低温下における飽和含水岩石の力学的性質に及ぼす 間隙水の影響[†]

鴨志田 直人* 大河原 正文** 齊藤 剛***

Influence of Pore Water on the Mechanical Properties of Water-Saturated Rock under Very Low Temperatures

by

Naoto KAMOSHIDA*, Masafumi OKAWARA** and Tsuyoshi SAITO***

It is commonly known that water-saturated rock increases in strength due to freezing of pore water when cooled. This increase in strength due to freezing obviously appears in rock with relatively high porosity. It is also known that water-saturated rock increases in thermal diffusivity due to freezing of pore water when cooled. Despite its relatively high porosity, however, frozen tuff does not increase in thermal diffusivity. In this study, we considered the presence of clay minerals and investigated the influence of pore water on the mechanical properties of water-saturated rock under low temperatures. Specifically, we put a specimen of Ogino tuff and that of Berea sandstone through a uniaxial compression test and an indirect tensile test in a temperature range of -170°C to room temperature. Our findings are as follows. The influence of pore water on the strengthening mechanism of water-saturated rock under low temperatures needs to be investigated separately on bulk water and interlayer water. The strength of water-saturated sandstone is presumed to result from the interaction between a load distribution effect due to freezing of bulk water and an increase in the strength of ice due to cooling after the freezing of bulk water. In water-saturated tuff, since interlayer water does not freeze, the load sharing effect due to freezing is not expected to contribute to the strength of the rock. Therefore, it is necessary to design a new model.

Key words:

Tuff, Sandstone, Low temperature, Uniaxial compressive strength, Indirect tensile strength, Interlayer water, Bulk water, Pore structure, Clay mineral

1 緒 言

2011 年の東日本大震災以降、原子力エネルギーの安全性に対する懸念が強まりつつある日本において、石油代替エネルギーとして天然ガスや液化水素などの低温液化燃料の需要増大が期待されている。低温液化燃料の安定供給には貯蔵施設の確保が課題であり、国土の狭い我が国では液化燃料を常圧低温下で貯蔵する岩盤内貯蔵施設の重要性が認識されている。

低温液化燃料の岩盤内貯蔵では、空洞周辺の岩盤が冷却されることにより、地下水の凍結が想定される。したがって、岩盤貯蔵施設の設計では間隙水の生成が岩石の力学物性に及ぼす影響を把握する必要がある。

一般に、飽和岩石を冷却すると間隙水の凍結により岩石の強度は増加し、その傾向は間隙率の大きい岩石ほど顕著であること¹⁾、特に、飽和含水凝灰岩においては、温度低下にともなう一軸圧縮強さの増加が著しいこと²⁾が知られている。また、間隙水凍結による岩石の強度発現

機構に関しては、冷却に伴う氷の強度上昇¹⁾や、間隙水の凍結の進行にともなう氷の膠着作用や荷重分担³⁾、間隙水の凍結の終了後における間隙を充填した氷と鉱物粒子の複合体としての特性³⁾、間隙を充填した氷がインクルージョン(介在物)として力学的に機能⁴⁾などが提案されている。

しかし、著者ら^{5),6)}が凍結した飽和岩石の熱拡散率の測定を行ったところ、飽和岩石の低温下における熱拡散率の温度依存性は、間隙率の小さい岩石ほど顕著であった。この結果は、間隙構造の違いにより間隙水凍結の有無が決定することを示唆している。したがって、冷却過程における飽和岩石の熱拡散率は、岩石全体の含水量(間隙率)ではなく、「凍結した間隙水(間隙氷)」の体積に支配されるとの結論を得た。

「熱拡散率の温度依存性は間隙率の小さい岩石ほど顕著である」と言う結論は、先に述べた「強度の増加は間隙率の大きい岩石ほど顕著である」とは間隙水の凍結が

[†] 原稿受理 平成 29 年 8 月 8 日 Received Aug. 8, 2017 ©2018 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 岩手大学理工学部 システム創成工学科社会基盤・環境コース 〒020-8551 盛岡市上田
Department of Systems Innovation Engineering, Faculty of science and Engineering, Iwate University, Ueda, Morioka 020-8551.

** 岩手大学理工学部 システム創成工学科社会基盤・環境コース 〒020-8551 盛岡市上田
Department of Systems Innovation Engineering, Faculty of science and Engineering, Iwate University, Ueda, Morioka 020-8551.

*** 岩手大学技術部 〒020-8551 盛岡市上田
Technical Office for Science and Engineering, Technical Division, Iwate University, Ueda, Morioka 020-8551.

力学・熱力学物性に及ぼす影響という観点において相反していると考えられる。したがって、低温下における飽和含水岩石の強度発現機構に関しても、間隙水凍結の有無、具体的には、凍結した間隙水（間隙氷）と凍結しない間隙水（不凍水）に分けて検討する必要があるという考えに至った。

低温下における飽和岩石の破壊機構に関して、間隙水を「間隙氷」と「不凍水」に分けて考察した先行研究としては、小玉ら⁷⁾や赤川⁸⁾の研究が挙げられる。小玉ら⁷⁾は、氷点下における岩石の強度増加の原因について「間隙氷の成長」と「不凍水の移動性の低下」に着目し、間隙氷については、その量よりも間隙氷と鉱物の接触面積が引張強さの増加に寄与している可能性があること、鉱物表面と間隙氷の間に位置する不凍水は、流体と言うよりはむしろ段階的かつ不連続に存在するために移動しづらく、き裂先端での応力腐食が生じにくい可能性があることを指摘している。また、不凍水の存在量は温度の低下と共に減少することが知られているが、そのメカニズムとして赤川⁸⁾は、土や岩石、モルタルの凍上機構に関する論文の中で、不凍水は土粒子より離れた部分から凍結することで、不凍水の厚さが温度の低下と共に薄くなることを述べている。

岩石の間隙構造は、鉱物粒子間に存在する間隙と粘土鉱物間に存在する間隙の2つに大きく分けることができる。前述の小玉らの研究では、鉱物粒子間に存在する間隙氷と不凍水に着目しているものの、粘土鉱物間に存在する間隙水については触れていない。同様に、赤川の研究においても土粒子骨格内（岩石の場合では鉱物粒子間）の不凍水しか言及していない。したがって、低温下における飽和岩石の破壊機構においては、特に粘土鉱物間に存在する間隙水の影響について、未だ不明な点が多いと言える。

本研究では、間隙水を「鉱物粒子間に存在する間隙水」と「粘土鉱物間に存在する間隙水」に分けて検討する必要があると仮定し、粘土鉱物や沸石の多い荻野凝灰岩とそれらが少ないベレア砂岩を供試岩石として、室温から-170℃までの温度範囲で一軸圧縮試験および圧裂引張試験を実施した。得られた結果より、異なる間隙構造に存在する間隙水が低温下における岩石の力学挙動に及ぼす影響について検討した。

2 実験方法

2・1 供試岩石

本研究では、粘土鉱物類の多い岩石として福島県喜多方市高郷町産の荻野凝灰岩を、粘土鉱物類が少ない岩石として米国産のベレア砂岩を供試岩石として用いた。

荻野凝灰岩は、主として長さ0.1~0.5mm程度の細粒火山ガラス片からなり、その大部分は沸石化（主にモルデン沸石であり斜ブチロ沸石を伴っている）および粘土鉱物化（主にモンモリロナイト）している、緑灰白色を呈するほぼ均質な中硬岩系の岩石である⁹⁾。一方、ベレア砂岩は、平均粒径0.1~0.2mm程度の粒子でやや角張って

Table 1 Properties of rock specimens.

		Ogino tuff	Berea sandstone
Dry density	(g/cm ³)	1.59	2.15
Saturated density	(g/cm ³)	1.90	1.34
Effective porosity	(%)	31.0	18.9

いるが、非常に淘汰の良い砂粒子で構成されている。主に石英からなり、少量の長石と方解石、微量の粘土鉱物（カオリナイト、イライト）を含む砂岩である^{10), 11)}。Table 1に供試岩石の物性値を示す。荻野凝灰岩の間隙率は31.0%、ベレア砂岩の間隙率は18.9%である。

供試体には、一軸圧縮試験用として直径35mm、長さ70mm（荻野凝灰岩）と直径31mm、長さ62mm（ベレア砂岩）の円柱形を、圧裂引張試験用として直径60mm、長さ30mm（荻野凝灰岩）と直径44mm、長さ22mm（ベレア砂岩）の円盤形をそれぞれ用いた。ここで、荻野凝灰岩とベレア砂岩とで供試体寸法が異なるのは、著者らが入手したベレア砂岩ブロックが小さく、先行して実験を行っていた荻野凝灰岩供試体と同寸法の供試体を必要本数作製することができなかったことによるものである。なお、供試体寸法の違いが本実験に及ぼす影響について検討した結果、ベレア砂岩と荻野凝灰岩の熱拡散率^{5), 6)}を用いた熱伝導解析より、荻野凝灰岩内部と同程度の冷却保持時間に取れば、ベレア砂岩内部の温度分布は十分に一樣になると言うことを確認している。

供試体作成にあたっては、岩石の異方性による測定結果のばらつきを避けるために、同一岩石ブロックから層面に直交するようにコアリングを行い、供試体の層面方向が同一になるように考慮した。

整形した供試体のうち半数は、85℃（荻野凝灰岩）、90℃（ベレア砂岩）の乾燥炉内で48時間以上乾燥させた後、シリカゲルを入れたデシケータ内で室温まで冷まし、残り半数は、真空容器中で24時間以上水中脱気した後、72時間以上水中養生した。それぞれの含水状態を、本研究における乾燥状態（飽和度約0%）と飽和含水状態（飽和度約100%）とした。

2・2 実験装置

載荷装置には油圧式万能材料試験機（東京衡機製造所：RUE-100型）を用いた。一軸圧縮試験・圧裂引張試験ともに、載荷荷重は試験機内蔵の荷重計を用いて計測した。また、一軸圧縮試験では、低温用ひずみゲージ（共和電業：KFL-5-120-C1-11）を供試体側面中央に軸ひずみと周ひずみ用それぞれ2枚ずつ合計4枚貼付け、対辺2アクティブゲージ法3線式を用いて各ひずみを計測した。計測された載荷荷重と軸ひずみ、周ひずみは、AD変換器を介してパーソナルコンピュータに記録した。

供試体の冷却には、熱伝導率測定用低温槽（ジャパンスーパーモティック社）を用いた。本装置の冷媒は液化窒素ボンベから導入した気化窒素ガスを用いる。本装置の冷却速度および昇温速度は、熱電対による恒温槽内部の温度測定と電磁弁による冷媒の流入量制御によって自由に

設定することが可能であり、低温槽内の温度保持は $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ の精度で制御可能である。

2・3 実験条件

試験実施時の供試体温度は、室温、 -10°C 、 -50°C 、 -100°C 、 -170°C の5段階とし、供試体の冷却速度は約 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ とした。なお、恒温槽内部が所定の温度になった後、1時間保持し、供試体内部の温度分布が一様になるのを待って試験に供した。供試体の冷却時には、供試体の含水状態の変化を避けるために供試体をフリーザーバッグへ入れて密封し、载荷試験時には、供試体をフリーザーバッグから取り出して行った。なお、供試体の温度変化を最小限に抑えるため、载荷盤の周囲を断熱材で作製した簡易低温槽で囲み、その内部を低温状態に保ち試験を行った。

一軸圧縮試験の载荷速度は約 0.3MPa/s 、圧裂引張試験の载荷速度は約 0.03MPa/s を目安として試験を実施した。しかし、本実験では手動式材料試験機を用いたことより

試験終了後に载荷速度を算出したところ、実際の载荷速度は荻野凝灰岩で約 0.5MPa/s （一軸圧縮試験）、約 0.01MPa/s （圧裂引張試験）、ベレア砂岩で約 0.3MPa/s （一軸圧縮試験）と約 0.03MPa/s （圧裂引張試験）であった。

一軸圧縮試験および圧裂引張試験は、各含水条件、温度条件につき3回ずつ実施した。ただし、乾燥凝灰岩の -170°C 、飽和凝灰岩の -10°C と -50°C については、一軸圧縮試験の結果にバラツキがみられたので5回ずつ実施した。

3 実験結果

3・1 温度と応力-ひずみ線図

Fig.1 に各供試体温度における荻野凝灰岩の応力-ひずみ線図を示す。同図には、各供試体温度について代表的な試験結果のみを示した。乾燥凝灰岩では最大応力と最大応力におけるひずみの値に違いは見られるものの、軸ひずみ・横ひずみ線図には大きな形状の違いは見られない。しかし、体積ひずみの破壊強度直前における膨張挙

Fig.1 Examples of stress-strain curve of Ogino tuff at various specimen temperatures. (a) dry, (b) wet

Fig.2 Examples of stress-strain curve of Berea sandstone at various specimen temperatures. (a) dry, (b) wet

動に注目すると温度の低下にともない膨張量が少なくなる, または膨張しなくなる傾向が確認される. 一方, 飽和凝灰岩では, -10 , -50°C と -100 , -170°C とで応力-ひずみ線図の形状が異なる. 具体的には, -10 , -50°C では一軸圧縮強さの増加にともない軸ひずみと横ひずみはともに増加する傾向を示すが, -100 , -170°C では圧縮強さの増加に対して軸ひずみと横ひずみが減少する傾向を示す. さらに, 体積ひずみの破壊強度直前における膨張挙動に注目すると, 温度の低下にともない膨張量が少なくなる, または膨張しなくなる傾向が確認される.

Fig.2 に各供試体温度におけるベレア砂岩の応力-ひずみ線図を示す. 同図には, 各供試体温度について代表的な試験結果のみを示した. 乾燥砂岩では最大応力に違いはあるものの, 軸ひずみ・横ひずみ・体積ひずみ線図には大きな形状の違いは見られない. 一方, 飽和砂岩では, 室温, -10°C と -100 , -170°C とで応力-ひずみ線図の形状が異なる. 具体的には, 室温, -10°C では乾燥砂岩と似た応力-ひずみ線図を示すが, -100 , -170°C では $0\sim 25\text{MPa}$ の载荷初期において凸の曲線を描いており, 乾燥砂岩とは異なる特徴的な挙動を示す. この挙動は, 凍結した間隙水(間隙氷)のヤング率が温度の低下にともない増加し¹²⁾, 载荷初期時のクラック閉塞段階における岩石のヤング率を超えたこと, その後, さらに応力が増し間隙氷の降

伏応力を超えたことで, 間隙氷が徐々に塑性流動的な挙動を示したことの複合的な理由によるものと考えられる. なお, 飽和砂岩の -50°C の応力-ひずみ線図は, 室温, -10°C と -100 , -170°C の中間的な挙動を示した.

3・2 温度と変形係数の関係

本研究では, 変形係数として一軸圧縮強さの 50%における応力-軸ひずみ曲線の接線勾配からヤング率を, 一軸圧縮強さの 50%における応力-軸ひずみ曲線の接線勾配と応力-横ひずみ曲線の接線勾配からポアソン比をそれぞれ求めた.

Fig.3 に供試体温度とヤング率の関係を示す. 同図の直線は飽和含水状態の 0°C 以下の平均値を直接つないだものの, 破線は乾燥状態の 0°C 以下の平均値に対して近似直線を当てはめたものもある. Fig.3(a)より乾燥凝灰岩のヤング率は, 供試体温度の低下にともない僅かに増加する傾向を示す. 一方, 飽和凝灰岩のヤング率は, 室温から -50°C にかけて減少し, その後 -170°C にかけて急激に増加する挙動を示す. その結果, -170°C における飽和凝灰岩のヤング率は乾燥凝灰岩の 3.8 倍となる. Fig.3(b)より乾燥砂岩のヤング率は, 供試体温度の低下にともない僅かに減少する傾向を示す. 一方, 飽和砂岩のヤング率は, 室温から -100°C にかけて減少し, その後 -170°C まで僅かに増加する挙動を示す. その結果, -170°C における飽和砂岩のヤング

Fig.3 Relationship between specimen temperature and Young's modulus. (a) Ogino tuff, (b) Berea sandstone

Fig.4 Relationship between specimen temperature and Poisson's ratio. (a) Ogino tuff, (b) Berea sandstone

率は乾燥砂岩の 0.77 倍となる。

Fig.4 に供試体温度とポアソン比の関係を示す。同図の直線は飽和含水状態の 0℃以下の平均値を直接つないだもの、破線は乾燥状態の 0℃以下の平均値に対して近似直線を当てはめたものがある。Fig.4(a)より乾燥凝灰岩のポアソン比は供試体温度を低下しても変化せずほぼ一定の値を示す。一方、飽和凝灰岩のポアソン比は、室温から-50℃にかけて増加し、その後-170℃にかけて減少する挙動を示す。その結果、飽和凝灰岩のポアソン比は室温と-170℃とでほぼ同じ値となる。Fig.4(b)より乾燥砂岩のポアソン比は、供試体温度の低下にともない減少する傾向を示す。一方、飽和砂岩のポアソン比は、室温から-50℃にかけて減少し、その後-100℃まで増加する挙動を示す。なお、室温、-10℃の飽和砂岩でポアソン比が 0.5 を超える結果が見られるが、これは一軸圧縮強さの 50%の載荷応力で既に正のダイレイタンスが生じたことが原因である。

3・3 温度と強度の関係

Fig.5 に供試体温度と一軸圧縮強さの関係を示す。同図の直線は飽和含水状態の 0℃以下の平均値を直接つないだもの、破線は乾燥状態の 0℃以下の平均値に対して近似直線を当てはめたものがある。Fig.5(a)より乾燥凝灰岩の圧縮強さは、供試体温度の低下にともないほぼ直線的に増加する傾向を示し、-170℃における圧縮強さは室温の約

1.5 倍まで増加する。一方、飽和凝灰岩の圧縮強さは、温度の低下にともない指数関数的に増加する傾向を示す。その結果、-170℃における飽和凝灰岩の圧縮強さは室温の約 10 倍、室温における乾燥凝灰岩と比較しても約 5 倍に増加する。Fig.5(b)より乾燥砂岩の圧縮強さは、供試体温度の低下にともない僅かに増加する挙動を示し、-170℃における圧縮強さは室温の約 1.05 倍までしか増加しない。一方、飽和砂岩の圧縮強さは、乾燥砂岩と同様の挙動を示すが、その強度増加は乾燥砂岩よりも大きい。その結果、-170℃における圧縮強さは室温の約 1.1 倍に増加する。しかし、-170℃における飽和砂岩の圧縮強さは、室温における乾燥砂岩の約 0.95 倍までしか増加しない。したがって、荻野凝灰岩で見られた飽和凝灰岩の圧縮強さが乾燥凝灰岩よりも大きくなる挙動は、ベレア砂岩では-170℃まで冷却しても見られない。

Fig.6 に供試体温度と圧裂引張強さの関係を示す。同図の直線は飽和含水状態の 0℃以下の平均値を直接つないだもの、破線は乾燥状態の 0℃以下の平均値に対して近似直線を当てはめたものがある。Fig.6(a)より乾燥凝灰岩の引張強さは、供試体温度の低下にともないほぼ直線的に増加する傾向を示し、-170℃における引張強さは室温の約 1.5 倍まで増加する。一方、飽和凝灰岩の引張強さは、室温から-170℃まで上に凸の曲線を描きながら緩やかに増

Fig.5 Relationship between specimen temperature and uniaxial compressive strength. (a) Ogino tuff, (b) Berea sandstone

Fig.6 Relationship between specimen temperature and indirect tensile strength. (a) Ogino tuff, (b) Berea sandstone

加する挙動を示す。その結果、 -170°C における引張強さは室温の約 6 倍、室温における乾燥凝灰岩と比較しても約 2.5 倍に増加する。Fig.6(b)より乾燥砂岩の引張強さは、供試体温度の低下にともない僅かに増加する挙動を示し、 -170°C における圧縮強さは室温の約 1.04 倍までしか増加しない。一方、飽和砂岩の変形係数は、室温から -170°C まで上に凸の曲線を描きながら緩やかに増加する挙動を示す。その結果、室温において乾燥砂岩の半分程度である飽和砂岩の引張強さは、 -10°C において乾燥砂岩と同程度にまで増加し、 -170°C において乾燥砂岩の約 1.6 倍に達する結果となる。

4 考 察

4・1 間隙構造の観察

冷却による飽和岩石の強度増加は、間隙水の凍結による作用と考えられている^{1)4), 7), 8)}。そこで、供試岩石の間隙構造を調べるため、荻野凝灰岩とベレア砂岩について電子顕微鏡観察を行った。Fig.7に供試岩石のSEM画像を示す。荻野凝灰岩の間隙構造は、粘土鉱物間の間隙 (nm オーダーの細孔) が多い。また、今井ら¹³⁾の透水試験結果より、間隙率は約 27%と大きいにも関わらず透水係数は 10^{-9}cm/s オーダーと小さいことから、間隙径は小さいといえる。一方、ベレア砂岩の間隙構造は、造岩鉱物間の間隙 (μm オーダーの孔) が多い。また、透水試験結果¹³⁾より、間隙率は約 17%と小さいにも関わらず透水係数は 10^{-5}cm/s オーダーと比較的大きいことから、間隙径は

大きいといえる。

一般に、粘土鉱物に保有される水は、吸着水・層間水・沸石水・結合水・構造水の 5 つに大きく分けることができる。そのうち、粘土鉱物内部を移動する水は吸着水と層間水であると思われる¹⁴⁾。そこで、本研究では、間隙水を「粘土鉱物間に存在する間隙水」=「層間水」と「鉱物粒子間に存在する間隙水」=「バルク水」とに分けて、飽和含水岩石の低温下での力学特性に及ぼす間隙水の影響を考察した。

4・2 鉱物粒子間に存在する間隙水が力学特性に及ぼす影響

低温下における飽和ベレア砂岩の熱拡散率測定結果⁶⁾からも、バルク水は凍結していると考えてよい。そこで、飽和ベレア砂岩を粒子分散系複合材料と仮定し、間隙水の凍結と飽和砂岩の強度増加の関係について単純な数値計算を試みた。なお、数値計算に当たっては飽和砂岩を以下のように仮定した。①複合材料の母材を造岩鉱物、粒子を間隙水とする。②造岩鉱物の強度は常温における飽和岩石の強度とする。③常温における飽和岩石の強度に及ぼす間隙水圧の影響は無いものとする。④造岩鉱物の強度には温度依存性が無いものとする。⑤間隙水はすべて間隙水とする。⑥複合材料の強度に対して複合則は単純には適用できないが、ここでは複合材料の上界を与える Voigt 則が成立するものとする。

$$S_{\text{wet}} = \phi S_{\text{ice}} + (1 - \phi) S_{\text{mineral}} \quad (1)$$

$$S_{\text{mineral}} = S_{\text{wet, room}} / (1 - \phi) \quad (2)$$

ここで、 S_{wet} 、 S_{ice} 、 S_{mineral} 、 $S_{\text{wet, room}}$ はそれぞれ飽和含水岩石、間隙水、造岩鉱物、常温での飽和含水岩石の強度、 ϕ は間隙率 (間隙水の占める割合) である。なお、不凍水は土粒子より離れた部分から凍結することで、不凍水の厚さが温度の低下と共に薄くなる (間隙水が増える) ことが知られているが⁸⁾、本研究では、間隙水はすべて凍結しているとモデルを単純化し、間隙水の温度依存性に着目して検討を行った。

飽和ベレア砂岩の間隙水の圧縮強さと引張強さを Table 2 に示す。Table 2(a)より間隙水は氷点下に冷却することで凍結し、間隙水として圧縮強さを発現する。その後、間隙水の圧縮強さは温度の低下にともない増加する傾向を示す。

Arakawa and Maeno¹²⁾は一軸圧縮下における多結晶氷の力学強度に関する研究の中で、直径約 20mm、長さ約 40mm、平均粒径 0.9mm の多結晶氷供試体の圧縮強さについて、凍結時 (-10°C) で約 3MPa であること、多結晶氷の圧縮強さは温度の低下にともない増加 (-170°C で約 70MPa) することを報告している。この多結晶氷とベレア砂岩の間隙水とでは、氷の粒子径が異なるため、多結晶氷と間隙水の圧縮強さを直接比較することはできないが、数値計算より算出した間隙水の圧縮強さと温度の関係は、多結晶氷のそれと調和的であると言える。

また、Table 2(b)より間隙水の引張強さは、圧縮強さと同様に温度の低下にともない増加する傾向を示し、 -170°C

Fig.7 Scanning electron microscopy images of rock pore structure.
(a) Ogino tuff, (b) Berea sandstone

Table 2 Result of numerical calculation. (Berea sandstone)

(a) Compressive Strength				
Temp. (°C)	ϕ (%)	Wet rock Sc (MPa)	Mineral Sc (MPa)	Pore ice Sc (MPa)
room	19	60.2	74.3	0
-10	19	60.5	74.3	1.8
-50	19	61.9	74.3	8.8
-100	19	63.5	74.3	17.5
-170	19	65.9	74.3	29.8

(b) Tensile strength				
Temp. (°C)	ϕ (%)	Wet rock St (MPa)	Mineral St (MPa)	Pore ice St (MPa)
room	19	2.8	3.4	0
-10	19	4.2	3.4	7.7
-50	19	5.9	3.4	16.3
-100	19	6.5	3.4	19.8
-170	19	7.2	3.4	23.4

では圧縮強さとほぼ同じ 23.4MPa にまで達している。しかし、多結晶氷の引張強さは圧縮強さのおよそ $1/10^{16}$ であることから、本数値計算では間隙氷の引張強さを過大評価していると考えられる。このことは、間隙氷の量や強度の温度依存性よりも、むしろ間隙氷と鉱物の接触面積が引張強さの増加に寄与していること⁷⁾を考慮する必要があると言える。

以上の結果より、冷却による飽和ベレア砂岩の強度発現機構に関して、圧縮強さは間隙水の凍結にともなう荷重分担効果と、その後の冷却にともなう氷の強度上昇で説明可能であること、引張強さはそれらだけでは説明できないことが示唆された。

4・3 粘土鉱物間に存在する間隙水が力学特性に及ぼす影響

層間水は、主な粘土鉱物は板状結晶であることから、ガラス板中の水（すきまの水）と同様にバルク水と異なる性質を持つことが予想される¹⁴⁾。すきまの水が有するバルク水とは異なる性質としては、すきまの水の氷点は、ガラス板間距離 1 μ m で-100°C以下まで低下すること¹⁷⁾、すきまの水はバルク水とは異なる粘度を示すこと、すきまの水にはデリャーギンの分離圧（2枚の板を引き剥がすために必要な力）を生じさせること¹⁸⁾、などが知られている。さらに、低温下における飽和荻野凝灰岩の熱拡散率測定結果⁵⁾や、低温下における飽和粘土鉱物の変調示差走査熱量測定結果¹⁵⁾より、層間水は-100°Cまで冷却しても凍結していない可能性が示唆されている。以上のことから、本研究においても荻野凝灰岩の層間水は、凍結していない可能性が考えられる。

仮に、荻野凝灰岩についても粒子分散系複合材料を仮定し、ベレア砂岩と同様の数値計算を行った結果を Table 3 に示す。層間水が凍結したと仮定すると、間隙氷が受け持つ圧縮強さは-170°Cで 800MPa 以上となり、多結晶氷の圧縮強さ約 70MPa (-170°C)¹²⁾を大きく超えてしまう。したがって、本数値計算の結果からでは、飽和凝灰岩の冷却による強度発現機構、特に圧縮強さに関しては、層間水

Table 3 Result of numerical calculation. (Ogino tuff.)

(a) Compressive Strength				
Temp. (°C)	ϕ (%)	Wet rock Sc (MPa)	Mineral Sc (MPa)	Pore ice Sc (MPa)
room	31	29.1	42.2	0
-10	31	32.8	42.2	11.9
-50	31	57.0	42.2	90.0
-100	31	117.7	42.2	285.8
-170	31	287.1	42.2	832.3

(b) Tensile strength				
Temp. (°C)	ϕ (%)	Wet rock Sc (MPa)	Mineral Sc (MPa)	Pore ice Sc (MPa)
room	31	3.1	4.5	0
-10	31	5.8	4.5	8.7
-50	31	9.4	4.5	20.3
-100	31	14.6	4.5	37.1
-170	31	19.4	4.5	52.6

の凍結にともなう荷重分担効果のみで説明することは難しいと思われる。

以上の検討結果より、冷却による飽和荻野凝灰岩の強度発現機構に関しては、層間水の冷却による強度発現機構を本研究では明らかにすることができなかった。したがって、今後は他の研究者が提案している力学モデルについて検討する必要がある。

5 結 言

本研究では、間隙率・間隙構造の異なる岩石として、ベレア砂岩（間隙率 18.9%）と荻野凝灰岩（31.0%）を供試岩石として用い、「鉱物粒子間に存在する間隙水」と「粘土鉱物間に存在する間隙水」の違いが低温下における飽和含水岩石の力学的特性について検討した。得られた知見を要約すると以下の通りである。

飽和荻野凝灰岩では、-10、-50°Cにおいて一軸圧縮強さの増加にともない軸ひずみ、横ひずみともに増加する傾向を示すが、-100、-170°Cでは圧縮強さの増加に対して軸ひずみ、横ひずみが減少する傾向を示す。飽和荻野凝灰岩の一軸圧縮強さは、乾燥凝灰岩の線形的に増加する傾向とは異なり、供試体温度の低下にともない指数関数的に増加する。その結果、-170°Cにおける圧縮強さは室温における乾燥凝灰岩の約 5 倍にまで増加する。

飽和ベレア砂岩の応力-ひずみ線図は、室温、-10°Cにおいて乾燥砂岩と同様の線図を描くが、-100、-170°Cでは載荷初期（0～25MPa）において、上に凸の曲線を描く特徴的な挙動を示す。飽和ベレア砂岩の一軸圧縮強さは、供試体温度の低下にともない乾燥砂岩と同様にほぼ線形的に増加するが、その増加の度合いは乾燥砂岩よりも大きい。しかし、-170°Cにおける圧縮強さは、室温における乾燥砂岩を超えることはない。

低温下における飽和岩石の強度発現機構に及ぼす間隙水の影響は、「鉱物粒子間に存在する水」＝「バルク水」と「粘土鉱物間に存在する間隙水」＝「層間水」に分けて検討する必要がある。

飽和ベレア砂岩の強度発現機構は、「バルク水の凍結による荷重分散効果」と「バルク水凍結後の冷却による氷の強度増加」の相互作用により概ね説明できると考えられる。一方、飽和荻野凝灰岩の強度発現機構は、層間水が凍結していないことが想定されることから、凍結にともなう荷重分担効果のみで説明することは難しい。

したがって、粘土鉱物を含有する飽和岩石の冷却による強度発現機構について、本研究において明らかにすることはできず、検討課題として残った。

本研究は JSPS 科研費 JP26420477 の助成を受けて実施した。また、実験を実施するにあたり岩手大学技術部阿部正良技術職員と元岩手大学工学部田頭勇樹氏の協力を得た。さらに、本稿の改良に当たり貴重なご指摘、ご意見を2名の匿名査読者から頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) Y. Inada, N. Kinoshita, S. Seki, T. Matsuo, A. Nariyuki and K. Ochi, "A few remarks on thermal behavior of rock mass affected by low temperature", Doboku Gakkai Ronbunshu, Vol.1996, No.547, pp.211-220 (1996).
- 2) Japan Society of Civil Engineers "Thermally-induced engineering problems in underground rock structures -properties and analysis-", p.36 (2006) Japan Society of Civil Engineers.
- 3) N. Kinoshita, S. Akagawa, and A. Denda, "Mechanical properties of soft rocks under extreme temperature conditions", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.45, No.2, pp.241-248 (1996).
- 4) J. Kodama, T. Goto and Y. Fujii, "Strength and deformation of frozen rocks", Journal of MMIJ, Vol.124, p.733-740 (2008).
- 5) N. Kamoshida, M. Okawara, K. Yoshida and M. Abe, "Measuring thermal diffusivity of frozen rock core by using the optional heating method", Journal of MMIJ, Vol.129, p.492-498 (2013).
- 6) N. Kamoshida and M. Abe, "Relationship between thermal diffusivity and effective porosity of rocks under low temperatures", Proceedings of MMIJ, Vol.2, No.2, (2015).
- 7) N. Kodama, Y. Fujii, S. Akagawa and Y. Ishijima, "Changes in mechanical properties and deformation behaviors of rocks due to freezing of pore water", Doboku Gakkai Ronbunshu C, Vol.63, No.1, p.24-33 (2007).
- 8) S. Akagawa, "Frost heave process of porous materials and its macroscopic ice lens initiation mechanism", Journal of the Japanese Society of Snow and Ice, Vol.66, No.2, p.149-161 (2004).
- 9) M. Furuzumi, "Doctoral dissertation", p.22 (1988) Tohoku University.
- 10) Y. Nara, K. Morimoto, T. Yoneda and K. Kaneko, "Effect of the humidity on subcritical crack growth in sandstone", Journal of MMIJ, Vol.125, p.138-145 (2009).
- 11) Y. Fujii and M. Takahashi, "Geology, sedimentary environment and physical properties of berea sandstone", Journal of the Japan Society of Engineering Geology, Vol.56, No.3, pp.105-109 (2015).
- 12) M. Arakawa and N. Maeno, "Mechanical strength of polycrystalline ice under uniaxial compression", Cold Regions Science and Technology, Vol.26, pp.215-229 (1997).
- 13) T. Imai, N. Kamoshida, S. Yamaguchi and F. Sugimoto, "New permeability test based on falling head method in rock core", International Journal of the Society of Materials Engineering for Resources, Vol.17, No.1, pp.78-85 (2010).
- 14) T. Sato, "Hydration and structure of adsorbed water on clay minerals", Journal of the Mineralogical Society of Japan, Vol.25, No.3, pp.99-110 (1996).
- 15) T. Kozłowski, "Modulated differential scanning calorimetry (MDSC) studies on low-temperature freezing of water adsorbed on clays, apparent specific heat of soil water and specific heat of dry soil", Cold Regions Science and Technology, Vol.78, pp.89-96 (2012).
- 16) N. Maeno and M. Fukuda, "Seppyo no kouzou to bussei", pp.117-119 (1986) Kokon Syoin.
- 17) T. Hori, "On the supercooling and evaporation of thin water films I", Low temperature science, Series A, Physical sciences, Vol.15, pp.33-42, (1956).
- 18) H. Uedaira, "Mizu toha nanika, mikuro ni mita sono furumai", p.114 (1977) Kodansha.