°/49°	7.09, 18°/41°	1.4	1.4
09MI20 号孔	27.50	09A	8.25, 131°/57°	7.16, 23°/65°	6.29, 263°/44°	1.3	1.1
	57.30	09B	8.27, 269°/78°	6.97, 175°/71°	6.52, 30°/23°	1.3	1.1
	73.60	09C	8.12, -19°/60°	7.61, 105°/47°	7.14, 230°/59°	1.1	1.1
	73.64	09D	8.33, 70°/55°	7.50, 322°/66°	6.89, 205°/45°	1.2	1.1
	90.80	09E	8.40, 156°/43°	7.65, 53°/78°	6.61, -48°/49°	1.3	1.2

(b) クラックパラメータ  $\Delta\beta$  の一覧

深度 (mabh)	番号	$\Delta\beta(10^{-6}/\text{MPa})$ , 走向/傾斜			$\sigma_1/\sigma_3$	$\sigma_2/\sigma_3$	
		最大主値	中間主値	最小主値			
08MI13 号孔	28.70	08A	6.12, 136°/77°	5.34, 19°/27°	4.73, 232°/67°	1.3	1.1
	36.50	08B	8.10, -83°/62°	5.15, 106°/28°	3.05, 9°/86°	2.7	1.7
	46.20	08C	9.57, 127°/85°	6.60, 28°/32°	5.15, 220°/59°	1.9	1.3
	54.60	08D	10.88, 115°/69°	9.74, 359°/43°	5.44, 220°/55°	2.0	1.8
	58.50	08E	21.51, -83°/75°	8.85, 127°/17°	6.92, 9°/82°	3.1	1.3
09MI20 号孔	27.50	09A	6.99, 143°/88°	4.66, 49°/38°	3.33, 234°/56°	2.1	1.4
	57.30	09B	9.53, 85°/65°	8.23, 308°/32°	4.74, 185°/71°	2.0	1.7
	73.60	09C	5.17, -54°/43°	4.09, -147°/88°	2.37, 121°/48°	2.2	1.7
	73.64	09D	4.37, 15°/53°	3.26, 129°/62°	2.41, 245°/50°	1.8	1.4
	90.80	09E	8.23, 73°/75°	6.38, 310°/26°	5.16, 167°/69°	1.6	1.2

表 3.3.1 算定されたクラックパラメータ(2/2)

(c) クラックパラメータ  $\Delta\beta/\beta^1$  の一覧

深度 (mabh)	番号	$\Delta\beta/\beta^1(-)$ , 走向/傾斜			$\sigma_1/\sigma_3$	$\sigma_2/\sigma_3$	
		最大主値	中間主値	最小主値			
08MI13 号孔	28.70	08A	0.79, 174°/39°	0.73, 351°/51°	0.64, 82°/88°	1.2	1.1
	36.50	08B	1.00, -79°/69°	0.70, 102°/21°	0.44, 11°/90°	2.3	1.6
	46.20	08C	1.23, -51°/86°	1.00, 44°/43°	0.69, 215°/47°	1.8	1.4
	54.60	08D	1.31, 68°/35°	1.24, 333°/87°	0.78, 241°/55°	1.7	1.6
	58.50	08E	2.31, -85°/72°	1.18, 56°/23°	0.94, 180°/77°	2.5	1.3
09MI20 号孔	27.50	09A	0.92, -36°/80°	0.62, 70°/34°	0.51, 228°/58°	1.8	1.2
	57.30	09B	1.34, 65°/33°	1.08, 290°/65°	0.69, 190°/69°	1.9	1.6
	73.60	09C	0.67, -75°/43°	0.54, 24°/82°	0.31, 121°/48°	2.2	1.7
	73.64	09D	0.56, 5°/60°	0.42, 137°/41°	0.34, 259°/65°	1.6	1.2
	90.80	09E	1.06, 79°/85°	0.95, 341°/33°	0.60, 172°/57°	1.8	1.6

(d) クラックパラメータ  $\eta_0$  の一覧

深度 (mabh)	番号	$\eta_0(10^{-6})$ , 走向/傾斜			$\sigma_1/\sigma_3$	$\sigma_2/\sigma_3$	
		最大主値	中間主値	最小主値			
08MI13 号孔	28.70	08A	135, 122°/66°	101, 4°/44°	89, 229°/56°	1.5	1.1
	36.50	08B	174, -87°/65°	111, 87°/26°	58, 182°/88°	3.0	1.9
	46.20	08C	210, 121°/76°	139, 20°/50°	89, 226°/43°	2.4	1.6
	54.60	08D	237, 102°/57°	143, 337°/49°	124, 216°/59°	1.9	1.2
	58.50	08E	401, -87°/74°	123, 172°/55°	109, 23°/40°	3.7	1.1
09MI20 号孔	27.50	09A	182, 147°/80°	114, -106°/32°	87, 60°/51°	2.1	1.3
	57.30	09B	214, 95°/61°	149, -99°/29°	99, 2°/84°	2.2	1.5
	73.60	09C	148, -36°/49°	131, -137°/77°	66, 119°/44°	2.2	2.0
	73.64	09D	140, 18°/59°	87, 128°/62°	59, 250°/45°	2.4	1.5
	90.80	09E	200, -78°/88°	154, -171°/40°	139, 14°/50°	1.4	1.1

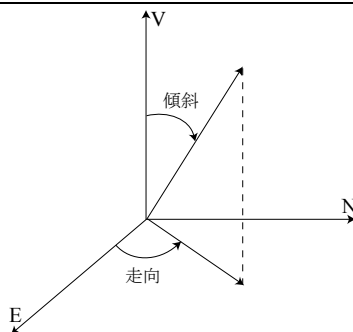
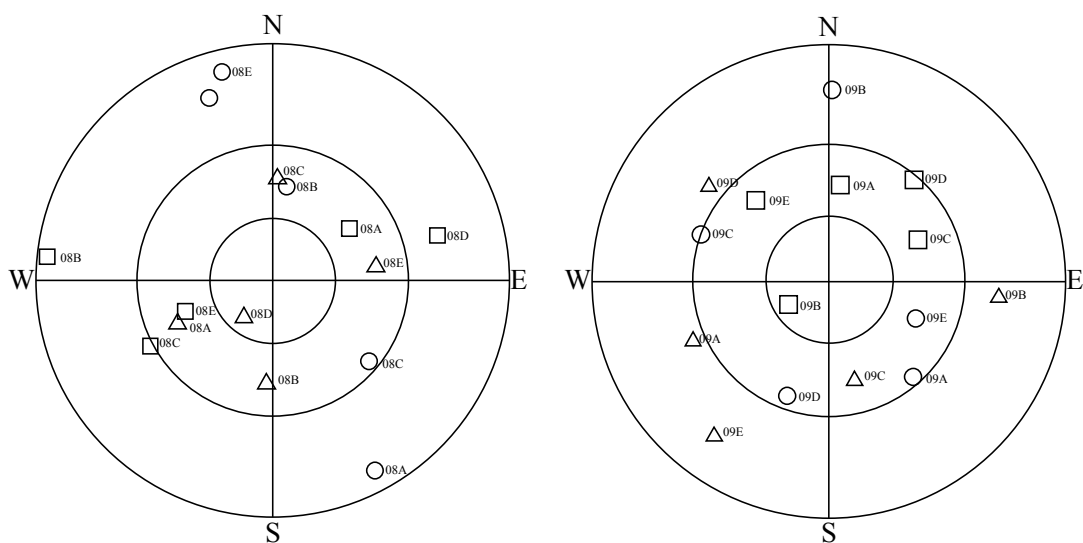
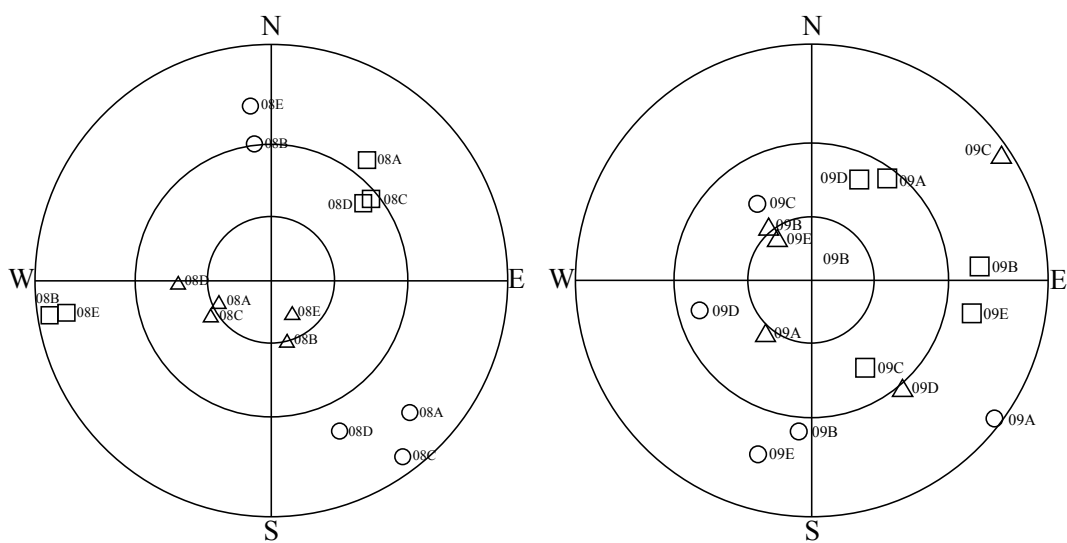


図 3.3.1 クラックパラメータの走向・傾斜



(a) 08MI13: $\beta^1$

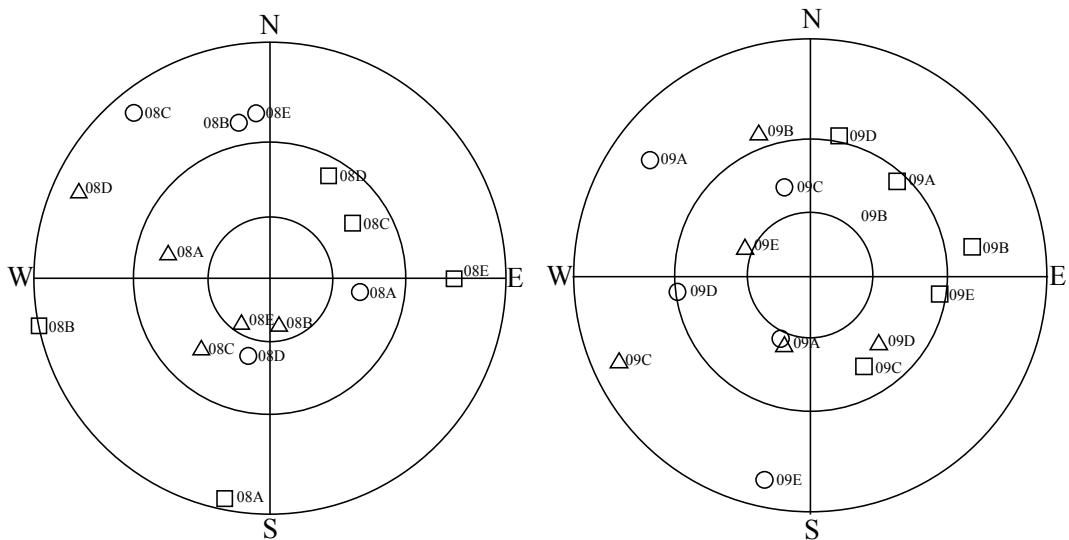
(b) 09MI20: $\beta^1$



(c) 08MI13: $\Delta\beta$

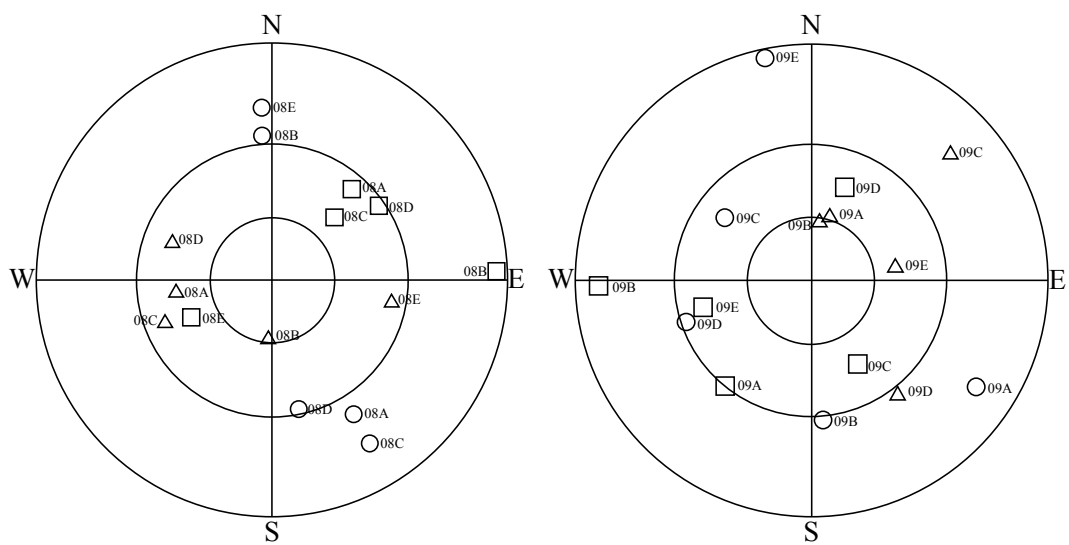
(d) 09MI20: $\Delta\beta$

図 3.3.2 クラックパラメータ ( $\beta^1, \Delta\beta, \Delta\beta/\beta^1, \eta_0$ ) の下半球投影図 (1/2)



(e) 08MI13:  $\Delta\beta/\beta^1$

(f) 09MI20:  $\Delta\beta/\beta^1$



(g) 08MI13:  $\eta_0$

(h) 09MI20:  $\eta_0$

図 3.3.2 クラックパラメータ ( $\beta^1, \Delta\beta, \Delta\beta/\beta^1, \eta_0$ ) の下半球投影図 (2/2)

#### 4. 多面体供試体を用いた弾性波速度測定

花崗岩を多面体供試体に成型し、各面で弾性波速度測定を行うと、主値を含む弾性波速度の三次元方位分布を評価することができる<sup>8)</sup>。このようにして求めた方位分布は、DSCA 試験と同様微小亀裂の方位分布に対する情報を与える。本章では、DSCA 試験の実施箇所近傍で実施された多面体供試体を用いた三次元弾性波速度測定結果を示す。

##### 4.1 弾性波速度測定

供試体の深度を表 4.1.1 に、試験の仕様を表 4.1.2 に示す。供試体は、08MI13 号孔の 28.63 mabh および 09MI20 号孔の 73.70 mabh から採取した岩石コアから製作した。ここでは、これらの試験片の名称を、それぞれ 08P および 09P と呼ぶ。これらの試験片の採取深度と、DSCA 試験の供試体 08A および 09D の採取深度の差は、それぞれ 7 cm および 6 cm と接近している。供試体の写真を図 4.1.1 に示す。供試体の作成は、円柱形供試体を平面研削盤にて、数度ずつ回転させながら研削し作成した<sup>8)</sup>。

表 4.1.1 弾性波速度測定に使用した供試体の深度

供試体名	ボーリング孔名	採取深度 (mabh)	備考
08P	08MI13 号孔	28.63	DSCA 試験の 08A の近傍
09P	09MI20 号孔	73.70	DSCA 試験の 09D の近傍

表 4.1.2 多面体供試体を用いた弾性波速度測定の仕様

試験項目	使用機器、試験体寸法など
多面体供試体を用いた弾性波速度測定	使用機器 超音波受信装置 試験体 直径 60 mm 程度の 98 面体、2 試料

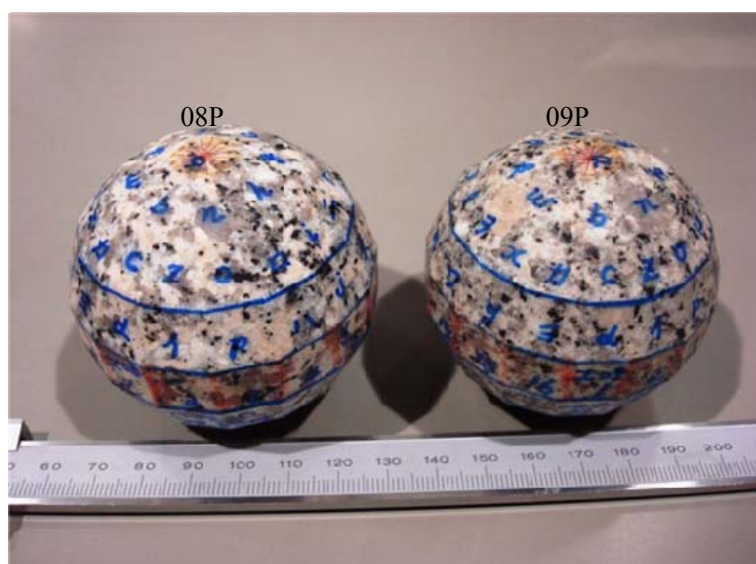


図 4.1.1 試験に使用した多面体供試体の写真

試験片を室内で一昼夜自然乾燥させ、超音波受信装置（応用地質（株）製、ソニックビューアーSX、MODEL-5251A、発振パルス 200 kHz）を試験片の平行な 1 対の表面に装着し、繰り返し信号をあたえて弾性波の走時を測定した。対をなす 49 組の平行な表面間の距離はノギスによって測定した。三次元弾性波速度測定は、奈良他（2008）<sup>8)</sup>と同様の方法で実施した。岩石の弾性波速度方位分布関数  $V(\theta, \varphi)$  は、 $(\theta, \varphi)$  方向の単位ベクトル  $\mathbf{k}=(\cos\theta\sin\varphi, \sin\theta\sin\varphi, \cos\varphi)$  を考え、その方向余弦を  $v_{ki}$  ( $i=x, y, z$ ) と表すと、次のように表すことができる<sup>8)</sup>。

$$V(\theta, \varphi) = V_{xx}v_{kx}^2 + V_{yy}v_{ky}^2 + V_{zz}v_{kz}^2 + 2V_{yz}v_{ky}v_{kz} + 2V_{zx}v_{kz}v_{kx} + 2V_{xy}v_{kx}v_{ky} \quad (4.1.1)$$

$V(\theta, \varphi)$  を  $k$  方向に伝播する弾性波速度  $V_{kk}$  と解釈すると、次のように書き換えられる。

$$V_{kk} = V_{ij}v_{ki}v_{kj} \quad (i, j = x, y, z) \quad (4.1.2)$$

ここで、 $V_{ij}=V_{ji}$  が成り立つとする。式(4.1.2)は次式の二次曲面において、原点から  $k$  方向の曲面までの距離(径)が  $1/\sqrt{V_{kk}}$  で与えられることと同義である。

$$V_{ij}x_ix_j = 1 \quad (4.1.3)$$

ここで、 $x_x=x, x_y=y, x_z=z$  である。式(4.1.2)は、速度方位分布が二次曲面で表現されることを意味している。さらに、その係数  $V_{ij}$  は 2 階対称テンソルとして取り扱うことができる。これは、主値および主軸の存在を示唆し、次式にあるように、それらが応力やひずみの場合と同様な固有値・固有ベクトルで表されることを示唆している。

$$V_{ij}m_i = Vm_j \quad (4.1.4)$$

ここで、 $m_i$  は主軸方向の単位ベクトル、 $V$  は主値であり、速度方位分布の測定結果に式(4.1.1)を適用して係数  $V_{ij}$  を求めれば、応力(ひずみ)テンソルから主応力(主ひずみ)を求めるのと同様な計算により、速度方位分布の主軸方向とその速度の値を求めることができる。また、係数  $V_{ij}$  と各方向の方向余弦を式(4.1.2)に適用すれば、各方向に進行する弾性波速度を計算することができる。

## 4.2 計測結果

図 4.2.1 に 08P の三次元弾性波速度分布と 08A の DSCA 試験結果を、図 4.2.2 に 09P の三次元弾性波速度分布と 09D の DSCA 試験結果、速度成分の一覧を表 4.2.1 に示す。表 4.2.1 の走向/傾斜は図 3.3.1 に示すような方向で記述した。DSCA 試験結果については、図 3.3.1 と同様に●、▲、■はそれぞれ  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  を示している。図 4.2.1 に示した 08P の弾性波速度分布と 08A の DSCA 試験の結果によると、主値の方位・傾斜の一致は良くなかった。一方で、図 4.2.2 に示した 09P と 09D の比較結果によると、弾性波速度の主値の内、最小速度と DSCA 試験の最大主値の方位・傾斜は良く一致した。中間速度の主値と DSCA 試験の最小主値、最大速度の主値と DSCA 試験の中間主値の分布は、図に示したような下半球投影図において近傍に位置した。このことから、弾性波速度と DSCA 試験で得られたクラックパラメータの方位分布を比較すると、08P については調和的な傾向が見られなかったが、09P については比較的一致する傾向が見られた。考えられる一つの理由としては、08P と 09P の弾性波速度の最大と最小の

値を比較すると、08P については 148 m/s、09P については 231 m/s と若干 09P の方が大きな差である。速度差の大きい 09P の方が、応力解放に伴うひずみ量が大きかったことにより今回のように調和的な結果が得られた可能性もある。しかしながら、本試験のサンプル数は少なく、より詳細な検討については、今後のデータ数の蓄積が望まれる。

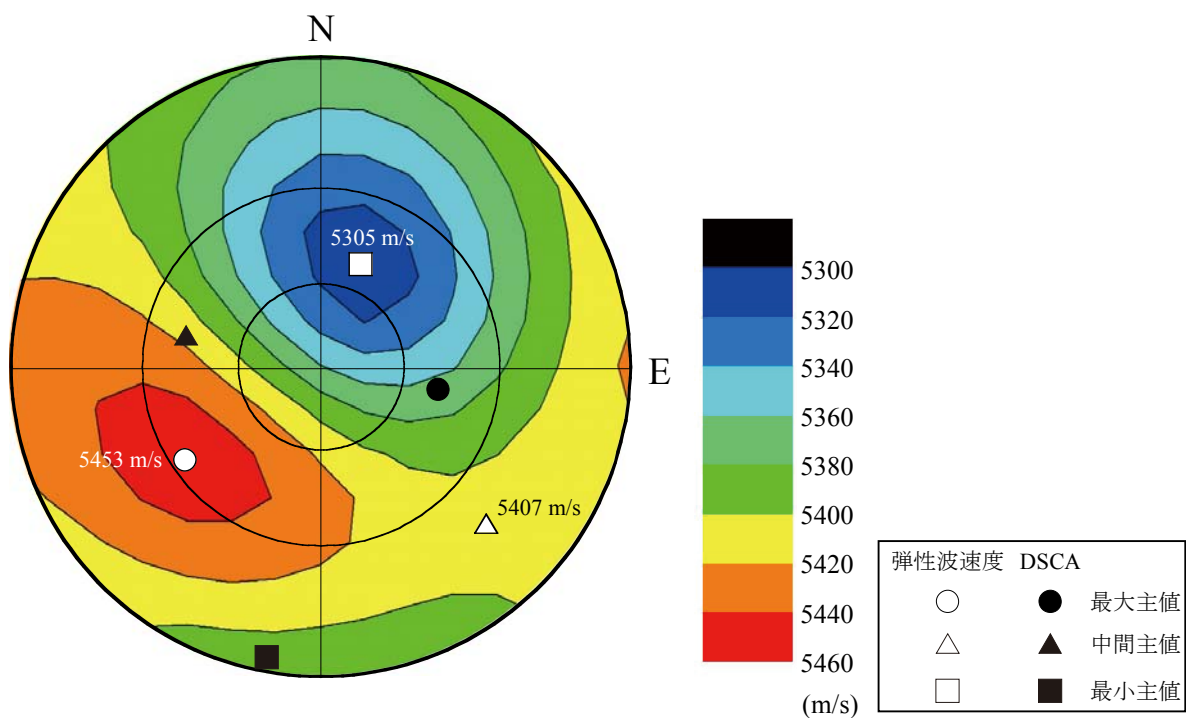


図 4.2.1 08P の三次元弾性波速度分布と 08A の DSCA 試験結果

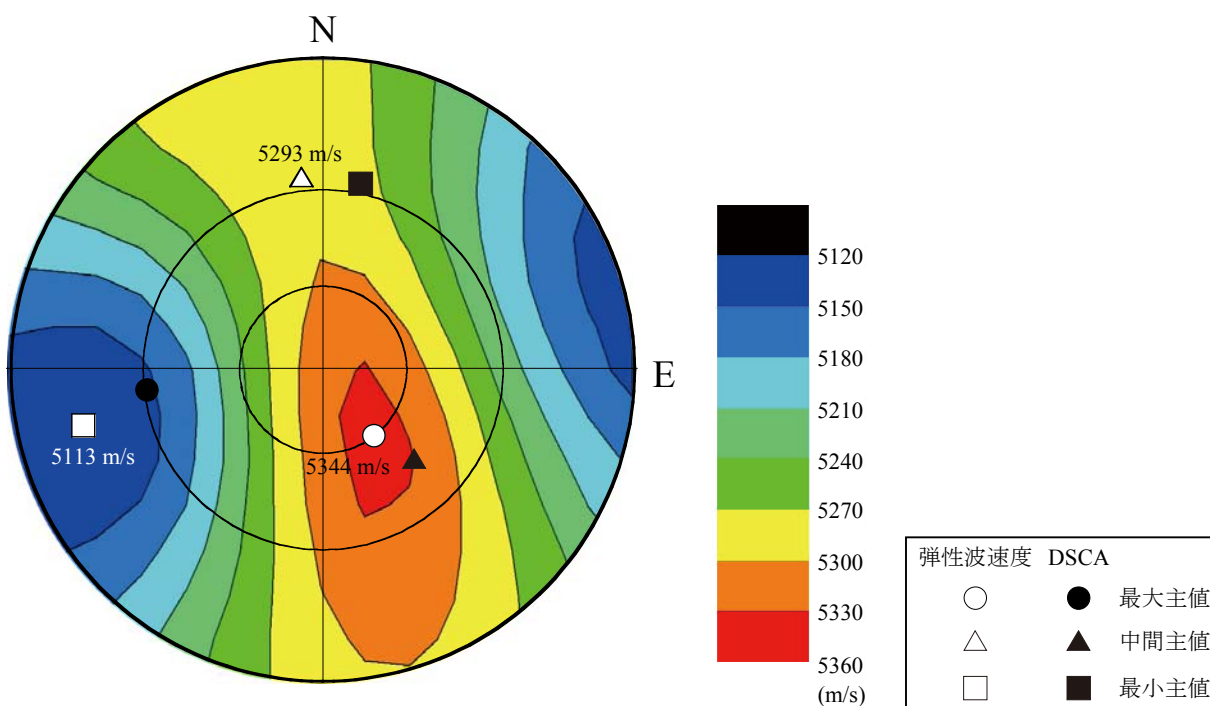


図 4.2.2 09P の三次元弾性波速度分布と 09D の DSCA 試験結果

表 4.2.1 求められた速度成分

	深度 (mabh)	番号	V, 走向/傾斜		
			最大主値	中間主値	最小主値
08MI13 号孔	28.63	08P	5453, 56°/34°	5407, 73°/136°	5305, 39°/249°
09MI20 号孔	73.70	09P	5344, 30°/128°	5293, 64°/276°	5113, 77°/13°

## 5. 深度 300 m ステージの初期応力状態および第 1 段階の初期応力測定結果との対比

本章では、DSCA 試験で得られた結果から深度 300 m ステージの初期応力状態を述べるとともに、それらと第 1 段階で得られた初期応力測定結果と対比した結果について述べる。

本調査結果によると、クラックパラメータから推定される主応力比は、08MI13 号孔で $\sigma_1/\sigma_3 \cdot \sigma_2/\sigma_3$ の範囲はそれぞれ 1.2~2.5, 1.1~1.6 を示し、平均値はそれぞれ 1.9, 1.4 となった。09MI20 号孔では、 $\sigma_1/\sigma_3 \cdot \sigma_2/\sigma_3$ の範囲はそれぞれ 1.6~2.2, 1.2~1.7 を示し、平均値はそれぞれ 1.9, 1.5 となり、応力比の範囲および平均値ともに 08MI13 号孔の結果に近かった。このことから、深度 300 m ステージの初期応力状態は、主応力比で概ね 2 以下を示すと予想される。

本調査で得られた主応力方向については、08MI13 号孔と 09MI20 号孔の結果を概観すると、08MI13 号孔では、最大主応力の方向が、北西-南東方向に分布するという傾向が見られた。一方で、09MI20 号孔では、08MI13 号孔の結果に比べ、バラツキが大きく系統的な分布傾向を見出すことが難しかった。したがって、深度 300 m ステージの初期応力状態を述べると、08MI13 号孔付近の最大主応力方向は、北西-南東方向を示すが、09MI20 号孔付近は主応力方向が乱れていることが予想される。

研究所周辺での初期応力測定は、第 1 段階において、水圧破碎試験 (AN-1 号孔、MIU-2 号孔、MIU-3 号孔、MIZ-1 号孔) やコア法による応力測定 (MIU-2 号孔、MIU-3 号孔、DH-2 号孔、MIZ-1 号孔) が実施されている (図 5.1)<sup>2)</sup>。また、研究坑道の掘削を伴う研究段階での深度 100 m 予備ステージおよび深度 200 m ボーリング横坑における岩盤力学ボーリング調査において、応力解放法・水圧破碎法・コア法による初期応力測定が実施されている<sup>9, 10)</sup>。図 5.2 にそれらの結果の内、深度 200 m ボーリング横坑における岩盤力学ボーリング調査までの結果を取りまとめた応力分布図を示す。それによると、一部の測定点を除き、水平面内の最大主応力の方向は北西-南東を示すことが分かっており<sup>10)</sup>、本調査で実施した 08MI13 号孔については、深度 200 m までの岩盤力学ボーリング調査結果と調和的な結果が得られた。

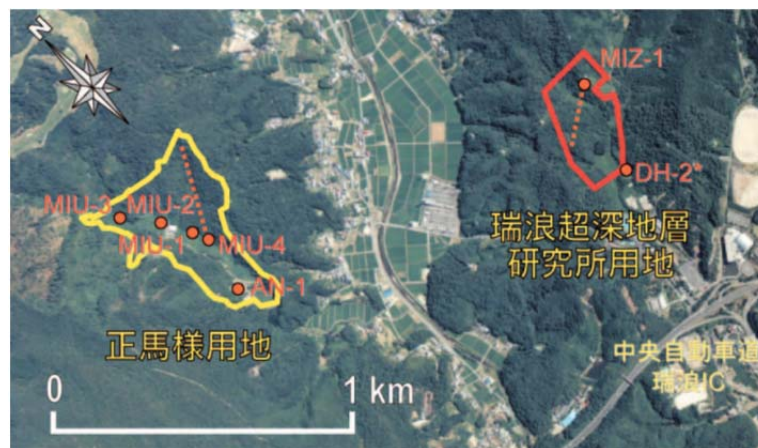


図 5.1 第 1 段階で掘削したボーリング孔の位置図

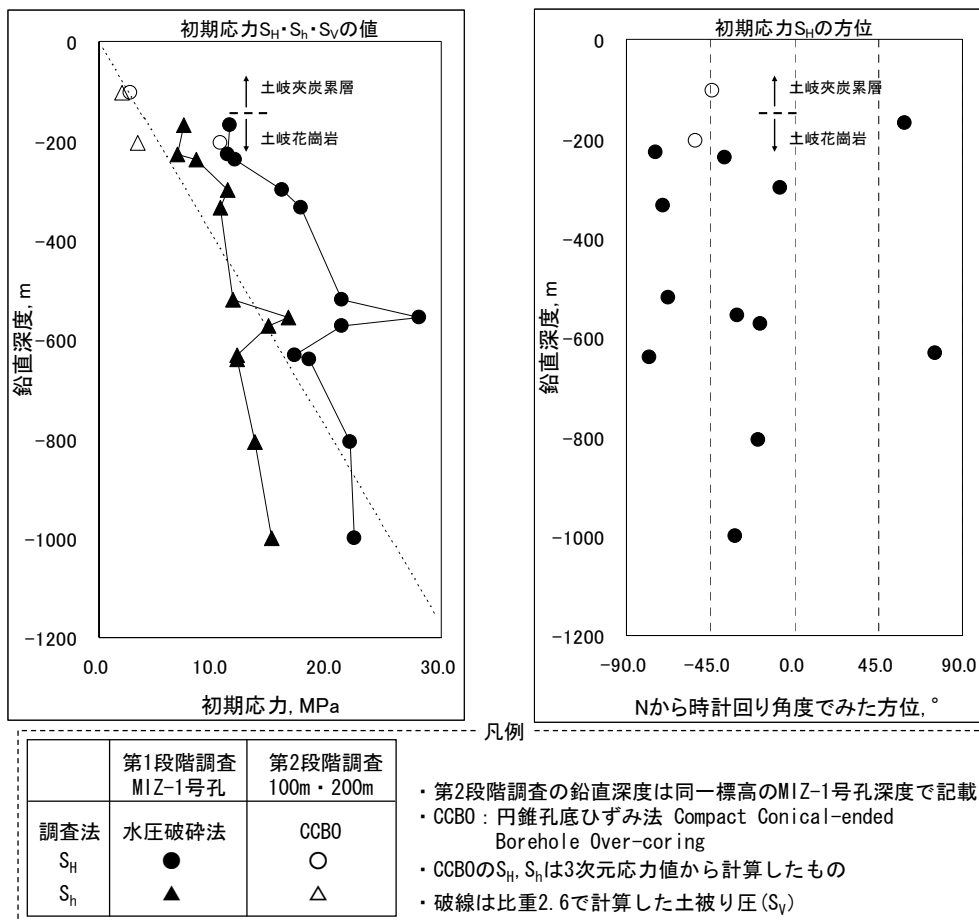


図 5.2 MIZ-1 号孔と深度 100 m, 200 m での初期応力測定結果の比較<sup>10)</sup>

## 6. まとめ

瑞浪超深地層研究所の研究坑道の深度 300 m ステージにおけるコア法による初期応力測定は、深度 300 m 付近の岩盤の初期応力状態の把握を目的とし、深度 300 m ステージで掘削されたボーリング孔 (08MI13 号孔、09MI20 号孔) から採取されたコアを用い、コア法の一つである Differential Strain Curve Analysis (以下、DSCA) を実施した。また、コア法の結果の補完のために、DSCA 試験で採取したコア近傍の岩石を多面体に整形し、三次元弾性波速度測定を実施した。本調査で得られた知見は、第 1 段階で得られた初期応力測定結果の妥当性確認のために活用される。本調査の結果を以下に記す。

- i. 主応力の方向について、08MI13 号孔と 09MI20 号孔の結果を比較すると、08MI13 号孔については、最大主応力の方向が概ね北西－南東方向に分布するという傾向が見られた。この傾向は、今まで実施してきた第 1, 2 段階での初期応力測定で得られた最大主応力方向と調和的だった。一方で、09MI20 号孔については、08MI13 号孔の結果に比べ、バラツキが大きく系統的な分布傾向を見出すことが難しかった。08MI13 号孔の初期応力状態は、第 1 段階と同様、主応力の方向が北西－南東方向に分布すると予想される。
- ii. クラックパラメータから推定される主応力比は、応力比の範囲および平均値ともに 08MI13 号孔と 09MI20 号孔の結果は近かった。具体的には、深度 300 m ステージの初期応力状態は、2 以下の主応力比を示すと予想される。
- iii. 08MI13 号孔の三次元弾性波速度の主値と DSCA 試験のクラックパラメータの比較をした結果、主値の方向・傾斜は一致しなかった。一方で、09MI20 号孔での比較では、弾性波速度の主値の内、最小速度と DSCA 試験の最大主値の方位・傾斜が一致した。

今後、超深地層研究計画では、深度 300 m ステージにおいて応力解放法による初期応力測定を予定している。本報告書に記載した調査結果と応力解放法による初期応力測定結果との対比から、本調査の妥当性確認と深度 300 m ステージの初期応力状態の更なる検討を予定している。

参考文献

- 1) 地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット, 超深地層研究所地層科学研究基本計画, JAEA-Review 2010-016, 2010, 37p.
- 2) 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, 坂巻昌工, 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, JAEA-Research 2007-043, 2007, 337p.
- 3) Strickland F. G. and Ren N. K. , Use of differential strain curve analysis in predicting in-situ stress state for deep wells, Proc. 21st U.S. Sympo. on Rock Mech. , 1980, pp. 523-532.
- 4) 松木浩二, 志水俊仁, 奥村清彦, DSCA による岩石内部微小き裂の評価, 資源と素材, vol. 111, 1995, pp. 607-615.
- 5) Dey T. N. and Brown D. W. , Stress measurements in a deep granitic rock mass using hydraulic fracturing and differential strain curve analysis, Proc. Int. Symp. Rock Stress and Rock Stress Measurements, 1986, pp. 351-357
- 6) 鶴田忠彦, 松岡稔幸, 程塚保行, 田上雅彦, 石田英明, 早野明, 栗原新, 湯口貴史, 超深地層研究所計画 地質・地質構造に関する調査研究(2008 年度)報告書, JAEA-research 2010-039, 131p.
- 7) 及川寧己, 山口勉, 松永烈, 佐藤嘉晃, DSCA による肘折高温岩体実験場の地圧評価, 資源と素材, vol. 111, 1995, pp. 587-594.
- 8) 奈良禎太, 加藤春實, 金子勝比古, 微視き裂分布評価を目的とした多面体試験片を利用した花崗岩の主軸方向決定法, Journal of MMIJ, vol.124, 2008, pp. 725-732.
- 9) 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)深度 100m における岩盤力学ボーリング調査, JAEA-Research 2010-002, 2010, 48p.
- 10) 平野享, 瀬野康弘, 松井裕哉, 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, 51p.

# 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	立法メートル	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
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	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
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</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>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s
電荷, 電気量	クーロン	C	s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	Vs
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C	K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>
放射線量	グレイ	Gy	J/kg
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, カーマ	グレイ	Gy	J/kg
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg
酸素活性化	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間には1:1の関係がある。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
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s
表面張力	ニュートンメートル	N m
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s
角加減	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K
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)
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>
電表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>
誘電率	ファラド毎メートル	F/m
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol
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)
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>

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>	zepto	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	yocto	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 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単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	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>
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx
ガリ	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 <sub>e</sub> =(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 フェルミ=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	μ	1 μ=1 μm=10 <sup>-6</sup> m

