R

JAEA-Research 2017-010 DOI:10.11484/jaea-research-2017-010



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 (共同研究)

Study on Crystalline Rock Aiming at Evaluation Method of Long-term Behavior of Rock Mass (Joint Research)

> 福井 勝則 羽柴 公博 松井 裕哉 Katsunori FUKUI, Kimihiro HASHIBA and Hiroya MATSUI

> > バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 地層科学研究部

Geoscientific Research Department Tono Geoscience Center Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

November 2017

日本原子力研究開発機構

Japan Atomic Energy Agency

本レポートは国立研究開発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。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方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 Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, 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, 2017

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 (共同研究)

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 地層科学研究部 福井 勝則*、羽柴 公博*、 松井 裕哉

(2017年9月6日 受理)

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、処分坑道周辺岩盤の力学的安定性は、建設・操業 時はもとより、埋め戻し部分の状態変化を可能な限り小さくするために、閉鎖後も維持されるこ とが重要である。

一方、坑道周辺の岩盤は、長期的にはクリープや応力緩和などの力学的な時間依存性挙動を示 すことが知られており、その挙動を把握・評価できる技術の構築が地層処分の技術的信頼性向上 のための課題の一つとなっている。

上記を踏まえ、岩盤の長期挙動を把握・評価できる技術の確立に資するため、年単位を超える ような岩石の長期クリープ試験や、高レベル放射性廃棄物の地層処分において想定される常温か ら 100℃程度の高温条件下での岩石の長期挙動を把握するための技術の開発等を実施し、想定さ れる様々な条件下での岩石の長期挙動現象の特徴やその程度に関する実験的評価を行うことを目 的とした研究を、共同研究として 2016 年度から開始した。

2016年度は、既往の研究成果を踏まえ、20年程度継続して実施している田下凝灰岩のクリープ 試験を引き続きおこなった。また、速度過程論や確率過程論にもとづく理論を水の影響を扱える ように修正し、気乾状態と湿潤状態における強度試験とクリープ試験の結果をもとに、修正した 理論の妥当性を検証した。さらに、種々の含水状態のもとで一軸圧縮試験を行い、応力-歪曲線 におよぼす含水状態の影響について検討した。

本報告書は、東京大学と日本原子力研究開発機構との共同研究に基づき実施した研究成果に関するものである。

東濃地科学センター:〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内 1-64

* 東京大学大学院工学系研究科

Study on Crystalline Rock Aiming at Evaluation Method of Long-term Behavior of Rock Mass (Joint Research)

Katsunori FUKUI*, Kimihiro HASHIBA* and Hiroya MATSUI

Geoscientific Research Department, Tono Geoscience Center Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management Japan Atomic Energy Agency Akiyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received September 6, 2017)

It is important to evaluate the stability of a repository for high-level radioactive waste not only during the design, construction and operation phases, but also during the post-closure period, for time frames likely exceeding several millennia or longer. The rock mass around the tunnels could be deformed through time in response to time dependent behavior such as creep and stress relaxation. Therefore, development of methodology to evaluate the past long-term behavior of rock mass is considered to be an issue. In view of above points, this study has been started as a collaboration study with the University of Tokyo from Fiscal Year 2016.

In FY 2016, creep testing on Tage tuff was continuously conducted. Existing theory of rate process and stochastic process was modified to be applied to evaluate effects of water, and then the modified theory was validated based on the results of strength and creep tests performed under dry and wet conditions. Furthermore, effects of water contents on stress-strain curves were examined by uniaxial compression testing under various water content conditions.

Keywords: Crystalline Rock, Long-term Behavior, Water Contents

This work has been performed in Japan Atomic Energy Agency as a joint research with the University of Tokyo.

* Graduate School of Engineering, the University of Tokyo

目	次
н	

1. 緒言	1
 2. 堆積岩(田下凝灰岩)の長期クリープ試験 2.1 はじめに 	2 2
2.2 試験の状況	2
2.2.1 試料岩石と試験方法	2
2.2.2 試験の維持管理	2
2.2.3 試験装置の移動	3
2.3 試験結果	4
2.4 まとめ	5
0. 出てでは明治されたいでもして思想	1 5
 若石の時間依存性季動におよはす水の影響 1 はじめに 	15
3.1 はしめに 2.9 亜染的些星	15
3.2	15
3.2.1 版本的项儿	17
3.2.2 平明元 9.9 三世日安山巴の試験結果に上る検討	10
 3 3 1 封約 3 3 1 封約 4 5 1 5 1 5 1 5 1 5 1 5 1 5 1 5 1 5 1 5	10
3.3.1 W41石石CEWW7月44 2.2.9 計略結用	10
3.3.2 - N級和本 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	19
 3.4 化両石と焼八石の砂碗和木による扱い 3.5 老<u>病</u> 	20 91
3.3 万宗····································	21 99
$5.0 \mathbf{z} \in \mathbf{\emptyset} \dots \dots$	44
4. 水分が岩石の応力	36
4.1 はじめに	36
4.2 試験方法	36
4.3 試験結果	38
4.3.1 応力一歪曲線	38
4.3.2 ピーク強度の変化量	39
4.4 考察	40
4.4.1 ピーク強度の変化量の含水状態依存性	40
4.4.2 含水状態による応力―歪曲線の変化	41
4.5 まとめ	42
5. 結言	59
参考文献	60

Contents

1.	Introduction	• 1
2.	Long-term creep testing on sedimentary rock (Tage tuff)	· 2
	2.1 Overview	· 2
	2.2 Creep testing ·····	· 2
	2.2.1 Core samples and test method	· 2
	2.2.2 Operation and maintenance	· 2
	2.2.3 Moving of test equipment due to building construction	· 3
	2.3 Present results ·····	· 4
	2.4 Summary	• 5
2	Efforts of water contents on time dependent behavior of reak mass	.15
5.	2.1 Overview	.15
	3.1 Overview	.15
	3.2 Theoretical background	.15
	3.2.1 Existing study	.17
	3.2.2 This study	.19
	2.2.1 Core samples and test method	.18
	2.2.2. Regults	.10
	3.3.2 Results	.20
	2.5 Discussion	.21
	3.5 Discussion	.21
	5.0 Summary	
4.	Effects of water contents on the stress-strain curve of different kinds of rocks	·36
	4.1 Overview ·····	·36
	4.2 Test method ·····	·36
	4.3 Results ·····	·38
	4.3.1 Stress-strain curve	·38
	4.3.2 Variation of the peak-strength	·39
	4.4 Consideration ·····	·40
	4.4.1 Effects of water contents on the peak-strength	·40
	4.4.2 Effects of water contents on the stress-strain curve	·41
	4.5 Summary	·42
5.	Concluding remarks	.59
Re	eferences	·60

図表リスト

図 2.1	空圧式一軸圧縮クリープ試験装置の概略図・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6
図 2.2	空圧式一軸圧縮クリープ試験装置の載荷部の写真・・・・・・・・・・・・・・・・・	7
図 2.3	東京大学工学部3号館と工学部4号館の位置・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	8
図 2.4	試験開始からのクリープ歪とクリープ応力の経時変化・・・・・・・・・・・・	9
図 2.5	2010 年以降のクリープ歪、水温、湿度の経時変化	11
図 2.6	クリープ歪と時間の対数との関係・・・・・	14
図 3.1	気乾状態における三城目安山岩の一軸圧縮強度の載荷速度依存性・・・・・	25
図 3.2	気乾状態と湿潤状態における三城目安山岩のクリープ応力 σ_{cr} とクリープ寿命 t_{cr}	
の関係・		26
図 3.3	気乾状態と湿潤状態における三城目安山岩のクリープ寿命 t _{er} のワイブルプロット	•
		27
図 3.4	気乾状態と湿潤状態における三城目安山岩の t*crのワイブルプロット	28
図 3.5	気乾状態と湿潤状態における三城目安山岩の t [*] _{cr、w} のワイブルプロット ······	29
図 3.6	5 種類の岩石の空隙率と b および a _w /a _d の関係	30
図 3.7	気乾状態と湿潤状態での一軸圧縮強度の計算結果・・・・・・・・・・・・・・・・	31
図 3.8	気乾状態と湿潤状態でのクリープ寿命の計算結果・・・・・・・・・・・・・・・	33
図 3.9	気乾状態における土岐花崗岩の一軸圧縮強度とクリープ寿命の計算結果・・・・・	35
図 4.1	6 種類の含水状態での試験方法	44
図 4.2	田下凝灰岩の載荷速度切換試験の結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	49
図 4.3	載荷速度 10 ⁻⁵ /s での応力―歪曲線・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	50
図 4.4	強度の増加量 $\Delta \sigma_{f_x w}$ と飽和度の関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	53
図 4.5	各含水状態での強度破壊点・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	55
図 4.6	応力一歪曲線の補正結果・・・・・	57

表 2.1	田下凝灰岩の力学物性値・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6
表 3.1	従来の研究と本研究での理論的検討の比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	23
表 3.2	三城目安山岩の一軸圧縮強度試験結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	24
表 3.3	6 種類の岩石の力学物性値 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	24
表 4.1	試験結果	43
表 4.2	式(4-3)中の定数 a と相関係数 R ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	44

This is a blank page.

1. 緒言

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、処分坑道の力学的安定性は、建設・操業時はもと より閉鎖後も維持されることが重要である。一方、処分坑道をとりまく岩石や岩盤は、クリープ や応力緩和などの力学的な時間依存性挙動を示すことが知られており、その長期にわたる挙動を 把握・評価することは、処分坑道の安定性評価における課題となっている。この課題を受け、2009 年度(平成21年度)までに実施してきた「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」では、結晶質岩を対象とした地上からの調査段階における長期岩盤挙動の評価手法の 構築を目指した研究開発をすすめ、2009 年度(平成 21 年度)にその成果のとりまとめを実施し た。2010 年度(平成 22 年度)は、その成果をふまえ、地上からの調査段階における長期岩盤挙 動評価手法の妥当性確認を主目的とした研究開発を実施した。2011年度(平成23年度)は、2010 年度(平成22年度)の研究に基づいて、次年度以降の研究の進め方を日本原子力研究開発機構内 部で検討した。2012 年度(平成 24 年度)と 2013 年度(平成 25 年度)は、超深地層研究所計画 の研究坑道を利用した研究段階(第3段階)における妥当性検証のための原位置試験手法について 検討した。2014年度(平成26年度)は、高レベル放射性廃棄物の地層処分において問題となる、 常温~100℃程度までの花崗岩の時間依存性挙動に関する検討を開始した。2015 年度は、これま での試験結果と数値解析結果の比較をもとにして、種々の時間依存性挙動の関係性について定量 的に検討した。これらの研究成果に基づき、2016年度から開始した共同研究では、田下凝灰岩の クリープ試験を継続するとともに、速度過程論や確率過程論にもとづく理論を水の影響を扱える ように修正し、気乾状態と湿潤状態における強度試験とクリープ試験の結果をもとに、修正した 理論の妥当性を検証した。さらに、種々の含水状態のもとで一軸圧縮試験を行い、応力-歪曲線 におよぼす含水状態の影響について検討した。

第2章では、継続しておこなってきた長期クリープ試験結果の現状について報告する。本研究 では、岩盤構造物の長期挙動予測評価手法に対して新しい知見を加えるため、長期間のクリープ 試験に耐えうる試験装置と、長期間にわたって精度の良い計測が行える計測システムを開発して、 1994年から試験を開始した。第2章では、試験条件や維持管理方法、2014年と2015年に行った 試験装置の移動の様子を説明するとともに、試験開始から19年間のクリープ試験結果を報告する。

第3章では、まず、従来の研究で用いてきた速度過程論や確率過程論にもとづく理論を、水分の影響を扱えるように修正し、次いで、気乾状態と湿潤状態における強度試験とクリープ試験の 結果をもとに、その理論の妥当性を検証した結果について述べる。さらに、その理論の応用例、 すなわち、クリープ寿命の予測や構成方程式への展開についても示した。

第4章では、花崗岩を含む5種類の岩石を用いて、6つの含水状態(湿潤状態、気乾浸水状態、 1日気乾状態、気乾状態、真空乾燥状態、炉乾燥状態)で試験を実施した結果について述べる。 なお、試験結果より、水分が岩石強度や応力一歪曲線に与える影響についても考察を加えている。

2. 堆積岩(田下凝灰岩)の長期クリープ試験

2.1 はじめに

一定応力のもとでの変形挙動を調べるクリープ試験は、材料の時間依存性挙動を調べるための 重要な試験の一つであり、種々の分野で古くから多くの研究が行われてきた。しかしながら、岩 石や岩塩などの岩質材料を対象とした試験のほとんどは、長くても数週間から数か月で打ち切ら れており、試験期間が1年を超えるような実験例は世界的にも少ない。この理由として、変位の 変化が小さいため温度や湿度の影響を受けやすく、測定が困難なことが挙げられる。

本研究では、できる限り長期間の試験に耐えうる装置と、長期間にわたって精度の良い測定が 行えるシステムについて検討した後、1997年に田下凝灰岩の一軸圧縮クリープ試験を開始した。 以下では、試験条件や維持管理方法、2014年と2015年に行った試験装置の移動の様子を説明す るとともに、試験開始から19.5年間の結果を報告する。

2.2 試験の状況

2.2.1 試料岩石と試験方法

試料岩石として、栃木県宇都宮市産の田下凝灰岩を用いた。田下凝灰岩の力学物性値は表 2.1 に示すとおりである。試験片は直径 25 mm、高さ 50 mm の円柱形とし、整形後は試験室で自然乾燥させてから、真空ポンプで減圧しながら飽和状態となるまで水を強制浸透させた。その後、1 か月以上水中に放置してから試験に用いた。なお試験では一貫して、イオン交換水を用いている が、試験室に放置することで空気中の二酸化炭素が溶け込んでいる(pH は 5.7 程度)。

試験には、図 2.1 に示した空圧式の一軸圧縮クリープ試験装置を用いた。コンプレッサー(図 2.1(a))の上限圧力と下限圧力をあらかじめ設定しておくと、圧力が下限まで下がるとモーターが運転を始め、設定した上限に達するとモーターは止まる。減圧弁(図 2.1(b))ではコンプレッサーからの一次圧を減圧し、二次圧として出力している。この際、減圧弁のブリード孔からは空気が絶えず漏れるようになっているが、その量は微少である。そのため、コンプレッサーのモーターは 2~3 時間に 1 回、約 1 分間だけ運転する。空圧シリンダー(図 2.1(d))には、空気の漏れ止め用のシールが使われていないので、圧力×有効受圧面積で荷重が計算できる。減圧弁の出口圧力、すなわち、シリンダー内の圧力は、歪ゲージ式圧力変換器(図 2.1(e))とブルドン管式圧力計で測定した。

変位測定には、2個の歪ゲージ式シングルカンチレバー型変位計(図2.1(g))を用いた。変位 計の出力は直流式の歪増幅器(図2.1(h))を経てディジタルマルチメーター(図2.1(i))に表示 される。試験開始後の変位の増加が大きいうちは、この出力を GPIB で計算機(図2.1(j))に取 り込んだ。変位の変動が小さくなってからは、毎週月曜日と金曜日にディジタルマルチメーター の値を読み取って記録した。なお、変位が急激に増加する三次クリープ状態になった場合は、再 び計算機で記録するようにしてある。

図 2.2 に示したように、試験は、常温下で試験片全体を水没させた状態で行った。減圧弁の出 口圧力を1 kg/cm²(0.098 MPa)に設定することで、クリープ応力の 2.8 MPa を試験片に加えた。 これは湿潤状態での田下凝灰岩の一軸圧縮強さ 9.1 MPa の約 30%に相当する。試験は 1997 年 5 月 23 日 10 時 27 分に開始した。

2.2.2 試験の維持管理

試験開始当初は変位計で測定した試験片の変位のみ記録していたが、2000年3月27日からは 圧力変換器で測定したシリンダー内の圧力も記録している。また、2010年1月8日には水温、室 温、湿度の記録も始めた。図 2.2 に示したように、水温は、試験に用いているものと同じ容器を 試験装置の横に置き、田下凝灰岩の別の試験片とイオン交換水を入れた状態で測定している。試 験室内の湿度の測定には、アスマン式通風乾湿計を用いている。水温、室温、湿度は、毎週月曜 日と金曜日に測定している。

ほぼ毎日行っていることとしては、シリンダー内の圧力が設定値に保持されていることの確認、 試験片が水没した状態になっていることの確認と水の継ぎ足し、前回の点検時に比べて変位の出 力値の大きな変化がないかどうかの確認、がある。その他、2014年9月からは1か月に1回、任 意の歪量を出力できるキャリブレーターにより、歪増幅器のキャリブレーションを行っている。 歪増幅器は直流式のため、ゲインの変化はほとんどないが、ゼロ点が変化する場合があるので、 その場合は試験開始時の値になるように調整が必要である。また適宜、コンプレッサー内部の水 抜きと、減圧弁のブリード孔の掃除を実施している。

今のところ問題は生じていないが、計測装置の測定値が異常を示した場合の対応策も考えてい る。圧力変換器の測定値が設定値やブルドン管式圧力計の表示値から大きくずれた場合は、図 2.1(c)の開閉弁を閉めることで数時間は圧力を一定にしたままクリープ試験が継続できるので、 その間に圧力変換器の点検を行うことにしている。変位の測定値が異常を示した場合は、まず、 歪増幅器やディジタルマルチメーターの設定値を確認することにしている。それらに問題がない 場合は、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 行うことにしている。ただし、ブロックゲージを取り出すと接点が若干ずれるため、この点検は 変位計の出力値が異常と判断した場合に限定することにした。また、故障に備えて歪増幅器や計 算機、CRT ディスプレイ、フロッピーディスクドライブなどは試験開始時と同一の機種を複数台 保管してある。これまでに、コンプレッサーと試験室の空調装置が故障し新品に交換したが、そ の他の機器に異常は生じていない。

2.2.3 試験装置の移動

試験装置は東京大学工学部4号館の試験室に設置してあったが、建物の耐震工事のため、2014 年と2015年に装置の移動を行った。

まず、工学部4号館の工事が開始する前の2014年5月22日に、試験装置を工学部3号館へ移動した。図2.3に建物の位置を示す。試験装置が設置してあった部屋(工学部4号館1階)から移動先の部屋(工学部3号館4階)までは約200mの距離があり、途中、坂やエレベーターによる移動も必要であった。当初は載荷を中断して除荷した状態での移動も検討したが、予想された移動時間が1時間程度と短く、図2.1(c)の開閉弁を閉じておけばその間の荷重の低下はほとんどないこと、載荷した状態でも移動が可能なこと、長期にわたって試験を行ってきたので、できるだけ載荷を継続することが重要であること、などの理由により、載荷を中断せず移動した。

移動の準備として、計測装置の電源を切り、ケーブルをテープで固定し、試験片が入っている 容器の上面をビニールテープで覆った。開閉弁を閉じ、コンプレッサーの電源を切ってから、コ ンプレッサーと減圧弁の間の配管を取り外した。次いで、載荷部から減圧弁までと計測装置が離 れないように台車に載せた。その際、コンプレッサーも同じ台車に載せ、梱包を行った。その後、 工学部4号館から工学部3号館へ、台車により装置を慎重に移動させた。移動先の部屋に着いた 後、梱包を外し、計測装置の電源を入れた。その後、コンプレッサーと減圧弁の間の配管をつな いでから、コンプレッサーの電源を入れた。コンプレッサー内部の圧力が所定の値になったこと を確認してから開閉弁を開け、移動前の状態に戻した。移動に要した時間は、準備も含めて約1 時間であった。

試験装置の移動直後からクリープ歪が急激に減少を始めたので、歪増幅器のキャリブレーショ

ンを行った。その結果、ゼロ点とゲインの設定値が変化していたことがわかったので、移動前の 値になるように調整を行った。

工学部4号館の工事が終了した後、2015年6月1日に試験装置を工学部3号館から工学部4号 館へ再度移動した。なお、工事の前後で、工学部4号館での試験室の場所が1階から2階へと変 わり、空調装置も新しいものへと変更された。2015年の移動は2014年とほぼ同様の手順で行っ た。ただし、工学部3号館から工学部4号館へは上り坂になっているため、その間は試験装置を トラックで運搬した。試験装置の移動直後にクリープ歪が少し増加したが、その後すぐに元の値 に戻った。2015年の移動では、歪増幅器の設定値には変化は見られなかった。

2.3 試験結果

図 2.4(a)、(b)には、試験開始の 1997 年 5 月 23 日から 2016 年 12 月 5 日までのクリープ歪お よびクリープ応力の経時変化を示した。試験では載荷開始から 0.3 秒程度で目標とするクリープ 応力に達するが、若干の振動があることなどから、図では載荷開始から 1 秒経過したときの歪を クリープ歪の起点とした。試験開始から 1999 年までの約 1000 日間は、クリープ歪がある値を取 った最後の時刻を計算機により記録した。2000 年 3 月 27 日以降は、2.2.1 でも述べたように、 毎週月曜日と金曜日にディジタルマルチメーターの表示値を読み取って記録した。

クリープ歪は、試験開始から 10 日後には約 400×10⁻⁶、500 日後には約 500×10⁻⁶、1300 日後に は約 600×10⁻⁶になった。その後、2000 年後半から 2002 年前半にかけては、クリープ歪の減少が 見られた。これは、図 2.4(b)に示したようにクリープ応力、すなわち、シリンダー内の圧力が徐々 に減少したことによるものであった。そこで、2002 年 7 月 12 日にシリンダーの手前の開閉弁を 閉め、減圧弁のブリード孔を掃除し、圧力を再調整した後、開閉弁を開けて試験を再開した。そ の結果、クリープ応力はほぼ設定値に戻り、クリープ歪も 2000 年後半とほぼ同じ値に戻った。そ れ以降も、クリープ応力が徐々に減少したので、適宜、減圧弁のブリード孔の掃除と圧力の再調 整を行った。

2007 年後半以降は、減圧弁の調整を頻繁に行ったので、それ以前よりもクリープ応力は安定した。しかし、2008 年から 2010 年にかけては、クリープ応力の測定値がほぼ一定であったにもかかわらず、クリープ歪は減少傾向を示した。この原因として、何らかの影響でシリンダーが動きにくくなっている可能性が考えられたので、2010 年 10 月 29 日にシリンダー内の圧力を設定値の1 kg/cm²から 0.5 kg/cm²まで下げてから、0.5 kg/cm²と 0.4 kg/cm²の間で圧力を 10 回上下に変化させた。その後、圧力を設定値である 1 kg/cm²に戻した。その結果、クリープ歪は 2007 年とほぼ同じ値に戻った。

2.2.3で述べたように、2014年5月22日に試験装置を移動した結果、クリープ歪が急激に 減少を始めたが、これは歪増幅器の設定値の変化によるものであった。また、2015年6月1日に 試験装置を再度移動したところ、クリープ歪が少し増加したが、その後すぐに元の値に戻った。 2016年8月には、シリンダーの手前の開閉弁を閉め、減圧弁のブリード孔を掃除したところ、ク リープ応力が増加し、それにともなってクリープ歪も増加した。そのため、2016年9月に減圧弁 を調整しクリープ応力を設定値に戻したところ、クリープ歪も元の値に戻った。

図 2.5(a)、(b)、(c)には、測定を開始した 2010 年から 2016 年までの水温と湿度の経時変化を、 クリープ歪とともに示した。図 2.5(b)に示したように、水温は夏に高く、冬に低くなるが、2010 年に比べて 2011 年以降は水温の変化の幅が小さくなった。これは、2010 年 6 月に試験室の扉を 交換した結果、試験室の密閉性が高まったためと考えられる。2014 年 5 月 22 日から 2015 年 6 月 1 日までは、それ以前の工学部 4 号館とは異なる工学部 3 号館に試験装置を設置したため、冬の 日変化が大きいなど、水温の変化傾向がやや異なっている。2015 年 6 月 1 日以降は、2014 年 5 月 22 日以前と同じ工学部4号館に試験装置を設置しているが、工事によって試験室の密閉性が高まったため、夏と冬の水温の差がやや小さくなった。

図 2.5(c)には湿度の変化を示した。冬にデータ点がところどころ消えているのは、アスマン式 通風乾湿計で測定できる湿度の下限を下回ったためである。湿度は夏に高く、冬に低くなるが、 2010 年から 2016 年まででその傾向はほとんど変化していない。

図 2.5(a)に示したクリープ歪の変化には、水温や湿度に見られたような季節変化は生じておら ず、長期的な変動は、図 2.4(b)に示したクリープ応力の変動によるものと思われる。一方、クリ ープ歪には日変化が生じており、この原因として、日々の温度変化による岩石試験片と試験装置 の膨張収縮が考えられる。また、温度や湿度の変化が、変位計や歪増幅器などの計測装置に影響 をおよぼしている可能性も考えられる。

図 2.6 には、クリープ歪と時間の対数との関係を示した。◆で示したのは、試験開始から 1999 年までの測定結果であり、2.2.1 で述べたように計算機で取得した。▲で示したのは、2000 年 から 2007 年までの測定結果であり、減圧弁の出口圧力を調整した次の月のクリープ歪の平均値で ある。○で示したのは、2016 年 11 月のクリープ歪の平均値である。図には、次式による計算結 果を赤の実線で示した。

$$\varepsilon = At^{(1/(\mu+1))} \tag{2-1}$$

ここで、 ϵ はクリープ歪、tは時間であり、A=120×10⁻⁶、 μ =9とした。右端の▲(2007年9月) から〇(2016年11月)まで約9年経過しており、その間気温や湿度の季節変化や日変化、載荷 装置や計測装置の調整、装置の移動などがあったものの、クリープ歪はほとんど変化していない。 また、図より、19.5年間のクリープ歪の変化が式(2-1)で近似できることがわかった。

2.4 まとめ

本章では、1997年に開始した田下凝灰岩の一軸圧縮クリープ試験について、まず、試験条件と 試験方法、これまでに行ってきた維持管理方法について述べた。次いで、2014年と2015年に行 った試験装置の移動の様子について説明した。その後も試験は順調に行われており、試験開始か ら今年で19年が経過した。2007年9月から2016年11月までの約9年間には、気温や湿度の季 節変化や日変化、載荷装置や計測装置の調整、装置の移動などを経験したが、クリープ歪はほと んど変化していないことがわかった。

本研究でのクリープ試験は開始から19年をすぎ、過去に例がほとんどない長期間の測定を継続 しているところである。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。 JAEA-Research 2017-010

	気乾	湿潤
一軸圧縮強度(MPa)	16	9.1
圧裂引張強度 (MPa)	1.9	0.9
ヤング率(GPa)	3.6	2.6
比重	1.81	2.05
空隙率 (%)	2	5





図 2.2 空圧式一軸圧縮クリープ試験装置の載荷部の写真 温度計1:室温測定用 温度計2:水温測定用



図 2.3 東京大学工学部 3 号館と工学部 4 号館の位置







- 10 -



- 11 -



- 12 -









◆:試験開始から1999年までの、計算機で取得した結果

▲: 2000 年から 2007 年までの、減圧弁の出口圧力を調整した次の月のクリープ歪の平均値 ○: 2016 年 11 月の平均値

赤の実線:式(2-1)による計算結果

3. 岩石の時間依存性挙動におよぼす水の影響

3.1 はじめに

地下構造物の長期安定性を評価するためには、岩石の時間依存性挙動を把握することが重要で あり、これまでに数多くの研究が行われてきた。載荷速度の増加とともに強度が増加すること(載 荷速度依存性)、一定の応力のもとで歪が徐々に増加すること(クリープ)、一定の歪のもとで応 力が徐々に減少すること(応力緩和)、などが広く知られている。

東京大学の著者らの研究室では、これらの種々の載荷条件下での時間依存性挙動の関係を実験 により明らかにし、岩石の時間依存性挙動を統一的に説明する理論や構成方程式についての研究 を行ってきた。0kubo et al.¹⁾では、安山岩と凝灰岩の試験結果をもとにして、応力-歪曲線とそ の載荷速度依存性、および、クリープ歪曲線を再現できる構成方程式を提案した。Shin et al.²⁾ では、安山岩と凝灰岩の試験結果をもとにして、強度とクリープ寿命のばらつき、および、それ らと載荷速度依存性とが密接な関係にあることを明らかにした。Hashiba & Fukui³⁾では、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、強度とクリープ寿命のばらつき、強度の 寸法効果を統一的に説明する理論について述べ、その理論が多くの岩石の試験結果にあてはまる ことを報告した。Hashiba & Fukui⁴⁾では、花崗岩を用いて、強度の載荷速度依存性を調べる試験、 クリープ試験、応力緩和試験、応力と歪の両方が時間とともに変化する試験を行い、それらすべ ての結果を再現できる構成方程式を提案した。

ただし、これらの研究は一定の環境下での時間依存性挙動を対象にしており、環境の変化の影響については考慮していなかった。例えば、岩石の時間依存性挙動は水分によって変化すること が知られており、気乾状態に比べて湿潤状態では、強度の載荷速度依存性が大きくなったり³⁾、 同じクリープ応力レベル(強度に対するクリープ応力の割合)での破壊までの時間(クリープ寿 命)が短くなったりする⁵⁾。これまで構築した理論や構成方程式は、気乾状態と湿潤状態のそれ ぞれには適用できたが、両者を統一的に説明することはできなかった。地下構造物周辺の岩盤は、 掘削の進展や、その後の時間経過とともに含水状態が変化する可能性があるので、岩石の時間依 存性挙動におよぼす水分の影響を統一的に説明できる理論や構成方程式の構築が重要である。

本章では、まず、従来の研究で用いてきた速度過程論や確率過程論にもとづく理論を、水分の 影響を扱えるように修正した。次いで、気乾状態と湿潤状態における強度試験とクリープ試験の 結果をもとに、その理論の妥当性を検証した。さらに、その理論の応用例、すなわち、クリープ 寿命の予測や構成方程式への展開についても合わせて示した。

3.2 理論的背景

3.2.1 従来の研究

Shin et al.²⁾や Hashiba & Fukui³⁾では、速度過程論や確率過程論⁶⁾にならって、岩石の破壊が 進行する速度 d λ /dt が応力 σ の関数に比例するとした。応力の関数としてべき関数を用いた。

$$\frac{d\lambda}{dt} = m\sigma^n \tag{3-1}$$

次に、dλ/dtの積分値がある値 Λ に達すると破壊すると仮定した。

$$\Lambda = \int_0^t \frac{d\lambda}{dt} dt \tag{3-2}$$

定応力速度 $\dot{\sigma}$ での強度試験の場合は $\sigma = \dot{\sigma}t$ として、t=t_fのときにピーク強度 σ_{f} に達する。その結果、強度の載荷速度依存性が次式のように表せる。

$$\sigma_f = \left(\frac{n+1}{m}\Lambda\dot{\sigma}\right)^{\frac{1}{n+1}} \tag{3-3}$$

クリープ試験では $\sigma = \sigma_{cr}$ =const. として、t=t_{cr}のときに破壊する。その結果、クリープ応力とクリープ寿命の関係が次式のように表せる。

$$t_{cr} = \frac{\Lambda}{m\sigma_{cr}^{\ n}} \tag{3-4}$$

強度とクリープ寿命の分布特性を検討するため、式(3-2)のΛがワイブル分布に従うと仮定した。

$$1 - F(\Lambda) = \exp\left\{-\left(\frac{\Lambda}{A}\right)^B\right\}$$
(3-5)

ここで、F(Λ)は Λ の累積分布関数、A は尺度母数、B は形状母数である。式(3-3)と式(3-4)を式 (3-5)に代入すると次式が得られる。

$$1 - F(\sigma_{f}) = \exp\left\{-\left(\frac{\sigma_{f}}{A_{1}}\right)^{B_{1}}\right\}$$
(3-6)
$$A_{1} = \left(\frac{n+1}{m}A\dot{\sigma}\right)^{\frac{1}{n+1}}, \quad B_{1} = (n+1)B$$

$$1 - F(t_{cr}) = \exp\left\{-\left(\frac{t_{cr}}{A_{2}}\right)^{B_{2}}\right\}$$
(3-7)
$$A_{2} = \frac{A}{m\sigma_{cr}{}^{n}}, \quad B_{2} = B$$

上式は、強度とクリープ寿命のいずれもがワイブル分布に従い、強度の形状母数 B₁がクリープ寿命の形状母数 B₂に n+1 を乗じた値となることを示している。

Shin et al.²⁾や Hashiba & Fukui³⁾では、多くの岩石の強度の載荷速度依存性が式(3-3)で表さ れ、クリープ寿命の応力依存性が式(3-4)で表されることを示した。さらに、強度とクリープ寿命 の形状母数の間に $B_1=(n+1)B_2$ が成り立つことを示し、岩石の破壊過程が、式(3-1)や式(3-2)のよ うな簡単な式で説明できることを明らかにした。Okubo & Fukui⁷⁾や Hashiba & Fukui⁴⁾は、式(3-1) をもとにして岩石の時間依存性挙動を再現する構成方程式を提案した。しかしながら、これまで の研究では、水の影響についての検討は不十分であった。例えば、式(3-1)から式(3-7)は気乾状態と湿潤状態の両方に適用できたが、式(3-1)のnが含水状態によって変化したので³⁾、気乾状態と湿潤状態とを別々に扱う必要があった。その結果、式(3-1)にもとづく構成方程式は一定の含水状態での挙動を再現するにとどまっていた。

3.2.2 本研究

3.2.1 で述べたように、気乾状態と湿潤状態では n の値が異なったので、式(3-1) で気乾状態 と湿潤状態の結果を統一的に説明することはできなかった。気乾状態と湿潤状態の結果を統一的 に説明するため、式(3-1)の応力関数をべき関数から指数関数に変えて検討してみる。

$$\frac{d\lambda}{dt} = a \exp(b\sigma) \tag{3-8}$$

破壊規準として式(3-2)を仮定すると、強度の載荷速度依存性とクリープ寿命の応力依存性は式 (3-3)と式(3-4)に対応して以下のように表される。ただし、exp(bσ_f)>>1を利用した。

$$\sigma_{f} = \frac{1}{b} \ln \frac{Ab\dot{\sigma}}{a}$$
(3-9)
$$t_{cr} = \frac{A}{a \exp(b\sigma_{cr})}$$
(3-10)

図 3.1 には、秋⁸が報告した三城目安山岩の気乾状態における一軸圧縮強度を示した。三城目 安山岩については次章で詳しく述べるが、図に示したのは、流理面に平行な方向に載荷して得ら れた結果である。図より、応力速度の増加とともに強度も増加することがわかる。図には、式(3-3) で n=39 とした計算結果と、式(3-9)で b=0.45 (1/MPa) とした計算結果を示した。これらの値の 根拠は次章で述べるが、室内試験での応力速度の範囲 (10⁻²~10 MPa/s) では、式(3-3)と式(3-9) の計算結果の差異は十分小さいものの、速度が遅くなるにつれ両者の差は大きくなることがわか る。なお、式(3-9)の方が強度が小さくなるため、設計などに用いる場合は安全側となる。また、 式(3-4)よりも式(3-10)の方が、長期的な挙動(例えば、凝灰岩の約10年間のクリープ試験結果) をうまく説明できる可能性がある^{9,10}。

強度試験において、速度 $\dot{\sigma}_1$ と $\dot{\sigma}_2$ での強度の差を $\Delta \sigma_f$ とすると、式(3-9)より次式が導かれる。

$$\Delta \sigma_f = \frac{1}{b} \ln \frac{\dot{\sigma}_1}{\dot{\sigma}_2} \tag{3-11}$$

Hashiba & Fukui³⁾では、同じ岩石の一軸圧縮応力下での $\Delta \sigma_f$ は、気乾状態と湿潤状態とでほぼ 等しいことが報告されている。すなわち、b が気乾状態と湿潤状態とで等しいことになり、式(3-8) を用いることで気乾状態と湿潤状態の結果を統一的に説明できる可能性がある。

強度とクリープ寿命の分布特性を検討するため、3.2.1と同様に Λ が式(3-5)のワイブル分 布に従うと仮定する。式(3-9)と式(3-10)を式(3-5)に代入すると次式が得られる。

$$1 - F(\sigma_{f}) = \exp\left\{-\exp\left(\frac{\sigma_{f} - A_{3}}{B_{3}}\right)\right\}$$
(3-12)
$$A_{3} = \frac{1}{b}\ln\frac{Ab\dot{\sigma}}{a}, \quad B_{3} = \frac{1}{Bb}$$
$$1 - F(t_{cr}) = \exp\left\{-\left(\frac{t_{cr}}{A_{4}}\right)^{B_{4}}\right\}$$
(3-13)
$$A_{4} = \frac{A}{a\exp(b\sigma_{cr})}, \quad B_{4} = B$$

すなわち、強度はグンベル分布、クリープ寿命はワイブル分布に従うことになる。材料強度の分 布関数としては、極値分布のタイプ III に分類されるワイブル分布が広く利用されてきたが、極 値分布のタイプ I に分類されるグンベル分布も利用されることがあり¹¹⁾、岩石強度の整理におい ては両者の差は小さい¹²⁾。

従来の研究と本研究での理論的検討の比較を表 3.1 にまとめた。

3.3 三城目安山岩の試験結果による検討

3.3.1 試料岩石と試験方法

既往の研究で得られている三城目安山岩の試験結果⁸⁾を用い、3.2.2で述べた理論の妥当性 を検証する。なお、三城目安山岩の結果を用いたのは、著者らの研究室で、多くの試験結果が蓄 積されてきたからである。試験には、直径約 25 mm、高さ約 50 mm の円柱形試験片が用いられ、 それらは流理面と平行にボーリングしたコアより作製された。試験には多数の試験片が必要であ ったため、図 3.1 に示したブロックとは異なるブロックから試験片が作製された。

試験は気乾状態と湿潤状態とで行われた。気乾状態とは、作製した試験片を1か月以上、温度 20±5℃、湿度65±15%に保たれた試験室で自然乾燥させた状態である。湿潤状態とは、乾燥させ た試験片をデシケータに入れ、真空ポンプにて減圧しながら試験片の中が飽和状態となるまで水

(イオン交換水)を浸透させ、その後1か月以上水中に放置した状態である。湿潤状態の試験は、 試験片を容器内で水没させた状態で行われた。

ー軸圧縮強度試験は、容量 100 kN の油圧式サーボ試験機により次式で表される応力帰還制御¹³⁾ で行われた。

$$\dot{\varepsilon} - \alpha \frac{\dot{\sigma}}{E} = k \tag{3-14}$$

ε は歪み、σ は応力、E はヤング率である。k は載荷速度で 10⁻⁴/s(応力速度 1 MPa/s に相当)、
 α は応力帰還量を決める無次元の定数で 0.3 とした。荷重は歪ゲージ式ロードセル、変位は差動
 変圧器式変位計で測定された。

ー軸圧縮クリープ試験は、Okubo et al.¹⁾で開発された容量 50 kN の油圧式クリープ試験機を用いて行われた。クリープ試験機に設置されたアキュムレータの働きにより、バルブを開けてから 0.2 s 以内に所定の応力が試験片に加わり、試験中の応力の変動は 0.1 MPa 以内であった。変位

は歪ゲージ式片持ち梁型変位計で測定された。

3.3.2 試験結果

表 3.2 に気乾状態と湿潤状態における一軸圧縮強度試験の結果を示す。湿潤状態では、強度と ヤング率のいずれもが気乾状態よりも小さくなることがわかる。Hashiba & Fukui³⁾では、三城目 安山岩の一軸圧縮強度はブロックによってばらつくが(例えば、気乾状態では 62 MPa から 103 MPa)、 式(3-3)から求められた n は気乾状態で 35-42、湿潤状態で 28-31 とブロックによる差異が小さい ことを報告した。そこで、気乾状態での三城目安山岩の n の平均値 39 と表 3-2 に示した強度の平 均値 86.8 MPa を用いて、載荷速度が 10 倍変化したときの強度の変化量 $\Delta \sigma_f$ を式(3-3)より求め ると 4.9 MPa となり、この $\Delta \sigma_f$ を式(3-11)に代入して b を求めると 0.47 /MPa となった。湿潤 状態での三城目安山岩の n の平均値 30 と表 3.2 に示した強度の平均値 74.8 MPa を用いて同様の 計算を行うと、 $\Delta \sigma_f$ は 5.4 MPa、b は 0.43 /MPa となった。b は気乾状態と湿潤状態とで同程度 の値となり、その平均値は 0.45 /MPa であった。図 3.1 に示したのは、これらの n と b の値を用 いて計算した結果である。

式(3-9)において、 Λ とbが気乾状態と湿潤状態とで等しいと仮定すると、同じ応力速度のも とでの $\sigma_{f,d}$ (気乾状態での σ_{f})と $\sigma_{f,w}$ (湿潤状態での σ_{f})の差は、 a_{d} (気乾状態での a)と a_{w} (湿潤状態での a)を用いて次式で表される。

$$\sigma_{f,d} - \sigma_{f,w} = \frac{1}{b} \ln \frac{a_w}{a_d} \tag{3-15}$$

表 3.2 に示した強度の平均値の差と b=0.45 (1/MPa) から、a_w/a_d=220 となる。これは、式(3-8) からわかるように、破壊が進行する速度が湿潤状態は気乾状態の 220 倍であることを示している。 以下では、これらの値を用いて、クリープ試験結果を整理してみる。

図 3.2 に、気乾状態と湿潤状態での一軸圧縮クリープ試験で得られたクリープ応力とクリープ 寿命の関係を自抜き記号で示した。湿潤状態では 5 通りのクリープ応力での結果が得られている が、それらの定性的な傾向は、式(3-10)で b=0.45 (1/MPa) として計算した図中の直線で表され た。式(3-10)の Λ と b が気乾状態と湿潤状態とで等しいとすると、同じクリープ応力での t_{cr、d} (気乾状態での t_{cr}) と t_{cr、w} (湿潤状態での t_{cr})の関係は、a_d と a_wを用いて次式で表される。

$$t_{cr,w} = \frac{a_d}{a_w} t_{cr,d} \tag{3-16}$$

式(3-16)で a_w/a_d=220 として t_{cr、d}から t_{cr、w}を推定し、図 3.2 に赤の■と◆で示したところ、それ らの結果は湿潤状態での試験結果の延長線上に位置した。すなわち、クリープ応力が同じであれ ば、気乾状態のクリープ寿命は湿潤状態のクリープ寿命の 220 倍程度であることがわかる。

次に、クリープ寿命のばらつきについて検討する。図 3.3 に、気乾状態と湿潤状態におけるク リープ寿命 t_{er}のワイブルプロットを示す。記号は図 3.2 の同じ条件での記号と同じである。いず れの条件でもデータは直線状に並んでおり、気乾状態と湿潤状態での各クリープ応力における t_{er} が、式(3-13)で表されるワイブル分布に従うことがわかる。

気乾状態と湿潤状態のそれぞれにおいて、クリープ応力の影響を補正するため、式(3-10)及び

式(3-13)を参考に、 $t^*_{cr}=t_{cr} \exp(b\sigma_{cr})=\Lambda/a$ とした場合のワイブルプロットを図 3.4 に示す。白抜き記号は図 3.3 に示した各クリープ応力での t_{cr} から求めた t^*_{cr} であり、この補正により、異なるクリープ応力での結果がほぼ重なったため、気乾状態と湿潤状態のそれぞれの条件下でのすべての結果をまとめて赤と青の●で示した。いずれの条件でもデータは直線状に並んでおり、気乾状態と湿潤状態での t^*_{cr} が、次式で表されるワイブル分布に従うことがわかった。

$$1 - F\left(t_{cr}^{*}\right) = \exp\left\{-\left(\frac{t_{cr}^{*}}{A_{5}}\right)^{B_{5}}\right\}$$

$$t_{cr}^{*} = t_{cr} \exp\left(b\sigma_{cr}\right) = \frac{A}{a}, \quad A_{5} = \frac{A}{a}, \quad B_{5} = B$$
(3-17)

図 3.4 に示した気乾状態の t*cr、d と湿潤状態の t*cr、wの関係は、式(3-16)より次式で表される。

$$t_{cr,w}^{*} = \frac{a_{d}}{a_{w}} t_{cr,d}^{*}$$
(3-18)

図 3.5 には、湿潤状態での $t^*_{cr,w}$ を青の●で、気乾状態での $t^*_{cr,d}$ から式(3-18)で a_w/a_d =220 として推定した $t^*_{cr,w}$ を赤の●で示した。湿潤状態での結果と気乾状態からの推定値はほぼ一致しており、 $t^*_{cr,w}$ は次式で表されるワイブル分布に従うことがわかる。なお、 A_6 =1.6×10¹⁵ (s)、 B_6 =0.9とした計算結果を図に直線で示した。

 $1 - F\left(t_{cr,w}^{*}\right) = \exp\left\{-\left(\frac{t_{cr,w}^{*}}{A_{6}}\right)^{B_{6}}\right\}$ $t_{cr,w}^{*} = t_{cr,w} \exp\left(b\sigma_{cr}\right) = \frac{A}{a_{w}}, \quad A_{6} = \frac{A}{a_{w}}, \quad B_{6} = B$ (3-19)

最後に、強度からクリープ寿命の推定を試みる。式(3-9)と式(3-19)より、 $t^*_{cr,w}$ と $\sigma_{f,w}$ や $\sigma_{f,d}$ との関係は次式で表される。

$$t_{cr,w}^{*} = \frac{\exp(b\sigma_{f,w})}{b\dot{\sigma}} = \frac{a_{d}}{a_{w}} \frac{\exp(b\sigma_{f,d})}{b\dot{\sigma}}$$
(3-20)

図 3.5 には、 $\sigma_{f,w}$ から推定した $t^*_{cr,w}$ を青の〇、 $\sigma_{f,d}$ から推定した $t^*_{cr,w}$ を赤の〇で示した。〇 のうち直線からずれているのは、値の小さい 2 点だけであり、強度から推定したクリープ寿命は クリープ試験結果とよく合っているといえる。

3.4 花崗岩と凝灰岩の試験結果による検討

大久保ら¹⁴⁾は、気乾状態と湿潤状態において、稲田花崗岩、河津凝灰岩、田下凝灰岩、大谷凝

灰岩の一軸圧縮強度試験を行った。試験は、容量100kNと容量1500kNの油圧式サーボ試験機に より、式(3-14)で表される応力帰還制御で行われた。荷重は歪ゲージ式ロードセル、変位は差動 変圧器式変位計で測定された。いずれの岩石とも、4 通りの載荷速度のもとで試験が行われ、一 軸圧縮強度とbの値が表3.3のように報告されている。ただし、4 種類の岩石の一軸圧縮強度は 載荷速度が10⁻⁵/s での値である。表より、これらの4 種類の岩石でも気乾状態と湿潤状態のb の値はほぼ一致していることがわかる。そこで、これらの結果からa_w/a_dを求めたところ、表に示 したように稲田花崗岩のa_w/a_dは三城目安山岩よりも小さく、3 種類の凝灰岩のa_w/a_dは三城目安 山岩よりも大きくなった。図3.6には、5 種類の岩石の空隙率とbおよび a_w/a_dの関係を示したが、 空隙率の増加とともにbもa_w/a_dも増加する傾向が見られた。すなわち、空隙率のように比較的容 易に取得できる物性値から時間依存性や水分の効果を推定できる可能性があることが示唆された。 ただし、時間依存性や水の効果は、空隙率だけでなく、岩種、構成鉱物、空隙の形状や大きさな どによっても変化すると考えられ、そのメカニズムについては今後も検討を続ける必要がある。

図 3.7 と図 3.8 には、式(3-9) と式(3-10) より計算した一軸圧縮強度とクリープ寿命を示す。これらの図からも、稲田花崗岩に比べて、凝灰岩の方が水分量の影響が大きいことがわかる。なお式(3-15) からわかるように、図 3.7 において湿潤状態の一軸圧縮強度に 1/b×ln(a_w/a_d)を加えると気乾状態の一軸圧縮強度になる。また、式(3-16) からわかるように、図 3.8 において湿潤状態のクリープ寿命に a_w/a_dを乗じると気乾状態のクリープ寿命になる。すなわち、湿潤状態の試験結果から気乾状態の結果を推定することができる。

日本原子力研究開発機構の瑞浪超深地層研究所が掘削された土岐花崗岩の一軸圧縮強度と、その載荷速度依存性より求めたbの値を表3.3に示す。土岐花崗岩の一軸圧縮強度も載荷速度10⁻⁵/sでの値である。これらの結果から式(3-9)と式(3-10)により一軸圧縮強度とクリープ寿命を求め、図 3.9 に示した。土岐花崗岩の一軸圧縮強度は稲田花崗岩よりも小さかったが、bの値は同程度であったので、図 3.9(a)のグラフの傾きは、図 3.7(a)のグラフの傾きとほぼ同じになった。また、図 3.9(b)のグラフの傾きは、図 3.8(a)のグラフの傾きとほぼ同じになった。

3.5 考察

3.2.2の理論にもとづいて三城目安山岩の試験結果を整理したところ、気乾状態と湿潤状態 における一軸圧縮強度試験と一軸圧縮クリープ試験の結果が、図 3.5 のように1本のマスターカ ーブで表せた。これは、三城目安山岩の破壊の進行や時間依存性挙動が、表 3.1 の最右欄に示し た簡単な計算で近似できることを意味している。

クリープ試験の実施には時間と手間がかかるが、bの値がわかれば、強度試験結果からクリー プ寿命が推定できる。また、 a_w/a_d がわかれば、気乾状態と湿潤状態のどちらか一方の結果からも う一方の結果が推定できる。これを、稲田花崗岩、河津凝灰岩、田下凝灰岩、大谷凝灰岩の試験 結果を用いて説明した。なお、bは強度の載荷速度依存性の程度を表しており(式(3-11))、 a_w/a_d は気乾状態と湿潤状態の強度差とbから求まるので(式(3-15))、著者らが開発した載荷速度切換 試験⁵⁾を気乾状態と湿潤状態で行えば、2本の試験片だけで、気乾状態と湿潤状態でのクリープ寿 命を推定できることになる。ただし、強度は試験片ごとにばらつくので、実際には、気乾状態と 湿潤状態のそれぞれで5本程度の試験片は必要になるであろう。それでも、クリープ試験を行う ことに比べれば、大幅な時間と手間の節約になる。なお、クリープ寿命のばらつきの程度を表す 式(3-13)の B₄の値を知るには、気乾状態か湿潤状態かで多くの強度試験を実施する必要がある。

式(3-8)において、破壊の進行や時間依存性挙動におよぼす水分の影響を表すのは定数 a であり、 湿潤状態の a は気乾状態に比べて大きいことがわかった。すなわち、気乾状態と湿潤状態とで破 壊進行のメカニズムはあまり変化せず、その進行速度が湿潤状態では加速されていると考えるこ とができる。式(3-1)と式(3-8)のd λ /dt は破壊が進行する速度と述べたが、具体的には亀裂の進 展速度、非弾性歪の増加速度、剛性の低下速度などを意味する。例えば、式(3-1)と式(3-8)で λ を亀裂長さ、 σ を応力拡大係数とすると、応力腐食による亀裂進展速度を表す式になる¹⁵⁾。また、 Okubo et al。¹⁾は λ を非弾性歪として、式(3-1)にもとづく構成方程式を提案した。Okubo & Fukui⁷⁾ や Hashiba & Fukui⁴⁾は λ をコンプライアンス(=歪/応力)として、式(3-1)にもとづく構成方 程式を提案した。これらの構成方程式は有限要素解析プログラムに組み込まれ、地下坑道周辺岩 盤の時間依存性挙動の計算に用いられてきた^{16,17)}。これらの式(3-1)にもとづく構成方程式では 水の影響を再現できなかったが、式(3-8)にもとづく構成方程式が構築できれば、aを変えるだけ で含水状態の変化も再現できる可能性がある。ただし、そのためには、本章のように気乾状態と 湿潤状態の2状態だけでなく、aと含水状態の関係を明らかにする必要がある。

3.6 まとめ

本章では、まず、従来の研究で用いてきた速度過程論や確率過程論にもとづく理論を紹介し、 環境が変化しない条件下には適用できるが、水の影響についての検討は不十分であったことを述 べた。その上で、理論をわずかに修正することで、気乾状態と湿潤状態の結果を統一的に説明で きることを三城目安山岩の既往の実験結果を用いた検証により示した。

また、この結果を用いることで、少数の強度試験結果からクリープ寿命を推定したり、気乾状 態と湿潤状態のどちらか一方の結果からもう一方の結果を推定したりすることができることも。 稲田花崗岩、河津凝灰岩、田下凝灰岩、大谷凝灰岩の既往の試験結果を用いて示した。さらに、 この理論にもとづく構成方程式を構築することができれば、水の効果を表す1つの定数を変化さ せることで、含水状態の変化を再現できる可能性があることも示した。

なお、土岐花崗岩に関しては、気乾状態での結果しか取得していなかったので、湿潤状態の結 果や次章で述べるように種々の含水状態での結果を取得する必要がある。

		従来の研究	本研究	
	速度 $\frac{d\lambda}{dt}$	$\frac{d\lambda}{dt} = m\sigma^n$	$\frac{d\lambda}{dt} = a \exp(b\sigma)$	
破壞進展	破壊規準 Λ	$\Lambda = \int_0^t \frac{d\lambda}{dt} dt$		
	累積分布関数 $F(A)$	$1 - F(\Lambda) = \exp\left\{-\left(\frac{\Lambda}{A}\right)^{B}\right\}$		
	強度 σ_f	$\sigma_f = \left(\frac{n+1}{m}\Lambda\dot{\sigma}\right)^{\frac{1}{n+1}}$	$\sigma_f = \frac{1}{b} \ln \frac{Ab\dot{\sigma}}{a}$	
定応力速度 試験 $\sigma = \dot{\sigma}t$	累積分布関数 $F\left(\sigma_{f} ight)$	$1 - F(\sigma_f) = \exp\left\{-\left(\frac{\sigma_f}{A_1}\right)^{B_1}\right\}$ $A_1 = \left(\frac{n+1}{m}A\dot{\sigma}\right)^{\frac{1}{n+1}}$ $B_1 = (n+1)B$	$1 - F(\sigma_f) = \exp\left\{-\exp\left(\frac{\sigma_f - A_3}{B_3}\right)\right\}$ $A_3 = \frac{1}{b}\ln\frac{Ab\dot{\sigma}}{a}$ $B_3 = \frac{1}{Bb}$	
	寿命 t _{cr}	$t_{cr} = \frac{\Lambda}{m\sigma_{cr}^{n}}$	$t_{cr} = \frac{\Lambda}{a \exp(b\sigma_{cr})}$	
クリープ試験 $\sigma = \sigma_{cr}$	累積分布関数 F(t _{cr})	$1 - F(t_{cr}) = \exp\left\{-\left(\frac{t_{cr}}{A_2}\right)^{B_2}\right\}$	$1 - F(t_{cr}) = \exp\left\{-\left(\frac{t_{cr}}{A_4}\right)^{B_4}\right\}$	
		$A_2 = \frac{A}{m\sigma_{cr}{}^n}$	$A_4 = \frac{A}{a \exp(b\sigma_{cr})}$	
		$B_2 = B$	$B_4 = B$	

気乾			湿潤		
No	UCS (MPa)	E (GPa)	No	UCS (MPa)	E (GPa)
1	83.6	9.5	1	71.8	9.0
2	83.8	9.7	2	71.8	9.1
3	84.9	9.8	3	72.5	9.0
4	85.1	9.8	4	73.6	9.1
5	86.1	9.9	5	73.8	9.1
6	86.5	9.6	6	74.2	9.1
7	86.8	10.0	7	74.9	9.4
8	87.2	9.8	8	76.2	9.2
9	87.9	9.7	9	76.5	9.3
10	88.0	9.6	10	77.0	9.1
11	88.1	9.8	11	77.5	9.4
12	88.4	10.0	12	77.9	9.4
13	88.5	10.0			
14	90.0	10.2			
平均	86.8	9.8	平均	74.8	9.2
標準偏差	1.9	0.19	標準偏差	2.2	0.15
変動係数	0.022	0.019	変動係数	0.029	0.016

表 3.2 三城目安山岩の一軸圧縮強度試験結果⁸⁾ UCS: 一軸圧縮強度、E: ヤング率

表 3.3 6種類の岩石の力学物性値^{8)、14)}

三城目安山岩の UCS は載荷速度 10⁻⁴ /s、その他の岩石の UCS は載荷速度 10⁻⁵ /s での値

	UCS (MPa)		b *		- /-
	気乾	湿潤	気乾	湿潤	a _w /a _d
三城目安山岩	87	75	0.47	0.43	220
稻田花崗岩	190	184	0.23	0.23	4.0
河津凝灰岩	33	23	2.0	1.8	3. 5×10^{10}
田下凝灰岩	15	8	2.8	2.7	3. 6×10^8
大谷凝灰岩	11	5	3.2	3.3	1.3×10^{8}
土岐花崗岩	170		0.29		

* b の単位は、1/MPa



図3.1 気乾状態における三城目安山岩の一軸圧縮強度の載荷速度依存性⁸⁾



図 3.2 気乾状態と湿潤状態における三城目安山岩のクリープ応力 σ_{cr} とクリープ寿命 t_{cr} の関係 (気乾状態での結果(赤の口と◇)から式(3-16)により推定した湿潤状態での結果を赤の■と◆ で示した。)



図 3.3 気乾状態と湿潤状態における三城目安山岩のクリープ寿命 t_{cr}のワイブルプロット (凡例中の応力はクリープ応力を表し、記号は図 3.2 の同じ条件での記号と同じ)



図 3.4 気乾状態と湿潤状態における三城目安山岩の t^{*}_{cr}のワイブルプロット (凡例中の応力はクリープ応力を表す。)


図 3.5 気乾状態と湿潤状態における三城目安山岩の t*_{cr、w}のワイブルプロット



図 3.6 5 種類の岩石の空隙率とb および a_w/a_dの関係 (図に示したb は表 3.3 に示した気乾状態と湿潤状態のb の平均値)

JAEA-Research 2017-010



(b) 河津凝灰岩

図 3.7 気乾状態と湿潤状態での一軸圧縮強度の計算結果(1/2)



(d) 大谷凝灰岩

図3.7 気乾状態と湿潤状態での一軸圧縮強度の計算結果(2/2)



(b) 河津凝灰岩

図3.8 気乾状態と湿潤状態でのクリープ寿命の計算結果(1/2)



(d) 大谷凝灰岩

図3.8 気乾状態と湿潤状態でのクリープ寿命の計算結果(2/2)



(b) クリープ寿命とクリープ応力の関係

図3.9 気乾状態における土岐花崗岩の一軸圧縮強度とクリープ寿命の計算結果

4. 水分が岩石の応力一歪曲線に与える影響

4.1 はじめに

水分が岩石や岩盤の強度・変形特性に影響をおよぼすことはよく知られている。地下の岩盤に 空洞を掘削する場合、空洞壁面と垂直な地殻応力は掘削にともない減少し、支保を設けなければ 最終的には一軸圧縮状態に近くなる。また、岩盤中の水分が空洞壁面から徐々に排出されるよう になるため、岩盤の含水状態は、掘削過程とともに変化すると同時に、空洞壁面からの距離によ っても異なる可能性がある。したがって、岩盤構造物の建設や安定性の評価において、一軸圧縮 状態における、種々の含水状態での岩石や岩盤の強度・変形特性を把握することは重要である。

岩石の力学特性におよぼす水分の影響について、これまでに多くの研究がなされている。それ によると、砂岩や頁岩の一軸圧縮強度は、岩石中の水分量の増加にともない指数関数的に減少し、 湿潤に近づくにつれてある値に収束する^{18,19,20)}。一方、いくつかの泥岩においては、湿潤に近い 含水状態において、強度が再び減少する結果も報告されている^{21,22)}。強度だけでなく、ヤング率 におよぼす水分の影響も実験的に調べられており、砂岩や頁岩では、水分量の増加にともない大 幅に減少するとされている¹⁹⁾。しかし、これらの力学特性値だけでなく、岩石の力学的挙動を表 す最も基本である応力一歪曲線が、含水状態によりどのように変化するか検討することが、岩石 の力学的挙動が水分により影響を受けるメカニズムを解明する上で重要である。大久保ら²³⁾によ ると、水分量の増加にともない非弾性歪が増加することで、岩石強度や変形特性が変化すると結 論付けている。しかし、応力一歪曲線に与える水分の影響は、湿潤と気乾状態のみでの検討にと どまっており、岩石の力学的挙動におよぼす水分の影響をより詳細に把握するためには、種々の 含水状態での検討が必要である。

そこで本章では、岩石の一軸圧縮試験における応力一歪曲線におよぼす水分の影響について検 討した。具体的には、三城目安山岩、田下凝灰岩、来待砂岩、秋芳大理石では、載荷速度を交互 に切り換える一軸圧縮試験⁵⁾を実施し、稲田花崗岩では、通常(載荷速度一定)の一軸圧縮試験 を行った。このとき、6つの含水状態(湿潤状態、気乾浸水状態、1日気乾状態、気乾状態、真空 乾燥状態、炉乾燥状態)で試験を実施した。試験片の水分量の調整方法は、なるべく簡易的に行 えるよう検討し、載荷中も調整した含水量が保てるように工夫した。最後に、試験結果より、水 分が岩石強度や応力一歪曲線に与える影響について考察した。

4.2 試験方法

岩石試料として、三城目安山岩、田下凝灰岩、来待砂岩、秋芳大理石、稲田花崗岩を用いた。 試験片は直径 25 mm、高さ 50 mmの円柱形とした。各岩種につき 21~24 本の試験片を準備し、種々 の含水量状態で実験を行った。試験片の含水状態は、次式で計算される飽和度 w_sで表すことにし た。

$$w_{\rm s} = \frac{V_{\rm w}}{V_{\rm p}} = \frac{m_{\rm i} - m_{\rm d}}{m_{\rm w} - m_{\rm d}} \tag{4-1}$$

ここで、V_pは空隙の体積、V_wは水の体積である。m_wは試験片の湿潤状態での質量、m_dは試験片の 乾燥状態での質量、m_iは試験片の一軸圧縮試験直前の質量であり、図4.1(a)に示す手順で求めた。

試験片は整形後、温度と湿度が管理された試験室内にて2週間以上自然乾燥させ、その後105度に設定した恒温器(図4.1(b))内で6日間以上乾燥させた。乾燥中は、1、2日おきに試験片の

質量を測定し、質量が一定の値となることを確認し、その測定した質量の最小値をm_dとした。恒 温器での乾燥後は、デシケータ(図4.1(c))内で1日間冷却させた後、イオン交換水で真空湿潤 (脱気水侵)させ、1日おきに2回測定した質量の平均値をm_wとした。この後、下記の方法で試 験片の含水状態を調整し、試験直前に質量 m_iを計測し式(4-1)で飽和度を算出した。試験片の飽 和度を種々の値に調整する方法は、なるべく簡易に行えるよう下記の方法を実施し、6 種類の含 水状態で試験を実施した(図4.1(a))。

すべての試験片の m_d および m_w を求めた後、この中の5本は湿潤させた状態のまま水中で試験を 実施した(湿潤状態:図4.1(d))。残りの試験片は、試験室内にて自然乾燥させたが、その内1 ~3本は自然乾燥1日後に試験を実施した(1日気乾状態:図4.1(e))。残りの試験片は2週間以 上そのまま自然乾燥させ、その中の5本を実験に使用した(気乾状態:図4.1(f))。さらに、残 りの試験片のうち2~3本は、大気圧下でイオン交換水に30秒程度浸水させた後、大気中で実験 を実施した(気乾浸水状態:図4.1(g))。残りの試験片は、約100℃に設定した恒温器内で6日間 以上乾燥させた。その後、2~3本の試験片は恒温器から取り出してすぐラップを巻き、実験を実 施した(炉乾燥状態:図4.1(h))。残りの5本は、デシケータ内で1日間保管し、真空脱気を1 日行った後、デシケータから取り出してすぐにラップを巻き、実験に供した(真空乾燥状態:図 4.1(i))。なお、1日気乾および気乾浸水状態の場合、微視的に見れば試験片の内部と表面で含水 状態が均一でない可能性があるが、毛細管現象により含水状態は極端には異ならないと考えた。

真空乾燥および炉乾燥状態での試験では、試験片が空気中の水分を吸収し含水状態が変化する のを防ぐために、試験片にラップを巻いたまま試験を実施した。ラップによる試験片の吸湿抑制 効果を検証するために、真空乾燥後の試験片をデシケータから取り出してすぐにラップで包み、 大気中に放置し2時間後の吸湿による質量変化を調べた。その結果、三城目安山岩で0.006g、 田下凝灰岩で0.018g、来待砂岩で0.012g、稲田花崗岩で0.004gの質量の増加が見られたもの のその量は非常に少なく、秋芳大理石では質量変化が確認されなかった。このため真空乾燥での 試験では、一回に5本までの試験片を使用することとし、真空乾燥後に試験片をデシケータから 取り出してから2時間以内で全ての試験が終了するようにした。また、炉乾燥状態での試験は、1 本の試験片を恒温器から取り出して試験終了するまでに15分程度であった。

各含水状態での試験片の飽和度の平均値を表 4.1 に示す。この表には、m_w(試験片の湿潤状態での質量)およびm_d(試験片の乾燥状態での質量)から求めた空隙の体積 V_pを、ノギスで測定した寸法から計算した試験片の体積で除して算出した有効空隙率 n_eも示している。三城目安山岩において、飽和度は湿潤状態である 100 %から、1 日の自然乾燥で 20 %程度にまで減少し、2 週間後には 3 %程度まで減少した。気乾状態から 30 秒ほど水に浸水させると飽和度は 30 %程度まで増加した。気乾状態から、恒温器で乾燥させることで飽和度は 0.1 %程度となった。恒温器による乾燥から、デシケータ保管後に真空乾燥を行うと飽和度は 1 %程度となった。

田下凝灰岩および来待砂岩の飽和度も、湿潤状態から1日気乾、2週間の気乾で低下するが、 それらの値は三城目安山岩よりも大きかった。これら2つの岩石において、2週間の気乾状態か ら浸水させると飽和度が10%以上上昇するが、1日気乾の飽和度の方が大きかった。気乾状態か ら、恒温器乾燥で飽和度は1%以下まで減少し、真空乾燥では田下凝灰岩で5%程度、来待砂岩で 15%程度の飽和度となった。

秋芳大理石および稲田花崗岩の空隙率は、上記の3岩種と比較して小さい。秋芳大理石の飽和 度は、1日の気乾でも8%程度まで大きく低下し、2週間の気乾で2%程度となった。その後、試 験片を浸水させても飽和度15%程度までしか吸水しなかった。気乾状態の後の恒温器による乾燥 でも、飽和度は気乾状態でのそれと同程度となったため、秋芳大理石は2週間程度の自然乾燥で 炉乾燥状態と同程度乾燥するといえる。そのため、この岩石においては、真空乾燥状態でも気乾 や炉乾燥状態の含水状態と同程度になると予想し、真空乾燥状態での試験は実施しなかった。稲 田花崗岩の飽和度の変化は、田下凝灰岩や来待砂岩と同様の傾向を示した。以上より、本研究で 実施した簡易的な方法で、飽和度を種々に変化させた試験片を用意できた。

三城目安山岩、田下凝灰岩、来待砂岩、秋芳大理石では、載荷速度切換試験⁵⁾を実施した。試験では、容量 500 kN のディジタル制御式サーボ試験機を用いた。荷重は容量 200 kN の歪ゲージ 式ロードセルで、変位はサーボ試験機に設置された差動変圧器式変位形で、それぞれ測定した。 試験では、次式で表される応力帰還制御¹³⁾を採用した。

 $\varepsilon - \alpha \frac{\sigma}{E} = Ct \tag{4-2}$

ただし、 ε 、 σ 、E、C、t はそれぞれ歪、応力、ヤング率、載荷速度、時間である。 α は応力帰 還量を決める定数である。試験では、式(4-2)の左辺が一定量 $\Delta \varepsilon$ だけ増加するごとに、載荷速 度 C を C₁ と C₂で交互に切り換えた。本研究で用いた C₁、C₂および $\Delta \varepsilon$ は、過去に気乾状態での 切換試験で検討された結果⁵⁾より、すべての含水状態で C₁ = 10⁻⁵ /s、C₂ = 10⁻⁴ /s、 $\Delta \varepsilon$ = 5 × 10⁻⁴ とした。 α は三城目安山岩では 0.3、その他の 3 岩種では 0 とした。稲田花崗岩では、載荷速 度が 10⁻⁵ /s の定載荷速度試験を行った。この試験でも応力帰還制御を採用し、 α は 0.4 とした。 1 日気乾、気乾、真空乾燥および炉乾燥状態での試験では、試験片をサーボ試験機の上下のプ ラテンで載荷した。一方、湿潤および浸水状態では、下部のプラテンにアクリル円筒容器を設置 し、容器内で試験片を載荷した。その際、試験片上端と上部プラテンの間には厚さ 1 mm のスペー サーを挟み、スペーサーを介して載荷した。

4.3 試験結果

4.3.1 応力一歪曲線

過去の研究で実施されていない湿潤状態での載荷速度切換試験結果も図 4.2 に示しているが、 気乾状態での試験と同じ載荷速度条件 ($C_1 = 10^{-5} / s$, $C_2 = 10^{-4} / s$, $\Delta \epsilon = 5 \times 10^{-4}$) で載荷速 度切換による応力の増減が見られ、載荷速度 C_1 および C_2 それぞれに対応する応力—歪曲線を推定 することができた。なお、その他の含水状態(気乾浸水・1 日気乾、真空乾燥、炉乾燥)でも、 同様に 2 種類の載荷速度に対応する応力—歪曲線を推定することができた。三城目安山岩、来待 砂岩、秋芳大理石においても、各含水状態で、2 種類の載荷速度に対応する応力—歪曲線を推定 した。以後の検討では、載荷速度 10⁻⁵/s に対応する応力—歪曲線を用いて、含水状態が応力—歪 曲線に与える影響について検討する。

各含水状態での、載荷速度 10⁻⁵ /s に対応する応力一歪曲線を図 4.3 に示す。4.2 で述べたように、三城目安山岩、秋芳大理石、稲田花崗岩の湿潤および浸水状態での試験では、円筒容器内で、厚さ1mmのスペーサーを介して試験片を載荷した。これらの応力一歪曲線において、載荷の

初期で下に凸の部分がより顕著に見られたため、この歪には試験片だけでなく円筒形容器および スペーサーの変形分も足されていると考えた。そこで、図 4.3 には載荷治具の変形分を補正した 結果を示した。

田下凝灰岩の応力一歪曲線(図4.3(b))は、三城目安山岩と比較して、より水分量の影響を大き く受けて変化する。強度破壊点以前の傾きおよびピーク強度は、湿潤状態から水分量が減少する につれて大きくなる。とくに、湿潤状態から気乾状態の間でピーク強度が大きく増加する。この ことは、例えば、岩盤構造物の建設時に、掘削前は湿潤状態にある岩盤でも、掘削時に自由断面 ができることで排水され、一日程度の乾燥で壁面の強度が2割ほど向上し、気乾状態になると強 度が2倍以上も増加する可能性を示唆している。強度破壊点以降で応力は減少するが、水分量が 減少するにつれて脆性的な傾向に変化する。残留強度も試験片のばらつきがあるものの、ピーク 強度と同様水分量が減少するにつれて大きくなる傾向にある。三城目安山岩と同様に、飽和度が 小さいときの応力一歪曲線が、大きいときのそれを内包する傾向が見られた。この傾向は、湿潤 および気乾状態で試験した大久保ら¹⁴とも同様であった。

来待砂岩の応力一歪曲線(図 4.3(c))も、田下凝灰岩と同様に、水分量の影響を大きく受ける。 ピーク強度以前の傾きは、水分量の少ない方が大きいが、その変化は田下凝灰岩よりも小さい。 ピーク強度は水分量に応じて大きく変化し、湿潤から気乾の間での強度向上も顕著であるが、真 空乾燥から炉乾燥の強度の増加割合は四岩種の中で最も大きい。強度破壊点での歪も、水分量に よって変化する。強度破壊点以降では、田下凝灰岩と同様に水分量が小さいほど脆性的な傾向が 見られる。残留強度も水分量が小さいものほど大きい。

秋芳大理石の応力一歪曲線(図 4.3(d))は、試験片のばらつきが大きく、強度破壊点以前の傾き およびピーク強度は、水分量の減少に応じて増加する傾向が見られるが、上記の三岩種と比較し てその変化は小さい。強度破壊点以降は、応力がピーク強度の約80%までは緩やかに低下し、そ の後急激に低下する傾向にある。強度破壊点での歪や残留強度に、水分状態の依存性は確認でき ない。

稲田花崗岩の応力一歪曲線(図 4.3(e))は、どの含水状態でも、強度破壊点以前ではほぼ重なっ た。強度破壊点の手前で曲線の傾きがやや小さくなり、強度破壊点に達すると応力は急激に低下 した。ピーク強度や強度破壊点での歪は、三城目安山岩、田下凝灰岩および来待砂岩と同様に含 水状態よって変化し、湿潤状態に近い方がより小さい傾向を示した。

4.3.2 ピーク強度の変化量

載荷速度 10⁻⁵ /s に対応する応力―歪曲線から得られるピーク強度 σ_fの平均値および各含水状 態でのピーク強度の平均値と湿潤状態でのピーク強度の平均値の差 Δσ_{f、w}を表 4.1 にまとめた。 過去の多くの研究では、乾燥状態(炉乾燥、真空乾燥、気乾など)でのピーク強度を基準とし、 この強度から水分量の増加によるピーク強度の減少量や減少率に着目している。しかし、乾燥状態での強度は水分量により敏感であるため、基準とする強度がばらつくことが考えられる。一方、 湿潤状態での試験では、試験片は水中に置かれるため水分量の変化は少なく、安定した含水状態 といえる。そこで本研究では、湿潤状態の強度から、水分量の減少に伴う強度の増加量 $\Delta \sigma_{f,w}$ について着目することにした。

 $\Delta \sigma_{f,w}$ と飽和度の関係を図 4.4 に示す。横軸の飽和度は、対数軸とした。4.3.1 で述べた応 カー歪曲線の変化からも明らかだが、三城目安山岩、田下凝灰岩、来待砂岩、稲田花崗岩では、 飽和度が減少すると、強度が増加し $\Delta \sigma_{f,w}$ が増加する傾向が見られる(図 4.4(a)、(b))。一方、 秋芳大理石の $\Delta \sigma_{f,w}$ は、ばらつきが大きく飽和度の依存性は見られない(図 4.4(c))。

過去の多くの研究では、含水量とピーク強度の関係を指数関数型の近似式で表現しているが、 本研究では Yilmaz²⁴⁾で用いられた対数関数型の近似式を参考に、飽和度への依存が見られなかっ た秋芳大理石以外の $\Delta \sigma_{f,w}$ と飽和度 w_sの関係を次の式で近似した。

 $\Delta \sigma_{\rm fw} = \sigma_{\rm f} - \sigma_{\rm fw} = a \ln(1/w_{\rm s}) \qquad (0 < w_{\rm s} \le 1) \tag{4-3}$

ここで、a は定数である。a の値は、図 4.4 のように、縦軸に強度、横軸に飽和度の対数を取った ときの直線の傾きとなり、強度の飽和度への依存の程度を示すことになる。

式(4-3)では、飽和度 w_sがゼロを取ることができないことに注意し、式(4-3)の適用範囲を考え るために、ひとまず近似線を引いた飽和度の範囲は、実際の地下空間周辺の岩盤の含水環境で考 えられない炉乾燥および真空乾燥状態を除き、湿潤から気乾状態までとした。最小二乗法により 求めた a および相関係数を、表 4.2 に示す。a の値は、来待砂岩、稲田花崗岩、田下凝灰岩、三 城目安山岩の順に大きい。また、これらの近似線を炉乾燥状態の飽和度まで延長して、破線で図 4.4 に示した。三城目安山岩および稲田花崗岩は、真空乾燥および炉乾燥の $\Delta \sigma_{f_x}$ が、この延長 線上に位置している。一方、田下凝灰岩および来待砂岩の $\Delta \sigma_{f_x}$ は、真空乾燥では延長線上に位 置しているが、炉乾燥では近似線で予想された $\Delta \sigma_{f_x}$ より小さい。

4.4 考察

4.4.1 ピーク強度の変化量の含水状態依存性

図 4.4において、各含水状態でのピーク強度と湿潤状態でのピーク強度の差 $\Delta \sigma_{f,w}$ と飽和度の 関係を、式(4-3)により近似した。このとき、近似線の適用範囲を、湿潤から気乾状態までとし、 炉乾燥状態の飽和度まで延長した。真空乾燥および炉乾燥の $\Delta \sigma_{f,w}$ が、この延長線上に位置して いる岩石と、炉乾燥では近似線で予想された $\Delta \sigma_{f,w}$ より小さい岩石があることから、式(4-3)に は適用できる範囲が存在するといえる。式(4-3)は、応力腐食²⁵⁾や粘土鉱物の強度低下¹⁹⁾といっ た機構により岩石の強度が変化することを示しており、近似線の傾き a は、岩石固有の材料定数 で応力腐食指数²⁶⁾との関連があると考えられる。今後、式(4-3)の理論的意味や係数 a の意味を考 察する必要がある。田下凝灰岩や来待砂岩の結果では、本研究で用いた飽和度の範囲内に、この 近似線の適用限界が見られた。炉乾燥状態などの飽和度の小さい範囲では、強度は水分量によっ て変化せず、岩石を構成する粒子の強度や組織構造の力学的特性が現れたためと考えられる。

式(4-3)のaが水分量に依存しない材料定数とすると、2つの含水状態、例えば、湿潤状態および気乾状態で、岩石の飽和度を求めて強度試験をすれば、その岩石のa、すなわち Δ σ_{f、*}の飽和 度への依存の程度を評価することができ、種々の飽和度での岩石強度を予測することができる。 本研究の実験結果では、安山岩および花崗岩では炉乾燥状態まで、田下凝灰岩および来待砂岩は 真空乾燥状態まで、式(4-3)が適用可能であった。今後、この予測方法がどの種類の岩石で、どの 程度の含水状態まで適用可能であるかなどの確認が必要である。

応力一歪曲線の含水状態による変化について検討する。ただし、秋芳大理石(図 4.3(d))は、応 力一歪曲線の含水状態への依存の程度は小さいため本検討では扱わなかった。

まず、各含水状態での応力—歪曲線の対応する点がわかりやすい、強度破壊点について検討する。図 4.5 には、各含水状態での応力—歪曲線(図 4.3)から得られた強度破壊点をプロットしている。この図には、各含水状態での標準的な応力—歪曲線およびその時の飽和度 w_sも示している。図 4.3 からも明らかだが、4 岩石とも、飽和度の小さい含水状態での強度破壊点の方が応力および歪が小さい。試験で得られたすべての強度破壊点はほぼ直線上に並んだため、図 4.5 に示すように最小二乗法により近似線を引いた。その傾きは、三城目安山岩で 15.7 GPa、田下凝灰岩で 9.16 GPa、来待砂岩で 7.17 GPa、稲田花崗岩で 33.5 GPa となった。三城目安山岩および稲田花崗岩において、羽柴ら²⁷⁾で得られた気乾状態での除荷載荷試験におけるピーク強度の約 20~30 %までの除荷曲線の傾きの平均値(三城目安山岩で 16.4 GPa、稲田花崗岩で 33.4 GPa)とほぼ一致した。また、大久保ら²³⁾では、気乾と湿潤状態での除荷曲線の傾きがほぼ等しいと報告していることから、除荷曲線の傾きは含水状態に依存しないことが推測される。

強度破壊点が直線上に並び、この傾きが除荷曲線の傾きとほぼ等しいことから、各含水状態の 強度破壊点での非弾性歪が等しいと言える。また、福井ら^{28、29)}の結果とあわせると、強度破壊点 での非弾性歪と、クリープ試験を含む一般化応力緩和試験における最小歪速度となるときの非弾 性歪が等しいことも推測される。応力の大きさに関係なくある量の非弾性歪が岩石内に蓄積する と、その後は加速的に変形していくことになるという気乾状態で得られた福井ら^{28、29)}の結論が、 どの含水状態においても成り立つことが考えられ、含水状態に関係なく本研究で求めた強度破壊 点を結ぶ直線より歪が大きくなると、加速的に破壊が進むことが示唆される。

つぎに、各含水状態の異なる応力—歪曲線の関係を調べるために、図 4.3 で示した応力—歪曲 線を、図 4.5 に示した強度破壊点を結ぶ直線に沿って適宜縮小して比較してみる。補正方法は、 まず、強度破壊点が図 4.5 の強度破壊点を結ぶ直線上に来るように応力—歪曲線を歪軸方向に平 行移動させる。ただし、稲田花崗岩においては、強度破壊点がほとんど直線状に並んでいたため、 この作業は行わなかった。つぎに、山口ら³⁰⁾、羽柴ら²⁷⁾を参考にして、強度破壊点を結ぶ直線の 傾き E_f により歪 ϵ を弾性歪 ($\epsilon_e = \sigma/E_f$)と非弾性歪 ($\epsilon_p = \epsilon - \epsilon_e$)とに分けて、補正後の 応力と歪をそれぞれ σ ' と ϵ 'として次式により補正した。

 $\sigma' = \sigma \times k, \quad \varepsilon' = \varepsilon_e \times k + \varepsilon_p \tag{4-4}$

ここで、補正係数 k は、各ピーク強度と湿潤状態でのピーク強度の平均値の比 ($\sigma_{f_{xw}}/\sigma_{f}$)とした。

三城目安山岩の補正後の応力—歪曲線を図4.6(a)に示す。強度破壊点から強度破壊点以前の低い応力まで、各含水状態での応力—歪曲線がよく重なった。強度破壊点以降は、応力の低下とともにずれが大きくなり、湿潤状態に近いものほど曲線の内側にある傾向が見られた。稲田花崗岩の補正結果を図4.6(b)に示す。三城目安山岩と同様に、強度破壊点以前の応力—歪曲線がほぼ重なった。強度破壊点以降も、ばらつきはあるものの概ね一致している。三城目安山岩および稲田花崗岩では、強度破壊点を結ぶ直線の傾きが強度破壊点以前の除荷曲線の傾きとほぼ等しいことが推測される。

一方、図 4.6(c)に示した田下凝灰岩の補正後の応力一歪曲線は、強度破壊点以外は重ならなかった。図には示していないが、この傾向は来待砂岩の補正結果にも見られた。田下凝灰岩および 来待砂岩では、除荷曲線の傾きが強度破壊点以前でも大きく変化するため、この補正方法では応 力一歪曲線が重ならなかったと考えられる。これらの岩石においては、羽柴ら²⁷⁾のように応力一 歪曲線上の任意の点での除荷曲線の傾きを求め、補正を行う必要がある。

補正後の応力—歪曲線の強度破壊点以降は、岩種によって程度の差があるが、よく重ならなかった。これは、強度破壊点以降の除荷曲線の傾きが、強度破壊点を結ぶ直線の傾きと大きく変化するためと考えられる。強度破壊点以降の検討は、任意の点で除荷曲線の傾きを求めて行う必要がある。また、田下凝灰岩および来待砂岩の通常の応力—歪曲線(図 4.3(b)、(c))では、強度破壊点以降での応力の低下は、水分量が減少するにつれて脆性的になる傾向が見られた。一方、補正した応力—歪曲線での強度破壊点以降の応力の低下は、これらの2種類の岩石および三城目安山岩で、湿潤状態に近い方がより急激に低下する様子が見られた。強度破壊点以降の力学的挙動は、破壊時に生じたせん断すべり面が大きく影響をおよぼしていると考えられるので、せん断すべり面の含水状態の依存性と合わせて検討する必要がある。強度破壊点以降の応力—歪曲線におよぼす水分の影響については、今後の課題としたい。

4.5 まとめ

表 4.1 試験結果

岩種	П _е (%)	含水状態	Ws (%)	$\sigma_{ m f}$ (MPa)	$\Delta \sigma_{\rm f,w}$ (MPa)
		炉乾燥状態	0.10	89.8	23.4
		真空乾燥状態	1.38	83.1	16.8
三城目	10 7	気乾状態	3.16	79.3	13.0
安山岩	19.7	1日気乾状態	20.4	68.9	2.5
		気乾浸水状態	29.2	69.9	3.6
		湿潤状態	100	66.3	0.0
		炉乾燥状態	0.11	33.9	25.5
		真空乾燥状態	4.98	29.4	21.0
田下	91 9	気乾状態	9.30	23.5	15.0
凝灰岩	31. 3	気乾浸水状態	21.6	16.2	7.8
		1日気乾状態	32.8	12.4	4.0
		湿潤状態	100	8.4	0.0
		炉乾燥状態	0.76	54.5	37.0
		真空乾燥状態	17.4	39.7	22.2
来待	<u></u>	気乾状態	25.9	36.4	18.9
砂岩	23.9	気乾浸水状態	41.3	29.6	12.1
		1日気乾状態	47.0	24.9	7.4
		湿潤状態	100	17.5	0.0
		炉乾燥状態	3.13	98.1	8.7
≁1, 11		気乾状態	1.89	94.8	5.4
秋方	0.45	1日気乾状態	8.33	97.2	7.8
八垤勹		気乾浸水状態	14.6	99.6	10.2
		湿潤状態	100	89.4	0.0
		炉乾燥状態	1.26	244.4	52.8
		真空乾燥状態	4.87	230.0	38.5
稻田	0 00	気乾状態	6.95	221.8	30.2
花崗岩	υ. δδ	1日気乾状態	23.7	201.1	9.5
		気乾浸水状態	32.0	199.7	8.1
		湿潤状態	100	191.6	0.0

 n_e 空隙率、 W_s 飽和度、 σ_f 載荷速度 10^{-5} /s での一軸圧縮強度、 $\Delta \sigma_{f_{x,w}}$ 強度の増加量

表 4.2 式 (4-3) 中の定数 a と相関係数 R

岩種	a (MPa)	R
三城目安山岩	3.62	0.88
田下凝灰岩	5.88	0.95
来待砂岩	13.4	0.97
稻田花崗岩	10.3	0.81

2週間気乾 IJ 6日間炉乾燥 m_d 計測 Ŷ 試験 湿潤状態 (湿潤状態) m_w 計測 \downarrow 試験 1日気乾 (1日気乾状態) Ũ 試験 試験 < → 30秒間浸水 < 2週間気乾 (気乾浸水状態) (気乾状態) ĥ 試験 6日間炉乾燥 □ (炉乾燥状態) Ń 試験 真空乾燥 (真空乾燥状態)

(a) 試験供試体の作成手順

図4.1 6種類の含水状態での試験方法(1/5)

JAEA-Research 2017-010



(b)恒温器



(c) デシケータ

図 4.1 6 種類の含水状態での試験方法(2/5)



(d) 湿潤状態での試験の様子



(e) 1日気乾状態での試験の様子

図4.1 6種類の含水状態での試験方法(3/5)



(f) 気乾状態での試験の様子



(g) 気乾浸水状態での試験の様子

図 4.1 6 種類の含水状態での試験方法(4/5)



(h) 炉乾燥状態での試験の様子



(i) 真空乾燥状態での試験の様子

図 4.1 6 種類の含水状態での試験方法(5/5)



図 4.2 田下凝灰岩の載荷速度切換試験の結果 (太線が試験で得られた応力—歪曲線、細線がスプライン補間による包絡線、W_sは飽和度)



図 4.3 載荷速度 10⁻⁵ /s での応力—歪曲線(1/3) ((a)~(d)は載荷速度切換試験、(e)は定載荷速度試験の結果)

JAEA-Research 2017-010



(c) 来待砂岩



(d) 秋芳大理石

図 4.3 載荷速度 10⁻⁵/s での応力—歪曲線(2/3) ((a)~(d)は載荷速度切換試験、(e)は定載荷速度試験の結果)



含水状態: 炉乾燥状態 真空乾燥状態 気乾状態 1日気乾状態 気乾浸水状態 湿潤状態

(e) 稲田花崗岩

図 4.3 載荷速度 10⁻⁵ /s での応力—歪曲線(3/3) ((a)~(d)は載荷速度切換試験,(e)は定載荷速度試験の結果)



(b) 田下凝灰岩と来待砂岩

図 4.4 強度の増加量 $\Delta \sigma_{f_w}$ と飽和度の関係 (1/2)

((a)と(b)には湿潤状態から気乾状態までの結果を式(4-3)で近似して実線で示し、その延長線を 破線で示した。)



(c)秋芳大理石

図 4.4 強度の増加量 Δ σ_{f、w}と飽和度の関係(2/2)

((a)と(b)には湿潤状態から気乾状態までの結果を式(4-3)で近似して実線で示し、その延長線を破線で示した。)

JAEA-Research 2017-010



図 4.5 各含水状態での強度破壊点(1/2) (図には各含水状態での標準的な応力—歪曲線を示した。図中の数字は飽和度を表す。)

JAEA-Research 2017-010



(d) 稲田花崗岩

JAEA-Research 2017-010



図 4.6 応力—歪曲線の補正結果(1/2) (図 4.3 に示した応力—歪曲線を、式(4-4)と図 4.5 の実線の傾きを用いて補正した。)



図 4.6 応力—歪曲線の補正結果(2/2) (図 4.3 に示した応力—歪曲線を、式(4-4)と図 4.5 の実線の傾きを用いて補正した。)

5. 結言

岩盤の長期挙動を把握・評価できる技術の確立に資するため、年単位を超えるような岩石の長期クリープ試験や、高レベル放射性廃棄物の地層処分において想定される常温から 100℃程度の高温条件下での岩石の長期挙動を把握するための技術の開発等を実施し、想定される様々な条件下での岩石の長期挙動現象の特徴やその程度に関する実験的評価を行うことを目的とした研究を、 共同研究として 2016 年度から開始した。

2016年度は、既往の研究成果を踏まえ、20年程度継続して実施している田下凝灰岩のクリープ 試験を引き続きおこなった。また、速度過程論や確率過程論にもとづく理論を水の影響を扱える ように修正し、気乾状態と湿潤状態における強度試験とクリープ試験の結果をもとに、修正した 理論の妥当性を検証した。さらに、種々の含水状態のもとで一軸圧縮試験を行い、応力-歪曲線 におよぼす含水状態の影響について検討した。

第2章では、1997年に開始した田下凝灰岩の一軸圧縮クリープ試験について、2007年9月から2016年11月までの約9年間には、気温や湿度の季節変化や日変化、載荷装置や計測装置の調整、装置の移動などを経験したが、クリープ歪はほとんど変化していないことを示した。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といえることから、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、まず、従来の研究で用いてきた速度過程論や確率過程論にもとづく理論を紹介し、 環境が変化しない条件下には適用できるが、水の影響についての検討は不十分であったことを述 べた。その上で、理論をわずかに修正することで、気乾状態と湿潤状態の結果を統一的に説明で きることを述べた。修正した理論にもとづいて三城目安山岩の試験結果を整理したところ、気乾 状態と湿潤状態における一軸圧縮強度試験と一軸圧縮クリープ試験の結果が、統一的に説明でき ること、この結果を用いることで、少数の強度試験結果からクリープ寿命を推定したり、気乾状 態と湿潤状態のどちらか一方の結果からもう一方の結果を推定したりすることができることを示 した。また、この理論にもとづく構成方程式を構築することができれば、水の効果を表す1つの 定数を変化させることで、含水状態の変化を再現できる可能性があることを述べた。

第4章では、5種類の岩石を用いて種々の含水状態で一軸圧縮試験を実施し、水分が岩石強度 や応力一歪曲線に与える影響について検討した。三城目安山岩、田下凝灰岩、来待砂岩および稲 田花崗岩では、含水状態によりピーク強度や応力一歪曲線が変化した。一方、秋芳大理石では、 ピーク強度や応力一歪曲線のばらつきが大きく、これらに与える水分の影響がほとんど見られな かった。各含水状態でのピーク強度と湿潤状態でのピーク強度の差と飽和度の関係について考察 するとともに、含水状態が変化することで強度破壊点がどのように移動するかを調べることで、 応力一歪曲線の含水状態による変化について検討した。今後も、様々な含水状態での岩石の応力 一歪曲線について検討することで、水分が岩石の力学的挙動に与える影響を調べる必要がある。

参考文献

- 1) S. Okubo, Y. Nishimatsu, K. Fukui: Complete creep curves under uniaxial compression, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 28, 1,1991, pp.77-82.
- 2) K. Shin, S. Okubo, K. Fukui, K. Hashiba: Variation in strength and creep life of six Japanese rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 42, 2005, pp.251-260.
- 3) K. Hashiba, K. Fukui: Index of loading-rate dependency of rock strength, Rock Mech. Rock Eng., 48, 2, 2015, pp.859-865.
- 4) K. Hashiba, K. Fukui: Time-dependent behaviors of granite: loading rate dependence, creep, and relaxation, Rock Mech. Rock Eng., 49, 7, 2016, pp.2569-2580.
- 5) K. Hashiba, S. Okubo, K. Fukui: A new testing method for investigating the loading rate dependency of peak and residual rock strength, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 43, 2006, pp. 894-904.
- 6) T. Yokobori: An interdisciplinary approach to fracture and strength of solids, Wolters-Noordhoff Scientific Publications Ltd., Chapter 3, 1968.
- 7) S. Okubo, K. Fukui: An analytical investigation of a variable-compliance-type constitutive equation, Rock Mech. Rock Eng., 39, 3, 2006, pp. 233-253.
- 8) 秋晳淵:岩石の湿潤状態における時間依存性,東京大学博士論文,1995.
- 9) S. Okubo, K. Fukui, K. Hashiba: Long-term creep of water-saturated tuff under uniaxial compression, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 47, 5, 2010, pp.839-844.
- 10) K. Hashiba, S. Okubo, K. Fukui: Creep test of tuff for over thirteen years and its know-how, Proceedings of the 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics, 2011, pp. 627-630.
- 11) H. Rinne: The Weibull distribution: A handbook, CRC Press (Boca Raton), Chapter 3, 2009.
- 12) V. T. Glushko, G. T. Rubets: Discussion of B. Kostak and H. U. Bielenstein's paper strength distribution in hard rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 10, 1973, pp. 763-766.
- S. Okubo and Y. Nishimatsu: Uniaxial compression testing using a linear combination of stress and strain as the control variable, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 22, 1985, pp. 323-330.
- 14) 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, 1992, pp. 403-409.
- 15) O. L. Anderson, P. C. Grew: Stress corrosion theory of crack propagation with applications to geophysics, Reviews of Geophysics and Space Physics, 15, 77-104, 1977.
- 16) JNC: H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Supporting Report 2 Repository Design and Engineering Technology, JNC TN1410 2000-033, pp. D-25-D-30., 2000.
- 17) T. Koyama, K. Ishibashi, Y. Suzuki, M. Minami, S. Okubo, K. Fukui: Prediction of long-term behavior for a large underground cavern, Proceedings of the International Symposium of the International Society for Rock Mechanics, EUROCK 2006, 325-330, 2006.
- 18) 堀部富雄:岩石の圧縮ならびに引張強さにおよぼす含水率,温度の影響,日本鉱業会誌,73,827,1957,pp.271-275.
- 19) 一之瀬政友, 内野健一, 松井紀久男: 含水による夾炭層岩石の強度の変化---夾炭層岩石の力学

的諸特性に及ぼす水分の影響(第1報)一,日本鉱業会誌,104,1207,1988, pp. 561-566.

- 20) A. B. Hawkins, B. J. McConnell: Sensitivity of sandstone strength and deformability to changes in moisture content, Quarterly J. Eng. Geology, 25, 1992, pp.115–130.
- 21) 田中芳則:泥質岩の含水による強度変化,応用地質, 9, 1968, pp. 82-93.
- 22) 羽柴公博,福井勝則,杉田裕,真田昌慶:稚内層珪質泥岩の力学特性,原子力バックエンド研究,21,2014, pp.75-82.
- 23) 大久保誠介,高秀君,福井勝則:気乾と湿潤状態における多孔質岩石の変形特性と力学模型, 資源と素材,121,12,2005,pp.583-589.
- 24) I. Yilmaz: Influence of water content on the strength and deformability of gypsum, Int.J. Rock Mech. Min. Sci., 47, 2010, pp. 342-347.
- 25) H. Jeong, S. Kang, Y. Obara: Influence of surrounding environments and strain rates on the strength of rocks subjected to uniaxial compression, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 44, 2007, pp. 321-331.
- 26) O. Sano, I. Ito, M. Terada: Influence of strain rate on dilatancy and strength of Oshima granite under uniaxial compression, J. Geophys. Res. 86, 1981, pp. 9299-9311.
- 28) 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, 1989, pp. 521-526.
- 29) 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一般化した応力緩和特性,資源 と素材,108,7,1992,pp.543-548.
- 30) 山口勉,大久保誠介,西松裕一:三城目安山岩の非線形レオロジーモデル―岩石の破壊および 変形における時間依存性の研究(第3報)―,日本鉱業会誌,100,1158,1984, pp.631-635.

This is a blank page.

_

表 1. SI 基本単位							
甘大昌	SI 基本ì	単位					
本平里	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	Α					
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
AI 立 是 SI 組 立 単位	
名称	記号
面 積 平方メートル	m ²
体 積 立方メートル	m ³
速 さ , 速 度 メートル毎秒	m/s
加 速 度メートル毎秒毎秒	m/s^2
波 数 毎メートル	m ⁻¹
密度,質量密度キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面 積 密 度 キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積 立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電 流 密 度 アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁 界 の 強 さ アンペア毎メートル	A/m
量 濃 度 ^(a) , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m ⁸
質量濃度 キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝 度 カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈 折 率 ^(b) (数字の) 1	1
比 透 磁 率 (b) (数字の) 1	1
(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では	t物質濃度

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

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

	SI 組立単位				
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 ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m	
立体鱼	ステラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 (b)	m^2/m^2	
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	-	s ⁻¹	
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²	
压力,応力	パスカル	Pa	N/m ²	$m^{-1} kg s^{-2}$	
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$	
仕 事 率 , 工 率 , 放 射 束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³	
電荷,電気量	クーロン	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 ²	$\text{kg s}^{2} \text{A}^{1}$	
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 ^(e)	°C		K	
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd	
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd	
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹	
吸収線量,比エネルギー分与,	ガレイ	Gv	J/kg	m ² e ⁻²	
カーマ		Gy	ong		
線量当量,周辺線量当量,	シーベルト (g)	Sv	J/kg	$m^2 e^{-2}$	
方向性線量当量,個人線量当量		50	5/Kg	III 8	
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol	

酸素活性(1) ダール kat [s¹ mol]
 (w)SH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。
 (h)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)へルツは周期現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。 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。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はどもらの単位で表しても同じである。
 (b)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205) についてはCIPM物告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	[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 ⁻¹ kg s ⁻¹
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	リニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	$m m^{-1} s^{-1} = s^{-1}$
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^{2} s^{2} K^{1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^2$
熱伝導率	「ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
誘 電 辛	コアラド毎メートル	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 ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$m^{-3} s^{-1} mol$

表 5. SI 接頭語								
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号			
10^{24}	э 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	+ 1	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	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=60 s			
時	h	1 h =60 min=3600 s			
日	d	1 d=24 h=86 400 s			
度	۰	1°=(π/180) rad			
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad			
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad			
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²			
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³			
トン	t	$1 t=10^3 kg$			

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

表される数値が実験的に得られるもの							
名称			記号	SI 単位で表される数値			
電子	ボル	ŀ	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J			
ダル	- F	\sim	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg			
統一原	子質量単	単位	u	1 u=1 Da			
天 文	単	位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m			

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海 里	Μ	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{ m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位しの粉結的な間径は
ベル	В	対数量の定義に依存。
デシベル	dB -	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値			
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J			
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N			
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =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	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$			
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx			
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²			
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$			
ガウス	G	1 G =1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T			
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4 π)A m ⁻¹			
(a) 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 帰	禹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	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	\sim	トゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ			ド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$			L	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ	3	/	7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	x	N	111		1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メー	ートルヌ	系カラ:	ット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 ⁻⁴ kg
ŀ			N	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	進っ	大気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カ	П	IJ	ļ	cal	1 cal=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		\sim		$1 = 1 = 10^{-6} m$