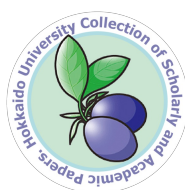




Title	凍結融解作用を受ける支笏溶結凝灰岩の損傷に与える冷却速度の影響
Author(s)	歌代, 佳祐; 野中, 聡志; 児玉, 淳一 他
Description	2020年度資源・素材関係学協会合同秋季大会（仙台）. 2020年9月8日～10日. オンライン開催, 宮城県.
Citation	資源・素材学会秋季大会講演集, 7(2), 1K0201-06-05
Issue Date	2020-09-08
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/79278
Type	conference paper
File Information	01_Utashiro2020.pdf



一般講演

開発機械／岩盤工学／資源経済と社会システム／資源開発技術

2020年9月8日(火) 09:00 ～ 11:30 第2会場

[1K0201-06-05] 凍結融解作用を受ける支笏溶結凝灰岩の損傷に与える冷却速度の影響

Impact of cooling rate on damage of Shikotsu welded tuff induced by freeze-thaw action

○歌代 佳祐¹、野中 聡志¹、児玉 淳一¹、福田 大祐¹、藤井 義明¹ (1. 北海道大学)

○KEISUKE UTASHIRO¹, SATOSHI NONAKA¹, JUNICHI KODAMA¹, DAISUKE FUKUDA¹, YOSHIAKI FUJII¹ (1. Hokkaido University)

キーワード：溶結凝灰岩、凍結融解、冷却速度、AEイベント、残留ひずみ

welded tuff, freeze-thaw, cooling rate, AE event, residual strain

寒冷地の岩盤表面では、しばしば凍結融解作用によって劣化が引き起こされる。そのため、岩盤斜面の長期安定性を評価するには、凍結融解による岩石の損傷の進行を把握することが重要である。本研究では、含水飽和状態の支笏溶結凝灰岩を対象に凍結融解試験を行い、岩石の損傷に与える冷却速度の影響について検討した。まず、同一の供試体に対して冷却速度を変化させながら凍結融解試験を実施した結果、冷却速度が遅くなるほど、間隙水の凍結開始温度は高くなること、1サイクルでのAEイベントの発生数が増えること、残留ひずみや凍結膨張ひずみが大きくなることがわかった。次に、3つの供試体に対して、それぞれ異なる冷却速度で凍結融解サイクルを繰り返し与える試験を実施した結果、冷却速度を遅く設定した供試体ほど、残留ひずみと凍結膨張ひずみは大きいことがわかった。以上のことから、冷却速度が遅いほど1サイクル当たりの岩石の損傷は大きいと考えられる。

1. はじめに

寒冷地における岩盤表面では、凍結融解作用が繰り返されることによって劣化や損傷が引き起こされる。そのため、岩盤斜面の長期安定性を評価するには、凍結融解における岩石の損傷の進行を把握することが重要である。過去には、3種の岩石に対して90分間の凍結融解試験を繰り返し行ったもの¹⁾や、12種の岩石を対象に6時間の凍結融解サイクルを繰り返した研究²⁾がある。しかし、寒冷地における実際の気温変化は、24時間周期の日変動や1年を通しての季節変動のように長い周期であることが多いため、冷却速度の影響について検討することも必要である。凝灰岩に対して異なる冷却速度で凍結融解試験を行い、冷却速度が高いほど凍結膨張ひずみは大きいといった知見³⁾や、モルタルに対して異なる冷却速度で凍結融解試験を行い、冷却速度が高いほど残留ひずみは大きいといった知見⁴⁾は得られているものの、岩石において、冷却速度が劣化や損傷に与える影響が解明されたとは言い難い。そこで、本研究では含水飽和状態にある支笏溶結凝灰岩を対象に、まず、同一の供試体に対して冷却速度を変えて凍結融解試験を行った。次に、異なる供試体に対して3種類の冷却速度で凍結融解を繰り返し与え、サイクル数の増加に伴う挙動を調べた。そして、直交する二方向のひずみとAEの計測結果から、冷却速度の違いが岩石の変形と損傷へ与える影響を明らかにした。

2. 試験方法

2.1 供試体

供試岩石には空隙率が約40%である支笏溶結凝灰岩を用い、流理面に対して垂直にボーリングを行い直径30mm、長さ60mmの円柱形供試体を作製した。+80℃の恒温槽で24時間以上静置し乾燥させた後、供試体側面の流理面と直交する方向(軸方向)と平行な方向(横方向)にひずみゲージを各2枚ずつ対角の位置に貼り付け、純水中で24時間以上真空脱気を行い含水させた。

2.2 試験装置

計測項目は軸ひずみ、横ひずみ、表面温度、AEである。ひずみの計測には共和電業社製のひずみゲージKFGS-20-120-C1-11L1M2Rを使用し、表面温度の計測にはT型熱電対を用いた。また、エヌエフ回路設計ブロック社製のAEセンサAE-901U(共振周波数150kHz)を用いてAEイベントの計測を行った。これらのデータは東京測器研究所製のデータロガーTDS-102と、日置電機社製のデータロガーLR8450-01で記録した。供試体の凍結融解には日本医化器械製作所製の特殊恒温槽LP-ZPSを使用した。

3. 同一の供試体を用いて冷却速度を変えた試験

3.1 試験条件

含水供試体を凍結融解槽の中に入れ、Fig.1, 2に示すように1-A(Fig.1)と、1-B(Fig.2)の2パターンの冷却・加熱条件で凍結融解履歴を5サイクル与えた。1-A, 1-Bでは、それぞれ同一の供試体を用いて途中で周期(8時間, 24時間, 72時間)を変化させているが、3種類の冷却速度を与える順番を変えている。すなわち、これらの試験により、冷却速度の影響に加えて冷却速度の違いが後のサイクルに与える影響についても把握することができる。以下、8時間の凍結融解サイクルを高速8hサイクル、24時間のものを中速24hサイクル、72時間のものを低速72hサイクルと呼ぶ。試験1-Aのサイクル1→3では周期が長くなり、サイクル3→5では周期が短くなる。対して試験1-Bのサイクル1→3では周期が短くなり、サイクル4→5では24hサイクルと8hサイクルを繰り返した。

Fig.1 試験1-Aにおける
制御温度と時間の関係

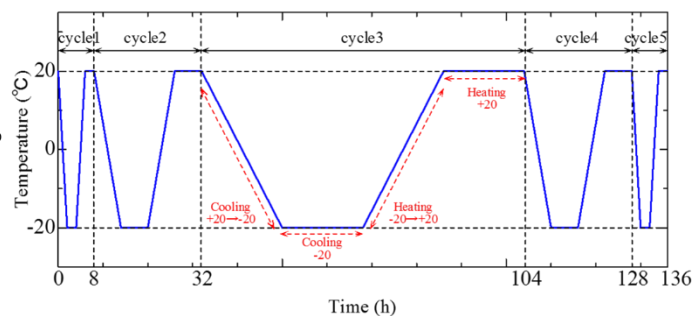
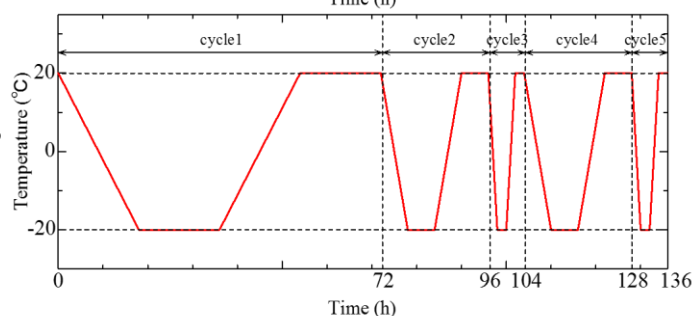


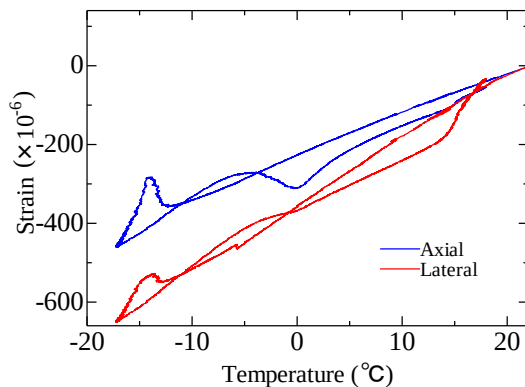
Fig.2 試験1-Bにおける
制御温度と時間の関係



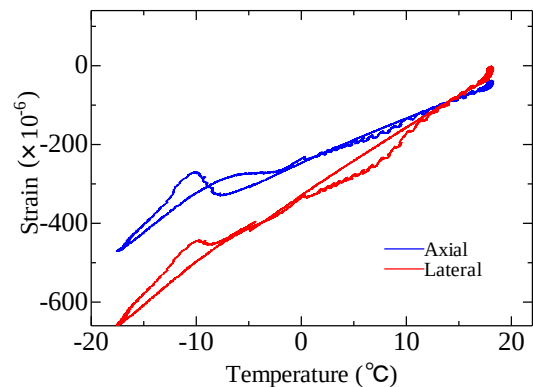
3・2 試験結果

(1) ひずみと温度の関係

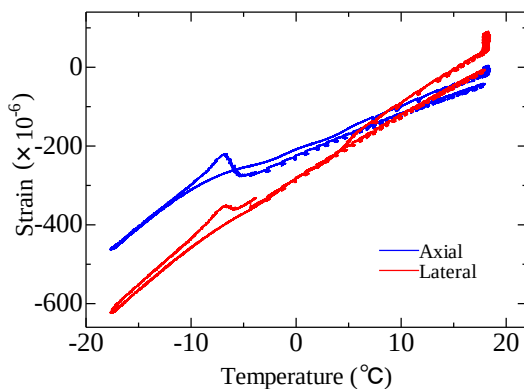
試験 1-A のひずみと温度の関係を Fig.3(a)-(e)に示す。図中の縦軸はすべて膨張を正としている。軸、横ひずみの挙動より、冷却過程では温度の低下に伴い熱収縮した後に間隙水の凍結による膨張が見られ(これを膨張ひずみと定義する)、その後再び熱収縮を示すことがわかる。また、加熱過程では、温度の上昇により熱膨張した後に間隙氷の融解による収縮挙動を示し、その後再び熱膨張する。これらの挙動はいずれのサイクルでも認められたが、間隙水が凍結を開始する温度はサイクルにより異なる。8h サイクルで約-13℃, 24h サイクルで約-8℃, 72h サイクルで約-6℃であり、冷却速度が遅くなると凍結開始温度は高くなる。また、各サイクルの最初と、サイクル終了時のひずみ値は異なっており、これを残留ひずみと定義する。以上の特徴は、試験 1-B でも同様に認められた。



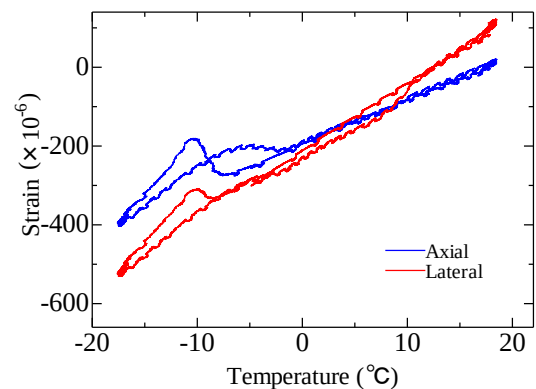
(a) cycle1(高速 8h サイクル)



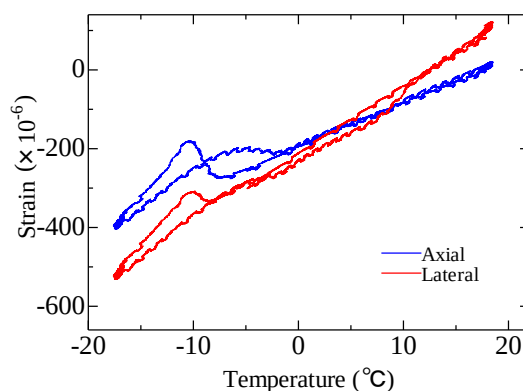
(b) cycle2(中速 24h サイクル)



(c) cycle3(低速 72h サイクル)



(d) cycle4(中速 24h サイクル)



(e) cycle5(高速 8h サイクル)

Fig.3 ひずみと温度の関係(試験 1-A)

(2) 各凍結融解過程でのサイクルごとの AE 数

試験 1-A, 1-B それぞれの各サイクルを冷却過程, 冷却保持過程, 加熱過程, 加熱保持過程に分けたときの (Fig.1 cycle3 参照), それぞれの過程での累積 AE 数を Fig.4 に示す. また, 1 時間あたりの AE 発生率を Fig.5 に示す. Fig.4 より, いずれの過程でも 1 サイクルの時間が 72 時間と長い低速サイクルで多くの AE 発生が見られ, 以下 24 時間の中速サイクル, 8 時間の高速サイクルの順で AE 発生数は少なくなる傾向があり, 特に冷却過程での AE 発生数が多い. また, Fig.5 より AE 発生率は冷却速度にあまり依存せずどの過程でもサイクルが進むごとに増加する傾向がある. 以上のことから, 損傷は主に冷却過程で発達し, また凍結融解の周期が長いほど発達しやすいと言える. 一方, 損傷の発達速度が損傷量に依存して大きくなると考えると, 低速のサイクルで発達した損傷がその後の高速のサイクルでの損傷を加速したため, サイクル 4, 5 ではより AE 発生率が大きくなったものと解釈できる.

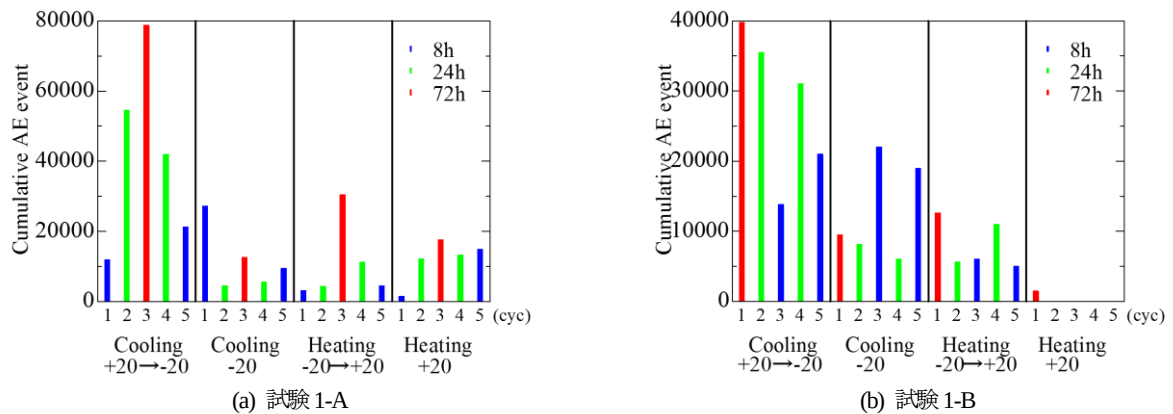


Fig.4 サイクルごとの各過程での累積 AE 数

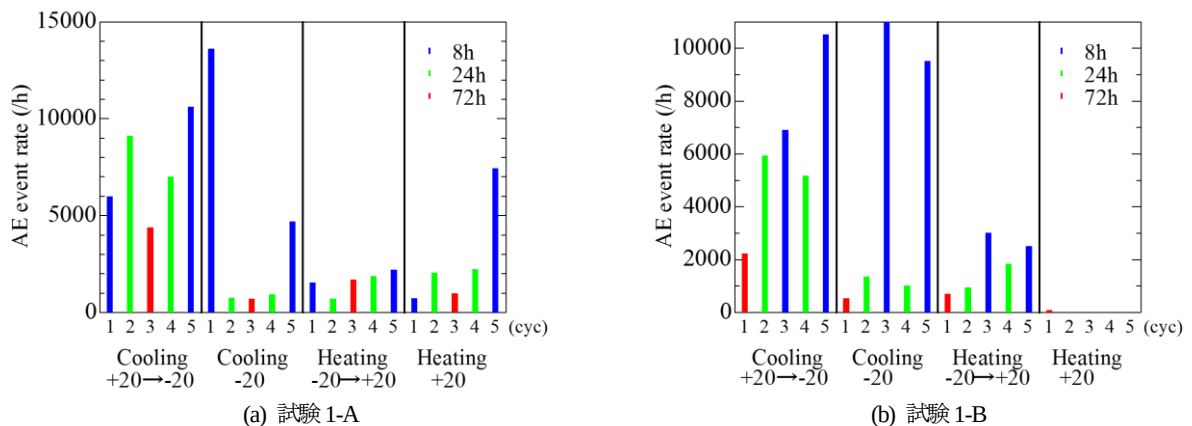


Fig.5 サイクルごとの各過程での AE 発生率

(3) 膨張ひずみと残留ひずみ

試験 1-A, 1-B の各サイクルでの膨張ひずみとサイクル数の関係を Fig.6 に示す. 試験 1-B における横筋膨張ひずみは測定できなかったため軸ひずみのみを表示している. いずれの試験も冷却速度が遅いほど, 軸, 横の膨張ひずみは小さくなっている. また, 再び中速, 高速と冷却速度を変えたサイクル 4 と 5 では膨張ひずみがサイクル 3 以前の同じ冷却速度におけるサイクルのものより大きくなっている.

試験 1-A, 1-B の各サイクルでの残留ひずみとサイクル数の関係を Fig.7 に示す. 軸, 横ともに低速サイクルで最も大きな残留ひずみを示した. これは累積 AE 数 (Fig.4) と同様の傾向であり, 冷却速度が遅いほど累積 AE 数が増え, 残留ひずみも大きくなる. 一方で膨張ひずみには累積 AE 数と同様の傾向は見られず, 冷却速度が遅いほど小さくなっているが, これは低い冷却速度での岩石の収縮が凍結膨張を抑制させるためであり, 岩石の損傷への影響は残留ひずみで評価すべきであると考えられる.

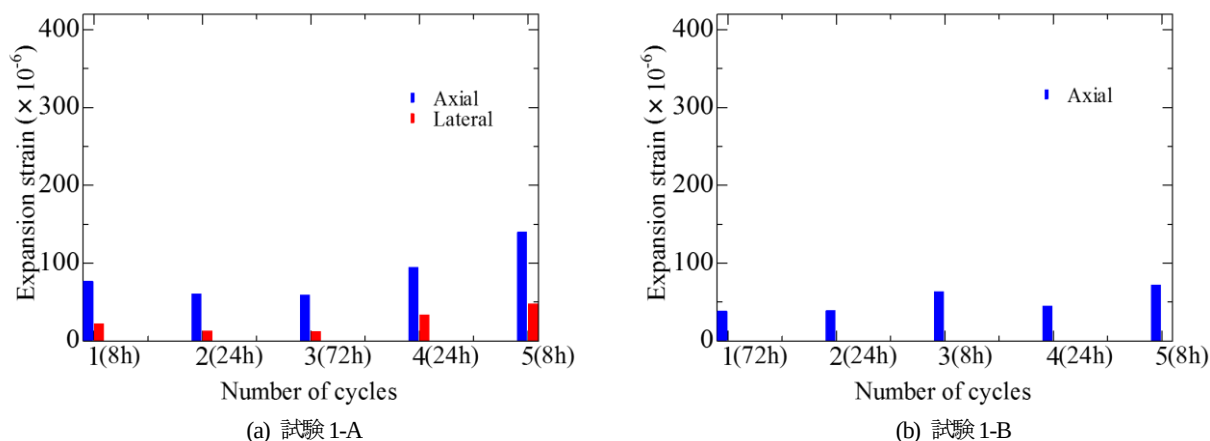


Fig.6 膨張ひずみとサイクル数との関係(試験 1)

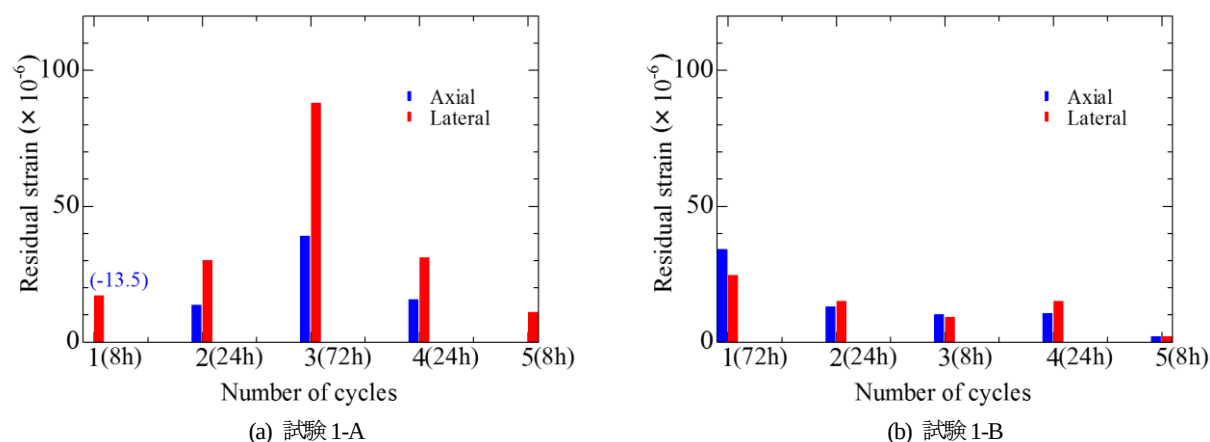


Fig.7 残留ひずみとサイクル数との関係(試験 1)

4. 異なる供試体を用いて冷却速度を変えた試験

4・1 試験条件

3つの供試体に対し、それぞれ Fig.8 に示す異なる冷却速度で凍結融解履歴を5サイクル与えた。試験 2-A, 試験 2-B, 試験 2-C の周期はそれぞれ 72 時間, 24 時間, 8 時間である。

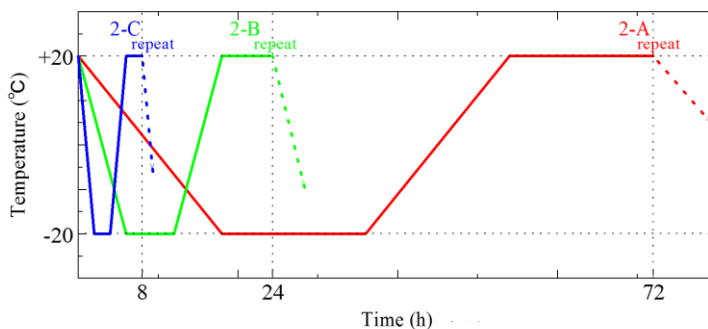


Fig.8 試験 2 における制御温度と時間の関係

4・2 試験結果

(1) ひずみと温度の関係

試験 2-A, 2-B, 2-C の軸ひずみ, 横ひずみと温度の関係を Fig.9, Fig.10 に示す。軸ひずみ, 横ひずみともに 72h サイクルの試験ではサイクルを経るごとに膨張方向への移動が大きくなっている。さらに、冷却速度が遅いほど冷却時の間隙水の凍結による膨張の開始温度は高いが、融解時の収縮開始温度は冷却速度による違いがあまり見られなかった。また、横方向の 24h サイクルと 8h サイクルでは間隙水の凍結融解による影響が小さく、熱膨張, 熱収縮による変形が主である上、サイクルを経るごとによる影響も少なくなっている。以上のことより、冷却速度が遅いほど流理面と直交する軸方向に大きな膨張変形が発生することがわかった。

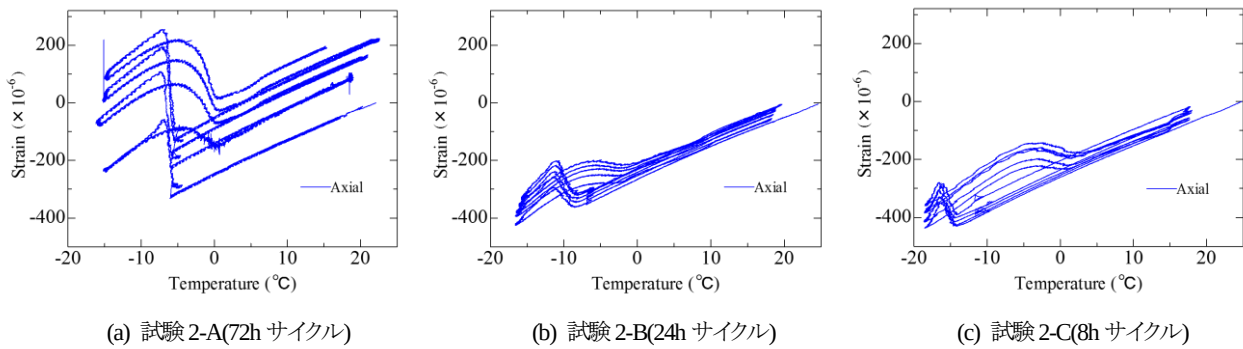


Fig.9 軸ひずみと温度の関係(試験 2)

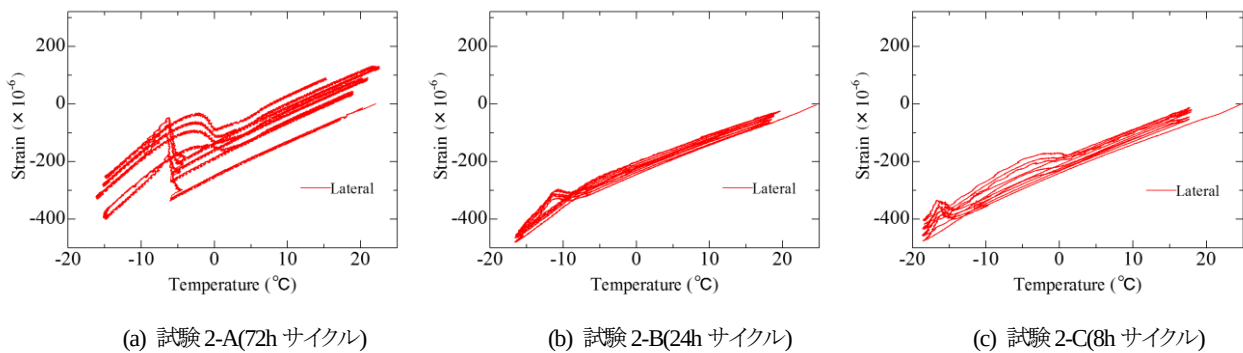


Fig.10 横ひずみと温度の関係(試験 2)

(2) 膨張ひずみと残留ひずみ

試験 2-A, 2-B, 2-C の各サイクルでの膨張ひずみとサイクル数の関係を Fig.11 に示す。試験 2-B(24h サイクル)における横膨張ひずみは測定できなかったため軸ひずみのみを表示している。どの冷却速度においてもサイクル数が増えるごとに膨張ひずみは増加する傾向がある。なお、3 章で述べた試験 1 とは異なり、冷却速度が最も遅い試験 2-A(72h サイクル)で膨張ひずみの量と増加率は大きくなっており、また、試験 2-B と 2-C ではほとんど差が見られなかった。

試験 2-A, 2-B, 2-C の各サイクルでの残留ひずみとサイクル数の関係を Fig.12 に示す。試験 1 と同様に、冷却速度が最も遅い試験 2-A で残留ひずみは大きくなっている。また、残留ひずみは 72h サイクルのようにサイクルを経るごとに減少していくのが通常であるが、24h, 8h サイクルでは顕著な傾向は見られず、8h サイクルの試験の 4 サイクル目では収縮方向(マイナスの値)に残留ひずみが発生している。このように、岩石供試体や冷却速度によっては不規則な挙動を示すことに留意することも重要である。

また、3・2(2), (3)で述べたように、損傷の発達速度が損傷量に依存して大きくなり、かつ損傷への影響は残留ひずみで評価できると仮定すると、冷却速度が低いほど空隙の増加や亀裂の進展等、何らかの形で損傷が大きくなり、以降に続くサイクルで膨張ひずみの増加をもたらすと考えられる。

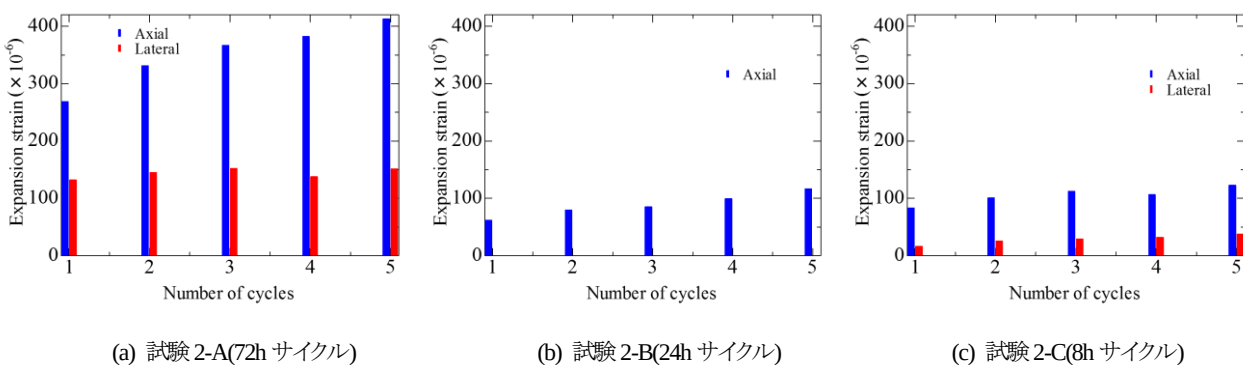


Fig.11 膨張ひずみとサイクル数の関係(試験 2)

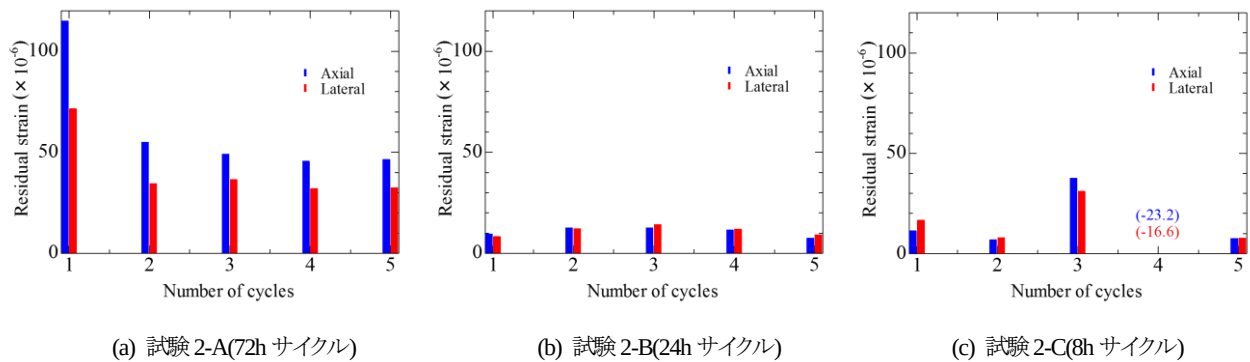


Fig.12 残留ひずみとサイクル数の関係(試験2)

5. まとめ

支笏溶結凝灰岩に対して凍結融解試験を行い、凍結融解作用による岩石の損傷に与える冷却速度の影響について検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 冷却速度が遅いほど、間隙水の凍結開始温度は高くなる。
- (2) 冷却速度が遅いほど、AE イベント発生数が多くなる。
- (3) 冷却速度が遅いほど、残留ひずみが大きくなり、その後の膨張ひずみの増加割合に影響を与えられる。
- (4) 以上から、冷却速度が遅いほど岩石の変形と損傷へ与える影響は大きくなる。

6. 引用文献

- 1) 山本清仁, 小林晃, 藤居宏一(2000), 凍結融解の影響による岩石の力学定数の変化, 土木学会論文集, No. 666 III-53, pp. 35-44
- 2) 児玉淳一, 中谷匡志, 奈良禎太, 後藤龍彦, 藤井義明, 金子勝比呂(2011), 凍結融解作用を受ける岩石の破壊プロセスと耐久性の評価, Journal of MMIJ, Vol. 127, pp. 117-126
- 3) N. Matsuoka(1990), Mechanisms of Rock Breakdown by frost Action: An Experimental Approach, Cold Regions Science and Technology, 17, pp. 253-270
- 4) 橋本勝文, 横田弘, 杉山隆文, 吉川昂純(2013), 凍結融解作用を受けたモルタルの X 線 CT 撮影による空隙構造評価, 材料 Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.62, pp.492-497