JAEA-Research
2010-002

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

Mizunami Underground Research Laboratory Project - Rock Mechanical Investigations In Situ Stress Measurements and Laboratory Tests Using Core on GL.-100m Level of Research Gallery

平野 享　中間 茂雄　山田 淳夫　瀬野 康弘　佐藤 稔紀

Toru HIRANO, Shigeo NAKAMA, Atsuo YAMADA, Yasuhiro SENO and Toshinori SATO

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

June 2010

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, 2010

JAEA-Research 2010-002

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

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
平野　享※、中間　茂雄+、山田　淳夫*1、瀬野　康弘*2、佐藤　稔紀*3

(2010 年 1 月 28 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及び深地層における工学技術の基盤の整備を目標として、日本原子力研究開発機構が岐阜県瑞浪市において実施している結晶質岩（土岐花崗岩）を対象とした深地層の研究施設の建設をともなう研究プロジェクトである。本プロジェクトは、地表からの調査予測研究段階（第 1 段階）、研究坑道の掘削を伴う研究段階（第 2 段階）、研究坑道を利用した研究段階（第 3 段階）の 3 段階からなり、全体で 20 年程度を予定している。1996 年度の第 1 段階の開始に続いて、2001 年度からは第 2 段階を実施している（第 1 段階は 2004 年度で終了）。

第 2 段階の調査研究においては、「研究坑道の掘削を伴う調査・研究による地質環境モデルの構築」及び「研究坑道の掘削による深部地質環境の変化の把握」が成果目標の一つとして設定されており、調査の種類や量と個別目標・課題に対する理解度・精度との関係を実例で把握し、調査の有効性の評価、サイトスケールで作成された第 1 段階の地質環境モデルの妥当性評価、ブロックスケールの同モデル構築等を行なうものとしている。

本報告書は、2006 年度に実施した、深度 100m における岩盤力学ボーリング調査の概要とその結果について取りまとめたものである。同調査は先に述べた目標や課題を達成するための調査研究の一環である。超深地層研究所計画で主に調査対象とする岩盤は土岐花崗岩であるが、これの被覆層（瑞浪層群土岐夾炭累層、以下、単に土岐夾炭累層）内に設けた、深度 100m の研究坑道からボーリング孔（06MI-04～06 号孔：3 孔）を掘削し、被覆層側の力学的な地質環境（岩石の物理・力学的特性、岩盤初期応力）を把握する調査である。なお、同様の調査は、深度 100m 以深においても概ね深度 100m ごとに実施中である。以下に今回の調査結果の概要を示す。

① ボーリングコアを用いた物理・力学的特性の把握

深度 100m における土岐夾炭累層（主に砂岩）の物理・力学的特性は、見かけ比重（乾燥相対密度）＝1.51±0.11、一軸圧縮強さ＝10.7±2.0MPa、50%接線ヤング率＝4.97±1.16GPa、静ポアソン比＝0.42±0.05 等（誤差は 1σ で表現）であり、MIZ-1 号孔調査（第 1 段階の調査）の結果における土岐夾炭累層の値と同程度である。

② ボーリングコアを用いた初期応力測定（AE/DRA 法）

測定結果で示される初期応力レベルの不明瞭なものが多く（原因は、初期応力値が小さ過ぎることによると考えられる）、調査した 3 孔のうち 06MI-06 号孔でのみ応力評価が可能であっ

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
＋　地層処分基盤研究開発ユニット
＊1　株式会社間組（元　技術開発協力員）
＊2　東急建設株式会社（元　技術開発協力員）
＊3　経済産業省

た。その結果、最大主応力（σ_1）の方向はNW-SEで瑞浪超深地層研究所（以下、研究所）用地周辺の広域ひずみ場と調和するものの、主応力（$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$）はどれも水平面内から30度程度傾斜しており土被り圧に対応する主応力は不明である。

③ 応力解放法を用いた原位置試験による初期応力測定（孔壁ひずみ法、円錐孔底ひずみ法）

孔壁ひずみ法は測定装置と岩盤の結合が満足に行なえなかったため、測定データを採取できなかった。円錐孔底ひずみ法は、その適用が水平孔に限られるものの、06MI-06号孔よりデータが取得でき、その結果はσ_1の方向がNW-SEで概ね水平面内にあり、このことは研究所用地周辺の広域ひずみ場と調和する。

④ 水圧破砕法を用いた原位置試験による初期応力測定

水圧破砕法による試験では測定原理に合致する縦方向の割れ目が原位置で生成しなかったため、測定原理に基づく評価は不可能であった。しかし、生成した割れ目が互いに平行でない6方向にあり、各々の割れ目の再開口圧を用いて独立6成分が未知数である初期応力を評価することができた。その結果はσ_1の方向がNW-SEで概ね水平面内にあり、このことは研究所用地周辺の広域ひずみ場と調和する。

⑤ MIZ-1号孔調査（第1段階調査）結果との比較

①のとおり、岩石の物理・力学的特性はMIZ-1号孔の調査結果と同程度の値が示され、第1段階の調査で深度100mの物理・力学的特性が概ね予測されていることを確認した。また、初期応力状態は、最大主応力の方向が、MIZ-1号孔の調査において土岐夾炭累層の下位に位置する土岐花崗岩で認められた方向と類似しており、また、広域ひずみ場とも調和していた。しかし、応力値は土岐花崗岩中の値を外挿して得られるものとは異なっていた。土岐夾炭累層と土岐花崗岩の境界において初期応力が不連続的に変化する（応力のデカップリングが生じている）ものと考えられる。

JAEA-Research 2010-002

Mizunami Underground Research Laboratory Project - Rock Mechanical Investigations In Situ Stress Measurements and Laboratory Tests Using Core on GL.-100m Level of Research Gallery

Toru HIRANO※, Shigeo NAKAMA+, Atsuo YAMADA*1, Yasuhiro SENO*2 and Toshinori SATO*3

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

(Received January 28, 2010)

In order to establish the scientific and technical basis of geological disposal of high level radioactive waste, Japan Atomic Energy Agency (JAEA) is advancing the geo-scientific research at the Mizunami Underground Research Laboratory (MIU). In this project, the surface-based investigation phase (Phase I) finished in fiscal year 2004. The Construction phase (Phase II) was started in fiscal year 2001 to overlap with the Phase I activities.

In Phase II, construction of a conceptual model of the geological environment and the observation and study of excavation effects are two of the scientific and technical objectives. Accordingly, additional investigations in Phase II, the checking of the relationship between the accuracy of results and the amount of information required and evaluating the effectiveness of the stepwise investigations were needed. Therefore *in situ*‡ stress measurements and laboratory tests on core from the GL.-100m level in the MIU research gallery were planed as additional rock mechanical investigations in Phase II, to develop further understanding of the rock mechanical environment. This report describes the results of these rock mechanical investigations. A brief summary is presented as follows.

1) The average physical and mechanical properties of the rock mass determined using core from the Toki Lignite-bearing Formation are:
   - apparent specific gravity (dry): 1.51;
   - unconfined compressive strength (U.C.S.): 10.7MPa;
   - tangent modulus at 50% U.C.S: 4.97GPa;
   - poisson's ratio: 0.42.

   These results are consistent with the results from the preliminary investigations in Phase I in the MIZ-1 borehole.

2) Estimation of *in situ* stress by measurements on core

   Two different methods (AE and DRA) were applied to numerous samples from three boreholes. However, about half of the AE/DRA samples provided no information on the existing stress state in each sample because of the likely release of any pre-existing stresses. The maximum principal stress is oriented in the NW-SE direction. But the vertical principal stress is could not be determined.

3) Determining of *in situ* stress from stress relief

   Two kinds of measurement tools were used. The CSIR triaxial strain cell was not suited to the investigation conditions (i.e., used in a holizontal borehole, in the Toki

---

※ Collaborating Engineer
\+ Geological Isolation Research Unit
＊1 Hazama Corporation (Former Collaborating Engineer)
＊2 Tokyu Construction (Former Collaborating Engineer)
＊3 Ministry of Economy, Trade and Industry

Lignite-bearing Formation etc.). Another tool, the conical-ended strain cell worked successfully. The maximum principal stress is oriented in the NW-SE direction. It is equal to the regional surface strain state.

4) Determining *in situ* stress by hydraulic fracturing

Fracturing induced by hydraulic pressure did not develop parallel to the axis of borehole. Therefore the usual stress analysis was not applicable. Fortunately, the pressure needed to re-open six non-parallel fractures could be determined and thus could be treated as six independent components of stress, were used for the successful determination of the initial stress state. This state gives the maximum principal stress oriented in the NW-SE direction. It is equal to the regional surface strain state.

5) Comparison with investigation results in MIZ-1 and at the GL.-100m level in the MIU

The average rock physical and mechanical properties at the GL.-100m level research gallery are consistent with the results from MIZ-1 testing. This means that the surface based investigations in MIZ-1 are valid at this level. Almost all *in situ* stress measurements indicate that the maximum principal stress is oriented in the NW-SE direction. The stress states at GL –100m depth match the observations in MIZ-1 at GL.-200m depth. But the observed stress level is not the expected value extrapolated from the MIZ-1 results. This suggests that the *in situ* stress has likely been decoupled at the rock boundary located at about the GL.-150m level between the Toki Lignite-bearing formation and the Toki granite.

‡ mean “in the natural or original position”

Keywords: *Research Gallery, 100m Level, Rock Mechanics, Rock Mechanical Property, In Situ Stress*

目　次

1.　はじめに 1
2.　調査項目 3
3.　ボーリングコアを用いた物理・力学的特性の把握 5
3.1　ボーリングコアの観察による地質状況 5
3.2　室内物理・力学試験結果 10
3.2.1　物理特性 10
3.2.2　力学特性 12
3.2.3　ボーリングコアの観察による地質状況との比較 14
4.　ボーリングコアを用いた初期応力測定 15
4.1　AE/DRA 法による測定 15
5.　応力解放法を用いた原位置試験による初期応力測定 20
5.1　孔壁ひずみ法による測定 20
5.2　CCBO（円錐孔底ひずみ法）による測定 23
5.3　孔壁ひずみ法と CCBO の適用性 25
6.　水圧破砕法を用いた原位置試験による初期応力測定 27
6.1　水圧破砕法による測定 27
7.　MIZ-1 号孔調査（第 1 段階調査）結果との比較 33
7.1　物理・力学的特性の比較 33
7.2　初期応力の評価結果の比較 34
7.2.1　深度 100m 調査での初期応力評価結果の比較 34
7.2.2　深度 100m 調査と MIZ-1 号孔調査での初期応力評価結果の比較 35
8.　まとめ 39
参考文献 41
付録（室内物理・力学試験における個々の試験体での結果） 43

CONTENTS

1. Introduction 1
2. Specifications of the rock mechanical investigations 3
3. Determining the rock physical and mechanical properties 5
3.1 Geological features of rock core 5
3.2 Results and discussions 10
3.2.1 Physical properties 10
3.2.2 Mechanical properties 12
3.2.3 Observations on core 14
4. Estimation of in situ stress by stress measurements using core 15
4.1 AE/DRA method 15
5. Determining in situ stress from stress relief 20
5.1 The method using CSIR triaxial strain cell 20
5.2 Compact conical-ended strain cell method 23
5.3 Feasibility of using tools 25
6. Determining in situ stress by hydraulic fracturing 27
6.1 Procedure, data analysis and results 27
7. Comparison with investigations results on MIZ-1 and the MIU GL.-100m level 33
7.1 Physical/Mechanical properties 33
7.2 Estimated in situ stress state 34
7.2.1 Each applied method 34
7.2.2 MIZ-1 and MIU GL.-100m level 35
8. Conclusion 39
References 41
Appendix (The rock physical and mechanical properties of each specimen) 43

図目次

図 1　研究所用地と研究坑道、調査位置の関係（原子力機構, 2007 に加筆） 1
図 2　深度 100m 岩盤力学ボーリング調査の概略位置（坑道配置は調査時） 3
図 3.1.1-(1)　06MI-04 号孔ボーリングコア外観 6
図 3.1.1-(2)　06MI-05 号孔ボーリングコア外観 7
図 3.1.1-(3)　06MI-06 号孔ボーリングコア外観 8
図 3.1.2　ボーリングコア観察から評価した岩盤等級 9
図 3.1.3　ボーリングコア観察から評価した RQD 9
図 3.1.4　ボーリングコア観察から評価した割れ目頻度 10
図 3.2.1-(1)　深度 100m 岩盤力学ボーリング調査（物理特性と研究坑道壁面からの距離の関係） . 11
図 3.2.1-(2)　深度 100m 岩盤力学ボーリング調査（物理特性と研究坑道壁面からの距離の関係） . 12
図 3.2.2　深度 100m 岩盤力学ボーリング調査（力学特性と研究坑道壁面からの距離の関係） 13
図 4.1.1　AE/DRA 法の試験体の作成方向（添字は試験体名） 15
図 4.1.2　DRA 法におけるひずみ差関数 16
図 4.1.3　AE/DRA 法による深度 100m 初期応力の評価方向 17
図 4.1.4　我が国の側圧係数の深度分布 17
図 5.1.1　孔壁ひずみ法概念図（左：設置状況、右上：測定プローブ、右下：セル） 20
図 5.1.2　06MI-04 号孔で観測された無効な解放ひずみデータ 21
図 5.1.3　06MI-05 号孔で観測された無効な解放ひずみデータ 22
図 5.2.1　CCBO 概念図（左：設置状況、右上：円錐セル先端、右下：同正面図） 23
図 5.2.2　CCBO で 16 成分が弾性的挙動を示した例 24
図 5.2.3　CCBO の解放ひずみ（□と○）に対する理論曲線（各曲線）のフィット
（左）16 成分での解析例　（右）7 成分が除外され 9 成分での解析例 24
図 5.2.4　CCBO による初期応力の評価方向 26
図 6.1.1　水圧破砕で生成した割れ目の状況 28
図 6.1.2　6 方向 P_s 法による初期応力の評価方向 32
図 7.2.1　各種の測定手法による初期応力の評価結果の比較 34
図 7.2.2　東濃地域における地表のひずみ 35
図 7.2.3　MIZ-1 号孔調査との初期応力評価結果の比較（原子力機構, 2009 に加筆） 35
図 7.2.4　初期応力評価結果の側圧係数での比較（駒田ほか, 2003 に加筆） 36
図 7.2.5　解析対象領域とボーリング孔および立坑（研究坑道）の位置（原子力機構, 2008） 38
図 7.2.6　研究坑道位置の S_H , S_h 値と S_H の方位（原子力機構, 2008 に加筆） 38

表目次

表 2.1　深度 100m 岩盤力学ボーリングの掘削仕様 3
表 2.2　深度 100m 岩盤力学ボーリング調査の概要 4
表 2.3　深度 100m 岩盤力学ボーリング調査で実施した試験・測定仕様 4
表 3.2.1　深度 100m 岩盤力学ボーリング調査（物理特性の概要） 11
表 3.2.2　深度 100m 岩盤力学ボーリング調査（力学特性の概要） 12
表 4.1.1　各ボーリング孔の AE/DRA 法による初期応力測定の実施区間 16
表 4.1.2　AE/DRA 法で試験体より分析された初期応力 18
表 4.1.3　AE/DRA 法による初期応力の評価結果 18
表 4.1.4　AE/DRA 法で試験体より初期応力が分析できた割合 19
表 5.1　各ボーリング孔の孔壁ひずみ法による初期応力測定の実施地点 20
表 5.2.1　CCBO による初期応力測定の実施地点 23
表 5.2.2　CCBO による初期応力の評価結果 25
表 5.2.3　孔壁ひずみ法、CCBO の土岐夾炭累層への適用性 25
表 6.1.1　水圧破砕法による初期応力測定の実施地点 27
表 6.1.2　水圧破砕で生成した割れ目の法線方向の方向余弦 29
表 6.1.3-(1)　水圧破砕で得られたデータ 29
表 6.1.3-(2)　水圧破砕で得られたデータ 30
表 6.1.4　6 方向 P_s 法による初期応力の評価結果 31
表 7.1　物理・力学的特性に関する MIZ-1 号孔調査結果との比較 33
表 7.2.1　深度 100m 初期応力の評価結果 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ から求めた側圧係数 36
表 7.2.2　深度 100m 初期応力の評価結果 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ から求めた S_H, S_h 37

1. はじめに

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及び深地層における工学技術の基盤の整備を目標として、日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）が、岐阜県瑞浪市において実施している結晶質岩（土岐花崗岩）を対象とした深地層の研究施設の建設をともなう研究プロジェクトである。本プロジェクトは、地表からの調査予測研究段階（第 1 段階）、研究坑道の掘削を伴う研究段階（第 2 段階）、研究坑道を利用した研究段階（第 3 段階）の 3 段階からなり、全体で 20 年程度を予定している[1)]。1996 年度の第 1 段階の開始に続いて、2001 年度からは第 2 段階を実施している（第 1 段階は 2004 年度で終了）。

第 2 段階の調査研究においては、「研究坑道の掘削を伴う調査・研究による地質環境モデルの構築」及び「研究坑道の掘削による深部地質環境の変化の把握」が成果目標の一つとして設定されており、調査の種類や量と個別目標・課題に対する理解度・精度との関係を実例で把握し、調査の有効性の評価、サイトスケールで作成された第 1 段階の地質環境モデル[2)]の妥当性評価、ブロックスケールの同モデル構築等を行なうものとしている。

本報告書で述べる「深度 100m における岩盤力学ボーリング調査」は上記目標や課題を達成するための調査研究の一環である。具体的には、超深地層研究所計画で主に調査対象とする岩盤は土岐花崗岩であるが、その被覆層の一つで土岐花崗岩と不整合面で接する、瑞浪層群土岐夾炭累層（以下、単に土岐夾炭累層）内の深度 100m の研究坑道から、ボーリング孔（06MI-04～06 号孔：3 孔）を掘削する調査を行った。そして、このボーリング調査により被覆層側の力学的な地質環境（岩石の物理・力学的特性、岩盤初期応力）を把握し、これを第 1 段階モデルの根拠とした MIZ-1 号孔調査（第 1 段階調査）の結果と比較し、第 1 段階調査の有効性を双方の一致性を踏まえて評価するまでを行なう。図 1 に研究坑道と MIZ-1 号孔の位置を示す。また、以下に、調査項目とその概要を述べる。なお、第 1 段階調査の有効性評価では、評価対象である MIZ-1 号孔調査に被覆層側の初期応力測定結果がないため、同評価は評価対象のある岩石の物理・力学的特性の把握についてのみ行った。

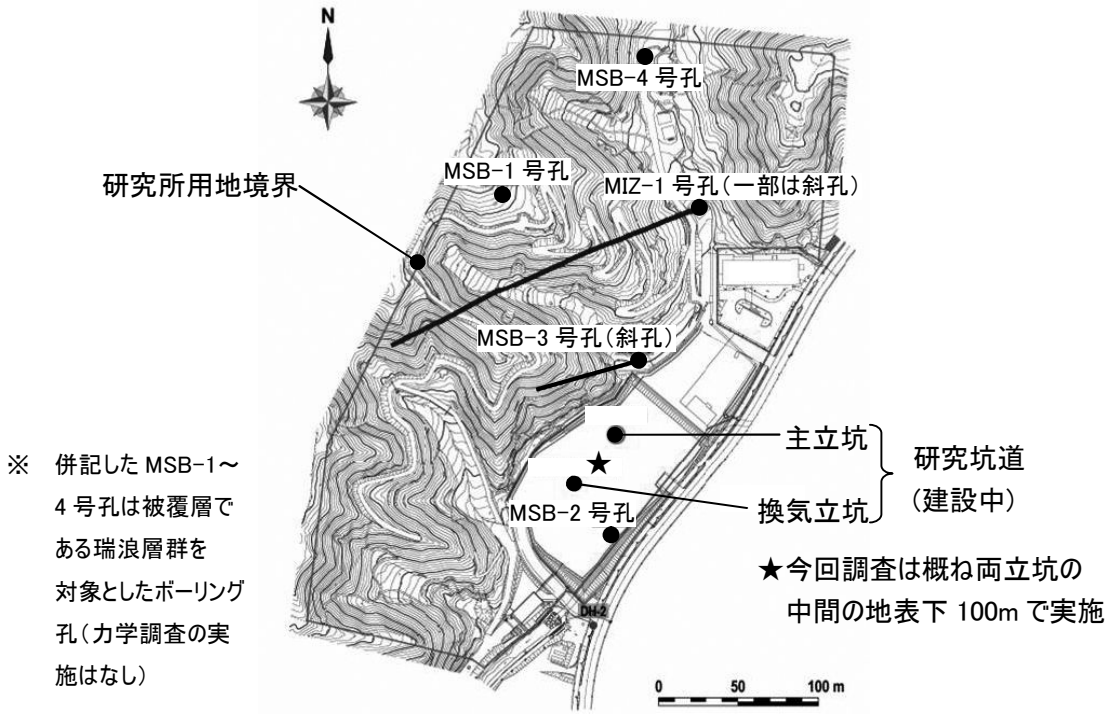


図 1　研究所用地と研究坑道、調査位置の関係（原子力機構, 2007[2)]に加筆）

① ボーリング孔の掘削
方向の異なる 3 孔（延長 20m 程度、HQ 径φ98.4mm）のボーリング孔掘削を行い、以下の調査で必要なボーリングコアを採取するとともに、原位置初期応力測定のための孔内測定点を用意する。

② ボーリングコアを用いた物理・力学的特性の把握
採取したボーリングコアを用いて試験体を作成し、物理・力学試験を行い、深度 100m の岩盤基質部分の物理･力学的特性を把握し､試験結果と孔口からの距離との関係について検討する。

③ ボーリングコアを用いた初期応力測定（AE 法と DRA 法、以下 AE/DRA 法と総称）
採取したボーリングコアを用いて、測定手法に AE: Acoustic Emission / DRA: Deformation Rate Analysis 法を適用し、深度 100m の初期応力状態を把握する。あわせて AE/DRA 法の適用性を検討する。

④ 応力解放法を用いた原位置試験による初期応力測定（孔壁ひずみ法、円錐孔底ひずみ法）
掘削したボーリング孔を用いて、応力解放法による原位置初期応力測定を行い、深度 100m の初期応力状態を把握する。あわせて測定システム（孔壁ひずみ法、円錐孔底ひずみ法）の適用性を検討する。

⑤ 水圧破砕法を用いた原位置試験による初期応力測定
掘削したボーリング孔を用いて、水圧破砕法による原位置初期応力測定を行い、深度 100m の初期応力状態を把握する。

⑥ MIZ-1 号孔調査（第 1 段階調査）結果との比較
ボーリングコアを用いた室内試験で得られた土岐夾炭累層の物理・力学的特性と、MIZ-1 号孔調査結果との一致性を分析し、第 1 段階の調査の有効性を評価する。また、深度 100m の初期応力状態（土岐夾炭累層）について、測地学的に得られた広域ひずみとの関係、土岐花崗岩での応力状態（MIZ-1 号孔調査で把握）との関係、広域ひずみ場にあるローカルスケールの 3 次元初期応力分布の解析予測との一致性などを確認する。

本報告書は､2006 年度に実施した､上記①から⑥までの作業について取りまとめたものである。初めに、第 2 章では調査項目としてボーリング掘削の諸元と調査仕様を示す。次に、第 3 章ではボーリングコアを用いた室内試験で得られた物理・力学的特性とその考察を述べる。続いて、第 4 章ではボーリングコアを用いた初期応力測定の結果を示すとともに、測定手法（AE/DRA 法）の適用性を考察する。さらに、第 5 章と第 6 章ではそれぞれ応力解放法、水圧破砕法による原位置初期応力測定の結果を示すとともに、前者の応力解放法では、用いた測定システムの違いでデータ取得の成否が分かれたことから、測定システムである孔壁ひずみ法と円錐孔底ひずみ法の適用性を考察する。第 7 章では、以上の結果を踏まえて MIZ-1 号孔調査の結果との比較を行なう。

2. 調査項目

深度 100m における岩盤力学ボーリング調査では、土岐夾炭累層に位置する深度 100m 予備ステージにおいて掘削延長 20m 程度の方向を変えた 3 孔のボーリング孔を掘削し、そこからボーリングコア（主に砂岩）を採取し、これを用いて室内物理・力学試験と初期応力測定を行ない、また、掘削したボーリング孔を用いて原位置初期応力測定を行った。

図 2 は、掘削したボーリング孔の概要であり、研究坑道内での概略位置を示すものである。また、表 2.1 はボーリング孔の掘削仕様である。

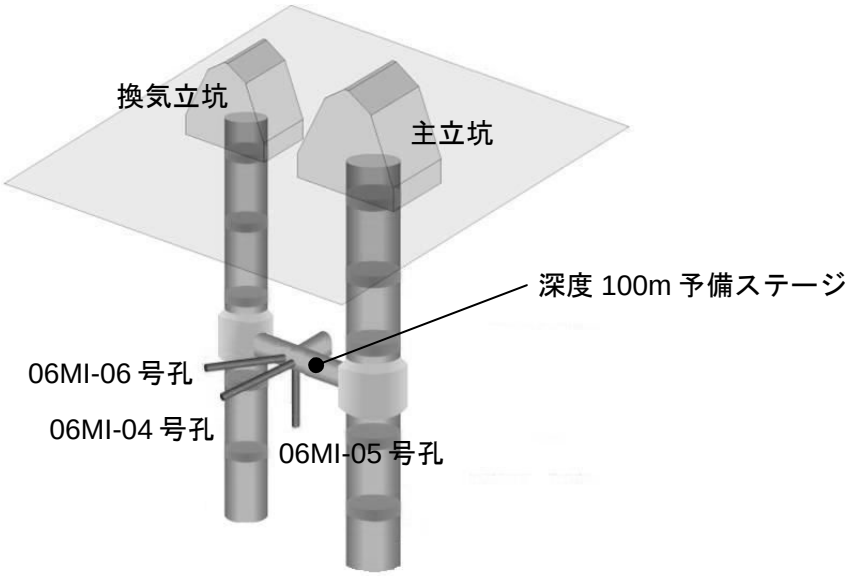


図 2　深度 100m 岩盤力学ボーリング調査の概略位置（坑道配置は調査時）

表 2.1　深度 100m 岩盤力学ボーリングの掘削仕様

実施者	ジオテクノス（株）		
期間	2006 年 11 月～2007 年 1 月（ボーリング孔掘削期間のみ示す）		
ボーリング孔号名	06MI-04	06MI-05	06MI-06
掘削方位	N130°E　+5°	鉛直孔	N170°E　+3°
掘削径	HQ（φ98.4mm）		
掘削長	20.10 (m)	21.41 (m)	20.10 (m)
孔口座標 （世界測地系）	X: -69,023.740 (m) Y:　6,439.809 (m) E.L.:　102.574 (m)	X: -69,023.480 (m) Y:　6,437.880 (m) E.L.:　100.748 (m)	X: -69,024.940 (m) Y:　6,439.060 (m) E.L.:　102.529 (m)
試錐機	TEC-1（5.5KW）		

表 2.2 は、上記ボーリング掘削で得られたボーリングコアとボーリング孔を用いて実施する、深度 100m における岩盤力学ボーリング調査の概要である。また、表 2.3 は実施した試験の仕様である。

表 2.2　深度 100m 岩盤力学ボーリング調査の概要

		06MI-04	06MI-05	06MI-06	
試験項目	試験名	試験ロット数（試験体３個／ロット）			備考
室内物理・力学試験	物理試験 ・比重　・吸水率 ・含水率・有効間隙率	２	－	４	
	・弾性波速度（P／S 波）	６	－	１２	
	力学試験 ・一軸圧縮強度 ・圧裂引張強度	２	－	４	
	・三軸圧縮強度	４	－	８	
測定項目	測定手法	孔中の測定深度（測定数１／深度）			備考
原位置初期応力測定	応力解放法	△２地点	△２地点	▲６地点	△孔壁ひずみ法 ▲円錐孔底ひずみ法
	水圧破砕法	２地点	２地点	３地点	6 個の P_s で一組の初期応力を解析
ボーリングコアを用いた初期応力測定	AE/DRA 法	１区間	１区間	１区間	

表 2.3　深度 100m 岩盤力学ボーリング調査で実施した試験・測定仕様

試験・測定項目	目的	使用機器、試験体寸法、試験条件など
室内物理・力学試験	岩盤基質部分の力学的特性を把握する	実施者（株）ダイヤコンサルタント、期間 2006 年 5 月～2007 年 3 月 試験基準　地盤工学会基準（JGS）、日本工業規格（JIS） International Society for Rock Mechanics（ISRM） 試験体　直径 35mm×高さ 70mm（圧裂 35mm） 端面平行度　高さの差が 0.1mm 以内 載荷試験機　森試験機製 MAX-200、能力 2MN 誠研舎製 DTB-112A（圧裂）、能力 100kN 誠研舎製 DTC-269（三軸）、能力 2MN 載荷制御　定応力速度制御（一軸）10min 程度で破壊 定ひずみ速度制御（圧裂）10min 程度で破壊 定ひずみ速度制御（三軸）10-3/s
原位置初期応力測定 ボーリングコアを用いた初期応力測定	研究坑道周辺の岩盤初期応力状態を把握する	実施者　ジオテクノス（株）、期間 2006 年 9 月～2007 年 3 月 【原位置初期応力測定・応力解放法】 センサー孔長または円錐孔底径／オーバーコア長 400～600mm／700mm（孔壁ひずみ） φ76 円錐底面／φ＋200mm（円錐孔底） センサー体 φ30 円柱体、ロゼットゲージ 3 枚 9ch（孔壁ひずみ） φ76×先端角 60°円錐体、ロゼットゲージ 8 枚 16ch（円錐孔底） センサー接着方法　シアノアクリレート系瞬間接着剤による 【原位置初期応力測定・水圧破砕法】 ストラドルパッカー　ジオテクノス製、耐圧 30MPa インプレッションパッカー　ジオテクノス製、耐圧 30MPa 高圧ポンプ　日本精密科学製 NP-GXL-400、能力 30MPa×400cc/min 加圧コンプライアンス 4.50cc/MPa（低クラス） 【ボーリングコアを用いた初期応力測定・AE/DRA 法】 試験体　直径 19mm×高さ 26～60mm 載荷試験機　Instron 8561、能力 98KN 載荷制御　定応力速度制御 5MPa/min、最大応力 4～5MPa AE センサー　NF　AE904DM、f=500kHz

3. ボーリングコアを用いた物理・力学的特性の把握

3.1　ボーリングコアの観察による地質状況

岩盤力学ボーリング調査で掘削した 3 孔（表 2.2 に示す 06MI-04 号孔、06MI-05 号孔、06MI-06 号孔）から得られたボーリングコアを肉眼観察した結果、全て土岐夾炭累層の砂岩と認められる。ボーリングコアの写真を図 3.1.1 に示す。その地質は風化・変質がほとんど見られない暗灰色の砂岩で、花崗岩類に由来する砕屑物が固結したものと考えられ、粒子径は 06MI-04 号孔で中粒、06MI-05 号孔で細粒～粗粒、06MI-06 号孔で極細粒～中粒で、ボーリング孔間の相違が若干ある。また、全孔のボーリングコアに層理が観察され、06MI-06 号孔のコアで最も発達しており、これに沿う炭質物の濃集が認められる。

ボーリングコアの観察結果に基づく岩盤等級（電研式岩盤分類[3)]）を図 3.1.2 に、RQD を図 3.1.3 に、割れ目頻度を図 3.1.4 に各々示す。図 3.1.2 をみると岩盤等級は同一孔において一様であり、06MI-04 号孔が CH、その他 2 孔が CM 級である。また、図 3.1.3 と図 3.1.4 をみると、06MI-05 号孔で全体的に RQD が小さく、割れ目頻度も若干高い傾向が認められる。その他、岩盤等級、RQD、割れ目頻度の各々で、ボーリング掘削深度に対する変化においては 3 孔に共通した特徴は認められない。

3～6 (mabh) 白色詰物は試験供出によりコアがない箇所（以下同様）	
6～9 (mabh)	
9～12 (mabh)	
12～15 (mabh)	
15～18 (mabh)	
18～終端 (mabh)	

図 3.1.1-(1)　06MI-04 号孔ボーリングコア外観

3～6 (mabh) 白色詰物は試験供出によりコアがない箇所（以下同様）	
6～9 (mabh)	
9～12 (mabh)	
12～15 (mabh)	
15～18 (mabh)	
18～終端 (mabh)	

図 3.1.1-(2)　06MI-05 号孔ボーリングコア外観

3～6 (mabh) 白色詰物は試験供出によりコアがない箇所 （以下同様）	
6～9 (mabh)	
9～12 (mabh)	
12～15 (mabh)	
15～18 (mabh)	
18～終端 (mabh)	（写真なし）

図 3.1.1-(3)　06MI-06 号孔ボーリングコア外観

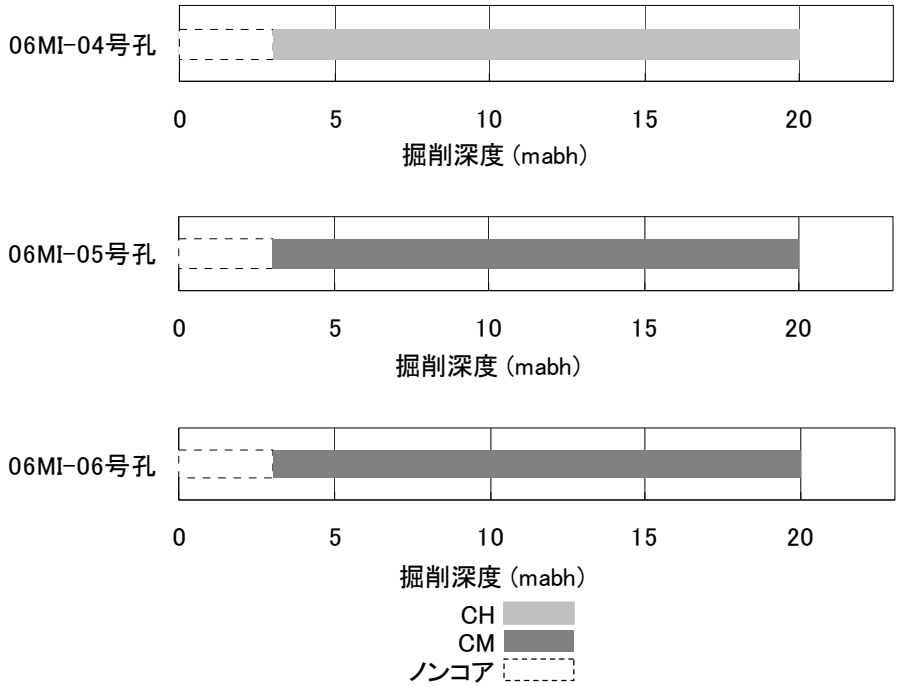


図 3.1.2　ボーリングコア観察から評価した岩盤等級

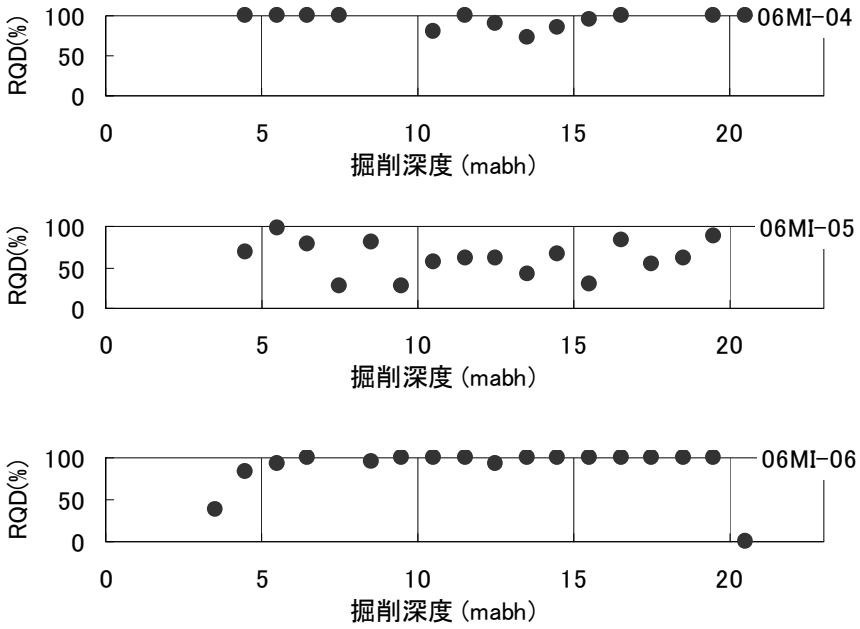


図 3.1.3　ボーリングコア観察から評価した RQD

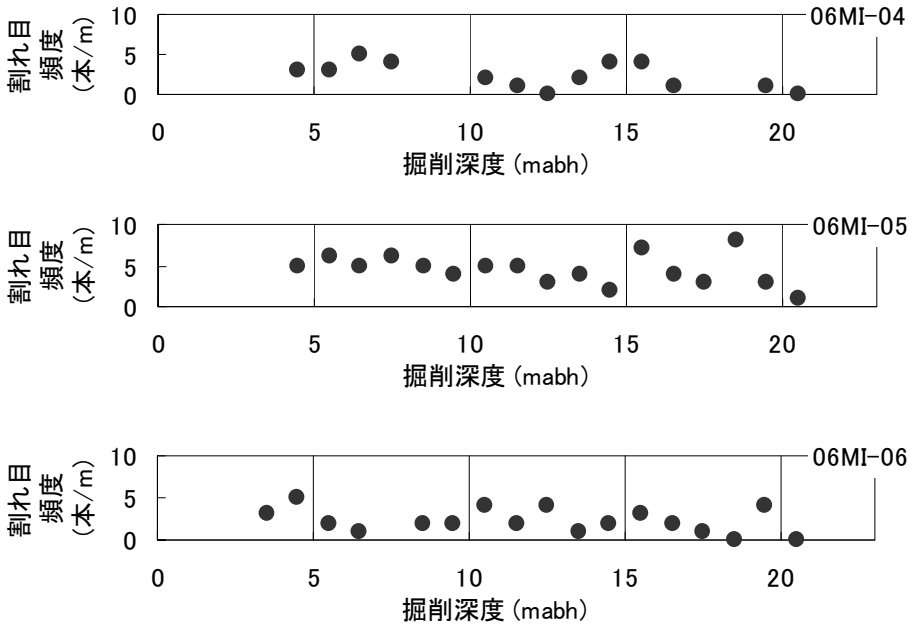


図 3.1.4　ボーリングコア観察から評価した割れ目頻度

3.2　室内物理・力学試験結果

3.2.1　物理特性

(1) 測定方法

室内物理試験の項目は、密度試験、含水比試験、有効間隙率試験及び弾性波速度試験であり、それぞれ地盤工学会が示した指針「岩の試験・調査方法の基準・解説書（平成 14 年度版）」[4]に準拠して実施した。なお、同指針は国際的な学会組織である International Society for Rock Mechanics (ISRM)の指針[5]（以下、ISRM 指針）をふまえた内容となっている。

(2) 測定結果と考察

物理特性の取得では、鉛直方向の 06MI-05 号孔から取得したボーリングコアは土岐夾炭累層の層理面に直交する方向にコア軸があり、均質な試験体を必要数だけ作成できないことから試験対象外とし、水平方向の 2 孔（表 2.2 に示す 06MI-04 号孔、06MI-06 号孔）のボーリングコアについてのみ試験を実施した。取得した物理特性の分布範囲と平均値を表 3.2.1 に示す。また、図 3.2.1 に、これら物理特性と、試験体としたボーリングコアのボーリング孔内での採取位置（研究坑道壁面からの距離）との関係を示す。図 3.2.1 では、物理・力学特性間のばらつきの割合を比較するため、各物理特性は、取得データ全体のうち最大値を用いて正規化した値としている。ここで最大値に対する最大値と最小値の差の割合（以下、ばらつきの割合と呼称）をみると、見かけ比重、有効間隙率、弾性波速度（S 波）で約 20%、含水比で約 40%であることが認められる。また、弾性波速度（P 波）では、壁面からの距離 10m 付近において平均値から 5σ 以上で不連続に離れた 1 点（正規化値 1.0 のデータで最大値に対応）が認められ、これが特異点となっている。そこで、表 3.2.1 に示す弾性波速度（P 波）の最大値をみると 4.15km/s であり、文献調査[6]で得られた新第三紀の砂質堆積岩の平均値 2.8km/s と比較して大きすぎる。また、当該深度の他の物理・力学特性は測定されておらず、他の特性との調和からこの値の妥当性を検証することはできない。以上を踏まえてこのデータは異常と考えて除外し、残ったデータについて弾性波速度（P 波）のばらつきの割合をみると約 20%となり、その他の物性値のばらつきの割合と同程度である。

坑道壁面からの距離に対する変化では、取得データ全体に対し、壁面から 10m 付近を中心に見かけ比重が大、有効間隙率・含水比が小、弾性波速度が高となる物理特性の変化が認められる。これは、坑道壁面寄りと壁面から奥とで同程度の岩盤の脆弱化があるものとも言える。一般に、坑道壁面寄りの脆弱化の原因として坑道掘削による影響が指摘されることが多い。ここで、既往の瑞浪層群の砂岩を対象とした掘削損傷領域の調査[7]によると、今回と同程度の寸法の坑道において掘削損傷領域が壁面から 1m 以内に確認されている。しかし、今回の調査はできるだけ掘削損傷を受けない岩盤の物理・力学特性の把握を目的としたことから、そのように浅い位置のデータは得ておらず、ここで得られたデータの変化について掘削損傷に結び付けた議論に及ぶことは無理と思われる。よって、以後ここで認められた変化は、坑道壁面寄りと壁面から奥の何れも、岩盤の不均一性が現われたものとして取り扱う。

表 3.2.1　深度 100m 岩盤力学ボーリング調査（物理特性の概要）

測定項目	最小値～最大値	平均値±σ	単位	備考
①見かけ比重（乾燥）	1.32～1.73	1.51±0.11	－	乾燥相対密度[脚注)]である
乾燥密度	1.32～1.71	1.50±0.10	10^3kg/m^3	ノギスで概略測定した体積で乾燥または自然状態の質量を除した密度
自然密度	1.82～2.08	1.94±0.07	10^3kg/m^3	
②含水比	21.4～38.3	29.7±4.5	%	
③有効間隙率	37.2～50.8	44.6±3.6	%	
④弾性波速度（P 波）	2.28～4.15	2.57±0.29	km/s	
（S 波）	0.99～1.56	1.22±0.12	km/s	

原子力機構, 2008[8]では本調査の速報として 06MI-04 号孔だけの平均値で示したので本表の値と異なる
乾燥相対密度は乾燥質量を有効間隙体積を含む見かけ体積で除して求めたもの

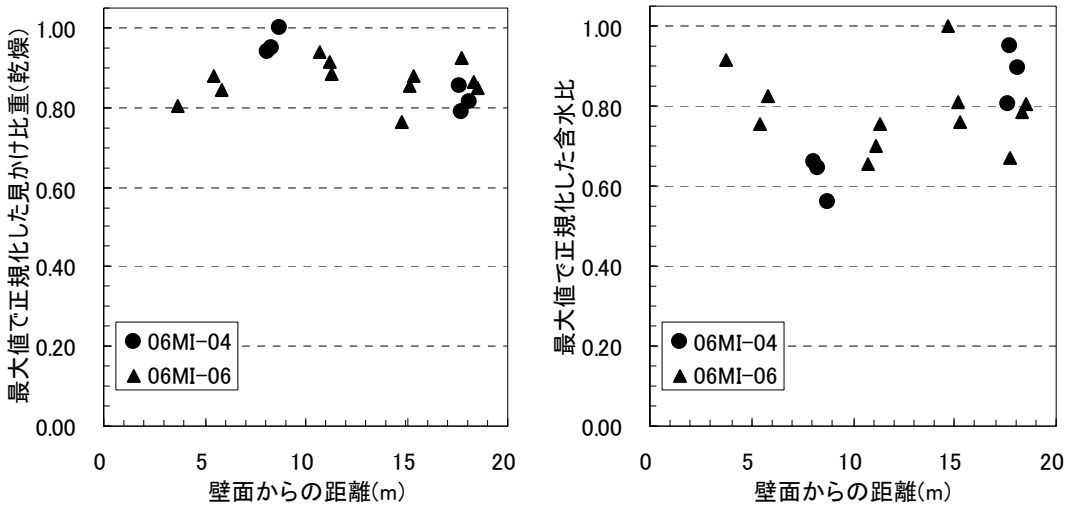


図 3.2.1-(1)　深度 100m 岩盤力学ボーリング調査（物理特性と研究坑道壁面からの距離の関係）

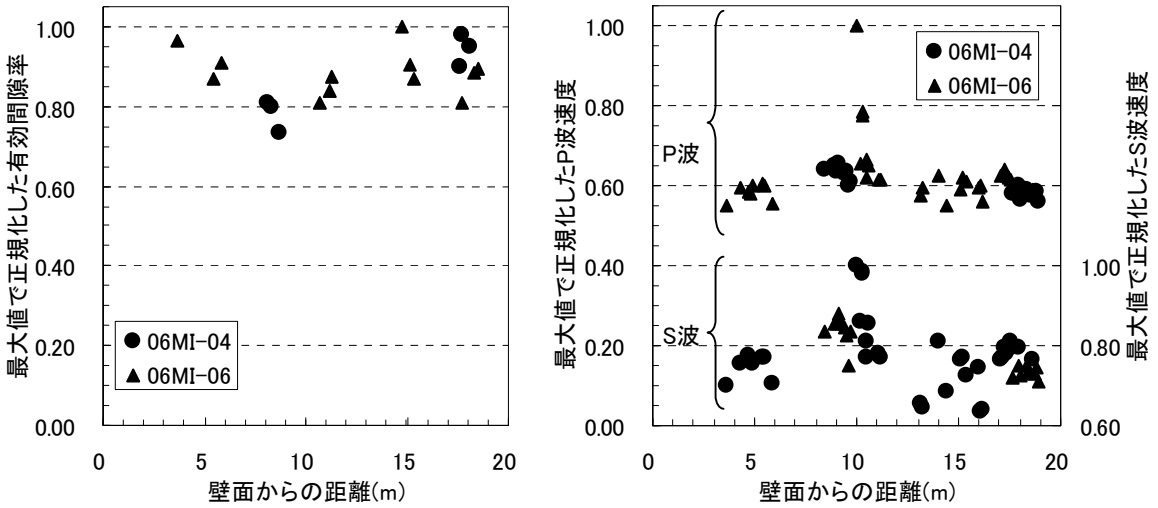


図 3.2.1-(2)　深度 100m 岩盤力学ボーリング調査（物理特性と研究坑道壁面からの距離の関係）

3.2.2　力学特性

(1) 測定方法

室内力学試験の項目は、一軸圧縮試験、圧裂引張試験及び三軸圧縮試験である。各試験方法は、室内物理試験と同様、地盤工学会が示した指針「岩の試験・調査方法の基準・解説書（平成 14 年度版）」[4)]に準拠して実施した。

(2) 測定結果と考察

水平方向の 2 孔（表 2.2 に示す 06MI-04 号孔、06MI-06 号孔）のボーリングコアから取得した、力学特性の分布範囲と平均値を表 3.2.2 に示す。また、図 3.2.2 に、これら力学特性と、試験体としたボーリングコアのボーリング孔内での採取位置（研究坑道壁面からの距離）との関係を示す。なお、3.2.1 で述べたのと同じ理由で、鉛直方向の 06MI-05 号孔を試験対象外とした。図 3.2.2 では、物理・力学特性間のばらつきの割合を比較するため、物理特性の場合と同じく最大値で正規化した値としている。全体的に力学特性のばらつきの割合は、物理特性のそれ（20～40%）よりも大きい傾向があり、06MI-04 号孔で 40%、06MI-06 号孔で 60%程度に達している。

表 3.2.2　深度 100m 岩盤力学ボーリング調査（力学特性の概要）

測定項目	最小値～最大値	平均値±σ	単位
①一軸圧縮強さ	5.43～13.7	10.7±2.0	MPa
②50%強度接線ヤング率	2.83～6.84	4.97±1.16	GPa
③静ポアソン比	0.31～0.47	0.42±0.05	－
④圧裂引張強さ	0.438～1.08	0.782±0.184	MPa
⑤粘着力 c	3.10～4.90	3.99±0.68	MPa
内部摩擦角 φ	8.89～20.5	15.4±4.2	°

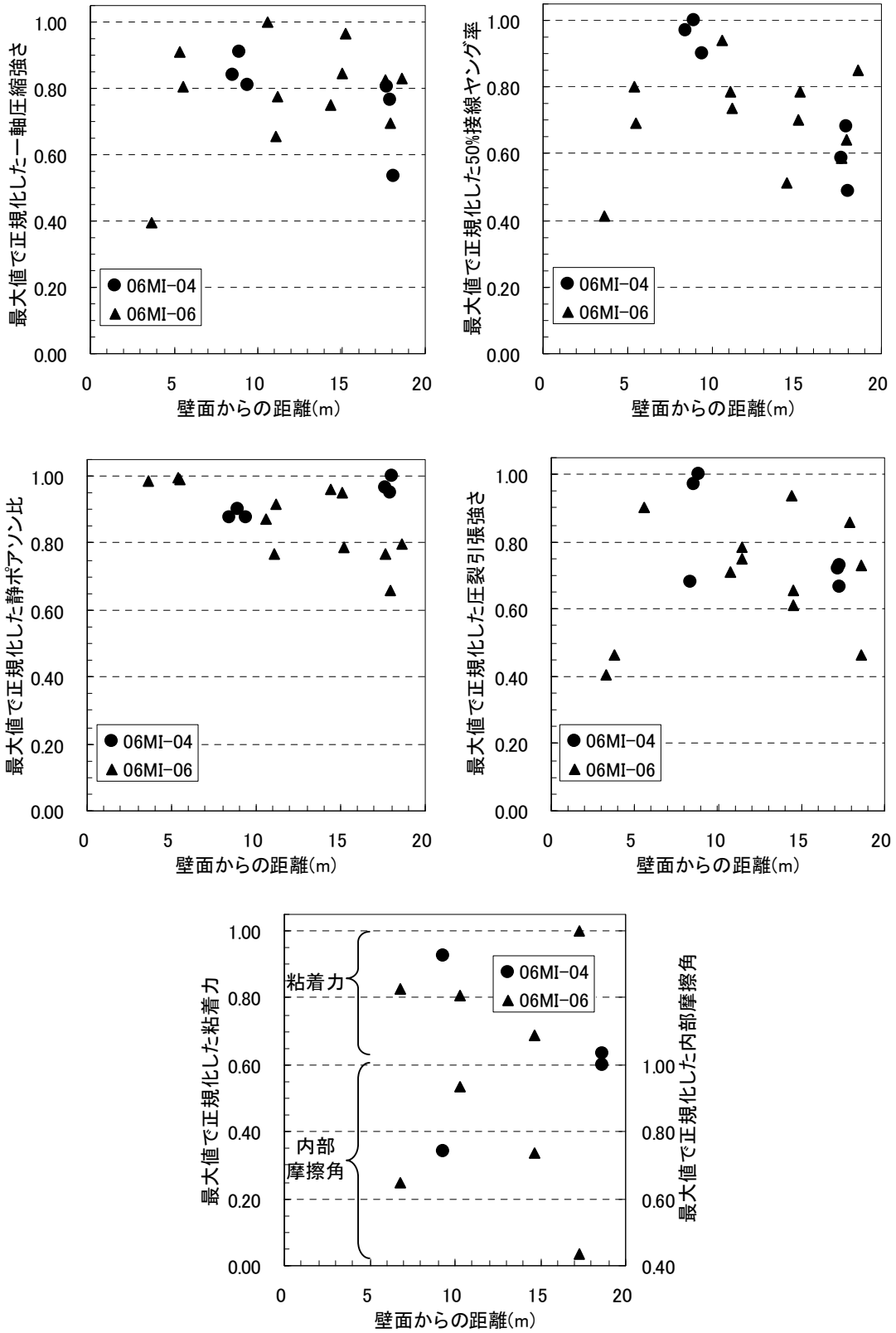


図 3.2.2　深度 100m 岩盤力学ボーリング調査（力学特性と研究坑道壁面からの距離の関係）

坑道壁面からの距離に対する変化をみると、位置による不均一性があるものの、物理特性に認められた壁面から 10m 付近を中心とする変化と対応するような変化は明瞭ではない。

3.2.3　ボーリングコアの観察による地質状況との比較

室内物理･力学試験の対象とした 06MI-04 号孔と 06MI-06 号孔に着目すると､図 3.1.3 の RQD の変化については、06MI-04 の方は不明瞭であるものの、06MI-06 号孔の方は掘削深度が約 5mabh（mabh: meter along bore hole）以浅で深度が浅いほど（研究坑道の孔壁寄りほど）大きく低下する傾向が認められる。しかし、その低下を示したデータ数は 2 点と少なく、これらの変化と掘削損傷を結び付けた議論に及ぶことは、前述の物理・力学特性と同様に無理と思われる。また、室内物理・力学試験を実施しなかった 06MI-05 をみると、同程度の低下は様々な深度で不規則に認められており、こちらの変化は岩盤の不均一性が現われた可能性が高い。

一方、室内物理試験で認められた壁面から 10m 付近を中心とする変化との対応は、岩盤等級、RQD、割れ目頻度の何れにおいても、図 3.1.2～3.1.4 においては明瞭でない。このような差が生じた理由として、岩盤等級、RQD、割れ目頻度は目視観察できるスケールの不連続面に比較的重みをおいた判定であるのに対し、室内物理・力学試験はそのような不連続面を避けた岩盤基質部で作成した試験体を評価している違いによるものと考えられる。

4. ボーリングコアを用いた初期応力測定

本章で述べる初期応力測定は、岩盤からボーリング掘削で採取したボーリングコアを試験することで、そのコアに記憶される岩盤初期応力を分析する手法である。現在行なわれている主な手法は、AE: Acoustic Emission 法[9]、DRA: Deformation Rate Analysis 法[10),11]、ASR: Anelastic Strain Recovery 法[12]、DSCA: Differential Strain Curve Analysis 法[13]であり、それぞれ測定原理として考えている岩盤初期応力の記憶メカニズムが若干異なる。本測定では、ここに示した 4 つの手法のうち、岩盤初期応力の記憶メカニズムが同じと考えられている AE 法と DRA 法を用いて初期応力測定を行った。

4.1 AE/DRA 法による測定

AE 法と DRA 法は同じ岩盤初期応力の記憶メカニズムに基づいて初期応力を分析する手法で、データ取得に必要な載荷試験は一体で行なえる。そこで以下では、両手法を総称して AE/DRA 法と呼称する。

AE/DRA 法では、岩盤初期応力によりボーリングコアに蓄積された微視亀裂が記憶の根源であると考える。その微視亀裂の蓄積レベルは、繰返し一軸載荷試験等で観察されるカイザー効果と同様にボーリングコアが履歴した最大応力に直接的に対応していると仮定し、その応力レベルを、載荷試験を行なって AE 発生頻度（AE 法）や岩石の変形率（DRA 法）の増加開始点として検出する。そのため、コアが履歴した最大応力が岩盤初期応力である場合にのみ、本手法によって岩盤初期応力が測定されることに注意が必要である。また、ボーリングコアに蓄積された微視亀裂が岩盤初期応力によって生成したとする直接的証拠は試験においては示されず、また、三軸応力状態の岩盤初期応力が一軸載荷状態でのカイザー効果に基づいて求まるとする測定原理に問題があるとの指摘もある[14]。

(1) 測定方法

AE/DRA 法による初期応力測定は、06MI-04～06 号孔の各孔 1 区間、合計 3 区間（表 4.1.1）から定方位のボーリングコア（HQ 径 63.5mm）を採取し、これを用いて方位既知の試験体を作成して実施した。試験体は 1 区間あたり図 4.1.1 に示す 6 方向のものが最低各 1 本必要である。そこで、データ取得を確実とし、また、精度の向上を意図して、6 方向で各 2 本（全体では 6 方向×2 本×3 区間で 36 本）の、円柱形状（直径 20mm×高さ 40mm 程度）試験体を作成した。

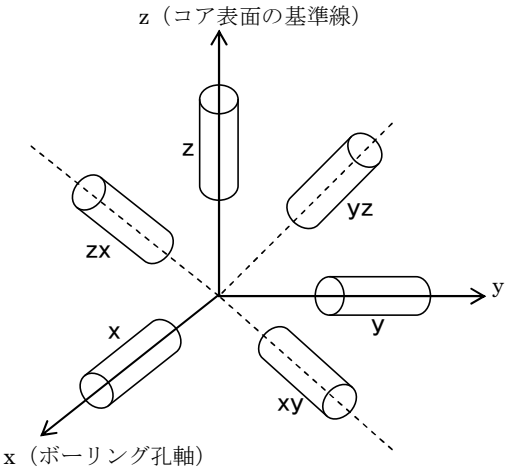


図 4.1.1　AE/DRA 法の試験体の作成方向（添字は試験体名）

表 4.1.1　各ボーリング孔の AE/DRA 法による初期応力測定の実施区間

孔号名	06MI-04	06MI-05	06MI-06
測定地点※(mabh)	19.2～20.0	20.8～21.4	9.0～9.6

※測定地点はコア採取区間で示す

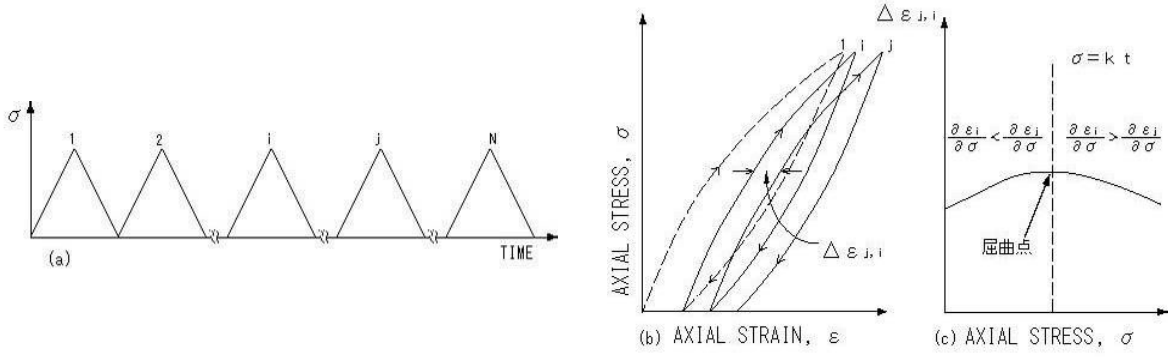
次に、作成した各試験体を用いて AE/DRA 法による測定を実施した。ここで、試験装置、測定方法は MIZ-1 号孔での調査で実施した AE/DRA 法のもの[15]と同様とした。なお MIZ-1 号孔の調査では測定のための載荷方法として一軸圧縮載荷を基本としつつも、調査深度が深く、予想される初期応力の最大値 σ_{max} が試験体の一軸圧縮強さ σ_f を超えて測定できない試験例があり、その場合は試験体に側圧を加え、σ_f を大きくする工夫[16]を施した。しかし今回は、調査深度が 100m 程度で、予想される σ_{max} は 2.3MPa 程度（文献[17]を参考として σ_{max} は土被り圧の 1.5 倍）、これに対し σ_f は 3 章の室内物理・力学試験結果のとおり 11MPa 程度あるため側圧を加える必要はなかった。AE/DRA 法において測定のための載荷の上限は σ_{max} を超え σ_f より小さい範囲とするので、上記を参考としてこれを 4～5MPa、載荷速度は 5MPa/min に設定した。

AE/DRA 法では一本の試験体から、その試験体の載荷軸方向の初期応力が推定される。そこで、図 4.1.1 に示した 6 方向の初期応力が、ある一様な初期応力状態に対して測定された観測 6 成分であると考えた解析を行い、3 次元の初期応力状態を評価した。

(2) 測定結果と考察

表 4.1.2 に AE/DRA 法で分析された各試験体の載荷軸方向の初期応力を示す。前述のとおり AE 法は初期応力レベルを一軸圧縮時の AE 発生頻度の増加点として抽出するが、そのための AE の数え方としてイベント法（包絡線検波法）[18]を用いた。また、イベント法は AE 発生が増えてくると数え漏らしが大きくなるので、AE エネルギを AE 波形記録から振幅の二乗×時間で求め、その変化率から間接的に AE 発生頻度の増加点を抽出する方法を併用した（表 4.1.2 でエネルギ法と記載した）。一方 DRA 法は山本の方法[14]に準拠して分析を行い、式 4.1.1 と図 4.1.2 で定義される、ひずみ差関数上に認められた屈曲点を初期応力レベルとして抽出した。

$$\Delta\varepsilon_{ij}(\sigma) = \varepsilon_j(\sigma) - \varepsilon_i(\sigma) \qquad (4.1.1)$$



(a) 繰返し一軸圧縮の載荷パターン　(b) $\Delta\varepsilon_{ij}(\sigma)$の定義　(c) ひずみ差関数の屈曲点

図 4.1.2　DRA 法におけるひずみ差関数[14]

表 4.1.2 をみると、初期応力を分析できない試験体が多く、3 次元の初期応力状態を評価するのに必要な 6 方向の初期応力が得られたのは 06MI-06 号孔の測定例だけであった。表 4.1.3 に、評価された初期応力（主応力）の値と方向を示す。また、この主応力の方向を図 4.1.3 のステレ

オ投影図に示す。ステレオ投影図をみると、主応力軸はどれも水平面内から約 30 度斜交しており土被り圧に相当する（鉛直軸に近い）主応力軸が認められない。一方、表 4.1.3 に示した主応力の値だけで判断すると、中間主応力σ_2が土被り圧の値（1.9MPa）脚注）に最も近い。そこで、σ_2が鉛直応力S_Vに対応するものと仮定し、最大主応力σ_1と最小主応力σ_3が水平面内最大主応力S_Hと水平面内最小主応力S_hのいずれかであると考えて、側圧係数$(S_H + S_h/2)/S_V$を計算すると約 1.1 となる。図 4.1.4 は我が国の平均的な側圧係数の分布傾向を示したものである。同図の深度 100m に計算した値 1.1 をおいて比較するとばらつきの範囲にあるが値は平均より小さい。しかし、図 4.1.4 に示された側圧係数の分布自体が深度 100m では広範囲に発散していることから、得られる側圧係数の値を根拠として応力測定結果の妥当性を議論することは、この深度においては困難と考えられる。

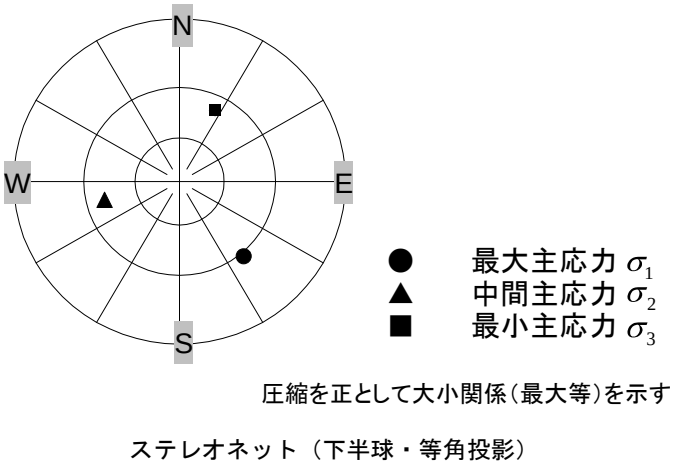
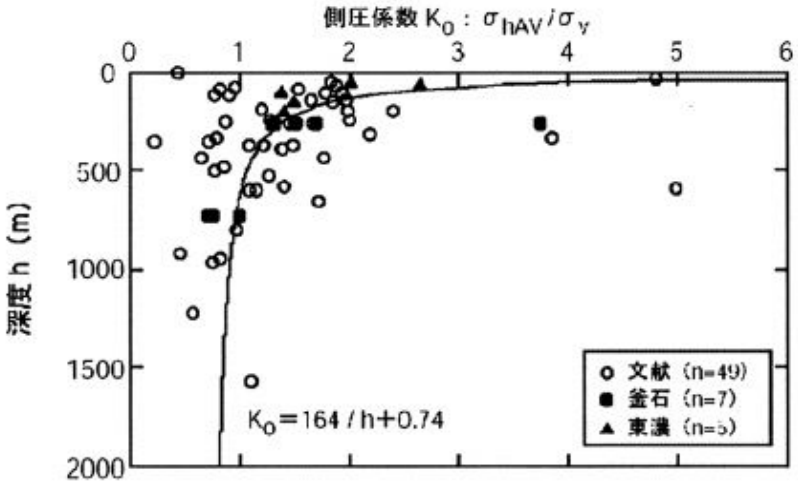


図 4.1.3　AE/DRA 法による深度 100m 初期応力の評価方向



「▲東濃」は東濃鉱山でのデータ

図 4.1.4　我が国の側圧係数の深度分布[19)]

注）土被り圧(MPa)＝鉛直深度(m)×岩の比重 1.9×重力加速度 9.8(m/s²)÷1000
　　比重は表 3.2.1 の自然密度を参考として決めた

表 4.1.2　AE/DRA 法で試験体より分析された初期応力

調査孔	試験体名-No.	初期応力（MPa）								両手法の不一致性※(%)
		AE 法			DRA 法					
		イベント法	エネルギ法	平均①	ひずみ差関数 $\Delta\varepsilon_{ij}(\sigma)$ のとり方 $j-i$				平均②	
					3-2	4-2	5-2	6-2		
06MI-04	x1	×	×	―	0.61	0.65	0.67	0.78	**0.68**	―
	x2	測定中に試験体が破壊して分析不能								
	y1	1.74	2.51	**2.13**	1.19	1.12	1.12	1.16	**1.15**	46.0
	y2	×	×	―	×	×	×	×	―	―
	z1	×	×	―	×	×	×	×	―	―
	z2	測定中に試験体が破壊して分析不能								
	xy1	2.46	×	**2.46**	2.70	2.72	2.47	2.49	**2.60**	5.4
	xy2	測定中に試験体が破壊して分析不能								
	yz1	2.60	3.14	**2.87**	×	×	×	×	―	―
	yz2	×	×	―	×	×	×	×	―	―
	zx1	×	×	―	×	1.71	1.50	1.68	**1.63**	―
	zx2	×	×	―	×	×	×	×	―	―
06MI-05	x1	×	×	―	×	×	×	×	―	―
	x2	2.67	3.24	**2.96**	×	×	×	×	―	―
	y1	2.56	2.96	**2.76**	×	×	×	×	―	―
	y2	2.39	2.68	**2.54**	1.23	0.94	0.97	1.22	**1.09**	57.1
	z1	2.06	2.00	**2.03**	1.60	1.57	2.38	2.42	**1.99**	2.0
	z2	1.94	2.03	**1.99**	2.41	1.90	2.21	3.00	**2.38**	16.4
	xy1	×	×	―	×	×	×	×	―	―
	xy2	×	2.64	**2.64**	×	×	×	×	―	―
	yz1	2.63	2.59	**2.61**	1.06	1.22	0.90	1.09	**1.07**	59.0
	yz2	×	×	―	×	×	×	×	―	―
	zx1	×	×	―	×	×	×	×	―	―
	zx2	×	×	―	×	×	×	×	―	―
06MI-06	x1	2.31	×	**2.31**	×	2.12	2.07	2.06	**2.08**	10.0
	x2	2.42	×	**2.42**	×	×	×	×	―	―
	y1	×	×	―	×	×	×	×	―	―
	y2	2.03	2.13	**2.08**	×	×	×	×	―	―
	z1	×	2.28	**2.28**	1.40	0.93	1.39	1.06	**1.20**	47.4
	z2	2.36	2.36	**2.36**	×	×	×	×	―	―
	xy1	2.97	2.74	**2.86**	×	×	×	×	―	―
	xy2	測定中に試験体が破壊して分析不能								
	yz1	1.83	2.49	**2.16**	×	×	×	×	―	―
	yz2	2.08	2.08	**2.08**	×	×	×	×	―	―
	zx1	×	×	―	3.28	3.04	3.30	2.22	**2.96**	―
	zx2	測定中に試験体が破壊して分析不能								

※　①－②の絶対値を①か②の大きい方に対する割合で示した
×：AE 発生頻度の増加点、ひずみ差関数の屈曲点が不明瞭で特定できず初期応力を分析できないもの
－：データ不足で計算できないもの

表 4.1.3　AE/DRA 法による初期応力の評価結果

測定地点 (mabh)	評価に用いた試験体数	最大主応力 σ_1 (MPa)	中間主応力 σ_2 (MPa)	最小主応力 σ_3 (MPa)	備　考
06MI-06 号孔 9.0～9.6	9	3.24±0.24 (140°/28°)	2.01±0.21 (256°/40°)	1.18±0.24 (26°/38°)	AE、DRA 法とも値がある場合は平均値を使用

※　初期応力は圧縮を正として大小関係（例：最大等）を示す、±値は確率誤差
括弧内は初期応力軸の方向（真北からの時計回り角度 / 傾斜伏角）を示す

(3) AE/DRA 法の適用性

表 4.1.2 をみると、試験中の試験体の破損は概ね少なく試験自体は実施可能といえる。しかし AE 発生頻度の増加点やひずみ差関数上の屈曲点が計測データ上で不明瞭なため抽出できず、その結果、初期応力が分析できない試験体が過半を占めている。表 4.1.4 に初期応力が分析できた割合をボーリング孔別に示す。水平孔である 06MI-04、06MI-06 と鉛直孔である 06MI-05 では土岐夾炭累層のほぼ水平な層理面に対するボーリングコアの軸方向が大きく異なるが、初期応力が分析できた割合に大きな差は認められない。図 4.1.1 に示したように、ボーリングコアの軸方向以外にも様々な方向の試験体を作成しているためと考えられる。

表 4.1.4 に、対象岩盤や調査深度は異なるが、MIZ-1 号孔の調査で実施した AE/DRA 法で初期応力が分析できた割合を併記した。MIZ-1 号孔の方が分析できた割合が明らかに高く、双方の調査深度の差（初期応力レベルの差）と対象岩盤の差がその主な理由と考えられる。前者は、深度 100m 程度では初期応力レベルが小さく、初期応力によりボーリングコアに記憶される微小破壊の絶対量が少なく、その結果 AE 発生頻度の増加点やひずみ差関数上の屈曲点が不明瞭となりやすいというメカニズムが考えられる。また後者は、岩盤のヤング率、一軸圧縮強さなどの強度、脆性度（圧縮強さ／引張強さ比）などの差が、初期応力によりボーリングコアに記憶される微小破壊の絶対量と関係することを示唆している。しかしながら、微小破壊の絶対量と初期応力の分析可能性の関係は不明である。ゆえに AE/DRA 法の適用性の判断は実施経験に頼っているのが現状である。

表 4.1.4　AE/DRA 法で試験体より初期応力が分析できた割合

調査孔	06MI-04	06MI-05	06MI-06	MIZ-1 調査 [15)]
対象岩盤	土岐夾炭累層			土岐花崗岩
調査深度	GL.-100m			GL.-300～1000m
AE 法	25%	58%	67%	88%
DRA 法	33%	33%	25%	100%

5. 応力解放法を用いた原位置試験による初期応力測定

本章で述べる応力解放法は、初期応力下にある岩盤の一部をボーリング掘削等で岩盤と切り離し、その際に初期応力が解放されることで発生する解放ひずみの量を測定し、これを解析することで岩盤の初期応力状態を評価する手法である。解放ひずみの測定方法は様々であるが、本測定では実績を踏まえて、ボーリング孔の孔壁でひずみを測定する孔壁ひずみ法[20]、円錐形に整形した孔底でひずみを測定する円錐孔底ひずみ法（以下、CCBO: Compact Conical-ended Borehole Over-coring）[21),22),23)]の二法を適用した。

5.1　孔壁ひずみ法による測定

06MI-04 号孔と 06MI-05 号孔の各孔 2 地点（表 5.1 に示す全体で 4 地点）において孔壁ひずみ法による初期応力測定を実施したが初期応力を評価することはできなかった。評価不能であった理由を以下に述べる。

表 5.1　各ボーリング孔の孔壁ひずみ法による初期応力測定の実施地点

孔号名	06MI-04	06MI-05
測定地点(mabh)	14.0，16.5	7.5，11.6

(1) 測定方法

孔壁ひずみ法の測定システムとして原子力機構が開発した長柱状の測定プローブを用いるものとした。これは孔内水が存在する環境でも適用可能で、深度 250m の鉛直孔への適用実績を持っている[20]。測定手順は、測定地点に到達したボーリング孔の孔底からパイロット孔を掘削し、測定プローブ先端のひずみゲージセル（以下、セル）をパイロット孔内に挿入して接着剤で岩盤に固定し、パイロット孔をオーバーコアリングするものである（図 5.1.1）。オーバーコアリングによるセル周囲の岩盤の解放ひずみを測定し、測定データを解析して初期応力状態を評価する。

初期応力評価では、セル周囲の岩盤が均質等方な連続体であると仮定するため、パイロット孔の掘削時にコアや孔内観察を行なって岩盤が肉眼で均質状態に見えること、顕著な割れ目が無いことを確認した後にセルを固定する。また、オーバーコアリングによる弾性的な初期応力解放も評価の仮定とするため、オーバーコアリング中にボーリングコアの破壊が起こると初期応力評価が不能となる。

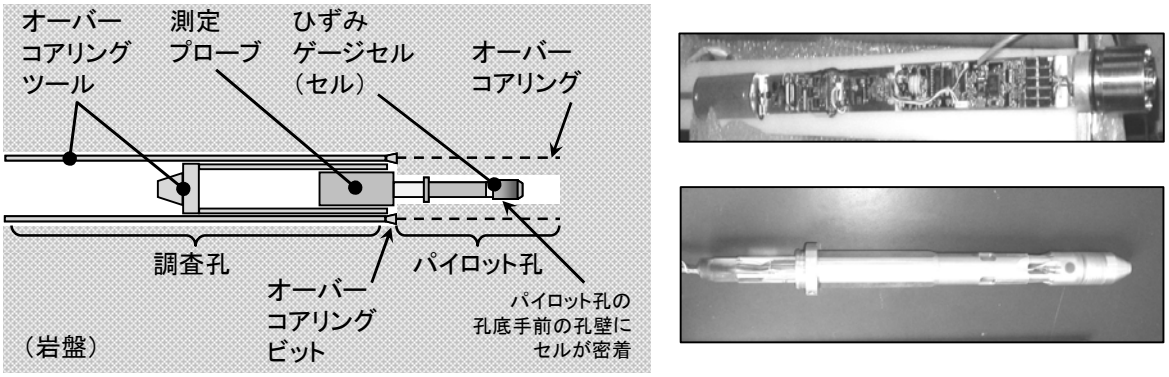


図 5.1.1　孔壁ひずみ法概念図（左：設置状況、右上：測定プローブ、右下：セル）

(2) 測定結果

06MI-04 号孔での測定は、上記測定プローブの、最初の水平孔への適用であり、測定プローブ適用可否の確認も目的の一つとした。ボーリングコアや孔壁観察により測定地点の候補とした岩盤は比較的良好で、測定プローブ挿入とセル固定まで問題なく行なえた。しかしオーバーコアリ

ングで測定プローブに外力や衝撃が加わり、先端のセルの岩盤固定が外れる現象が続発したため有効な解放ひずみデータを得ることができなかった。固定が外れる原因は、長柱状の測定プローブを水平方向に置くことで先端の固定部を支点として孔口側がプローブ自重でたわみ、プローブ本体が周囲を回転するオーバーコアリング掘削ツールに接触するためと考えられた。これを修正するには測定プローブの仕様変更が必要で、本測定中にこれを行なうことは不可能であった。ゆえに 06MI-04 号孔で初期応力を評価することはできなかった。図 5.1.2 に、本測定で得られたデータ（無効な解放ひずみデータ）を示す。測定プローブの方位をみると、オーバーコアリング時にプローブが不規則な回転を繰返し、掘削ツールに接触していることがうかがえる。

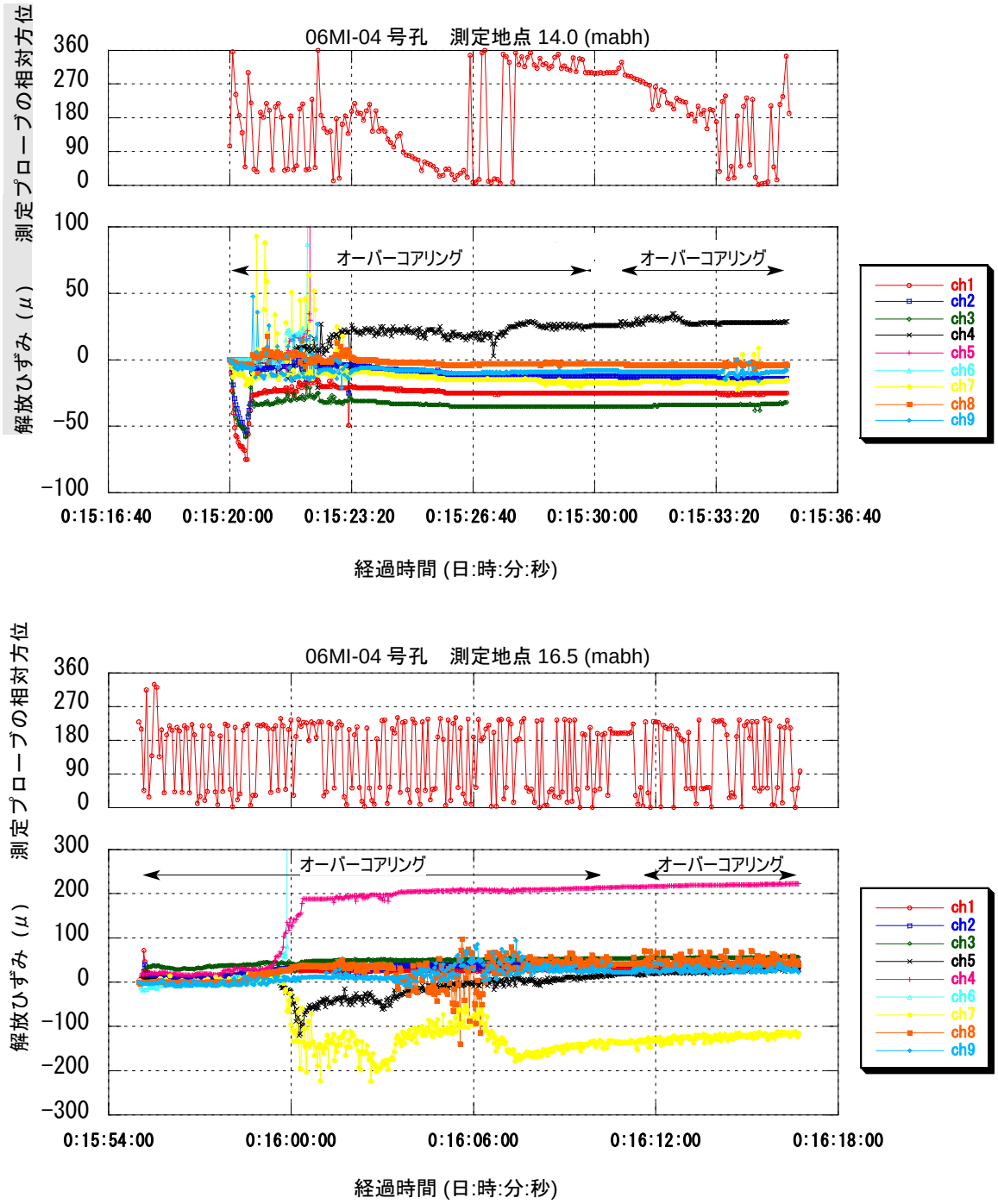


図 5.1.2　06MI-04 号孔で観測された無効な解放ひずみデータ

06MI-05 号孔での測定は、鉛直孔を対象とするため、06MI-04 号孔とは異なり測定実績があり、また、測定プローブの軸が重力方向と一致するので、06MI-04 号孔で発生したたわみの問題も無いと考えられた。しかし本孔では、コアや孔内観察により測定地点の候補を数多く検討したものの、水平方向の層理面が連続して認められ、均質と判断される区間を見つけることが困難であった。最終的に比較的均質であると考えられた 2 地点で測定を試みたが、どちらもオーバーコアリングでコアが破壊し、有効な解放ひずみが計測されず、初期応力を評価することができなかった。図 5.1.3 に、本測定で得られたデータ（無効な解放ひずみデータ）を示す。測定プローブの方位をみると、コア破壊によってセル固定が外れ、測定プローブが回転していることがうかがえる。

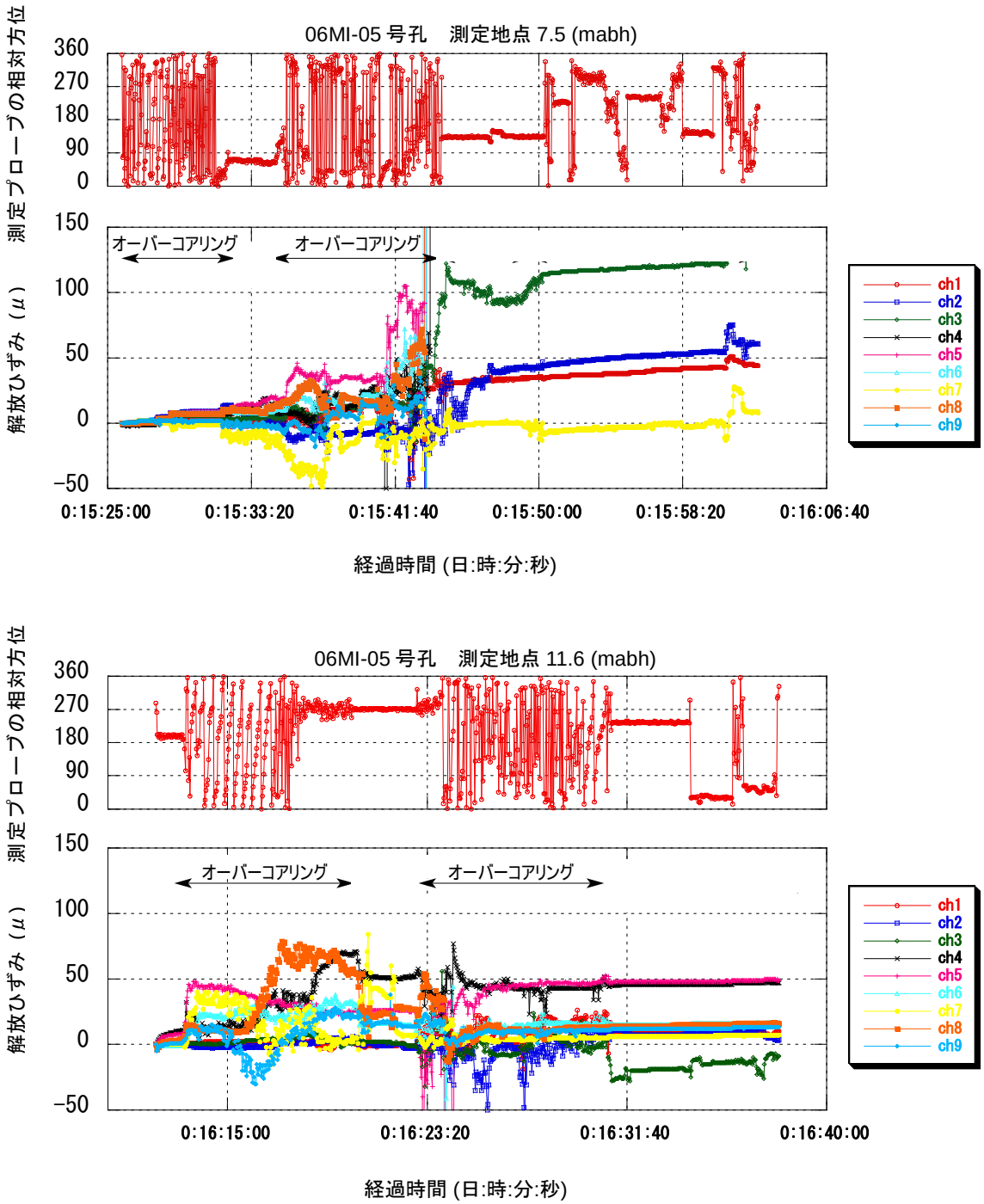


図 5.1.3　06MI-05 号孔で観測された無効な解放ひずみデータ

以上示した 2 つの失敗例から、ボーリング孔が水平孔である場合や、岩盤不均質性がボーリング孔軸に沿って顕著な場合は、前述の測定プローブの適用は不適切であると言える。そこで、測定プローブを条件に適合するよう改良することも考えられるが、次の理由からその必要性は低いと判断している。すなわち、①5.2 で述べるような今回の深度 20m 程度の水平孔に適合する別の測定手法がある、②本プローブの開発目的はセルとデータロガー間を有線で接続できない大深度の鉛直ボーリング孔への適用である、③岩盤不均質性がボーリング孔軸に沿って顕著な場合はプローブを改良しデータを取得可能としても有効な解析ができないなどがその理由である。

5.2　CCBO（円錐孔底ひずみ法）による測定

前述のとおり、孔壁ひずみ法の実施において、測定プローブ構造に起因した水平孔への不適合が認められたため、残る 1 本の水平孔である 06MI-06 号孔での初期応力測定は、掘削延長の比較的短い水平孔での実績が多い、CCBO を用いて評価するものとした（表 5.2.1 に示す 6 地点）。

表 5.2.1　CCBO による初期応力測定の実施地点

孔号名	06MI-06
測定地点(mabh)	5.0，6.0，7.0，8.0，8.5，9.0

(1) 測定方法

CCBO は、円錐形のひずみゲージセル（以下、円錐セル）を同形状に整形したボーリング孔底面に接着するので（図 5.2.1）、孔壁ひずみ法に比較して、孔底に孔内水の残留した環境での適用が難しい（孔底の岩盤面を綺麗に露出する必要があるため）。ゆえに CCBO は孔内水が排水可能な水平孔に適していると考えられる。また、オーバーコアリングによる解放ひずみを測定・解析して初期応力を評価すること、解析において仮定する内容（岩盤の均質等方な連続性、オーバーコアリング中の弾性的挙動・コア非破壊）などは前述の孔壁ひずみ法と同様である。しかし、円錐セルが孔軸方向で小型であるためオーバーコアリングの必要長が孔壁ひずみ法の約 1/3 で済み、オーバーコアリング区間で均質等方な連続性が確保される測定に適した地点を見つけ出すことが比較的容易である。

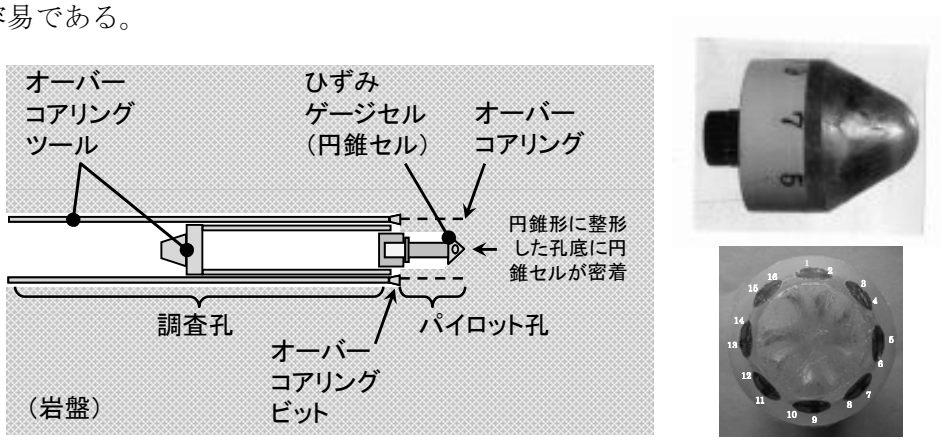


図 5.2.1　CCBO 概念図（左：設置状況、右上：円錐セル先端、右下：同正面図）

(2) 測定結果

06MI-06 号孔では、表 5.2.1 に示した 6 地点において CCBO による初期応力測定を実施した。今回用いた円錐セルは 16 成分の解放ひずみを測定しているが、円錐セルの岩盤との接着不良や接着面に割れ目があると、全部または一部の成分が解析上の仮定である弾性的挙動から外れる場合がある。例えば、図 5.2.2 に示した測定例では 16 成分全てが概ね弾性的挙動を示したと考えられる。この図の成分のように、オーバーコアリングのビット通過時（横軸が 0 の位置）で解放ひ

ずみが急変し、全体的に連続で滑らかな曲線が得られている場合は弾性的挙動をしたと考えられる。もし、測定においてそのようでない成分があれば、それは解析上の仮定と矛盾するので除外する。このとき、解析の未知数は初期応力 6 成分なので、観測 16 成分から残り 6 成分までは除外可能であるが、除外成分が多くなると、図 5.2.3 で比較したように、解析で行う解放ひずみデータへの理論曲線のフィット誤差が大きくなり、初期応力の評価結果の信頼性が低下する。

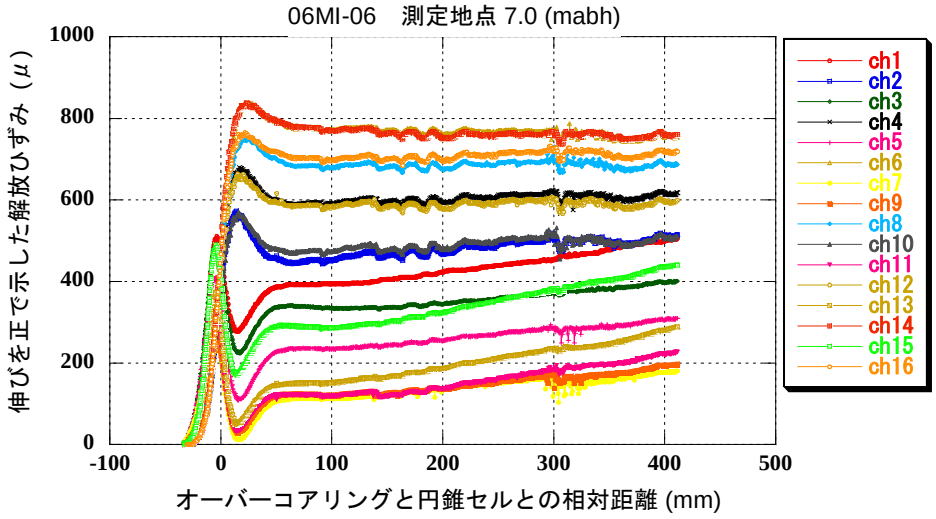


図 5.2.2　CCBO で 16 成分が弾性的挙動を示した例

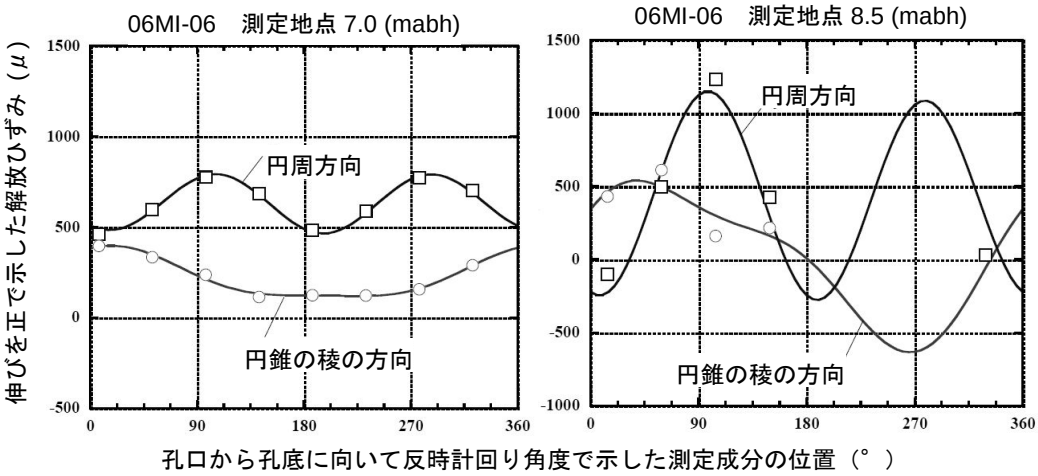


図 5.2.3　CCBO の解放ひずみ（□と○）に対する理論曲線（各曲線）のフィット
（左）16 成分での解析例　（右）7 成分が除外され 9 成分での解析例

表 5.2.2 に CCBO で評価した深度 100m の初期応力（主応力）の値と方向を示す。また、この主応力の方向を図 5.2.4 のステレオ投影図に示す。なお、測定地点 8.0mabh では解析可能な成分数が 6 個に足らず初期応力が評価できなかったので同地点のステレオ投影図は省略した。

(3) 測定結果の考察

図 5.2.4 をみると初期応力の方向は測定地点ごとに異なっている。概ね水平に堆積した堆積岩中の初期応力は、大局的には鉛直方向に土被り圧に相当する一つの主応力があり、残りの二つの主応力が水平面内にあると予想される。しかし 6.0mabh では鉛直方向に近い主応力が認められない。また、表 5.2.2 で応力値をみると 8.5mabh では鉛直方向に引張力が、9.0mabh では土被り圧

としては小さ過ぎる値が評価されており、予想される状況と異なる。このうち、8.5、9.0mabh の例は、図 5.2.3 で例示したように解析可能な成分数が少ないため理論曲線のフィット誤差（表 5.2.2 中の±値）が大きく、正しい解に収束していない可能性が高いと考えられる。しかし 6.0mabh の方は解析可能な成分数が比較的多くてフィット誤差も小さなことから、他の理由、例えば岩盤の不均質や割れ目による局所的乱れの結果が測定された可能性が考えられる。以上のことから、大局的な初期応力である可能性が高いのは測定地点 5.0、7.0mabh の評価結果といえる。

表 5.2.2　CCBO による初期応力の評価結果

測定地点 (mabh)	解析可能な成分数	最大主応力 σ_1 (MPa)	中間主応力 σ_2 (MPa)	最小主応力 σ_3 (MPa)	備　考
5.0	10	3.35±0.38 (9°/8°)	★2.67±0.13 (144°/79°)	1.49±0.11 (278°/8°)	
6.0	12	3.28±0.07 (149°/44°)	2.03±0.09 (9°/38°)	1.59±0.05 (262°/21°)	鉛直方向に近い主値を認めない
7.0	16	2.79±0.02 (136°/7°)	2.03±0.02 (44°/13°)	★1.84±0.01 (255°/75°)	確率誤差が今回測定の中で最小
8.0	2	評価不能			値が得られず
8.5	9	2.46±0.48 (110°/20°)	1.38±1.04 (212°/30°)	★-0.88±0.99 (352°/52°)	値に対して確率誤差が大きく精度不足と考えられる
9.0	9	3.74±0.34 (312°/5°)	2.06±0.35 (43°/9°)	★0.41±0.28 (193°/80°)	

※初期応力は圧縮を正として大小関係（例：最大等）を示す、±値は確率誤差
括弧内は初期応力軸の方向（真北からの時計回り角度 / 傾斜伏角）を示す
★印は三個の主応力のうち方向が鉛直に近く土被り圧に相当すると認めたもの

5.3　孔壁ひずみ法と CCBO の適用性

今回の孔壁ひずみ法と CCBO の、深度 100m における土岐夾炭累層への適用事例に基づいて得られた、各手法の適用性を表 5.2.3 にまとめる。

表 5.2.3　孔壁ひずみ法、CCBO の土岐夾炭累層への適用性

手法	対象とする岩盤	鉛直孔		水平孔	
孔壁ひずみ法	土岐夾炭累層 概ね水平な層理面を有する堆積岩	×	層理間隔が狭いと測定に適した地点の選定が困難、オーバーコアリングでコアが破壊し易い	△	・長柱状プローブのオーバーコアリングツールとの接触によるひずみセル剥離が発生し易い
CCBO		×	ひずみセルを接着する孔底面の排水、スライム除去が困難	○	・測定は概ね良好に行える ・大局的な応力状態であるかどうかの別途検討が必要

△は測定ツールの改修で解決する可能性があることによる

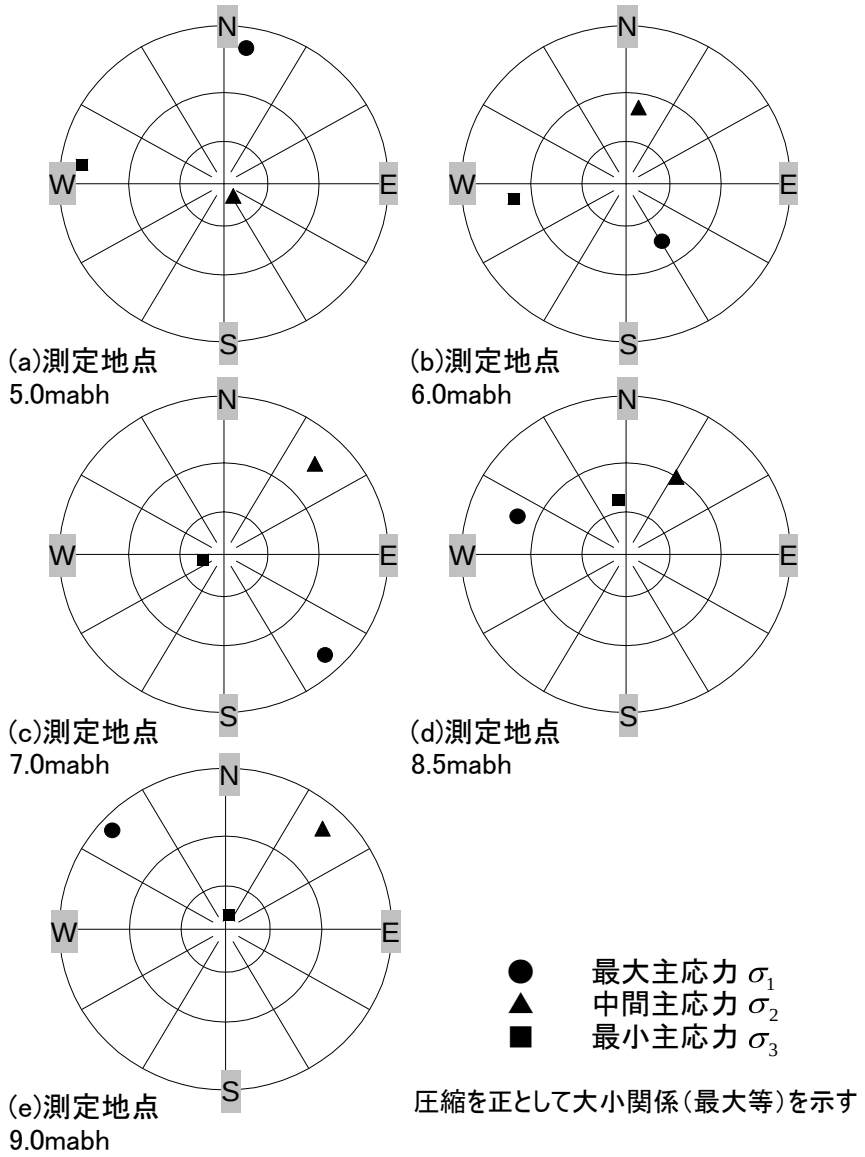


図 5.2.4　CCBO による初期応力の評価方向

6. 水圧破砕法を用いた原位置試験による初期応力測定

6.1 水圧破砕法による測定

表 6.1.1 に示した 06MI-04 号孔内の 2 地点、06MI-05 号孔内の 2 地点、06MI-06 号孔内の 3 地点、合計 7 地点において水圧破砕法[24),25)]による初期応力測定を実施した。ただし、06MI-05 号孔の測定地点 9.4mabh では岩盤の透水性が高く、逸水が発生したために孔内加圧ができず、水圧破砕（割れ目の生成）が行なえたのはこの地点を除いた残り 6 地点である。

表 6.1.1　水圧破砕法による初期応力測定の実施地点

孔号名	06MI-04	06MI-05	06MI-06
測定地点(mabh)	6.0，9.0	6.0，9.4※	12.0，15.0，18.0

※当地点では逸水により孔内加圧ができず測定不能

(1) 測定原理

水圧破砕法では、岩盤が均質等方な連続体と見なせること、孔内加圧により周辺岩盤が弾性的な挙動を示すこと、初期応力を主応力で示したとき、その一つが概ねボーリング孔軸の方向であることを仮定し、ボーリング孔軸と直交する面内の主応力を評価する。水圧破砕法を実施して、前述の仮定が概ね正しければ、孔内加圧によりボーリング孔軸に平行な割れ目（以下、適用孔の方向が水平、鉛直に関わらず縦方向の割れ目と呼ぶ）が生成する[26)]。

岩盤の初期応力は鉛直方向に土被り圧（S_V）に相当する一つの主応力があることが多いため、鉛直にボーリング孔を掘削し、これに直交する水平面内の主応力（水平最大主応力S_H、水平最小主応力S_h）を評価することが一般的である。また、水平孔の場合、孔軸に直交する面内の上下方向にS_Vが含まれ、孔軸がS_HまたはS_h方向に近ければ左右方向にS_hまたはS_H相当の初期応力が得られると考えられる。

(2) 水圧破砕による割れ目の生成

図 6.1.1 は今回の測定で生成した割れ目をインプレッションパッカーで型取りした展開図である。この図によるとどの地点の割れ目も縦方向とは認められず、水圧破砕法による測定原理に合致する現象と異なる。特に 06MI-04 号孔、9.0mabh 地点の割れ目は雁行状を示し、これは水平面とボーリング孔軸のどちらにも平行でない方向に一つの主応力があることを示している。その他の地点では､割れ目が雁行状でないために割れ目の発生状況から主応力方向を推測できないが、雁行状であってもなくても、縦方向の割れ目でない以上、その発生を前提とした解析による初期応力評価はできないと考えられる。なお、雁行状でないが縦方向の割れ目でもない後者の生成した理由として、対象岩盤が層理を有する堆積岩であることを踏まえると、岩盤基質部に初期応力で決まる方向の割れ目が生成する前に、岩盤内の弱面あるいは潜在する割れ目が開いたものである可能性が考えられる。

(3) 初期応力の解析方法

今回の水圧破砕法による測定で得られたデータを表 6.1.2 と 6.1.3 に示す。表 6.1.2 は生成した割れ目を型取りした展開図から読み取った割れ目の方向余弦である。また、表 6.1.3 の破砕圧P_bは割れ目が生成したときの加圧量、閉口圧P_sは割れ目生成後に孔内加圧を止めて加圧部を外部と遮断したときに収束する圧力（割れ目に垂直な初期応力成分とバランスする圧力）、再開口圧P_rは孔内加圧を解放後、再度加圧して生成済みの割れ目が再開口するときの加圧量である。P_bは破砕する最初の孔内加圧でしか測定できないが、P_r、P_sは孔内加圧と圧力解放を繰り返すことで複数回測定できる。そこでP_r、P_sは 4 回の測定を原則とし、4 回の測定結果が不明瞭な場合は、明

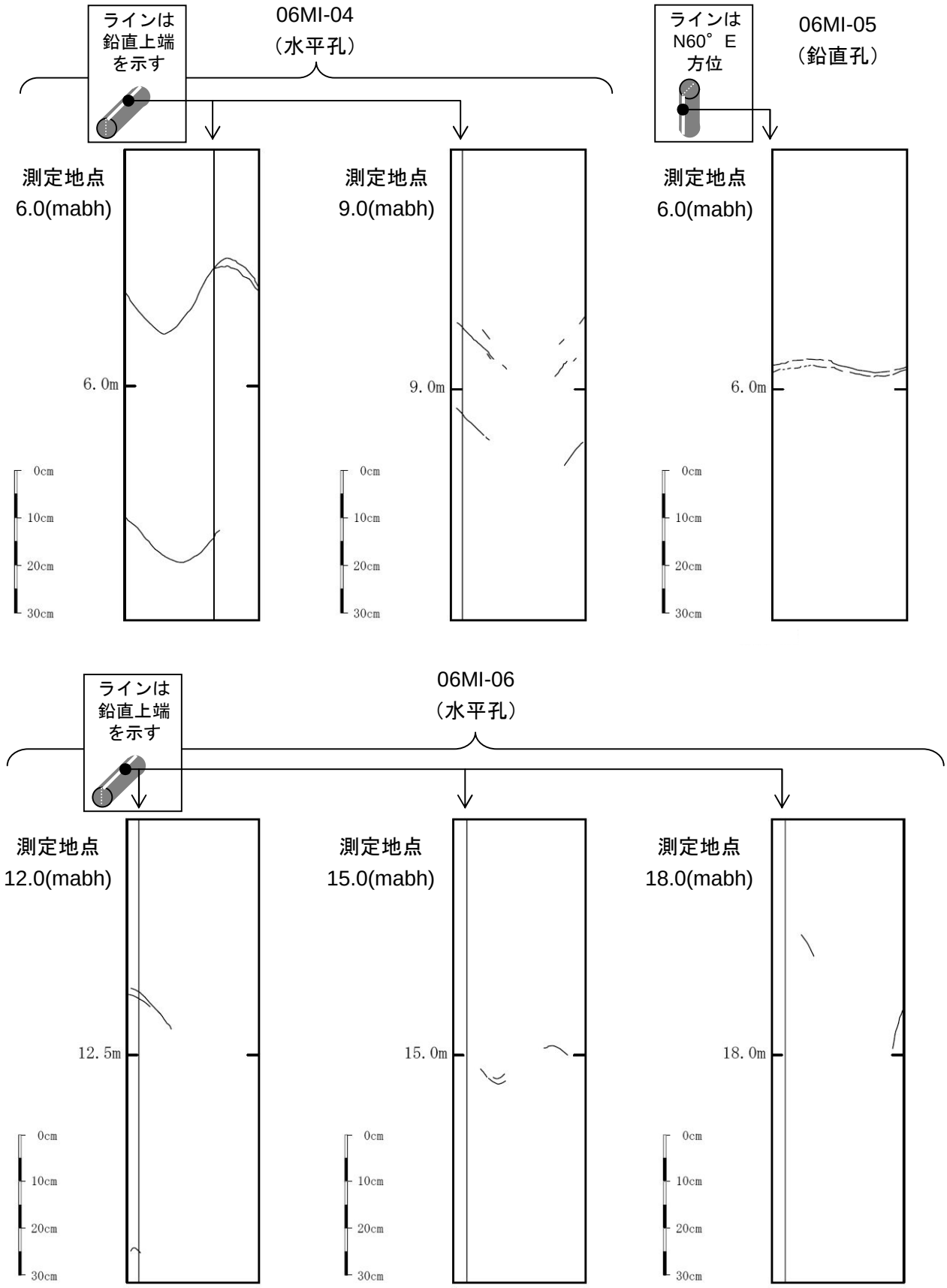


図 6.1.1　水圧破砕で生成した割れ目の状況

瞭となるまで測定回数を増やした。

本来の水圧破砕法では、縦方向の割れ目の発生を前提とした式 6.1.1 を用いて P_r、P_s より S_H、S_h を求めるが、前述のとおり今回のデータではこれが行なえない。

$$P_r = \frac{3S_h - S_H}{2} \qquad (6.1.1)$$
$$P_s = S_h$$

一方、P_s の値は、割れ目の方向には関係なく、常に割れ目に垂直な初期応力成分と釣り合った圧力と考えることができる。そこで、縦方向の割れ目が得られずとも、互いに平行でない 6 方向以上の割れ目について P_s が得られた場合、これらを初期応力 6 成分の測定結果と見なし、3 次元的な初期応力状態を評価する方法（以下、6 方向 P_s 法）が、本来の水圧破砕法とは別に考えられる[27]。表 6.1.2 に示す、水圧破砕で生成した割れ目の方向余弦（λ_E λ_N λ_V）をみると、その値は測定地点間で異なり、よって割れ目は互いに平行でない 6 方向と言える。そこで、6 方向 P_s 法により初期応力を解析することができる。なお、P_s は、表 6.1.3 に示す、同一地点で複数回測定した結果の平均値を用いるものとした。ただし、この方法によると、本来の水圧破砕法による評価（式 6.1.1 による解析）に対して、①互いに平行でない 6 方向の割れ目が得られるよう水圧破砕を制御することはできない、②応力状態を一つ評価するために最低 6 地点の水圧破砕が必要（本来の水圧破砕法では 1 地点で 1 評価）というデメリットがある。

表 6.1.2　水圧破砕で生成した割れ目の法線方向の方向余弦

調査孔		測定地点 (mabh)	方向余弦（E-N-V 座標系）		
			λ_E	λ_N	λ_V
06MI-04 号孔	水平孔	6.0	0.006804	0.814347	-0.580339
		9.0	-0.034795	0.128338	-0.991120
06MI-05 号孔	鉛直孔	6.0	0.132784	0.249731	0.959168
06MI-06 号孔	水平孔	12.5	0.643632	0.556749	-0.525136
		15.0	0.762398	0.583724	0.279313
		18.0	-0.454588	0.316320	-0.832641

表 6.1.3-(1)　水圧破砕で得られたデータ

孔名	測定地点 (mabh)	試験名	加圧流量 (cc/min)	パッカー圧 (MPa)	破砕圧 P_b (MPa)	閉口圧 P_s (MPa)	再開口圧 P_r (MPa)
06MI-04	6.0	割れ目発生試験	400	5	3.18	2.53	-
		割れ目再開口試験 1	400	5	-	2.53	2.79
		割れ目再開口試験 2	400	5	-	2.55	2.75
		割れ目再開口試験 3	200	5	-	2.56	2.61
		割れ目再開口試験 4	200	5	-	2.49	2.65
					平均値	2.53	2.70
	9.0	割れ目発生試験	400	5	3.54	2.04	-
		割れ目再開口試験 1	400	5	-	2.29	2.25
		割れ目再開口試験 2	400	5	-	2.26	2.11
		割れ目再開口試験 3	200	5	-	2.19	2.26
		割れ目再開口試験 4	200	5	-	2.26	2.21
		割れ目再開口試験 5	100	5	-	2.24	2.13
		割れ目再開口試験 6	100	5	-	2.24	2.22
					平均値	2.22	2.20

表 6.1.3-(2)　水圧破砕で得られたデータ

孔名	測定地点 (mabh)	試験名	加圧流量 (cc/min)	パッカー圧 (MPa)	破砕圧 P_b (MPa)	閉口圧 P_s (MPa)	再開口圧 P_r (MPa)
06MI-05	6.0	割れ目発生試験	400	6	2.81	2.13	-
		割れ目再開口試験 1	400	6	-	2.21	2.24
		割れ目再開口試験 2	400	6	-	2.38	2.39
		割れ目再開口試験 3	400	6	-	2.33	2.29
		割れ目再開口試験 4	400	6	-	2.37	2.21
		割れ目再開口試験 5	400	6	-	2.30	2.13
		割れ目再開口試験 6	200	6	-	2.35	1.96
		割れ目再開口試験 7	200	6	-	2.28	2.13
		割れ目再開口試験 8	200	6	-	2.21	2.42
		割れ目再開口試験 9	100	6	-	2.21	1.97
		割れ目再開口試験 10	100	6	-	2.16	1.99
					平均値	2.27	2.17
06MI-06	12.5	割れ目発生試験	400	5	3.71	2.16	-
		割れ目再開口試験 1	400	5	-	2.03	2.03
		割れ目再開口試験 2	400	5	-	2.04	1.96
		割れ目再開口試験 3	200	5	-	1.99	1.89
		割れ目再開口試験 4	200	5	-	1.97	1.93
					平均値	2.04	1.95
	15.0	割れ目発生試験	400	5	1.97	1.39	-
		割れ目再開口試験 1	400	5	-	1.18	1.58
		割れ目再開口試験 2	400	5	-	1.17	1.68
		割れ目再開口試験 3	200	5	-	1.17	1.19
		割れ目再開口試験 4	200	5	-	1.13	1.24
					平均値	1.21	1.42
	18.0	割れ目発生試験	400	5	4.35	2.50	-
		割れ目再開口試験 1	400	5	-	2.33	2.35
		割れ目再開口試験 2	400	5	-	2.38	2.32
		割れ目再開口試験 3	200	5	-	2.36	2.24
		割れ目再開口試験 4	200	5	-	2.42	2.26
					平均値	2.40	2.29

前述した 6 方向 P_s 法（互いに平行でない 6 方向の割れ目の P_s より初期応力を求める方法）の具体的手順について以下に述べる。はじめに P_s が割れ目の法線方向の軸応力に等しいと仮定する。仮定に基づき、力の釣合いから式 6.1.2 が成り立つ。

$$\sum_{i,j=1}^{3} \sigma_{ij}\ \lambda_i\ \lambda_j = P_s \qquad (6.1.2)$$

ここで岩盤は任意の直交座標系 $X_i\ (i=1,2,3)$ で $\sigma_{ij}\ (i,j=1,2,3)$ で表せる初期応力状態にあるとしている。また λ_i と λ_j は座標軸 X_i, X_j それぞれに対する割れ目の法線方向を示す方向余弦である。

具体例として直交座標系 $X_i\ (i=1,2,3)$ が E-N-V 座標系であるとき、水平な割れ目(1)があり、その閉口圧が $P_s^{(1)}$ である場合を考えると、式 6.1.2 は以下のとおり展開される。

$$\sigma_{EE}\lambda_E\lambda_E + \sigma_{NN}\lambda_N\lambda_N + \sigma_{VV}\lambda_V\lambda_V + 2\sigma_{NV}\lambda_N\lambda_V + 2\sigma_{VE}\lambda_V\lambda_E + 2\sigma_{EN}\lambda_E\lambda_N = P_s^{(1)} \qquad (6.1.3)$$

この例では、割れ目(1)の法線ベクトルが V 軸に平行で E,N 軸と直交するため、その方向余弦

は$\lambda_E = 0, \lambda_N = 0, \lambda_V = 1$となり、これを式 6.1.3 に代入すれば、最初の仮定のとおり、割れ目の法線方向の軸応力（例では水平面の法線方向すなわち鉛直方向の応力成分）は割れ目の閉口圧に等しいとする次式が得られている。

$$\sigma_{VV} = P_s^{(1)} \tag{6.1.4}$$

式 6.1.2 の未知数は初期応力 6 成分であるため、独立な 6 方向以上の割れ目の方位（λ_i, λ_j）と閉口圧P_sを測定して式 6.1.2 を連立させると初期応力が計算できる。

(4) 測定結果と考察

表 6.1.4 に、6 方向P_s法を用いて評価した初期応力（主応力）の値と方向を示す。また、この主応力の方向を図 6.1.2 のステレオ投影図に示す。ここで、評価例は一つしかないが、中間主応力σ_2の方向が鉛直に近く、またその値も土被り圧の値（1.9MPa）に近いことから、σ_2がS_Vに対応するものと考えられる。

最大主応力σ_1の方向は、前述の CCBO で大局的な初期応力の可能性が高いと評価した 2 例のうち、7.0mabh 地点のそれとほぼ等しい。しかし、σ_1の値は互いに一致せず、6 方向P_s法による値が CCBO のそれの 2 倍以上大きい。この相違は、CCBO がボーリング孔内のある 1 点の計測で評価しているのに対し、6 方向P_s法は調査ボーリング 3 孔（06MI-04～05 号孔）に亘るデータを一組として分析している、すなわち、応力測定領域のスケールの相違による可能性が考えられる。そのほか、本来の水圧破砕法を目指した装置を用いて生成した割れ目を用いて、当初は考えなかった 6 方向P_s法を適用したことの影響もあり得る。

表 6.1.4　6 方向P_s法による初期応力の評価結果

測定地点 (mabh)	評価に用いた割れ目数	最大主応力 σ_1 (MPa)	中間主応力 σ_2 (MPa)	最小主応力 σ_3 (MPa)	備　考
評価に用いた 6 枚の割れ目を含む領域	06MI-04: 2 06MI-05: 1 06MI-06: 3 合計 6	6.2 (131°/16°)	★2.2 (3°/65°)	1.1 (226°/19°)	連立式の本数（割れ目数）が未知数に等しく確率誤差を得ず

※初期応力は圧縮を正として大小関係（例：最大等）を示す
括弧内は初期応力の軸の方向（真北からの時計回り角度 / 傾斜伏角）を示す
★印は三個の主応力のうち方向が鉛直に近く土被り圧に相当すると認めたもの

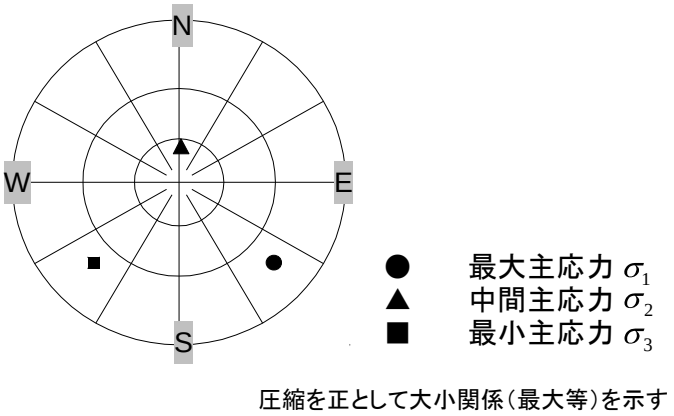


図 6.1.2　6 方向 P_s 法による初期応力の評価方向

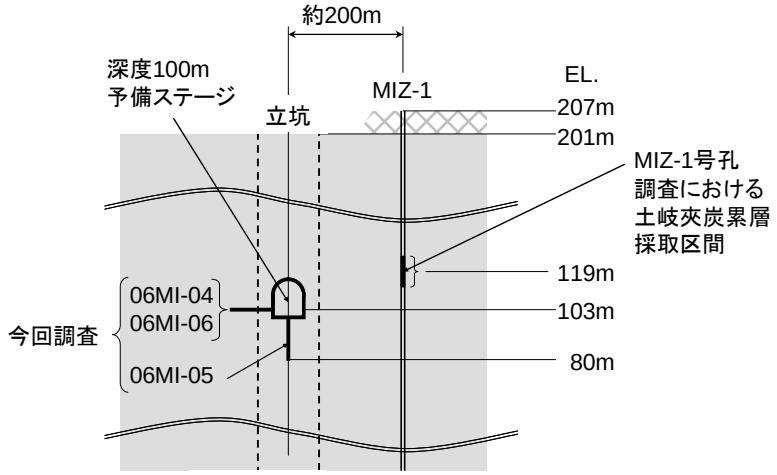
7. MIZ-1 号孔調査（第 1 段階調査）結果との比較

7.1　物理・力学的特性の比較

表 7.1 は、物理・力学的特性について、深度 100m における岩盤力学ボーリング調査（以下、深度 100m 調査）結果と MIZ-1 号孔調査（第 1 段階調査）結果を比較したものである。MIZ-1 の平均値に対する深度 100m と MIZ-1 の平均値の差の割合は、静ポアソン比と三軸試験における内部摩擦角で約 40%あるのが最大であり、その他の特性は、物理特性で約 10%、力学特性で約 20%程度である。2 章で示したように、室内物理・力学試験の結果のばらつきの割合が 20%～40%あったことを踏まえると、概ね双方の分布範囲は重なっており大局的には同程度と言える。ゆえに、第 1 段階調査は深度 100m の物理・力学的特性の把握に有効であったと考えられる。

表 7.1　物理・力学的特性に関する MIZ-1 号孔調査結果との比較

調査地点	① 深度 100m （平均値±1σ）	② MIZ-1 （平均値±1σ）	①/② %
岩相	土岐夾炭累層		
調査深度（EL.m）	80～103	119	
乾燥状態の見かけ比重 （乾燥相対密度）	1.51±0.11	1.47±0.35	103
含水比（%）	29.7±4.5	30.5±4.9	97
有効間隙率（%）	44.6±3.6	44.3±3.8	101
P 波弾性波速度（km/s）	2.57±0.29	2.39±0.11	108
S 波弾性波速度（km/s）	1.22±0.12	1.09±0.03	112
一軸圧縮強さ（MPa）	10.7±2.0	12.3±0.4	87
50%強度接線ヤング率（GPa）	4.97±1.16	4.5±0.3	110
静ポアソン比	0.42±0.05	0.290±0.049	145
圧裂引張強さ（MPa）	0.782±0.184	1.00±0.04	78
粘着力 c （MPa）	3.99±0.68 側圧 0-4MPa 時	3.30 注 側圧 0-4MPa 時	121
内部摩擦角 φ（°）	15.4±4.2 側圧 0-4MPa 時	24.3 注 側圧 0-4MPa 時	63



調査地点の相対位置（概略）

注）測定値が 1 つのためσの計算なし

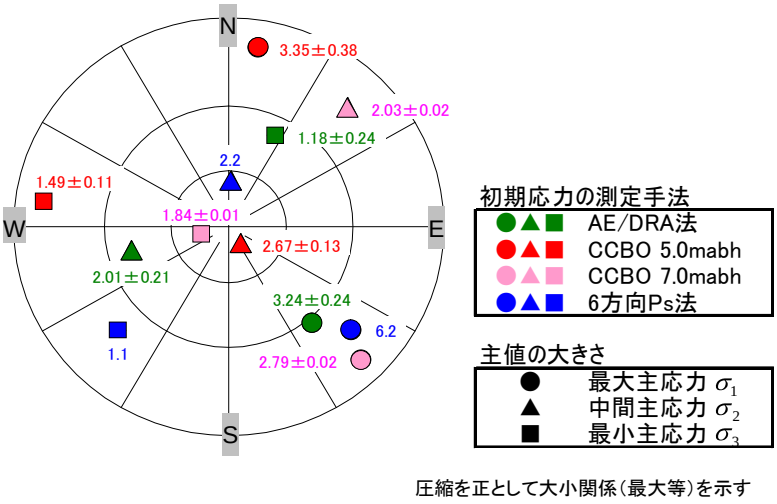
7.2　初期応力の評価結果の比較

初期応力の評価結果については、深度 100m 調査での測定法や測定地点による相違が認められたことから、深度 100m 調査と MIZ-1 号孔調査の結果比較の前に、これらについて検討する。

7.2.1　深度 100m 調査での初期応力評価結果の比較

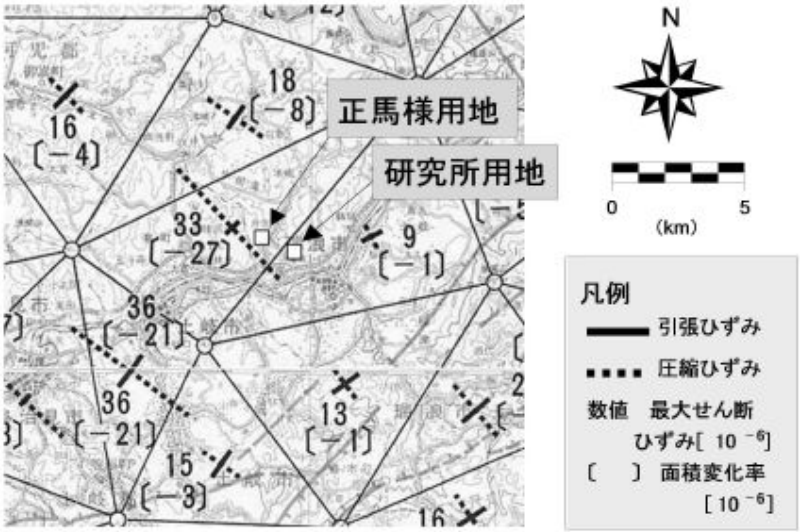
図 7.2.1 は、深度 100m 調査で実施した三種類の手法（AE/DRA 法、CCBO の 2 地点、6 方向 P_s 法）で各々評価した 4 例の初期応力をまとめて示したものである。この図は、主応力方向をステレオ投影したもので、各記号に添えた数字は主応力値（MPa）を表している。なお、CCBO は、図 5.2.4 で示したように 5 地点の初期応力が評価されていたが、ここに示すのは、大局的な初期応力を示した可能性が高い 2 地点（5.0mabh、7.0mabh）の評価結果である。

図 7.2.1 をみると、CCBO の 5.0mabh 地点を除き、どの手法から評価しても最大主応力 σ_1 の方向がほぼ一致することが示されている。一方、除かれた CCBO の 5.0mabh 地点の主応力をみると、ほぼ鉛直な中間主応力 σ_2 の値（▲の 2.67MPa）は土被り圧と考えるには値が大きく、また、水平 2 成分 σ_1、σ_3（●、■）の方向が他の何れの評価結果とも一致しない。図 7.2.2 は、本測定地点が属する東濃地域における、三角測量による地表のひずみ[28),29)]を示している。この図によると、本測定地点の地表付近では広域的に NW-SE 方向に圧縮されていることがわかる。これは CCBO の 5.0mabh 地点を除いた σ_1 の方向と調和する。広域的な地表のひずみ方向と地下の主応力方向は、どちらも広域的な地殻運動に起因する力を反映したものであり、急峻な地形や断層による局所的な擾乱が大きくなければ双方は概ね調和するものと考えられる。以上を踏まえると、CCBO の 5.0mabh は大局的な初期応力を評価していない可能性が高いと考えられる。よって、以降の検討は、CCBO の 5.0mabh 地点を除き、σ_1 の方向のほぼ一致した 3 例を対象とする。



ステレオネットは下半球・等角投影、数字は応力値（MPa）

図 7.2.1　各種の測定手法による初期応力の評価結果の比較



研究所用地の位置は広域的に NW-SE 方向に圧縮されていることが分かる
なお、正馬様用地は本調査の対象領域外であるが研究所用地と並ぶ調査研究サイトである

図 7.2.2　東濃地域における地表のひずみ [28),29)]

7.2.2　深度 100m 調査と MIZ-1 号孔調査での初期応力評価結果の比較

MIZ-1 号孔の調査では、土岐夾炭累層を対象とした初期応力測定を行っておらず、直接、双方の一致性を検討することはできない。そこで、土岐夾炭累層の基盤岩である土岐花崗岩で測定された結果との関係や、モデル解析 [8)]によって予測された初期応力との対応について検討した。

図 7.2.3 に、深度 100m 調査の初期応力評価結果と MIZ-1 号孔調査で土岐花崗岩を対象に実施した水圧破砕法による初期応力評価結果 [15)]を重ねて示す。また、図 7.2.4 に、双方の初期応力に基づく側圧係数（表 7.2.1）と我が国の側圧係数の深度分布 [19)]を重ねて示す。

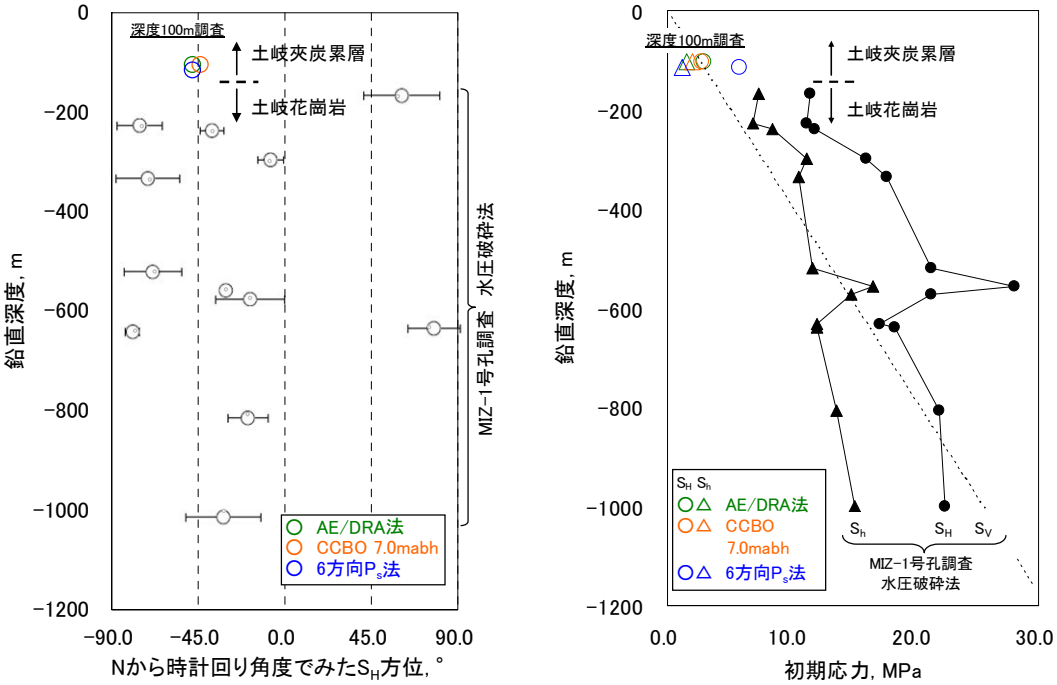


図 7.2.3　MIZ-1 号孔調査との初期応力評価結果の比較（原子力機構, 2009[15)]に加筆）

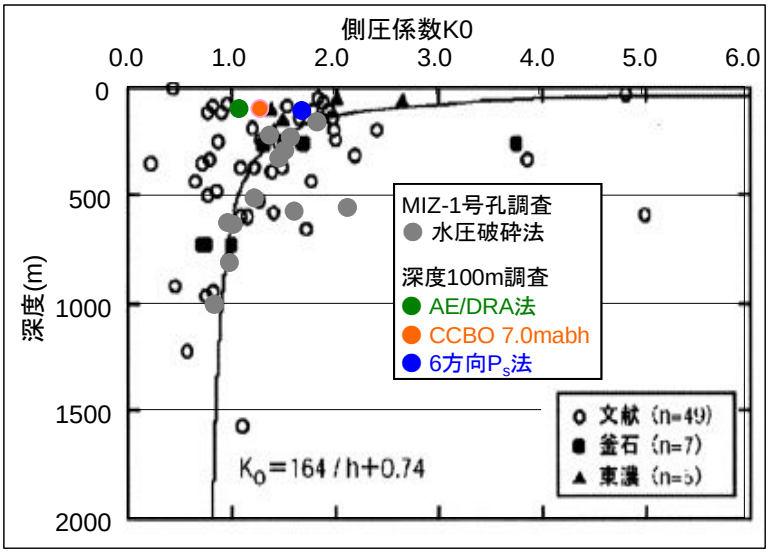


図 7.2.4　初期応力評価結果の側圧係数での比較（駒田ほか, 2003[19] に加筆）

表 7.2.1　深度 100m 初期応力の評価結果 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ から求めた側圧係数

測定手法	土被り圧 S_V（1.9MPa）に近い主値 $\tilde{S}_V$ の特定		側圧係数＝ $\dfrac{\tilde{S}_V \text{ 以外の主値平均}}{\tilde{S}_V}$	我が国の側圧係数の深度分布[19] と比較して
	鉛直方向に近い主値	推定 S_V 値に近い主値		
AE/DRA 法	特定できず	σ_2	$\sigma_2 = \tilde{S}_V$ で 1.1	若干小さい
CCBO 7.0mabh	σ_3	σ_3	$\sigma_3 = \tilde{S}_V$ で 1.3	若干小さい
6 方向 P_s 法	σ_2	σ_2	$\sigma_2 = \tilde{S}_V$ で 1.7	ほぼ平均

※土被り圧 S_V (MPa)＝鉛直深度(m)×岩の比重 1.9×重力加速度 9.8(m/s^2)÷1000 で計算
ただし比重は表 3.1.1 の自然密度（含水状態）の値を参考として決めた

図 7.2.3 の作成では、図のベースとなる MIZ-1 号孔調査結果が準 3 次元的な評価結果（鉛直方向に土被り圧に等しい主応力 S_V を仮定し、残り 2 つの主応力 S_H, S_h だけを評価したもの）であるため、深度 100m 調査の完全 3 次元の評価結果 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ をそのまま書き加えることはできない。そこで、本図の作成にあたり、次の方法により深度 100m 調査結果から S_H, S_h を推定し、それを書き加えるものとした。はじめに、深度 100m 調査で得られた $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ の方向を座標軸とする直交座標系を座標回転し、鉛直軸と二つの水平面内の軸を座標軸とする座標系（例えば E-N-V 系）に変換すると、水平面内の応力状態を知ることができる。次に、この水平面内の応力状態を用いて同面内の主応力を計算し、それが S_H, S_h であると考えた。ただし、この方法によると、土被り圧に相当すると考えた主応力の鉛直からの傾斜が大きくなる程、S_H, S_h の推定誤差は大きくなるが、それは無視した。この方法で評価した S_H, S_h を表 7.2.2 に示す。

その他にも、図 7.2.3 の作成では、MIZ-1 号孔と研究坑道の地上面に標高差が 6m あるため、比較の便宜上、同一標高が同一深度で図示されるよう、研究坑道の深度を MIZ-1 号孔の深度に換算した。

図 7.2.3 をみると、MIZ-1 号孔調査で評価した S_H 方位は概ね NW-SE 方向に集中しており、深度 100m 調査で評価した S_H 方位もまた同様で、土岐花崗岩（基盤岩）と土岐夾炭累層（被覆層）という双方の相違にもかかわらず S_H 方位は良く一致することが認められる。しかし、S_H, S_h の

表 7.2.2　深度 100m 初期応力の評価結果 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ から求めた S_H, S_h

測定手法	水平面内主応力（MPa） 括弧内は方位	
	S_H	S_h
AE/DRA 法	2.92（N48W）	1.55（N42E）
CCBO 7.0mabh	2.78（N44W）	2.01（N46E）
6 方向 P_s 法	5.86（N48W）	1.24（N42E）

値でみると、MIZ-1 号孔調査の深度 200～300m 付近で土岐花崗岩に認められた S_H, S_h の深度に対する変化を深度 100m にまで外挿したものよりも明らかに小さく、同一の広域的なひずみ場に置かれた基盤岩と被覆層で、相対的にヤング率が低い被覆層側で同一変形下での応力負担が小さいことを示したものと考えられる。また、6 方向 P_s 法の結果を除くと、主応力比（S_H / S_h）は 1 に近く、土被り圧（1.9MPa）とも近い。これは深度 100m での初期応力状態が比較的等方的な状態にあることを示している。

つぎに、図 7.2.4 をみると、6 方向 P_s 法によるものを除き、深度 100m での側圧係数は平均値より小さくて値は 1.0 に近く、前述した等方的な初期応力状態であることを示している。一方、除外した 6 方向 P_s 法による側圧係数は平均値に近く、また、MIZ-1 号孔調査で水圧破砕法により得られた側圧係数の傾向と調和している。しかし、用いた測定ツールが水圧破砕法用であることに共通点はあるものの、初期応力の評価方法は 6 章で述べたとおり全く異なり、両者が一致する必然性は考えにくい。

一方、原子力機構では、既得の初期応力測定結果を用いて、任意地点の初期応力を予測するための手法の開発と研究を行なってきた[8)]。その結果、第Ⅰ～Ⅳ層からなる地盤モデル（堆積岩層；生俵累層・明世累層を第Ⅰ層、土岐夾炭累層を第Ⅱ層と、土岐花崗岩を第Ⅲ・Ⅳ層とする）を用いて、研究所用地を含むローカルスケール（図 7.2.5）を範囲とする解析を行うことで、研究坑道位置の初期応力予測がある程度可能となっている[8)]。これによると、研究坑道位置の S_H, S_h の値と方位は、図 7.2.6 に示される曲線のとおり予測され、深度 100m では S_H と S_h が 3～4MPa 程度、S_H 方位は NNW-SSE と示されている。これに深度 100m 調査で評価した S_H、S_h の値と S_H の方位を重ねて比較すると、CCBO の 7.0mabh 地点の一致性が最良と認められる。なお、図 7.2.6 の予測曲線をみると、初期応力が土岐夾炭累層と土岐花崗岩の境界で急変し、その境界の存在に影響されて初期応力状態が局所的に大きく変化することを示している。これは、前述の図 7.2.3 と 7.2.4 に示された、土岐夾炭累層と土岐花崗岩の初期応力状態の相違を解析から裏付けたものと言える。

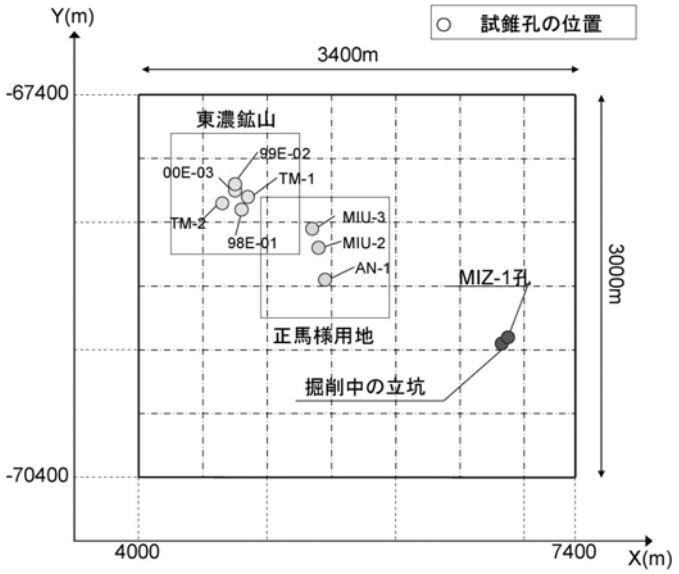


図 7.2.5　解析対象領域とボーリング孔および立坑（研究坑道）の位置（原子力機構, 2008[8)]）

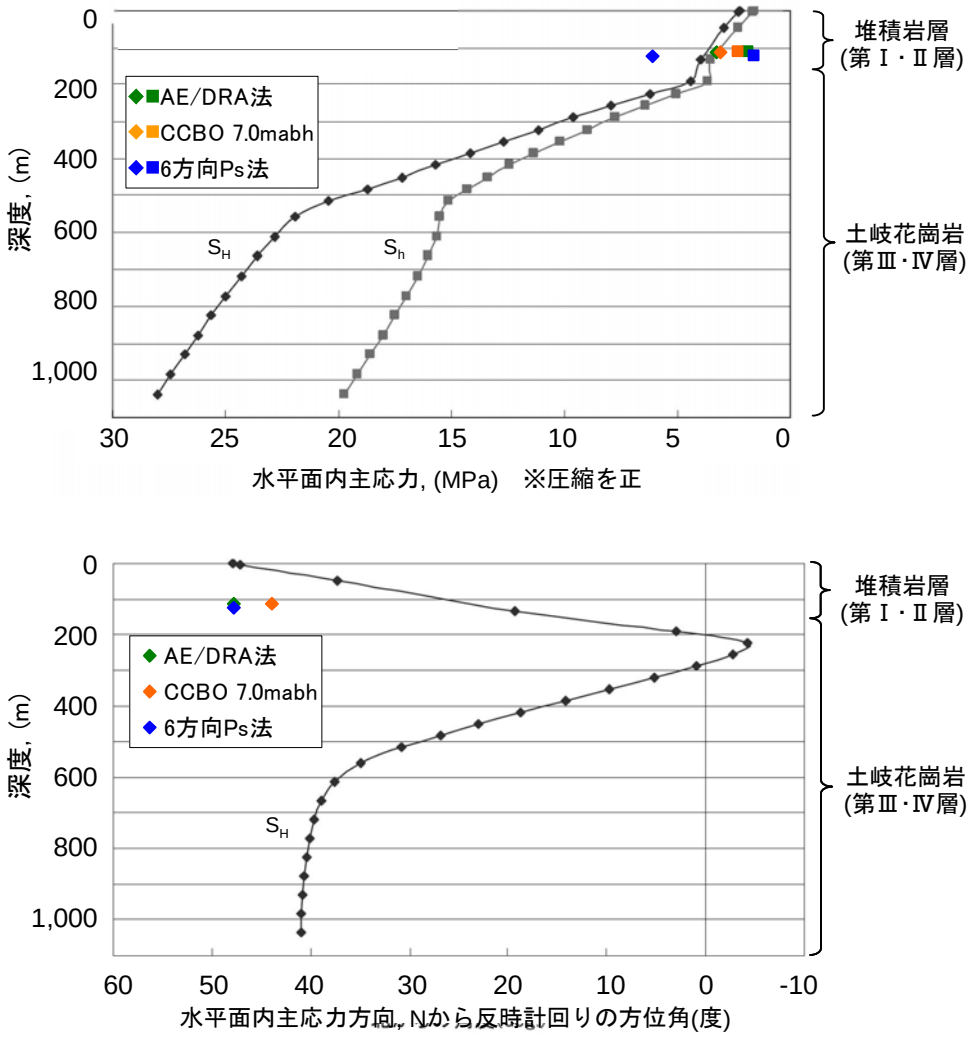


図 7.2.6　研究坑道位置の S_H , S_h 値と S_H の方位（原子力機構, 2008[8)]に加筆）

8. まとめ

本調査では、超深地層研究所計画における第 2 段階の目標や課題を達成するための調査研究の一環として、深度 100m における岩盤力学ボーリング調査を行った。ボーリング孔（06MI-04～06 号孔）掘削によって坑道周辺の地質環境（岩石の物理・力学的特性、岩盤初期応力状態）を把握し、これを第 1 段階の地質環境モデルの根拠とした MIZ-1 号孔調査の結果と比較し、第 1 段階調査の有効性を双方の一致性を踏まえて評価した。

① ボーリングコアを用いた物理・力学的特性の把握

- 深度 100m 土岐夾炭累層の物理・力学的特性は、見かけ比重（乾燥相対密度）＝1.51±0.11、一軸圧縮強さ＝10.7±2.0MPa、50%接線ヤング率＝4.97±1.16GPa、静ポアソン比＝0.42±0.05（±は 1σ）などである
- これら値のばらつきの程度は 20%～60%と比較的大きかった
- これら値と試験体採取位置の関係をみると、掘削損傷を議論することは無理と思われた

② ボーリングコアを用いた初期応力測定（AE/DRA 法）

- 初期応力が分析できない試験体が多く 06MI-06 号孔だけから初期応力が評価可能であった
- その理由として深度 100m の初期応力レベルが小さいためボーリングコアに記憶された微小破壊が少ないことが可能性として考えられた
- 評価した最大主応力 σ_1 は NW-SE 方向で、研究所用地周辺の広域ひずみ場と調和するが、主応力（$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$）はどれも水平面内から約 30 度傾斜しており、土被り圧に対応する主応力は不明である

③ 応力解放法を用いた原位置試験による初期応力測定（孔壁ひずみ法、CCBO）

- 水平孔（06MI-04 号孔）および鉛直孔（06MI-05 号孔）に適用した孔壁ひずみ法は、測定装置と岩盤の結合が満足に行なえず、有効な測定データを取得できなかった
- CCBO（円錐孔底ひずみ法）の適用は水平孔に限られるため水平孔（06MI-06 号孔）のみで測定を行って初期応力を評価した
- CCBO により評価した大局的な最大主応力 σ_1 の方向は NW-SE で概ね水平面内にあり、研究所用地周辺の広域ひずみ場と調和した

④ 水圧破砕法を用いた原位置試験による初期応力測定

- 本来の水圧破砕法を試みたが、測定原理に合致する縦方向の割れ目が原位置で生成しなかったため、測定原理に基づく評価は不可能であった
- 水圧破砕によって生成した割れ目は雁行状あるいはボーリング孔軸に斜交する平面状のものであり、鉛直応力の傾斜あるいは岩盤中の弱面等の開口が考えられた。
- 生成した割れ目が互いに平行でない 6 方向にあったことからその割れ目について P_s を測定し、6 方向の P_s を用いて 3 次元初期応力状態を解析すること（6 方向 P_s 法）を試みた
- 6 方向 P_s 法により評価した最大主応力 σ_1 の方向は NW-SE で概ね水平面内にあり、研究所用地周辺の広域ひずみ場と調和した

⑤ MIZ-1 号孔調査（第 1 段階調査）結果との比較

- 物理・力学的特性の値は MIZ-1 号孔調査で得られた土岐夾炭累層のものと大局的には同程度であると認められ、第 1 段階の調査は深度 100m の物理・力学的特性の把握に有効であったと言える
- 深度 100mを含めて土岐夾炭累層における初期応力状態は MIZ-1 号孔においては調査していないため、今回の初期応力測定の結果と直接比較することはできない

- 今回の各調査で評価した初期応力の最大主応力σ_1の方向はほぼ一致し、これは、MIZ-1 号孔調査において土岐夾炭累層（被覆層）の下位に位置する土岐花崗岩（基盤岩）で認められた方向とも類似し、広域ひずみ場とも調和していた
- しかしσ_1の値は土岐花崗岩に認められた傾向に外挿して予想されるよりも小さく、同一の広域ひずみ場におかれた基盤岩と被覆層で応力負担の程度が異なることを示したものと考えられた
- 研究所用地を含むローカルスケールを範囲とする、既往の広域ひずみ場における 3 次元岩盤応力解析によると、土岐夾炭累層と土岐花崗岩の境界で応力状態が局所的に大きく変化し（応力のデカップリング）、今回の調査結果と MIZ-1 号孔調査で得られた結果の相違を説明するものであった

参考文献

1) 核燃料サイクル開発機構: “超深地層研究所　地層科学研究基本計画”, JNC TN7410 2001-018 (2002)
2) 三枝博光ほか: “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)
3) 田中治雄: “土木技術者のための地質学入門”, 山海堂 (1964)
4) 社団法人地盤工学会: “岩の試験・調査方法の基準・解説書　平成 14 年度版”, 社団法人地盤工学会 (2003)
5) Brown, E.T.: “Rock Characterization Testing and Monitoring”, International Society for Rock Mechanics, Pergamon Press (1981)
6) 佐藤稔紀ほか: “文献調査による我が国の岩石の物理的特性に関するデータの収集（その２）”, JNC TN7400 99-011 (1999)
7) 山田文孝ほか: “北延 NATM 坑道における緩み領域の真空透気試験”, JNC TJ7176 98-002 (1998)
8) 瀬野康弘ほか: “超深地層研究所計画における岩盤力学に関する調査研究年度報告書(2006 年度)”, JAEA-Research 2008-084 (2008)
9) 小島隆, 松木浩二: “低応力レベルにおける岩石のカイザー効果に関する基礎的研究”, 資源と素材, Vol.110, pp.435-440 (1994)
10) 小島隆, 西山琢雄, 松木浩二: “DRA による三次元地圧計測法に関する基礎的研究”, 資源と素材, Vol.110, pp.143-148 (1994)
11) 山本清彦: “岩石試料による北上山地地域とその周辺の地殻応力の推定”, 平成 7,8 年度科学研究費補助金(基礎研究(C)(2))研究成果報告書 (1997)
12) Warapinski, N. R. and Teufel L. W.: “A viscoelastic constitutive model determining in-situ stress magnitudes from anelastic strain recovery of core”, SPE 15368 (1986)
13) 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. Symposium On Rock Mechanics, pp.523-532 (1980)
14) Yamamoto, K.: “The Rock Property of IN-Situ Stress Memory: Discussions on its Mechanism”, Int. W/S on rock stress, 8-th ISRM, Tokyo (1995)
15) 平野享ほか: “超深地層研究所計画（岩盤力学に関する調査研究）MIZ-1 号孔における岩盤力学調査”, JAEA-Research 2009-031 (2009)
16) 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)
17) 加藤春實, 佐藤稔紀, 前田信行, 松井裕哉: “水圧破砕法から推定される初期応力分布と弾性波速度異方性の関係”, 西日本岩盤工学シンポジウム (2000)
18) 石田毅: “岩盤は破壊音の科学”, 近未来社 (1999)
19) 駒田広也, 河西基: “連載講座 放射性廃棄物の処分 第 2 回 高レベル放射性廃棄物の地層処分に関連するわが国の地質環境”, 日本原子力学会誌, Vol.45, No.11, pp.55-66 (2003)
20) 中間茂雄, 佐藤稔紀, 加藤春實: “応力解放法による深部岩盤における初期応力測定装置の適用例”, 資源・素材 2004(盛岡), 企画発表・一般発表(A)(B)資料, pp.65-66 (2004)
21) 坂口清敏, 竹原孝, 尾原祐三, 中山智晴, 菅原勝彦: “円錐孔底ひずみ法の応力測定精度”, 資源と素材, Vol.108, pp.455-460 (1992)

22) 坂口清敏, 竹原孝, 尾原祐三, 中山智晴, 菅原勝彦: “コンパクトオーバーコアリング法による岩盤応力測定”, 資源と素材, Vol.110, pp.331-336 (1994)
23) Sugawara, K. and Obara, Y.: “Draft ISRM suggested method for in situ stress measurement using the compact conical-ended borehole overcoring(CCBO) technique”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 36, pp.307-322 (1999)
24) Zoback, M.D., Rummel, R., Jung, R. and Raleigh, C.B.: “Laboratory Hydraulic Fracturing Experiments in Intact and Pre - fractured Rock”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 14, pp.49-58 (1977)
25) Hayashi, K., Ito T. and Abe, H.: “In Situ Stress Determination by Hydraulic Fracturing - A Method Employing an Artificial Notch”, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 26, pp.197-202 (1989)
26) 伊藤高敏: “水圧破砕地殻応力評価法の問題点と亀裂開口圧の物理的意味”, 月刊地球, Vol.26, No.1 (2004)
27) Hayashi K., Sato A. and Ito T. : “In situ stress measurements by hydraulic fracturing for a rock mass with many plane of weakness” , Int. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 34, pp.45-48 (1997)
28) 地震予知総合研究振興会: “日本の地殻水平歪 1885-1983 年”, pp.63-64 (1990)
29) 佐藤稔紀, 前田信行, 松井裕哉: “1,000m 試錐孔における岩盤の初期応力測定-東濃地域における測定例-”, サイクル機構技報, No.5, pp.95-99 (1999)

付録（室内物理・力学試験における個々の試験体での結果）

1. 全試験体の物理試験結果（比重等測定）

No.	試験工種	採取位置	採取孔	地層名	分　類	単位体積重量	みかけ比重	みかけ比重	みかけ比重	含水比	有効間隙率
						γt	自然	湿潤	乾燥	We	ne
		mabh	孔号名			kN/m3	―	―	―	%	%
1	密度・見かけ	8.11	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩		2.030	2.032	1.621	25.2	41.1
2	密度・見かけ	8.29	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩		2.040	2.041	1.635	24.7	40.6
3	圧裂	8.36	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	19.60					
4	一軸	8.47	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	19.90					
5	圧裂	8.54	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	19.90					
6	密度・見かけ	8.76	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩		2.097	2.099	1.726	21.4	37.2
7	圧裂	8.83	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	20.40					
8	一軸	8.90	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	20.30					
9	三軸	9.05	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	20.10					
10	三軸	9.14	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	20.50					
11	三軸	9.23	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	20.20					
12	一軸	9.40	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	19.80					
13	三軸	9.50	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	20.00					
14	三軸	9.59	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	19.40					
15	三軸	9.68	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	19.60					
16	圧裂	17.26	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	19.50					
17	圧裂	17.31	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	18.70					
18	圧裂	17.35	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	18.40					
19	密度・見かけ	17.59	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩		1.935	1.935	1.477	30.9	45.8
20	一軸	17.68	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	18.50					
21	密度・見かけ	17.77	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩		1.858	1.859	1.362	36.4	49.7
22	一軸	17.95	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	18.60					
23	一軸	18.07	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	18.20					
24	密度・見かけ	18.16	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩		1.883	1.885	1.403	34.2	48.2
25	三軸	18.31	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	18.70					
26	三軸	18.40	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	18.60					
27	三軸	18.49	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	18.60					
28	三軸	18.70	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	18.40					
29	三軸	18.79	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	18.60					
30	三軸	18.88	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	18.10					
31	圧裂	3.33	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	18.10					
32	一軸	3.62	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	18.30					
33	密度・見かけ	3.71	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩		1.876	1.880	1.389	35.1	49.1
34	圧裂	3.78	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	18.20					
35	三軸	4.36	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	19.00					
36	三軸	4.75	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	18.90					
37	三軸	4.84	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	18.80					
38	三軸	4.93	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	19.00					
39	一軸	5.35	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	19.30					
40	密度・見かけ	5.44	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩		1.959	1.960	1.519	29.0	44.2
41	一軸	5.53	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	19.00					
42	圧裂	5.60	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	18.90					
43	密度・見かけ	5.80	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩		1.922	1.924	1.461	31.6	46.3
44	三軸	5.89	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	18.60					
45	三軸	10.04	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	20.10					
46	三軸	10.16	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	20.00					
47	三軸	10.25	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	22.10					
48	三軸	10.34	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	21.40					
49	三軸	10.45	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	19.60					
50	三軸	10.53	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	20.30					
51	一軸	10.62	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	20.20					
52	密度・見かけ	10.71	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩		2.034	2.035	1.625	25.1	41.0
53	圧裂	10.78	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	19.60					
54	一軸	11.04	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	19.60					
55	密度・見かけ	11.15	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩		1.998	1.999	1.574	26.9	42.5
56	一軸	11.22	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	19.70					
57	密度・見かけ	11.33	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩		1.966	1.967	1.524	29.0	44.4
58	圧裂	11.45	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	19.60					
59	圧裂	11.48	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	19.60					
60	三軸	13.13	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	18.80					
61	三軸	13.22	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	19.00					
62	三軸	14.05	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	19.50					
63	一軸	14.38	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	17.90					
64	圧裂	14.43	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	17.80					
65	圧裂	14.48	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	17.80					
66	圧裂	14.53	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	17.90					
67	密度・見かけ	14.71	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩		1.825	1.827	1.320	38.3	50.8
68	一軸	15.06	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	18.70					
69	密度・見かけ	15.13	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩		1.928	1.929	1.471	31.1	45.9
70	一軸	15.22	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	19.40					
71	密度・見かけ	15.31	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩		1.958	1.959	1.517	29.1	44.2
72	三軸	15.42	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	19.20					
73	三軸	15.94	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	19.10					
74	三軸	16.04	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	18.90					
75	三軸	16.15	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	18.30					
76	三軸	17.05	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	19.70					
77	三軸	17.14	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	19.90					
78	三軸	17.23	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	20.00					
79	三軸	17.32	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	20.00					
80	三軸	17.47	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	19.80					
81	三軸	17.56	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	19.60					
82	一軸	17.66	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	19.30					
83	密度・見かけ	17.73	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩		2.007	2.009	1.598	25.6	41.1

力学試験の試験体に対してはノギス法による
単位体積重量測定を行った

No.	試験工種	採取位置	採取孔	地層名	分　類	単位体積重量	みかけ比重	みかけ比重	みかけ比重	含水比	有効間隙率
						γt	自然	湿潤	乾燥	We	ne
		mabh	孔号名			kN/m3	―	―	―	%	%
84	圧裂	17.89	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	19.50					
85	一軸	17.95	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	19.10					
86	密度・見かけ	18.30	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩		1.940	1.941	1.492	30.0	44.9
87	密度・見かけ	18.49	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩		1.921	1.922	1.468	30.9	45.4
88	圧裂	18.56	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	18.60					
89	圧裂	18.59	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	18.30					
90	一軸	18.65	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	18.80					

2. 全試験体の物理試験結果（弾性波速度等測定）

No.	試験工種	採取位置	採取孔	地層名	分　類	P波速度	S波速度	動弾性係数	動せん断弾性係数	動ポアソン比
						Ｖｐ	Ｖｓ	Ｅｄ	Ｇｄ	vd
		mabh	孔号名			km/sec	km/sec	GPa	GPa	-
1	一軸	8.47	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.66	1.30	9.24	3.44	0.343
2	一軸	8.90	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.70	1.33	9.81	3.66	0.340
3	三軸	9.05	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.63	1.33	9.64	3.63	0.328
4	三軸	9.14	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.72	1.37	10.50	3.93	0.330
5	三軸	9.23	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.66	1.34	9.82	3.69	0.330
6	一軸	9.40	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.62	1.32	9.36	3.52	0.330
7	三軸	9.50	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.63	1.29	9.10	3.39	0.342
8	三軸	9.59	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.48	1.17	7.33	2.70	0.357
9	三軸	9.68	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.53	1.30	8.90	3.37	0.321
10	一軸	17.68	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.40	1.12	6.45	2.37	0.361
11	一軸	17.95	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.48	1.17	7.06	2.60	0.357
12	一軸	18.07	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.34	1.13	6.42	2.38	0.348
13	三軸	18.31	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.44	1.17	7.05	2.61	0.351
14	三軸	18.40	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.42	1.15	6.80	2.51	0.354
15	三軸	18.49	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.38	1.14	6.67	2.47	0.351
16	三軸	18.70	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.38	1.14	6.59	2.44	0.351
17	三軸	18.79	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.42	1.16	6.89	2.55	0.351
18	三軸	18.88	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.32	1.11	6.17	2.28	0.352
19	一軸	3.62	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.29	1.09	5.98	2.21	0.354
20	三軸	4.36	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.46	1.18	7.27	2.69	0.351
21	三軸	4.75	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.43	1.21	7.53	2.82	0.335
22	三軸	4.84	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.41	1.19	7.26	2.71	0.339
23	三軸	4.93	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.48	1.18	7.31	2.70	0.354
24	一軸	5.35	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.52	1.20	7.66	2.83	0.353
25	一軸	5.53	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.48	1.20	7.52	2.79	0.347
26	三軸	5.89	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.30	1.10	6.19	2.29	0.352
27	三軸	10.04	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	4.15	1.56	14.10	4.98	0.418
28	三軸	10.16	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.72	1.34	9.81	3.66	0.340
29	三軸	10.25	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	3.25	1.53	14.30	5.28	0.358
30	三軸	10.34	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	3.22	1.54	14.00	5.18	0.352
31	三軸	10.45	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.58	1.20	7.85	2.88	0.362
32	三軸	10.53	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.75	1.26	8.99	3.29	0.367
33	一軸	10.62	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.69	1.33	9.77	3.65	0.338
34	一軸	11.04	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.55	1.22	8.03	2.97	0.352
35	一軸	11.22	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.56	1.20	7.88	2.90	0.359
36	三軸	13.13	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.39	1.02	5.53	1.99	0.389
37	三軸	13.22	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.46	1.01	5.51	1.97	0.399
38	三軸	14.05	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.59	1.26	8.47	3.15	0.345
39	一軸	14.38	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.28	1.07	5.68	2.09	0.359
40	一軸	15.06	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.45	1.19	7.27	2.70	0.346
41	一軸	15.22	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.57	1.20	7.76	2.85	0.361
42	三軸	15.42	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.53	1.13	6.88	2.50	0.375
43	三軸	15.94	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.46	1.16	7.11	2.62	0.357
44	三軸	16.04	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.49	0.99	5.31	1.89	0.406
45	三軸	16.15	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.33	1.00	5.14	1.85	0.388
46	三軸	17.05	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.59	1.19	7.76	2.84	0.366
47	三軸	17.14	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.62	1.20	8.01	2.93	0.367
48	三軸	17.23	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.65	1.24	8.54	3.14	0.360
49	三軸	17.32	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.59	1.22	8.22	3.03	0.357
50	三軸	17.47	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.58	1.23	8.25	3.05	0.353
51	三軸	17.56	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.55	1.26	8.51	3.18	0.338
52	一軸	17.66	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.46	1.24	8.06	3.03	0.330
53	一軸	17.95	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.45	1.24	7.97	3.00	0.328
54	一軸	18.65	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2.44	1.19	7.31	2.72	0.344

3. 全試験体の力学試験結果（一軸圧縮試験）

No.	試験工種	採取位置	採取孔	地層名	分　類	一軸圧縮強さ	接線静弾性係数	静ポアソン比		
						q_u	E_{t50}	ν_u		
		mabh	孔号名			MPa	GPa	-		
1	一軸	8.47	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	11.50	6.63	0.412		
2	一軸	8.90	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	12.50	6.84	0.423		
3	一軸	9.40	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	11.10	6.15	0.412		
4	一軸	17.68	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	11.00	4.03	0.455		
5	一軸	17.95	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	10.50	4.68	0.448		
6	一軸	18.07	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	7.31	3.34	0.470		
7	一軸	3.62	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	5.43	2.83	0.464		
8	一軸	5.35	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	12.50	5.47	0.469		
9	一軸	5.53	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	11.00	4.72	0.466		
10	一軸	10.62	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	13.70	6.45	0.409		
11	一軸	11.04	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	8.99	5.38	0.360		
12	一軸	11.22	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	10.60	5.03	0.430		
13	一軸	14.38	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	10.30	3.51	0.451		
14	一軸	15.06	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	11.60	4.80	0.447		
15	一軸	15.22	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	13.20	5.39	0.370		
16	一軸	17.66	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	11.30	4.01	0.361		
17	一軸	17.95	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	9.49	4.38	0.310		
18	一軸	18.65	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	11.40	5.81	0.375		

4. 全試験体の力学試験結果（圧裂引張試験）

No.	試験工種	採取位置	採取孔	地層名	分　類	圧裂引張強さ				
						σ_t				
		mabh	孔号名			MPa				
1	圧裂	8.36	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	0.733				
2	圧裂	8.54	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	1.050				
3	圧裂	8.83	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	1.080				
4	圧裂	17.26	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	0.775				
5	圧裂	17.31	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	0.789				
6	圧裂	17.35	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	0.721				
7	圧裂	3.33	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	0.438				
8	圧裂	3.78	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	0.502				
9	圧裂	5.60	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	0.974				
10	圧裂	10.78	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	0.769				
11	圧裂	11.45	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	0.844				
12	圧裂	11.48	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	0.809				
13	圧裂	14.43	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	1.010				
14	圧裂	14.48	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	0.659				
15	圧裂	14.53	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	0.709				
16	圧裂	17.89	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	0.927				
17	圧裂	18.56	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	0.786				
18	圧裂	18.59	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	0.502				

5. 全試験体の力学試験結果（三軸圧縮試験）

堆積岩に対する三軸(CU) 試験										
No.	試験工種	掘削深度	鉛直深度	岩　種	分　類	圧密圧力	CU圧縮強さ	接線静弾性係数	静ポアソン比	
							(σa-σr)max	Et,50	νt	
		m	m			MPa	MPa	GPa	-	
1	三軸(CU)	9.05	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	1	12.6	5.15	0.145	
2	三軸(CU)	9.14	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	1	12.5	5.90	0.201	
3	三軸(CU)	9.23	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2	12.8	5.60	0.184	
4	三軸(CU)	9.50	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2	14.1	4.62	0.221	
5	三軸(CU)	9.59	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	4	14.8	4.83	0.219	
6	三軸(CU)	9.68	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	4	14.4	5.41	0.356	
7	三軸(CU)	18.31	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	1	9.7	3.20	0.171	
8	三軸(CU)	18.40	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	1	10.2	4.28	0.182	
9	三軸(CU)	18.49	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2	11.2	4.89	0.399	
10	三軸(CU)	18.70	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2	11.4	4.82	0.290	
11	三軸(CU)	18.79	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	4	12.6	6.10	0.343	
12	三軸(CU)	18.88	06MI04	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	4	13.7	5.28	0.414	
13	三軸(CU)	4.36	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	1	10.3	3.98	0.452	
14	三軸(CU)	4.75	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	1	11.3	4.32	0.409	
15	三軸(CU)	4.84	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2	11.7	3.84	0.343	
16	三軸(CU)	4.93	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2	11.4	4.43	0.358	
17	三軸(CU)	5.89	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	4	12.7	3.67	0.417	
18	三軸(CU)	15.94	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	4	12.4	4.79	0.390	
19	三軸(CU)	10.04	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	1	11.4	6.09	0.459	
20	三軸(CU)	10.16	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	1	12.4	4.74	0.327	
21	三軸(CU)	10.25	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2	14.4	10.00	0.349	
22	三軸(CU)	10.34	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2	16.7	7.60	0.282	
23	三軸(CU)	10.45	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	4	13.0	6.10	0.477	
24	三軸(CU)	10.53	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	4	12.7	6.26	0.444	
25	三軸(CU)	13.13	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	1	8.7	3.27	0.331	
26	三軸(CU)	13.22	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	1	11.1	5.08	0.450	
27	三軸(CU)	14.05	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2	9.0	4.39	0.371	
28	三軸(CU)	15.42	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2	12.0	5.17	0.441	
29	三軸(CU)	16.04	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	4	11.6	5.43	0.455	
30	三軸(CU)	16.15	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	4	10.3	6.04	0.402	
31	三軸(CU)	17.05	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	1	11.3	4.68	0.248	
32	三軸(CU)	17.14	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	1	12.0	5.07	0.163	
33	三軸(CU)	17.23	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2	12.8	5.26	0.131	
34	三軸(CU)	17.32	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	2	12.2	6.05	0.371	
35	三軸(CU)	17.47	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	4	12.8	4.57	0.191	
36	三軸(CU)	17.56	06MI06	瑞浪層群土岐夾炭累層	堆積岩	4	12.7	5.00	0.136	

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^2
体積	立法メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度[a]，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率[b]	（数字の） 1	1
比透磁率[b]	（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[b]	rad	1 [b]	m/m
立体角	ステラジアン[b]	sr[c]	1 [b]	m^2/m^2
周波数	ヘルツ[d]	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m\ kg\ s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[e]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
放射性核種の放射能[f]	ベクレル[d]	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
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[g]	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		$s^{-1}\ mol$

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

表５．SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	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	1h =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	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	$1L=1l=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3$ 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	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

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	$1\ bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	$1\ Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m$
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	$1\ b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$
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	$1\ erg=10^{-7}\ J$
ダイン	dyn	$1\ dyn=10^{-5}N$
ポアズ	P	$1\ P=1\ dyn\ s\ cm^{-2}=0.1Pa\ s$
ストークス	St	$1\ St\ =1cm^2\ s^{-1}=10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	$1\ sb\ =1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$
フォト	ph	$1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$
ガル	Gal	$1\ Gal\ =1cm\ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	$1\ Mx = 1G\ cm^2=10^{-8}Wb$
ガウス	G	$1\ G\ =1Mx\ cm^{-2}\ =10^{-4}T$
エルステッド[c]	Oe	$1\ Oe \triangleq (10^3/4\pi)A\ m^{-1}$

(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	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$
ラド	rad	$1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$
レム	rem	$1\ rem=1\ cSv=10^{-2}Sv$
ガンマ	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	$1\ \mu =1\mu m=10^{-6}m$

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています