

高温条件下での稚内層珪質泥岩の一軸圧縮試験

Uniaxial Compression Tests on Siliceous Mudstone of the Wakkanai Formation
under High Temperature Conditions

望月 陽人 佐藤 稔紀 和田 純一

Akihito MOCHIZUKI, Toshinori SATO and Jun-ichi WADA

核燃料・バックエンド研究開発部門

幌延深地層研究センター

深地層研究部

Horonobe Underground Research Department

Horonobe Underground Research Center

Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

June 2024

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

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。本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課
〒319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.
For inquiries regarding this report, please contact Library, Institutional Repository and INIS Section, Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

高温条件下での稚内層珪質泥岩の一軸圧縮試験

日本原子力研究開発機構 核燃料・バックエンド研究開発部門
幌延深地層研究センター 深地層研究部

望月 陽人、佐藤 稔紀、和田 純一*

(2024年1月24日受理)

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、現状の処分システムで想定されている緩衝材中の上限温度（100℃）の緩和に資するための調査研究が国内外で進められている。本研究では、北海道・幌延町の珪質泥岩（稚内層）を事例として、高温条件下における岩盤物性の変化を理解するために、一部 100℃を超える複数の温度条件下での一軸圧縮試験を実施した。同岩石の一軸圧縮強さは加熱温度とともに上昇した。100℃以上で加熱した供試体の一軸圧縮強さは、試験前にデシケータ乾燥した供試体と同程度であった。また、走査型電子顕微鏡による鉱物観察では、先行研究において他の岩石で認められたような空隙構造や鉱物の変質は認められなかった。以上のことから、本研究において確認された加熱温度にともなう珪質泥岩の強度の増加は、加熱にともなう試料の乾燥に由来するものと考えられた。

幌延深地層研究センター：〒098-3224 北海道天塩郡幌延町字北進 432-2

* 応用地質株式会社

**Uniaxial Compression Tests on Siliceous Mudstone of the Wakkanai Formation
under High Temperature Conditions**

Akihito MOCHIZUKI, Toshinori SATO and Jun-ichi WADA*

Horonobe Underground Research Department
Horonobe Underground Research Center
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development
Japan Atomic Energy Agency
Horonobe-cho, Teshio-gun, Hokkaido

(Received January 24, 2024)

For the geological disposal of high-level radioactive waste, research and studies are being conducted in Japan and abroad to contribute to the mitigation of the upper temperature limit (100°C) in the buffer material assumed in the current disposal system. In this study, uniaxial compression tests under several temperature conditions, some of which exceed 100°C, were conducted to understand changes in rock properties under high temperature conditions, using siliceous mudstone (Wakkanai formation) from Horonobe, Hokkaido, as a case study. The uniaxial compressive strength of the rock increased with heating temperature. The uniaxial compressive strength of specimens heated above 100°C was comparable to that of specimens desiccated before testing. Mineralogical observations by scanning electron microscopy showed no evidence of alteration of pore structure or minerals, as observed in other rocks in previous studies. In conclusion, the increase in strength of siliceous mudstone with heating temperature observed in this study is considered to be due to the drying of the specimens with heating.

Keywords: Uniaxial Compression Test, High Temperature, Siliceous Mudstone, Wakkanai Formation, Horonobe

* OYO Corporation

目 次

| | |
|-----------------------|----|
| 1. 序論----- | 1 |
| 2. 方法----- | 2 |
| 3. 結果----- | 13 |
| 4. 考察----- | 31 |
| 5. まとめ----- | 33 |
| 謝辞----- | 34 |
| 参考文献----- | 34 |
| 付録1 試験に使用した供試体写真----- | 37 |
| 付録2 応力-ひずみ線図----- | 69 |

Contents

| | |
|---------------------------------------|----|
| 1. Introduction----- | 1 |
| 2. Methods----- | 2 |
| 3. Results----- | 13 |
| 4. Discussion----- | 31 |
| 5. Summary----- | 33 |
| Acknowledgements----- | 34 |
| References----- | 34 |
| Appendix 1 Pictures of samples----- | 37 |
| Appendix 2 Stress-strain diagram----- | 69 |

This is a blank page.

1. 序論

高レベル放射性廃棄物の地層処分における処分場の設計や廃棄体の設置深度は、人工バリア中の緩衝材の最高温度が 100°C を上回らないように設定される^{1),2)}。この 100°C という上限温度は、緩衝材中のベントナイトの変質が生じず、それゆえ緩衝材の性能が長期間にわたって損なわれることのない温度と考えられている¹⁾。一方、少なくとも 120°C 程度までの温度上昇では、ベントナイトの水理・物理的特性や鉱物組成に顕著な変化が生じないという報告もあり³⁾、上限温度の緩和に資する科学的な知見を取得するための調査研究が進められている^{たとえば4)-6)}。緩衝材の上限温度が緩和されれば、廃棄体の定置間隔や処分坑道間の距離の短縮などが可能となり、より合理的な処分場設計が期待できる⁵⁾。また、現状の処分システムにおいても、想定外の要因により緩衝材が 100°C を超えた状態になることを考慮し、高温条件における人工バリアシステムの安全裕度を検証するための情報を整備することが重要となる。

緩衝材の最高温度が 100°C を超えた場合には、人工バリアの周囲に位置する処分場の母岩についても初期状態の温度（地温）より高くなることも予想される。高温条件下での岩石の特性評価として、地球科学上の諸問題に関連した超高温（700°C 以上）・超高压（500 MPa 以上）条件での研究は多数実施されているものの、地層処分に関連しうるような相対的に低温・低压条件での研究例は多くない⁷⁾。また、花崗岩や安山岩などの結晶質岩⁷⁾⁻¹⁰⁾と比べて、堆積岩については十分なデータが得られているとは言い難い^{7),11)}。わが国を代表する堆積岩の一部である新第三紀堆積岩について、その一例である北海道・幌延町の珪藻質泥岩（声問層）および珪質泥岩（稚内層）を対象とした力学的特性や熱特性の評価は実施されているが^{12),13)}、100°C を超えるような高温条件下での岩石の力学挙動に関する試験の報告例はない。

本研究では、100°C を超える高温環境でのニアフィールド構成要素の挙動評価に資するため、幌延深地層研究センター地下施設の 350 m 調査坑道から採取した稚内層の珪質泥岩コア試料を用いて、高温下での一軸圧縮試験を実施した。

2. 方法

2.1. 供試体整形

試験には、幌延深地層研究センターの 350m 調査坑道で実施した既往調査¹⁴⁾の鉛直ボーリング孔 3 本 (T-1~T-3; 孔径 86 mm、掘削長 11 m) から採取された稚内層珪質泥岩のコア試料を使用した。各ボーリング孔の位置図を図 2.1 に、各コア試料の写真を付録 1 に示す。試験に供するまでの間に含水状態が極力変化しないようにするため、試料は採取直後に真空パック処理した。

試験に供する試料の両端面をダイヤモンドカッターで平滑にカットし、一軸圧縮試験に供するための直径：高さ=1：2 の供試体を作製した。供試体の側面は原則としてコア試料のままとしたが、側面の凹凸が大きくひずみゲージの貼り付けが困難な供試体は、側面を紙やすりで平滑に削り表面処理を施した。

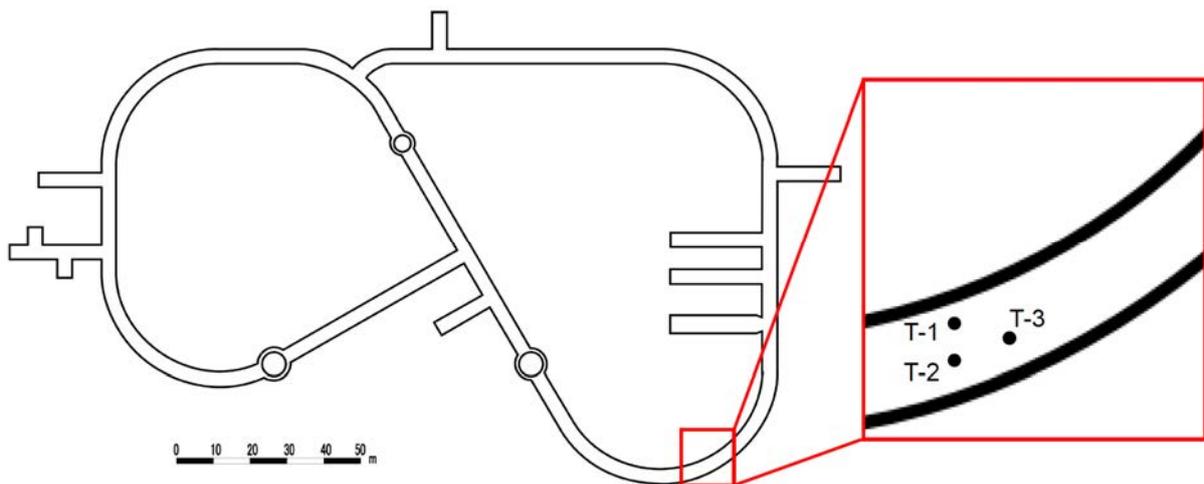


図 2.1 コア試料を採取したボーリング孔の位置図¹⁴⁾

2.2. 試験方法の予備検討

一軸圧縮試験の実施に先立ち、供試体の加熱や乾燥、ひずみゲージの貼り付け方法などに関する予備検討を行った。

(1) 温度・ひずみ測定方法に関する予備検討

供試体の温度およびひずみの測定方法を検討するため、供試体（直径約 6.5 cm、長さ約 11.7 cm）を 150°C に加熱し、その後に一軸圧縮試験を実施した。使用した加熱・保温装置の写真および概略図をそれぞれ図 2.2、図 2.3 に、加熱前後の供試体の写真を図 2.4 に示す。供試体を収める容器は、銅製の筒の外側に熱源となるリボンヒーター（HAKKO 製 DG2-100; 最高温度 750°C）を巻き付け、その外側および筒の上下をガラスウール断熱材で覆って作製した。銅筒の内側および銅筒と供試体の間に熱電対を取り付け、それぞれヒーター表面および容器内の温度を測定した。供試体の高さ方向の中間点には熱電対（東京測器製 T-6F-0.32 ; 耐熱温度 200°C）を埋め込み（図 2.4）、加熱時に供試体内部の温度を測定した。また、ひずみゲージを供試体の

対向する 2 箇所¹²⁾に貼り付け、供試体軸方向および周方向のひずみを測定した。加熱温度 25°C および 50°C の場合にはゲージ長 10 mm の一般用ゲージ（東京測器製 FCAB-10-11）をシアノアクリレート系接着剤で、加熱温度 100°C および 150°C の場合にはゲージ長 3 mm の高温用ゲージ（東京測器製 QFCAB-3-11）を高温用接着剤（東京測器製 NP-50B）で、それぞれ供試体に貼り付けた。熱電対による測定値をもとにヒーターの出力を調整し、試験条件として想定する温度で安定したことを確認してから、JGS 2521-2020「岩石の一軸圧縮試験方法」¹⁵⁾に準拠して一軸圧縮試験を実施した。なお、本報告書において、加熱過程で供試体に生じるひずみは膨張方向を正、収縮方向を負として示す。

加熱による温度およびひずみの経時変化を図 2.5 に示す。供試体内部の温度は加熱開始から約 6 時間でほぼ 150°C に達し、その後安定した（図 2.5）。供試体のひずみ測定値は増減を繰り返す（図 2.5）、続けて実施した一軸圧縮試験の最中にも継続して変化が認められた。図 2.4(b) に示すように、加熱により供試体に複数の亀裂が生じた。一軸圧縮強さは 31.5 MN/m² であった。

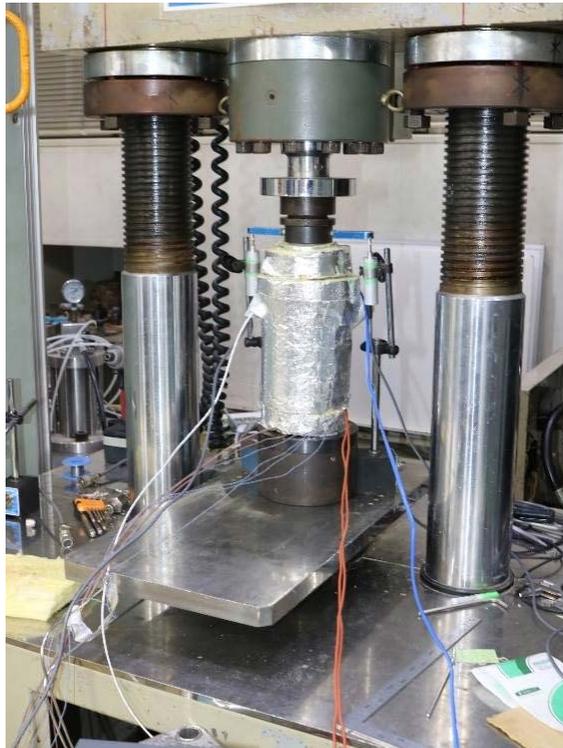


図 2.2 試料の加熱および保温に用いた装置の写真

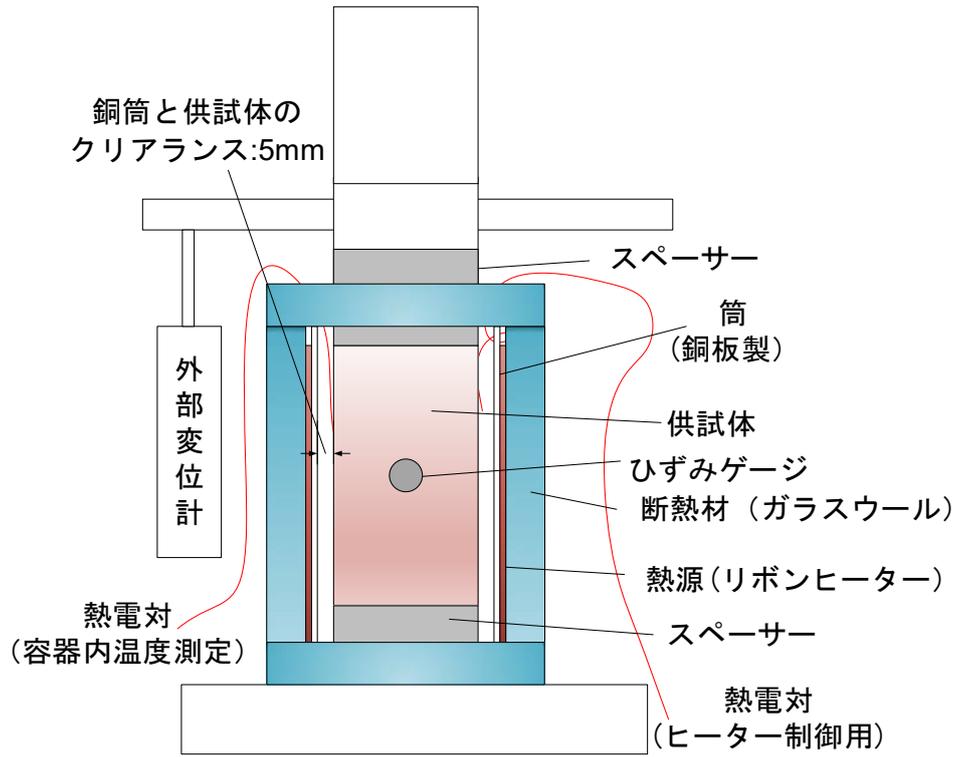


図 2.3 試料の加熱および保温に用いた装置の概略図

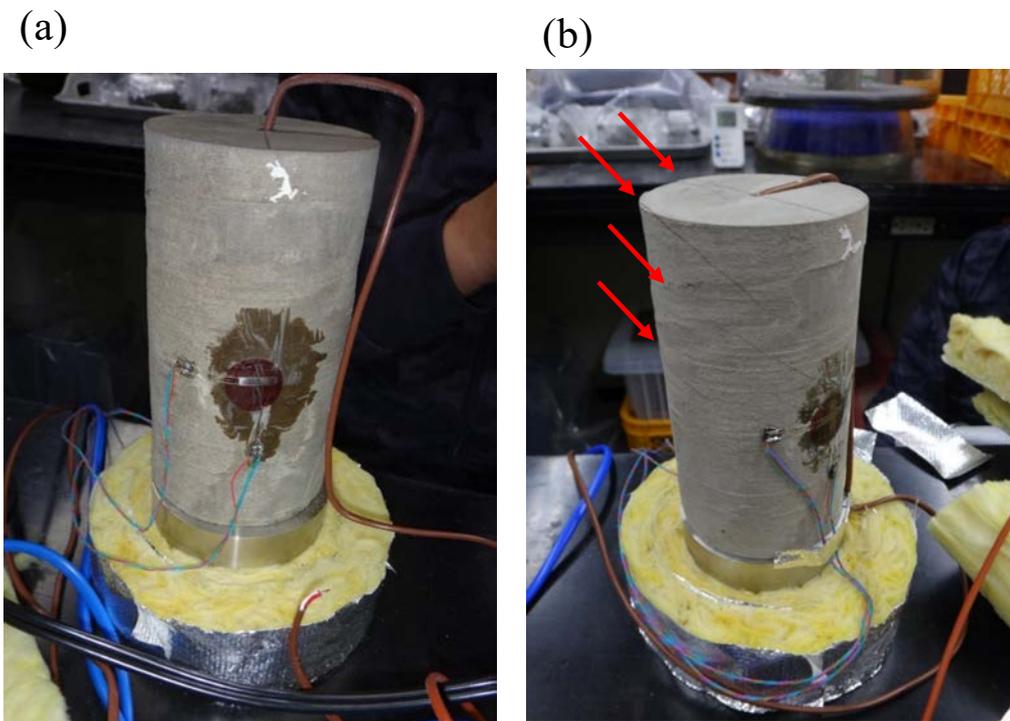


図 2.4 温度・ひずみ測定方法に関する予備検討に供した試料の

(a) 加熱前および (b) 加熱後の写真

(b) における赤矢印は、加熱後に認められた亀裂を意味する。

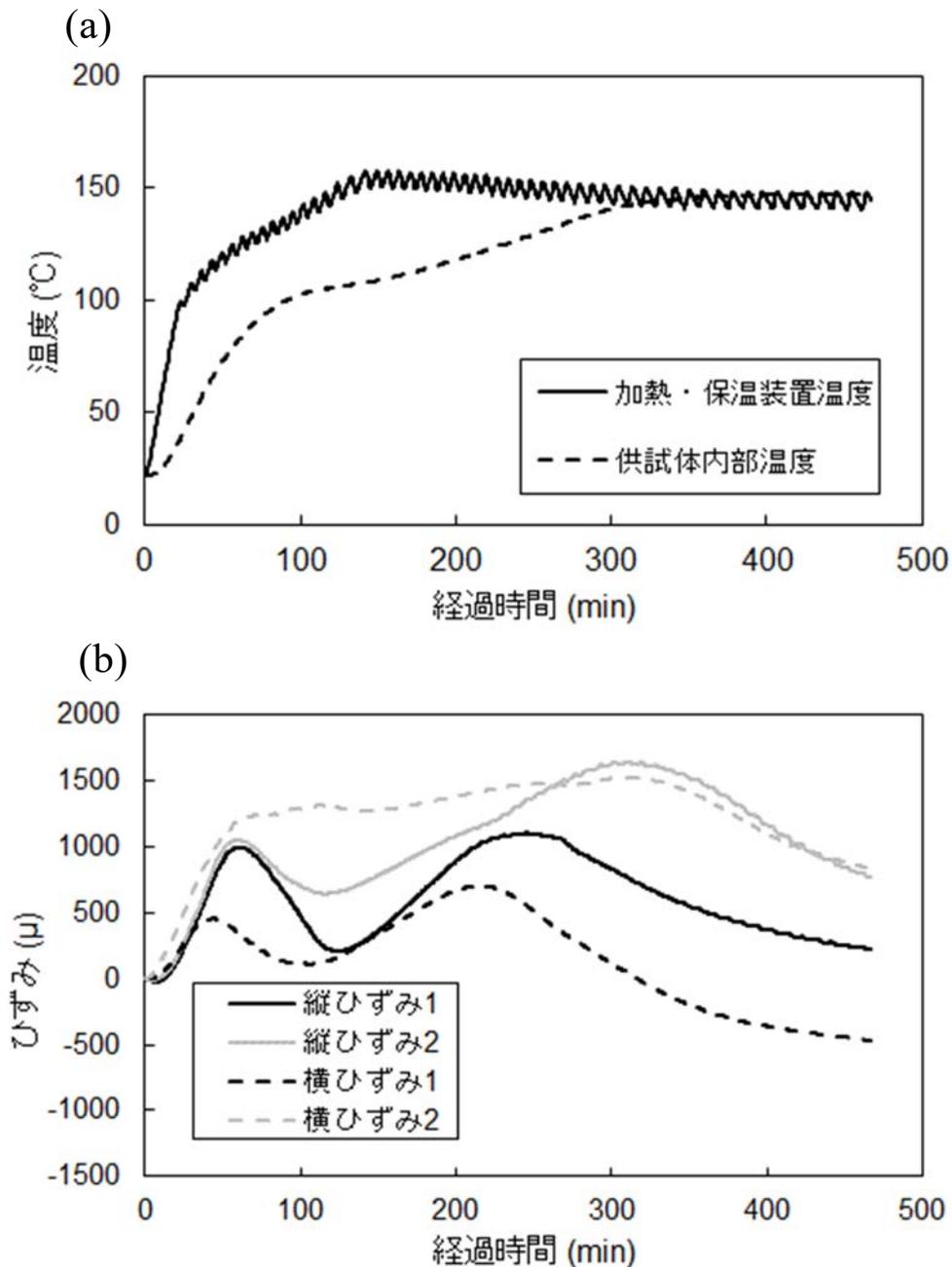


図 2.5 温度・ひずみ測定方法に関する予備検討に供した供試体の加熱にともなう
 (a) 装置内および供試体内の温度、ならびに (b) 供試体のひずみの経時変化

(2) 加熱乾燥に関する予備検討

(1) の予備検討において供試体に亀裂が発生したことから、加熱による乾燥状態の変化を確認するための予備検討を行った。供試体（直径約 6.5 cm、長さ約 10.9 cm）を、150°Cの恒温乾燥炉で2日間加熱乾燥した。加熱前後の供試体の写真を図 2.6 に示す。加熱により供試体に亀裂が発生し、加熱後には高さ方向に 0.50%、直径方向に 0.12%収縮した。亀裂の発生は供試体の乾燥収縮によるものと考えられる。また、供試体の収縮にともない貼り付けたひずみゲージ

が移動し、(1) の予備検討で認められたようなひずみ測定値の増減が生じたと考えられる。

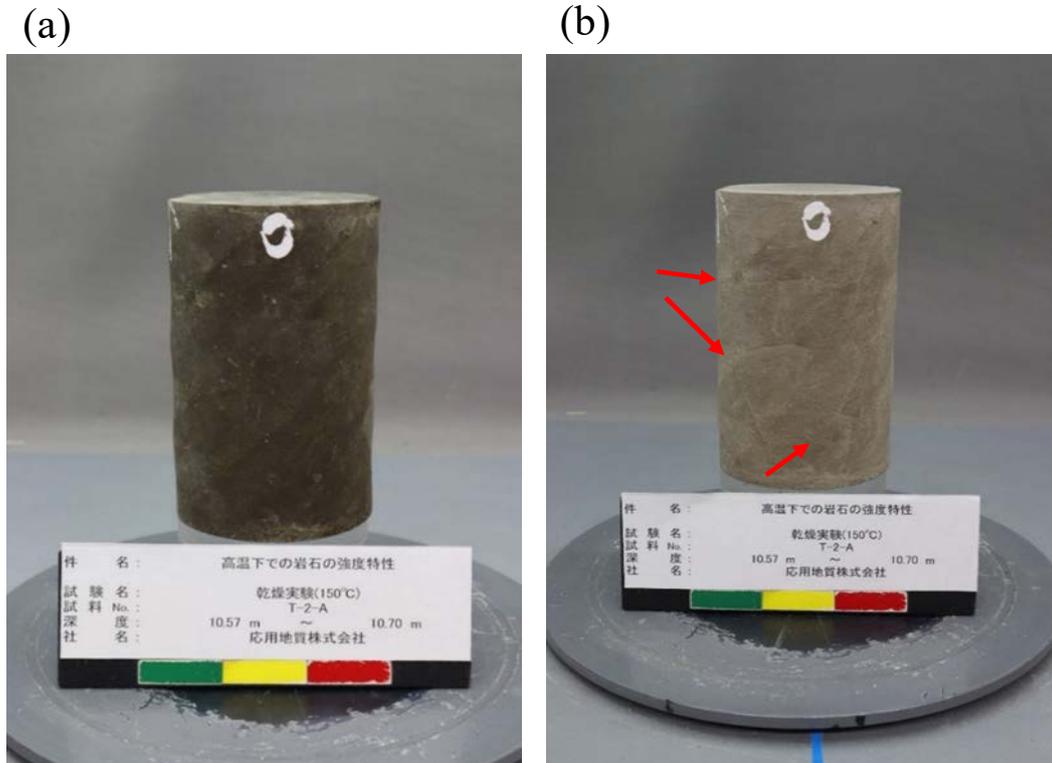


図 2.6 加熱乾燥に関する予備検討に供した試料の (a) 加熱前および (b) 加熱後の写真
(b) における赤矢印は、加熱後に認められた亀裂を意味する。

(3) 加熱乾燥を考慮した温度・ひずみ測定方法に関する予備検討

(1) および (2) の予備検討の結果から、水分を含む供試体を加熱すると亀裂が発生し、またひずみゲージの移動に起因する測定の不具合が生じることが示唆された。そこで、図 2.7 のように供試体の加熱と冷却を繰り返し、その都度状態を確認した。(1) の場合と同様に供試体の中間部に熱電対を埋め込み、内部の温度を測定した。50°Cで加熱した場合、加熱から約 6 時間で内部の温度が約 50°Cに達した。150°Cでの加熱の場合、1 回目は約 13 時間、2 回目は約 3 時間半で内部の温度が約 150°Cに達した。供試体の加熱と冷却を繰り返したものの、(1) の場合とは異なり亀裂の発生は認められなかった。50°Cから 150°Cへと段階的に加熱したことにより、供試体の急激な収縮が生じなかったことによると考えられる。

1 回目と 2 回目の 150°Cでの加熱時におけるひずみの測定結果を、それぞれ図 2.8、図 2.9 に示す。加熱前に貼り付けたひずみゲージでの測定結果は (1) の場合と同様に増減を繰り返したが (図 2.8)、1 回目の加熱後にひずみゲージを貼り付け直したところ、2 回目の加熱中のひずみについては良好なデータが取得できた (図 2.9)。1 回目の加熱により供試体が乾燥し、貼り付けたゲージが移動しにくくなったことによるものと考えられる。また、2 回目の加熱後に実施した一軸圧縮試験の結果から、一軸圧縮強さは 34.4 MN/m²、ポアソン比は 0.105 と算出された。



図 2.7 加熱乾燥を考慮した温度・ひずみ測定方法に関する予備検討の実施手順

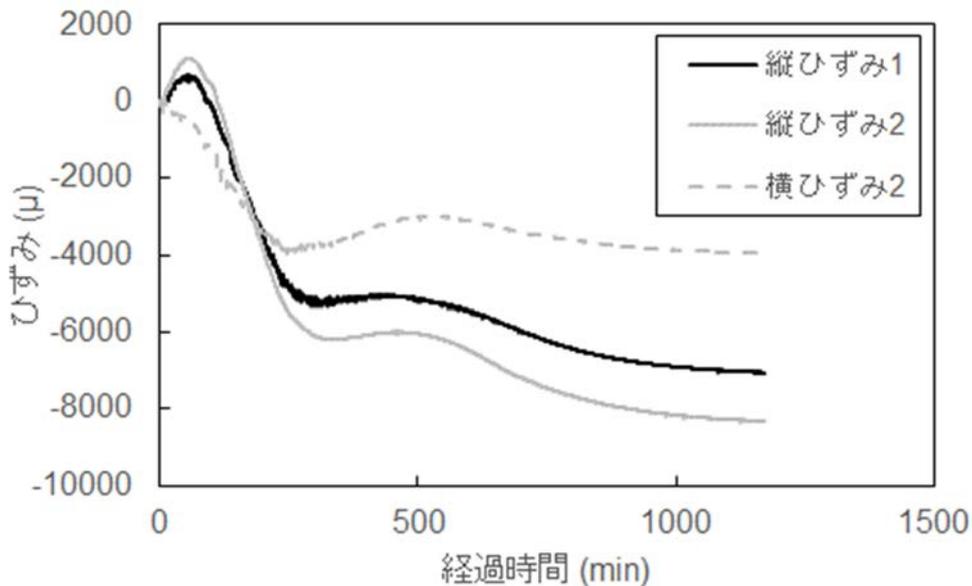


図 2.8 加熱乾燥を考慮した温度・ひずみ測定方法に関する予備検討における、1 回目の 150°C加熱時のひずみの経時変化

「横ひずみ1」のセンサーは、供試体を装置に設置する際に断線したため欠測となっている。

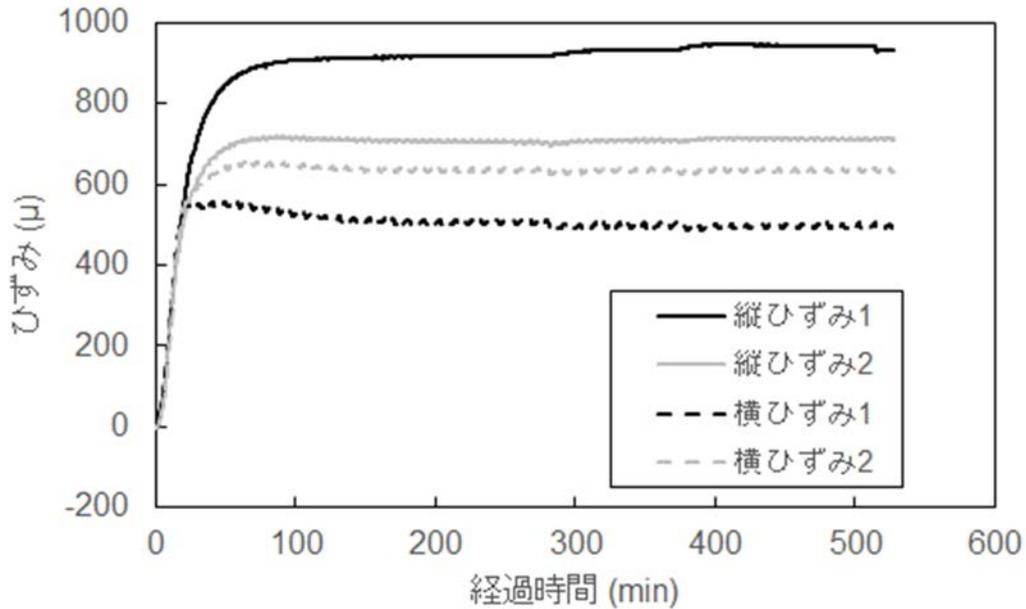


図 2.9 加熱乾燥を考慮した温度・ひずみ測定方法に関する予備検討における、2 回目の 150°C 加熱時のひずみの経時変化

(4) 試験手順

(1)~(3) で実施した予備検討の結果をふまえ、試験の実施手順を図 2.10 のように定めた。「供試体の整形」は 2.1. に記載の方法で実施した。それ以降の各項目における実施方法等の詳細は、2.3.~2.5. に記載する。

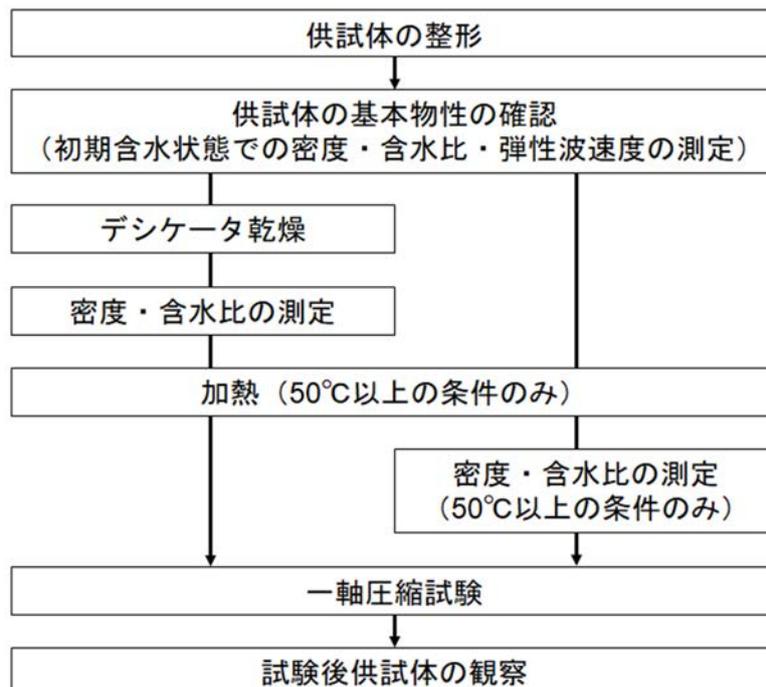


図 2.10 試験の実施手順

2.3. 供試体の基本物性の確認

試験に供する供試体の基本的な物性値を確認するために、各試料採取時の含水状態を維持した状態（初期含水状態）での密度、含水比および弾性波速度を測定した。2.1.で整形した試験前の供試体の寸法（直径、高さ）および質量を測定し、JGS 2132-2020「岩石の密度試験方法」¹⁶⁾に準拠して、初期含水状態での密度 ρ_i を算出した。また、供試体整形で発生した試料の切れ端を用い、JGS 2134-2020「岩石の含水比試験方法」¹⁷⁾に準拠して、初期含水状態での含水比 w_i を算出した。さらに、 ρ_i と w_i から、以下の式により初期含水状態での乾燥密度 ρ_{di} を算出した。

$$\rho_{di} = \frac{100\rho_i}{100 + w_i} \quad (1)$$

弾性波速度の測定は JGS 2564-2020「岩石の弾性波速度計測方法」¹⁸⁾に準拠した。P 波用および S 波用振動子を備えた透過式弾性波速度測定装置（オシロスコープ：KEYSIGHT 製 DSOX2002A、波形発生装置：エヌエフ回路設計ブロック製 WF1944B、増幅器：メステック製 M-2131）を用い、整形直後の供試体の高さ方向に対して P 波速度と S 波速度を測定した。供試体高さと透過に要した時間から弾性波速度を算出し、供試体の密度を用いて動せん断弾性係数、動弾性係数および動ポアソン比も算出した。

2.4. 供試体の乾燥・加熱

供試体の温度および水分状態に関する試験条件と試験数を表 2.1 に示す。本研究では、加熱による供試体の水分状態の変化とそれ以外の影響を区別するため、一部の供試体は十分に乾燥させた状態（乾燥状態）で試験に供した。供試体を、乾燥剤を入れたデシケータ内で 34 日間保管し、その後 40℃の恒温乾燥炉でさらに 8 日間保管した。以上の乾燥過程を「デシケータ乾燥」と呼ぶ。一般的に供試体の乾燥は 110℃程度の温度で加熱することにより実施するが、このような乾燥方法では粘土鉱物の層間水の脱水、急激な乾燥による亀裂の発生などが生じうると考えられたためである。デシケータ乾燥を実施しない供試体については、初期含水状態のまま試験に供した。

表 2.1 供試体の温度および水分状態に関する試験条件および試験数

| 供試体の水分状態 | 試験温度 | | | |
|---------------|------|-----|------|------|
| | 25℃ | 50℃ | 100℃ | 150℃ |
| 乾燥状態（デシケータ乾燥） | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 初期含水状態 | 3 | 3 | 3 | 3 |

乾燥状態の供試体については、デシケータ乾燥実施後に寸法および質量を測定し、乾燥操作後の密度 ρ_a を算出した。さらに、一軸圧縮試験実施後の供試体を用いて含水比を算出し、乾燥（加熱）操作後の含水比 w_a とした。 ρ_a と w_a の値から、式(1)と同様に、乾燥操作後の乾燥密度 ρ_{da} を算出した。デシケータ乾燥を実施しない供試体についても、一軸圧縮試験の実施前に予備

加熱を行うため（2.5.参照）、予備加熱実施後（一軸圧縮試験実施前）の供試体ならびに w_a の値を用いて予備加熱後の密度 ρ_h と乾燥密度 ρ_{dh} を算出した。

2.5. 加熱状態下での一軸圧縮試験

図 2.2 および図 2.3 に示した試験装置を用い、2.2.の(1)と同様の方法で一軸圧縮試験を実施した。その他の詳細な試験条件は以下のように設定した。

- ・ 供試体径：コア径のまま（側面の凹凸が大きな供試体は表面を研磨）
- ・ 供試体長：コア径の 2 倍
- ・ 載荷方法：ひずみ制御
- ・ 載荷パターン：単調載荷
- ・ 載荷速度：軸ひずみ速度 $0.1\%/min^{12)}$

乾燥状態の供試体の加熱方法を図 2.11 に示す。2.4.で述べたデシケータ乾燥を行った供試体にひずみゲージを貼り付けてから試験に供した。急激な加熱による亀裂の発生を防ぐため、一軸圧縮試験の際には、1 時間につき 25°C ずつ段階的に昇温した。また、2.2.(3)の予備検討における 1 回目の加熱では、容器内が試験温度（ 150°C ）に達してから供試体内部が同程度の温度まで上昇するのに最大 13 時間を要した。そのため本試験では、一軸圧縮試験の前に、供試体を試験温度で約 1 日間保温した。



図 2.11 乾燥状態の供試体の加熱方法

初期含水状態の供試体の加熱方法を図 2.12 に示す。2.2.の(3)で実施した予備検討から、供試体を一度加熱した後にひずみゲージを貼り付け、その後に再加熱すると、ひずみが測定可能となることを確認した。そのため、デシケータ乾燥を実施しない供試体は試験温度まで予備加熱し、冷却後にひずみゲージを貼り付け、再度試験温度に加熱してから一軸圧縮試験を実施した。乾燥状態の供試体と同様に、予備加熱時ならびに一軸圧縮試験実施時は、1 時間につき 25°C ずつ段階的に昇温し、試験温度で約 1 日間保温した。予備加熱した供試体を取り出してひずみゲージを貼り付ける際に、2.4.に記載の方法で、供試体の密度・含水比の測定ならびに亀裂の発生などの状態の確認も実施した。

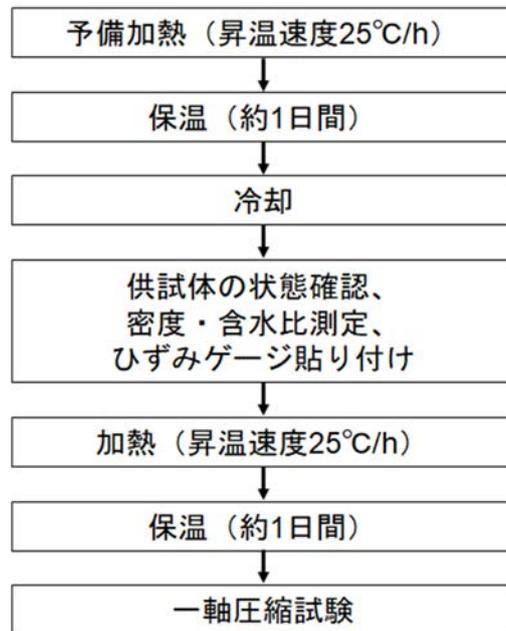


図 2.12 初期含水状態の供試体の加熱方法

2.6. 試験後の試料観察

一軸圧縮試験後の供試体の状況や破壊様式を確認するために、走査型電子顕微鏡 (SEM; JEOL 製 JSM-6390) を用いて破壊面の鉱物粒子の粒径・形状ならびに空隙等の微細構造を観察した。図 2.13 に示すように、SEM 観察用の試料は原則、試料の破壊面から採取し、引張方向の力が加わり開口したと考えられる高角の破壊面およびせん断したと考えられる低角の破壊面を観察した。試験前後の試料の変化を比較するための対象試料として、一軸圧縮試験に供していない予備試料も一点観察した。

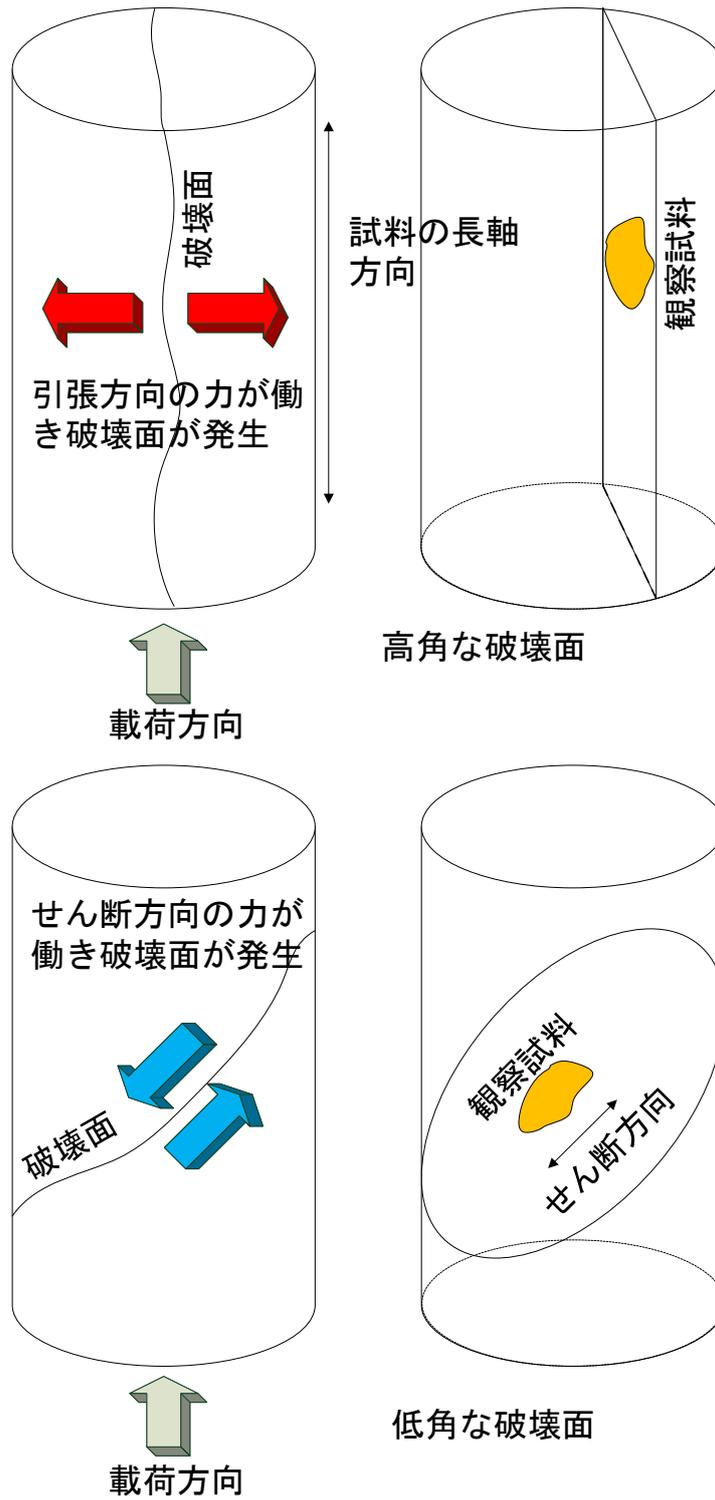


図 2.13 SEM 観察試料の採取位置の模式図

3. 結果

3.1. 物理試験

3.1.1. 密度・含水比

供試体の密度・含水比の測定結果を表 3.1 に示す。初期含水状態における供試体の密度は 1.79 ~ 1.86 Mg/m³ (平均 1.83 Mg/m³)、乾燥密度は 1.35~1.43 Mg/m³ (平均 1.40 Mg/m³)、含水比は 29.1~33.4% (平均 30.7%) であった。本試験の結果と、幌延地域における地上からのボーリング調査にもとづく既往値¹²⁾との比較を図 3.1 に示す。初期含水状態における密度ならびに乾燥密度はいずれも、既往値と同程度の値を示した。

表 3.1 供試体の密度・含水比の測定結果

| 試料状態 | 試料名 | 孔名 | 採取深度 | | | | 中心深度 m | 初期含水状態 | | | 乾燥操作後 | | | 予備加熱後 | | |
|----------------|----------------|-------|------|------|---|------|-----------|-------------------------------|----------------------------------|------------|-------------------------------|----------------------------------|------------|-------------------------------|----------------------------------|------------|
| | | | m | ~ | m | m | | 密度 | 乾燥密度 | 含水比 | 密度 | 乾燥密度 | 含水比 | 密度 | 乾燥密度 | 含水比 |
| | | | | | | | | ρ_i Mg/m ³ | ρ_{di} Mg/m ³ | W_i % | ρ_a Mg/m ³ | ρ_{da} Mg/m ³ | W_a % | ρ_h Mg/m ³ | ρ_{dh} Mg/m ³ | W_h % |
| 乾燥 | 25°C | T-2-4 | T-2孔 | 5.24 | ~ | 5.40 | 5.32 | 1.800 | 1.349 | 33.4 | 1.410 | 1.368 | 3.1 | - | - | - |
| | 50°C | T-3-2 | T-3孔 | 3.22 | ~ | 3.38 | 3.30 | 1.823 | 1.394 | 30.8 | 1.464 | 1.421 | 3.0 | - | - | - |
| | 100°C | T-2-8 | T-2孔 | 9.20 | ~ | 9.35 | 9.28 | 1.818 | 1.390 | 30.8 | 1.448 | 1.407 | 2.9 | - | - | - |
| | 150°C | T-3-4 | T-3孔 | 4.00 | ~ | 4.18 | 4.09 | 1.844 | 1.413 | 30.5 | 1.484 | 1.435 | 3.4 | - | - | - |
| | 乾燥試料 平均値 | | | | | | | 1.821 | 1.387 | 31.4 | 1.452 | 1.408 | 3.1 | - | - | - |
| 非乾燥 | 25°C① | T-1-1 | T-1孔 | 3.08 | ~ | 3.28 | 3.18 | 1.843 | 1.428 | 29.1 | - | - | - | - | - | - |
| | 25°C② | T-2-2 | T-2孔 | 4.04 | ~ | 4.27 | 4.16 | 1.835 | 1.413 | 29.9 | - | - | - | - | - | - |
| | 25°C③ | T-3-6 | T-3孔 | 4.36 | ~ | 4.52 | 4.44 | 1.828 | 1.405 | 30.1 | - | - | - | - | - | - |
| | 非乾燥25°C試料 平均値 | | | | | | | 1.835 | 1.415 | 29.7 | - | - | - | - | - | - |
| | 50°C① | T-2-5 | T-2孔 | 5.40 | ~ | 5.56 | 5.48 | 1.787 | 1.352 | 32.2 | - | - | - | 1.748 | 1.354 | 29.1 |
| | 50°C② | T-3-3 | T-3孔 | 3.38 | ~ | 3.53 | 3.46 | 1.831 | 1.401 | 30.7 | - | - | - | 1.792 | 1.403 | 27.7 |
| | 50°C③ | T-3-9 | T-3孔 | 5.74 | ~ | 5.96 | 5.85 | 1.853 | 1.434 | 29.2 | - | - | - | 1.822 | 1.451 | 25.6 |
| | 非乾燥50°C試料 平均値 | | | | | | | 1.824 | 1.396 | 30.7 | - | - | - | 1.787 | 1.403 | 27.5 |
| | 100°C① | T-2-6 | T-2孔 | 5.59 | ~ | 5.83 | 5.71 | 1.855 | 1.429 | 29.8 | - | - | - | 1.654 | 1.451 | 14.0 |
| | 100°C② | T-3-1 | T-3孔 | 3.06 | ~ | 3.22 | 3.14 | 1.822 | 1.386 | 31.5 | - | - | - | 1.496 | 1.402 | 6.7 |
| | 100°C③ | T-3-5 | T-3孔 | 4.18 | ~ | 4.36 | 4.27 | 1.833 | 1.415 | 29.5 | - | - | - | 1.559 | 1.444 | 8.0 |
| | 非乾燥100°C試料 平均値 | | | | | | | 1.837 | 1.410 | 30.3 | - | - | - | 1.570 | 1.432 | 9.6 |
| | 150°C① | T-2-3 | T-2孔 | 5.09 | ~ | 5.24 | 5.17 | 1.791 | 1.351 | 32.6 | - | - | - | 1.370 | 1.381 | -0.8 |
| | 150°C② | T-2-7 | T-2孔 | 9.05 | ~ | 9.20 | 9.13 | 1.815 | 1.381 | 31.4 | - | - | - | 1.427 | 1.403 | 1.7 |
| | 150°C③ | T-3-8 | T-3孔 | 5.60 | ~ | 5.74 | 5.67 | 1.835 | 1.410 | 30.1 | - | - | - | 1.437 | 1.431 | 0.4 |
| 非乾燥150°C試料 平均値 | | | | | | | 1.814 | 1.381 | 31.4 | - | - | - | 1.411 | 1.405 | 0.4 | |
| 全試料 平均値 | | | | | | | 1.826 | 1.397 | 30.7 | - | - | - | - | - | - | |
| 全試料 標準偏差 | | | | | | | 0.020 | 0.027 | 1.2 | - | - | - | - | - | - | |

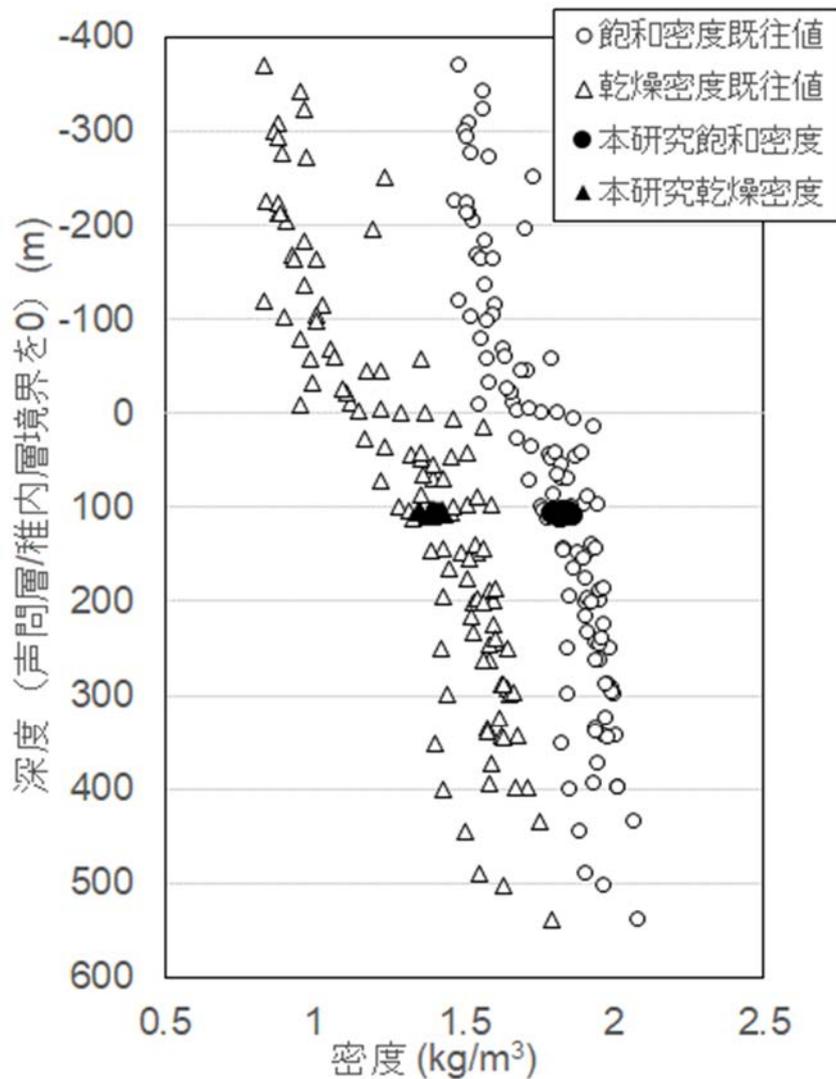


図 3.1 初期含水状態における供試体の密度および乾燥密度の既往値¹²⁾との比較

同一供試体における、デシケータ乾燥または予備加熱にともなう密度および含水比の変化を図 3.2 に示す。初期含水状態における密度 $1.79 \sim 1.86 \text{ Mg/m}^3$ (平均 1.83 Mg/m^3) および含水比 $29.1 \sim 33.4\%$ (平均 30.7%) と比べ、デシケータ乾燥を施した供試体の密度と含水比はそれぞれ $1.41 \sim 1.48 \text{ Mg/m}^3$ (平均 1.45 Mg/m^3)、 $2.9 \sim 3.4\%$ (平均 3.1%) に減少した。予備加熱後の供試体の密度は $1.37 \sim 1.82 \text{ Mg/m}^3$ 、含水比は $0 \sim 29.1\%$ の範囲にあり、より高温で加熱した供試体ほど低い密度および含水比を示した。デシケータ乾燥を施した供試体の密度および含水比は、おおむね 100°C で加熱した供試体と 150°C で加熱した供試体の間の値を示した。デシケータ乾燥ならびに予備加熱後の供試体には、変状や亀裂の発生は認められなかった。

150°C で加熱した供試体の一つ (試料名: T-2-3) は、一軸圧縮試験実施後の供試体を用いて算出した乾燥 (加熱) 後の含水比 w_a が負の値を示したため、その値を用いて算出した乾燥密度 ρ_{dh} も、予備加熱後に測定した密度 ρ_h より大きくなった。 w_a は以下の式により算出される。

$$w_a = \frac{m_{wa}}{m_{sa}} \times 100 = \frac{m_{ta} - m_{sa}}{m_{sa}} \times 100 \quad (2)$$

ここで、 m_{wa} ：一軸圧縮試験実施後の供試体に含まれる水の重量 (g)、 m_{sa} ：一軸圧縮試験実施後の供試体の乾燥重量 (g)、 m_{ta} ：一軸圧縮試験実施後の供試体の重量 (g) である。JGS 2134-2020「岩石の含水比試験」に準拠し、 m_{sa} は 110℃での加熱乾燥により求めている。一方、より高温である 150℃の加熱を経た供試体の一部では、加熱状態下での一軸圧縮試験中の水分損失量が大きく、 m_{ta} が m_{sa} よりも小さくなったため、含水比 w_a が負の値になったと考えられる。

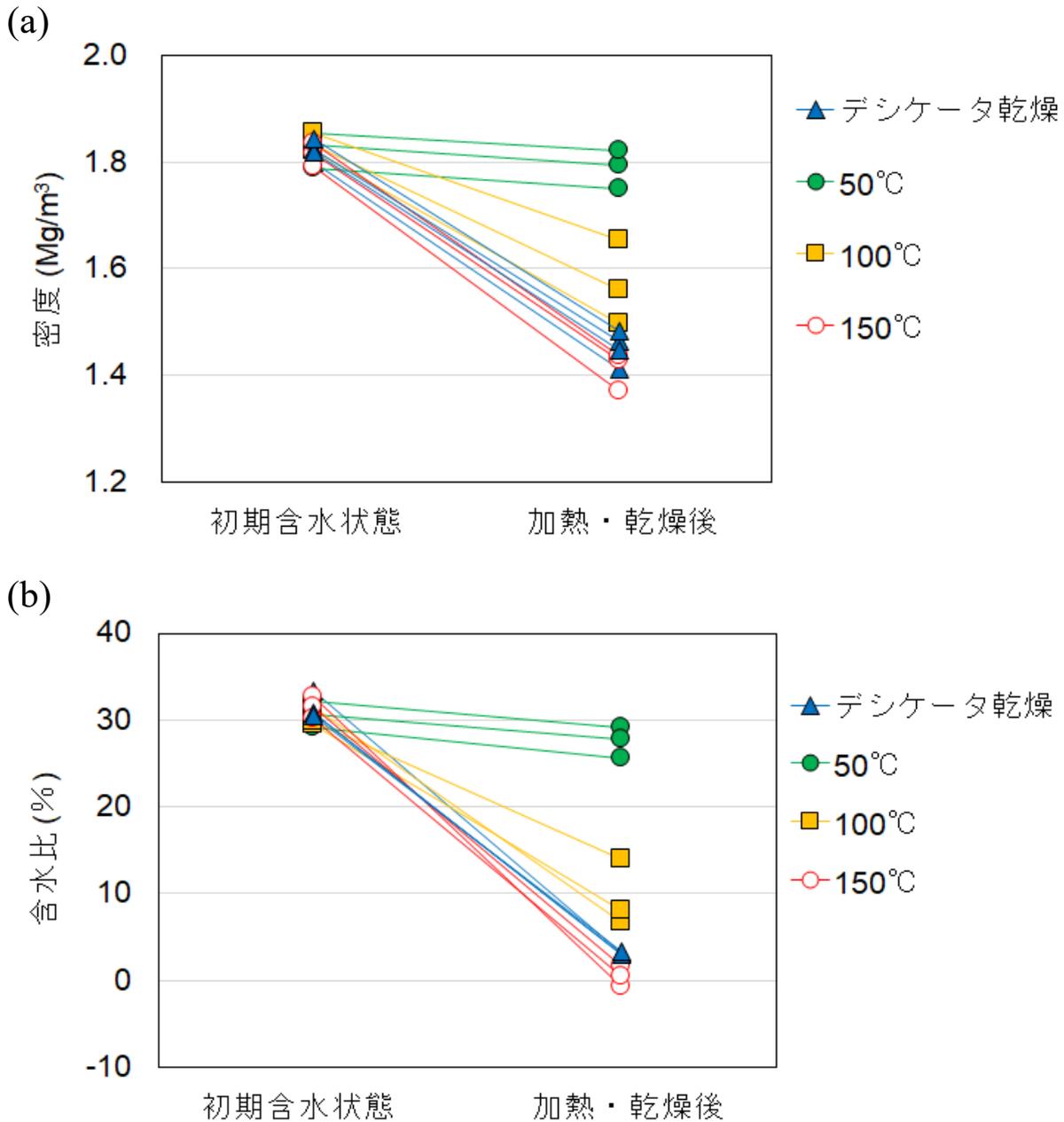


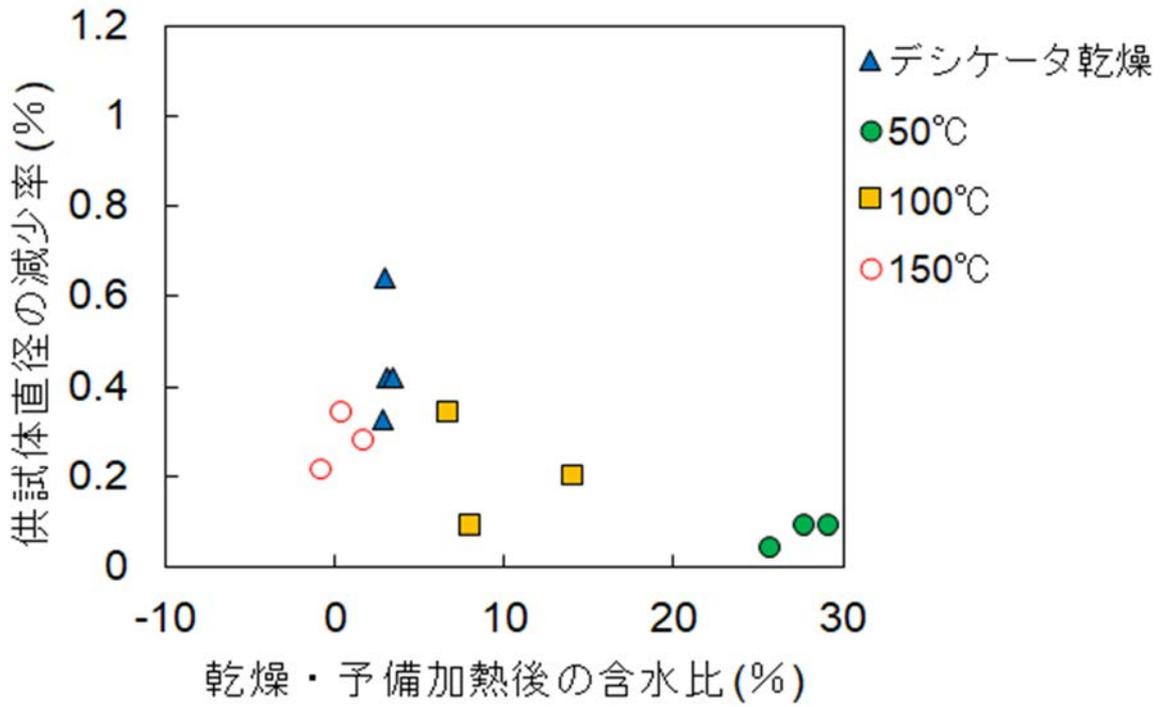
図 3.2 デシケータ乾燥ならびに予備加熱による供試体の
(a) 密度および (b) 含水比の変化

乾燥または予備加熱にともなう供試体の質量、直径および高さの減少率を表 3.2 に示す。また、供試体の含水比と直径・高さの減少率との関係を図 3.3 に示す。50℃で加熱した場合の直径および高さの減少率はそれぞれ 0.05～0.09%、0.00～0.02%であるが、100℃以上で加熱した場合ならびにデシケータ乾燥の場合は直径の減少率が 0.09～0.64%、高さの減少率が 0.52～1.08%であり、より大きく収縮した。供試体の直径および高さの減少率と乾燥・加熱後の含水比には負の相関が認められた（図 3.3）。また、デシケータ乾燥および 100℃以上で加熱した場合、高さ方向の収縮が直径方向の収縮より大きかった（表 3.2）。このような収縮の異方性は、デシケータ乾燥を施した供試体より、予備加熱した供試体の方が顕著であった（表 3.2）。

表 3.2 供試体の質量・直径・高さの減少率

| 試料状態 | 試料名 | 孔名 | 採取深度 | | 中心深度 | 乾燥・予備加熱後 | | | 初期含水状態からの減少率 | | | | |
|---------------|---------------|-------|------|------|------|-------------------|-----------------------|-------|--------------|------|------|------|------|
| | | | | | | 密度 | 乾燥密度 | 含水比 | 質量 | 直径 | 高さ | | |
| | | | | | | ρ_a/ρ_h | ρ_{da}/ρ_{dh} | w_a | m | D | H | | |
| | | m | ～ | m | m | Mg/m ³ | Mg/m ³ | % | % | % | % | | |
| 乾燥 | 25℃ | T-2-4 | T-2孔 | 5.24 | ～ | 5.40 | 5.32 | 1.410 | 1.368 | 3.1 | 22.7 | 0.42 | 0.52 |
| | 50℃ | T-3-2 | T-3孔 | 3.22 | ～ | 3.38 | 3.30 | 1.464 | 1.421 | 3.0 | 21.2 | 0.64 | 0.63 |
| | 100℃ | T-2-8 | T-2孔 | 9.20 | ～ | 9.35 | 9.28 | 1.448 | 1.407 | 2.9 | 21.3 | 0.33 | 0.58 |
| | 150℃ | T-3-4 | T-3孔 | 4.00 | ～ | 4.18 | 4.09 | 1.484 | 1.435 | 3.4 | 20.8 | 0.42 | 0.77 |
| | 乾燥試料 平均値 | | | | | | | 1.452 | 1.408 | 3.1 | 21.5 | 0.45 | 0.63 |
| 非乾燥 | 50℃① | T-2-5 | T-2孔 | 5.40 | ～ | 5.56 | 5.48 | 1.748 | 1.354 | 29.1 | 2.3 | 0.09 | 0.00 |
| | 50℃② | T-3-3 | T-3孔 | 3.38 | ～ | 3.53 | 3.46 | 1.792 | 1.403 | 27.7 | 2.3 | 0.09 | 0.00 |
| | 50℃③ | T-3-9 | T-3孔 | 5.74 | ～ | 5.96 | 5.85 | 1.822 | 1.451 | 25.6 | 1.9 | 0.05 | 0.02 |
| | 非乾燥50℃試料 平均値 | | | | | | | 1.787 | 1.403 | 27.5 | 2.2 | 0.08 | 0.01 |
| | 100℃① | T-2-6 | T-2孔 | 5.59 | ～ | 5.83 | 5.71 | 1.654 | 1.451 | 14.0 | 12.2 | 0.20 | 1.08 |
| | 100℃② | T-3-1 | T-3孔 | 3.06 | ～ | 3.22 | 3.14 | 1.496 | 1.402 | 6.7 | 18.8 | 0.35 | 0.77 |
| | 100℃③ | T-3-5 | T-3孔 | 4.18 | ～ | 4.36 | 4.27 | 1.559 | 1.444 | 8.0 | 15.7 | 0.09 | 0.61 |
| | 非乾燥100℃試料 平均値 | | | | | | | 1.570 | 1.432 | 9.6 | 15.6 | 0.22 | 0.82 |
| | 150℃① | T-2-3 | T-2孔 | 5.09 | ～ | 5.24 | 5.17 | 1.370 | 1.381 | -0.8 | 24.5 | 0.22 | 0.58 |
| | 150℃② | T-2-7 | T-2孔 | 9.05 | ～ | 9.20 | 9.13 | 1.427 | 1.403 | 1.7 | 22.6 | 0.28 | 0.69 |
| 150℃③ | T-3-8 | T-3孔 | 5.60 | ～ | 5.74 | 5.67 | 1.437 | 1.431 | 0.4 | 22.8 | 0.34 | 0.72 | |
| 非乾燥150℃試料 平均値 | | | | | | | 1.411 | 1.405 | 0.4 | 23.3 | 0.28 | 0.66 | |

(a)



(b)

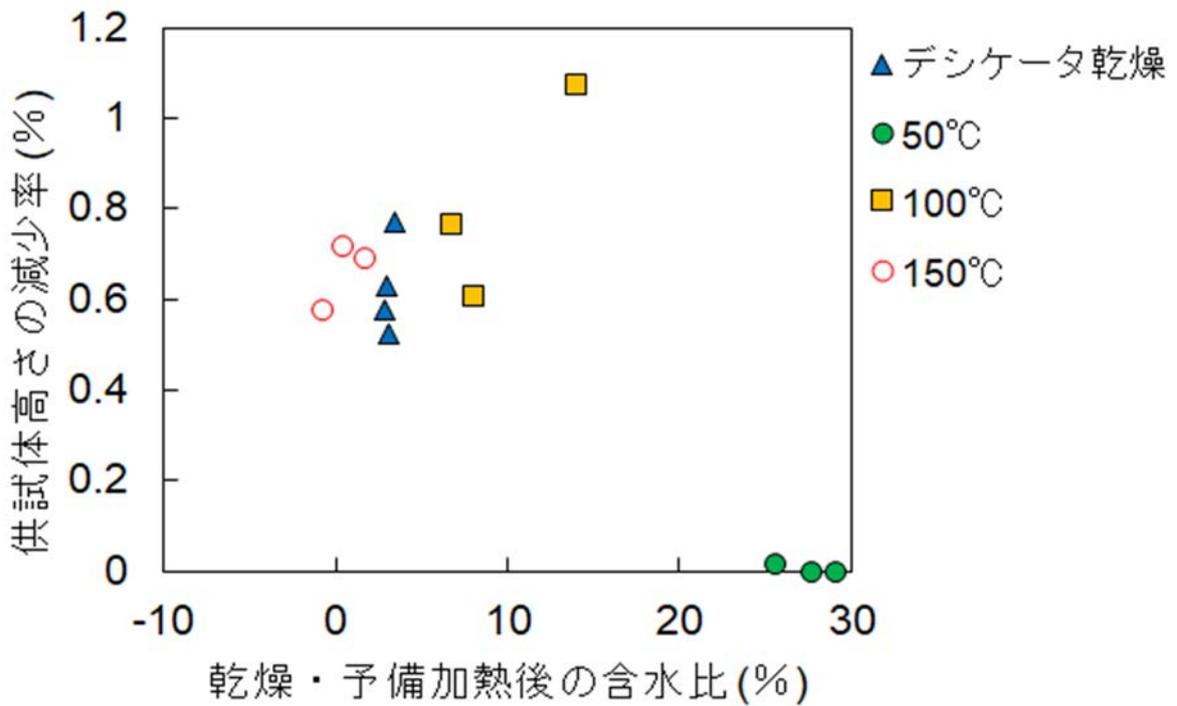


図 3.3 加熱乾燥後の供試体の (a) 直径および (b) 高さの減少率

3.1.2. 弾性波速度

初期含水状態の供試体における弾性波速度の測定結果を表 3.3 に示す。また、弾性波速度と対象試料の坑道からの採取深度の関係を図 3.4 に、既往の弾性波速度測定値¹²⁾との比較を図 3.5 に示す。本試験における供試体の P 波速度は 1,910~2,230 m/s（平均 2,130 m/s）、S 波速度は 841~1,050 m/s（平均 967 m/s）であり、ばらつきが小さいこと、採取深度による明瞭な差がないこと（図 3.4）ならびに稚内層における既往の測定値とも同程度であること（図 3.5）が確認された。

表 3.3 供試体の弾性波速度の測定結果

| 試料状態 | 試料名 | 孔名 | 採取深度 | | | 中心深度 | 初期含水状態 | | | P波速度 V _p | S波速度 V _s | ポアソン比 ν | せん断剛性率 G | ヤング率 E | |
|----------|--------|-------|------|------|---|------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------|------------------------|------------------------|------------|-------------|-----------|------|
| | | | | | | | 密度 | 乾燥密度 | 含水比 | | | | | | |
| | | | | | | | ρ _t Mg/m ³ | ρ _{di} Mg/m ³ | w _i % | | | | | | |
| | | | m | ~ | m | m | | | | | | | | | |
| 乾燥 | 25°C | T-2-4 | T-2孔 | 5.24 | ~ | 5.40 | 5.32 | 1.800 | 1.349 | 33.4 | 2120 | 966 | 0.369 | 1680 | 4600 |
| | 50°C | T-3-2 | T-3孔 | 3.22 | ~ | 3.38 | 3.30 | 1.823 | 1.394 | 30.8 | 2140 | 969 | 0.371 | 1710 | 4690 |
| | 100°C | T-2-8 | T-2孔 | 9.20 | ~ | 9.35 | 9.28 | 1.818 | 1.390 | 30.8 | 2110 | 959 | 0.370 | 1670 | 4580 |
| | 150°C | T-3-4 | T-3孔 | 4.00 | ~ | 4.18 | 4.09 | 1.844 | 1.413 | 30.5 | 2100 | 961 | 0.368 | 1700 | 4650 |
| 非乾燥 | 25°C① | T-1-1 | T-1孔 | 3.08 | ~ | 3.28 | 3.18 | 1.843 | 1.428 | 29.1 | 2100 | 945 | 0.373 | 1650 | 4530 |
| | 25°C② | T-2-2 | T-2孔 | 4.04 | ~ | 4.27 | 4.16 | 1.835 | 1.413 | 29.9 | 2230 | 1050 | 0.358 | 2020 | 5490 |
| | 25°C③ | T-3-6 | T-3孔 | 4.36 | ~ | 4.52 | 4.44 | 1.828 | 1.405 | 30.1 | 2150 | 975 | 0.371 | 1740 | 4770 |
| | 50°C① | T-2-5 | T-2孔 | 5.40 | ~ | 5.56 | 5.48 | 1.787 | 1.352 | 32.2 | 2170 | 992 | 0.368 | 1760 | 4820 |
| | 50°C② | T-3-3 | T-3孔 | 3.38 | ~ | 3.53 | 3.46 | 1.831 | 1.401 | 30.7 | 2130 | 967 | 0.370 | 1710 | 4690 |
| | 50°C③ | T-3-9 | T-3孔 | 5.74 | ~ | 5.96 | 5.85 | 1.853 | 1.434 | 29.2 | 2170 | 980 | 0.372 | 1780 | 4880 |
| | 100°C① | T-2-6 | T-2孔 | 5.59 | ~ | 5.83 | 5.71 | 1.855 | 1.429 | 29.8 | 1910 | 841 | 0.380 | 1310 | 3620 |
| | 100°C② | T-3-1 | T-3孔 | 3.06 | ~ | 3.22 | 3.14 | 1.822 | 1.386 | 31.5 | 2130 | 963 | 0.372 | 1690 | 4640 |
| | 100°C③ | T-3-5 | T-3孔 | 4.18 | ~ | 4.36 | 4.27 | 1.833 | 1.415 | 29.5 | 2110 | 959 | 0.370 | 1690 | 4630 |
| | 150°C① | T-2-3 | T-2孔 | 5.09 | ~ | 5.24 | 5.17 | 1.791 | 1.351 | 32.6 | 2110 | 964 | 0.368 | 1660 | 4540 |
| | 150°C② | T-2-7 | T-2孔 | 9.05 | ~ | 9.20 | 9.13 | 1.815 | 1.381 | 31.4 | 2140 | 980 | 0.367 | 1740 | 4760 |
| | 150°C③ | T-3-8 | T-3孔 | 5.60 | ~ | 5.74 | 5.67 | 1.835 | 1.410 | 30.1 | 2190 | 993 | 0.371 | 1810 | 4960 |
| 全試料 平均値 | | | | | | | 1.826 | 1.397 | 30.7 | 2130 | 967 | 0.370 | 1710 | 4680 | |
| 全試料 標準偏差 | | | | | | | 0.020 | 0.027 | 1.2 | 70 | 41 | 0.004 | 140 | 360 | |

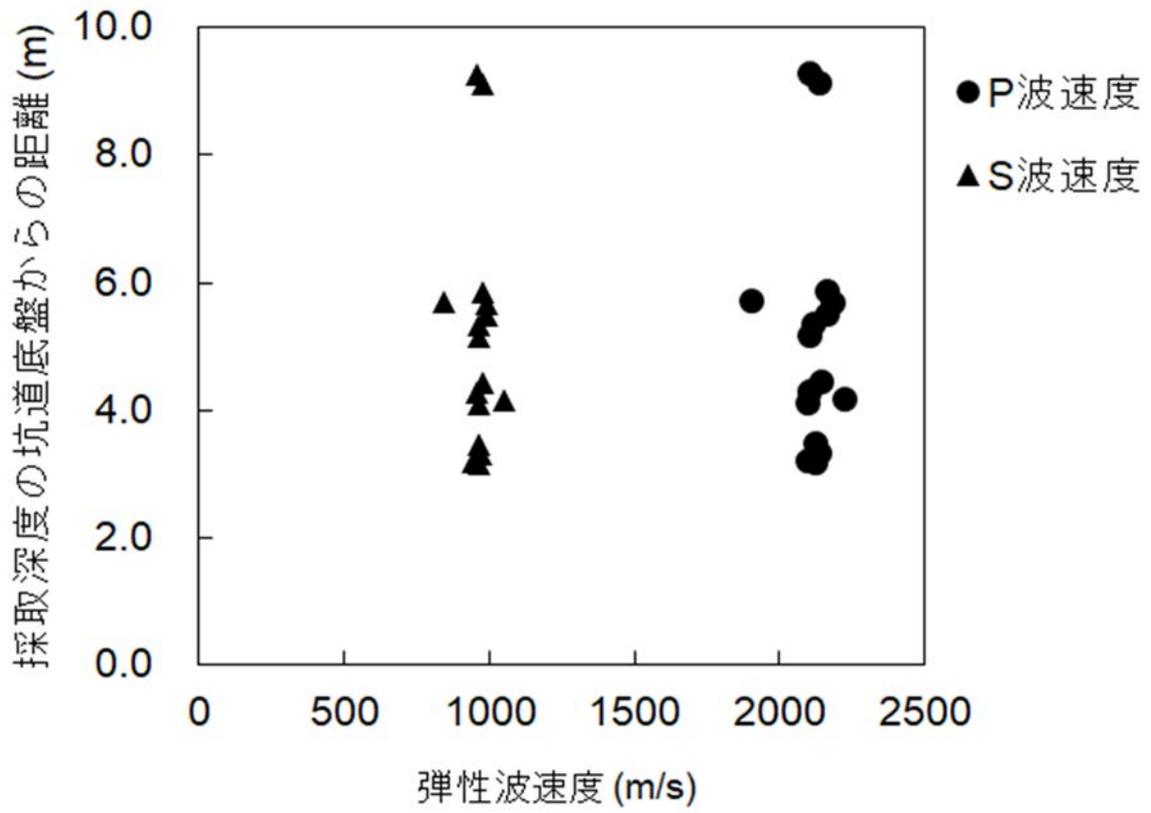


図 3.4 供試体の弾性波速度と各試料採取深度の坑道からの距離の関係

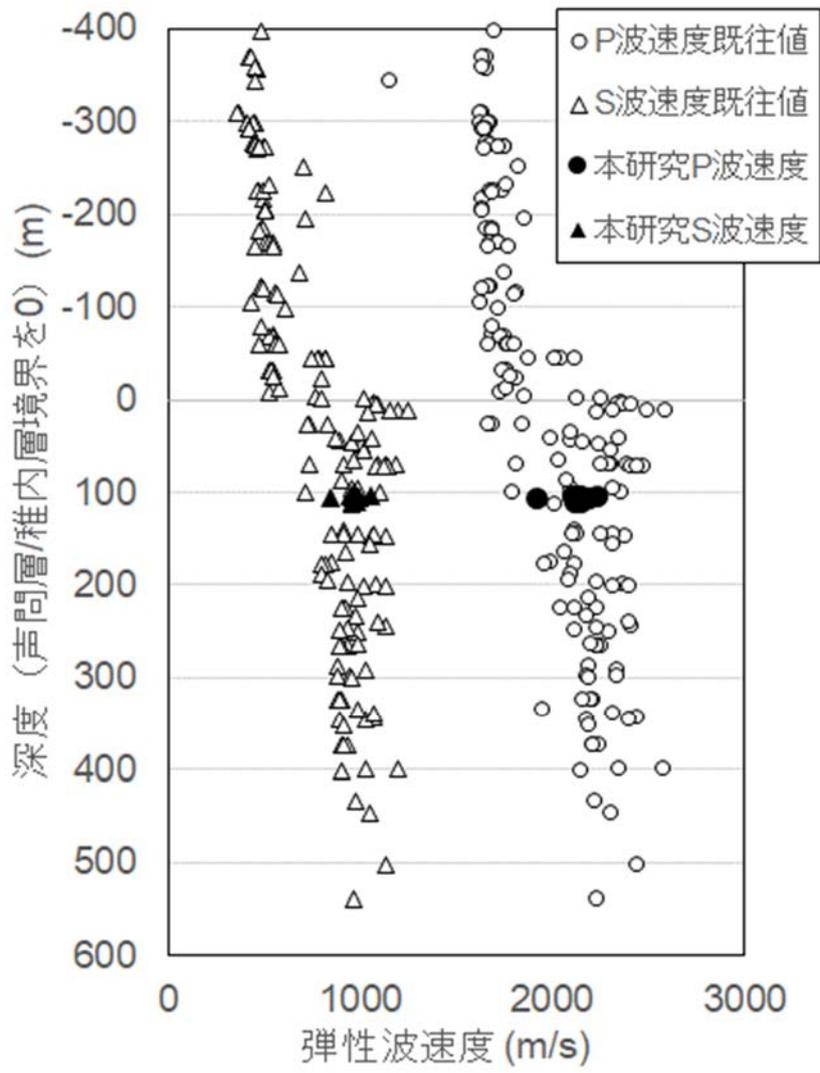


図 3.5 弾性波速度の既往値¹²⁾との比較

3.2. 加熱中のひずみの変化

一軸圧縮試験前の加熱過程における、供試体のひずみおよび加熱・保温容器の温度の経時変化の例を図 3.6 に示す。加熱後の時間経過とともにひずみは増加するが、試験条件とした温度に達し保温状態になると、ひずみが徐々に減少した。

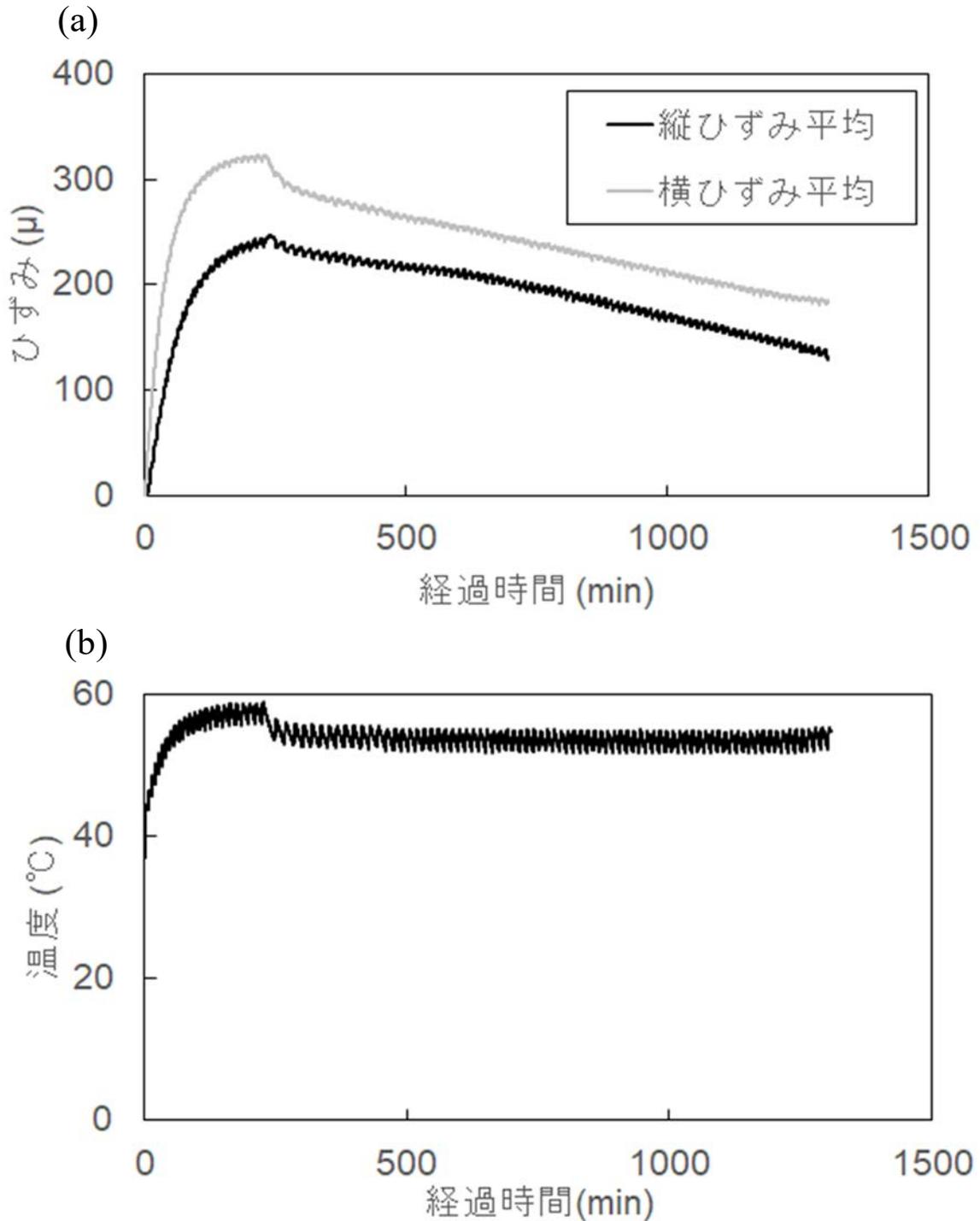


図 3.6 50 $^{\circ}\text{C}$ での加熱過程における (a) 供試体のひずみおよび (b) 容器温度の変化

3.3. 加熱状態下での一軸圧縮試験

各供試体の一軸圧縮強さを表 3.4 に、試験で取得された物性値（一軸圧縮強さ、変形係数、ポアソン比）と試験温度との関係を図 3.7 に示す。また、各供試体の応力-ひずみ線図を付録 2 に示す。デシケータ乾燥を施した供試体の一軸圧縮強さは 26.8～55.0 MN/m² であった。なお、デシケータ乾燥後に 100℃で加熱した場合の一軸圧縮強さは、他の温度での試験結果より値が小さかった（図 3.7）。変形係数は加熱温度とともに増加し、ポアソン比は加熱温度が上昇するほど低下した（図 3.7）。

予備加熱を施した供試体では、加熱温度が高くなるほど一軸圧縮強さと変形係数が増加し、ポアソン比が低下した（図 3.7）。100℃および 150℃で加熱した場合の一軸圧縮強さは、25℃および 50℃で加熱した場合の約 2 倍であった。一軸圧縮強さについては、加熱温度が高くなるほど供試体間の値のばらつきが大きくなる傾向が認められた。

表 3.4 供試体の一軸圧縮強さの測定結果

| 試料状態 | 試料名 | 孔名 | 採取深度 | | 中心深度 | 初期含水状態 | | | 密度・含水比試験 | | | 予備加熱後 | | | 一軸圧縮試験 | | | | | |
|--------|--------|-------|-------------|-------------|-------|----------|-------------|-------|----------|-------------|-------|----------|-------------|-------|--------|--------------|------------|--------------|------------|-------|
| | | | m | | | 密度 | 乾燥密度 | 含水比 | 密度 | 乾燥密度 | 含水比 | 密度 | 乾燥密度 | 含水比 | 強さ | 破壊ひずみ | 変形係数 | 破壊ひずみ | 変形係数 | ポアソン比 |
| | | | ~ | ~ | | ρ_i | ρ_{di} | W_i | ρ_a | ρ_{da} | W_a | ρ_h | ρ_{dh} | W_a | Q_u | ϵ_f | $E_{s,50}$ | ϵ_f | $E_{s,50}$ | ν |
| 乾燥 | 25°C | T-2-4 | T-2孔 | 5.24 ~ 5.40 | 5.32 | 1.800 | 1.349 | 33.4 | 1.410 | 1.368 | 3.1 | - | - | - | 44.1 | 2.18 | 2360 | 2.00 | 2800 | 0.176 |
| | 50°C | T-3-2 | T-3孔 | 3.22 ~ 3.38 | 3.30 | 1.823 | 1.394 | 30.8 | 1.464 | 1.421 | 3.0 | - | - | - | 41.0 | 2.04 | 2360 | 1.59 | 3060 | 0.211 |
| | 100°C | T-2-8 | T-2孔 | 9.20 ~ 9.35 | 9.28 | 1.818 | 1.390 | 30.8 | 1.448 | 1.407 | 2.9 | - | - | - | 26.8 | 0.99 | 2410 | 0.74 | 4440 | 0.072 |
| | 150°C | T-3-4 | T-3孔 | 4.00 ~ 4.18 | 4.09 | 1.844 | 1.413 | 30.5 | 1.484 | 1.435 | 3.4 | - | - | - | 55.0 | 2.15 | 2810 | 1.22 | 3770 | 0.096 |
| | | | | 乾燥試料 | 平均値 | 1.821 | 1.387 | 31.4 | 1.452 | 1.408 | 3.1 | - | - | - | 41.7 | 1.84 | 2490 | 1.39 | 3520 | 0.138 |
| | | | | 乾燥試料 | 平均値 | 1.843 | 1.428 | 29.1 | - | - | - | - | - | - | 14.6 | 1.04 | 1710 | 0.29 | 2110 | 0.179 |
| 非乾燥 | 25°C① | T-1-1 | T-1孔 | 3.08 ~ 3.28 | 3.18 | 1.835 | 1.413 | 29.9 | - | - | - | - | - | 9.23 | 0.55 | 2000 | 0.39 | 2420 | 0.204 | |
| | 25°C② | T-2-2 | T-2孔 | 4.04 ~ 4.27 | 4.16 | 1.835 | 1.413 | 29.9 | - | - | - | - | - | 18.3 | 1.21 | 1780 | 0.40 | 2160 | 0.198 | |
| | 25°C③ | T-3-6 | T-3孔 | 4.36 ~ 4.52 | 4.44 | 1.828 | 1.405 | 30.1 | - | - | - | - | - | 14.0 | 0.93 | 1830 | 0.36 | 2230 | 0.194 | |
| | | | | 非乾燥25°C試料 | 平均値 | 1.835 | 1.415 | 29.7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 50°C① | T-2-5 | T-2孔 | 5.40 ~ 5.56 | 5.48 | 1.787 | 1.352 | 32.2 | 1.748 | 1.354 | 29.1 | 1.748 | 1.354 | 29.1 | 17.3 | 1.30 | 1500 | 1.12 | 1780 | 0.171 |
| | 50°C② | T-3-3 | T-3孔 | 3.38 ~ 3.53 | 3.46 | 1.831 | 1.401 | 30.7 | 1.792 | 1.403 | 27.7 | 1.792 | 1.403 | 27.7 | 21.5 | 1.45 | 1810 | 0.22 | 2170 | 0.161 |
| | 50°C③ | T-3-9 | T-3孔 | 5.74 ~ 5.96 | 5.85 | 1.853 | 1.434 | 29.2 | 1.822 | 1.451 | 25.6 | 1.822 | 1.451 | 25.6 | 22.4 | 1.50 | 2010 | 0.88 | 2300 | 0.244 |
| | | | | 非乾燥50°C試料 | 平均値 | 1.824 | 1.396 | 30.7 | 1.787 | 1.403 | 27.5 | 1.787 | 1.403 | 27.5 | 20.4 | 1.41 | 1770 | 0.74 | 2080 | 0.192 |
| | 100°C① | T-2-6 | T-2孔 | 5.59 ~ 5.83 | 5.71 | 1.855 | 1.429 | 29.8 | 1.654 | 1.451 | 14.0 | 1.654 | 1.451 | 14.0 | 44.7 | 2.04 | 2830 | 2.11 | 2910 | 0.120 |
| | 100°C② | T-3-1 | T-3孔 | 3.06 ~ 3.22 | 3.14 | 1.822 | 1.386 | 31.5 | 1.496 | 1.402 | 6.7 | 1.496 | 1.402 | 6.7 | 28.6 | 1.48 | 2520 | 1.38 | 2770 | 0.126 |
| | 100°C③ | T-3-5 | T-3孔 | 4.18 ~ 4.36 | 4.27 | 1.833 | 1.415 | 29.5 | 1.559 | 1.444 | 8.0 | 1.559 | 1.444 | 8.0 | 39.2 | 2.33 | 2220 | 1.41 | 3000 | 0.131 |
| | | | | 非乾燥100°C試料 | 平均値 | 1.837 | 1.410 | 30.3 | 1.570 | 1.432 | 9.6 | 1.570 | 1.432 | 9.6 | 37.5 | 1.95 | 2520 | 1.63 | 2890 | 0.126 |
| 150°C① | T-2-3 | T-2孔 | 5.09 ~ 5.24 | 5.17 | 1.791 | 1.351 | 32.6 | 1.370 | 1.381 | -0.8 | 1.370 | 1.381 | -0.8 | 40.3 | 1.40 | 1990 | 1.21 | 3450 | 0.094 | |
| 150°C② | T-2-7 | T-2孔 | 9.05 ~ 9.20 | 9.13 | 1.815 | 1.381 | 31.4 | 1.427 | 1.403 | 1.7 | 1.427 | 1.403 | 1.7 | 50.6 | 1.64 | 2950 | 1.31 | 4700 | 0.095 | |
| 150°C③ | T-3-8 | T-3孔 | 5.60 ~ 5.74 | 5.67 | 1.835 | 1.410 | 30.1 | 1.437 | 1.431 | 0.4 | 1.437 | 1.431 | 0.4 | 31.0 | 0.87 | 3980 | 0.65 | 5300 | 0.107 | |
| | | | 非乾燥150°C試料 | 平均値 | 1.814 | 1.381 | 31.4 | 1.411 | 1.405 | 0.4 | 1.411 | 1.405 | 0.4 | 40.6 | 1.31 | 2970 | 1.06 | 4480 | 0.099 | |
| | | | 全試料 | 平均値 | 1.826 | 1.397 | 30.7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | | | 全試料 | 標準偏差 | 0.020 | 0.027 | 1.2 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

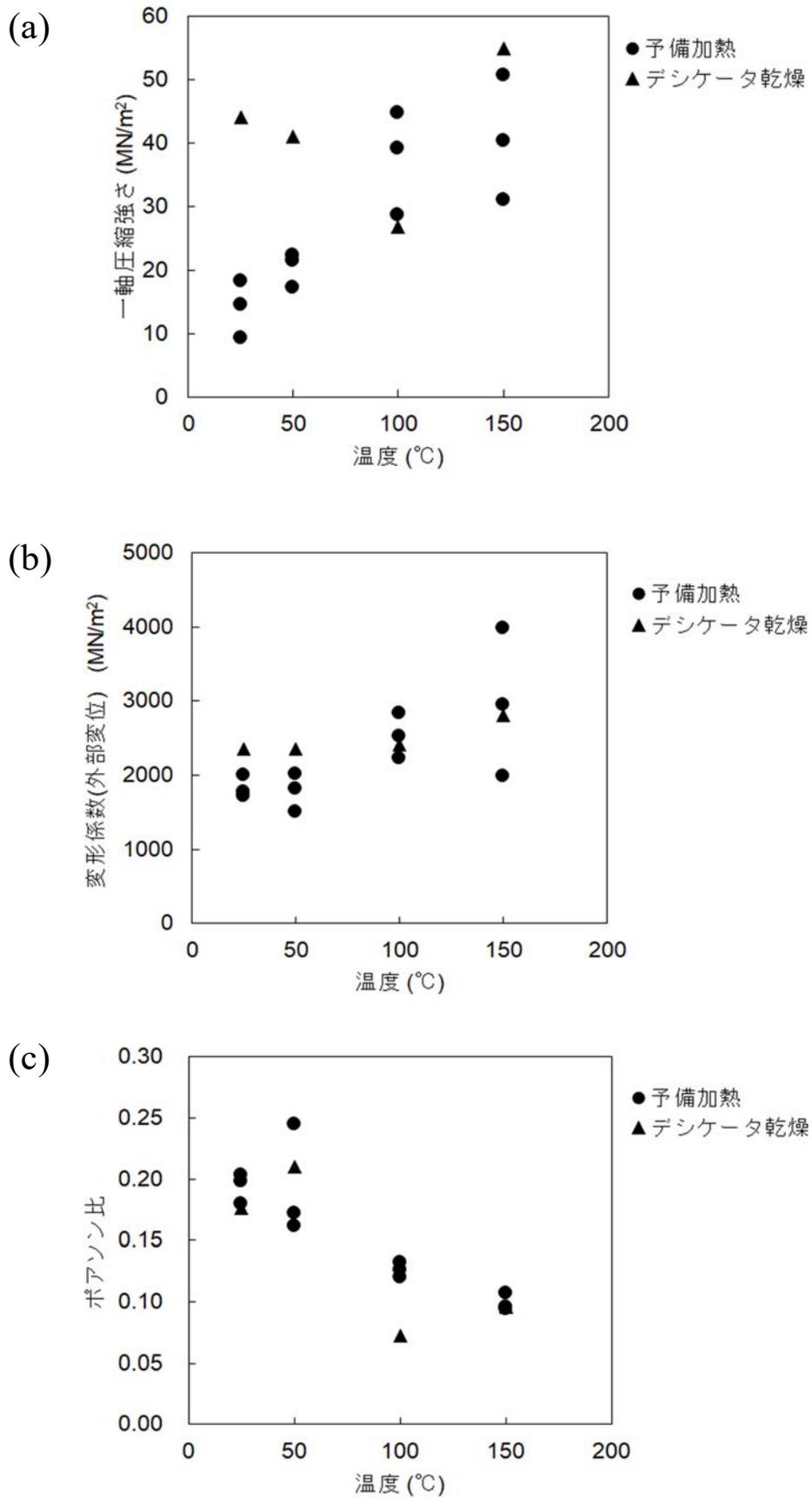


図 3.7 加熱温度と (a) 一軸圧縮強さ、(b) 変形係数および (c) ポアソン比の関係

本試験での一軸圧縮強さと稚内層における既往値との比較を図 3.8 に示す。また、一軸圧縮強さと密度の関係について、本試験結果と既往値との比較を図 3.9 に示す。予備加熱を施した供試体について、25℃および 50℃で加熱した場合には一軸圧縮強さと密度は既往値の範囲に分布した。一方、100℃および 150℃で加熱した場合とデシケータ乾燥を施した場合には、既往値と比べて密度が大きく低下し、一軸圧縮強さは稚内層での既往値以上となった。

これらは、供試体の乾燥が進むにつれ、強度変形特性に及ぼす岩石マトリックス自体の構造的な差が顕著になり、かつ供試体が脆性化したことを示していると考えられる。特に、一軸圧縮試験のように载荷速度が速い試験では、供試体中の水分により過剰間隙水圧が発生し有効応力が減少するため、乾燥状態よりも湿潤・飽和状態の試験の一軸圧縮強さが低くなる可能性があるが、既往の試験結果との強度差はそのような現象の発生も示唆していると思われる。

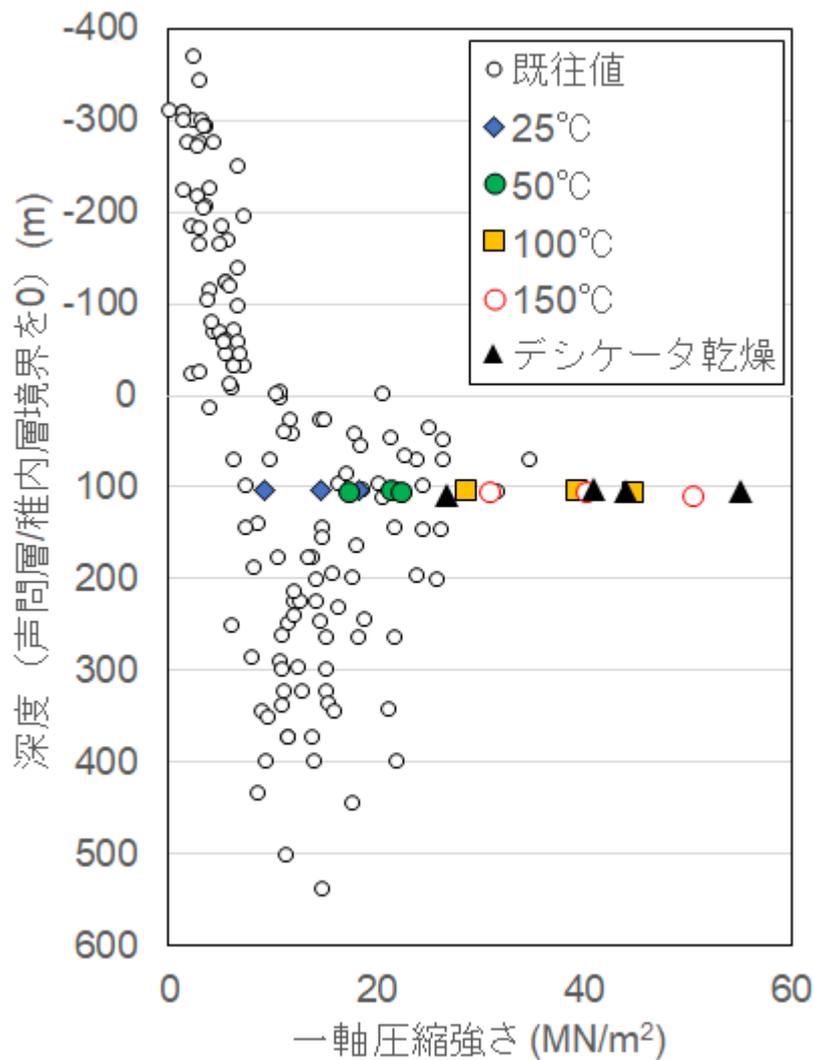


図 3.8 一軸圧縮強さの既往値¹²⁾との比較

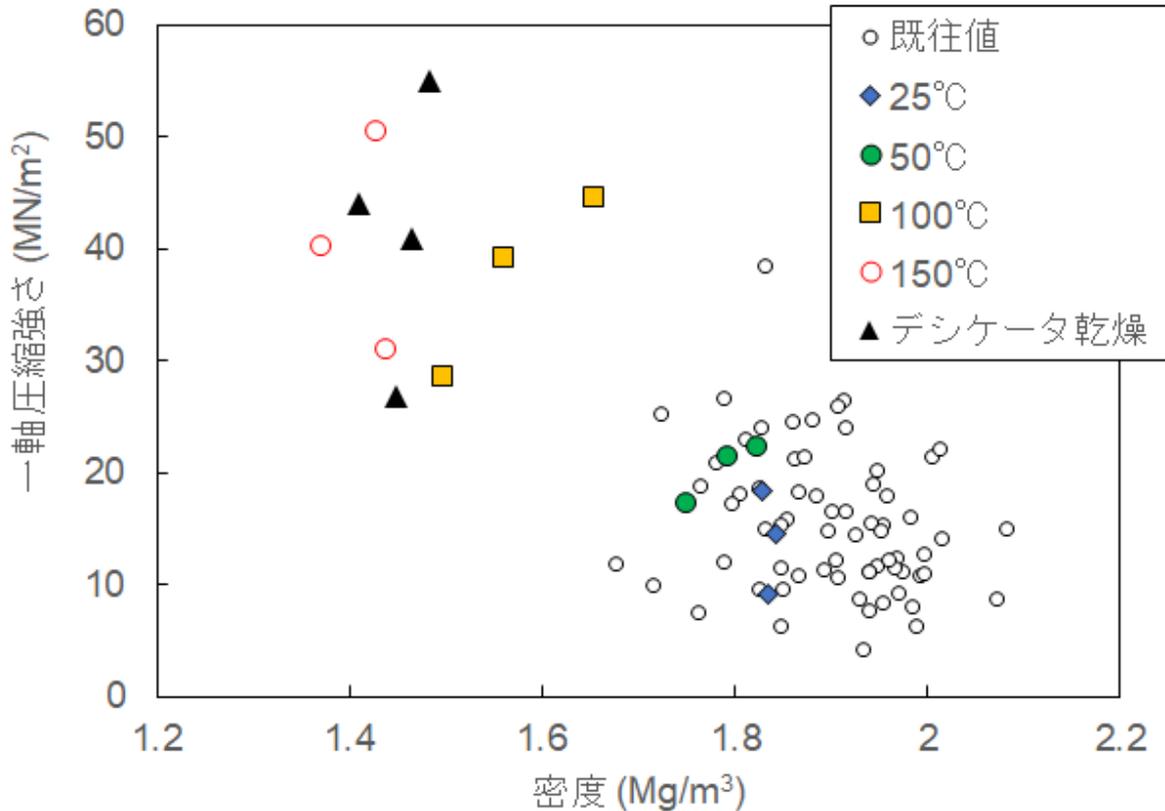


図 3.9 稚内層における一軸圧縮強さと密度の関係

既往値¹²⁾の密度は飽和密度であるが、本研究の密度は記載温度にて加熱後の値である。

3.4. 試料観察

一軸圧縮試験後の供試体の多くは、長軸方向に平行な高角の破壊面が発達していた。また、一軸圧縮強さの大きな供試体ほど破壊の程度が大きく、小さな岩片状に破壊する傾向が認められた。主にこれらの高角破壊面を対象として、表 3.5 に示すように SEM 観察を実施した。観察画像の一例を図 3.10～図 3.14 に示す。乾燥や加熱および一軸圧縮試験を実施前の供試体には、10～100 μm 程度の空隙が多数存在し、その空隙の中に球状の粒子集合体（フランボイダルパイライト）が認められた（図 3.10）^{19),20)}。また、角張った鱗片状物質もすべての試料に認められた（図 3.10）。粒子の粒径や空隙形状などに、試験条件による大きな差は認められなかった。

一軸圧縮試験後の破壊面には、せん断で形成されたとと思われるフランボイダルパイライトの変形（図 3.11、図 3.12）と鏡肌（図 3.13、図 3.14）が認められた。試験条件によるフランボイダルパイライトの変形および鏡肌の特徴を表 3.6 に示す。これらの変化は、乾燥状態の供試体では試験条件の温度が低いほど、デシケータ乾燥を行っていない供試体では試験条件の温度が高いほどより顕著であった。デシケータ乾燥は、乾燥自体が相対的に緩やかに進行するため、同じ加熱温度であっても残存する水分量が多い可能性が考えられる。

表 3.5 SEM 観察試料一覧

| 試料名 | 試験条件 乾燥状態・加熱温度 | 薄片番号 | 破壊面 | 上盤・下盤 |
|-------|-------------------|--------|-----|-------|
| T-1-A | 一軸圧縮試験未実施 | T-1-AA | — | — |
| T-2-4 | デシケータ乾燥：25℃ | T-2-4A | 高角 | 下盤 |
| T-3-2 | デシケータ乾燥：50℃ | T-3-2A | 高角 | 下盤 |
| T-2-8 | デシケータ乾燥：100℃ | T-2-8A | 高角 | 下盤 |
| T-3-4 | デシケータ乾燥：150℃ | T-3-4A | 高角 | 下盤 |
| T-1-1 | 25℃ | T-1-1A | 高角 | 下盤 |
| T-2-2 | 25℃ | T-2-2B | 低角 | 上盤 |
| T-3-6 | 25℃ | T-3-6A | 高角 | 下盤 |
| T-2-5 | 50℃ | T-2-5A | 高角 | 下盤 |
| T-3-3 | 50℃ | T-3-3A | 高角 | 下盤 |
| T-3-9 | 50℃ | T-3-9A | 高角 | 下盤 |
| T-2-6 | 100℃ | T-2-6A | 高角 | 下盤 |
| T-3-1 | 100℃ | T-3-1A | 高角 | 下盤 |
| T-3-5 | 100℃ | T-3-5A | 高角 | 下盤 |
| T-2-3 | 150℃ | T-2-3A | 高角 | 下盤 |
| T-2-7 | 150℃ | T-2-7A | 高角 | 下盤 |
| T-3-8 | 150℃ | T-3-8A | 高角 | 下盤 |

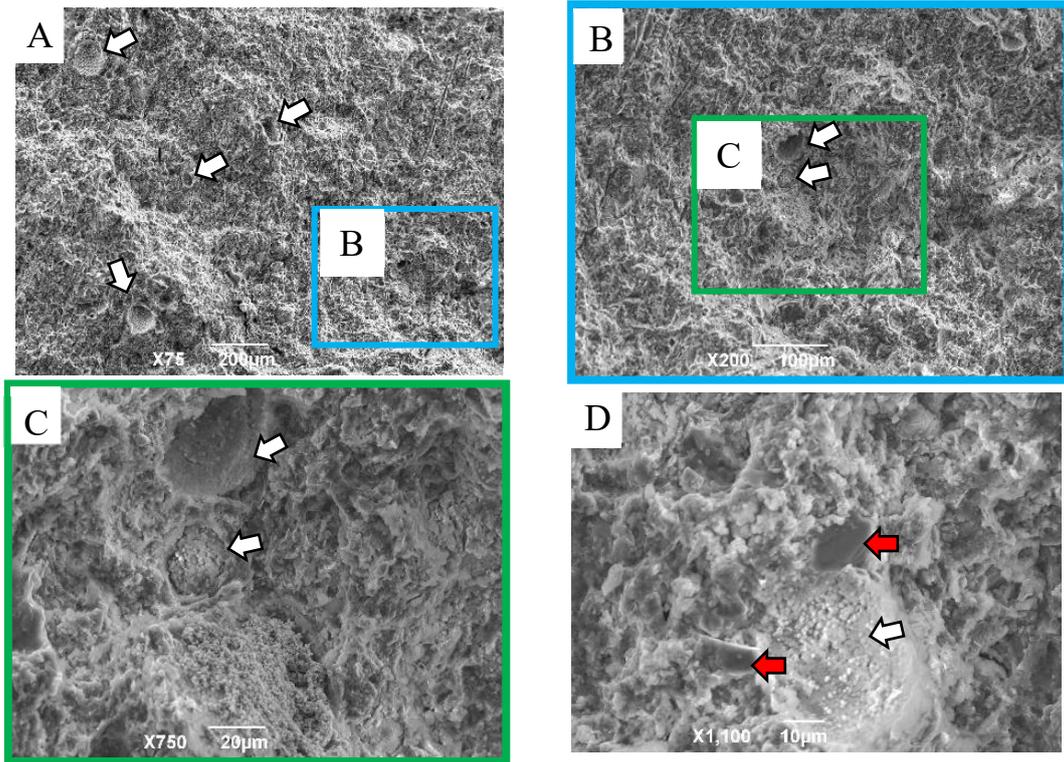


図 3.10 乾燥、加熱および一軸圧縮試験を実施していない試料の SEM 観察結果 (B) および (C) は (A) の一部を拡大したもの。白矢印はフランボイダルパイライトが発達する穴、赤矢印は角張った鱗片状物質を示す。

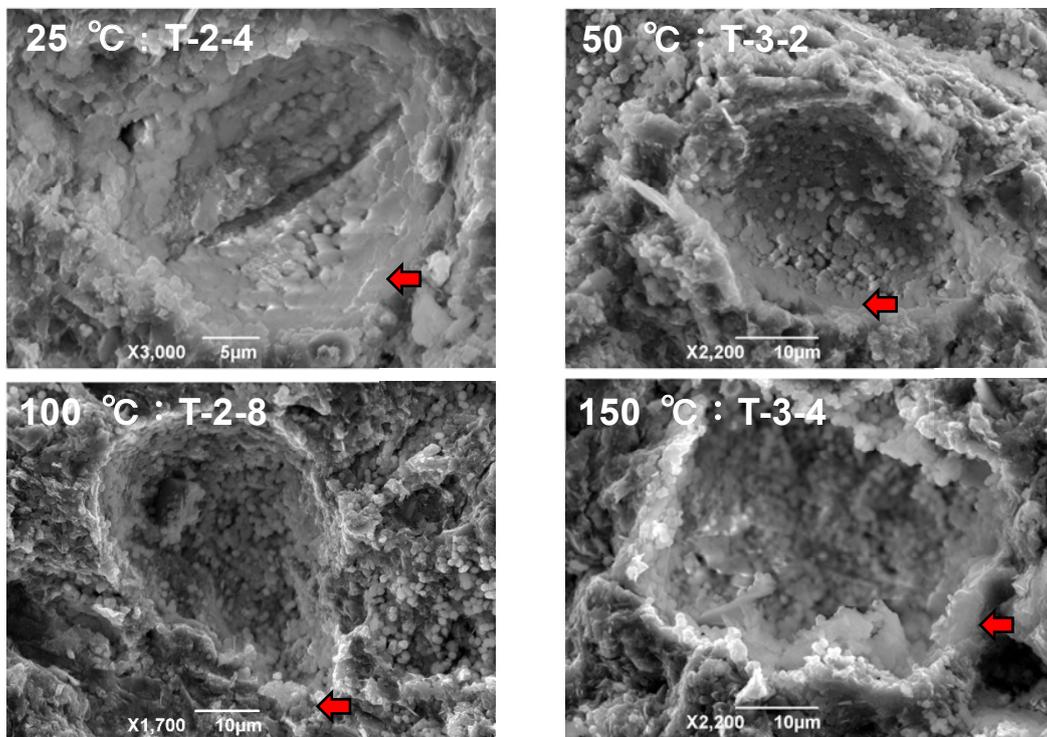


図 3.11 デシケータ乾燥を実施した供試体中のフランボイダルパイライト 赤矢印は、引き伸ばされたような形状に変化したフランボイダルパイライトを示す。

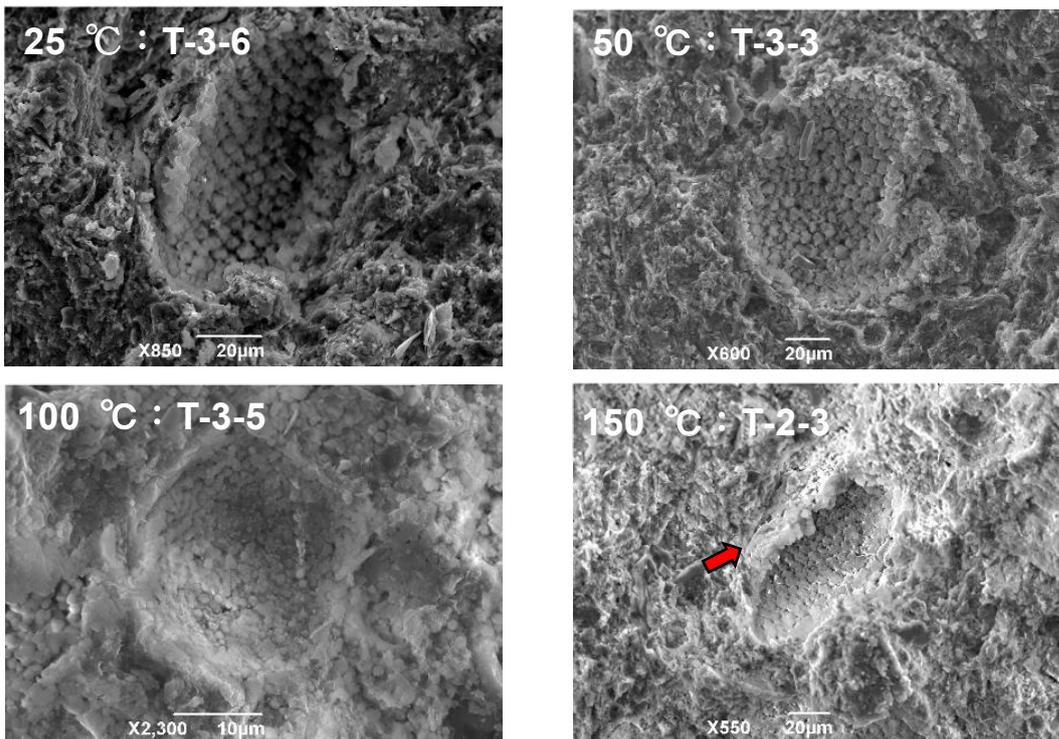


図 3.12 加熱供試体のフランボイダルパイライト
赤矢印は、引き伸ばされたような形状に変化したフランボイダルパイライトを示す。

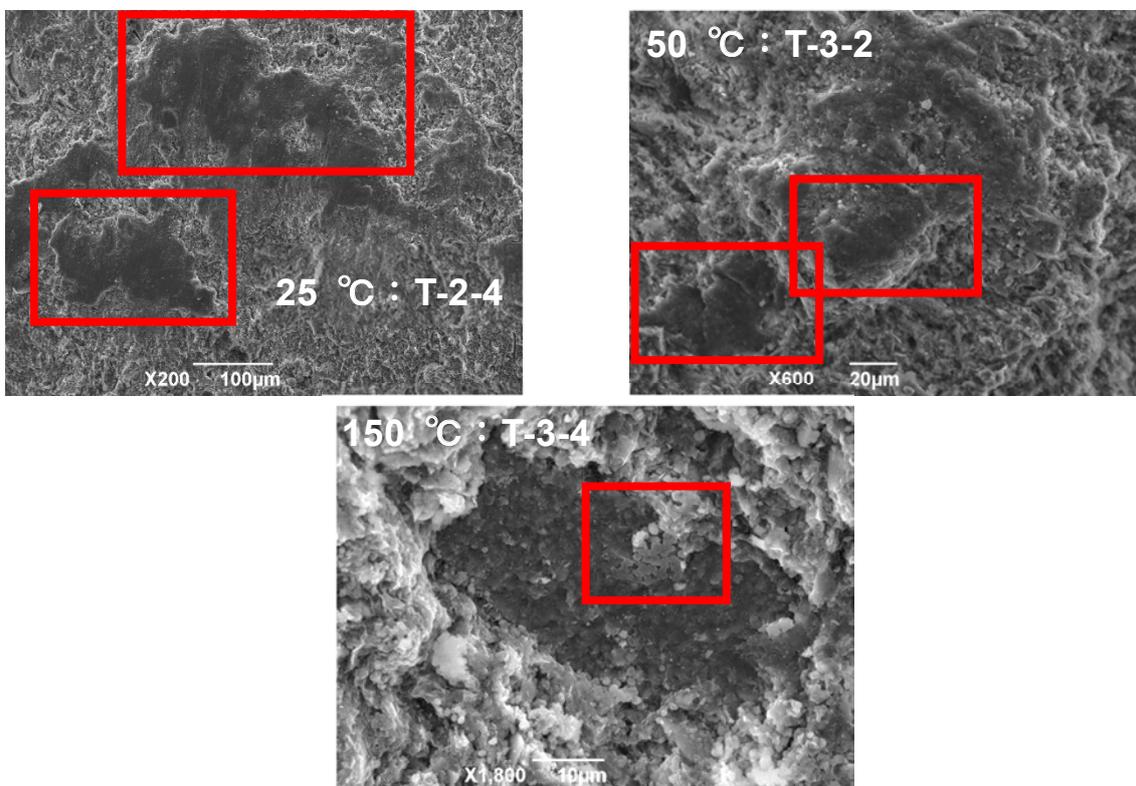


図 3.13 デシケータ乾燥を実施した供試体中の鏡肌
赤線で囲った部分は鏡肌を示す。

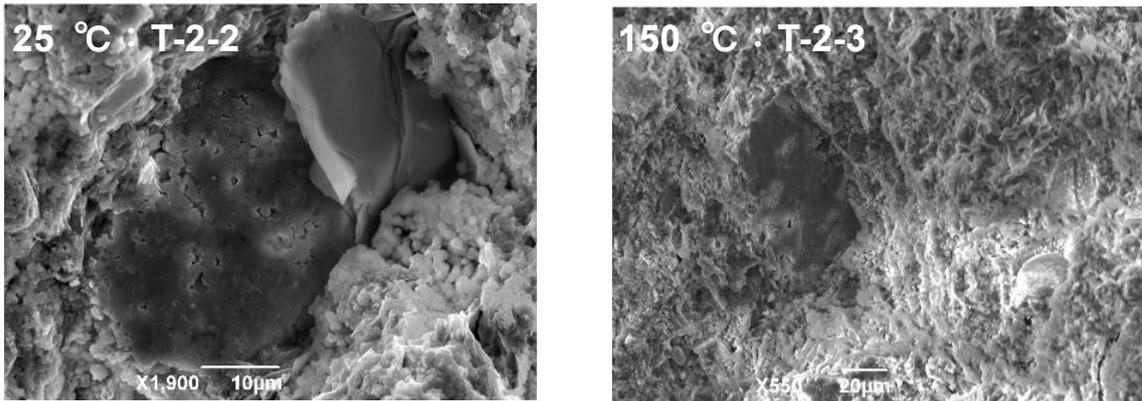


図 3.14 加熱供試体中の鏡肌

表 3.6 試験条件によるフランボイダルパイライトの変形ならびに鏡肌の特徴

| | フランボイダルパイライトの変形 | 鏡肌 |
|---------------|---|--|
| デシケータ乾燥 | <ul style="list-style-type: none"> 温度条件に関わらず穴の縁のフランボイダルパイライトが変形 25°Cおよび50°Cで加熱の場合、穴自体も潰れて変形 | <ul style="list-style-type: none"> 25°C加熱で形成された鏡肌は広い（滑り量約 300 μm） 高温になるほど狭い（150°Cでは滑り量約 20 μm） |
| 非乾燥 (予備加熱) | <ul style="list-style-type: none"> 25°C加熱では穴の縁の変形は少ない 150°C加熱では穴の縁の変形が見られる | <ul style="list-style-type: none"> 温度条件に関わらず鏡肌は少ない |

4. 考察

4.1. 乾燥および加熱による供試体の変化

今回試験に用いた稚内層の珪質泥岩は、デシケータ乾燥および加熱により含水量の減少と収縮が生じた（表 3.1、表 3.2）。加熱のみを実施した場合の含水比の減少率は、加熱温度が 50°C の場合と比べて 100°C 以上で大きくなった（図 3.2）。供試体の温度が 100°C を超えると水分の蒸発が促進されることによると考えられる。

乾燥・加熱により生じる供試体の収縮には異方性が認められ、高さ方向の収縮が直径方向の収縮より大きかった（表 3.2）。既往研究¹³⁾においても、稚内層の珪質泥岩は乾燥により最大 0.9% 程度の収縮が生じること、層理面に垂直な方向の収縮が層理面に平行な方向の収縮よりも大きいことが報告されており、本研究の結果と整合的である。

各供試体の加熱中に確認されたひずみの増加（図 3.6）は、供試体やひずみゲージを貼り付けた接着剤が加熱により膨張したことに由来すると考えられる。一方、温度一定の状態でもひずみが時間とともに減少する理由は不明である。

SEM 観察の結果から、粒子の粒径や空隙形状については乾燥・温度条件の違いによる顕著な差は認められなかった（図 3.10～図 3.14）。また、試料の破壊にともなうフランボイダルパイライトの変形や鏡肌以外の変化、たとえば鉱物の変質などは確認されなかったことから、高温での加熱が岩石中の粒子・鉱物特性に与える影響は小さいと考えられる。

4.2. 高温条件下での堆積岩の強度特性

乾燥状態の試料に対して実施した一軸圧縮試験では、100°C で加熱した場合の試験結果が他の温度での結果よりやや低いものの、加熱温度に依らずおおむね一定の一軸圧縮強さを示した（図 3.7）。また、これらの強度は、デシケータ乾燥を実施していない供試体の 100°C および 150°C での試験結果に近い値となった（図 3.7）。既往研究では、室内ならびにデシケータ内で十分に乾燥させた砂岩および凝灰岩の一軸圧縮強さが 100°C までの加熱でほとんど変化しないという結果¹⁰⁾や、デシケータ内で一週間以上乾燥させた凝灰岩の一軸圧縮強さが最大 300°C までの加熱でほとんど変化しないという結果^{7),21)}が報告されており、幌延の珪質泥岩を対象とした本研究の結果もこれらと整合的である。さらに、乾燥状態の試料に対する一軸圧縮試験結果が同一温度での非乾燥状態の試料に対する試験結果より大きいという結果も、既往研究¹⁰⁾と整合的である。

デシケータ乾燥を実施しない場合、25°C および 50°C の試料の一軸圧縮強さは稚内層の珪質泥岩における既往値¹²⁾と同程度であったが、100°C および 150°C では、一軸圧縮強さが 50°C 以下の場合の 2 倍程度に上昇し既往値¹²⁾を大きく上回った（図 3.8）。この結果は、乾燥後に完全飽和させた砂岩および凝灰岩の一軸圧縮強さが高温になるにつれ低下するという稲田・国土¹⁰⁾の試験結果とは逆の傾向を示す。稲田・国土¹⁰⁾では、温度とともに岩石のひずみが増していることから、岩石中の鉱物粒子の熱膨張によって粒子の結晶構造の変化やマイクロクラックが発生したことが示唆されている。しかし本研究では、温度とひずみの明瞭な関係性は認められないこと（表 3.4）、ならびに試験後の試料に対する SEM 観察結果で空隙形状の変化や鉱物の変

質などが認められなかった（図 3.10～図 3.14）ことから、高温での加熱による岩石の粒子・鉱物特性等の変化は生じていないと考えられる。一方、泥岩・シルト岩・頁岩等の泥質岩では一般的に、含水量の増加にともない一軸圧縮強さが低下する傾向が報告されている^{22),23)}。本研究で対象とした稚内層の珪質泥岩についても、飽和度が 100%から 10%に低下すると一軸圧縮強さが約 2 倍となることが確認されており¹³⁾、この変化の程度は本研究において 100°C以上で実施した試験結果と 50°C以下での試験結果との差（図 3.8）におおむね相当する。さらに上述の通り、乾燥状態の試料の一軸圧縮試験は加熱温度に依らず、乾燥を実施していない供試体の 100°Cおよび 150°Cでの試験結果とおおむね同程度の値となった（図 3.7）。また、変形係数は加熱温度とともに増加し、ポアソン比は加熱温度が上昇するほど低下した。以上のことから、本試験結果は、高温での加熱乾燥により試料の含水量が減少したため強度が増加し、変形しにくくなったと解釈できる。

泥質岩の含水比と強度の関係については以下のように整理される。泥質岩などの低透水性試料（稚内層の珪質泥岩の場合、健岩部の透水係数は $10^{-12} \sim 10^{-11}$ m/s¹²⁾）に対して、本研究で実施したような比較的速いひずみ速度（本研究の場合、0.1%/min）で載荷すると、試料からの排水が生じにくい非排水状態で試験を実施したのと同じような状態となっている²⁴⁾と考えられる。この場合、載荷により岩石試料中の間隙水に高い圧力がかかり間隙水圧が上昇する。含水比が高い岩石試料ほど、これらの現象により間隙水圧が上昇しやすく、そのため一軸圧縮強さが低くなると考えられる。

4.3 高レベル放射性廃棄物の地層処分との関連性

包括的技術報告書²⁾で実施されている廃棄体熱影響の解析評価において、縦置き・ブロック方式の場合には、力学的安定性が担保される最小の処分坑道中心間距離ならびに廃棄体定置間隔を設定した場合、緩衝材中の最高温度は 100°Cを下回るという解析結果が得られている。横置き・PEM方式の場合、深成岩類・先新第三紀堆積岩類の解析結果では、緩衝材中で 100°Cを超える領域が発生しうるが、その最高温度は 105°Cであり、継続期間も数十年程度と短い。したがって、従来の処分概念にもとづき、力学的安定性を確保しながら坑道レイアウト等を定める場合には、処分坑道中心間距離や廃棄体定置間隔を変更しても、母岩中の広範囲が 100°Cを超える状態になる可能性は低いと考えられる。

一方、緩衝材中の温度が 100°Cを超えることを許容した場合、廃棄体の種類や埋設前の保管期間等の条件によっては、緩衝材ならびに周辺岩盤中の温度が 100°Cを上回る可能性も想定される。米国の事例ではあるが、オーバーパック近傍の緩衝材中の温度が 200°Cとなる条件の場合、緩衝材と岩盤との境界付近では 120～160°C、坑道の上部 10 m に位置する岩盤中では 100～120°Cの温度が約 1,000 年継続するという解析結果が報告されている^{25),26)}。また、緩衝材内で生じる温度勾配を低減させるために、グラファイトやグラフェン酸化物などを混合して熱伝導性を高めた緩衝材²⁷⁾の使用も検討されているが、このような緩衝材を利用した場合、坑道周辺岩盤では温度が十分に低下しきらず、処分場の閉鎖後に岩盤内で熱応力が生じる可能性が指摘されている²⁸⁾。さらに、本試験で対象とした稚内層珪質泥岩などの堆積岩の場合、温度の上昇にともなう岩石中の水分量の変化により母岩の強度特性が変化すること、高温条件での加熱

乾燥のみにより最大で 1%程度の異方性を有する収縮が生じることが確認された（表 3.2、図 3.3）。先行研究¹³⁾でも指摘されているように、乾燥収縮によるひずみが掘削での応力再配分に起因するひずみよりも大きい場合、引張破壊が生じて岩盤の強度や透水性を変化させる可能性もあることから、緩衝材中の最高温度が 100℃を超えることを許容する場合、周辺母岩中の温度変化にも十分留意する必要があると考えられる。加えて、母岩中の温度も 100℃を超えることが想定される場合、それにともなう周辺母岩の強度・透水性の変化、熱応力の発生にともなう岩盤内での応力状態の変化や支保コンクリートの力学特性についても、評価や解析を進めていく必要がある。

5. まとめ

北海道・幌延町の珪質泥岩（稚内層）を対象に、100℃を超える高温条件で一軸圧縮試験を実施した。同岩石の一軸圧縮強さは加熱温度とともに上昇した。電子顕微鏡による鉱物観察では加熱温度に依らず空隙構造や鉱物に変質が認められなかったことおよび 100℃以上で加熱した供試体の一軸圧縮強さは試験前にデシケータ乾燥した供試体と同程度であったことから、強度の増加は供試体の乾燥に由来するものと考えられる。

謝 辞

走査型電子顕微鏡による観察は、広島大学大学院先進理工系科学研究科 安東淳一 教授に実施いただいた。この場を借りて御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構, わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性: 地層処分研究開発第2次取りまとめ一分冊2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022, 1999, 703p.
- 2) 原子力発電環境整備機構, 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築—, NUMO-TR-20-03, 2021, 807p.
- 3) Wersin, P., Johnson, L.H., McKinley, I.G., Performance of the bentonite barrier at temperatures beyond 100°C, *Physics and Chemistry of the Earth*, vol.32, Nos. 8-14, 2007, pp.780-788.
- 4) Leupin, O.X., Birgersson, M., Karnland, O., Korkeakoski, P., Sellin, P., Mäder, U., Wersin, P., Montmorillonite stability under near-field conditions, *Nagra Technical Report 14-12*, 2014, 104p.
- 5) Cho, W.J., Kim, G.Y., Reconsideration of thermal criteria for Korean spent fuel repository, *Annals of Nuclear Energy*, vol.88, 2016, pp.73-82.
- 6) Kober, F., Schneeberger, R., Vomvoris, S., Finsterle, S., Lanyon, B., The HotBENT Experiment: objectives, design, emplacement and early transient evolution, *Geoenergy*, vol.1, 2023, 2023-021, 12p.
- 7) 木下直人, 安部透 若林成樹, 石田毅, 高温下岩石の力学特性に関する研究, *土木学会論文集*, no.561, III-38, 1997, pp.151-162.
- 8) Heuze, F.E., High-temperature mechanical, physical and thermal properties of granite rocks – A review, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol.20, no.1, 1983, pp.3-10.
- 9) 北野晃一, 新孝一, 木下直人, 奥野哲夫, 高温下岩石の力学特性, 熱特性および透水特性に関する文献調査, *応用地質*, vol.29, no.3, 1988, pp.242-253.
- 10) 稲田善紀, 国土新彦, 高温および低温が岩石の圧縮破壊特性に及ぼす影響, *材料*, vol.41, no.463, 1992, pp.410-416.
- 11) 岡田哲実, 高温環境下における堆積軟岩の力学特性 (その1) —三軸圧縮試験による温度依存性の把握—, *電力中央研究所報告*, N04026, 2005, 26p.
- 12) 真田祐幸, 丹生屋純夫, 松井裕哉, 藤井義明, 堆積履歴が幌延地域に分布する珪質岩の力学特性や微視的構造変化に及ぼす影響, *Journal of MMIJ*, vol.125, 2009, pp.521-529.
- 13) 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*, vol.21, no.2, 2014, pp.75-82.
- 14) 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資産管理センター, 令和2年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業: 地層処分施設閉鎖技術確証試験報告書, 2021, 569p.

- 15) 地盤工学会, 岩石の一軸圧縮試験方法, JGS 2521-2020, pp.892-899.
- 16) 地盤工学会, 岩石の密度試験方法, JGS 2132-2020, pp.210-218.
- 17) 地盤工学会, 岩石の含水比試験方法, JGS 2134-2020, pp.125-130.
- 18) 地盤工学会, 岩石の弾性波速度計測方法, JGS 2564-2020, pp.1003-1019.
- 19) 大藤弘明, フランボイダルパイライト—天然における鉱物の不思議な自己組織化作用—, 日本結晶学会誌, vol.53, 2011, pp.46-51.
- 20) Mochizuki, A., Ishii, E., Miyakawa, K., Sasamoto, H., Mudstone redox conditions at the Horonobe Underground Research Laboratory, Hokkaido, Japan: Effects of drift excavation, *Engineering Geology*, vol.267, 2020, 105496.
- 21) 酒井昇, 一軸圧縮下における加熱岩石の力学的挙動, 応用地質, vol.28, no.1, 1987, pp.19-24.
- 22) 田中芳則, 泥質岩の含水による強度変化, 応用地質, vol.9, no.2, 1968, pp.82-93.
- 23) 磯杏奈, 森井俊広, 乾湿繰り返し作用を受ける泥岩の強度特性, 新潟大学農学部研究報告, vol.56, no.2, 2004, pp.119-127.
- 24) 増田幸治, 佐藤隆司, 西澤修, 岩石の変形・破壊過程における水の役割—実験的研究—, 地質調査所月報, vol.48, no.8, 1997, pp.475-485.
- 25) Zheng, L., Rutqvist, J., Birkholzer, J.T., Liu H.H., On the impact of temperatures up to 200°C in clay repositories with bentonite engineer barrier systems: A study with coupled thermal, hydrological, chemical, and mechanical modelling, *Engineering Geology*, vol.197, 2015, pp.278-295.
- 26) Zheng, L., Rutqvist, J., Xu, H., Birkholzer, J.T., Coupled THMC models for bentonite in an argillite repository for nuclear wastes; Illitization and its effect on swelling stress under high temperature, *Engineering Geology*, vol.230, 2017, pp.118-129.
- 27) Chen, Y.G., Liu, X.M., Mu, X., Ye, W.M., Cui, Y.J., Chen, B., Wu, D.B., Thermal conductivity of compacted GO-GMZ bentonite used as buffer material for a high-level radioactive waste repository, *Advances in Civil Engineering*, 2018, 9530813.
- 28) Rutqvist, J., Thermal management associated with geologic disposal of large spent nuclear fuel canisters in tunnels with thermally engineered backfill, *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol.102, 2020, 103454.

This is a blank page.

付録 1

試験に使用した供試体写真

This is a blank page.



T-2-4 乾燥状態 25°C
表 試験後



T-2-4 乾燥状態 25°C
裏 試験後



T-3-2 乾燥状態 50°C
表 試験前



T-3-2 乾燥状態 50°C
裏 試験前



T-3-2 乾燥状態 50°C
表 試験前 乾燥後



T-3-2 乾燥状態 50°C
裏 試験前 乾燥後



T-3-2 乾燥状態 50°C
表 試験後



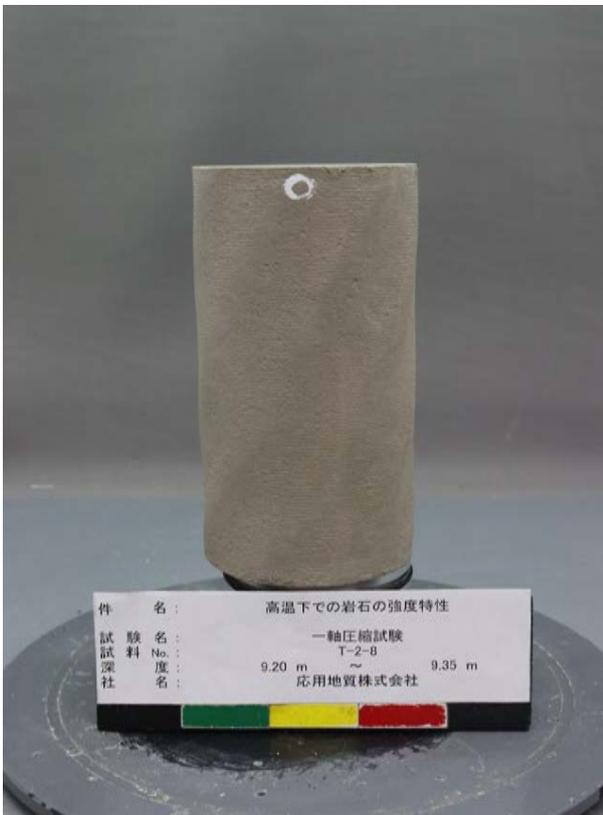
T-3-2 乾燥状態 50°C
裏 試験後



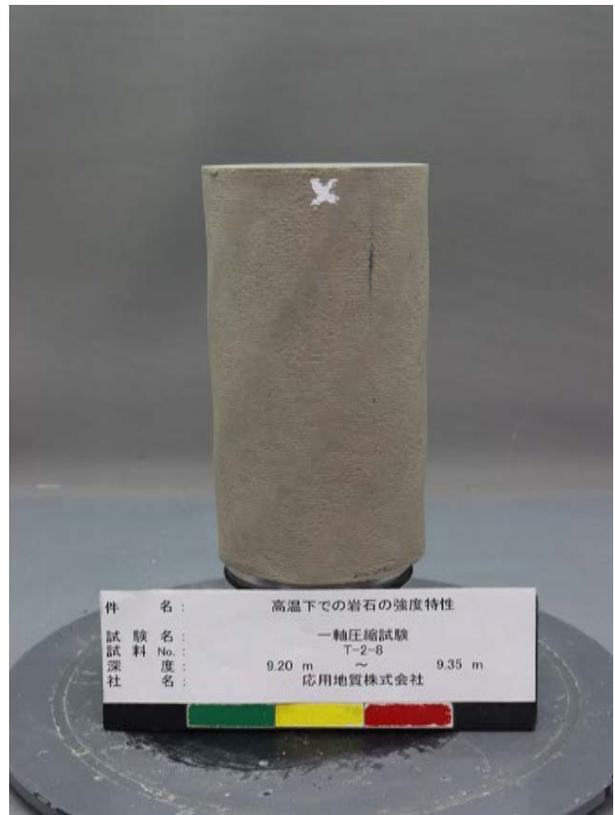
T-2-8 乾燥状態 100°C
表 試験前



T-2-8 乾燥状態 100°C
裏 試験前



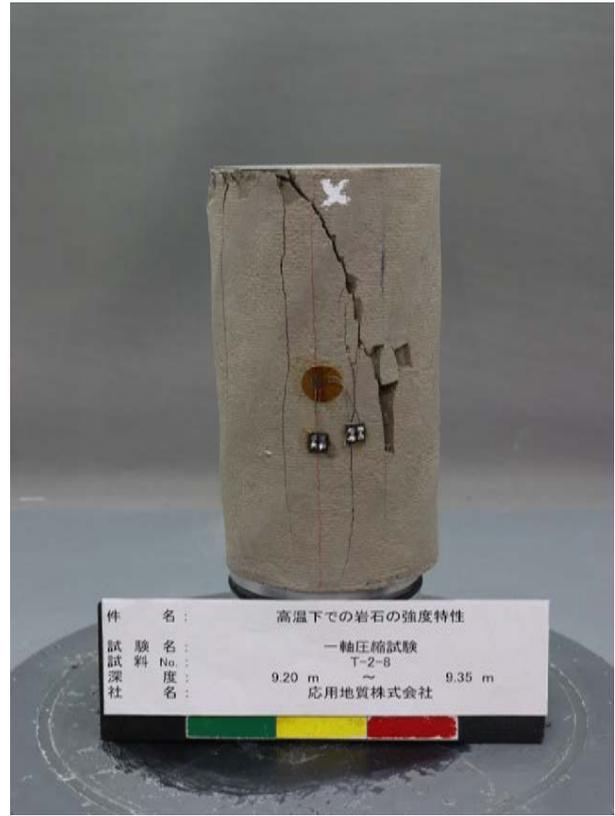
T-2-8 乾燥状態 100°C
表 試験前 乾燥後



T-2-8 乾燥状態 100°C
裏 試験前 乾燥後



T-2-8 乾燥状態 100°C
表 試験後



T-2-8 乾燥状態 100°C
裏 試験後



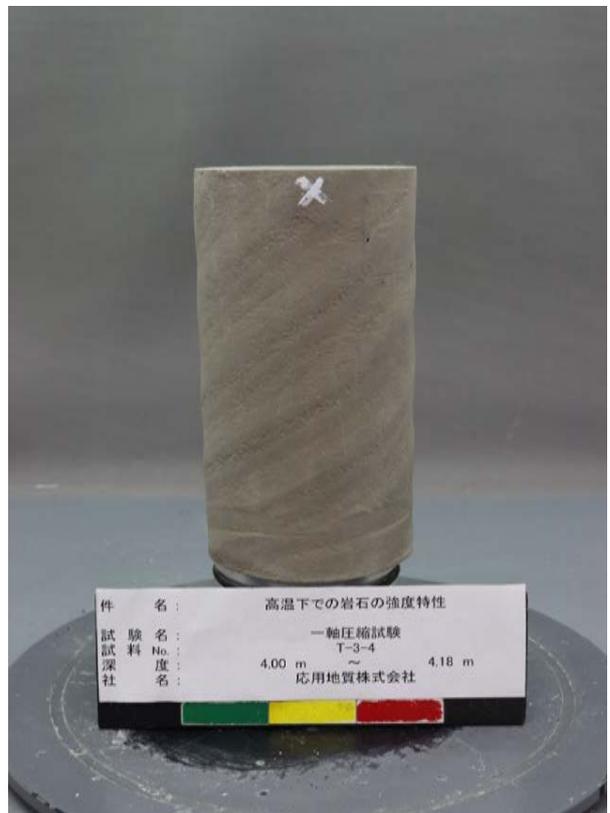
T-3-4 乾燥状態 150°C
表 試験前



T-3-4 乾燥状態 150°C
裏 試験前



T-3-4 乾燥状態 150°C
表 試験前 乾燥後



T-3-4 乾燥状態 150°C
裏 試験前 乾燥後



T-3-4 乾燥状態 150°C
表 試験後



T-3-4 乾燥状態 150°C
裏 試験後



T-1-1 湿潤状態 25°C①
表 試験前



T-1-1 湿潤状態 25°C①
裏 試験前



T-1-1 湿潤状態 25°C①
表 試験後



T-1-1 湿潤状態 25°C①
裏 試験後



T-2-2 湿潤状態 25°C②
表 試験前



T-2-2 湿潤状態 25°C②
裏 試験前



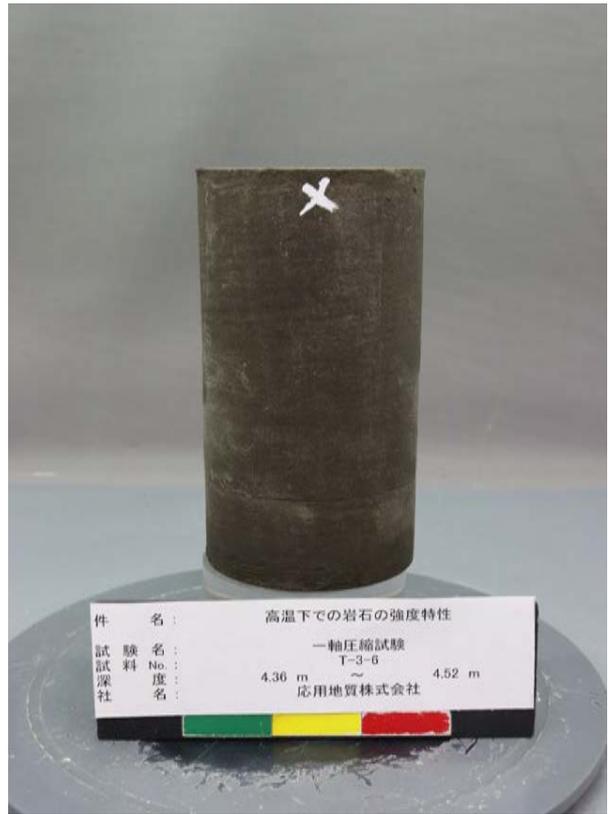
T-2-2 湿潤状態 25°C②
表 試験後



T-2-2 湿潤状態 25°C②
裏 試験後



T-3-6 湿潤状態 25°C③
表 試験前



T-3-6 湿潤状態 25°C③
裏 試験前



T-3-6 湿潤状態 25°C③
表 試験後



T-3-6 湿潤状態 25°C③
裏 試験後



T-2-5 湿潤状態 50°C①
表 試験前



T-2-5 湿潤状態 50°C①
裏 試験前



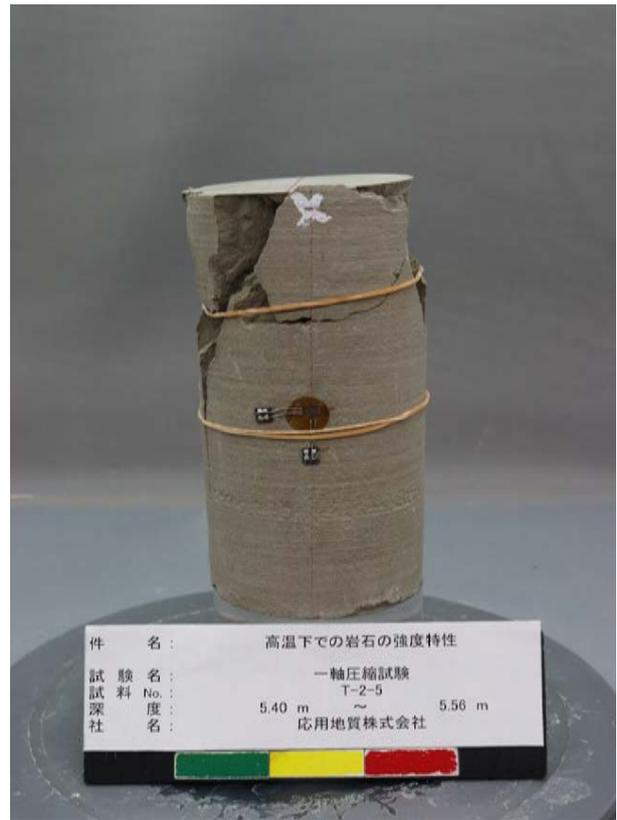
T-2-5 湿潤状態 50°C①
表 試験前 加熱後



T-2-5 湿潤状態 50°C①
裏 試験前 加熱後



T-2-5 湿潤状態 50°C①
表 試験後



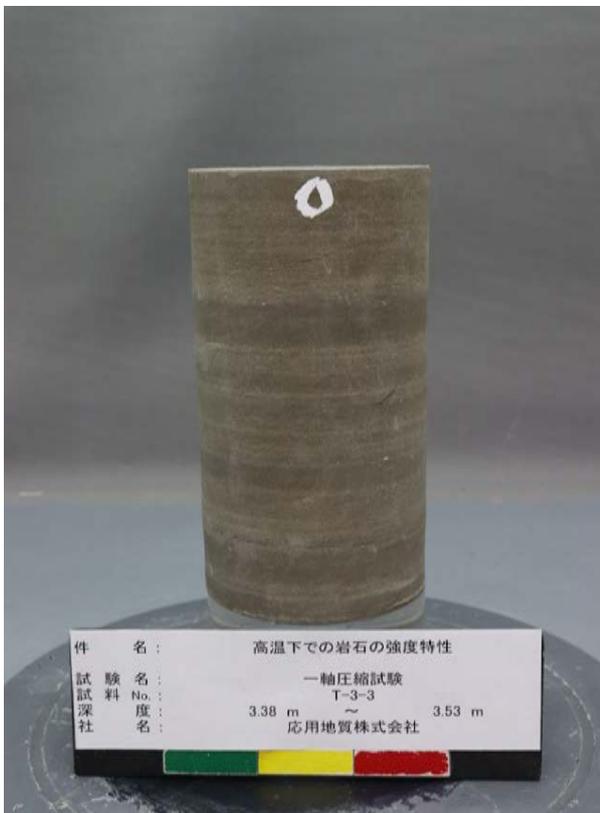
T-2-5 湿潤状態 50°C①
裏 試験後



T-3-3 湿潤状態 50°C②
表 試験前



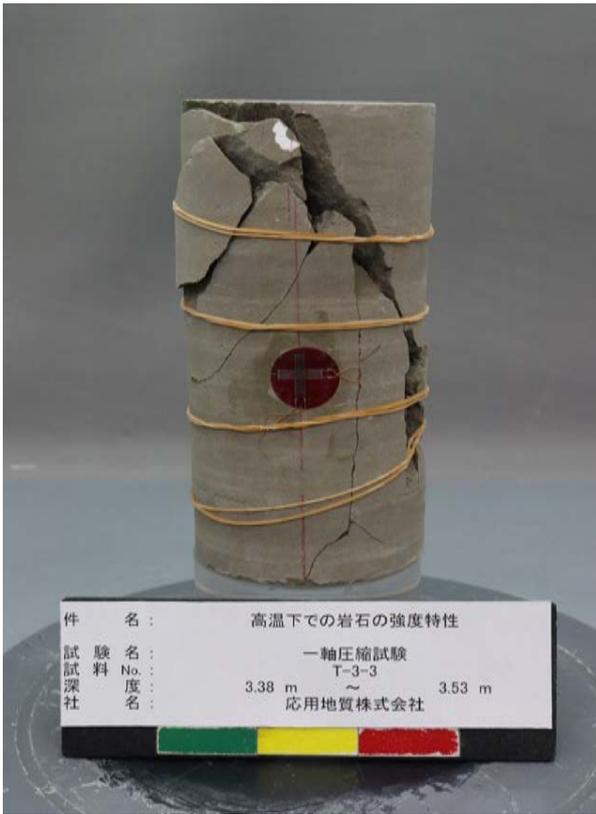
T-3-3 湿潤状態 50°C②
裏 試験前



T-3-3 湿潤状態 50°C②
表 試験前 加熱後



T-3-3 湿潤状態 50°C②
裏 試験前 加熱後



T-3-3 湿潤状態 50°C②
表 試験後



T-3-3 湿潤状態 50°C②
裏 試験後



T-3-9 湿潤状態 50°C③
表 試験前



T-3-9 湿潤状態 50°C③
裏 試験前



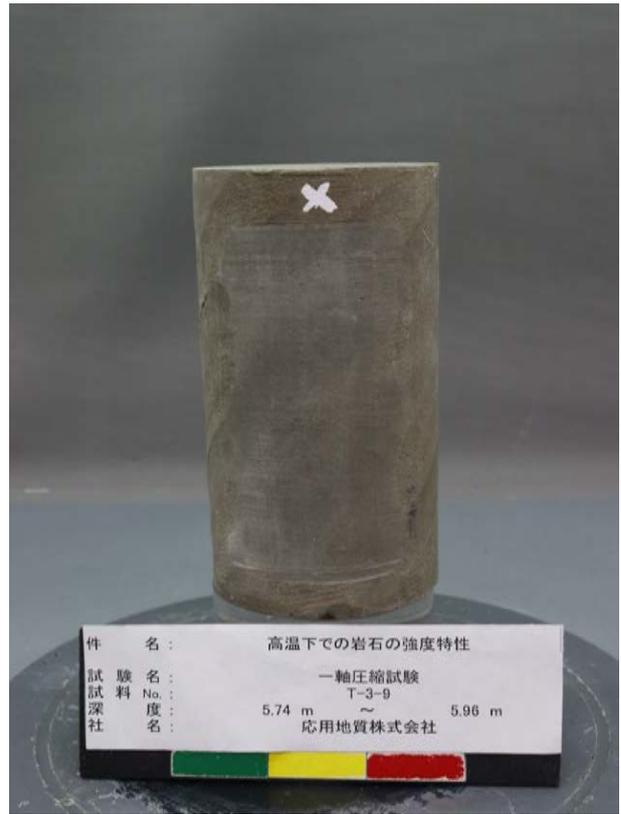
T-3-9 湿潤状態 50°C③
表 試験前 表面処理後



T-3-9 湿潤状態 50°C③
裏 試験前 表面処理後



T-3-9 湿潤状態 50°C③
表 試験前 加熱後



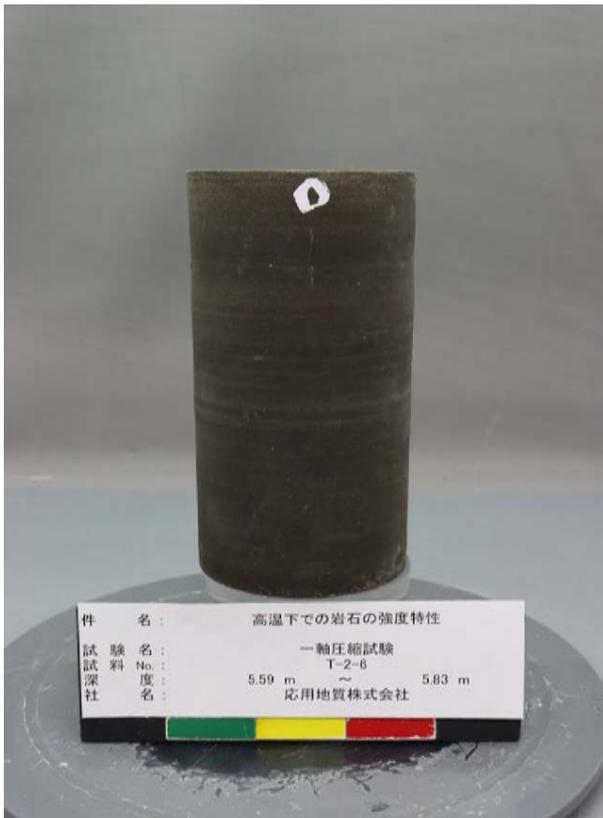
T-3-9 湿潤状態 50°C③
裏 試験前 加熱後



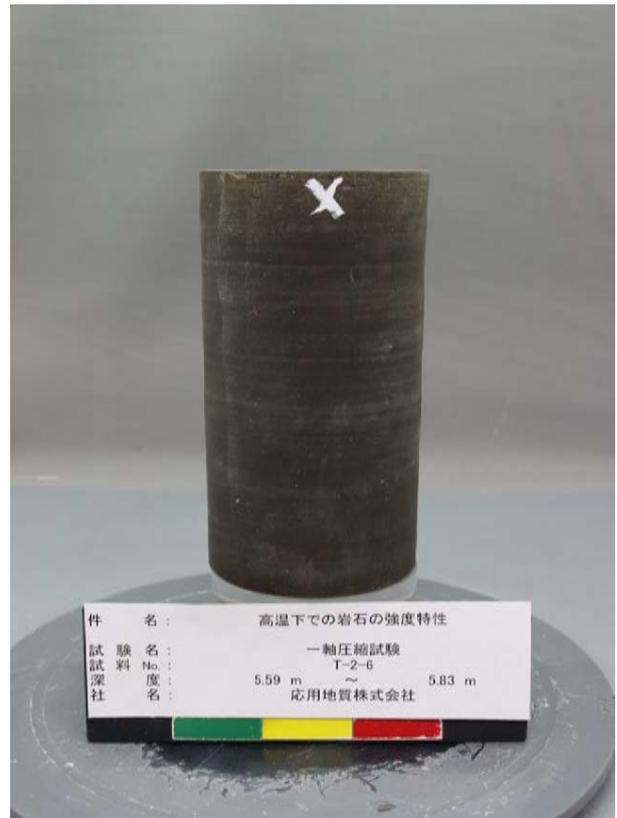
T-3-9 湿潤状態 50°C③
表 試験後



T-3-9 湿潤状態 50°C③
裏 試験後



T-2-6 湿潤状態 100°C①
表 試験前



T-2-6 湿潤状態 100°C①
裏 試験前



T-2-6 湿潤状態 100°C①
表 試験前 加熱後



T-2-6 湿潤状態 100°C①
裏 試験前 加熱後



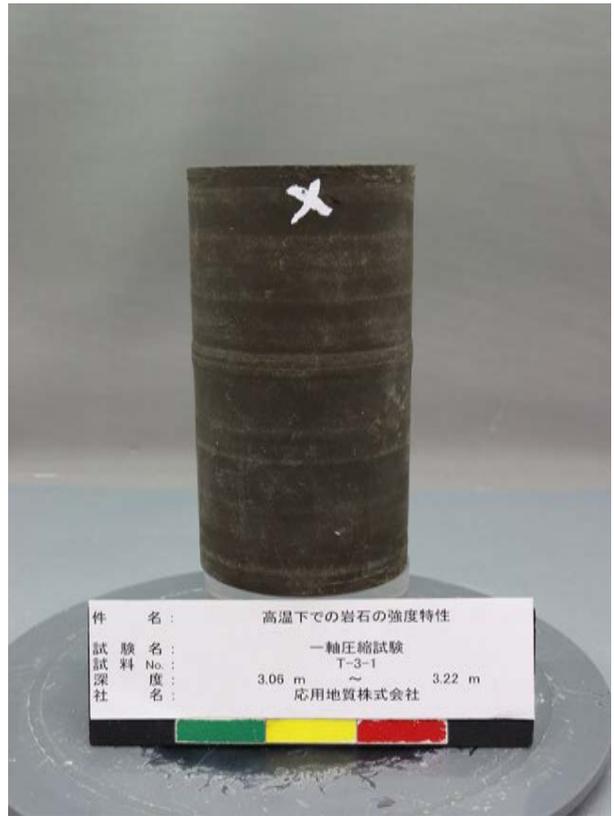
T-2-6 湿潤状態 100°C①
表 試験後



T-2-6 湿潤状態 100°C①
裏 試験後



T-3-1 湿潤状態 100°C②
表 試験前



T-3-1 湿潤状態 100°C②
裏 試験前



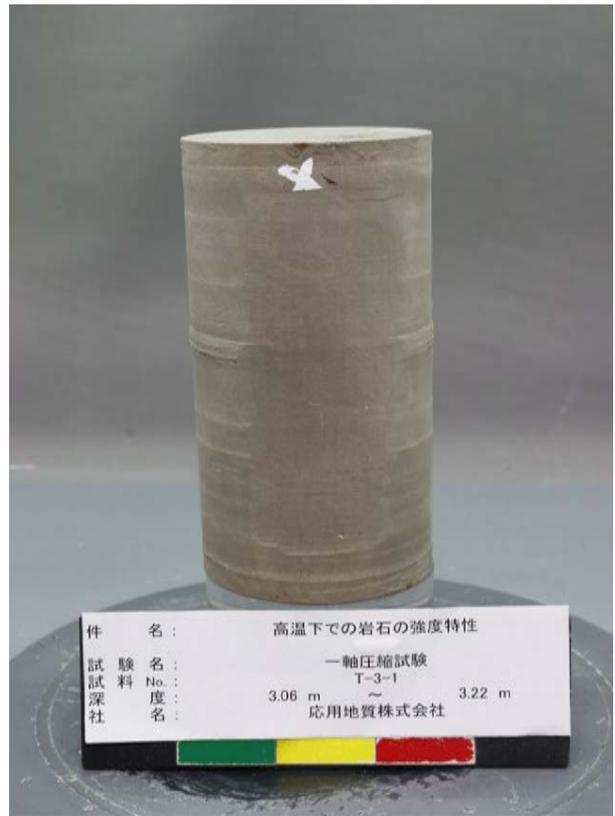
T-3-1 湿潤状態 100°C②
表 試験前 表面処理後



T-3-1 湿潤状態 100°C②
裏 試験前 表面処理後



T-3-1 湿潤状態 100°C②
表 試験前 加熱後



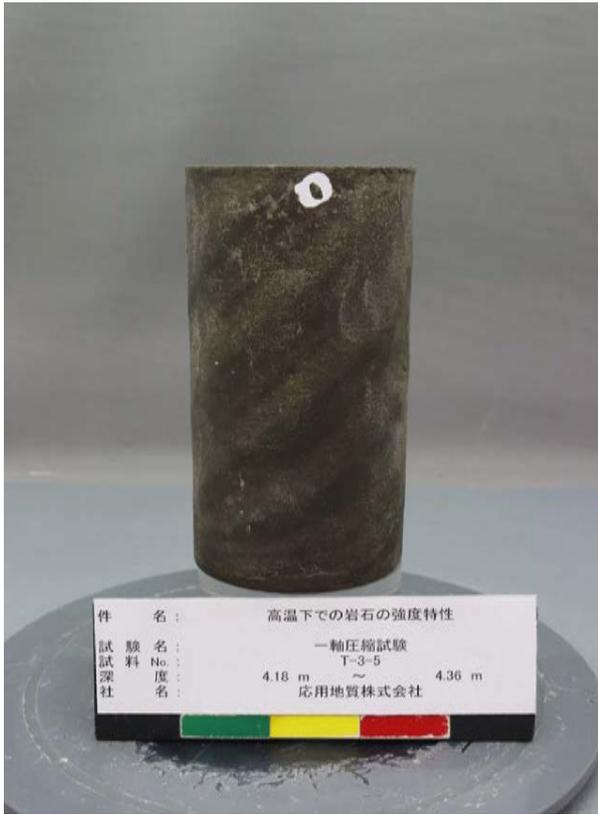
T-3-1 湿潤状態 100°C②
裏 試験前 加熱後



T-3-1 湿潤状態 100°C②
表 試験後



T-3-1 湿潤状態 100°C②
裏 試験後



T-3-5 湿潤状態 100°C③
表 試験前



T-3-5 湿潤状態 100°C③
裏 試験前



T-3-5 湿潤状態 100°C③
表 試験前 表面処理後



T-3-5 湿潤状態 100°C③
裏 試験前 表面処理後



T-3-5 湿潤状態 100°C③
表 試験前 加熱後



T-3-5 湿潤状態 100°C③
裏 試験前 加熱後



T-3-5 湿潤状態 100°C③
表 試験後



T-3-5 湿潤状態 100°C③
裏 試験後



T-2-3 湿潤状態 150°C①
表 試験前



T-2-3 湿潤状態 150°C①
裏 試験前



T-2-3 湿潤状態 150°C①
表 試験前 表面処理後



T-2-3 湿潤状態 150°C①
裏 試験前 表面処理後



T-2-3 湿潤状態 150°C①
表 試験前 加熱後



T-2-3 湿潤状態 150°C①
裏 試験前 加熱後



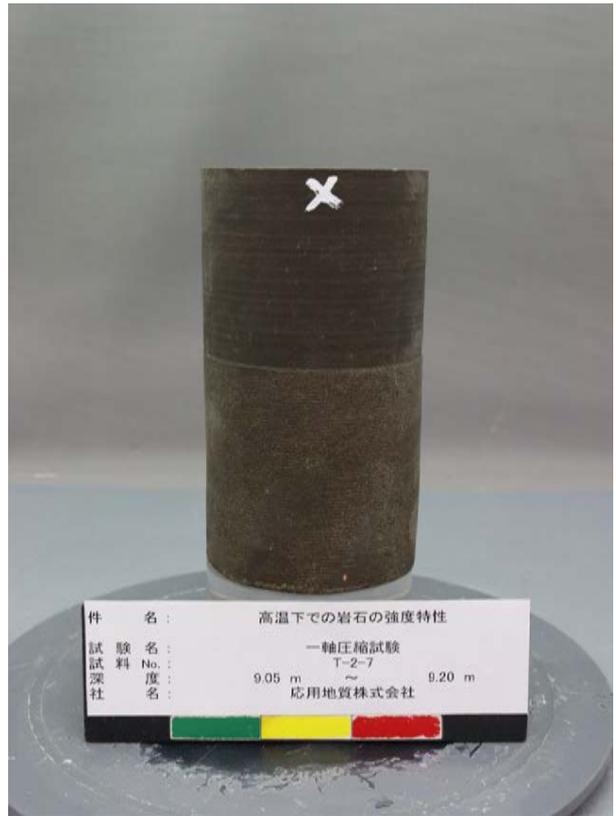
T-2-3 湿潤状態 150°C①
表 試験後



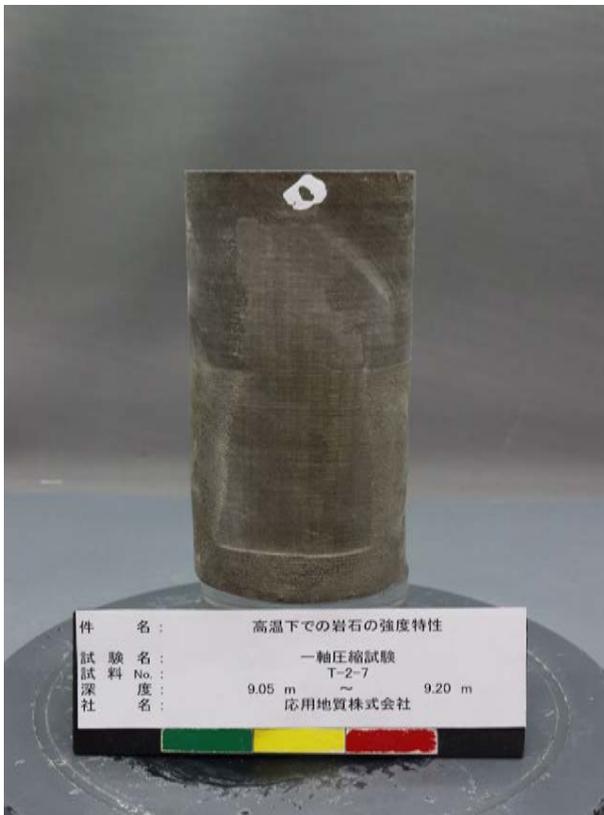
T-2-3 湿潤状態 150°C①
裏 試験後



T-2-7 湿潤状態 150°C②
表 試験前



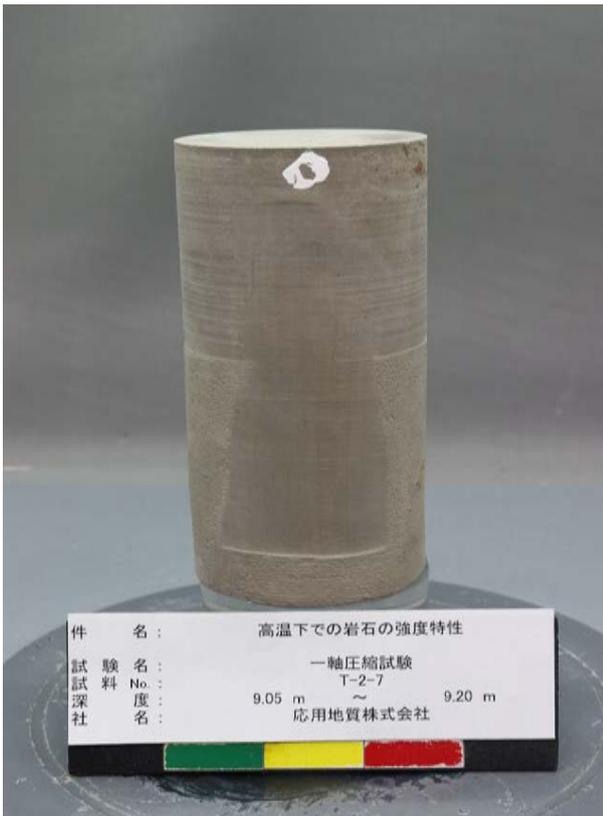
T-2-7 湿潤状態 150°C②
裏 試験前



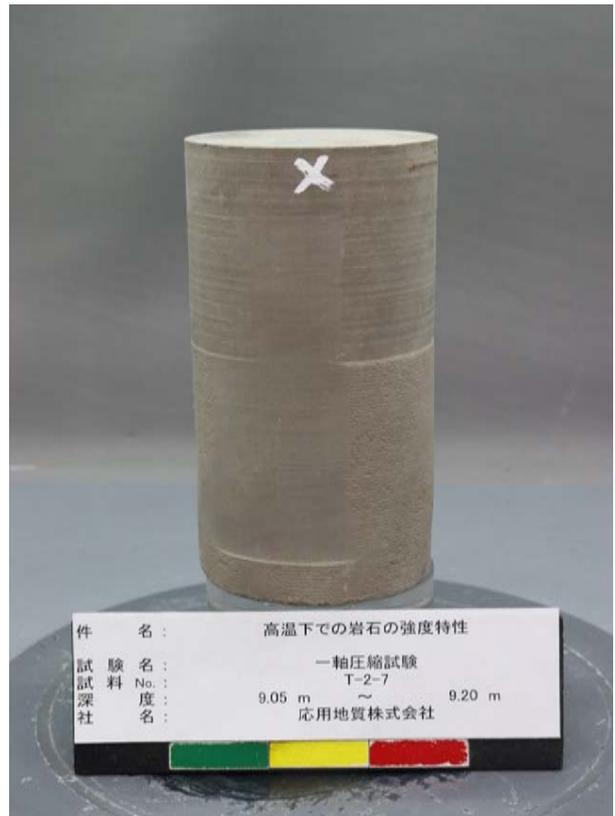
T-2-7 湿潤状態 150°C②
表 試験前 表面処理後



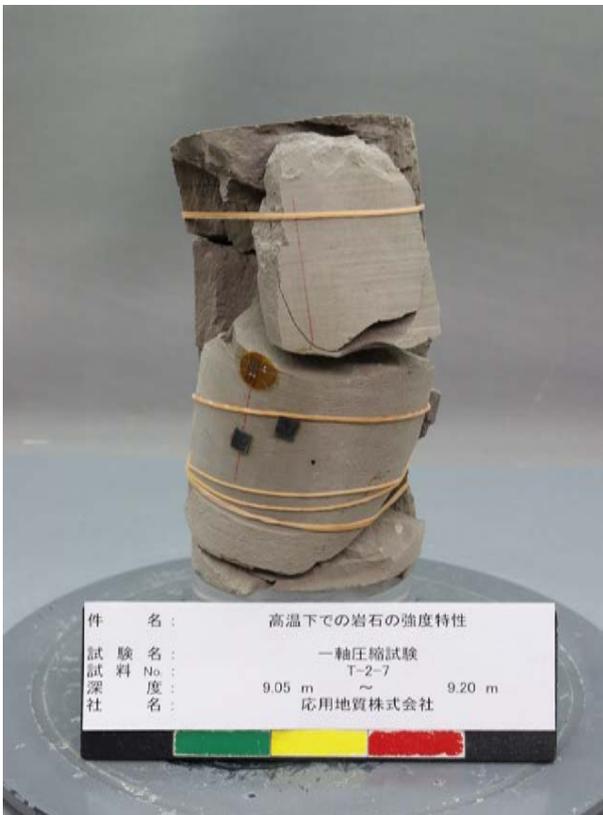
T-2-7 湿潤状態 150°C②
裏 試験前 表面処理後



T-2-7 湿潤状態 150°C②
表 試験前 加熱後



T-2-7 湿潤状態 150°C②
裏 試験前 加熱後



T-2-7 湿潤状態 150°C②
表 試験後



T-2-7 湿潤状態 150°C②
裏 試験後



T-3-8 湿潤状態 150°C③
表 試験前



T-3-8 湿潤状態 150°C③
裏 試験前



T-3-8 湿潤状態 150°C③
表 試験前 加熱後



T-3-8 湿潤状態 150°C③
裏 試験前 加熱後



T-3-8 湿潤状態 150°C③
表 試験後



T-3-8 湿潤状態 150°C③
裏 試験後

This is a blank page.

付録 2

応力-ひずみ線図

注：応力-ひずみ線図におけるひずみは、圧縮方向を正、引張方向を負とする。

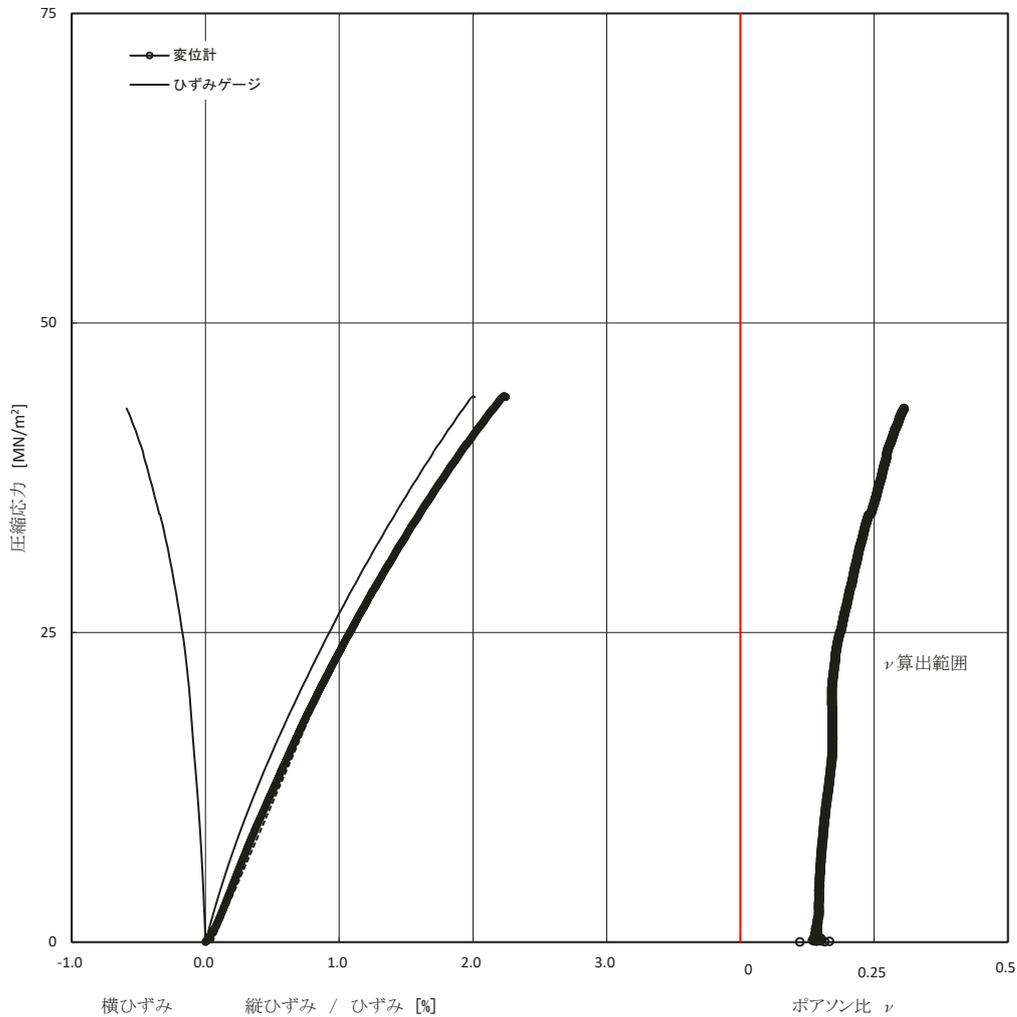
This is a blank page.

| | |
|---------------|-----------|
| JGS 2521-2020 | 岩石の一軸圧縮試験 |
|---------------|-----------|

件名： 高温下での岩石の強度特性試験

試験日： 2022年1月19日
 試験者： 細田 光一
 試料番号(深度)： T-2-4(25°C) (5.24m ~ 5.40m)

| | | | | | |
|-------------|-----|-----------------------------------|--------|--------------|------------------------|
| 岩種 | | 供試体番号 | 1 | | |
| 採取方法 | | 供試体形状 | 円柱状 | | |
| 供試体作成方法 | | 高さ H_0 mm | 129.37 | | |
| ひずみ速度 %/min | 0.1 | 直径 D_0 mm | 63.68 | | |
| | | 質量 m g | 580.93 | | |
| | | 湿潤密度 ρ_t Mg/m ³ | 1.410 | | |
| | | 含水比 w % | 3.1 | | |
| | | 圧縮強さ q_u MN/m ² | 44.1 | ひずみゲージ | |
| | | 破壊ひずみ ϵ_f % | 2.18 | ϵ_f | 2.00 % |
| | | 変形係数 $E_{s,50}$ MN/m ² | 2360 | $E_{s,50}$ | 2800 MN/m ² |
| | | | | ポアソン比 ν | 0.176 |



供試体の破壊状況

No.1



備考:

変位計原点補正 0.051%

| | |
|---------------|-----------|
| JGS 2521-2020 | 岩石の一軸圧縮試験 |
|---------------|-----------|

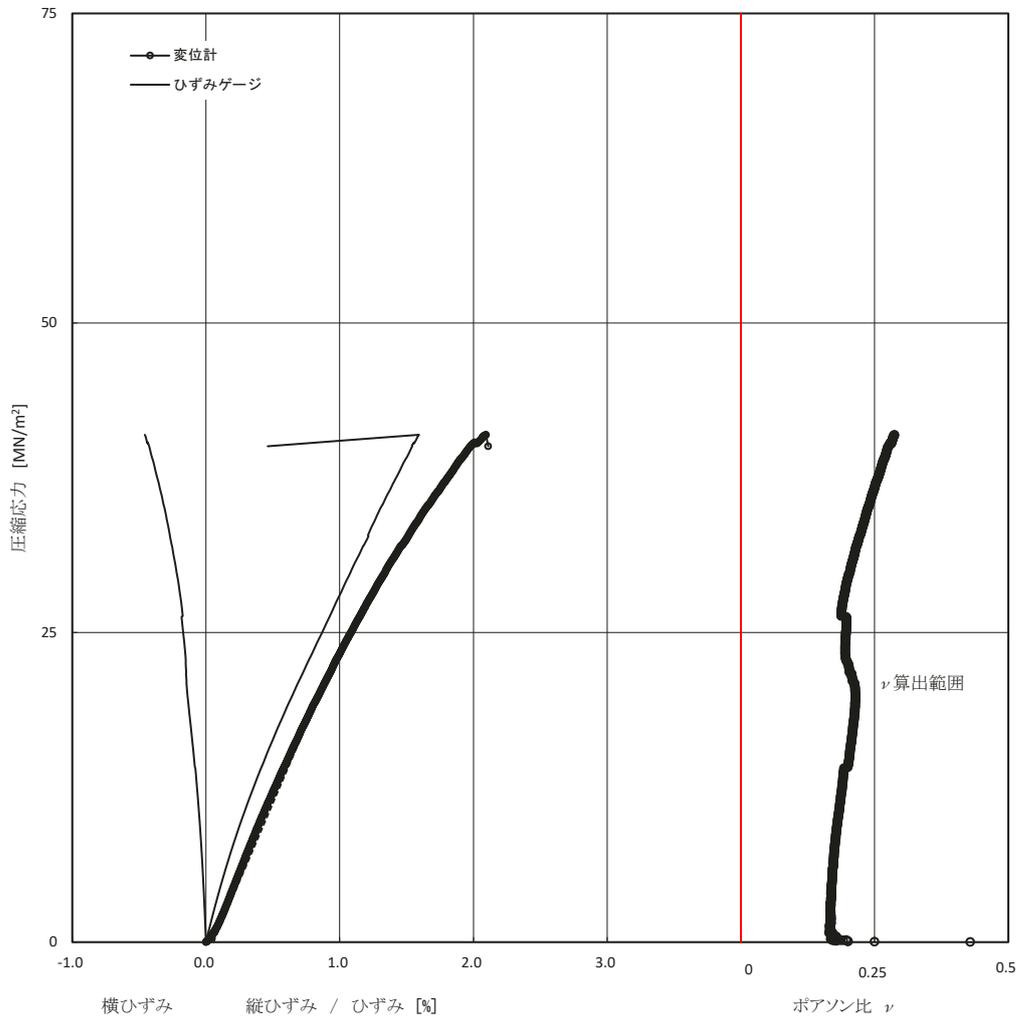
件名： 高温下での岩石の強度特性試験

試験日： 2022年1月19日

試料番号(深度)： T-3-2(50°C加熱後) (3.22m ~ 3.38m)

試験者： 細田 光一

| | | | | | | |
|-------------|-----|-----------------------------------|--------|--------------|-------|-------------------|
| 岩種 | | 供試体番号 | 1 | | | |
| 採取方法 | | 供試体形状 | 円柱状 | | | |
| 供試体作成方法 | | 高さ H_0 mm | 129.15 | | | |
| ひずみ速度 %/min | 0.1 | 直径 D_0 mm | 63.26 | | | |
| | | 質量 m g | 594.29 | | | |
| | | 湿潤密度 ρ_t Mg/m ³ | 1.484 | | | |
| | | 含水比 w % | 3.4 | | | |
| | | 圧縮強さ q_u MN/m ² | 41.0 | ひずみゲージ | | |
| | | 破壊ひずみ ϵ_f % | 2.04 | ϵ_f | 1.59 | % |
| | | 変形係数 $E_{s,50}$ MN/m ² | 2360 | $E_{s,50}$ | 3060 | MN/m ² |
| | | | | ポアソン比 ν | 0.211 | |



供試体の破壊状況

No.1



備考:

変位計原点補正 0.056%

| | |
|---------------|-----------|
| JGS 2521-2020 | 岩石の一軸圧縮試験 |
|---------------|-----------|

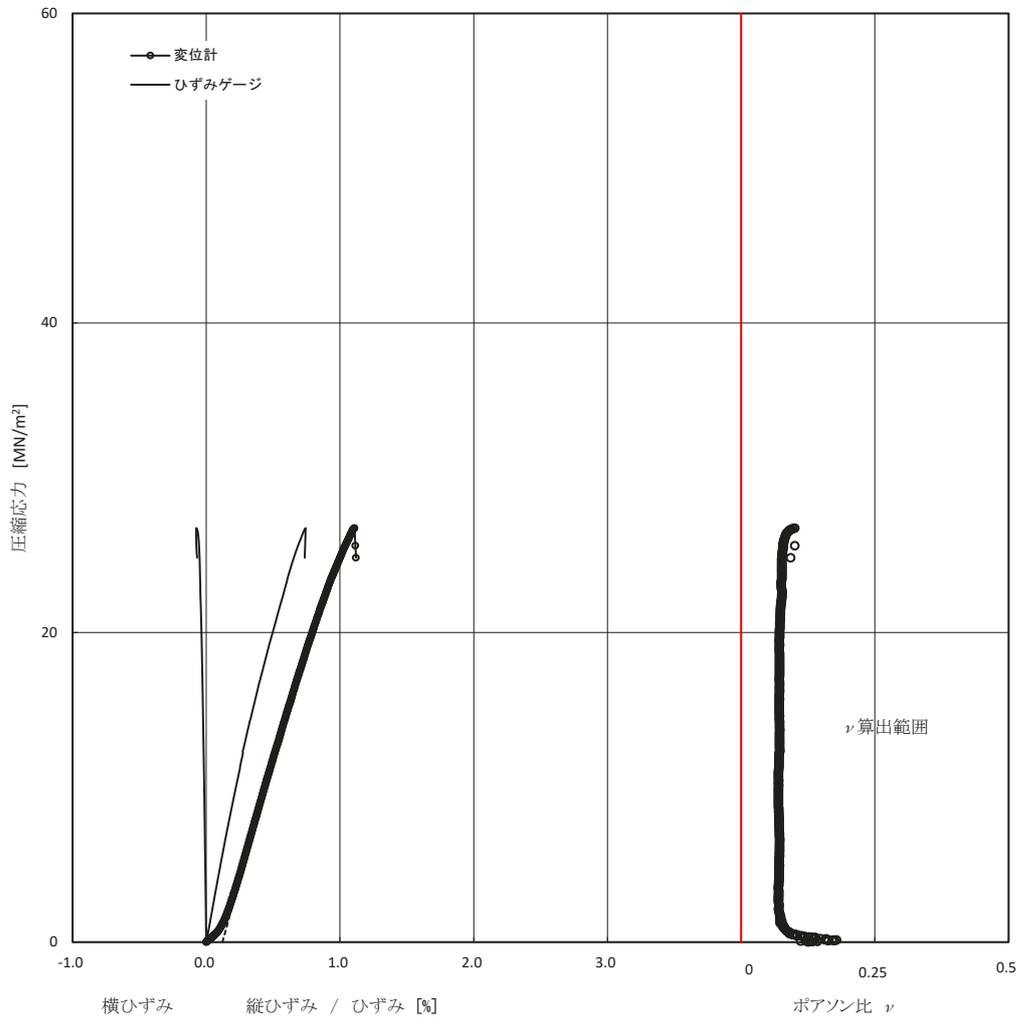
件名： 高温下での岩石の強度特性試験

試験日： 2022年1月18日

試料番号(深度)： T-2-8(100°C加熱後) (9.20m ~ 9.35m)

試験者： 細田 光一

| | | | | | |
|-------------|-----|-----------------------------------|--------|--------------|------------------------|
| 岩種 | | 供試体番号 | 1 | | |
| 採取方法 | | 供試体形状 | 円柱状 | | |
| 供試体作成方法 | | 高さ H_0 mm | 129.27 | | |
| ひずみ速度 %/min | 0.1 | 直径 D_0 mm | 64.03 | | |
| | | 質量 m g | 602.59 | | |
| | | 湿潤密度 ρ_t Mg/m ³ | 1.448 | | |
| | | 含水比 w % | 2.9 | | |
| | | 圧縮強さ q_u MN/m ² | 26.8 | ひずみゲージ | |
| | | 破壊ひずみ ϵ_f % | 0.99 | ϵ_f | 0.74 % |
| | | 変形係数 $E_{s,50}$ MN/m ² | 2410 | $E_{s,50}$ | 4440 MN/m ² |
| | | | | ポアソン比 ν | 0.072 |



備考：
変位計原点補正 0.121%

| | |
|---------------|-----------|
| JGS 2521-2020 | 岩石の一軸圧縮試験 |
|---------------|-----------|

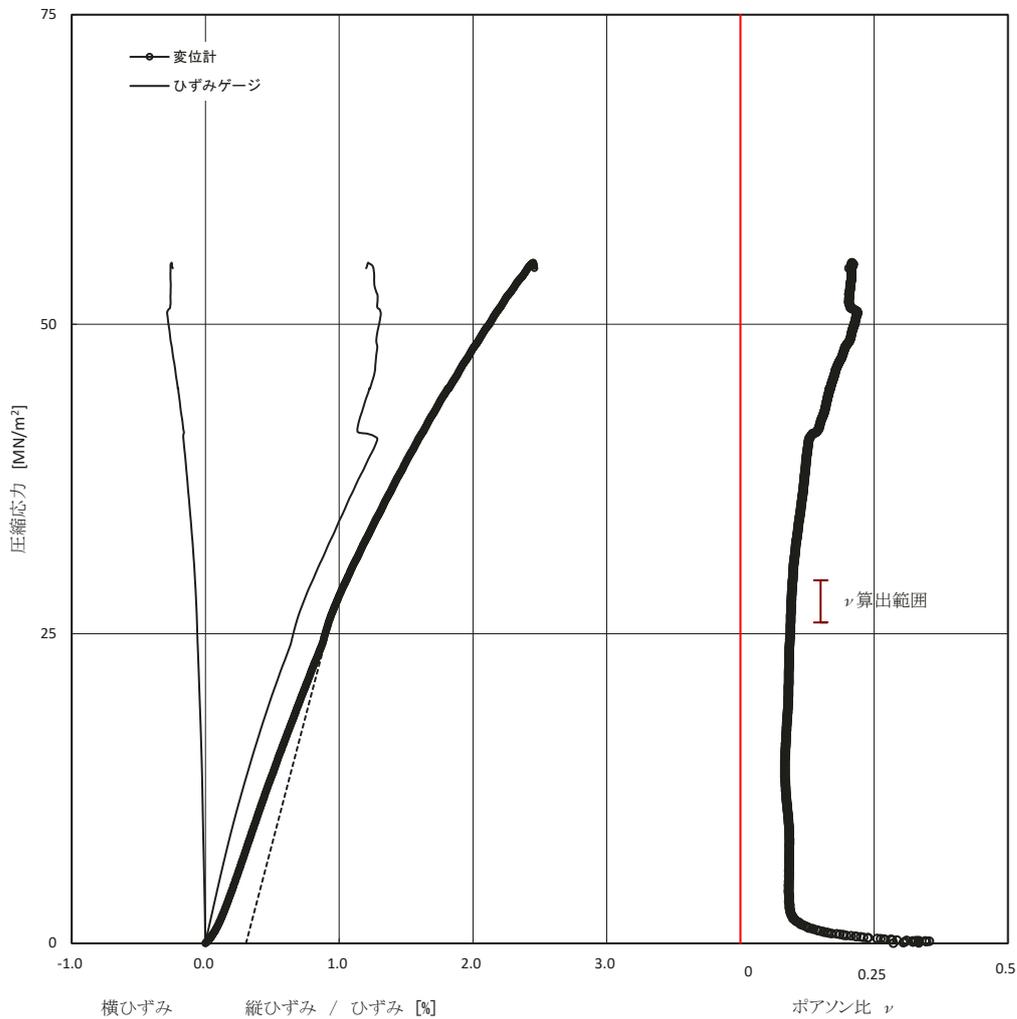
件名： 高温下での岩石の強度特性試験

試験日： 2022年1月18日

試験者： 細田 光一

試料番号(深度)： T-3-4(150°C加熱後) (4.00m ~ 4.18m)

| | | | | | |
|-------------|-----|-----------------------------------|--------|--------------|------------------------|
| 岩種 | | 供試体番号 | 1 | | |
| 採取方法 | | 供試体形状 | 円柱状 | | |
| 供試体作成方法 | | 高さ H_0 mm | 128.82 | | |
| ひずみ速度 %/min | 0.1 | 直径 D_0 mm | 64.01 | | |
| | | 質量 m g | 615.24 | | |
| | | 湿潤密度 ρ_t Mg/m ³ | 1.484 | | |
| | | 含水比 w % | 3.4 | | |
| | | 圧縮強さ q_u MN/m ² | 55.0 | ひずみゲージ | |
| | | 破壊ひずみ ϵ_f % | 2.15 | ϵ_f | 1.22 % |
| | | 変形係数 $E_{s,50}$ MN/m ² | 2810 | $E_{s,50}$ | 3770 MN/m ² |
| | | | | ポアソン比 ν | 0.096 |



供試体の破壊状況

No.1



備考:

変位計原点補正 0.303%

| | |
|---------------|-----------|
| JGS 2521-2020 | 岩石の一軸圧縮試験 |
|---------------|-----------|

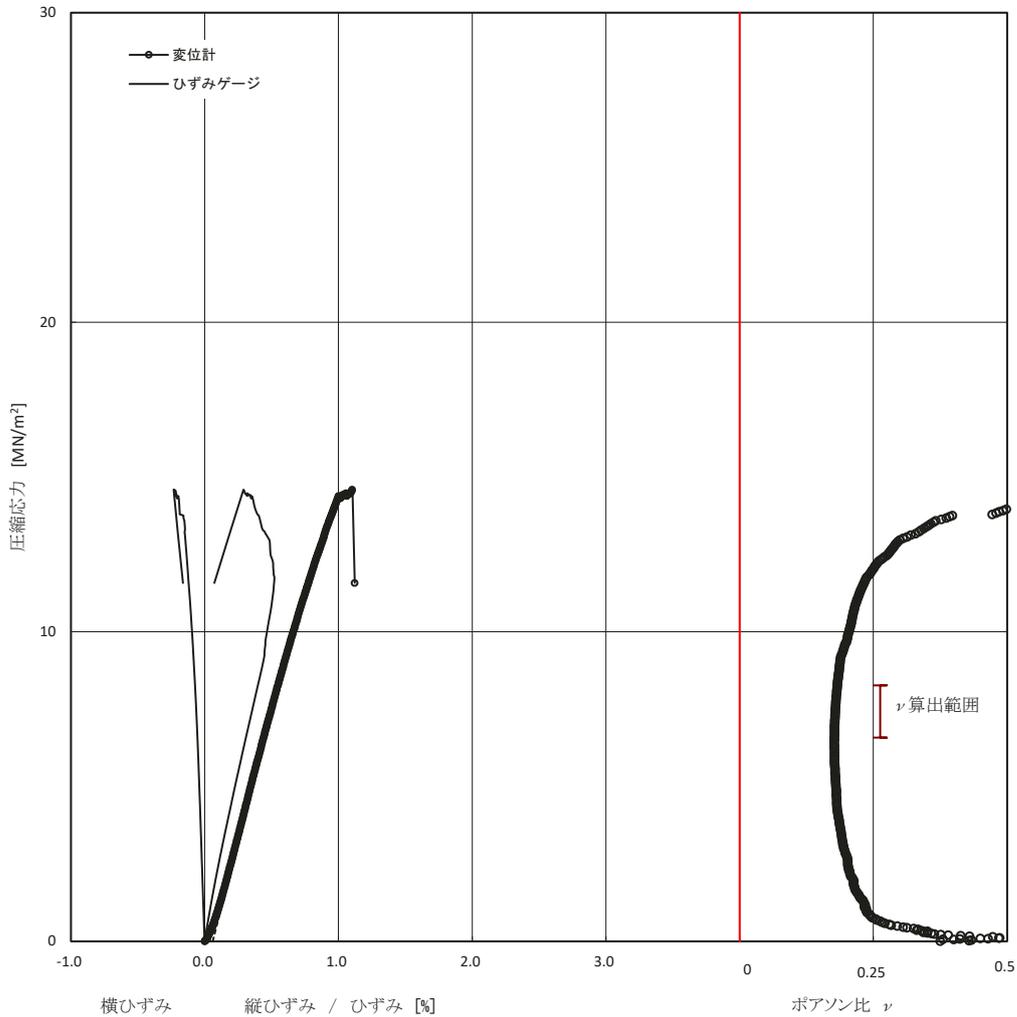
件名： 高温下での岩石の強度特性試験

試験日： 2021年12月20日

試料番号(深度)： T-1-1(25°C) (3.08m ~ 3.28m)

試験者： 細田 光一

| | | | | | |
|-------------|-----|-----------------------------------|--------|--------------|------------------------|
| 岩種 | | 供試体番号 | 1 | | |
| 採取方法 | | 供試体形状 | 円柱状 | | |
| 供試体作成方法 | | 高さ H_0 mm | 129.97 | | |
| ひずみ速度 %/min | 0.1 | 直径 D_0 mm | 64.29 | | |
| | | 質量 m g | 777.68 | | |
| | | 湿潤密度 ρ_t Mg/m ³ | 1.843 | | |
| | | 含水比 w % | 29.1 | | |
| | | 圧縮強さ q_u MN/m ² | 14.6 | ひずみゲージ | |
| | | 破壊ひずみ ϵ_f % | 1.04 | ϵ_f | 0.29 % |
| | | 変形係数 $E_{s,50}$ MN/m ² | 1710 | $E_{s,50}$ | 2110 MN/m ² |
| | | | | ポアソン比 ν | 0.179 |



供試体の破壊状況

No.1



備考:

変位計原点補正 0.060%

| | |
|---------------|-----------|
| JGS 2521-2020 | 岩石の一軸圧縮試験 |
|---------------|-----------|

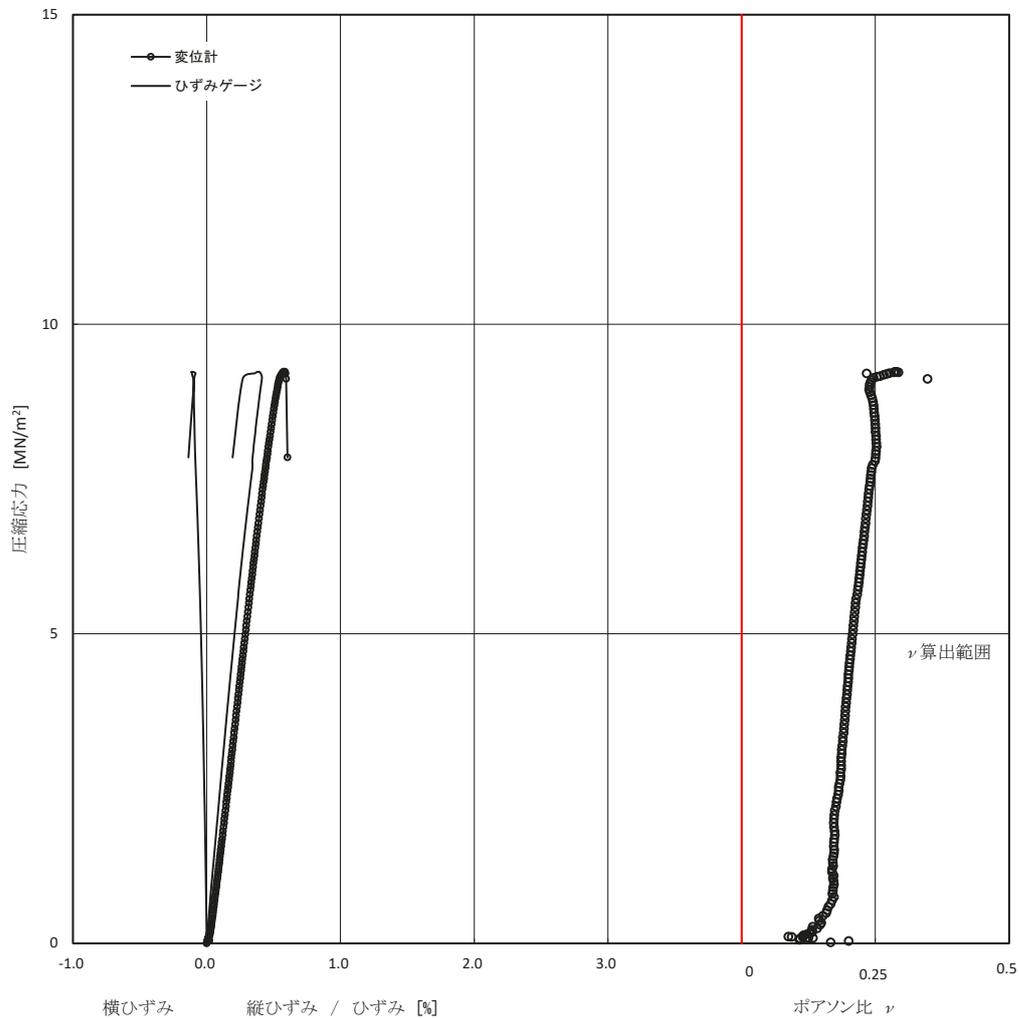
件名： 高温下での岩石の強度特性試験

試験日： 2021年12月20日

試料番号(深度)： T-2-2(25°C) (4.04m ~ 4.27m)

試験者： 細田 光一

| | | | | | |
|-------------|-----|-----------------------------------|--------|--------------|------------------------|
| 岩種 | | 供試体番号 | 1 | | |
| 採取方法 | | 供試体形状 | 円柱状 | | |
| 供試体作成方法 | | 高さ H_0 mm | 130.32 | | |
| ひずみ速度 %/min | 0.1 | 直径 D_0 mm | 64.13 | | |
| | | 質量 m g | 772.48 | | |
| | | 湿潤密度 ρ_t Mg/m ³ | 1.835 | | |
| | | 含水比 w % | 29.9 | | |
| | | 圧縮強さ q_u MN/m ² | 9.23 | ひずみゲージ | |
| | | 破壊ひずみ ϵ_f % | 0.55 | ϵ_f | 0.39 % |
| | | 変形係数 $E_{s,50}$ MN/m ² | 2000 | $E_{s,50}$ | 2420 MN/m ² |
| | | | | ポアソン比 ν | 0.204 |



備考:

変位計原点補正 0.038%

| | |
|---------------|-----------|
| JGS 2521-2020 | 岩石の一軸圧縮試験 |
|---------------|-----------|

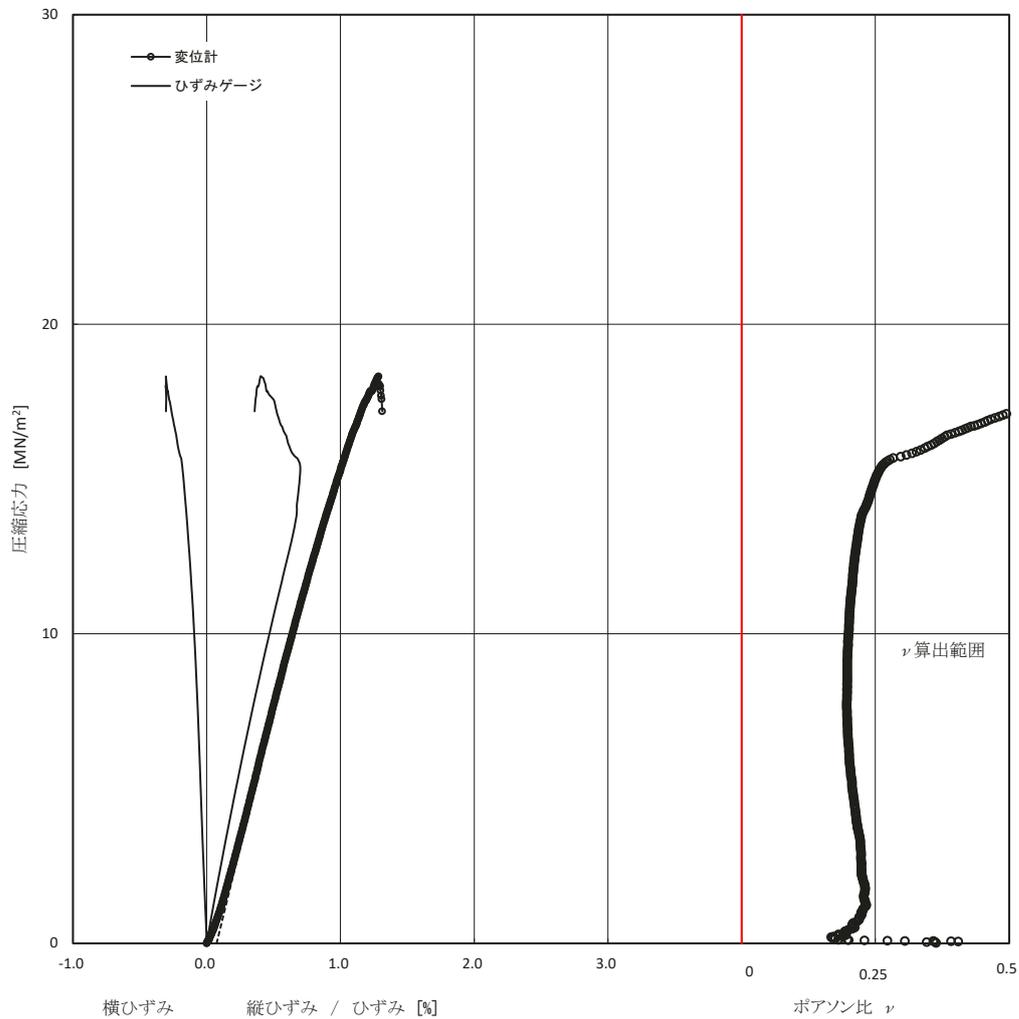
件名： 高温下での岩石の強度特性試験

試験日： 2021年12月20日

試料番号(深度)： T-3-6(25°C) (4.36m ~ 4.52m)

試験者： 細田 光一

| | | | | | |
|-------------|-----|-----------------------------------|--------|--------------|------------------------|
| 岩種 | | 供試体番号 | 1 | | |
| 採取方法 | | 供試体形状 | 円柱状 | | |
| 供試体作成方法 | | 高さ H_0 mm | 129.78 | | |
| ひずみ速度 %/min | 0.1 | 直径 D_0 mm | 64.44 | | |
| | | 質量 m g | 773.88 | | |
| | | 湿潤密度 ρ_t Mg/m ³ | 1.828 | | |
| | | 含水比 w % | 30.1 | | |
| | | 圧縮強さ q_u MN/m ² | 18.3 | ひずみゲージ | |
| | | 破壊ひずみ ϵ_f % | 1.21 | ϵ_f | 0.40 % |
| | | 変形係数 $E_{s,50}$ MN/m ² | 1780 | $E_{s,50}$ | 2160 MN/m ² |
| | | | | ポアソン比 ν | 0.198 |



供試体の破壊状況

No.1



備考:

変位計原点補正 0.074%

| | |
|---------------|-----------|
| JGS 2521-2020 | 岩石の一軸圧縮試験 |
|---------------|-----------|

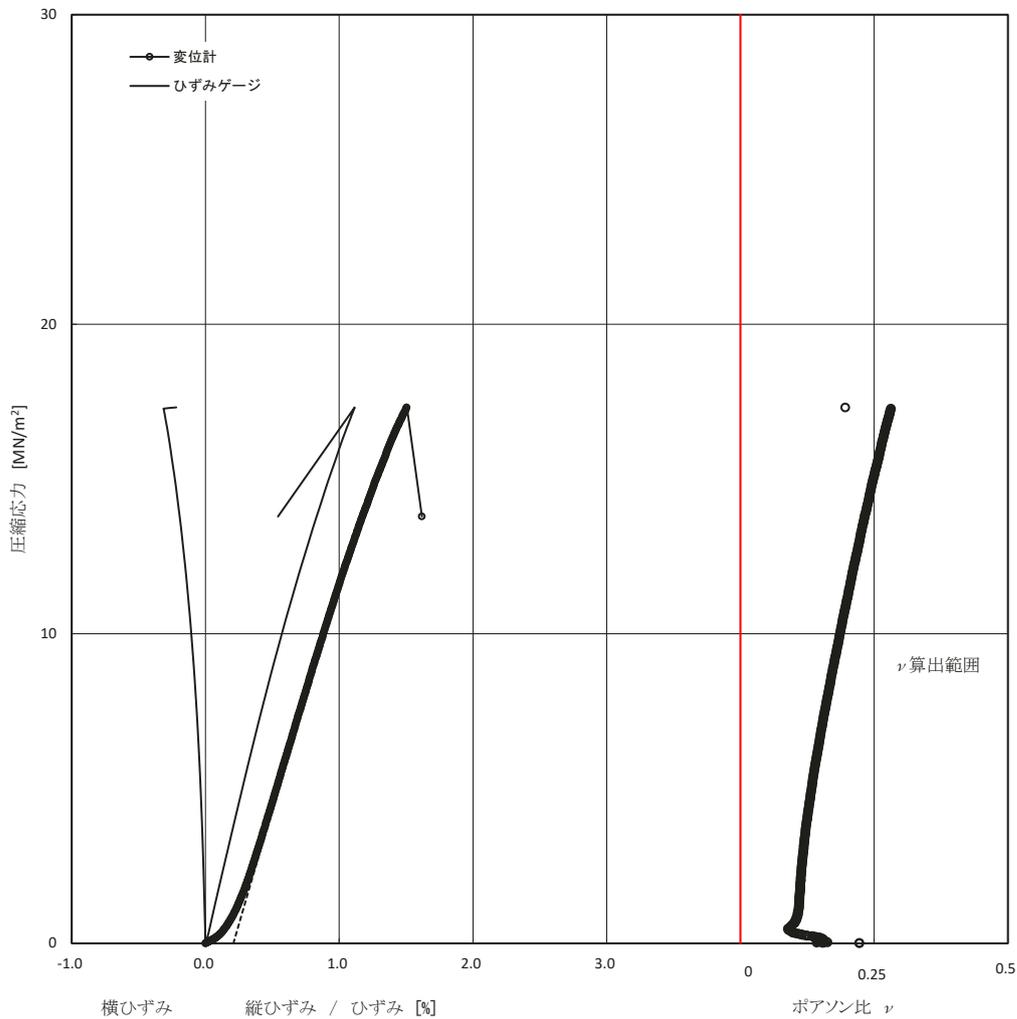
件名： 高温下での岩石の強度特性試験

試験日： 2021年12月10日

試料番号(深度)： T-2-5(50°C加熱) (5.40m ~ 5.56m)

試験者： 細田 光一

| | | | | | |
|-------------|-----|-----------------------------------|--------|--------------|------------------------|
| 岩種 | | 供試体番号 | 1 | | |
| 採取方法 | | 供試体形状 | 円柱状 | | |
| 供試体作成方法 | | 高さ H_0 mm | 129.48 | | |
| ひずみ速度 %/min | 0.1 | 直径 D_0 mm | 64.10 | | |
| | | 質量 m g | 730.39 | | |
| | | 湿潤密度 ρ_t Mg/m ³ | 1.748 | | |
| | | 含水比 w % | 29.1 | | |
| | | 圧縮強さ q_u MN/m ² | 17.3 | ひずみゲージ | |
| | | 破壊ひずみ ϵ_f % | 1.30 | ϵ_f | 1.12 % |
| | | 変形係数 $E_{s,50}$ MN/m ² | 1500 | $E_{s,50}$ | 1780 MN/m ² |
| | | | | ポアソン比 ν | 0.171 |



供試体の破壊状況

No.1



備考:

変位計原点補正 0.209%

| | |
|---------------|-----------|
| JGS 2521-2020 | 岩石の一軸圧縮試験 |
|---------------|-----------|

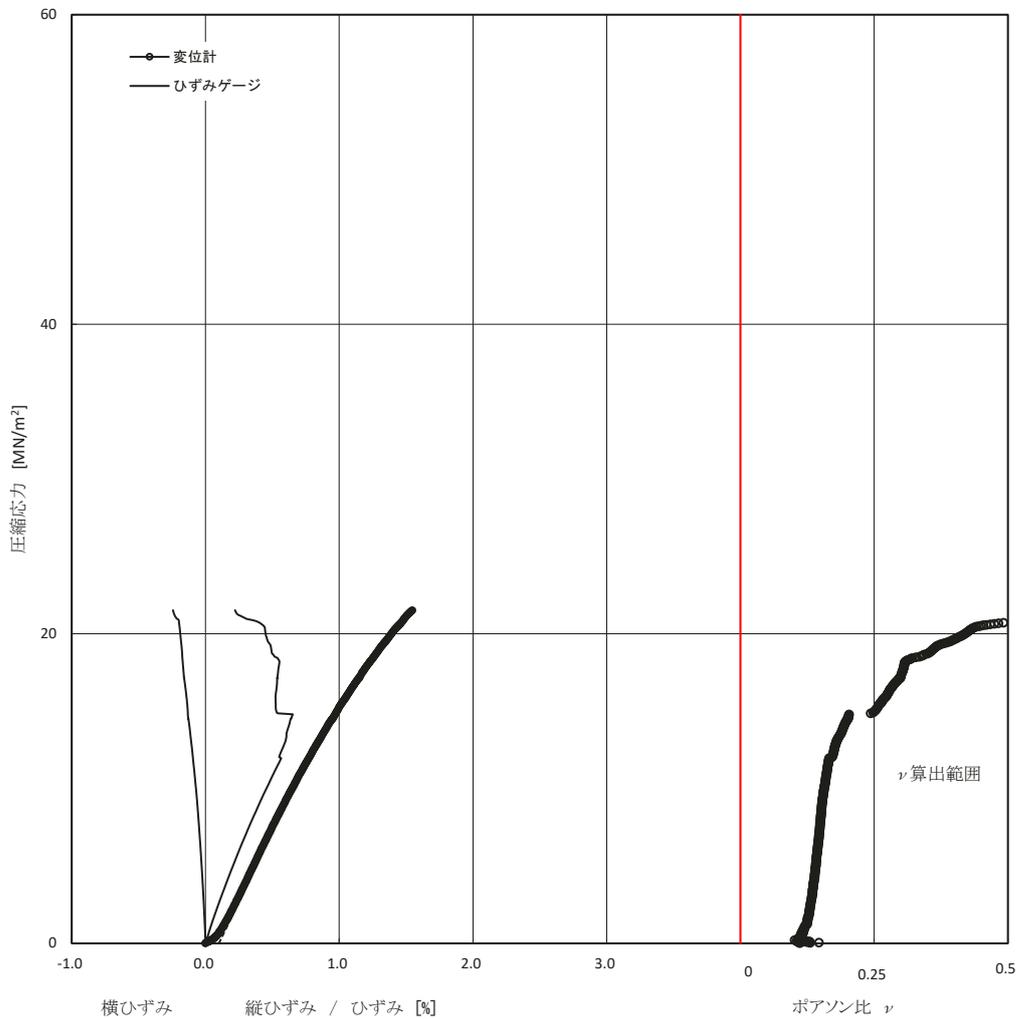
件名： 高温下での岩石の強度特性試験

試験日： 2021年12月24日

試験者： 細田 光一

試料番号(深度)： T-3-3(50°C加熱後) (3.38m ~ 3.53m)

| | | | | | |
|-------------|-----|-----------------------------------|--------|--------------|------------------------|
| 岩種 | | 供試体番号 | 1 | | |
| 採取方法 | | 供試体形状 | 円柱状 | | |
| 供試体作成方法 | | 高さ H_0 mm | 130.08 | | |
| ひずみ速度 %/min | 0.1 | 直径 D_0 mm | 63.58 | | |
| | | 質量 m g | 740.00 | | |
| | | 湿潤密度 ρ_t Mg/m ³ | 1.792 | | |
| | | 含水比 w % | 27.7 | | |
| | | 圧縮強さ q_u MN/m ² | 21.5 | ひずみゲージ | |
| | | 破壊ひずみ ϵ_f % | 1.45 | ϵ_f | 0.22 % |
| | | 変形係数 $E_{s,50}$ MN/m ² | 1810 | $E_{s,50}$ | 2170 MN/m ² |
| | | | | ポアソン比 ν | 0.161 |



備考:

変位計原点補正 0.100%

| | |
|---------------|-----------|
| JGS 2521-2020 | 岩石の一軸圧縮試験 |
|---------------|-----------|

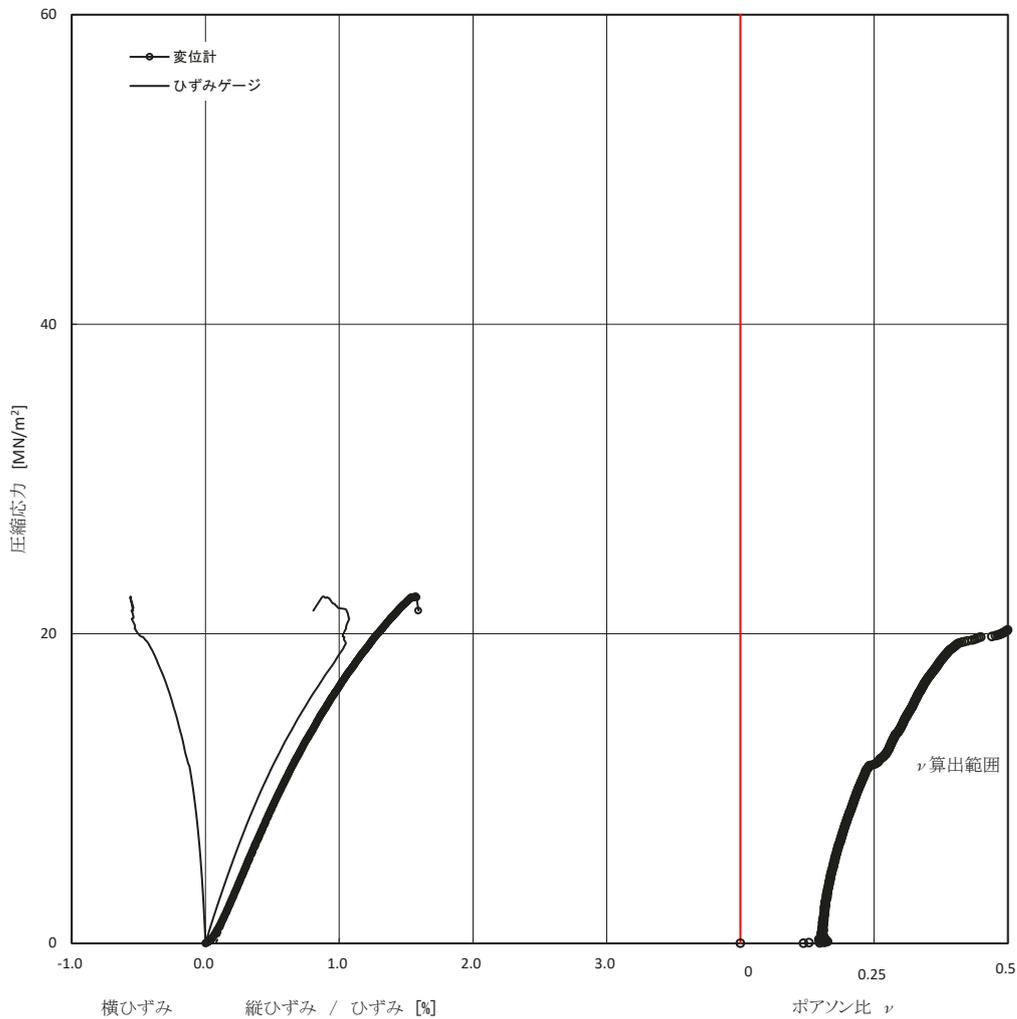
件名： 高温下での岩石の強度特性試験

試験日： 2021年12月24日

試験者： 細田 光一

試料番号(深度)： T-3-9(50°C加熱後) (5.74m ~ 5.96m)

| | | | | | |
|-------------|-----|-----------------------------------|--------|--------------|------------------------|
| 岩種 | | 供試体番号 | 1 | | |
| 採取方法 | | 供試体形状 | 円柱状 | | |
| 供試体作成方法 | | 高さ H_0 mm | 129.85 | | |
| ひずみ速度 %/min | 0.1 | 直径 D_0 mm | 63.70 | | |
| | | 質量 m g | 754.02 | | |
| | | 湿潤密度 ρ_t Mg/m ³ | 1.822 | | |
| | | 含水比 w % | 25.6 | | |
| | | 圧縮強さ q_u MN/m ² | 22.4 | ひずみゲージ | |
| | | 破壊ひずみ ϵ_f % | 1.50 | ϵ_f | 0.88 % |
| | | 変形係数 $E_{s,50}$ MN/m ² | 2010 | $E_{s,50}$ | 2300 MN/m ² |
| | | | | ポアソン比 ν | 0.244 |



供試体の破壊状況

No.1



備考:

変位計原点補正 0.077%

| | |
|---------------|-----------|
| JGS 2521-2020 | 岩石の一軸圧縮試験 |
|---------------|-----------|

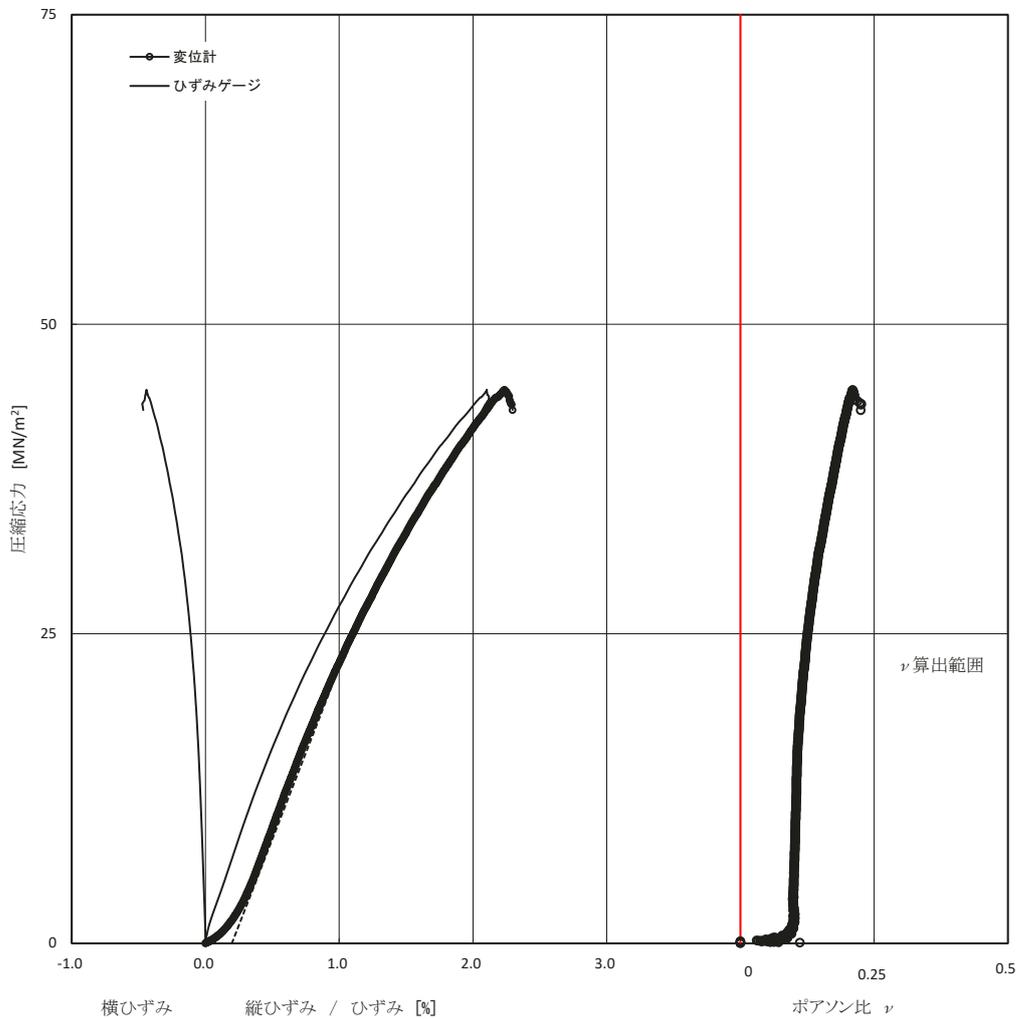
件名： 高温下での岩石の強度特性試験

試験日： 2021年12月21日

試験者： 細田 光一

試料番号(深度)： T-2-6(100°C加熱後) (5.59m ~ 5.83m)

| | | | | | |
|-------------|-----|-----------------------------------|--------|--------------|------------------------|
| 岩種 | | 供試体番号 | 1 | | |
| 採取方法 | | 供試体形状 | 円柱状 | | |
| 供試体作成方法 | | 高さ H_0 mm | 128.57 | | |
| ひずみ速度 %/min | 0.1 | 直径 D_0 mm | 63.60 | | |
| | | 質量 m g | 675.69 | | |
| | | 湿潤密度 ρ_t Mg/m ³ | 1.654 | | |
| | | 含水比 w % | 14.0 | | |
| | | 圧縮強さ q_u MN/m ² | 44.7 | ひずみゲージ | |
| | | 破壊ひずみ ϵ_f % | 2.04 | ϵ_f | 2.11 % |
| | | 変形係数 $E_{s,50}$ MN/m ² | 2830 | $E_{s,50}$ | 2910 MN/m ² |
| | | | | ポアソン比 ν | 0.120 |



供試体の破壊状況

No.1



備考:

変位計原点補正 0.197%

| | |
|---------------|-----------|
| JGS 2521-2020 | 岩石の一軸圧縮試験 |
|---------------|-----------|

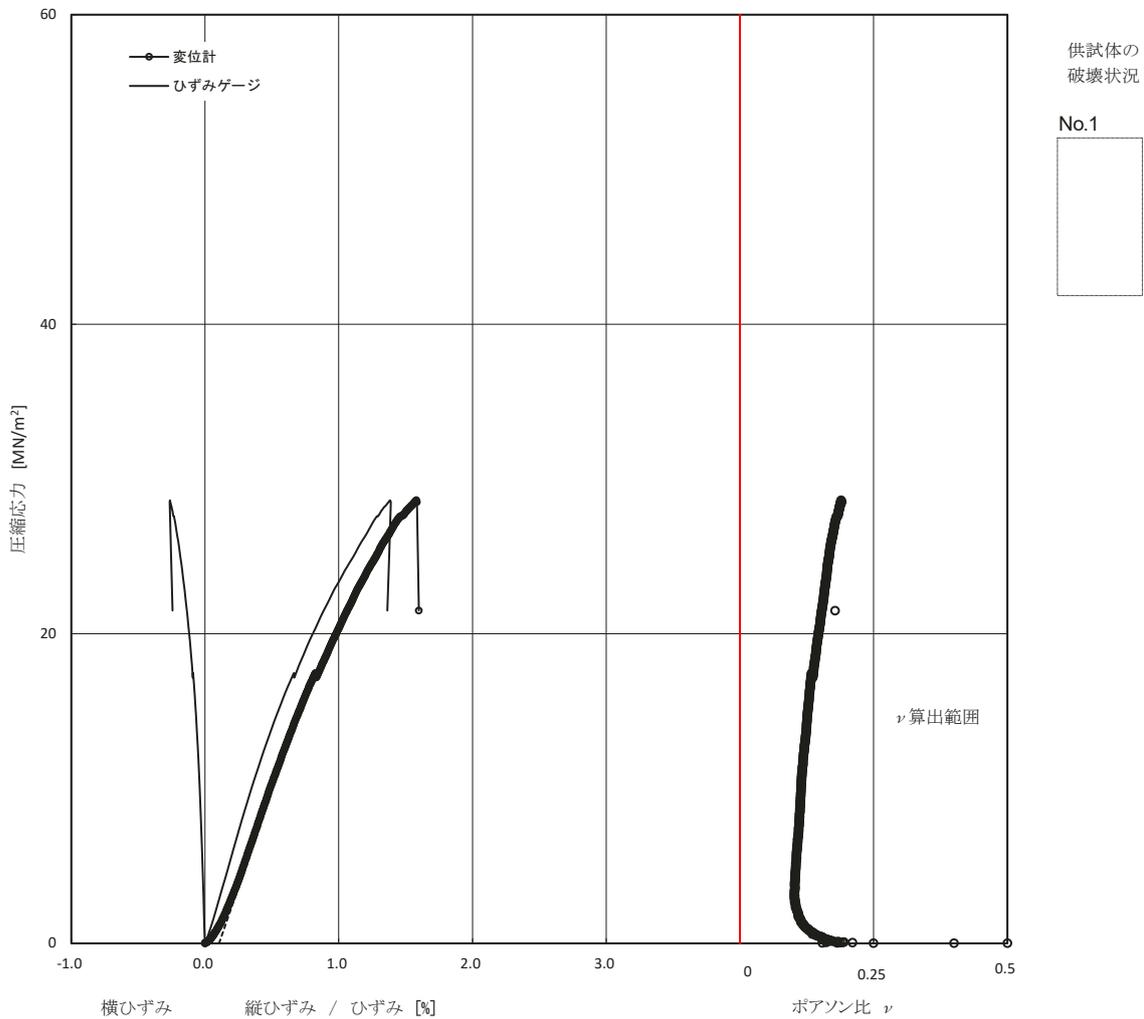
件名： 高温下での岩石の強度特性試験

試験日： 2021年12月29日

試料番号(深度)： T-3-1(100°C加熱後) (3.06m ~ 3.22m)

試験者： 細田 光一

| | | | | | |
|-------------|-----|-----------------------------------|--------|--------------|------------------------|
| 岩種 | | 供試体番号 | 1 | | |
| 採取方法 | | 供試体形状 | 円柱状 | | |
| 供試体作成方法 | | 高さ H_0 mm | 129.60 | | |
| ひずみ速度 %/min | 0.1 | 直径 D_0 mm | 63.08 | | |
| | | 質量 m g | 606.05 | | |
| | | 湿潤密度 ρ_t Mg/m ³ | 1.496 | | |
| | | 含水比 w % | 6.7 | | |
| | | 圧縮強さ q_u MN/m ² | 28.6 | ひずみゲージ | |
| | | 破壊ひずみ ϵ_f % | 1.48 | ϵ_f | 1.38 % |
| | | 変形係数 $E_{s,50}$ MN/m ² | 2520 | $E_{s,50}$ | 2770 MN/m ² |
| | | | | ポアソン比 ν | 0.126 |



備考：
変位計原点補正 0.105%

| | |
|---------------|-----------|
| JGS 2521-2020 | 岩石の一軸圧縮試験 |
|---------------|-----------|

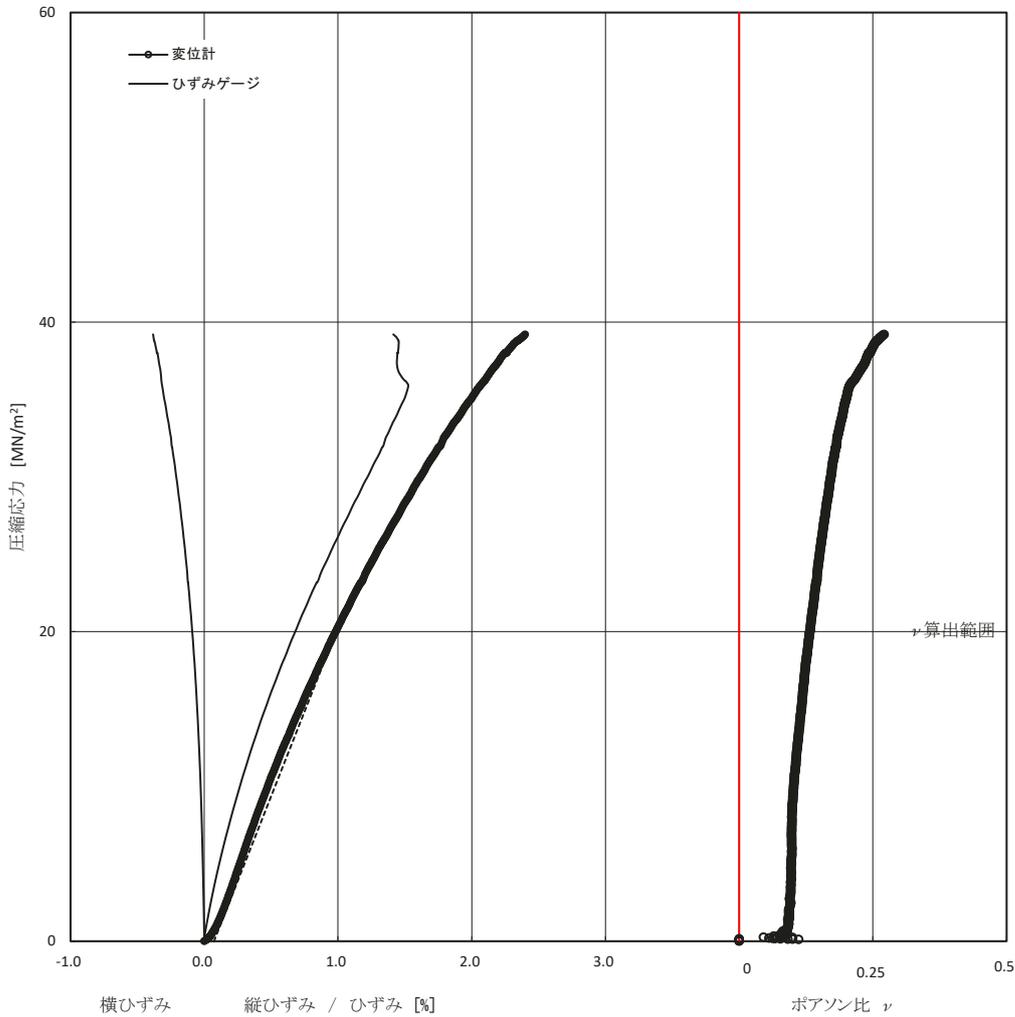
件名： 高温下での岩石の強度特性試験

試験日： 2022年1月13日

試験者： 細田 光一

試料番号(深度)： T-3-5(100°C加熱後) (4.18m ~ 4.36m)

| | | | | | |
|-------------|-----|-----------------------------------|--------|--------------|------------------------|
| 岩種 | | 供試体番号 | 1 | | |
| 採取方法 | | 供試体形状 | 円柱状 | | |
| 供試体作成方法 | | 高さ H_0 mm | 129.23 | | |
| ひずみ速度 %/min | 0.1 | 直径 D_0 mm | 64.06 | | |
| | | 質量 m g | 649.40 | | |
| | | 湿潤密度 ρ_t Mg/m ³ | 1.559 | | |
| | | 含水比 w % | 8.0 | | |
| | | 圧縮強さ q_u MN/m ² | 39.2 | ひずみゲージ | |
| | | 破壊ひずみ ϵ_f % | 2.33 | ϵ_f | 1.41 % |
| | | 変形係数 $E_{s,50}$ MN/m ² | 2220 | $E_{s,50}$ | 3000 MN/m ² |
| | | | | ポアソン比 ν | 0.131 |



供試体の破壊状況

No.1



備考:

変位計原点補正 0.073%

| | |
|---------------|-----------|
| JGS 2521-2020 | 岩石の一軸圧縮試験 |
|---------------|-----------|

件名：高温下での岩石の強度特性試験

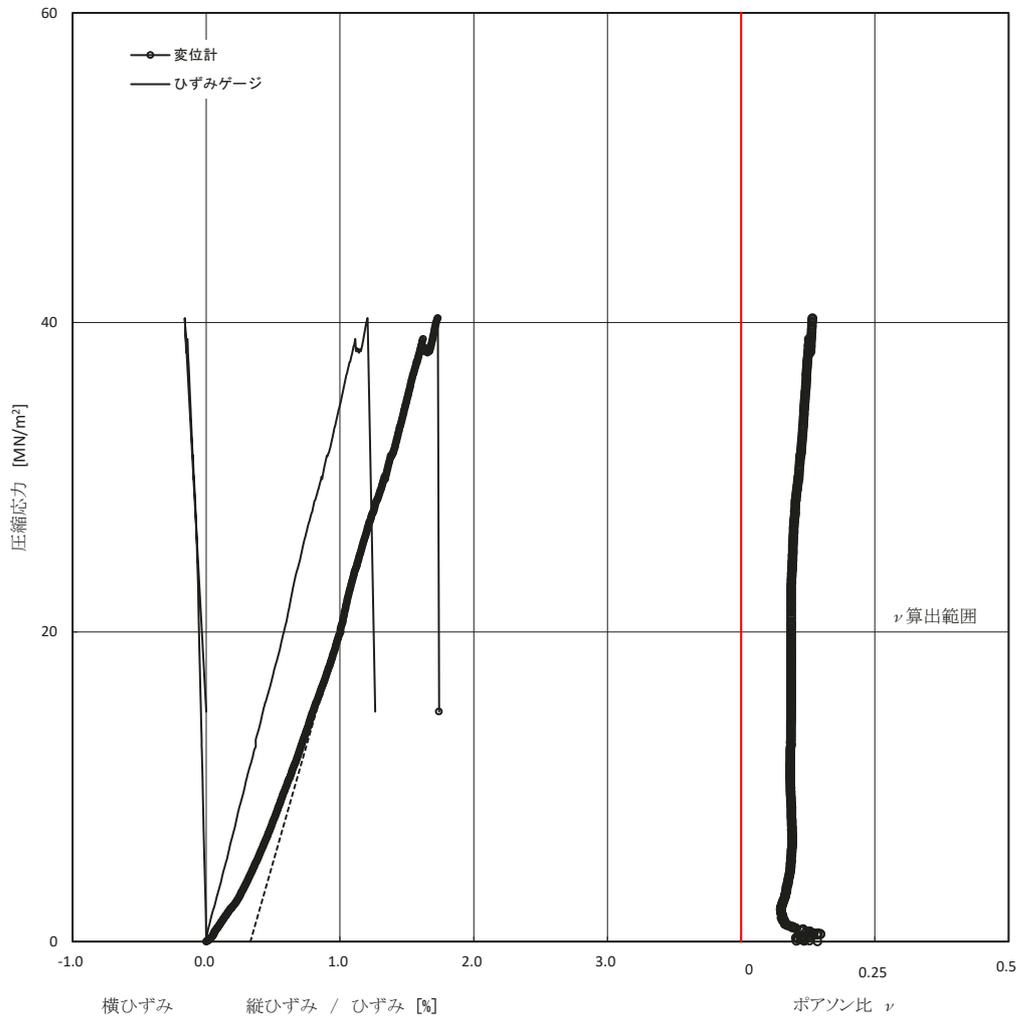
試験日：2021年12月16日

試料番号(深度)：T-2-3(150°C加熱後)

(5.09m ~ 5.24m)

試験者：細田 光一

| | | | | | | |
|-------------|-----|-----------------------------------|--------|--------------|-------|-------------------|
| 岩種 | | 供試体番号 | 1 | | | |
| 採取方法 | | 供試体形状 | 円柱状 | | | |
| 供試体作成方法 | | 高さ H_0 mm | 128.95 | | | |
| ひずみ速度 %/min | 0.1 | 直径 D_0 mm | 63.53 | | | |
| | | 質量 m g | 559.97 | | | |
| | | 湿潤密度 ρ_t Mg/m ³ | 1.370 | | | |
| | | 含水比 w % | -0.8 | | | |
| | | 圧縮強さ q_u MN/m ² | 40.3 | ひずみゲージ | | |
| | | 破壊ひずみ ϵ_f % | 1.40 | ϵ_f | 1.21 | % |
| | | 変形係数 $E_{s,50}$ MN/m ² | 1990 | $E_{s,50}$ | 3450 | MN/m ² |
| | | | | ポアソン比 ν | 0.094 | |



供試体の破壊状況

No.1



備考:

変位計原点補正 0.330%

| | |
|---------------|-----------|
| JGS 2521-2020 | 岩石の一軸圧縮試験 |
|---------------|-----------|

件名：高温下での岩石の強度特性試験

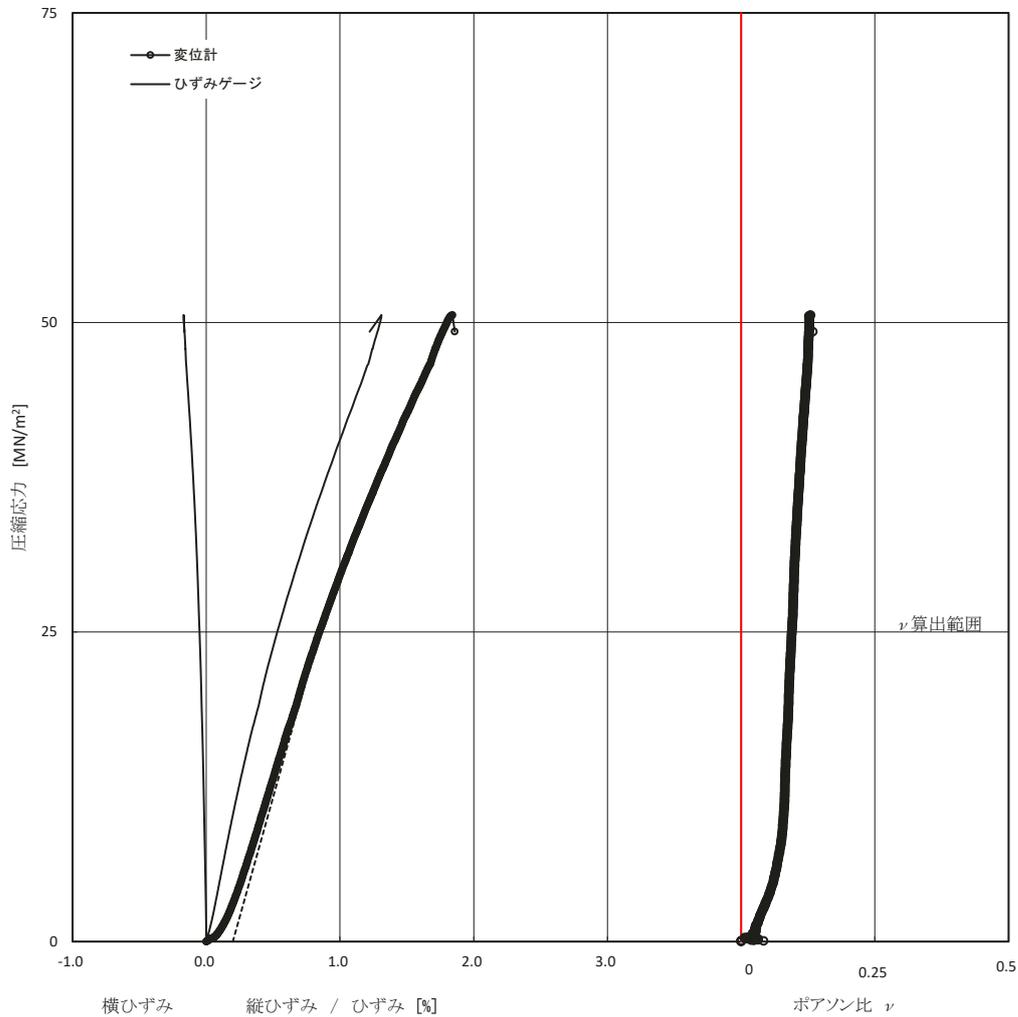
試験日：2021年12月29日

試料番号(深度)：T-2-7(150°C加熱後)

(9.05m ~ 9.20m)

試験者：細田 光一

| | | | | | |
|-------------|-----|-----------------------------------|--------|--------------|------------------------|
| 岩種 | | 供試体番号 | 1 | | |
| 採取方法 | | 供試体形状 | 円柱状 | | |
| 供試体作成方法 | | 高さ H_0 mm | 129.05 | | |
| ひずみ速度 %/min | 0.1 | 直径 D_0 mm | 63.59 | | |
| | | 質量 m g | 584.87 | | |
| | | 湿潤密度 ρ_t Mg/m ³ | 1.427 | | |
| | | 含水比 w % | 1.7 | | |
| | | 圧縮強さ q_u MN/m ² | 50.6 | ひずみゲージ | |
| | | 破壊ひずみ ϵ_f % | 1.64 | ϵ_f | 1.31 % |
| | | 変形係数 $E_{s,50}$ MN/m ² | 2950 | $E_{s,50}$ | 4700 MN/m ² |
| | | | | ポアソン比 ν | 0.095 |



備考:

変位計原点補正 0.199%

| | |
|---------------|-----------|
| JGS 2521-2020 | 岩石の一軸圧縮試験 |
|---------------|-----------|

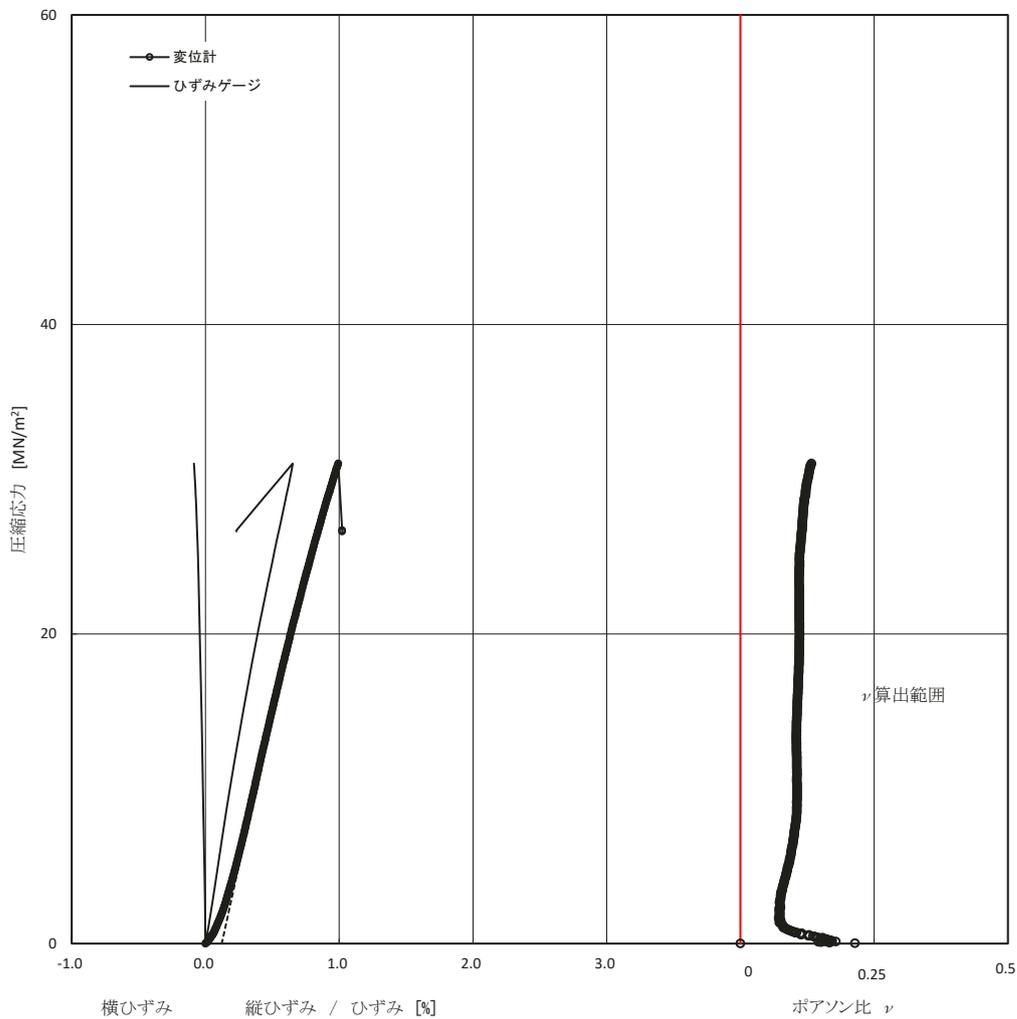
件名：高温下での岩石の強度特性試験

試験日：2022年1月14日

試料番号(深度)：T-3-8(150°C加熱後) (5.60m ~ 5.74m)

試験者：細田 光一

| | | | | | |
|-------------|-----|-----------------------------------|--------|--------------|------------------------|
| 岩種 | | 供試体番号 | 1 | | |
| 採取方法 | | 供試体形状 | 円柱状 | | |
| 供試体作成方法 | | 高さ H_0 mm | 128.80 | | |
| ひずみ速度 %/min | 0.1 | 直径 D_0 mm | 63.73 | | |
| | | 質量 m g | 590.41 | | |
| | | 湿潤密度 ρ_t Mg/m ³ | 1.437 | | |
| | | 含水比 w % | 0.4 | | |
| | | 圧縮強さ q_u MN/m ² | 31.0 | ひずみゲージ | |
| | | 破壊ひずみ ϵ_f % | 0.87 | ϵ_f | 0.65 % |
| | | 変形係数 $E_{s,50}$ MN/m ² | 3980 | $E_{s,50}$ | 5300 MN/m ² |
| | | | | ポアソン比 ν | 0.107 |



供試体の破壊状況

No.1



備考:

変位計原点補正 0.122%

