JAEA-Research 2013-031



# 結晶質岩を対象とした長期岩盤挙動評価手法 に関する研究(2012年度) (委託研究)

Study on Crystalline Rock for Evaluating Method of Long-term Behavior (FY2012) (Contract Research)

福井 勝則	羽柴 公博	丹野 剛男	引間 亮-
真田 祐幸	佐藤 稔紀		

Katsunori FUKUI, Kimihiro HASHIBA, Takeo TANNO, Ryoichi HIKIMA Hiroyuki SANADA 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

December 2013

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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

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

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency. 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan

Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2013

# 結晶質岩を対象とした長期岩盤挙動評価手法に関する研究(2012年度) (委託研究)

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット 福井 勝則\*1、羽柴 公博\*1、 丹野 剛男\*1、引間 亮一\*2、真田 祐幸、佐藤 稔紀

## (2013年8月22日受理)

岩石や岩盤は、クリープや応力緩和のような時間依存性挙動を示すことが知られている。高レ ベル放射性廃棄物の地層処分時においては、建設時および操業時は言うまでもなく、坑道埋め戻 し後も千年程度の長期にわたる坑道の安定性の評価が要求される。このため、長期にわたる岩石 や岩盤の時間依存性挙動を把握することは、そのような坑道の長期安定性を評価する上で重要な 課題である。そこで、岩石や岩盤の時間依存性挙動を、室内クリープ試験などの精密な試験や観 察・計測から直接的に検討する手法(現象論的方法)で解明し、岩盤構造物の長期挙動予測評価 手法を開発する研究を行ってきた。これまでの研究により、現象を把握するための試験法、非線 形粘弾性論を拠りどころとした現象の評価方法をほぼ確立し、また瑞浪超深地層研究所周辺に分 布する黒雲母花崗岩(土岐花崗岩)のモデルを作成するためのパラメータを取得した。残された 課題は、得られたモデルとパラメータの信頼性の検討である。

本報告書は、2012 年度に実施した研究をまとめたものである。第1章では、これまでの研究 内容とその背景を概括した。第2章では、1997 年度から継続している田下凝灰岩のクリープ試 験結果について報告した。第3章では、岩石の時間依存性挙動把握のため、載荷速度依存性に関 するデータの整理と分析を行った。第4章では、原位置試験計画の策定のため、空洞の周辺岩盤 に生じる応力が一本の円形坑道を掘削した際の周辺岩盤の応力状態よりも大きくなるような条件 下での坑道の安定性について検討した。

本報告書は、日本原子力研究開発機構との委託研究契約に基づき、東京大学が実施した研究の成 果に関するものである。 東濃地科学センター(駐在):〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内 1-64 ※1 技術開発協力員(現:株式会社 3D 地科学研究所)

- ※2 技術開発協力員(現:西松建設株式会社)
- \*1 東京大学

## Study on Crystalline Rock for Evaluating Method of Long-term Behavior (FY2012) (Contract Research)

Katsunori FUKUI<sup>\*1</sup>, Kimihiro HASHIBA<sup>\*1</sup>, Takeo TANNO<sup>\*1</sup>, Ryoichi HIKIMA<sup>\*2</sup>, Hiroyuki SANADA and Toshinori SATO

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

> > (Received August 22, 2013)

Rock shows time-dependent behavior such as creep/relaxation. With respect to high-level radioactive waste disposal, knowledge of the long-term mechanical stability of shafts and galleries excavated in rock are required, over a period of thousands of years after closure as well as during construction and operation. Therefore, it is very important to understand the time-dependent behavior of rock for evaluating long-term mechanical stability.

The purpose of this study is to determine the mechanisms of time-dependent behavior of rock by the precise test (e.g. laboratory creep test), observation and measurement and to develop methods for evaluating long-term mechanical stability. In previous works, testing techniques were established and basic evaluation methods were developed. Recently, some parameters, which required for simulation of time-dependent behavior, were determined for the modeling of biotite granite (Toki granite) distributed around the Mizunami underground research laboratory. However, we were not able to obtain enough data to assess the reliability of the method to evaluate these parameters.

This report describes the results of the research activities carried out in fiscal year 2012. In Chapter 1, we provide background and an overview of this study. In Chapter 2, the results of a long-term creep test on Tage tuff, started in fiscal year 1997, are described. In Chapter 3, the experimental results concerning the loading-rate dependency of rock strength were examined to understand the time-dependent behavior of rock. In Chapter 4, the stability of tunnels, under conditions which rock stress is larger than that around a circular tunnel, were examined to obtain useful information on the future plan for in-situ tests in the underground research laboratory.

Keywords: Crystalline Rock, Loading-rate Dependency of Strength, Creep, Stability of Tunnels, Planning of In Situ Experiment

This work was perfomed by the University of Tokyo under contract with Japan Atomic Energy Agency.

<sup>\*1</sup> Collaborating Engineer (Present affiliation : 3D Geoscience, Inc.)

<sup>\*2</sup> Collaborating Engineer (Present affiliation : Nishimatsu Construction Co., Ltd.)

<sup>\*1</sup> The University of Tokyo

# 目 次

1. はじめに	1
2. 堆積岩(田下凝灰岩)の長期クリープ試験	3
2.1 試料岩石と試験方法	3
2.2 試験装置の維持管理	4
2.3 試験結果	5
3. 岩石の時間依存性挙動把握のためのデータの整理と分析	8
3.1 岩石の時間依存性挙動に関するこれまでの研究	8
3.2 岩石強度の載荷速度依存性に関するこれまでの研究	8
3.3 岩石強度の時間依存性を調べるための試験方法	9
3.4 周圧の加わっていない条件下での結果	11
3.5 周圧下での結果	. 14
3.6 亀裂が多く生じている試験片での結果	. 16
3.7 寸法効果	. 17
3.8 本章のまとめ	. 17
4. 研究坑道を利用した原位置試験計画に関する検討	. 18
4.1 これまでの数値計算試験の結果	. 18
4.2 楕円形坑道周辺の応力場と破壊限接近度	. 18
4.3 連設坑道周辺の応力場と破壊限接近度	. 43
4.4 原位置試験手法に関する検討	. 45
4.5 本章のまとめ	. 46
5. まとめ	. 48
参考文献	. 49

# CONTENTS

1. Introduction 1
2. Long-term creep test of Tage tuff
2.1 Sample and testing method
2.2 Maintenance of equipment 4
2.3 Results
3. Data reduction and analysis for time dependent behavior of rock
3.1 Previous research of time dependent behavior of rock
3.2 Previous research of loading-rate dependency of rock strength
3.3 Testing methods for understanding time dependent behavior of rock
3.4 Result under unconfined condition11
3.5 Result under confined condition14
3.6 Result of compression tests with dameged rock sample
3.7 Scale effect
3.8 Summary
4. Study of future plan for in-situ testing in underground research laboratory 18
4.1 Previous research of numerical analysis18
4.2 Stress field and stress severity around an ellipsoidal tunnel
4.3 Stress field and stress severity around multi tunnels
4.4 Study of in-situ testing
4.5 Summary
5. Conclusions
References

図リスト
------

図 2.1.1 空圧式クリープ試験機の概略図
図 2.1.2 供試体周辺の試験装置
図 2.3.1 クリープ歪およびシリンダ内の圧力の変化(2011 年~2012 年)6
図 2.3.2 クリープ歪および水温・室温の変化(2011 年~2012 年)
図 2.3.3 クリープ歪およびシリンダ内の圧力の変化(1997 年~2012 年)
図 3.3.1 n を取得するための試験方法10
図 3.5.1 三軸圧縮試験での正規化した強度と正規化した nの関係15
図 4.2.1 計算に用いた楕円形坑道の模式図
図 4.2.2 楕円形坑道の短径/長径の変化に伴う形状の変化
図 4.2.3 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h/\sigma_v$ =1, $\alpha$ =0)21
図 4.2.4 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h/\sigma_v=2$ , $\alpha=0$ )22
図 4.2.5 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h/\sigma_v$ =3, $\alpha$ =0)23
図 4.2.6 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h/\sigma_v$ =4, $\alpha$ =0)24
図 4.2.7 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h/\sigma_v$ =1.5, $\alpha$ =0)26
図 4.2.8 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h / \sigma_v = 1.5$ , $\alpha = \pi / 8$ )27
図 4.2.9 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h/\sigma_v$ =1.5, $\alpha$ = $\pi/4$ )28
図 4.2.10 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h/\sigma_v$ =1.5, $\alpha$ =3 $\pi/8$ ) 29
図 4.2.11 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h/\sigma_v$ =1.5, $\alpha$ = $\pi/2$ )…30
図 4.2.12 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h/\sigma_v$ =2.5, $\alpha$ =0)31
図 4.2.13 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h/\sigma_v$ =2.5, $\alpha$ = $\pi/8$ )…32
図 4.2.14 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h/\sigma_v$ =2.5, $\alpha$ = $\pi/4$ )…33
図 4.2.15 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h/\sigma_v$ =2.5, $\alpha$ =3 $\pi/8$ ) 34
図 4.2.16 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h/\sigma_v$ =2.5, $\alpha$ = $\pi/2$ )…35
図 4.2.17 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h/\sigma_v$ =3.5, $\alpha$ =0)36
図 4.2.18 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h/\sigma_v$ =3.5, $\alpha$ = $\pi/8$ )…37
図 4.2.19 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h/\sigma_v$ =3.5, $\alpha$ = $\pi/4$ )…38
図 4.2.20 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h/\sigma_v$ =3.5, $\alpha$ =3 $\pi/8$ )·39
図 4.2.21 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h/\sigma_v$ =3.5, $\alpha$ = $\pi/2$ )…40
図 4.2.22(1) 坑道の短径/長径と破壊限接近度の最大値の関係(α=0, π/8)41
図 4.2.22(2) 坑道の短径/長径と破壊限接近度の最大値の関係(α=π/4,3π/8)42
図 4.2.22(3) 坑道の短径/長径と破壊限接近度の最大値の関係(α=π/2)43
図 4.3.1 計算に用いた多連設坑道の模式図44
図 4.3.2 多連設坑道の鉱柱における破壊限接近度44
図 4.4.1 破壊限接近度と破壊までの寿命の関係46

# 表リスト

表 3.4.1(1) 周圧の加わっていない条件下での結果	2
表 3.4.1(2) 周圧の加わっていない条件下での結果	3
表 3.4.2 三城目安山岩の n の平均値、標準偏差、変動係数	4
表 3.5.1(1) 周圧下での結果	4
表 3.5.1(2) 周圧下での結果	5
表 3.6.1 残留強度領域における結果	6
表 3.6.2 破壊後に圧密した試験片での結果	6
表 4.2.1 計算に用いた値	0

#### 1. はじめに

本研究は1994年度~2003年度1)-10)の研究を基礎としている。

1994 年度りは、空圧式クリープ試験機の改良および稲田花崗岩の P 波速度やシュミットハンマ ー試験などを行った。1995年度2は、空圧式クリープ試験機を使用して、湿潤状態の田下凝灰岩 のクリープ試験を行った。また応力-歪曲線を得るために、サーボ試験機を用いて一軸圧縮試験 と一軸引張試験および稲田花崗岩の短期クリープ試験を行った。さらに、1996年度に開始する予 定の稲田花崗岩を用いたクリープ試験のために耐久性と安定性の向上を目的とした油圧式クリー プ試験機の改良を行った。特に変位計、歪アンプ、デジタルボルトメータおよびパーソナルコン ピュータから構成される測定装置は新しいものと取替えた。1996年度<sup>3)</sup>は、クリープ試験、圧縮 試験および引張試験を行った。また、2 つの様式(油圧式と空圧式)の周圧維持装置の仕様を検 討した。1997 年度4は、従来の結果を踏まえた上で、クリープ試験、圧縮試験および引張試験を 行った。また、田下凝灰岩のクリープ試験および稲田花崗岩の中期クリープ試験の結果について 報告した。なお、クリープ試験はともに湿潤状態で行った。1998年度5は、田下凝灰岩の長期ク リープ試験を引続き行い、サーボ試験機を用いた中期クリープ試験も行った。白浜砂岩ではクリ ープ応力レベルが一軸圧縮強度の17%でもかなりのクリープ変形量が確認された。さらに、三軸 圧縮試験、一軸引張応力下での除荷・載荷試験を行った。1999年度~2002年度6.7.8.9は、田下 凝灰岩のクリープ試験を引続き行った。また、多連油圧式クリープ試験機と可視化周圧ベッセル を開発し、クリープ試験のデータを得ることならびに破壊時の供試体の状況を観察することに成 功した。2003年度10は、これまでの研究を継続して行うとともに、10年間にわたる研究の経緯 と成果をまとめた。1994年度から2003年度までの10年間の研究によって、岩盤の時間依存性 挙動を予測評価するための基礎(試験法とモデル)を構築した。

日本原子力研究開発機構の進める超深地層研究所計画<sup>11)</sup>は、結晶質岩を主な調査・研究対象と し、深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備等を図るもので、2004年度に「研究坑道 の掘削を伴う研究段階(第2段階)」を開始した。これに合わせて、時間依存性挙動の研究は、 主現象であるクリープと応力緩和現象の現象論的な解明をテーマとし、原位置における時間依存 性挙動の予測評価手法の開発と、その手法を用いた研究坑道での原位置試験による検証を目標と する新たな研究段階に移行した。

2004年度<sup>12</sup>は、引続き田下凝灰岩のクリープ試験を行った。また、中間温度領域におけるクリ ープ試験と低応力下でのクリープ試験を行った。さらに、時間依存性挙動のメカニズムについて 検討し、試験結果のばらつきについて考察を行った。2005年度<sup>13</sup>は、中間温度領域におけるクリ ープ試験を実施した。また、大久保が提案した岩石の時間依存性挙動を考慮したコンプライアン ス可変型構成方程式<sup>14),15),16),17)</sup>中のパラメータを求めるための新しい試験方法について報告した。 さらに、一般化応力緩和試験に関する計画および TBM のカッターヘッドのスラスト/回転トルク から原位置で岩盤強度を推定する方法を提案した。2006年度<sup>13</sup>は、土岐花崗岩を用いて力学試 験を行い、その結果から構成方程式のパラメータの取得と数値実験を実施した。さらに、岩盤の 不均一性評価技術の開発を目的として、さく岩機により岩盤強度のばらつきを測定・評価する手 法について検討するとともに、岩盤の長期挙動評価を目的とした新岩盤分類法についても検討し た。2007年度<sup>18</sup>は、一般化応力緩和試験をサーボ制御試験機で行うための制御プログラムを開発 し、開発したプログラムを用いて土岐花崗岩の一般化応力緩和試験を行い基礎的なデータを得る ことに成功した。また、従来の三次クリープを対象としたコンプライアンス可変型構成方程式に ついて、一次クリープも表現できるように構成方程式を拡張し、拡張したコンプライアンス可変 型構成方程式について解析的に検討した。さらに、得られたデータを基にし、構成方程式のパラ メータを求めるとともに数値実験を実施した。2008年度<sup>19</sup>は、これまでの10年間以上の研究に 基づき、クリープ試験装置の試験機本体、圧力制御装置、センサーについてその取扱い方法やメ ンテナンスを実施した実績についてまとめた。一般化応力緩和試験については、それを行うため のサーボ試験機の制御プログラムを改良し、土岐花崗岩の試験結果を蓄積した。さらに、時間依 存性挙動を重要な要因として考慮した岩盤分類方法の考えを提案した。2009年度<sup>20</sup>は、岩石を対 象にした構成方程式とそのパラメータの取得法についてまとめた。さらに、拡張したコンプライ アンス可変型構成方程式を用いた有限要素解析により、土岐花崗岩に掘削した坑道周辺の岩盤の 長期挙動に関する予察的検討を行った。2010年度<sup>21</sup>は、岩石を対象にした構成方程式とそのパラ メータの取得、原位置試験計画策定のための基礎的な検討を進めた。また、地下深部における長 期空洞安定性評価では岩盤の長期挙動を考慮した破壊基準が必要であるため、長期挙動を考慮し た破壊基準に関する既往の研究事例のレビューおよびそれに基づく岩盤の破壊基準の設定に関す る検討を行った。

2012 年度は、田下凝灰岩のクリープ試験を引続き行い、試験を開始してから 15.5 年以上を経 過した。また、岩石の時間依存性挙動把握のため、載荷速度依存性に関するデータの整理と分析 を行った。さらに、原位置試験計画の策定のため、空洞の周辺岩盤に生じる応力が一本の円形坑 道を掘削した際の周辺岩盤の応力状態よりも大きくなるような条件下(楕円形坑道、多連接坑道) での坑道の安定性について検討した。

## 2. 堆積岩(田下凝灰岩)の長期クリープ試験

本章では、試験を開始してから15.5年以上を経過した、空圧式クリープ試験機による田下凝灰 岩の長期クリープ試験について述べる。

## 2.1 試料岩石と試験方法

試料岩石および試験方法は、既報21)と同様で以下の通りである。

- 岩 石:田下凝灰岩
- 試 験 機:空圧式クリープ試験機(図 2.1.1、図 2.1.2)
- 環 境:常温下、湿潤状態
- 試 験 片: 直径 25mm×高さ 50mm の円柱形
- クリープ応力: 2.8MPa [一軸圧縮強度(9.1MPa)の30%]
- 実験開始日時:1997年5月23日10時27分
- 経 過 時 間:実験開始後 490,492,800sec (2012年12月7日現在)
- 計 測 方 法:試験開始後から現在にいたるまでの計算機による変位データの取り込み(主 に載荷初期と破壊に備えての計測)と、2000年から毎週月曜日と金曜日午前 10時時点の測定(定常時の計測)



図 2.1.1 空圧式クリープ試験機の概略図

#### JAEA-Research 2013-031



図 2.1.2 供試体周辺の試験装置

## 2.2 試験装置の維持管理

試験の維持・管理方法は以下の通りである。

- 1)維持·管理(日常):
  - ・シリンダ内の圧力について、設定値に保持されていることの確認
  - ・試験片の状態について、完全に水没した状態になっていることの確認
  - ・変位の出力値について、前回の点検時と比較して大きな変化がないかの確認
- 2) 維持·管理(適宜):
- ・コンプレッサ内部の水抜き
- ・減圧弁のブリード孔の掃除
- 3) 計測装置が異常を示した場合の対応策:
  - ・ 歪増幅器:任意の歪量を出力できるキャリブレータを用意し、歪増幅器のキャリブレーションを行う。
  - ・圧力計:シリンダの手前の開閉弁を閉めることによって数時間はクリープ試験が継続で きるのでその間に点検を行う。
  - ・変 位 計:クリープ試験は継続したままで、変位計の接点にブロックゲージを入れることで点検を行う。ただし、ブロックゲージを取り出すと接点が若干ずれてしまうので変位計の点検は変位計の値が異常と認められる場合に限定する。
  - ・その他:同機種を複数台ストックする(CRTやフロッピーディスクドライブ)。

## 2.3 試験結果

2011年と2012年における、クリープ歪とクリープ荷重を作用させるシリンダ内の圧力の経時 変化を図 2.3.1に示す。シリンダ内の圧力は変動が少なく概ね一定であった。クリープ歪は日々 の小さい変動が見られたものの、2年間で大きな変化は見られなかった。また同期間の水温と室 温の変化を図 2.3.2に示す。水温と室温には同様な変化が見られたが、水温の変化が若干大きく、 夏場に高く冬場に低くなる傾向が見られた。

試験開始(1997年5月23日)から2012年12月7日までのクリープ歪とシリンダ内の圧力の 経時変化を図 2.3.3 に示す。試験開始から約3年間は、クリープ歪が一定量の変化をする度にデ ータを計算機に取り込んだ。その後は、毎週月曜日と金曜日の午前10時に歪と圧力の値を記録 した。2007年までは、時間とともにクリープ荷重を作用させるシリンダ内の圧力が設定値よりも 徐々に減少したため、適宜圧力を設定値に戻すという作業を行った。クリープ歪は概ね圧力と似 たように変動しながらも徐々に増加した。しかしその後、圧力はこれまでよりも変動が少なくほ ぼ同じ圧力レベルであったにもかかわらず、クリープ歪は、従来と同じように変動しながら若干 の減少傾向を示した。この原因として、何らかの影響でシリンダが動きにくくなっている可能性 が考えられたため、2010年10月29日に図 2.1.1 に示した(b)減圧弁により圧力を設定値の1 kg/cm<sup>2</sup>から0.5 kg/cm<sup>2</sup>まで下げてから、圧力を0.5 kg/cm<sup>2</sup>と0.4 kg/cm<sup>2</sup>の間で10回上下させ た。その後、圧力を設定値である1 kg/cm<sup>2</sup>に戻した。この時点を図 2.3.3 に矢印で示す。この作 業の後は、クリープ歪は2007年と同程度まで回復し、それ以降も歪は挙動している。

試験は開始から15.5年以上が経過し、過去に例がない長期間のデータを取得しているところで あり、二次クリープの挙動を継続して観測している。今後も試験を継続する予定である。



図 2.3.1 クリープ歪およびシリンダ内の圧力の変化(2011 年~2012 年)



図 2.3.2 クリープ歪および水温・室温の変化(2011 年~2012 年)



図 2.3.3 クリープ歪およびシリンダ内の圧力の変化(1997 年~2012 年)

#### 3. 岩石の時間依存性挙動把握のためのデータの整理と分析

## 3.1 岩石の時間依存性挙動に関するこれまでの研究

2006 年度 <sup>13)</sup>は、MIZ-1 号孔(瑞浪超深地層研究所用地内における地表からの深層ボーリング 孔、掘削長 1,300m で下方は斜孔となっている<sup>22)</sup>)から採取された土岐花崗岩を用いて、一軸圧 縮試験、圧裂引張試験、P 波弾性波速度試験、ショア硬度試験を実施した。また、載荷速度を切 り換えながら一軸圧縮試験を行って、強度の載荷速度依存性について調べた。2007年度 18)は、 MIZ-1 号孔から採取された土岐花崗岩を用いて、一軸圧縮試験と一般化応力緩和試験を行った。 2008 年度 19は、MIZ-1 号孔から採取された土岐花崗岩を用いて一般化応力緩和試験を行い、デ ータを蓄積した。2009年度20は、これらの結果をとりまとめたところ、土岐花崗岩の強度やヤ ング率、ポアソン比などの物性値や、強度の載荷速度依存性から求めた時間依存性の程度(構成 方程式中のnの値)は、東京大学の研究室で過去に実験を行った花崗岩(稲田花崗岩)と大きな 違いがないことが分かった。クリープ特性や一般化応力緩和特性に関しても、過去に得られてい る他の岩石と同様な傾向を示すことが確認された。2010年度 21)は、過去に求めた土岐花崗岩の 時間依存性の程度を表す n が有する性質を再確認するために、岩石の強度の載荷速度依存性とク リープ寿命の応力依存性との関係、および時間依存性、強度とクリープ寿命の分布特性、寸法効 果の相互関係について、決定論モデルや確率過程論モデルを用いて考察した。次いで、過去の同 様の研究で得られた岩石の強度とnの値を整理して、土岐花崗岩の強度やnの値と比較検討した。 さらに今後、瑞浪超深地層研究所の研究坑道で原位置試験を行うにあたって、土岐花崗岩の力学 特性や時間依存性の把握に関して、取得すべき情報について検討した。これまでに岩石の時間依 存性に関する研究は長年行われてきたが、原位置岩盤の時間依存性に関する知見は少なく、現状 では室内試験で得られた結果を原位置岩盤の評価にいかにして反映させるかについて検討の余地 が残されている。

本章では、まず 2010 年度に示した岩石の強度と時間依存性の程度を表す n の値について、試 験条件で再整理した。これらはピーク強度の載荷速度依存性に関するデータである。次に、不連 続面の時間依存性と関係が深いと考えられる亀裂表面あるいは破片表面でのすべりおよび摩擦に 支配されている状態での n の値について検討した。さらに、室内試験で得られた結果を原位置岩 盤の評価に反映させるために重要な時間依存性の寸法効果に関する検討を行った。

#### 3.2 岩石強度の載荷速度依存性に関するこれまでの研究

岩石の一軸圧縮強度の載荷速度依存性については、古くから多くの研究がなされてきた<sup>23)·27)。</sup> 本研究で対象とする日本国内の岩石では、長年にわたる研究<sup>28)·42)</sup>の結果、載荷速度が 10 倍にな るごとに一軸圧縮強度が 5~20%増加することが知られている。ただし、気乾状態での試験が多 く、湿潤状態での試験<sup>33),34),37),43),44)</sup>は比較的少ないので、湿潤状態での強度の載荷速度依存性に ついては不明な点が残っている。載荷速度依存性は、圧裂引張強度<sup>45)·47)</sup>、一軸引張強度<sup>46),48)·51)</sup>、 曲げ強度<sup>52)·54)</sup>、さらにはせん断強度<sup>55)</sup>でも見られるとの報告がある。しかしながら、公表され たデータの数は少なく、一軸圧縮強度と載荷速度との関係が明らかになっているとは言えない。

地下では、三軸応力状態であるので、三軸圧縮強度の載荷速度依存性を把握することは重要と 思われる。しかしながら、載荷速度を制御しながらの三軸圧縮試験は難易度が高く、多くの時間 を要するので、三軸圧縮強度の載荷速度依存性に関する研究<sup>28),31),36),40),44),56)-60)は少なく、一軸圧 縮強度の載荷速度依存性との関係ほどに明らかになっているとは言えない。</sup> 次節では、まず一軸圧縮強度の載荷速度依存性を調べる4つの試験方法について述べる。次い で、一軸圧縮試験、圧裂引張試験、一軸引張試験、曲げ試験、せん断試験での試験結果をまとめ て検討する。さらに、三軸圧縮応力下での試験結果を述べ、周圧の加わっていない条件下で行わ れた試験結果との比較・検討を行う。

圧縮試験時のピーク強度は、亀裂進展と密接な関係がある 52,61,62)。そこで、本研究では、亀裂 が十分に多く入っており、その力学的挙動が亀裂進展よりも亀裂表面あるいは破片表面でのすべ りおよび摩擦に支配されていると考えられる次の二つの状態についても検討した。

- ① ピーク強度を大きく過ぎて応力の低下速度が非常に小さくなり、応力-歪曲線がほぼ水平 になった残留強度領域での載荷速度依存性<sup>39,41)</sup>
- ② 岩石の小さな破片を鋼製厚肉円筒に入れて圧密したのちに、鋼製厚肉円筒から取り出して 一軸圧縮試験を実施した(強度回復試験)時の載荷速度依存性<sup>42)</sup>

このように本研究では、多岐にわたる方法と条件で測定された載荷速度依存性についてデータを収集し、比較・検討した。

#### 3.3 岩石強度の時間依存性を調べるための試験方法

図 3.3.1 に岩石強度の時間依存性の程度を表す n を取得するための試験方法を示す。図の(a)~ (c)は強度試験から n を取得する方法である。(d)はクリープ試験から n を取得する方法である。

(a)の方法(略称: MS)は、試験片ごとに定まった歪速度 Cで強度試験を行い、そのときのピーク強度 $\sigma_c$ を調べる方法である<sup>32)</sup>。この方法は従来から行われており、均質な岩石ブロックが入手できるときには確実な方法である。しかしながら、この方法には多数の試験片が必要であるという欠点がある。例えば載荷速度を4段階に変えて、各載荷速度で5本の試験片を使用して試験をすると、一連の試験に20本の試験片が必要である<sup>32)</sup>。なお、nの値が小さいほど載荷速度依存性が高いと考えられており<sup>32)</sup>、本研究では次式を基にデータ整理を行った。

$$\sigma_{c} \propto C^{1/(n+1)}$$

(3.1)

(b)の方法(略称:SS)は、応力-歪曲線を見ながら定歪速度試験を行い、応力-歪曲線の傾き が小さくなり間もなくピーク強度というときに、歪速度を上げて、そのときの応力の増加より載 荷速度依存性を推定する方法である<sup>32)</sup>。この方法では、1本の試験片で載荷速度依存性が求まる が、試験装置の操作の難易度が高く経験が要求される。

(c)の方法(略称:AS)は、もっとも後になって開発された方法で、試験中に歪速度を切り換 えて、切り換えに伴う応力の変化量より載荷速度依存性を推定する方法である<sup>39)</sup>。この方法では、 1本の試験片で載荷速度依存性が求まり、歪速度を交互に切り換えるだけなので試験は容易であ る。なお、一軸圧縮応力下では 5×10<sup>-4</sup>、三軸圧縮応力下では 8×10<sup>-4</sup>だけ歪が増加するごとに、 歪速度 10<sup>-4</sup>と 10<sup>-5</sup>/s とを交互に切り換えることを勧めている<sup>39)</sup>。

(d)の方法(略称:ML)は、クリープ試験でクリープ応力 $\sigma$ と寿命 *T* との関係を求めて、次式 を基に *n* の値を計算する <sup>44,63</sup>。

$$T \propto 1/\sigma^n$$

(3.2)

なお、この方法では試験片が破壊するまでクリープ試験を行うので試験には長時間を要する。

#### JAEA-Research 2013-031



# 図 3.3.1 n を取得するための試験方法

#### 3.4 周圧の加わっていない条件下での結果

周圧の加わっていない条件で行われた一軸圧縮試験、圧裂引張試験、一軸引張試験、曲げ試験、 せん断試験での試験結果をまとめて表 3.4.1(1)、(2)に示す。この表では(3.1)式を用いて、一軸圧 縮強度は歪速度 *C* =10<sup>-5</sup>/s での値に、一軸引張強度は歪速度 *C* =10<sup>-6</sup>/s での値に換算してある。そ の他の試験における強度は、原論文に記載されている値を採用した。なお、三城目安山岩につい ては試験結果が多いので表 3.4.1 の *n* の値に対する標準偏差と変動係数を表 3.4.2 に示した。

土岐花崗岩については、nの値は52であった。

三城目安山岩については、試験は長年に渡り断続的に行われ、試験片を切出した岩石ブロック も複数にわたっているが、標準偏差、変動係数からは大きなばらつきは認められなかった。気乾 状態における圧縮試験と引張試験でのnの値は、37.3 と 37.5 でありよく一致している。ただし、 変動係数は圧縮試験では5%であるのに対して引張試験では7%とやや大きくなった。気乾状態と 湿潤状態を比較すると、気乾状態でのnの平均値は37.4 であったのに対して、湿潤状態では29.0 と20%以上もnの値が低下した。湿潤状態での引張応力下での結果は1例しかないが、nの値は 28 であり、湿潤状態での平均値29 との差はわずかであった。また、湿潤状態での全データの変 動係数は4%であり、気乾状態でのそれと比較してやや小さかった。なお、気乾状態での一軸圧 縮試験については、MS、ML、SS、ASと図3.3.1 に書かれた全ての方法で行われているが、 試験方法の違いによるnの値の大きな相違はなかった。

稲田花崗岩については、一軸圧縮試験のみである。気乾状態の n の平均値は 47 で、三城目安 山岩より大きかった。また、湿潤状態での n の値は 42 であり気乾より 10%小さくなった。

河津凝灰岩についても一軸圧縮試験のみである。気乾状態の n の平均値は 60 であり、上記の 岩石と比較して大きかった。湿潤状態での n の値は 42 であり、気乾状態に比べて 30%低下した。

田下凝灰岩と大谷凝灰岩については、気乾状態と湿潤状態との差は大きく、ともに湿潤状態で のnの値は気乾状態での値の半分以下であった。

和泉砂岩、来待砂岩、多胡砂岩、秋吉大理石については、気乾状態の一軸圧縮試験のみである。 土丹については乾燥させると細かい亀裂が入ってしまうので、湿潤状態のデータのみである。

石炭については異方性が顕著であったので3方向の試験を行った。一軸圧縮試験と一軸引張試験が行われており、一軸引張強度では亀裂の方向(Y方向)に引っ張ったときのnが140であったのに対して、亀裂が開く方向(X方向、Z方向)に引張ったときのnは100とかなり小さかった。 気乾状態でのnの平均値は125であり、表3.4.1の中ではもっとも大きかった。

- 11 -

岩石	文献	気乾/湿潤	試験	方法	強度(MPa)	п	圧縮/引張	気乾/湿潤		
土岐花崗岩	[20]	気乾	UC	AS	161.0	52		気乾 52		
	[28]	気乾	UC	MS	102.7		_			
	[29]	気乾	UC-Creep	ML	87.3	35				
	[31]	気乾	UC	MS	92.0	38				
	[32]	気乾	UC	MS	94.0	35				
	[32]	気乾	UC	$\mathbf{SS}$	94.0	38				
	[33]	気乾	UC	MS	94.0	38				
	[33]	気乾	UC	MS	88.0	37	圧縮 37			
	[34]	気乾	UC	MS	79.3	36				
	[34]	気乾	UC	MS	80.7	36				
	[36]	気乾	UC	MS	79.7	36				
	[39]	気乾	UC	AS	62.2	39		気乾 37		
	[41]	気乾	UC	AS	75.8	42				
	[41]	気乾	UC	AS	69.8	39				
三城目安山岩	[46]	気乾	UT	MS	4.3	38				
	[49]	気乾	UT	SD	4.1 36					
	[51]	気乾	UT	MS	6.2	39				
	[51]	気乾	UT	AS	7.1	40	리 토 아이			
	[46]	気乾	IT	MS	5.6	41	5 坂 38			
	[52]	気乾	BD	MS	-	<b>37</b>				
	[52]	気乾	BD	MS	8.4	34				
	[53]	気乾	BD-Creep	ML	4.9	35				
	[55]	気乾	SH	MS	19.7	38				
	[33]	湿潤	UC	MS	73.0	29				
	[33]	湿潤	UC	MS	68.3	28	工約 20			
	[34]	湿潤	UC	MS	66.2	29	)上,州日 23	湿潤 29		
	[34]	湿潤	UC	MS	68.8	31				
_	[46]	湿潤	IT	MS	4.1	28	引張 28			
	[31]	気乾	UC	MS	182.0	42				
	[32]	気乾	UC	MS	180.0	51		/ 合盐 / □		
稻田花崗岩	[32]	気乾	UC	$\mathbf{SS}$	180.0	49		又(平4 4 1		
	[33]	気乾	UC	MS	190.0	44				
	[33]	湿潤	UC	MS	184.0	42		湿潤 42		

表 3.4.1(1) 周圧の加わっていない条件下での結果

強度:一軸圧縮試験は10<sup>-5</sup>/s,一軸引張試験は10<sup>-6</sup>/sでの値

UC: 一軸圧縮試験, UT: 一軸引張試験, IT: 圧裂引張試験, BD: 三点曲げ試験, SH: せん断試験 MS: 複数の載荷速度, SS: ピーク強度直前で載荷速度切換, AS: 載荷速度交互切換, ML: 複数の クリープ応力レベル, SD: 強度のばらつきを示す。圧縮/引張、気乾/湿潤の数値は平均値を示す。

出工	小市	与乾/浪測		专注	辞度(MDa)		工编/门框	氨虧/湿潤
石山	又臥			刀伍 MI	强度(MFA)	<i>II</i>	江和1515天	入中山山山山
	[29]	风虹	UC-Creep	ML	37.2	60		
	[31]	风虹		MO	32.0	66 <b>F</b> O		
	[32]	凤乾		MS	32.0	58		気乾 60
<b>끤</b> 禈礙伙宕	[32]	気乾	UC	SS	32.0	59		
	[33]	気乾	UC	MS	33.0	66		
	[42]		UC	AS	39.0	53		
	[33]	湿潤	UC	MS	23.0	42		湿潤 42
	[33]	気乾	UC	MS	15.0	41		
	[35]	気乾	UC	MS	18.2	53	圧縮 47	
	[39]	気乾	UC	AS	21.7	51		氨药 46
田下凝灰岩	[40]	気乾	UC	AS	17.6	41		入(平台 40
	[51]	気乾	UT	AS	1.2	46		
	[47]	気乾	IT	MS	1.3	45	5  按 40	
	[33]	湿潤	UC	MS	8.0	22		湿潤 22
	[33]	気乾	UC	MS	11.0	36		合計 40
大谷凝灰岩	[35]	気乾	UC	MS	12.7	43		入(平4 40
	[33]	湿潤	UC	MS	5.0	16	-	湿潤 16
	[32]	気乾	UC	MS	200.0	61	-	
相永砂宕	[32]	気乾	UC	$\mathbf{SS}$	200.0	56		気乾 59
来待砂岩	[39]	気乾	UC	AS	39.9	42		気乾 42
多胡砂岩	[30]	気乾	UC	MS	32.5	72		気乾 72
	[32]	気乾	UC	MS	120.0	64		
秋芳大理石	[32]	気乾	UC	$\mathbf{SS}$	120.0	73		気乾 68
	[39]	気乾	UC	AS	97.0	67		
土丹	[37]	湿潤	UC	AS	4.2	30	<u>.</u>	湿潤 30
石炭 X方向	[38]	気乾	UC	AS	50.0	140	<u>.</u>	
Y方向	[38]	気乾	UC	AS	25.0	150	圧縮 137	
Z方向	[38]	気乾	UC	AS	22.0	120		
X方向	[38]	気乾	UT	AS	0.42	100		気乾 125
Y方向	[38]	気乾	UT	AS	1.0	140	引張 113	
Z方向	[38]	気乾	UT	AS	0.57	100		

表 3.4.1(2) 周圧の加わっていない条件下での結果

強度: 一軸圧縮試験は 10<sup>-5</sup>/s, 一軸引張試験は 10<sup>-6</sup>/s での値

UC: 一軸圧縮試験, UT: 一軸引張試験, IT: 圧裂引張試験, BD: 三点曲げ試験, SH: せん断試験 MS: 複数の載荷速度, SS: ピーク強度直前で載荷速度切換, AS: 載荷速度交互切換, ML: 複数の クリープ応力レベル。圧縮/引張、気乾/湿潤の数値は平均値を示す。

岩石	気乾/湿潤	条件	平均值	標準偏差	変動係数
三城目安山岩 -		すべて	37.4	2.1	6%
	気乾	圧縮	37.3	2.0	5%
		引張	37.5	2.4	7%
		すべて	29.0	1.2	4%
	湿潤	圧縮	29.3	1.3	4%
		引張	28	(1例のみ)	(1例のみ)

表 3.4.2 三城目安山岩の n の平均値、標準偏差、変動係数

## 3.5 周圧下での結果

前述のように、三軸圧縮応力下でのデータは重要であるにもかかわらず載荷速度依存性を調べる試験が困難であるのでデータ数は少ない。表 3.5.1(1)、(2)に、試験条件が明示されている周圧下での試験結果を示す。この表の数値を得る際に使われた試験方法は、田下凝灰岩は AS、その他の岩石は MS である。図 3.5.1 には周圧のない状態での値で基準化した n と強度(差応力)の関係を示した。河津凝灰岩を除いて、他の岩石は強度の増加にほぼ比例して n が増加していくことが分かった。なお、数値計算を行うと、n と強度が比例する場合には、載荷速度を 10 倍にしたときの強度の増加量 $\Delta\sigma$ は、強度(よって周圧)によらずほぼ一定であることが分かった<sup>36</sup>。

表 3.5.1(1) 周圧下での結果									
岩石	中中	氨乾/湿潤	古注	周圧	強度	n	正規化した	正規化した	
石石	入责	入(平山)亚国	714	(MPa)	(MPa)	11	強度	n	
				0.0	102.8	36	1.00	1.00	
	[99]	与故	MS	10.2	159.5	52	1.55	1.44	
	[20]	入「十七	MB	20.4	200.4	70	1.95	1.94	
				39.2	246.1	71	2.39	1.97	
				0.0	92.0	38	1.00	1.00	
		気乾		5.0	129.0	50	1.40	1.32	
二十日二十二十二十二十二十二十二十二十二十二十二十二十二十二十二十二十二十二十	[31]		MS	10.0	154.0	66	1.67	1.74	
二城日女山石				20.0	197.0	73	2.14	1.92	
				40.0	246.0	84	2.67	2.21	
	[36]	気乾		0.0	79.7	36	1.00	1.00	
				5.0	109.0	52	1.37	1.44	
			MS	10.0	125.3	63	1.57	1.75	
				20.0	154.1	73	1.93	2.03	
				40.0	191.3	85	2.40	2.36	
				0.0	182.0	42	1.00	1.00	
				5.0	263.0	65	1.45	1.55	
稲田花崗岩	[31]	気乾	MS	10.0	318.0	<b>74</b>	1.75	1.76	
				20.0	408.0	98	2.24	2.33	
				40.0	542.0	104	2.98	2.48	

岩石	文献	気乾/湿潤	方法	周圧	強度 (MD-)	n	正規化した	正規化した
					(MPa)		知及	n
			MS	0.0	32.0	66	1.00	1.00
河津熔匹屶	[91]	気乾		2.5	35.0	56	1.09	0.85
何律姚八石	[91]			5.0	38.0	47	1.19	0.71
				10.0	37.0	69	1.16	1.05
田下凝灰岩・		気乾	AS	0.0	21.7	51	1.00	1.00
	[39]			2.0	28.5	56	1.31	1.10
				7.8	38.4	57	1.77	1.12
		気乾	AS	0.0	17.6	41	1.00	1.00
	[40]			2.0	24.6	52	1.40	1.27
				7.8	31.5	49	1.79	1.56

表 3.5.1(2) 周圧下での結果



図 3.5.1 三軸圧縮試験での正規化した強度と正規化した nの関係

#### 3.6 亀裂が多く生じている試験片での結果

ピーク強度の載荷速度依存性は、亀裂先端の進展速度と密接な関係があると思われる<sup>64</sup>。そこで、マクロな亀裂の進展はないと思われる、ピーク強度を大きく過ぎて応力の低下速度が非常に小さくなり、応力-歪曲線がほぼ水平になった残留強度領域での載荷速度依存性を調べた<sup>39),41)</sup>。この場合には次式を仮定して*n*の値を計算した。

$$\sigma_1/\sigma_2 = (C_1/C_2)^{1/(n+1)}$$

## (3.3)

 $\sigma_1 \ge \sigma_2$ は、表 3.6.1 に歪で示した領域における、歪速度  $C_1 \ge C_2$ での残留応力である。この表の数値を得る際に使われた試験方法は全て AS である。表 3.6.1 に示した試験結果はばらついているが、全体としてみれば表 3.4.1 に示した n の値との相違は認められなかった。

次に、一軸圧縮試験により破壊した試験片にさらに載荷を加えていき、押し固めた試験片を用 いた一軸圧縮試験(強度回復試験)について整理する。試験の詳細は、試験片を試験片の径より 少し大きい鋼製厚肉円筒に入れて、試験片に上から鋼棒で力を加える。ピーク強度を過ぎてから も鋼棒を押し込み続けると試験片は細かく砕ける。さらに鋼棒を押し込むと、破片の集合体の側 面が鋼製厚肉円筒側面と接触し始め、載荷方向と直交する方向の変位は厚肉円筒により拘束され る。この段階からさらに鋼棒に力を加えると圧密される。このようにして破片の集合体が圧密さ れてできた円柱試験片の一軸圧縮試験を実施して、その強度と載荷速度依存性とを調べた結果を 表 3.6.2 に示した<sup>42)</sup>。この表の数値を得る際に使われた試験方法は全て AS である。表 3.6.2 に 示した試験結果もかなりばらついているが、全体としてみれば岩石間の n の値の相違が小さくな った。この場合には、亀裂の進展が関与している可能性は小さく、破片間の摩擦抵抗が力学特性 を支配している可能性が高い。そのために n の値の差が小さくなった可能性があるが、現状では 詳しいことはわからないため、岩石の載荷速度依存性の機構を解明するための端緒となる試験結 果である可能性がある。

20.01 没自强反顶域における相未										
- 単石	也中	与乾/湿潤	計略	专注	対象とする領域	<i>n</i> *	<i>n</i> in Table			
石石	大歌	入平山亚间	时心灵	714	歪 (%)	п	3.4.1			
三城目安山岩	[41]	気乾	UC	AS	>1.5	$35\pm5$	37			
稻田花崗岩	[41]	気乾	UC	AS	>0.7	$45\!\pm\!10$	47			
田下凝灰岩	[41]	気乾	UC	AS	>1.5	$45\pm5$	46			

表 3.6.1 残留強度領域における結果

\*表に示した歪領域での応力を用いて(3.3)式より算出

表	3.6.2	破壊後に	こ圧密し	,た試験片	「での結果

-								
	岩石	文献	気乾/湿潤	試験	方法	強度 (MPa)	п	<i>n</i> in Table 3.4.1
	三城目安山岩	[42]	気乾	UC	AS	1.0-1.3	$49\pm1$	37
	河津凝灰岩	[42]	気乾	UC	AS	8.1 - 9.2	$49\pm4$	60
	田下凝灰岩	[42]	気乾	UC	AS	7.6 - 9.2	$49\pm10$	46
	来待砂岩	[42]	気乾	UC	AS	8.9-9.1	$41\pm4$	42

## 3.7 寸法効果

岩石による試験結果を原位置岩盤に適用する際には、載荷速度依存性の寸法効果を明らかにす ることが必要であるが、公表された実験データはほとんどない。

羽柴ら 40は、周圧 0、2、 7.8 MPa で試験を行った。使用した試験片の寸法は直径 10mm と 25mm であり、ともに高さは直径の2倍である。得られた結果によると試験片の大小によるnの 値の変化は認められなかった。

趙ほか(1995)<sup>65</sup>は、試験片の寸法を変えて、有限要素法による数値シミュレーションを行った。その結果によれば、寸法が増大すると強度は低下するが載荷速度依存性はほとんど変化しないとの結果を得た。一方、鉱山の坑道を対象とした数値シミュレーション<sup>14)</sup>では、測定値よりも小さめの*n*を用いた方が、現場での計測結果と計算結果とが一致するとの報告がある。

このように、実験結果を原位置に適用する際に必要な載荷速度依存性の寸法効果に関する知見 が著しく不足しており、実際の岩盤に適用するには、時間依存性の寸法効果の解明が必要であり、 今後の課題として残されている。

## 3.8 本章のまとめ

本研究での結果をまとめると以下のようになる。

- ① 載荷速度依存性を決めるための4つの試験方法を図3.3.1 に示したが、本研究で検討したデ ータに限れば、nの値は試験方法に依存しない。
- ② 圧縮試験と引張試験で、nの値は試験方法に依存しない。
- ③ 気乾状態と比較して湿潤状態では n の値が小さくなった。n の値の減少率は凝灰岩で最も大きい。
- ④ 一軸圧縮強度(差応力)にほぼ比例して n の値が増加する。
- ⑤ 残留強度領域での載荷速度依存性は、ピーク強度の載荷速度依存性と大きな相違はない。
- ⑥ 岩石を破壊してできた破片を圧密した試験片では、岩石間のnの値の相違が小さい。
- ⑦ 岩石を対象として室内試験の結果を実際の岩盤の評価に適用するには、時間依存性の寸法 効果の解明が必要であり、今後の課題として残されている。

#### 4. 研究坑道を利用した原位置試験計画に関する検討

## 4.1 これまでの数値計算試験の結果

2006 年度は、MIZ-1 号孔 22から採取した土岐花崗岩を用いて 2 種類の載荷速度を交互に切り 換えながら一軸圧縮試験を行い強度の載荷速度依存性について調べた。2007 年度は、MIZ-1 号 孔より採取した土岐花崗岩を用いて、一軸圧縮試験と一般化応力緩和試験を行った。また 2006 年度と2007年度の結果を用いて、過去に提案した岩石の時間依存性挙動を再現できるモデル(拡 張したコンプライアンス可変型構成方程式66)の定数を求め、数値解析により強度試験結果と一 般化応力緩和試験結果がうまく再現できることを確認した。2008年度は、土岐花崗岩を用いて一 般化応力緩和試験を行ってデータを蓄積し、拡張したコンプライアンス可変型構成方程式による 計算結果の妥当性を確認した。2009年度は、拡張したコンプライアンス可変型構成方程式を用い た二次元有限要素解析により、土岐花崗岩中に設けられた円形坑道の長期挙動に関する予察的検 討を行った。岩盤の物性値や構成方程式の定数、地圧条件などを変化させた計算を行った結果、 実施した計算条件の中で坑道周辺岩盤の時間依存的な変形量に最も大きく影響を及ぼすのは、一 軸圧縮強度と地圧との関係、すなわち応力レベルであることがわかった。その次に計算結果に及 ぼす影響が大きかったのは、構成方程式中で時間依存性の程度を表す定数であるnであった。2010 年度は、拡張したコンプライアンス可変型構成方程式を用いた二次元有限要素解析において、周 圧下でのnの値の変化、および岩盤強度のばらつきを考慮した計算を行った。2009年度と2010 年度の結果より、土岐花崗岩では原位置で想定されるようないずれの条件下でも、弾性変形に比 べると時間依存的な変形量はかなり小さいことが確認された。

以上のように、土岐花崗岩における時間依存的な挙動はかなり小さいことが確認されたが、円 形坑道を一本設けた場合だけであり、坑道の断面形状が円形でない場合や、複数の坑道が連設す るような場合は検討していない。

そこで本章では、原位置試験計画の策定に資する情報を得るため、空洞の周辺岩盤に生じる応 力が一本の円形坑道を掘削した際の周辺岩盤の応力状態よりも大きくなるような条件下(楕円形 坑道、多連接坑道)での坑道の安定性について検討した。まず、断面形状が楕円形の坑道に関し て周辺岩盤に生じる応力の理論解と土岐花崗岩の力学試験結果から、坑道壁面での破壊限接近度 の分布を求めた。次いで、複数の坑道が連設された多連設坑道の鉱柱に生じる応力と土岐花崗岩 の力学試験結果から破壊限接近度を求めた。それらの結果から、坑道壁面が破壊するまでの寿命 を推定し、原位置の空洞を対象とした原位置試験手法について検討した。

#### 4.2 楕円形坑道周辺の応力場と破壊限接近度

図 4.2.1 のように鉛直地圧 $\sigma_v$ 、水平地圧 $\sigma_h$ が加わっている岩盤中に、長径が 2a、短径が 2b の 楕円形坑道を長軸が鉛直方向から反時計回りに角度 $\alpha$ だけ傾くように設けた場合の坑道周辺の応 力場について検討する。なお、応力は圧縮を正とする。楕円形坑道の短軸方向と長軸方向の垂直 応力 p、q、およびせん断応力sは座標変換により次式のように求められる。

$$p = \sigma_v \sin^2 \alpha + \sigma_h \cos^2 \alpha \tag{4.1}$$

$$q = \sigma_v \cos^2 \alpha + \sigma_h \sin^2 \alpha \tag{4.2}$$

$$s = (\sigma_v - \sigma_h) \sin \alpha \cos \alpha \tag{4.3}$$

半径方向応力 $\sigma_r$ とせん断応力 $\tau_{r\theta}$ は坑道壁面では0になる。坑道の長軸方向から反時計回りに角度 $\theta$ の側線上の周方向応力 $\sigma_{\theta}$ は、坑道壁面で最大値をとり、次式で計算される<sup>67</sup>。

$$\sigma_{\theta} = \frac{(p+q)\sinh 2R - (p-q)\{1 - \exp(2R)\cos 2\theta\} + 2s\exp(2R)\sin 2\theta}{\cosh 2R - \cos 2\theta}$$
(4.4)  
$$\forall z \not z \not z \downarrow, \quad R = \cosh^{-1}\frac{a}{c} = \sinh^{-1}\frac{b}{c}, \quad c^2 = a^2 - b^2$$

坑道壁面での破壊限接近度 Sv は次式により計算することにする。

$$Sv = \begin{cases} \frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_{c}} & (\sigma_{\theta} \ge 0) \\ \frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_{t}} & (\sigma_{\theta} < 0) \end{cases}$$

$$(4.5)$$

 $\sigma_c$ は一軸圧縮強度、 $\sigma_t$ は一軸引張強度である。



図 4.2.1 計算に用いた楕円形坑道の模式図

表 4.2.1 に計算条件を示す。一軸圧縮強度は土岐花崗岩の平均的な値、引張強度は土岐花崗岩の圧裂引張強度の平均的な値を用いた。鉛直地圧は 10 MPa とし、水平地圧と鉛直地圧の比である側圧係数 $\sigma_h/\sigma_v$ は1(等方圧)、1.5、2、2.5、3、3.5、4の7通りで計算した。楕円形坑道の短径/長径は1(円形)、0.8、0.6、0.4、0.2、0.1の6通りで計算した。楕円形坑道の長軸と鉛直方向との傾き $\alpha$ は0、 $\pi/8$ 、 $\pi/4$ 、3 $\pi/8$ 、 $\pi/2$ の5通りで計算した。

なお、楕円形坑道の短径/長径 b/a の変化に伴う形状の変化の様子を図 4.2.2 に示す。

一軸圧縮強度(MPa)	$\sigma_{\rm c}$	160						
引張強度 (MPa)	$\sigma_{t}$	6.5						
鉛直地圧(MPa)	$\sigma_{v}$	10						
側圧係数	$\sigma_{\rm h}/\sigma_{\rm v}$	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
楕円形坑道の短径/長径	b/a	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0.1	
長軸の角度 (rad)	α	0	$\pi/8$	$\pi/4$	$3 \pi / 8$	$\pi/2$		

表 4.2.1 計算に用いた値



図 4.2.2 楕円形坑道の短径/長径の変化に伴う形状の変化

図 4.2.3~図 4.2.6 に、 σ<sub>h</sub> / σ<sub>y</sub>が 1、2、3、4 で、 短径 / 長径を 6 通りに変化させた場合の結果 を示す。 $\alpha = 0$ では坑道の長軸方向と鉛直方向は一致している。図 4.2.3 に示した $\sigma_h / \sigma_v = 1$ (等 方圧)で短径 / 長径 = 1 (円形)の結果はよく知られた弾性解であり、 $\theta$ に関わらず $\sigma_{\theta}$ は一定値 20 MPa、Sv は一定値 0.125 である。 短径 / 長径が小さくなるにしたがって、長軸方向 ( $\theta = 0^\circ$ 、 180°) の $\sigma_{\theta}$ と Sv が大きくなり、短軸方向( $\theta = 90^{\circ}$ )の $\sigma_{\theta}$ と Sv が小さくなった。短径/長径= 0.1 では、長軸方向で Sv が 1 より大きくなる部分が生じた。図 4.2.4~図 4.2.6 に示したように、  $\sigma_{\theta}$ に関しては $\sigma_{h}/\sigma_{v}$ を増加させても定性的な傾向はあまり変わらず、短径/長径が小さくなるに したがって、長軸方向の値は大きくなり、短軸方向の値は小さくなった。一方、Sv に関しては、  $\sigma_h/\sigma_v = 1$ では長軸方向の値が大きかったが、 $\sigma_h/\sigma_v$ を増加させていくと短軸方向の値も増加し た。これは、短軸方向に引張応力が生じたためである。図 4.2.4 に示したように、 $\sigma_{\mu}/\sigma_{\nu}=2$  で は短径/長径が 0.6 以上では孔壁の全周にわたって圧縮応力が生じ、短軸方向の Sv は小さかった が、短径/長径が 0.4 以下では短軸方向に引張応力が生じ Sv が大きくなった。図 4.2.4~図 4.2.6 よりわかるように、 $\sigma_{\mu}/\sigma_{\nu}$ が大きくなるにしたがって、短径/長径がより小さい値から短軸方向の 引張応力場で Sv が大きくなり、その範囲が広がることが分かった。また図 4.2.5 と図 4.2.6 から、 長軸方向の圧縮応力場ではなく、短軸方向の引張応力場で Sv が最大となる場合もあることが分か った。



図 4.2.3 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布(σ<sub>h</sub>/σ<sub>v</sub>=1, α=0)



図 4.2.4 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h / \sigma_v = 2$ ,  $\alpha = 0$ )



図 4.2.5 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h / \sigma_v = 3$ ,  $\alpha = 0$ )



図 4.2.6 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h / \sigma_v = 4$ ,  $\alpha = 0$ )

図 4.2.7~図 4.2.21 に、 $\sigma_h/\sigma_v$ が 1.5、2.5、3.5 で、 $\alpha \ge 5$ 通りに変化させた場合の結果を示す。 なお、 $\sigma_h/\sigma_v=2.5$ 、b/a=0.4、 $\alpha=\pi/2$  では、 $\theta$ によらず $\sigma_\theta$ 、Sv ともに一定値となる。いずれの 場合でも $\sigma_\theta$ は長軸方向の近傍で最大となったが、 $\alpha$ の増加とともに $\sigma_\theta$ の最大値は減少した。すな わち、 $\alpha$ の増加とともに坑道壁面の圧縮破壊の可能性は低下するといえる。一方で、 $\alpha$ の増加と ともに $\sigma_\theta$ が負の値をとる位置での Sv が増加する場合があった。例えば、 $\sigma_h/\sigma_v$ が 3.5 では、 $\sigma_\theta$ が 正の場所での Sv よりも $\sigma_\theta$ が負の場所での Sv の方が大きくなり、同条件では圧縮破壊よりも引張 破壊の方が生じやすくなることが分かった。図 4.2.7~図 4.2.11 ( $\sigma_h/\sigma_v=1.5$ 、 $\alpha=0-\pi/2$ ) で は引張応力が生じる可能性は少なく、 $\alpha$ によらずほぼ長軸方向で Sv が最大となった。図 4.2.12 ~図 4.2.16 ( $\sigma_h/\sigma_v=2.5$ 、 $\alpha=0-\pi/2$ ) では、 $\alpha$ の増加とともに引張応力が生じる領域が、短径 ( $\theta=90^\circ$ ) 付近であったのが徐々に長径 ( $\theta=0^\circ$ ) 付近の方へと移動し、領域の大きさも徐々に小 さくなり、 $\alpha=\pi/2$ では引張応力を生じる領域はなくなった。なお、 $\alpha=\pi/4$ では $\theta=20^\circ$ の引張 応力が生じる場所で Sv が最大となった。図 4.2.17~図 4.2.21 ( $\sigma_h/\sigma_v=3.5$ 、 $\alpha=0-\pi/2$ ) では、 引張応力が生じる範囲が広くなり、特に $\alpha=\pi/4$ では引張応力場での Sv が圧縮応力場での Sv より もかなり大きくなることが分かった。

図 4.2.22(1)~(3)には坑道の短径/長径と Sv の最大値との関係を示した。同一条件でも $\theta$ によっ  $\sigma_{\theta}$ が圧縮になったり引張になったりするが、実線で示したのが圧縮応力場( $\sigma_{\theta}$ が圧縮)での Sv の最大値、破線で示したのが引張応力場( $\sigma_{\theta}$ が引張)での Sv の最大値である。両者のうちの 大きい方が、その条件での坑道の Sv となる。青で示した $\sigma_h/\sigma_v=1.5$ では、条件によっては引張 応力が生じる場合があったが、短径/長径によらず Sv の最大値は引張応力場(破線)よりも圧縮 応力場(実線)の方が大きく、圧縮破壊が生じやすいことが分かった。赤で示した $\sigma_h/\sigma_v=2.5$  では、 $\alpha = 0$ 、 $\pi/8$ 、 $\pi/4$  で圧縮応力場よりも引張応力場の Sv の最大値の方が大きくなることがあ った。緑で示した $\sigma_h/\sigma_v=3.5$ では、 $\alpha = \pi/8$ 、 $\pi/4$ で短径/長径によらず圧縮応力場よりも引張応 力場の Sv の最大値の方がかなり大きくなり、 $\alpha = 3 \pi/8$ 、 $\pi/2$ では、短径 / 長径=1(円形)でも 圧縮応力場よりも引張応力場の Sv の最大値の方が大きくなった。よって $\sigma_h/\sigma_v=3.5$ では、圧縮 破壊よりも引張破壊の方が生じやすくなることが分かった。



図 4.2.7 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h/\sigma_v = 1.5$ ,  $\alpha = 0$ )



図 4.2.8 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h / \sigma_v = 1.5$ ,  $\alpha = \pi / 8$ )



図 4.2.9 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h / \sigma_v = 1.5$ ,  $\alpha = \pi/4$ )



図 4.2.10 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h / \sigma_v = 1.5$ ,  $\alpha = 3\pi/8$ )



図 4.2.11 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h/\sigma_v = 1.5$ ,  $\alpha = \pi/2$ )



図 4.2.12 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h/\sigma_v = 2.5$ ,  $\alpha = 0$ )







図 4.2.14 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h / \sigma_v = 2.5$ ,  $\alpha = \pi / 4$ )



図 4.2.15 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h / \sigma_v = 2.5$ ,  $\alpha = 3\pi/8$ )



図 4.2.16 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h / \sigma_v = 2.5$ ,  $\alpha = \pi/2$ )



図 4.2.17 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h/\sigma_v = 3.5$ ,  $\alpha = 0$ )



図 4.2.18 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h / \sigma_v = 3.5$ ,  $\alpha = \pi / 8$ )



図 4.2.19 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h / \sigma_v = 3.5$ ,  $\alpha = \pi / 4$ )



図 4.2.20 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h/\sigma_v = 3.5$ ,  $\alpha = 3\pi/8$ )



(b) 破壊限接近度 Sv

図 4.2.21 楕円形坑道壁面における周方向応力と破壊限接近度の分布( $\sigma_h / \sigma_v = 3.5$ ,  $\alpha = \pi/2$ )



図 4.2.22(1) 坑道の短径/長径と破壊限接近度の最大値の関係 (α=0, π/8)



図 4.2.22(2) 坑道の短径/長径と破壊限接近度の最大値の関係 (α=π/4,3π/8)



(e)  $\alpha = \pi / 4$ 



## 4.3 連設坑道周辺の応力場と破壊限接近度

従来から連設坑道の安定性に関する検討が行われてきた<sup>68,69</sup>が、安定性を詳細に検討するため には坑道の断面形状や長さ、数、深度、周辺岩盤の特性など考慮すべき事項が多い。そこでここ では、簡易的なモデルを用いて連設坑道周辺の応力場と破壊限接近度について検討した。

図 4.3.1のように幅Dで坑道間の距離Lだけ離れた坑道が無限に広がる場合について考えると、 坑道間の鉱柱に生じる軸応力σ₂は次式で求められる<sup>68)</sup>。

$$\sigma_z = \frac{D+L}{L}\sigma_v \tag{4.6}$$

ここで、 $\sigma_v$ は坑道が設けられた深度での鉛直地圧である。破壊限接近度 Sv は一軸圧縮強度 $\sigma_c$ を用いて次式で計算することにする。

$$Sv = \frac{\sigma_z}{\sigma_c} \tag{4.7}$$

計算では表 4.2.1 に示した土岐花崗岩の一軸圧縮強度の値を用い、 $L/D \ge \sigma_v$ を変化させた。図 4.3.2 に破壊限接近度の計算結果を示す。これに $\sigma_c$ を掛けると $\sigma_z$ になる。いずれの $\sigma_v$ でも L/D

が大きいうちは *Sv* の変化は小さいが、*L* / *D* が 0.5 より小さくなると *Sv* は急激に大きくなった。  $\sigma_v$ が大きいほど *Sv* は大きく、*Sv* が 1 より大きくなるのは $\sigma_v$ =10 MPa では *L* / *D* = 0.06、 $\sigma_v$ =40 MPa では *L* / *D* = 0.3 であった。







図 4.3.1 計算に用いた多連設坑道の模式図

D: 坑道の幅, L: 坑道間の距離

図 4.3.2 多連設坑道の鉱柱における破壊限接近度

#### 4.4 原位置試験手法に関する検討

2009年度と2010年度の数値計算結果より、土岐花崗岩では原位置で想定されるようないずれ の条件下でも、弾性的な変形量に比べると時間依存的な変形量はかなり小さいことが確認された。 また、坑道が破壊に至るような応力条件下では、破壊直前までに生じる時間依存的な変形量はか なり小さく、変形が生じるとすぐに破壊に至るという計算結果が得られた。すなわち円形坑道で の原位置試験においては坑道の時間依存的な変形量を測定することは難しいと考えられるため、 破壊までの寿命が数日から数年となるような応力条件を計算により求め、坑道の形状や配置を工 夫して坑道壁面において応力集中により計算によって求めた応力状態を人工的に作り出して、破 壊の兆候や実際の破壊現象を観察することが有効であると考えられる。ただし、安全面の観点か らの問題もあるため実際の坑道の大きさではなく、ボーリング孔程度の大きさで原位置試験を実 施し、可能であれば寸法を大きくする方法が有効と考えられる。

応力状態および試験期間の設定についてはクリープ試験の結果が参考になる。岩石のクリープ 試験におけるクリープ寿命は、クリープ応力レベル(=クリープ応力/強度)すなわち破壊限接 近度の n 乗に反比例することが報告されている<sup>39)</sup>。前章で述べたように、n は強度の載荷速度依 存性やクリープ寿命の応力依存性より求められる。そこで坑道壁面の破壊までの時間 t<sub>f</sub>を、前節 までで求めた破壊限接近度 Sv を用いて次式で推定することにする。

(4.8)

 $t_f = Sv^{-n}$ 

図 4.4.1 に Sv と  $t_f$ の関係を示した。過去の研究により、Sv = 1 での  $t_f$ は三城目安山岩では 2.5 秒、田下凝灰岩では 1 秒との報告がある <sup>39)</sup>が、両者の差は小さいので 1 秒を採用した。n は土岐 花崗岩の気乾状態での値 52 と、稲田花崗岩の湿潤状態での値 42 を用いた。(4.8)式からわかるよ うに Sv と  $t_f$ の関係は両対数グラフ上で傾き -nの直線になるが、図のように狭い範囲内では片対 数グラフ上でも直線的であった。Sv が同じ場合は気乾状態での  $t_f$ は湿潤状態の 10~100 倍にな り、例えば Sv = 0.7 では、湿潤状態での  $t_f$ が約 37 日に対して気乾状態での  $t_f$ は約 1300 日となっ た。同じ Sv では気乾状態よりも湿潤状態の方が破壊までの時間が短く、また、わが国に設けられ る坑道の周辺岩盤は気乾状態よりも湿潤状態である場合が多いことから、原位置試験は湿潤状態 で行った方が良いと考えられる。図 4.4.1 より、Sv が 0.7 程度に設定できれば、破壊までの時間 は数日~数年の範囲に収まる可能性がある。Sv = 0.7 程度を実現できそうな例として以下が挙げ られる。

- ① *σ<sub>h</sub>*/*σ<sub>v</sub>*=1 (等方圧)で短径 / 長径= 0.1~0.2 の楕円形の試験孔を設ける
- ② 短径 / 長径 = 1 (円形)の試験孔を $\sigma_h/\sigma_v$  = 3.5 程度の場所に設ける
- ③ 多数の円孔 ( $\sigma_v = 20$  MPa では L/D = 0.2 程度、 $\sigma_v = 30$  MPa では L/D = 0.4 程度) を設ける

ただし、①は楕円孔の掘削が困難である。②は孔壁において圧縮応力場よりも引張応力場での破壊限接近度の方が大きくなるので、引張破壊が生じる可能性がある。円孔の掘削は容易なので、 $\sigma_h / \sigma_v = 3.5$ 程度が実現できれば引張破壊の観察を行うには良い条件と考えられる。③は圧縮破壊が生じる条件である。計算では坑道が水平に広がる場合を想定したが、原位置試験ではボーリング孔を鉛直方向に配置しても良いので、この場合は $\sigma_h = 20 \sim 30$  MPa の応力条件で行うことが可能である。この程度の水平地圧は研究所周辺の岩盤でも測定されている<sup>70</sup>。円孔の掘削も容易であるが、 $L/D = 0.2 \sim 0.4$ を満たすのは施工上難易度が高いと考えられる。また、今回は坑道が無限に広がっている場合の結果であるが、実際の原位置試験では試験孔の数は有限のため、その

場合の破壊限接近度の算出には数値計算を行う必要がある。

原位置試験を行うにはより詳細な検討が必要であるが、本研究を踏まえての暫定的な試験案と して、以下のような項目を挙げる。

目

的:原位置岩盤の遅れ破壊およびその兆候の把握、室内試験結果から予測した時間依存性挙動の原位置における検証、原位置試験結果を用いた構成方程式の定数の取得、時間依存性の寸法効果の検討

期 間:数日~3年程度

環 境:常温、湿潤状態

試験孔の断面形状:円形

試験孔の寸法: φ数十mm~数百mm

孔 の 配 置: 孔壁における破壊限接近度の最大値が 0.7 程度になるように配置



図 4.4.1 破壊限接近度と破壊までの寿命の関係

## 4.5 本章のまとめ

本章では、原位置試験計画の策定に資する情報を得るため、空洞の周辺岩盤に生じる応力が一 本の円形坑道を掘削した際の周辺岩盤の応力状態よりも大きくなるような条件下での坑道の安定 性について検討した。空洞の断面形状が楕円形の坑道に関して、周辺岩盤に生じる応力の理論解 と土岐花崗岩の力学試験結果から、坑道壁面での破壊限接近度の分布を求めた。また、複数の坑 道が連設された多連設坑道の鉱柱に生じる応力と土岐花崗岩の力学試験結果から破壊限接近度を 求めた。それらの結果と岩石のクリープ試験の結果を比較した結果、次のような条件下では数日 〜数年で坑道壁面の破壊が生じる可能性があることを指摘した。

- ① *σ<sub>h</sub> / σ<sub>v</sub>* = 1 (等方圧) で短径 / 長径= 0.1~0.2 の楕円形の試験孔を設ける
- ② 短径 / 長径 = 1 (円形)の試験孔を $\sigma_h/\sigma_v$  = 3.5 程度の場所に設ける
- ③ 多数の円孔 ( $\sigma_v = 20$  MPa ではL/D = 0.2 程度、 $\sigma_v = 30$  MPa ではL/D = 0.4 程度) を設ける

これらの検討結果をもとにして、原位置試験の暫定的な案を提示したが、今後はより詳細な案 を検討していく必要がある。まず、試験孔の寸法や形状、配置は数値解析を用いて検討する必要 がある。地下坑道周辺の応力場は掘削によって変化しており、坑道の形状によっては応力集中が 生じている箇所がある場合がある。土岐花崗岩は強度が高いため、破壊限接近度を大きくする(た だし1未満)ためには坑道周辺の応力集中を利用するのがよいと考えられる。なお実際の坑道で は、掘削による周辺岩盤のゆるみなどの損傷の影響も考慮する必要があると考えられる。土岐花 崗岩は脆性的な破壊挙動を示すため時間依存的な変形量がかなり小さいと予想されるので、試験 孔の直径や内空変位の測定による把握は困難だと推定される。孔壁の破壊やその兆候を知るため には、歪や AE (アコースティックエミッション)の測定が有効であると考えられるが、そのた めの機器の選定も重要である。ただし、数日~3 年程度の試験期間を想定しているので、測定装 置を新たに開発する必要はなく、市販品で精度が高いものを選定すれば良いと考えられる。

#### 5. まとめ

本研究の主たる目的は、未だに知られるところの少ない力学的な長期岩盤挙動に対して少しで も新しい知見を加えることである。

第2章では、堆積岩(田下凝灰岩)の長期クリープ試験について述べた。本年度で、試験を開始してから15.5年以上が経過した。このような長期にわたる試験は過去にも例が少なく、岩石の 長期時間依存性挙動を評価するための貴重なデータを取得している。今後もできるだけ長期にわたって試験を継続する予定である。

第3章では、2010年度に示した岩石の強度とnの値に、試験方法の記載やデータを追加して再 整理した。これらはピーク強度の載荷速度依存性に関するデータであるが、次いで不連続面の時 間依存性と関係が深いと考えられる亀裂表面あるいは破片表面でのすべり、および摩擦に支配さ れている状態(残留強度領域)でのnの値について検討した。さらに、室内試験で得られた結果 を原位置岩盤の評価に適用するために重要な、時間依存性の寸法効果に関する検討を行った。そ の結果、載荷速度依存性を決めるための4つの試験方法によるnの値の相違は見られなかった。 また、圧縮試験と引張試験ではnの値の相違は見られず、気乾状態と比較して湿潤状態ではnの 値が小さいことが分かった。三軸圧縮強度(差応力)にほぼ比例してnの値が増加した。残留強 度領域での載荷速度依存性は、ピーク強度の載荷速度依存性と大きな相違はなかった。岩石を破 壊してできた破片を圧密した試験片では、岩石間のnの値の相違が小さくなった。岩石を対象に した室内試験の結果を実際の岩盤に適用するには、時間依存性の寸法効果の解明が必要であり、 今後の課題として残されていることを指摘した。

第4章では、原位置試験計画の策定に資する情報を得るため、空洞の周辺岩盤に生じる応力が 一本の円形坑道を掘削した際の周辺岩盤の応力状態よりも大きくなるような条件下での坑道の安 定性について検討した。まず、断面形状が楕円形の坑道に関して、周辺岩盤に生じる応力の理論 解と土岐花崗岩の力学試験結果から、坑壁での破壊限接近度の分布を求めた。次いで、複数の坑 道が連設された多連設坑道の鉱柱に生じる応力と土岐花崗岩の力学試験結果から破壊限接近度を 求めた。それらの結果から、坑道壁面が破壊するまでの寿命を推定し、坑道を利用した原位置試 験手法について検討した。それらの結果と岩石のクリープ試験の結果を比較した結果、次のよう な条件下では、数日~数年程度の期間で孔壁の破壊が生じる可能性があることを指摘した。

- ① *σ<sub>h</sub> / σ<sub>v</sub>* = 1 (等方圧) で短径 / 長径= 0.1~0.2 の楕円形の試験孔を設ける
- ② 短径 / 長径 = 1 (円形)の試験孔を $\sigma_h/\sigma_v$  = 3.5 程度の場所に設ける
- ③ 多数の円孔 ( $\sigma_v = 20$  MPa では L/D = 0.2 程度、 $\sigma_v = 30$  MPa では L/D = 0.4 程度) を設ける

#### 参考文献

- 1) 大久保誠介: "長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎的研究", JNC-TJ7400 2005-044 (1995).
- 2) 大久保誠介: "長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎的研究", PNC-TJ1602 96-004 (1996).
- 3) 大久保誠介: "長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎的研究", PNC-TJ1602 97-004 (1997).
- 4) 大久保誠介: "長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎的研究", PNC-TJ1602 98-004 (1998).
- 5) 大久保誠介: "長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎的研究", JNC-TJ7400 99-003 (1999).
- 大久保誠介: "長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎的研究", JNC-TJ7400 2000-002 (2000).
- 7) 大久保誠介: "長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎的研究", JNC-TJ7400 2001-003 (2001).
- 8) 大久保誠介: "長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎的研究", JNC-TJ7400 2001-010 (2002).
- 9) 大久保誠介: "長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎的研究", JNC-TJ7400 2002-011 (2003).
- 10) 大久保誠介: "長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎的研究", JNC-TJ7400 2004-002 (2004).
- 11) 日本原子力研究開発機構: "超深地層研究所地層科学研究基本計画", JAEA-Review 2010-016 (2010).
- 12) 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).
- 13) 大久保誠介,瀬野康弘,中間茂雄,佐藤稔紀,平野享:"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(委託研究)", JAEA-Research 2007-088 (2008).
- 14) 大久保誠介, 何昌栄, 西松裕一: "一軸圧縮応力下における時間依存性挙動", 日本鉱業会誌, Vol.103, pp.177-181 (1987).
- 15) 大久保誠介, 西松裕一, 緒方義弘: "非線形粘弾性モデルによる坑道変形のシミュレーション", 日本鉱業会誌, Vol.103, pp.293-296 (1987).
- 16) 大久保誠介,: "コンプライアンス可変型構成方程式の解析的検討", 資源と素材, Vol.108, pp.601-606 (1992).
- 17) 大久保誠介, 福井勝則: "田下凝灰岩の長期クリープ試験と構成方程式", 資源と素材, Vol.118, pp.36-42 (2002).
- 18) 大久保誠介,瀬野康弘,平野享,中間茂雄,松井裕哉: "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(委託研究)", JAEA-Research 2008-065 (2008).
- 19) 大久保誠介,平野享,松井裕哉: "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(委託研究)", JAEA-Research 2009-020 (2009).
- 20) 大久保誠介,引間亮一,平野享,松井裕哉: "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(委託研究)", JAEA-Research 2010-031 (2010).
- 21) 大久保誠介,福井勝則,羽柴公博,引間亮一,丹野剛男,真田祐幸,松井裕哉,佐藤稔紀: "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(委託研究)",

JAEA-Research 2011-040 (2012).

- 22) 三枝博光, 瀬野康弘, 中間茂雄, 鶴田忠彦 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).
- 23) Perkins RD, Green SJ, Friedman M.: "Uniaxial stress behavior of porphyritic tonalite at strain rates to 103 / second", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 7, pp.527-535 (1970).
- 24) Sangha CM, Dhir RK.: "Influence of time on the strength, deformation and fracture properties of a lower devonian sandstone", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 9, pp.343-354 (1972).
- 25) Peng S, Podnieks ER.: "Relaxation and the behavior of failed rock", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 9, pp.699-712 (1972).
- 26) Sano O, Ito I, Terada M.: "Influence of strain rate on dilatancy and strength of Oshima granite under uniaxial compression", J Geophys Res, 86, pp.9299-9311 (1981).
- 27) Lajtai EZ, Scott Duncan EJ, Carter BJ.: "The effect of strain rate on rock strength", Rock Mech Rock Engng, 24, pp.99-109 (1991).
- 28)山口勉,大久保誠介,西松裕一,小泉昇三:"三城目安山岩の三軸圧縮強度に及ぼすひずみ速度の影響-岩石の破壊および変形における時間依存性の研究(第1報)",日本鉱業会誌,99, pp.87-92 (1983).
- 29)大久保誠介,西松裕一: "三城目安山岩と河津凝灰岩のクリープ特性と構成方程式",日本鉱業会誌,102, pp.395-400 (1986).
- 30) 福井勝則, 大久保誠介, 西松裕一: "一軸圧縮荷重下での岩石のクリープ特性", 資源と素材, 105, pp.521-526 (1989).
- 31) 何昌栄,大久保誠介,西松裕一: "クラス II 岩石の周圧下の挙動の載荷速度依存性",材料, 38, pp.216-220 (1989).
- 32) Okubo S, Nishimatsu Y, He C.: "Loading rate dependence of class II rock behaviour in uniaxial and triaxial compression tests - an application of a proposed new control method", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 27, pp.559-562 (1990).
- 33) 大久保誠介, 西松裕一, 何昌栄, 秋皙淵: "湿潤状態での岩石の一軸圧縮強度の載荷速度依存性", 材料, 41, pp.403-409 (1992).
- 34) 大久保誠介,秋皙淵: "気乾状態と湿潤状態とでの三城目安山岩のクリープ",資源と素材, 109, pp.917-922 (1993).
- 35) 大久保誠介,秋皙淵: "気乾状態と湿潤状態での田下凝灰岩ならびに大谷凝灰岩の一軸圧縮 クリープ",材料,43, pp.819-825 (1994).
- 36) 趙顕,大久保誠介,福井勝則: "周圧下での三城目安山岩のクリープ",資源と素材,111, pp.543-548 (1995).
- 37) 大久保誠介,福井勝則,木村有仁:"土丹の力学的特性と構成方程式",トンネルと地下,33, pp.45-50 (2002).
- 38) Okubo S, Fukui K, Qi Q.: "Uniaxial compression and tension tests of anthracite and loading rate dependence of peak strength", Int. J Coal Geol, 68, pp.196-204 (2006).
- 39) Hashiba K, Okubo S, Fukui K.: "A new testing method for investigating the loading rate dependency of peak and residual rock strength", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 43, pp.894-904 (2006).
- 40) 羽柴公博, 高秀君, 大久保誠介, 福井勝則: "小型岩石試験片用の三軸圧縮試験法の開発", 材料, 56, pp.790-795 (2007).
- 42) 羽柴公博, 雷鳴, 大久保誠介, 福井勝則: "破砕した岩石の強度回復特性と載荷速度依存性", Journal of MMIJ, 125, pp.481-488 (2009).
- 43) Shin K, Okubo S, Fukui K, Hashiba K.: "Variation in strength and creep life of six Japanese rocks", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 42, pp.251-260 (2005).

- 44) Okubo S, Fukui K.: "An analytical investigation of a variable-compliance-type constitutive equation", Rock Mech Rock Engng, 39, pp.233-253 (2006).
- 45) Mellor M, Hawkes I.: "Measurement of tensile strength by diametral compression of discs and annuli", Eng Geol, 5, pp.173-225 (1971).
- 46) 大久保誠介,金豊年,秋山政雄:"一軸引張強度と圧裂引張強度の載荷速度依存性,資源と 素材",109, pp.865-869 (1993).
- 47) 秋皙淵,大久保誠介,福井勝則: "気乾状態と湿潤状態での岩石の圧裂・一軸引張強度の分 布特性",資源と素材,111, pp.231-237 (1995).
- 48) Peng SS.: "A note on the fracture propagation and time-dependent behavior of rocks in uniaxial tension", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 12, pp.125-127 (1975).
- 49) 西松裕一,山口勉: "岩石の引張遅れ破壊寿命の分布特性に関する確率過程論的研究", 材料, 29, pp.192-197 (1980).
- 50) Cho SH, Ogata Y, Kaneko K.: "Strain-rate dependency of the dynamic tensile strength of rock", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 40, pp.763-777 (2003).
- 51) 福井勝則,大久保誠介,岩野圭太: "一軸引張応力下での三城目安山岩と田下凝灰岩の載荷 速度依存性",土木学会論文集,729, pp.59-71 (2003).
- 52) 大久保誠介,新孝一,西松裕一:"時間効果を考慮したき裂進展のモデルー三城目安山岩の場合-",材料,33, pp.882-887 (1984).
- 53) 福井勝則,大久保誠介,西松裕一: "三城目安山岩の三点曲げクリープ", 資源と素材, 107, pp.416-421 (1991).
- 54) Backers T, Fardin N, Dresen G, Stephansson O.: "Effect of loading rate on mode I fracture toughness, roughness and micromechanics of sandstone", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 40, pp.425-433 (2003).
- 55) Fukui K, Okubo S, Ogawa A.: "Some aspects of loading-rate dependency of Sanjome andesite strengths", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 41, pp.1215-1219 (2004).
- 56) Heard HC.: "Effect of large change in strain rate Int.he experimental deformation of Yule Marble", J Geol, 71, pp.162-195 (1963).
- 57) Rutter EH.: "The effects of strain-rate changes on the strength and ductility of Solenhofen limestone at low temperatures and confining pressures", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 7, pp.183-189 (1972).
- 58) Blanton TL.: "Effect of strain rates from 10-2 to 10 sec-1 in triaxial compression tests on three rocks", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 18, pp.47-62 (1981).
- 59) Swan G, Cook J, Bruce S, Meehan R.: "Strain rate effects in Kimmeridge bay shale", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 26, pp.135-149 (1989).
- 60) Li HB, Zhao J, Li TJ.: "Triaxial compression tests on a granite at different strain rates and confining pressures", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 36, pp.1057-1063 (1999).
- 61) Tapponnier P, Brace WF.: "Development of stress-induced microcracks in westerly granite", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 13, pp.103-112 (1976).
- 62) Lankford J.: "The role of tensile microfracture in the strain rate dependence of compressive strength of fine-grained limestone analogy with strong ceramic", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 18, pp.173-175 (1981).
- 63) Okubo S, Nishimatsu Y, Fukui K.: "Complete creep curves under uniaxial compression", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 28, pp.77-82 (1991).
- 64) 大久保誠介: "岩石のクリープ", 資源・素材学会誌, 107, N0.5, pp.245-252 (1991).
- 65) 趙顕,福井勝則,大久保誠介: "岩石の寸法効果と時間依存性挙動の計算機シミュレーションによる検討",資源と素材,111, pp.595-600 (1995).
- 66) 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",資源と素材, Vol.118, No.12, pp.737-744 (2002).
- 67) 福島啓一: "わかりやすいトンネルの力学", 土木工学社, §24. (1994).

- 68) 新孝一: "多連設空洞の構造安定問題についての予察", 第 33 回岩盤力学に関するシンポジ ウム講演論文集, pp.145-150 (2004).
- 69) 新孝一,大久保誠介:"水平に広がる空洞群の安全率について",資源・素材 2004(盛岡)企画 発表・一般発表(A)(B)講演資料, pp.103-104 (2004).
- 70) 平野享, 中間茂雄, 山田淳夫, 瀬野康弘, 佐藤稔紀: "超深地層研究所計画(岩盤力学に関する調査研究) MIZ-1 号孔における岩盤力学調査", 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2009-031 (2009).

表 1. SI 基本単位						
甘大昌	SI 基本ì	単位				
盔半里	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							
和辛量	SI 基本単位						
和立里	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 数每	メートル	m <sup>-1</sup>					
密度,質量密度キ	ログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>					
面積密度キ	ログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>					
比 体 積立	方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg					
電流密度ア	ンペア毎平方メートル	$A/m^2$					
磁界の強さア	ンペア毎メートル	A/m					
量 濃 度 <sup>(a)</sup> , 濃 度 モ	ル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>					
質量濃度キ	ログラム毎立法メートル	kg/m <sup>3</sup>					
輝 度力	ンデラ毎平方メートル	$cd/m^2$					
屈 折 率 <sup>(b)</sup> (	数字の) 1	1					
比透磁率(b)	数字の) 1	1					
(a) 量濃度 (amount concentra	ation)は臨床化学の分野では	物質濃度					
(substance concentration) Ft. FIFT Z							

(substance concentration)ともよばれる。
 (b)これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

#### 表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

			SI 租立单位	
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
亚	5.37 v (b)	red	1 (b)	m/m
	() / / / / / / (b)	(c)	1 1 (b)	2/ 2
		sr II-	1	m m -1
同 仮 多		пг		S .
カ	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
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	$m^2 kg s^2 A^1$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m <sup>2</sup>	$kg s^{2} A^{1}$
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				
カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>2</sup>
線量当量,周辺線量当量,方向	2 × 2 2 (g)	C	T/la a	2 -2
性線量当量,個人線量当量		SV	J/Kg	ms
酸素活性	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

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 ュ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。
 (a)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)へルツは周崩現象についてのみ、ペシレルは抜焼性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (a)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度度を表すために使用される。
 (d)やレ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。
 (d)かけ性核種の放射能(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

	SI 組立単位				
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方		
粘度	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>		
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>		
表 面 張 九	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>		
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>		
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	$rad/s^2$	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>		
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	$W/m^2$	kg s <sup>-3</sup>		
熱容量,エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{-2} K^{-1}$		
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$		
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{2}$		
熱 伝 導 率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>		
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>		
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>		
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> sA		
表 面 電 荷	「クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> sA		
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> sA		
誘 電 率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$		
透磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>		
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$		
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$		
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> sA		
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{3}$		
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$		
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>		
酸素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> e <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 <sup>-1</sup>	デシ	d		
$10^{21}$	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	с		
$10^{18}$	エクサ	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m		
$10^{15}$	ペタ	Р	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ		
$10^{12}$	テラ	Т	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n		
$10^{9}$	ギガ	G	$10^{-12}$	ピコ	р		
$10^{6}$	メガ	M	$10^{-15}$	フェムト	f		
$10^{3}$	+ 1	k	10 <sup>-18</sup>	アト	а		
$10^{2}$	ヘクト	h	$10^{-21}$	ゼプト	z		
$10^{1}$	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	v		

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	٥	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

衣される剱値が実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	ŀ	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J		
ダ	N	ŀ	$\sim$	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg		
統-	一原子	質量単	单位	u	1u=1 Da		
天	文	単	位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m		

#### 表8.SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

	名称		記号	SI 単位で表される数値
バ	-	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オン	グストロ・	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海		里	М	1 M=1852m
バ	-	ン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm)2=10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
1	ツ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネ	-	パ	Np	CI単位しの粉値的な間接け
ベ		N	В	対数量の定義に依存。
デ	ジベ	ル	dB -	

#### 表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値			
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J			
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N			
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s			
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} = 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$			
スチルブ	sb	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd } \text{ cm}^{\cdot 2} = 10^4 \text{ cd } \text{ m}^{\cdot 2}$			
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
キ	ユ	IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
$\scriptstyle  u$	ン	トゲ	$\sim$	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ			K	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
$\scriptstyle  u$			ム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガ		$\sim$	7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	I.	N	"		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			ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	進	大気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力	П	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)
3	カ	17	~		$1 = 1 = 10^{-6}$ m

この印刷物は再生紙を使用しています