**JAEA-Research** 2010-005



# 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(2008 年度)

Mizunami Underground Research Laboratory Project -Rock Mechanical Investigations Annual Report for Fiscal Year 2008

> 平野 享 瀬野 康弘 松井 裕哉 Toru HIRANO, Yasuhiro SENO and Hiroya MATSUI

> > 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 日本原子力研究開発機構

June 2010

Japan Atomic Energy Agency

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

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

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2010

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(2008年度)

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<sup>\*\*</sup>、瀬野 康弘<sup>\*1</sup>、松井 裕哉

#### (2010年2月3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で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や課題に対する理解度や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の構築等を行なうものとしている。その中で、岩盤力学に関する調査研究では、概ね深度100m間隔で岩盤力学ボーリング調査を実施し、適宜、坑内での変位・ひずみ計測などの調査を実施し、これらを通じて上記目標や課題を達成するものとした。

本報告は、以上に述べた調査研究の一環として、2008年度に実施した岩盤力学に関する次に示 す項目の調査研究成果をとりまとめたものである。

- ① 岩盤ひずみ計測及び岩盤力学ボーリング調査(深度 200m)
- ② 第2段階の調査研究結果に基づくモデル化・解析
- ③結晶質岩における長期岩盤挙動評価のための研究
- ④ 大学・他研究機関との共同研究

| 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

<sup>\*1</sup> 東急建設株式会社(元 技術開発協力員)

#### JAEA-Research 2010-005

# Mizunami Underground Research Laboratory Project -Rock Mechanical Investigations Annual Report for Fiscal Year 2008

Toru HIRANO<sup>\*\*</sup>, Yasuhiro SENO<sup>\*1</sup> and Hiroya MATSUI

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

(Received February 3, 2010)

Japan Atomic Energy Agency (JAEA) at Tono Geoscience Center (TGC) is carrying out a geoscientific research project in the crystalline rock environment at the Mizunami Underground Research Laboratory (MIU), in order to establish the scientific and technological basis for geological disposal of HLW. The geoscientific research at the MIU is being carried out in three overlapping phases spanning a period of 20 years; the Surface-based Investigation Phase (Phase I; FY1996 - 2004), the Construction Phase (Phase II; FY2001- in progress) and the Operation Phase (Phase III; in future).

The project is currently in Phase II. The Phase II goals are to construct models of the geological environment from all investigation results obtained during the construction. These models describe the geological environment at the construction points that were affected by excavation of the shafts and the galleries. To achieve these goals, we are examing the relationship between scope of investigation and accuracy of data, an assessment of investigation methods, validation of the Phase I geological environment models and construction of block scale geological environment models. As part of these studies, rock mechanical investigations involving both laboratory testing and *in situ* stress measurements in diamond drilled boreholes every 100m along the shaft.

This report presents the following FY2008 activities undertaken to achieve the above goals.

- 1) Borehole Investigations at the -200m.
- 2) Validation of the Phase I Rock Mechanical Environment Model.
- 3) A Study of Crystalline Rock for Evaluating of Long-Term Mechanical Behavior
- 4) Research Collaboration

Keywords: Rock Mechanical Investigations, Crystalline Rock, MIU, TGC, Phase II

X Collaborating Engineer

<sup>\*1</sup> Tokyu Construction(Former Collaborating Engineer)

# 目 次

1. はじめに	<u>-</u>	1
1.1 調査	£研究の目的	1
1.2 これ	lまでの経緯及び結果概要	<b>2</b>
1.3 200	8年度の実施概要	4
1.3.1	調査試験	<b>5</b>
1.3.2	モデル化・解析	<b>5</b>
1.3.3	調查技術開発	<b>5</b>
<ol> <li>調査試験</li> </ol>	È	6
2.1 岩盤	なびずみ計測	6
2.1.1	目的	6
2.1.2	調查內容	6
2.1.3	調査結果	7
2.1.4	考察	8
2.1.5	今後の課題1	0
2.2 岩盤	<u>と</u> 力学ボーリング調査1	1
2.2.1	目的1	1
2.2.2	調查內容1	1
2.2.3	調査結果1	2
2.2.4	考察1	<b>5</b>
2.2.5	今後の課題1	6
<ol> <li>モデル化</li> </ol>	☆・解析1	8
3.1 目的	j1	.8
3.2 解析	行内容1	8
3.3 解析	f結果1	8
3.4 考察	ξ2	22
3.5 今後	6の課題2	23
4. 調査技術	5開発2	24
4.1 長期	引岩盤挙動評価のための現象論的研究2	24
4.1.1	目的2	24
4.1.2	研究内容	24
4.1.3	研究結果	26
4.1.4	考察	28
4.1.5	今後の課題	29
4.2 長期	月岩盤挙動評価のための理論的研究	30
4.2.1	目的音	30
4.2.2	研究内容 3	30
4.2.3	研究結果 3	32
4.2.4	考察	33
4.2.5	今後の課題	33
5. 大学・他	1研究機関との研究協力	35
6. まとめ		0
参考文献、公	☆表成果一覧4	1

# CONTENTS

1.	Intr	oduction	1
1.	1	Aims	1
1.	2	Present Status of Rock Mechanical Study	2
1.	3	Views of Activities in FY2008	4
	1.3.1	1 Research and Investigation	5
	1.3.2	2 Modelling	5
	1.3.3	3 Development of Investigation Technique	5
2.	Rese	earch and Investigation	6
2.	1	In Situ Measurement of Rock Strain during Shaft Excavation	6
	2.1.1	1 Purpose	6
	2.1.2	2 Investigation	6
	2.1.3	3 Results	7
	2.1.4	4 Discussion	8
	2.1.5	5 Subjects	10
2.	2	Rock Mechanical Investigation	.11
	2.2.1	1 Purpose	.11
	2.2.2	2 Investigation	.11
	2.2.3	3 Results	12
	2.2.4	4 Discussion	15
	2.2.5	5 Subjects	16
3.	Mod	lelling	18
3.	1	Purpose	18
3.	2	Analysis	18
3.	3	Results	18
3.	4	Discussion	22
3.	5	Subjects	23
4.	Dev	elopment of Investigation Tequnique	24
4.	1	$Phenomenological\ Study\ on\ Long-term Mechanical\ Behavior\ in\ Surrounding\ Rock$	24
	4.1.1	1 Purpose	24
	4.1.2	2 Method of Study	24
	4.1.3	3 Results	26
	4.1.4	4 Discussion	28
	4.1.8	5 Subjects	29
4.	2	Theoretical Study on Long-termMechanical Behavior in Surrounding Rock	30
	4.2.1	1 Purpose	30
	4.2.2	2 Method of Study	30
	4.2.3	3 Results	32
	4.2.4	4 Discussion	33
	4.2.8	5 Subjects	33
5.	Coll	aboration Study	35
6.	Con	clusions	40
Refe	erenc	Ce	41

# 図目次

図 1.1 研究所用地(原子力機構, 2007 に加筆)	1
図 1.2 第1段階の岩盤力学概念モデル	2
図 1.3 MIZ-1 号孔調査での初期応力状態の評価結果との比較	4
図 1.4 研究坑道の配置とボーリング孔掘削場所及びボーリング孔名	5
図 2.1.1 岩盤ひずみ計測のレイアウト	7
図 2.1.2 プレグラウトによる岩盤ひずみの変化	8
図 2.1.3 切羽進行にともなう岩盤の先行変位とひずみの程度と変化	9
図 2.2.1 岩盤力学ボーリング調査孔の掘削方位	11
図 2.2.2 深度 200m 岩盤力学ボーリング調査での物理・力学特性	13
図 2.2.3 08MI-14・15 号孔における原位置初期応力測定(CCBO)の結果	15
図 2.2.4 深度 200m 岩盤力学ボーリング調査での初期応力場(圧縮が正)	16
図 3.3.1 岩盤力学ボーリング調査と第1段階の調査で把握した初期応力	19
図 3.3.2 掘削ずり(深度 200m~300m)と岩盤力学ボーリング調査・第1段階調査の比較	ŧ 20
図 3.3.3-(1) 壁面観察による割れ目スケッチとその走向・傾斜のステレオ図	21
図 3.3.3-(2) 第1段階の調査から評価した岩盤割れ目の状況	22
図 4.1.1-(1) 空圧式一軸圧縮クリープ試験装置による精密試験の概略図	25
図 4.1.1-(2) 一般化応力緩和試験での荷重と応力の変化条件	25
図 4.1.2-(1) 長期・短期クリープ試験の結果の一致	26
図 4.1.2-(2) 一般化応力緩和試験の結果(左)と試験終了後に行った一軸圧縮試験結果(右)	27
図 4.2.1-(1) 閉鎖溶液系実験で用いた装置の模式図と試験体(枠内)	31
図 4.2.1-(2) 開放溶液系実験で用いた装置の模式図と試験体(枠内)	31
図 4.2.2-(1) 閉鎖溶液系実験で得られた石英溶解速度と溶解速度式	
(左)応力 200MPa (右)pH9、共に温度 20℃	32
図 4.2.2-(2) 開放溶液系実験で得られた石英溶解速度と溶解速度式	
(左)応力 9.86MPa (右)13.7MPa、共に温度 35 度	32
図 4.2.2-(3) 圧力溶解した試料の断面と Island-Channel モデル	33
図 5.1.1 AE/DRA 試験の実施状況(産業技術総合研究所)	35
図 5.1.2 ソース波形の採取位置(上)とボーリング孔内への振動センサー挿入状況(下)	. 36
図 5.1.3 掘削振動計測における観測波形の例(縦軸の単位:観測孔 $\mu$ m/s <sup>2</sup> ,他 mm/s <sup>2</sup> )	36
図 5.2.1 主立坑パイロットボーリング(06MI-02 号孔)	
孔底の高精度ひずみ計の記録(全データ)	37
図 5.2.2 潮汐力の影響を受けた岩盤ひずみの状況	38
図 5.2.3 ひずみ計と DH-2 号孔の位置関係(原子力機構, 2007 に加筆)	39

# 表目次

表 1.1	深度 100m と MIZ-1 号孔の物理・力学的特性の比較	3
表 1.2	岩盤力学における調査研究の実施概要(2008 年度)	4
表 2.1.1	1 岩盤ひずみ計測ボーリング諸元と計測器の概要	6
表 2.1.2	2 岩盤ひずみ計測の値と弾性解の比較	10
表 2.2.1	1 岩盤力学ボーリング調査 ボーリング掘削の諸元と試験項目の概要	12
表 2.2.2	2 深度 200m 岩盤力学ボーリング調査 物理特性の概要	12
表 2.2.3	3 深度 200m 岩盤力学ボーリング調査 力学特性の概要	13
表 2.2.4	4-(1) 08MI-14 号孔における原位置初期応力測定(CCBO)の結果	14
表 2.2.4	4-(2) 08MI-15 号孔における原位置初期応力測定(CCBO)の結果	15
表 3.3.1	1 岩盤力学ボーリング調査と第1段階の調査で把握した物理・力学特性	18
表 4.1.1	l-(1) コンプライアンス可変型構成方程式のパラメータ評価	28
表 4.1.1	1-(2) 粘弾性(時間依存性)を考慮した岩盤区分のイメージ	28
表 5.1.1	1 AE/DRA 試験数量	35

## 1. はじめに

#### 1.1 調査研究の目的

超深地層研究所計画(以下、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)が岐阜県瑞浪市で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<sup>1)</sup>。1996年度の第1段階の開始に続 いて、2001年度からは研究坑道(図1.1)の掘削を伴う研究段階(第2段階)を実施している。



図 1.1 研究所用地(原子力機構, 2007<sup>2)</sup>に加筆)

第2段階においては、「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や課題に対する理解度や精度との関係を実例で把握し、調査の有効性の評 価、第1段階の地質環境モデル<sup>2</sup>)(サイトスケール)の妥当性評価とブロックスケールのモデル構 築等を行なうとしている。深度 200m における岩盤力学調査はその一環として実施した調査であ り、研究坑道から掘削したボーリング孔を用いて、①立坑掘削前の岩盤内に変位計とひずみ計を 埋設し、立坑掘削の切羽到達に先行して発生する岩盤内のひずみ・変位の程度の把握(2章2.1)、 ②研究坑道位置の地質環境を把握するための、岩石の物理・力学的特性、岩盤初期応力の測定(2 章2.2)を行なうものとした。また、ここで把握された情報の①は、立坑設計パラメータの妥当性 を検証するとともに、第3段階で実施する掘削影響調査計画の立案における基礎的情報となり、 ②は第1段階モデルの根拠とした、地表からの調査の妥当性を検証するデータとなる(3章)。

一方、前述の成果目標の達成にむけて実施する調査は、技術的に確立した手法によることを基本するが、調査手法のさらなる高精度化に向けた開発も段階的に進めるものとしている。なぜなら、第2段階の調査では研究坑道周辺のより小さいスケールを対象とすることで、調査密度や精

度等の向上が求められるためである。そこで、高精度化に向けた開発の一環として、岩盤力学分野においては、力学的な掘削影響領域を効率よく多数調査できることを目標とする調査手法の開発、岩盤ひずみを潮汐変動オーダーまで高精度にモニタリングする手法の適用性確認が必要と考え、当該手法の基礎的研究を行っている機関と共同研究を実施した(5章)。

その他に、第2段階の成果目標には「第3段階の調査・研究計画の策定」がある。研究所で対象となる岩盤の土岐花崗岩は、クリープや応力緩和で知られる非線形粘弾性挙動(時間依存性の力学的挙動)が一般における工学的時間スケール(数年から数十年程度)では比較的小さいが、長期スケール(数百年から数千年以上)でも同じと言える根拠はなく、深部地質環境の理解を深めるうえで、その評価手法の開発が課題である。しかし、数百年から数千年以上に及ぶ時間スケールの実験は不可能なため、数年から10年程度で行われる試験結果を踏まえた長期評価手法を開発し、その開発した手法を実地検証(研究坑道を用いて検証)することが代替案として考えられる。そこで、原子力機構ではこれに必要な基礎的理論のとりまとめ、試験法の開発を1994年度から継続して行ってきた。2004年度からは、冒頭に示した「第3段階の調査・研究計画の策定」に、開発した評価手法の検証を盛り込めるよう、計画の策定に必要な情報のとりまとめを主眼に置いた長期岩盤挙動評価に関する研究(委託研究)<sup>34</sup>を継続している(4章)。

#### 1.2 これまでの経緯及び結果概要

岩盤力学の分野では、第1段階の調査として 2004 年度に MIZ-1 号孔(図 1.1)を用いた岩盤 力学調査<sup>5)</sup>を実施し、地下 1000m 深度に至る範囲の地質環境のうち力学的特性(主に岩石コアの 物理・力学的特性、岩盤初期応力)を把握した。また、その成果を踏まえ、第1段階調査から作 成された地質構造モデル<sup>2)</sup>をベースとする第1段階の岩盤力学概念モデル<sup>5)</sup>を作成した(図 1.2)。



図 1.2 第1段階の岩盤力学概念モデル<sup>5)</sup>

続いて、第2段階の調査として、土岐夾炭累層を対象とした岩盤力学ボーリング調査<sup>6)</sup>を 2006 年度に 100m 予備ステージで実施し、研究坑道位置における地質環境(項目は前述の MIZ-1 号孔 調査と同じ)を把握した。その結果、物理・力学的特性(表 1.1)は第1段階の MIZ-1 号孔調査 より得られた結果と整合的であった.また、初期応力(図 1.3)は MIZ-1 号孔で測定対象とした 花崗岩部に比較して水平面内最大主応力 $S_H$ と水平面内最小主応力 $S_h$ (ただし圧縮を正)の差が 少ない等方的な値であり、 $S_H$ 方位は地表の広域的なひずみ場の方向と同様 NW-SE 方向であると いう結果が得られた。さらに、これら調査結果は、堆積岩と花崗岩の境界の影響による応力状態 の変化を示した三次元応力場解析の予測<sup>7</sup>と整合することを確認した。

調査地点	①深度 100m (平均値±1 <i>σ</i> )	②MIZ-1 (平均値±1σ)	1/2 %
岩相	瑞浪層群 二	上岐夾炭累層	
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(%)	$29.7 \pm 4.5$	30.5±4.9	97
有効間隙率(%)	$44.6 \pm 3.6$	44.3±3.8	101
P 波弾性波速度(km/s)	$2.57 \pm 0.29$	2.39±0.11	108
S 波弾性波速度(km/s)	$1.22 \pm 0.12$	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	$0.42 \pm 0.05$	0.290±0.049	145
圧裂引張強さ(MPa)	$0.782 \pm 0.184$	1.00±0.04	78
粘着力 c (MPa)	3.99±0.68 側圧 0-4MPa 時	3.30 <sup>注</sup> 側圧 0-4MPa 時	121
<b>内</b> 部摩擦角 <b>印</b> (°)	15.4±4.2 側圧 0-4MPa 時	24.3 <sup>注</sup> 側圧 0-4MPa 時	63
深度100m 予備ステージ 地表 (06MI-04) 06MI-06 (06MI-06) 06MI-05	約200m MIZ-1 Z坑	EL. -207m -201m MIZ-1号孔 調査における 土岐夾炭累層 採取区間 -119m -103m	
調査地	点の相対位置(概略)		

表 1.1 深度 100m と MIZ-1 号孔の物理・力学的特性の比較

注) 測定値が1つのためσの計算なし



※凡例について ・AE/DRA: Acoustic Emission / Deformation Rate Analysis
 ・CCBO: 円錐孔底ひずみ法 Compact Conical-ended Borehole Over-coring
 ・6 方向 Ps 法: 水圧破砕で生成した互いに平行でない 6 方向割れ目の再開口圧 Ps による 3 次元初期応力解析法<sup>6)</sup>
 図 1.3 MIZ-1 号孔調査での初期応力状態の評価結果との比較

# 1.3 2008年度の実施概要

2008年度は、表 1.2 に示す①②の調査試験(共に内部実施)、③のモデル化・解析(内部実施)、 ならびに、④~⑦の調査技術開発(委託研究、共同研究で各 2 項目)に関する調査研究を実施し た。なお、実施概要に関係するボーリング孔の掘削場所と孔名を、2008年度末時点での研究坑道 の配置図に重ねて図 1.4 に示す。

式 H.2 石皿ガ H Cloth & 岡正町 2000 人 2000 十反/					
作業分類	作業項目	実施場所等(図 1.4 参照)			
調査試験	①岩盤ひずみ計測 ②岩盤カ学ボーリング調査	換気立坑側、深度 200m ボーリング横坑			
モデル化・解析	<ul><li>③岩盤力学調査結果の MIZ-1 号</li><li>孔と立坑深度 100、200m 比較</li></ul>	既得情報を踏まえた机上検討等			
調査技術開発	<ul> <li>■岩盤長期挙動評価手法開発</li> <li>④現象論的研究</li> <li>⑤理論的研究</li> <li>■調査手法の高精度化</li> <li>⑥掘削影響領域調査技術開発</li> <li>⑦高精度岩盤ひずみ計測開発</li> </ul>	<ul> <li>④東京大学に委託、室内試験</li> <li>⑤名古屋大学に委託、室内試験</li> <li>⑥産業技術総合研究所と共同研究</li> <li>深度 200m ボーリング横坑(換気立坑側)</li> <li>⑦名古屋大学と共同研究</li> <li>主立坑・換気立坑パイロットボーリング</li> </ul>			

表 1.2 岩盤力学における調査研究の実施概要(2008 年度)

#### 1.3.1 調査試験

2008 年度の調査試験では、2007 年度に設置した岩盤ひずみ計による計測を継続し、プレグラウトや換気立坑の掘削が岩盤に及ぼす力学的影響の程度を把握した(2章2.1)。また、換気立坑200m ボーリング横坑よりボーリング孔(08MI-14~16号孔)を掘削し、土岐花崗岩を対象とするボーリングコアを用いた室内物理・力学試験及び室内初期応力測定を行うとともに、原位置初期応力測定を実施した(2章2.2)。

#### 1.3.2 モデル化・解析

2008年度のモデル化・解析では、岩盤初期応力や岩石の物理・力学的特性について、第1段階で構築した岩盤力学概念モデルと、第2段階の調査として100m予備ステージの06MI-04~06号 孔及び換気立坑200mボーリング横坑の08MI-14~16号孔で、それぞれ調査した結果等を比較・ 検討した(3章)。

#### 1.3.3 調查技術開発

2008 年度の調査技術開発では、2004 年度から継続中の、岩盤の長期挙動評価手法の確立に関 する研究を行い、試験結果を非線形粘弾性モデルで解釈する手法をとりまとめ、その手法を坑道 掘削に適用する際の方針を提案した(現象論的研究:4章4.1)。また、非線形粘弾性のメカニズ ムである岩石の力学・化学連成現象を室内実験で確認し、微視・巨視解析に必要な理論を構築した (理論的研究:4章4.2)。

一方、掘削影響領域の調査技術開発として、岩芯を用いた応力測定と掘削振動計測を手段とす る基礎的研究を本年度より2ヵ年計画で開始し、2008年度は1.3.1の調査試験で実施したボーリ ング掘削を用いてデータを取得し、測定手法により有効なデータが取得できることを確認した(5 章 5.1)。さらに2007年度にパイロットボーリング孔内へ設置した高精度ひずみ計を用いた、立 坑切羽到達前の岩盤ひずみの高精度観測を継続し、潮汐変動による岩盤ひずみを計測することが できた(5章 5.2)。



図 1.4 研究坑道の配置とボーリング孔掘削場所及びボーリング孔名

#### 2. 調査試験

## 2.1 岩盤ひずみ計測<sup>8)</sup>

#### 2.1.1 目的

岩盤ひずみ計測では、立坑掘削前に変位・ひずみ計を設置し、2007年度より計測を継続してき たデータを用いて、立坑掘削の切羽到達に先行して発生する岩盤内の変位とひずみの程度を把握 した。先行変位とひずみの発生は、立坑掘削による応力解放で生じる立坑周辺の岩盤内の三次元 的な応力再配分がもたらす現象で、応力再配分の程度は、岩盤強度やヤング率などの立坑周辺の 岩盤の力学的性質と関係するため、応力再配分の程度を把握することで、逆に力学的性質を評価 することもできる。

本計測では、立坑切羽前方に行なうプレグラウトによるプレストレスの発生量や、立坑掘削に よる周辺の岩盤の力学的な損傷で発生する非弾性的な領域の程度を把握することを目的とした。 また、このデータを利用し、立坑設計に用いられた応力解放率(立坑の力学的挙動を水平面内で 二次元解析する際、実際は切羽近傍で切羽前方岩盤が三次元的に初期応力を一部負担する割合を 考慮するための補正係数、吹付けコンクリートや覆工などの設計に用いられる)の妥当性評価を 別途実施している。

#### 2.1.2 調査内容

換気立坑 200m ボーリング横坑から掘削した、ボーリング孔 07MI-10 号孔~12 号孔までの 3 本の鉛直孔(図 1.4)に計測機器を設置(2007 年度に実施)し、以来、岩盤ひずみ計測を継続した。ボーリング掘削は、換気立坑の切羽が深度 200m で停止している期間に実施し、その後の主なイベントは、①計測機器の設置と測定開始(2008 年 1 月)、②プレグラウト(同年 2 月)、③換気立坑の掘削開始(同年 3 月下旬~)の順となっている。表 2.1.1 に、ボーリング孔の諸元と設置した計測機器の概要を示す。また、図 2.1.1 は計測のレイアウトである。

実施者 瑞浪超深地層研究所研究坑道掘削工事 B エ区その				
期間	期間 2007 年 12 月(ボーリングエのみ期			
ボーリング孔名	07MI-10	07MI-11	07MI-12	
掘削方位	鉛直孔	鉛直孔	鉛直孔	
掘削径	PQ (φ12	3.0mm)	HQ (φ98.4mm)	
掘削長	16.50 (m)	42.00 (m)	52.00 (m)	
孔口座標 (世界測地系)	X: -69,044.845 (m) Y: 6,420.329 (m) E.L.: 推定 0.9 (m)	X: -69,041.002 (m) Y: 6,423.590 (m) E.L.: 推定 0.9 (m)	X: -69,040.266 (m) Y: 6,422.914 (m) E.L.: 推定 0.9 (m)	
試錐機	٢			
計測器	■ひずみ計測 埋設型ひずみ計 センサーTML KM-50F 設置深度 216m(6Ch)	■ひずみ計測 埋設型ひずみ計 センサーTML KM-50F 設置深度 216m(6Ch) 234m(3Ch)	■変位計測 連続式挿入型傾斜計 センサーOYO Q-Tilt 設置深度 225・234m	
計測データ	岩盤の温度と3次元ひずみ	岩盤の温度と3次元ひずみ ※234mは水平面内ひずみ	ボーリング孔軸方向の 岩盤傾斜角	

表 2.1.1 岩盤ひずみ計測ボーリング諸元と計測器の概要

※E.L.値(推定)は設計図での施工基面(ボーリング横坑の床板)レベルで示している



図 2.1.1 岩盤ひずみ計測のレイアウト

#### 2.1.3 調査結果

図 2.1.2 は、換気立坑の深度 200m からの掘削開始で発生するひずみの経時変化を、プレグラウトが施工される領域内に設置した埋設型ひずみ計②(図 2.1.1)で観測し、プレグラウト作業期間とその前後について示したものである。この図をみると、プレグラウト期間において岩盤の膨張を示す 10~40 µ 程度の伸びひずみが認められる。

図 2.1.3 は、換気立坑の深度 200m からの掘削開始後におけるひずみ・変位の時系列データを、 図 2.1.1 に示す埋設型ひずみ計①~③と連続式挿入型傾斜計で観測し、計測深度(216m と 234m) に対する切羽の相対的な位置(接近の程度を立坑掘削径 D(5.3m)の単位で示す)を横軸として 整理し、切羽進行にともなう岩盤変位やひずみの変化を縦軸に示した図である。なお、この図よ り評価される応力解放率は切羽到達時で 80~100%である。



図 2.1.2 プレグラウトによる岩盤ひずみの変化

#### 2.1.4 考察

図 2.1.2 に認められたプレグラウトによる岩盤ひずみ発生量( $\varepsilon = 10 \sim 40 \mu$ )と、2.2 で後述す る岩盤力学ボーリング調査から得られた 50%接線ヤング率(E = 52GPa)を用いて、プレグラウ トによる岩盤への荷重により発生した応力( $\sigma = E\varepsilon$ )を概算すると 0.5~2MPa と求められる。 これは、実際のグラウト注入圧が地下水圧+1MPa(約 2MPa)で管理されていたことと整合的で ある。

図 2.1.3 をみると、切羽通過時の応力再配分によるひずみ・変位の急変が認められる。また、埋 設型ひずみ計では、切羽通過とはあまり関係しない横軸全体にわたる単調な変化が認められるが、 連続式挿入型傾斜計では同様の変化は認められず、この原因を検討したが岩盤の温度や地下水位 の変化では説明できなかった。また、類似の測定事例<sup>90</sup>でもこの現象が認められなかったことから、 その原因はひずみ計の絶縁抵抗の変化等、ひずみセンサー側の理由によるドリフトと判断した。

次に、立坑掘削による周辺の岩盤の力学的な損傷範囲を推定するため、ひずみ・変位について、 初期応力下の均質等方弾性体に円孔を抜いた場合の理論解と計測値を比較した。仮に、埋設型ひ ずみ計周囲の岩盤が立坑掘削で損傷しておらず、元の弾性的性質を保持しているなら、切羽通過 で発生するひずみ・変位の全体量は弾性体の理論解と概ね一致するものと考えられる。比較結果 は表 2.1.2 に示すとおりで、双方の値が大小関係や値の桁数で概ね一致していることが確認され た。また、ひずみ・変位の計測値の全体量は、事前に評価した岩盤の限界ひずみ(300 µ 以上)を 大きく下回っていた。以上のことから、埋設型ひずみ計の周囲は掘削による損傷が少なく、すな わち立坑側壁から 0.2D まで離れると力学的な掘削損傷は小さいと考えられる。



図 2.1.3 切羽進行にともなう岩盤の先行変位とひずみの程度と変化

# JAEA-Research 2010-005

ž ž	奥気立坑との	1.2D	0.2D	0.2D
水平離隔		ひずみ,μ	ひずみ,μ	変位,mm
計測深度		※符 ※D	符号は伸びを正とす ) は換気立坑の掘削	る 刂径 5.3m
	Ⅲ=全級	$\varepsilon_r = 7$	$\varepsilon_r = 68$	$u_r = -0.3$
216m	'''' '' '' '' '' '' '' '' '' '' '' '' '	$\varepsilon_{\theta} = -15$	$\varepsilon_{\theta} = -117$	$u_{\theta} = -0.1$
21011	計測	$\varepsilon_r = 0$	$\varepsilon_r = -10$	$u_r = -1.5$
		$\varepsilon_{\theta} = -15$	$\varepsilon_{\theta} = -36$	$u_{\theta} = -1.0$
	聑論鼦		$\varepsilon_r = 73$	$u_r = -0.4$
024m	上三部月午		$\varepsilon_{\theta} = -127$	$u_t = -0.1$
23411	≡┼泪I		$\varepsilon_r = 0$	$u_r = -0.5$
	<b>百一/</b> 则		$\varepsilon_{\theta} = -20$	$u_{\theta} = -0.5$

# 表 2.1.2 岩盤ひずみ計測の値と弾性解の比較

# 2.1.5 今後の課題

- ・ 掘削による力学的な岩盤損傷は、今回の条件(風化変質の少ない比較的健全な花崗岩)では、 立坑径 D の 0.2 倍よりも狭い範囲にあると評価された。このようにごく壁面近傍を対象とす る岩盤の力学的調査は、今回の埋設型ひずみ計や連続式挿入型傾斜計を用いると効率が悪い ので、今後の掘削影響調査等の計画では調査手法の効率化が課題である。
- ・ 今回用いた測定システムは、掘削影響により非弾性的な比較的大きなひずみ・変位(ひずみで1000µ程度)が発生してもオーバーレンジしないよう設計しており、センサーのダイナミックレンジは固定であることから、ひずみ・変位の測定分解能は1µ(変位は0.5mm)程度に抑えられた。しかし、実際の計測結果をみると確認されたのは概ね弾性的挙動で比較的小さなひずみ・変位であり、設定したレンジは最適ではなかった。今後、同様の調査では測定レンジをいくつに設定するかが課題である。
- ・ 埋設型ひずみ計は、計測初期から、類似事例で経験しなかったセンサー側の理由と思われる ドリフトを発生しており、結局、設置から約1年後(2008年11月頃)、絶縁不良を発生して 計測不能となった。当該ひずみ計は設置前に、現地の地下水圧(約1MPa)相当の加圧試験を 実施していたが、計測器の耐久性に関する検討方法が今後の課題である。

#### 2.2 岩盤力学ボーリング調査<sup>10)</sup>

# 2.2.1 目的

岩盤力学ボーリング調査では、調査対象の深度(2008年度は深度200m)の研究坑道内におい て、岩盤の比較的健全な領域(断層帯や風化変質部ではない領域)を対象とする延長約20mのボ ーリング孔を掘削した。そして、同孔内の、孔口寄り(研究坑道の掘削による損傷を受けている 可能性がある領域)から孔底寄り(同損傷が少ないと考えられる領域)までのボーリングコア(室 内物理・力学試験用、以下コア)を採取するとともに、孔底寄りの複数の地点において原位置初 期応力測定を実施した。この調査は坑道掘削位置の地質環境のうち、力学的特性(岩石の物理・ 力学的特性、岩盤初期応力)の把握を目的としている。

## 2.2.2 調査内容

換気立坑 200m ボーリング横坑から、延長約 20m の 3 本のボーリング孔 08MI-14 号孔~ 08MI-16 号孔(図1.4)を図2.2.1に示す方向で掘削した。これらのボーリング掘削は、換気立坑 (掘削径 D=5.3m)の切羽が深度280m~300m位置にある期間に行っており、切羽と当該ボーリ ング掘削位置の距離(60~80m)及び立坑掘削径(5.3m)からみて、その切羽移動による直接の 力学的影響は少ないと考えられる。また、各ボーリング孔の掘削方向は、岩盤異方性を考慮する 際の条件がなるべく単純となるよう、パイロットボーリング06MI-03号孔(図1.4)の深度200m 付近で確認された岩盤割れ目の卓越3方向に対し、その1つにボーリング孔が直交するように決 めた。表2.2.1に、ボーリング孔の諸元と各孔で実施した試験項目の概要を示す。







図 2.2.1 岩盤力学ボーリング調査孔の掘削方位

実施者			
期間	2008年10月~	期間のみ示す)	
ボーリング孔名	08MI-14	08MI-15	08MI-16
掘削方位	N19.3°E +7.3°	N71.0°E +6.7°	鉛直孔
掘削径		HQ (Ø98.4mm)	
掘削長	20.00 (m)	22.28 (m)	19.53 (m)
孔口座標 (世界測地系)	X: -69,050.633 (m) Y: 6,417.246 (m) E.L.: 2.392 (m)	X: -69,048.335 (m) Y: 6,414.643 (m) E.L.: 2.390 (m)	X: -69,048.109 (m) Y: 6,417,440 (m) E.L.: 1.056 (m)
試錐機			
試験項目	<ul> <li>■原位置初期応力測定(</li> <li>■室内物理・力学試験</li> <li>■コアを用いた初期応</li> </ul>	(CCBO <sup>注1</sup> ) 力測定(DSCA <sup>注2</sup> )	同左
試験結果	<ul> <li>■原位置初期応力(主成</li> <li>■コアの物理特性(比重 S波速度等)</li> <li>■コアの力学特性(一車 ν、三軸試験 C・φ、圧</li> <li>■コアのクラックテン</li> </ul>	※ただし原位置初期応力測 定 (CCBO) は非実施につ き原位置初期応力の試験 結果も無し	

表 2.2.1 岩盤力学ボーリング調査 ボーリング掘削の諸元と試験項目の概要

注1 CCBO: Compact Conical-ended Borehole Over-coring (円錐孔底ひずみ法)

注 2 DSCA: Differential Strain Curve Analysis

#### 2.2.3 調査結果

表 2.2.2 は、深度 200m の岩盤力学ボーリング調査で採取したコアの物理特性の範囲(最大値 と最小値の範囲)と平均値、ばらつきの大きさ(±σ)を示したものである。また、表 2.2.3 で 力学特性についても同様に示した。なお、これら試験に用いたコアは全て土岐花崗岩で、灰白色、 塊状、堅硬、中〜粗粒の黒雲母花崗岩で、風化や変質は認められなかった。

12 2.2.2 /	未反 200111 石盈刀于	ハーリンフ詞且	初生付上の	陇女
測定項目	最小値~最大値	平均值±σ	単位	備考
目れけ比重(乾燥)	2.63~2.65	2.65±0.00	—	粒子相対密度 <sup>注1</sup>
兄がいに生(紀床)	2.60~2.62	2.62±0.01	—	乾燥相対密度 <sup>注2</sup>
乾燥密度	2.58~2.61	2.60±0.01	10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	ノギスで概略測 定した体積で乾 幅または白然は
自然密度	2.59~2.62	2.60±0.01	10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	様なたは自然が 態の質量を除し た密度
含水比	0.23~0.24	0.24±0.00	%	
有効間隙率	0.92~1.20	1.05±0.09	%	
弾性波速度(P 波)	4.97~5.78	5.42±0.20	km/s	
(S 波)	3.11~3.84	3.44±0.19	km/s	

表 2.2.2 深度 200m 岩盤カ学ボーリング調査 物理特性の概要

注1 粒子相対密度は乾燥質量を有効間隙体積を除くほぼ実質部の体積で除して求めたもの

注2 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

_	21 111				
1	測定項目	最小値~最大値	平均值±σ	単位	備考
l	ー軸圧縮強さ	131.2~159.2	143.2±9.4	MPa	
l	50%接線ヤング率 E	44.4~61.1	51.9±4.3	GPa	
l	静ポアソン比 $\nu$	0.24~0.44	0.34±0.07	—	
I	圧裂引張強さ	4.87~7.20	6.32±0.71	MPa	
	粘着力c	15.0~16.7	16.3±0.9	MPa	ー軸圧縮試験と 封圧を三段階(5・
	内部摩擦角Φ	63~64	64±1	0	た 三 軸 圧 縮 試 験 よ り 得 ら れた 値

表 2.2.3 深度 200m 岩盤カ学ボーリング調査 カ学特性の概要



図 2.2.2 深度 200m 岩盤力学ボーリング調査での物理・力学特性

図 2.2.2 は、表 2.2.2 と 2.2.3 に示したデータを用いて、コアの採取位置による値の変化を示したものである。ここで、各物性値は最大値で正規化して示し、ばらつきの割合を明示した。この図をみると、各物性値とも、ボーリング孔口からの距離に関係する変化は特に認められず、今回コアを採取した領域において岩盤基質部の物性は概ね一様であると考えられる。

ばらつきの割合は、静ポアソン比と圧裂引張強さを除いて、約20%に収まっている。静ポアソン比と圧裂引張強さのばらつきは約40%と相対的に大きい。静ポアソン比のばらつきは、比較的値がばらつき易いひずみゲージ出力(試験体の粒子径、ゲージの接着性等、試験条件の影響を受け易い)から評価されていること、また、圧裂引張強さのばらつきは、載荷面(円柱形試験体の側面)の接触条件を一定とし難いことが、それぞればらつきを拡大した原因の一つと考えられる。

表 2.2.4-(1)、(2)は、CCBO: Compact Conical-ended Borehole Over-coring(円錐孔底ひずみ 法)による原位置初期応力測定を行った結果を示している。表 2.2.4-(1)の 08MI-14 号孔では、 CCBO の実施の妨げとなる割れ目や湧水がほとんど孔中で認められなかったものの、コアディス キングを生じ CCBO の実施が中断された測定地点が 2 点ある(測定地点 12.8、13.0mabh)。コ アディスキングは、初期応力方向とボーリング孔軸がオーバーコアリング時に応力集中を起しや すい位置関係にあると起きるもので、そのメカニズムは FEM 等を用いた事後解析で検討できる が、応力測定前に予測することは困難である。一方、表 2.2.4-(2)の 08MI-15 号孔では、CCBO の 実施の妨げとなる孔中の割れ目や湧水(1000/分を超える量)に数多く遭遇し、CCBO 実施には不 適切である測定地点そばの割れ目を事前確認できないまま CCBO を実施し、後にそれが確認され た測定地点が 2 点ある(測定地点 18.1、21.7mabh)。

図 2.2.3 は、前述の各表に示した原位置初期応力測定の結果を各々ステレオ投影したものである。CCBO 実施の妨げとなる孔中の割れ目や湧水が少ない 08MI-14 号孔で再現性の良い測定結果 が得られており、最大主応力( $\sigma_1$ ) は概ね水平で NW-SE 方向にあることが確認された。ただし 鉛直方向に主応力は認められず、主応力値から判断すると最小主応力( $\sigma_3$ ) が土被り圧に相当す るものと考えられる。一方、孔中の割れ目や湧水が多かった 08MI-15 号孔では、測定地点そばに 割れ目のある測定地点 18.1、21.7mabh を中心に、測定結果の再現性が悪く、この図から、 $\sigma_1$ や  $\sigma_3$ に何か一定の傾向を確認することができなかった。

	( )				
測定地点 (mabh)	解析可能 な成分数	最大主応力 $\sigma_{\!_1}$ (MPa)	中間主応力 $\sigma_{_2}$ (MPa)	最小主応力 $\sigma_{_3}$ (MPa)	備考
12.8	16	8.2±0.3 (298°/26°)	4.0±0.4 (190°/33°)	0.7±0.3 (58°/46°)	コアディスキ ング発生
13.0	16	7.7±0.6 (310°/7°)	4.5±0.5 (213°/43°)	-1.4±0.5 (48°/46°)	コアディスキ ング発生
13.4	15	11.9±0.5 (314°/5°)	2.9±0.4 (219°/46°)	1.0±0.4 (49°/44°)	機器故障によ り途中で欠測
17.9	16	12.4±0.4 (300°/5°)	5.5±0.4 (203°/51°)	3.1±0.4 (34°/38°)	
18.4	11	10.4±0.3 (118°/9°)	6.6±0.2 (220°/55°)	3.0±0.3 (22°/34°)	
19.2	16	9.5±0.6 (137°/21°)	5.2±0.4 (253°/49°)	2.8±0.6 (32°/33°)	

表 2.2.4-(1) 08MI-14 号孔における原位置初期応力測定(CCBO)の結果

※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 括弧内は初期応力の軸の方向(真北からの時計回り角度/傾斜伏角)を示す

測定地点 (mabh)	解析可能 な成分数	最大主応力 $\sigma_{\!_1}$ (MPa)	中間主応力 $\sigma_{_2}$ (MPa)	最小主応力 $\sigma_{_3}$ (MPa)	備考
12.0	16	4.8±0.3 (305°/0°)	2.8±0.2 (206°/88°)	1.1±0.3 (35°/2°)	
12.6	16	2.9±0.3 (145°/43°)	1.7±0.3 (318°/47°)	1.4±0.4 (51°/4°)	
14.3	14	3.9±0.2 (252°/76°)	1.5±0.3 (135°/6°)	-0.8±0.3 (44°/12°)	
17.4	16	9.0±0.3 (325°/48°)	5.2±0.5 (76°/17°)	3.9±0.3 (179°/36°)	
18.1	16	9.8±0.9 (56°/26°)	3.9±0.6 (241°/64°)	0.8±0.8 (143°/2°)	測定地点そば に割れ目あり
21.1	0		評価不能		値なし
21.7	14	2.4±0.3 (191°/2°)	1.0±0.4 (283°/58°)	-0.4±0.5 (100°/32°)	測定地点そば に割れ目あり

表 2.2.4-(2) 08MI-15 号孔における原位置初期応力測定(CCBO)の結果

※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 括弧内は初期応力の軸の方向(真北からの時計回り角度/傾斜伏角)を示す



図 2.2.3 08MI-14・15 号孔における原位置初期応力測定(CCBO)の結果

#### 2.2.4 考察

図 2.2.2 より、コアの物理・力学特性にボーリング孔口からの距離に関係する変化が特に認められない(例えば一軸圧縮強さの値など)ことから、今回のコアの採取位置(孔口から 5m より深い地点)においては、換気立坑 200m ボーリング横坑の掘削による岩盤基質部の物理・力学特性を変化させる損傷は認められないと言える。また、コアは岩盤に対して方向の異なる 3 孔のボーリング掘削(図 2.2.1)から得ているが、採取孔の違いに起因する物理・力学特性の変化が特に認められないことから、今回対象とした岩盤の物理・力学的な異方性の程度は小さいものと推測

される。この異方性の程度はコアの超音波伝播速度を様々な方向より測定することで概略評価で きる。08MI-16 号孔のコアを用いた研究<sup>11)</sup>によると弾性波速度の異方性の程度は 7.7%であったの で、異方性は、前述した試験結果のばらつき(20~40%)に比較して無視できるほど小さいもの と考えられた。

図 2.2.3 において、08MI-14 号孔で得られた結果が、CCBO 実施の妨げとなる割れ目や湧水が 少なく測定結果の再現性が良いことから、深度 200m における初期応力状態である可能性が高い。 この考えの妥当性を以下の観点で検討した。各々の検討結果を合わせて示す。

- ① 同一手法、異なる手法による測定結果に再現性があるか
  - ・地表の三角測量で示された広域ひずみ場の主ひずみ方向<sup>12)</sup>と調和的である
     瑞浪超深地層研究所用地周辺は急峻な地形でなく地形の影響は無視できると考えている
  - ・08MI-16 号孔で実施したコアを用いた初期応力測定法 DSCA: Differential Strain Curve Analysis の示すクラックテンソルの主値方向(初期応力測定結果)と概ね一致する<sup>10)</sup>
- ② 土被り圧に相当する成分が認められるか
  - ・前述のとおり $\sigma_3$ がこれに相当する可能性が高い
- ③ 側圧係数(水平方向主応力平均値の土被り圧に対する比)が一般的な範囲にあるか
  - ・概ね3であり、深度200mに認められる我が国の側圧係数の深度分布13)の範囲内である

以上を踏まえて、08MI-14 号孔での結果(表 2.2.4-(1))が深度 200m における初期応力状態で あると結論した。最後に、08MI-14 号孔での6地点の測定結果のうち、コアディスキングした2 地点の測定結果は実験中断による不確実さが残るため除外し、残る4地点の測定結果を用いて平 均的な初期応力状態を計算した(図 2.2.4)。

応力成分	$\sigma_{\scriptscriptstyle E}$	8.0±0.4	
	$\sigma_{_N}$	6.0±0.6	
	$\sigma_{_V}$	4.4±0.3	
	${ au}_{\scriptscriptstyle E\!N}$	-3.5±0.4	
	$ au_{_{NV}}$	1.1±0.3	
	$ au_{\scriptscriptstyle V\!E}$	0.6±0.2	
主	$\sigma_{_{ m l}}$ (方位°/傾斜°)	10.6±0.5 (121	/ 2)
ー 応 力	$\sigma_{_2}$ (方位°/傾斜°)	5.2±0.4 (220/	(57)
	$\sigma_{_3}$ (方位°/傾斜°)	2.6±0.5 (36/	33)



※応力成分の座標系は E(東)-N(北)-V(鉛直) ※応力の単位は MPa、括弧内は応力軸の真北から 時計回りの免疫し傾気(た)の

時計回りの角度と傾斜伏角

図 2.2.4 深度 200m 岩盤力学ボーリング調査での初期応力場(圧縮が正)

# 2.2.5 今後の課題

 研究坑道位置における岩盤力学ボーリング調査では、引き続き、概ね深度 100m 間隔で調査 を実施し、第1段階の調査研究結果や岩盤力学概念モデルと逐次比較し、第1段階の調査研 究の有効性を検証し、第2段階の岩盤力学概念モデルを構築することが課題である。その一 環として、次は換気立坑 300m のボーリング横坑における岩盤力学ボーリング調査を計画中 である。

- 一連の岩盤力学ボーリング調査で、研究坑道位置において把握される初期応力状態は、これ まで主立坑近傍で確認されている NNW-SSE 方向の高角度断層の下盤側での測定であり、同 断層の上盤側での初期応力状態は未測定である。今後、同断層の存在が初期応力状態に与え る影響を検討するため、深度 300m アクセス坑道等からの岩盤力学ボーリング調査を行なっ て上盤の初期応力状態を把握することが課題と考えられる。
- コアを用いた初期応力測定法 (DSCA) は、測定結果の他手法との整合性により妥当性の検証 を行なっているが、結果の信頼性を高めるには、この手法で応力が測定されるメカニズムと される微視亀裂の発生を初期応力解放の進行下で直接確認すること、また、応力解放のため のオーバーコアリング掘削による過渡的応力変化の測定結果への影響を整理することが残さ れた課題である。
- 土岐花崗岩の力学的異方性には微視亀裂の存在が大きく寄与している。上述のコアを用いた 初期応力測定法(DSCA)の仮定が正しければ、地殻から取り出した土岐花崗岩に観察される 異方性は必然的に初期応力方向と関係していることが予想される。その関係の基礎的研究は、 土岐花崗岩の異方性を理解するために重要と考えられる。

## 3. モデル化・解析

## 3.1 目的

モデル化・解析では、新たに取得された第2段階における調査試験の結果を、第1段階の調査 試験の結果や岩盤力学概念モデルと比較・検討することを目的として、2008年度は、主に深度 200m 岩盤力学ボーリング調査で取得したデータの整理・分析と、深度 300m までの土岐花崗岩 を範囲として、第1段階の岩盤力学概念モデルの検証結果をとりまとめた。

#### 3.2 解析内容

はじめに、コアの物理・力学特性と原位置初期応力状態について、深度 100m、200m 岩盤力学 ボーリング調査で取得したデータを第1段階の調査結果と横並びで示し、双方の相違や一致性を 検討した。また、換気立坑で実施している掘削ずりを用いた室内試験(掘削工事の C 計測として 実施)が示す、深度 200m~300m の範囲の物理・力学特性との関係も比較した。さらに、深度 200m~300m を範囲として、換気立坑を掘削する際の壁面観察で確認された岩盤の割れ目分布を、 第1段階の調査から評価したそれと比較した。最後に、以上の比較・検討結果をふまえて、第1 段階で構築した岩盤力学概念モデルの妥当性について検討した。

#### 3.3 解析結果

表 3.3.1 は、第 2 段階調査として 2008 年度までに実施した、深度 100m と 200m の岩盤力学ボ ーリング調査に基づく各岩相の基質部の物理・力学特性を、第 1 段階調査(MIZ-1 号孔)の物理・ 力学特性の平均値と比較したものである。この表を見ると深度 200m の一軸圧縮強さと三軸試験 から求めた粘着力が若干小さいが、概ねその他は、各岩相とも双方で同様の値を示している。

調本地占	第1段階調査 <sup>注1</sup>	深度 200m 調査	第1段階調査 <sup>注1</sup>	深度 100m 調査
詞直地魚	(平均值 <b>±</b> σ <sup>注2</sup> )	(平均值±σ)	(平均值±σ)	(平均值±σ)
岩相	土岐右	花崗岩	土岐夾	炭累層
乾燥状態の見かけ比重 (乾燥相対密度)	2.62±0.01	2.62±0.01	1.47±0.35	1.51±0.11
含水比(%)	0.41±0.15	0.24±0.00	30.5±4.9	29.7±4.5
有効間隙率(%)	1.12 ±0.40	1.05±0.09	44.3±3.8	44.6±3.6
P 波弾性波速度(km/s)	5.45±0.41	5.42±0.20	2.39±0.11	2.57±0.29
S 波弾性波速度(km/s)	2.91±0.32	3.44±0.19	1.09±0.03	1.22±0.12
一軸圧縮強さ(MPa)	173±25	143.2±9.4	12.3±0.4	10.7±2.0
50%接線ヤング率(GPa)	53.9±5.8	51.9±4.3	4.5±0.3	4.97±1.16
静ポアソン比	0.265±0.043	0.34±0.07	0.290±0.049	0.42±0.05
圧裂引張強さ(MPa)	6.48±1.86	6.32±0.71	1.00±0.04	0.782±0.184
粘着力c(MPa)	39.1±2.2 側圧 0-30MPa 時	16.3±0.9 側圧 0-20MPa 時	3.30 <sup>注 3</sup> 側圧 0-4MPa 時	3.99±0.68 側圧 0-4MPa 時
内部摩擦角 <b></b> (°)	52.2±1.3 側圧 0-30MPa 時	64±1 側圧 0-20MPa 時	24.3 <sup>注3</sup> 側圧 0-4MPa 時	15.4±4.2 側圧 0-4MPa 時

表 3.3.1 岩盤力学ボーリング調査と第1段階の調査で把握した物理・力学特性

注1) MIZ-1 号孔で実施した第1段階調査の結果である

注2) MIZ-1 号孔の花崗岩部の全平均である,ただし鉛直深度 199.5m の局所的な軟質部のデータは除いた

注3) 測定値が1つのためσの計算なし

## JAEA-Research 2010-005

図 3.3.1 は、第 2 段階調査として 2008 年度までに実施した、深度 100m と 200m の岩盤力学ボーリング調査に基づく研究坑道位置での原位置初期応力状態を、第 1 段階調査(MIZ-1 号孔)の それと比較したものである(水平面内の最大・最小主応力、 $S_H \cdot S_h$ で比較)。この図で、深度 100m(土岐夾炭累層)では、MIZ-1 号孔の方に比較データがないが、深度 200m に比較して初期 応力値が等方的( $S_H \Rightarrow S_h$ )である。また、深度 200m(土岐花崗岩)では、初期応力値が MIZ-1 号孔のそれと概ね同様である。さらに、100m、200m いずれの深度においても、 $S_H$ 方向は地表 の三角測量で示された広域ひずみ場の主ひずみ方向 <sup>12)</sup>と調和しており、MIZ-1 号孔の全調査深度 に対する平均的 $S_H$ の方向とも一致している。



図 3.3.1 岩盤力学ボーリング調査と第1段階の調査で把握した初期応力

図 3.3.2 は、換気立坑で実施している掘削ずりを用いた室内試験の結果を、岩盤力学ボーリング調査や第1段階調査(MIZ-1号孔)と比較したものである。図によると、掘削ずりの弾性波速度はP波、S波ともに比較的遅い傾向が認められ、掘削時にずり内部に力学的な損傷を受けている可能性が考えられるが、その他の物理・力学的特性をみるとMIZ-1号孔のそれと概ね値が一致している。





図 3.3.3·(1)は、坑道を掘削する際に行った壁面観察で作成した岩盤の割れ目スケッチと、その 割れ目の走向・傾斜のステレオ図を、深度 200m~250m と 250m~300m の二つの深度領域に区 分して示したものである。ここでステレオ図の深度を 250m で区分したのは、換気立坑の壁面観 察において、概ね深度 250m 以浅で水平方向に近い割れ目が多くあることが認められ、これが、 第1段階の地質構造モデル<sup>20</sup>で示された、低角度傾斜を有する割れ目の集中帯 (LAFZ: Low-Angle Fractured Zone) に相当するためである<sup>14)</sup>。これらのステレオ図をみると、換気・主立坑ともに NNW-SSE 走向の高角度割れ目群が卓越している。一方、低角度割れ目群はほとんど換気立坑だ けに認められる。その低角度割れ目群の頻度は、LAFZ に相当する深度 250m より上部で若干高 まるものの、コントラストは 250m より下部と比べてもそれ程顕著でないことが示されている。

図 3.3.3-(2)は、第1段階の調査で予想した岩盤割れ目の分布を示す。なお、第1段階調査は概 ね鉛直な方向のボーリング孔(MIZ-1 号孔)によるため、高角度割れ目の検出感度が低いと考え られたので、この図の地質構造区分は主に低角度割れ目群の頻度に着目した結果である。図 3.3.3-(2)をみると、深度 200m~300m は LAFZ を含む上部割れ目帯(UHFD: Upper Highly Fractured Domain)に区分され、LAFZ、UHFDではどちらも低角度割れ目群が卓越している<sup>2)</sup>。 これを、図 3.3.3-(1)に示した実際に照らしてみると、双方で LAFZ の出現は一致するものの、実 際は低角度割れ目群だけでなく、高角度割れ目群も LAFZ、UHFD において卓越して認められて おり、また、主立坑近傍の断層に付随する割れ目も観察されている。



図 3.3.3-(1) 壁面観察による割れ目スケッチとその走向・傾斜のステレオ図



図 3.3.3-(2) 第1段階の調査から評価した岩盤割れ目の状況

# 3.4 考察

第1段階の岩盤力学概念モデル(図 1.2)は、力学特性の範囲を概略示した定性的なモデル化に 留まるものであり、また主立立坑近傍においては断層が確認されていることから、同モデルの検 証は、断層を避け、健岩部が認められる地点(深度 100m は予備ステージ、深度 200m は換気立 坑ボーリング横坑)の調査によって行なった。

その結果、3.3 で述べたように、これら調査地点での物理・力学的特性及び初期応力は、第1 段階調査(MIZ-1 号孔)の結果と概ね整合することが確認された。また、掘削ずりを用いた試験 による物理・力学的特性の高頻度な検証によっても、ずりに掘削損傷の影響は多少あるが、同じ く MIZ-1 号孔の結果と整合的と言えた。以上のことから、今回検証した深度 300m までの範囲に おいて、第1段階の岩盤力学概念モデルに示された力学特性の範囲は、物理・力学的特性及び初 期応力において実際の状況と合致していると言える。

一方、土岐花崗岩の力学的物性は、コアを用いた試験で把握される微視亀裂の影響に加えて、 BTV や壁面観察から把握されるスケールの割れ目の影響も強く受けると考えられる。3.3 で、図 3.3.3-(1)、(2)を用いて示したように、第1段階調査(MIZ-1号孔)から評価した割れ目分布は、 主立坑近傍の断層に付随する割れ目の分布を記述していない。また、断層の影響のない換気立坑 での健岩部で比較すると高角度割れ目の情報が抜け落ちている。これは、前述のとおり第1段階 調査ではMIZ-1号孔の掘削方向に起因して高角度割れ目群の検出が困難であった影響を受けたも のと考えられる。以上のことから、第1段階で評価した岩盤割れ目群の卓越状況は、低角度割れ 目群の予想において有効であった一方、高角度割れ目群や断層に付随する割れ目は、第1段階調 査で予想することは困難で、第2段階調査で初めて得られる情報と考えられた。したがって、こ のような第1段階モデルの限界を踏まえ、今後、第2段階で構築するブロックスケールの同モデ ルは、実際に研究坑道内で把握された割れ目の情報を反映させる必要がある。

なお、BTV や壁面観察から把握されるスケールの割れ目分布は、割れ目の影響を考慮した岩盤 力学挙動の解析(クラックテンソルモデル<sup>15)</sup>、MBC モデル<sup>16)</sup>による解析)における主要パラメー タである。既往の研究として、第1段階の岩盤力学概念モデルに基づく同解析<sup>15),16)</sup>を行なってい るが、これらについて、実際の割れ目分布が異なったことの解析結果への影響を検討する必要も あると考えられる。

# 3.5 今後の課題

- ・ 引続き行なわれる岩盤力学ボーリング調査、掘削ずり試験、坑内壁面観察等の結果を用いて、 深度 300m より深い地点を対象とした、第1段階の岩盤力学概念モデルの検証が課題である。
- 第1段階の岩盤力学概念モデルで評価できなかった、BTV や壁面観察から把握されるスケールの割れ目分布を反映したブロックスケールの第2段階モデルを作成し、これを踏まえた割れ目の影響を考慮した岩盤力学挙動の解析を行なって、モデルの更新による解析結果へ与える影響の検討が課題である。

#### 4. 調査技術開発

#### 4.1 長期岩盤挙動評価のための現象論的研究<sup>17)</sup>

#### 4.1.1 目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分では、建設から操業を経て坑道埋め戻しまでの期間が長く、 数十年~百年程度の力学的な坑道の安定性評価が求められると考えられる。程度の差はあるが、 一般に岩盤はクリープや応力緩和で知られる非線形粘弾性挙動(時間依存性の力学的挙動)を示 すので、安定性や挙動の評価をこのように幅広い時間スケールで行うにはその性質の把握が必要 であり、これを踏まえた評価手法(長期岩盤挙動評価手法)の開発が重要な課題と考えられる。

そこで、1994 年度から 2003 年度までの 10 年間の研究で、岩石の非線形粘弾性挙動を精度良 く把握するための基礎となる試験法とモデルの構築を行った。これを受けて、2004 年度からは、 基礎を踏まえた実際の長期岩盤挙動評価手法を開発し、それを第3段階(研究坑道を利用した研 究段階)において検証することを目標とする研究を実施している。具体的には、研究所計画で対 象とする土岐花崗岩のクリープや応力緩和の性質を、現象論的手法(精密な試験や観察結果から 現象を直接的に理解する手法)を用いて解明し、長期岩盤挙動評価に必要と考えられる試験や観 察手法をとりまとめ、またその結果の検証方法を示すことを目的とする研究を実施している。

## 4.1.2 研究内容

2008年度の研究内容は以下のとおりである。

#### 田下凝灰岩<sup>脚注)</sup>の長期クリープ室内試験

非線形粘弾性挙動を把握するための基礎となる、現在可能なできるだけ長期にわたる精密試 験(図 4.1.1-(1))を継続するものである。なお、本試験では、土岐花崗岩に対する研究の予 察として、試験開始当時に非線形粘弾性の比較的明らかであった田下凝灰岩を用いている。 今年度で、試験開始(1997年度)から10年を超え、追加されたデータを踏まえた長期試験 結果の更新を行なうとともに、現在まで特に問題なく長期継続を可能とした試験法の要素(装 置やメンテナンス等)についてノウハウをとりまとめた。つぎに、更新された長期試験結果 に基づき、低応力レベル(破壊応力の3割)におけるクリープ挙動を整理し、これを既往の 短期クリープ試験結果(比較的高応力レベル、破壊応力の6~9割程度)と比較して、非線形 粘弾性論を拠りどころとして相互の関係や性質等の検討を行った。

注)田下凝灰岩は大谷石の一種で、軟岩で加工しやすく建材として販売されている。新生代第三期の火山灰・砂 礫が海底で凝固したものと考えられており、比較的均質な岩石が得られる(大谷石材共同組合ホームページ、 平塚市博物館の石材図鑑など)。気乾状態の一軸圧縮強さ 20MPa、ヤング率 4.5GPa 程度で、均質であるこ とから、クリープ現象の研究対象としてもよく用いられる<sup>18</sup>。



図 4.1.1-(1) 空圧式一軸圧縮クリープ試験装置による精密試験の概略図

② 土岐花崗岩の一般化応力緩和状態(原位置岩盤に想定されるクリープと応力緩和の中間的状態)における力学的挙動を確認する室内試験

2008年度は、土岐花崗岩に対する一般化応力緩和試験を 2007年度に引続き行ない、試験ケース(図 4.1.1-(2))を充実させた。また、試験機の制御プログラムを改良し、試験条件として設定可能な応力とひずみの変化方向を拡張し、これまで実施できなかった条件下での試験ケースを追加した。



ひずみ



# ③ 拡張コンプライアンス可変型構成方程式のまとめ

非線形粘弾性論を拠りどころとして、時間依存性の力学的挙動を表現する基礎式である、拡 張コンプライアンス可変型構成方程式(式4.1.1)<sup>19)</sup>をレビューし、その式に含まれるパラメ ータを実験的に取得する方法を総括した。また、パラメータ取得の難易度や問題点を考察し、 パラメータの信頼性向上のための指針を述べた。さらに、時間依存性の力学的挙動を踏まえ た坑道設計を行なうため岩盤分類の概念を示した。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a_1 \left(\sigma^*\right)^{n_1} \left(\lambda^* - 1\right)^{-m_1} + a_3 \left(\sigma^*\right)^n \left(\lambda^*\right)^m$$
(4.1.1)

コンプライアンス $\lambda = \varepsilon/\sigma$ :ひずみ $\varepsilon$ と応力 $\sigma$ の比

 $\lambda^* (= \lambda / \lambda_0) : \lambda$  を初期値  $\lambda_0$  で正規化した値

 $\sigma^*: \sigma$ を一軸圧縮強度 $\sigma_c$ で正規化した値

 $n: d\lambda^*/dt$ の応力依存性をあらわすパラメータ、値が大きいほどわずかな応力の違いで破壊までの寿命が大きく変化する m: 破壊が急激に進むかどうかをあらわすパラメータ

n、mの添字1は一次クリープ現象のパラメータであることを示す。添字の無い方は三次クリープ現象のパラメータ

#### 4.1.3 研究結果

# ① 田下凝灰岩の長期クリープ室内試験

1997年度から継続している田下凝灰岩の長期クリープ試験では、湿潤条件、低応力レベル(破壊応力の3割)で、10年以上経過した後でも測定可能なクリープひずみの増加を示すことが確認された。また、クリープひずみ速度は試験開始から一貫して低下し、経過時間の約-0.9 乗に比例するものであった。これら結果は、短期クリープ試験結果(比較的高応力レベル、破壊応力の6~9割程度)で得られる一次クリープの挙動とほぼ一致することから、非線形粘弾性論を拠りどころとすれば長期クリープと短期クリープが統一的に説明できると考えられる(図4.1.2-(1))。



図 4.1.2-(1) 長期・短期クリープ試験の結果の一致

# ② 土岐花崗岩の一般化応力緩和状態における力学的挙動を確認する室内試験

土岐花崗岩の一般化応力緩和試験(図 4.1.1-(2))では、今回新たに試験が可能となった条件 を含め、これまで実施した全ての試験ケースの結果(図 4.1.2-(2)左)で、試験開始後 100s 程 度まで対数クリープ則(式 4.1.2)が成立することを確認した。ここで、 $\delta \epsilon$ はひずみ変化、tは経過時間、Pは定数である。これは従来のクリープ試験で得られている知見と同じである。

$$\delta \varepsilon = P \cdot \log(t)$$

(4.1.2)



図 4.1.2-(2) 一般化応力緩和試験の結果(左)と試験終了後に行った一軸圧縮試験結果(右)

また、試験ケースで設定した荷重・ひずみの変化条件が異なっても、試験終了後の試験片の 一軸圧縮強度はどれもほぼ同じであった(図 4.1.2-(2)右)。このことは、一軸圧縮強度に及ぼ す応力履歴の影響が小さいことを示している。その他、土岐花崗岩に関する既往の拡張コン プライアンス可変型構成方程式(式 4.1.1)のパラメータ(*n*<sub>1</sub>=52、*m*<sub>1</sub>=4~5)は、この一 般化応力緩和試験の結果と整合し、同パラメータの信頼性が向上した。

#### ③ 拡張コンプライアンス可変型構成方程式のまとめ

コンプライアンス可変型構成方程式(以下、構成式)に含まれるパラメータの取得は、現在 のところ表 4.1.1-(1)に示した三段階で行なうことが考えられている。表に示した第1段階で は、一軸圧縮載荷により構成式のパラメータを求める手法は完成している。三軸圧縮載荷も 同様であるが、実施のための所要時間とコストがやや難点である。表に示した第2段階以降 では、第1段階の実験で求めた構成式のパラメータやそれを用いた計算結果の信頼性を、比 較的長い期間の調査・試験によって検証していくことを示しているが、ここで用いられる手 段の知見はまだ少ない。

一方、構成式の工学的な応用を考えると、以下のような課題が認められる。

- 正確な把握が必要な脆弱岩盤ほど多くの試験片を要するが、その試験片が作成し難い
- ・現状のやり方では、成果を得るまでに比較的長い期間と高いコストが要求される
- ・構成式のパラメータを施工管理の指標に用いることは直感的でなく理解しにくい

これを解決する概念として、非線形粘弾性的な性質の程度を用いて岩盤を区分することが考 えられる。例えば、非線形粘弾性的な性質を"強い、普通、弱い"の3段階程度に区分する ことは可能と考えられる(表 4.1.1-(2))。

	目的	試験および 原位置調査	構成方程式 および計算	検討項目	所要試験片	所要日数	備考
第一段階	1-1 一軸応力下で の基礎データ	歪速度を切換えた 一軸圧縮強度試験	構成方程式の パラメータ		5	1日	到達度合:80%
(所要期間は試験片 整形を含めて1ヶ月)	1-2 三軸応力下で の基礎データ	歪速度を切換えた 三軸圧縮強度試験	構成方程式のパラ メータ,破壊条件		20	1週間	到達度合60%
第二段階	2-1 試計算		コンプライアンス 可変型構成方程式 による試計算	一軸,三軸応力下で の応力-歪曲線,一 般化応力緩和挙動		1週間	特に問題点は無い
(所要期間は3ヶ月)	2-2 計算結果と試 験結果(中期)を 比較・検討	一般化応力緩和 試験(中期)		試計算結果の妥当性 の確認	20(5条件×3本 +予備)	1ヶ月	到達度合:60%
	<ul> <li>2-3 構成方程式の 精密化と試計算 (必要に応じてお こなう)</li> </ul>		コンプライアンス 可変型構成方程式 の精密化と試計算	一軸,三軸応力下で の応力-歪曲線,一 般化応力緩和挙動		1ヶ月	到達度合:80%
					•	•	
第三段階	3-1 計算結果と試 験結果(長期)を 比較・検討	一般化応力緩和 試験(長期)		再確認. 必要に応じ て構成方程式を補正	20(5条件×3本 +予備)	1年	到達度合:40%
(所要期間は数年)	3-2 実際の構造物 の検討(計算)		岩盤内構造物を 対象とした計算	4		1年	到達度合:60%
	3-3 実際の構造物 等の検討(調査)	原位置調査		調査結果と計算結果 との比較・検討		数年	到達度合:20%

表 4.1.1-(1) コンプライアンス可変型構成方程式のパラメータ評価

表 4.1.1-(2) 粘弾性(時間依存性)を考慮した岩盤区分のイメージ

粘弾性 (時間依存性)	対応	適用事例 (Wet:浸潤、Dry:乾燥状態)
強い	短期でも粘弾性を考慮すべき	凝灰岩 Wet 堆積岩 Wet
普通	長期のみ粘弾性を考慮	花崗岩 Wet 強固な結晶質岩 Wet 凝灰岩 Dry 堆積岩 Dry
弱い	考慮しなくてよい	花崗岩 Dry 強固な結晶質岩 Dry

#### 4.1.4 考察

初めに、田下凝灰岩の長期クリープ室内試験について述べる。このように観測期間が長期に及 ぶ試験では、試験条件が安定し易い測定法によることが望ましく、クリープ試験ならば重りを試 験体に載せて静的荷重を与える方法が第一に考えられる。しかし、結晶質岩を対象とすると、比 較的その強度が大きいため、重りを載せる方法では所定の応力レベルを得ることが難しい。今回、 図 4.1.1-(1)の試験装置を空圧載荷式としたのはこの理由による。そのため、十分な配慮にもかか わらず、空気漏洩や配管詰まり等の障害による試験の中断や条件の変動は避けられなかった。し かし、10年以上に及ぶ経験により、試験の障害はメンテナンスで回復可能であり、また、条件が 変動した観測データも補正できることを確認しており、これらは重要なノウハウと考えている。

図 4.1.2-(1)から、非線形粘弾性論を用いて長期クリープと短期クリープの統一的説明ができる ことが示され、短期試験の結果を用いて長期挙動を予測できる可能性が示唆されたと言える。た だし、統一的説明の過程で、岩石の変形や破壊速度は応力の関数  $g(\sigma^*)$ に比例するとしているが、 現状で  $g(\sigma^*)$ の関数形の選び方は複数あり、選び方で計算されるクリープ寿命が異なる。ゆえに、 統一的説明にはこの点の評価が課題である。

次に、土岐花崗岩の一般化応力緩和状態試験について述べる。実際の坑道周辺岩盤のおかれる 応力・ひずみ変化は、応力緩和とクリープの中間的な状態(一般化応力緩和状態)と考えられる。 今回、そのような条件を再現した試験が実施可能なことを示し、その結果は、既往のクリープ試 験等で得られる知見と整合的であった。すなわち、非線形粘弾性モデルが一般化応力緩和状態に 対しても適用できることを示唆したものと言える。前述した短期、長期クリープの統一的説明に 加えて、一般化応力緩和状態までを統一的に説明できる理論は非常に扱いやすく、それが得られ れば長期岩盤挙動評価手法として有効であると考えられる。

最後に、拡張コンプライアンス可変型構成方程式のまとめについて述べる。長期岩盤挙動評価 手法として実施すべき項目は表 4.1.1-(1)のとおり明確であり、残された課題は、評価結果の検証 と評価結果の工学的な応用と考えられる。これらは知見が少なく今後の研究が必要である。

# 4.1.5 今後の課題

- ・ 田下凝灰岩の長期クリープ室内試験を可能な限り継続し、短期・長期クリープの統一的説明 理論の根拠となるデータを蓄積し、また、岩石の変形や破壊の進む速度 $g(\sigma^*)$ の選び方につい て検討することが課題である。
- 非線形粘弾性論による評価結果(構成式とそのパラメータ、及びこれらを用いた力学的挙動の計算結果等)の検証方法に関する知見の収集と、その検証を、第3段階(研究坑道を利用した研究段階)において実施するための計画立案が課題である。

# 4.2 長期岩盤挙動評価のための理論的研究<sup>20)</sup>

# 4.2.1 目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、処分坑道周辺の岩盤に認められる時間依存性の力 学的挙動の研究の必要性は 4.1.1 で既に述べたとおりである。なお、本研究は、超深地層研究所 計画で対象とする土岐花崗岩には限定せず、土岐花崗岩を含む、主に結晶質岩に共通に認められ る現象の検討を行なうものとした。

結晶質岩から成る岩盤は、様々な階層の不連続面群と不均質物質を内包した複合材料と見るこ とが出来る。その岩盤から巨視的な不連続面群を除いた基質部の岩石で考えると、個々の結晶粒 子と粒界及び粒子内における微視亀裂の集合体と言える。一方、このような集合体において、応 力緩和やクリープ等に代表される時間依存性の力学的挙動が現われる原因は、主に微視亀裂の伝 播によるもので、その伝播は力学・化学連成メカニズムに基づくものと考えられている<sup>21)</sup>。したが って、結晶質岩の長期岩盤挙動を何らかのモデルを用いて評価する際に、実験や観測によるモデ ルの直接的検証ができない条件(時間スケールの大きな条件)に対しては、この力学・化学連成メ カニズムからみて妥当と考えられるモデルとすることがモデルの信頼性を向上させるものと考え られる。そこで、結晶質岩の主要な構成である珪酸塩鉱物を対象とし、応力下での溶解現象を力 学・化学連成現象として定量的に理解し、それを踏まえた微視亀裂の伝播をモデル化し、また、微 視亀裂、結晶粒子や粒界等の微視的要素の挙動を踏まえた集合体としての巨視的挙動の解析理論 の構築を目的とする研究(強不連続解析、均質化解析)を実施している。

# 4.2.2 研究内容

2008年度の研究内容は以下のとおりである。

① 石英単結晶供試体を用いた閉鎖溶液系及び開放溶液系における圧力溶解試験

結晶質岩石の微視レベルの破壊機構に深く関わっている各鉱物の圧縮応力下の化学反応によ る溶解現象を確認するために、石英単結晶供試体を用いた圧力溶解試験を試み、溶解及び再 沈殿した石英表面の形状を「共焦点レーザー走査型顕微鏡」(CLSM: Confocal Laser Scanning Microscope)で観察し、各種条件下における溶解速度を分析した。ここで、常温で pH 調整済 の溶液中に供試体をおいて載荷する閉鎖溶液系と、恒温庫内で pH 調整済の溶液を供試体周囲 で流下させながら載荷する開放溶液系の2種類の実験を実施した。図 4.2.1-(1)に閉鎖溶液系 実験、図 4.2.1-(2)に解放溶液系実験の、それぞれ実験装置の概要を示す。

# ② 内部欠陥を有する結晶質岩の時間依存性挙動の微視・巨視解析に関する理論的考察

結晶質岩に認められるクリープや応力緩和の原因が、破壊力学で扱う即時破壊に至らない低 応力レベルで起こる微視亀裂の伝播であり、そのメカニズムは微視亀裂先端の応力集中によ る珪酸塩鉱物の溶解であることを踏まえて、①溶解に不可欠な水の移動に関する微視・巨視 均質化解析の基礎方程式の導出、②微視亀裂の伝播を扱える強不連続解析と均質化解析との 連携のための基礎方程式の導出を行なった。

なお、これらの導出結果は、記述が若干複雑であるため、4.2.3の研究結果からは割愛し、全容は原子力機構, 2009<sup>20)</sup>を参照されたい。



図 4.2.1-(1) 閉鎖溶液系実験で用いた装置の模式図と試験体(枠内)



図 4.2.1-(2) 開放溶液系実験で用いた装置の模式図と試験体(枠内)

#### 4.2.3 研究結果

石英単結晶を用いた圧力溶解試験の結果について述べる。図 4.2.2-(1)は閉鎖溶液系実験の結果、 図 4.2.2-(2)は開放溶液系実験の結果を、それぞれ、試験体(石英単結晶)の溶解速度について示 したものである。図中に記号で示された実測値に対して求めた溶解速度式も併記する。なお、図 4.2.2-(1)の閉鎖溶液系実験では比較的溶解量が多く、顕微鏡画像より溶解体積を計算することが 可能で、これを用いて溶解速度を計算している。一方、図 4.2.2-(2)の開放溶液系実験では、顕微 鏡画像より体積が定量できる程まで試験体が溶解せず、溶解体積は不明であった。そこで、試験 体を流れた溶液中の石英濃度を定量し、これを用いて溶解速度を計算するものとした。

図 4.2.2-(1)の閉鎖溶液系実験では、試験体を浸漬する溶液の pH または試験体に加える応力の 何れかを変数として、試験開始から約二週間後までの石英溶解量との関係を定量するものとした。 ここで、閉鎖溶液系のため、時間経過とともに試験体が溶けることによって、溶液の性質は初期 値から変動する。図に示した pH は初期値であり、その時間経過の効果は不明である。図をみる と、高 ph、高応力ほど石英の溶解速度が高まることが認められる。

図 4.2.2-(2)の開放溶液系実験では、試験開始後の経過時間を変数として、閉鎖溶液系実験に比較して小さな応力 2 ケースの下で石英溶解量を定量するものとした。図のように、常に初期値の 溶液が試験体に流入するので、試験体が溶けることによる溶液の性質の変化は排除される。図を みると溶解速度はある時間を経過すると一定に収束することが認められる。



』4.2.2-(1) 闭顕溶液糸実験で待られた石英溶解速度と溶解速度コ (左)応力 200MPa (右)pH9、共に温度 20℃



<sup>(</sup>左)応力 9.86MPa (右)13.7MPa、共に温度 35 度

図 4.2.2-(3)は、閉鎖溶液系実験で観察された、試験体(石英単結晶)の溶解後の断面を示している。石英の溶解がピンホール状に局所的に進行しており、これは den Brok<sup>22)</sup>の Island-Channel モデルの正しさを検証したものと思われる。



図 4.2.2-(3) 圧力溶解した試料の断面と Island-Channel モデル<sup>22)</sup>

#### 4.2.4 考察

はじめに、石英単結晶を用いた圧力溶解試験について述べる。図 4.2.2-(1)に示した閉鎖溶液系 実験は、実験が比較的容易にコントロールできるので、石英溶解現象の全容を把握するための第 ーの試験法としたものである。しかし、試験の特性として、一つの試験体から得られるデータが 一定時間後までの石英溶解量の総量で、また、時間経過の途中で試験体が溶けたことによる溶媒 の変質(初期調整時からの pH や化学種の濃度変化)の影響が分離できないため、現象の厳密な 把握には課題の残る方法と言える。そこで、実験のコントロールは難しいが、図 4.2.2-(2)に示し た開放系実験を、2008年度に初めて試行した。その試行段階にて、開放溶液系の溶媒流量コント ロールに問題を抱え、その解決に時間を要したため、今回は試験ケース数が十分に得られていな い。また、与えた試験条件では顕微鏡観察できるほどの溶解量が得られないため、より応力を大 きく、またより長い(今回は 20 日)期間の再実験が必要と考えている。

っぎに、内部欠陥を有する結晶質岩の時間依存性挙動の微視・巨視解析に関する理論的考察で は、微視亀裂先端での化学反応速度式の構築が、現在の最大の課題である。前述した、圧力溶解 試験での石英溶解速度の定量と、ここで示した水の移動に関する基礎方程式の導出は、ともにそ の式の構築で基礎となる要素である。微視亀裂での化学反応速度式が構築された後は、同じくこ こで示した強不連続解析と均質化解析理論を応用して、個々の微視亀裂の伸張に基づく微視・巨視 解析を行ない、解析と実験の一致性等を検討する段階に至るものと考えている。ただし、その際 は、試験体の鉱物粒子や微視亀裂の配向、分布を三次元的にモデル化するが、現在行っている試 験体スライス片の顕微鏡観察では非常に効率が悪く、本成果の工学的応用の際はその改善が必要 と考えられる。

#### 4.2.5 今後の課題

・ 石英単結晶供試体を用いた圧力溶解試験においては、圧力溶解の過程において溶液濃度等の

条件を一定とできる開放溶液系試験についてケース数を増やし、溶解体積の測定し、溶解速 度式の精度を高めることが課題である。

 ・時間依存性挙動の微視・巨視解析に関する理論的考察では、①圧力溶解に不可欠な水の移動 を明らかにし、②微視亀裂先端での圧力溶解の反応速度式を導出し、③実際の微視亀裂の分 布特性を踏まえた強不連続・均質化解析の実施が課題である。

#### 5. 大学・他研究機関との研究協力

# 独立行政法人 産業技術総合研究所:岩芯を用いた応力測定と掘削振動計測による掘削影響領 域の評価に関する基礎的研究

本研究は二ヵ年(2008~2009年度)の計画で実施している共同研究である。2008年度は、ボーリング孔の掘削のみで得られる情報(ボーリングコア及び掘削中の振動)を活用した掘削影響 領域評価手法の開発を目的として、基礎的なデータ収集と分析を行なった。実施項目は、ボーリ ングコアを用いた応力測定(AE/DRA法: Acoustic Emission/Deformation Rate Analysis)と掘 削振動計測である。なお、本研究に必要なボーリング孔の掘削は 2.2 で述べた岩盤力学ボーリン グ調査のもの(08MI-14~08MI-16号孔)と一体化して実施した。

AE/DRA 法によるコアを用いた応力測定(図 5.1.1)では、有効なデータが採取できない試験片 が少なからず存在し、最終的な有効データ数は表 5.1.1 に示すとおりである。コアによって評価 される初期応力状態は異なり、研究坑道周辺の初期応力状態は水平面内の最大主応力(圧縮)が 概ね NW-SE 方向にあるとした岩盤力学ボーリング調査の結果(2.2)と必ずしも一致しなかった。 この理由として、コアが記憶するとされる初期応力状態が、ボーリング孔の掘削過程における一 過性の応力集中、あるいは割れ目の存在や坑道掘削による二次的応力変化の影響を受けている可 能性が考えられる。今後はその程度の確認を行ない、掘削影響の分析等を行なう予定である。



図 5.1.1 AE/DRA 試験の実施状況(産業技術総合研究所)

表 5.1.1 AE/DRA 試験数量

試験片に用いたボーリングコアの採取位置	有効試験片数/採取試験片数
08MI-14 号孔 掘削深度 14.1~15.1m	13/15
08MI-15 号孔 掘削深度 13.3~15.3m	17/18
08MI-16 号孔 掘削深度 12.0~13.0m	10/16
08MI-16 号孔 掘削深度 17.4~18.6m	17/19

掘削振動計測(図 5.1.2)では、ボーリング掘削機上で観測される振源(ソース)波形と研究坑 道内またはボーリング孔内に置いた振動センサーで観測される岩盤伝播後の波形を同期して記録 し、相互に掘削開始など作業イベントとの対応が認められる有効なデータが得られることを確認 した(図 5.1.3)。今後はソースの移動(掘削ビットの移動)に対する観測波形の変化を分析し、 相互相関処理等を用いて岩盤内部の弾性波速度分布の評価等を行なう予定である。



図 5.1.2 ソース波形の採取位置(上)とボーリング孔内への振動センサー挿入状況(下)



図 5.1.3 掘削振動計測における観測波形の例(縦軸の単位:観測孔 µ m/s<sup>2</sup>,他 mm/s<sup>2</sup>)

#### ② 国立大学法人 名古屋大学:地下深部岩盤のひずみ変化のメカニズムに関する研究

本研究は四ヵ年(2006~2009年度)の計画で実施している共同研究である。2008年度は、高 精度ひずみ計(2007年度に設置)を用いた計測を継続し、2008年10月までの岩盤ひずみ変化を 取得した(図 5.2.1)。このうち、主立坑のひずみ変化では、変化が比較的安定している2008年2 月までの期間と、それ以降の変化が顕著に不安定となる期間があることが認められた。なお、換 気立坑の高精度ひずみ計は、2008年1月に一時的に稼動したのみで、他の期間は欠測しているこ とから、ここでは示さない。

ひずみ変化が不安定な期間において、計画では岩盤に固定されるひずみ計の回転が数度にわた り観察され、累積した回転量は約 90度に達している。この期間に切羽は進行しており、切羽から ひずみ計までの距離は徐々に短くなるが、最短でも鉛直方向に約 200m 離れている。このような 条件において周囲を拘束されたひずみ計を取り巻く岩盤が約 90 度も回転するとは考えられない ため、ひずみ計もしくはその岩盤への固定に不具合が生じた可能性が高いと考えられる。



図 5.2.1 主立坑パイロットボーリング(06MI-02 号孔) 孔底の高精度ひずみ計の記録(全データ)

次に、ひずみ変化が安定している期間のデータから、潮汐の影響と考えられる変化を分析した (図 5.2.2・上)。また、ひずみ計から約 100m 離れた DH・2 号孔(図 5.2.3)の間隙水圧変化(た だしひずみ計とほぼ同深度の値、以下同様)と当地域に隣接する名古屋沿岸の潮位において、こ の岩盤ひずみと対応する変化を認めた(図 5.2.2・下)。図 5.2.2 では、間隙水圧と潮位の変化の位 相差は小さいことに比較して、岩盤ひずみの変化の位相はこれらより明らかに遅れている。また、 間隙水圧と潮位の変化では認められない、非線形な成分が岩盤ひずみの変化には混在している。 これら現象のメカニズムは不明である。

図 5.2.2-上から、潮汐に対応した岩盤ひずみ変化の振幅を読み取ると $\varepsilon = 1 \sim 2\mu$ 程度である。 ひずみ計をおいた岩盤の弾性係数Eを約 50GPa (この値は第1段階モデルでひずみ計の設置深度 に予想される 50%強度接線ヤング率「図 1.2」を参考とした)とすれば、応力変化量 $\sigma = E\varepsilon$ は 50~100kPa 程度となる。一方、図 5.2.2-下から、DH-2 号孔の間隙水圧変動は水頭差で1m 未満 なので、これによる応力変化量は10kPa未満と考えられる。したがって、ひずみ計位置とDH-2 号孔で間隙水圧が同じと考えると、ひずみ計の示す変化は間隙水圧変化から予想される変化より 5~10 倍大きい。ここで、双方のオーダーが一致するには、上記Eが想定した 50GPa より 1/10 程度小さくなければならない。図 3.3.3-(1)をみると、主立坑の深度 200m~300m で高角度の断層 帯が出現していることから、同様の断層帯がひずみ計位置(主立坑掘削位置の深度 500m)にも 存在して、Eの小さな脆弱部となっている可能性が考えられる。



図 5.2.2 潮汐力の影響を受けた岩盤ひずみの状況



図 5.2.3 ひずみ計と DH-2 号孔の位置関係(原子力機構, 2007<sup>2)</sup>に加筆)

#### 6. まとめ

2008 年度においては、以下に示す項目の、岩盤力学に関する調査研究を実施した。

① 岩盤ひずみ計測及び岩盤力学ボーリング調査(深度 200m ボーリング横坑「換気立坑側」)

② 第2段階の調査研究結果に基づくモデル化・解析

③結晶質岩における長期岩盤挙動評価のための研究

④ 大学・他研究機関との共同研究

①においては、換気立坑で掘削前の岩盤内に変位計とひずみ計を埋設し、切羽の到達に先行し て発生する岩盤ひずみ・変位の程度を把握した。その結果、プレグラウト時の岩盤に 10~40 µ 程 度の伸びひずみを認め、その値はグラウト注入圧力と整合した。また、掘削で発生した応力解放 率は切羽到達時で 80~100%であり、ひずみ・変位の全体量は、岩盤の限界ひずみ(300 µ 以上) を下回り、計測位置(立坑側壁から 0.2D 以上)の力学的掘削損傷は小さいと考えられた。

また、換気立坑 200m ボーリング横坑で延長約 20m のボーリング孔を掘削し、横坑周辺の地質 環境のうち力学的特性を把握した。その結果、コアの物理・力学特性にボーリング孔口からの距 離に関係する変化を特に認めず、孔口から 5m より深部では坑道掘削によるコア(土岐花崗岩) の物理・力学特性を変化させる損傷を認めなかった。また、コアの異方性は、試験結果のばらつ き (20~40%) に比較して無視できるほど小さい (7.7%) ことを確認した。岩盤初期応力は、最 大主応力 ( $\sigma_1$ :10.6MPa) が概ね水平で NW-SE 方向にあり、応力値から土被り圧と判断される最 小主応力 ( $\sigma_3$ :2.6Mpa) を水平方向から約 30 度傾斜した方向に認めた。

続いて②では、2008年度までに第2段階調査として実施した、深度100m、200m岩盤力学ボ ーリング調査等の結果を用い、第1段階モデルとその根拠とした地表からの調査結果(MIZ-1号 孔調査)の妥当性を検討した。その結果、健岩部において坑道地点での物理・力学的特性及び初 期応力は、第1段階調査(MIZ-1号孔)の結果と概ね整合することが確認された。掘削ずりを用 いた試験による物理・力学的特性の高頻度な検証によっても同様であった。一方、BTV や壁面観 察から把握されるスケールの割れ目については、第1段階調査の限界により、高角度割れ目群や 主立坑近傍の断層に付随する割れ目は、第2段階調査で初めて得られる情報と考えられた。

さらに、③では、土岐花崗岩の非線形粘弾性挙動(時間依存性の力学的挙動)の現象論的手法 による検討を行なった。土岐花崗岩研究の予察として位置づけた10年を超える田下凝灰岩の長期 クリープ室内試験から、岩石の変形や破壊速度を示す関数形が未確定であるものの、非線形粘弾 性モデルを拠りどころにすれば短期試験の結果を用いて長期挙動を予測できる可能性が示された。 また、土岐花崗岩を用いた試験結果より、この非線形粘弾性モデルを用いると応力緩和とクリー プの中間的な状態(一般化応力緩和状態)が説明可能なことも示された。

③では、土岐花崗岩を含む結晶質岩に共通に認められると考えられる非線形粘弾性挙動を、微 視亀裂の伝播(力学・化学連成現象)を踏まえて解析モデル化するために、理論的手法による検討 を行なった。その結果、実験ケース数は少ないが、石英溶解試験によって解析モデルの基礎とな る微視亀裂先端での化学反応速度式に必要な石英溶解速度とその溶解速度式が得られた。

④として2件の共同研究を実施した。調査密度や精度が第1段階以上に必要となる第2段階以降の調査技術の開発として、力学的な掘削影響領域を効率よく多数調査できることを目標とする 調査手法の開発、岩盤ひずみを潮汐変動オーダーまで高精度にモニタリングする手法の適用性確 認について、それぞれ現在までの知見を示した。

## 参考文献、公表成果一覧

- 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) 大久保誠介: "結晶質岩を対象とした長期岩盤挙動評価のための現象論的研究", JNC TJ7400 2005-004 (2005)
- 4) 市川康明: "結晶質岩を対象とした長期岩盤挙動評価のための理論的研究", JNC TJ7400 2005-003 (2005)
- 5) 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)
- 6) 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)深度 100m における岩盤力 学ボーリング調査", JAEA-Research 2010-002 (2010)
- 7) 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)
- 8) 平野 享, 松井裕哉, 木下晴信: "結晶質岩における大深度立坑掘削を対象とした岩盤の変位・ひ ずみ計測", 土木学会第 64 回年次学術講演会概要集, Ⅲ-210, pp.419-420 (2009)
- 9) 福田和寛: "花崗岩中のトンネル掘削に伴う岩盤挙動と物性変化", 第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.231-236 (1990)
- 10) 平野 享, 石井洋司, 松井裕哉: "瑞浪超深地層研究所 深度 200m ボーリング横坑における初期 応力測定", 資源・素材 2009(札幌), 一般ポスター発表 【P】 要旨, pp. 1 (2009)
- 11) 加藤春實, 奈良禎太, 金子勝比古, 松木浩二, 佐藤隆司, 塚本 斉, 北川有一: "多面体試験片を用いた3次元弾性波速度測定による初期地圧評価", 資源・素材(札幌), 企画発表【A11-2】, pp.283-286 (2009)
- 12) 国土地理院: "日本の地殻水平ひずみ (1883 年~1985 年)", 日本国土地理院 (1990)
- 13) 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)
- 14) 西尾和久ほか: "超深地層研究所計画年度報告書(2007年度)", JAEA-Review 2009-002 (2009)
- 15) 瀬野康弘ほか: "クラックテンソル・仮想割れ目モデルによる瑞浪超深地層研究所研究坑道の 掘削影響予測解析", JAEA-Research 2007-081 (2008)
- 16) 瀬野康弘ほか: "MBC モデルによる瑞浪超深地層研究所研究坑道の掘削影響予測解析", JAEA-Research 2007-080 (2008)
- 17) 大久保誠介ほか: "結晶質岩を対象とした長期岩盤挙動評価のための現象論的研究" JAEA-Research 2009-020 (2009).
- 18) 羽柴公博,大久保誠介,福井勝則: "可視化ベッセルによる田下凝灰岩の三軸圧縮クリープの 観察",資源と素材, Vol.120, pp.190-196 (2004).
- 19) 大久保誠介,福井勝則,羽柴公博: "コンプライアンス可変型構成方程式の拡張とクリープ試験結果による検討",資源・素材学会誌, Vol.118, pp.737-744 (2002)
- 20) 市川康明ほか: "結晶質岩を対象とした長期岩盤挙動評価のための理論的研究" JAEA-Research 2009-027 (2009).
- 21) Cristescu, N.: "Rock Rheology", Kluwer Academic Pub. (1989)
- 22) den Brok, S.: "Effect of microcracking on pressure-solution strain rate: the Gratz grainboundary model", Geol., 26(10), pp.915-918 (1998)

This is a blank page.

表 1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本単位				
巫平里	名称	記号			
長さ	メートル	m			
質 量	キログラム	kg			
時 間	秒	s			
電 流	アンペア	А			
熱力学温度	ケルビン	Κ			
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						
<sub>知 고 문</sub> SI 基本	5単位					
和立重 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 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 <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	$- \vdash \nu = kg/m^2$					
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・	$- h \mu A/m^2$					
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	$\nu mol/m^3$					
質量濃度 キログラム毎立法メ	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()(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) これらは電気元量あるいは次元1ともつ量であるが、そのこと を表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

			SI 組立甲位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
平 面 鱼	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
· 協 方 立 体 鱼	ステラジア、/(b)	er <sup>(c)</sup>	1 (b)	$m^{2/m^2}$
周 波 数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz	1	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	Ν		m kg s <sup>-2</sup>
压力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	$m^{-1} kg s^{-2}$
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 <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷,電気量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$
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	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^{\cdot 2} A^{\cdot 1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m <sup>2</sup>	$\text{kg s}^{2}\text{A}^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> cd
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量,比エネルギー分与,	グレイ	Gv	J/kg	$m^2 s^{-2}$
カーマ				
線量当量,周辺線量当量,方向	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	$m^2 s^{2}$
性線量当量, 個人線量当量		2.		
酸素活性	カタール	kat		s <sup>1</sup> mol

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

(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、ベクレルは放射性抜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。
 (e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度で表すために使用される。
 (f)数単位を通の大きさは同一である。したがって、温度差や温度問隔を表す数値はとちらの単位で表しても同じである。
 (f)数単性核種の放射能(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

	S	I 組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘质	E パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2 kg s^2$
表 面 張 九	コニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角 速 度	ミラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
角 加 速 度	E 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	E ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
熱容量,エントロピー	- ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$
比熱容量, 比エントロピー	- ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	- ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{2}$
熱 伝 導 率	『ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	- ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電 荷 密 度	E クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> sA
表面電荷	ラクーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> sA
電 束 密 度 , 電 気 変 位	エクーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> 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 辛	ミ ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエネルギー	- ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー,モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^{2} kg s^{2} K^{1} mol^{1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> sA
吸収線量率	ミグレイ毎秒	Gy/s	$m^2 s^{-3}$
放射 強度	E 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	<b>E</b> ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	たカタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> mol

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

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

\_

表7.	SIに属さないが、	SIと併用される単位で、	SI 単位で
	キャトアルは	ジャートレートレート	

衣される剱値が美験的に待られるもの				
名称	記号	SI 単位で表される数値		
電 子 ボ ル	⊦ eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J		
ダルト	ン Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg		
統一原子質量単	位u	1u=1 Da		
天 文 単	位 ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m		

表8.SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位				
名称			記号	SI 単位で表される数値
バ	1	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートルmmHg			mmHg	1mmHg=133.322Pa
オン	グストロー	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海		里	М	1 M=1852m
バ	-	$\sim$	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm)2=10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
1	ッ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネ	-	パ	Np	
ベ		N	В	↓ 51単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
デ	ジベ	N	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	Р	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s		
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$		
スチルブ	$^{\rm sb}$	1 sb =1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>		
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx		
ガル	Gal	1 Gal =1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>		
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$		
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{2} = 10^{4} \text{T}$		
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe ≙ (10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>		

(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
+	ユ		IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
$\nu$	ン	ŀ	ゲ	$\sim$	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				ド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
$\nu$				L	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	I.		ル	"		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
ŀ				N	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カ			IJ	ļ	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)
Ξ	ク		П	ン	μ	$1 \text{ u} = 1 \text{ um} = 10^{-6} \text{ m}$

この印刷物は再生紙を使用しています