

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420477

研究課題名(和文)凍結過程における岩石-間隙水系の熱拡散率変化挙動に及ぼす間隙構造の影響

研究課題名(英文)Effect of Pore Structure on the Thermal Diffusivity of Rock-Water System under Freezing Process

研究代表者

鴨志田 直人 (KAMOSHIDA, Naoto)

岩手大学・理工学部・助教

研究者番号：00400177

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、凍結過程における飽和含水岩石の熱拡散率に及ぼす間隙のサイズ・形状の影響について検討した。その結果、飽和含水岩石の熱拡散率に及ぼす間隙水の影響は、「粘土鉱物中の水」と「鉱物粒子間の水」で異なり、鉱物粒子間に存在する水の凍結は飽和岩石の熱拡散率温度依存性に大きな影響を及ぼすが、粘土鉱物に保有される水(具体的には、吸着水、層間水、および体質水)は熱拡散率の温度依存性に関与しないことを明らかにした。さらに、粘土鉱物に保有される水の凍結の有無について検討を行ったが、それについては明確な結論を得ることができなかった。

研究成果の概要(英文)：In this study, we examined the effects of pore structure on the thermal diffusivity of water-saturated rock under freezing process and obtained the following findings. The effect of pore water on the thermal diffusivity of water-saturated rocks is different in "water in clay minerals" and "water between mineral particles." In other words, the freezing of water between mineral particles increases the diffusivity, whereas the water in clay minerals (i.e., adsorbed water, interlayer water, and constitution water) does not affect the diffusivity at all. Furthermore, we examined the presence/absence of freezing of water in clay minerals under low temperature. As a result, it could not get a clear conclusion.

研究分野：土木工学・地盤工学・岩石力学

キーワード：岩石-間隙水系 間隙構造 熱拡散率 極低温 任意加熱法 粒子分散系複合材料

1. 研究開始当初の背景

低温液化燃料 (例えば、液化天然ガス-160°C, 液化水素-252, ジメチルエーテル-25) の岩盤内貯蔵方式や、積雪寒冷地における岩盤斜面の長期安定性などにおいて必要不可欠である低温下における岩盤の熱伝導解析では、水や氷が内在する岩盤の熱物性値 (熱伝導率, 熱拡散率, 比熱) を把握する必要がある。しかし、本研究課題で対象とする低温下における岩石の熱拡散率については報告が少なく、飽和岩石の凍結過程と熱拡散率の変化挙動は未だに明らかとされていない。その原因の1つとして、低温下での岩石の熱拡散率測定は、試験片の形状, 加熱条件, 断熱条件などの制約条件が厳しく, 測定が困難で測定者の熟練を要することが挙げられる。

研究代表者は、これまでの研究において凍結した飽和岩石の熱拡散率温度依存性を検討するため、間隙構造の異なる2つの岩石で-100 から 20 の温度範囲の熱拡散率を測定した¹⁾。その結果、飽和来待砂岩の温度と熱拡散率の関係は、全間隙水が一度に凍結するのではなく、孔 (μm オーダー) から細孔 (nm オーダー) へと大きい間隙の間隙水から順に凍結すると考えられること (図1), 来待砂岩より間隙率が大きく細孔が大部分を占める荻野凝灰岩では、熱拡散率に変化がみられないこと (図2), 岩石を粒子分散系複合材料と仮定して熱拡散率の温度依存性を検討した結果、来待砂岩の熱拡散率は、概ね粒子分散系で仮定できるが、0~50 の増加部分と-50~-90 の一定部分において、実測値と推定値とで異なる挙動を示すこと、荻野凝灰岩の熱拡散率では、単純な粒子分散系で仮定できないこと (図3) を明らかとした。以上の結果より、温度低下にともなう岩石の熱拡散率挙動は、間隙のサイズ形状による間隙水の凍結温度低下の影響を受けるものと予想される。

2. 研究の目的

研究代表者はこれまでの研究において、温度低下にともなう岩石の熱拡散率挙動は、間隙のサイズ形状による間隙水の凍結温度低下の影響を受けるものと予想している。

本研究課題では、凍結過程における飽和岩石の熱拡散率に及ぼす間隙のサイズ・形状の影響を明らかにすることを目的とし、以下に示す2つの実験を行った。

(1) 凍結過程における飽和岩石の熱拡散率に及ぼす間隙構造の影響

数値計算で予測された熱拡散率の変化挙動 (図3) を実証するには、粒子分散系模擬岩石と同様の特性 (凍結温度の低下が小さいサイズの空隙径でかつ空隙径のバラツキが少ない) を有する岩石を供試岩石として熱拡散率を測定すればよい。

本実験では、始めに μm オーダーの空隙を

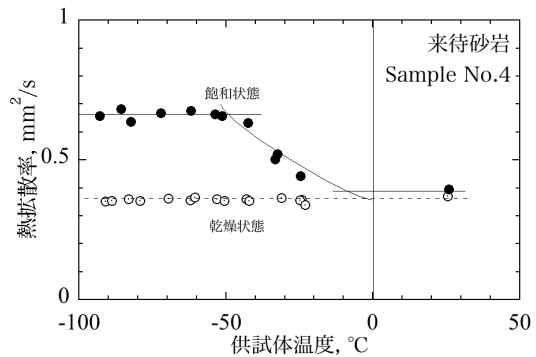


図1 来待砂岩の供試体温度と熱拡散率の関係

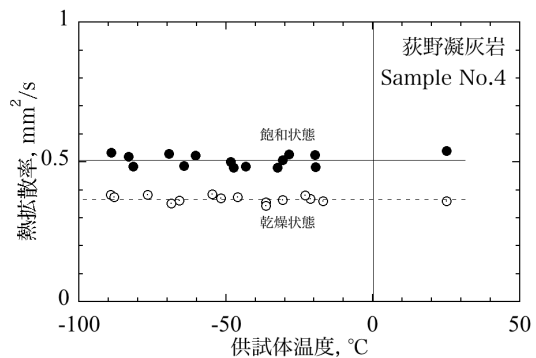


図2 荻野凝灰岩の供試体温度と熱拡散率の関係

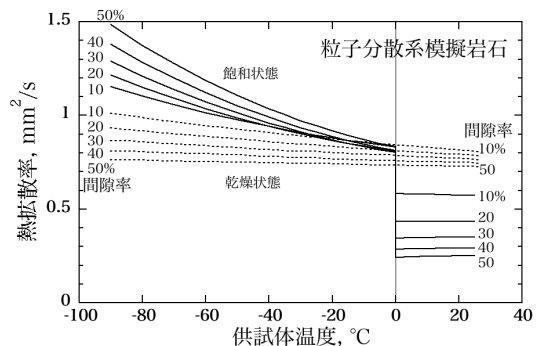


図3 粒子分散系模擬岩石の数値計算結果

主とし、間隙率が異なるベレア砂岩と姫神花崗岩の熱拡散率を、任意加熱法を用いて 0 から-100 の温度範囲で測定した。次に、測定したベレア砂岩と姫神花崗岩の熱拡散率と過去に測定した nm オーダーの間隙を主とする荻野凝灰岩と μm オーダーの間隙と nm オーダーの間隙が存在する来待砂岩の熱拡散率とを比較し、間隙率・間隙構造の異なる岩石の凍結過程における熱拡散率の変化挙動について検討した。

(2) 荻野凝灰岩の間隙水凍結温度の推定

飽和荻野凝灰岩では、常温から-90 へと温度を低下させても熱拡散率には温度依存性は見られなかった。この結果からは、凝灰岩の間隙水が凍結しなかったことで熱拡散率は変化しなかったのか、間隙水は凍結したのにも関わらず熱拡散率は変化しなかったのかを判断することはできない。したがって、飽和荻野凝灰岩の熱拡散率を考察する上で

は、間隙水凍結の有無を明確にすること、また、凍結するのであればその凍結温度を把握することが必要となる。

本実験では、氷点下から極低温下まで冷却した飽和荻野凝灰岩を供試体として一軸圧縮試験・圧裂引張試験を行った。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することが知られており、温度の低下にともなう岩石の力学的性質の変化挙動を調べることは、間接的に間隙水の凍結状態を知る手立てになるのと考えたからである。

3. 研究の方法

(1) 供試岩石

本研究では、間隙構造の異なる供試岩石としてベレア砂岩（アメリカ合衆国オハイオ州産、間隙率 13%）、姫神花崗岩（岩手県盛岡市玉山産、間隙率 1%）、来待砂岩（島根県松江市宍道産、間隙率 20%）、荻野凝灰岩（福島県喜多方市高郷産、間隙率 29%）を用いた。

整形後の供試体は、85 の乾燥炉内で 48 時間以上乾燥させた後、室温まで冷ましたものを本研究における乾燥状態とし、この乾燥状態にある供試体を真空容器中で 48 時間以上水中脱気養生したものを含む状態として実験に供した。

(2) 熱拡散率の測定

本実験では、熱拡散率の非定常測定法の 1 つである任意加熱法^{2),3)}を用いて、ベレア砂岩、姫神花崗岩の熱拡散率を 0～-100 の温度範囲において測定を行った。なお、来待砂岩、荻野凝灰岩の熱拡散率については過去に測定した結果¹⁾を用いた。

岩石供試体は直径 35mm、長さ 70mm の円柱形とし、端面の中心と中心から約 10mm の位置の 2 カ所に直径 3mm、深さ 35mm（供試体長さ半分）の温度測定孔を空けて、試験に供した。

(3) 一軸圧縮試験・圧裂引張試験

本実験では、氷点下から極低温下まで冷却した飽和荻野凝灰岩を供試体として一軸圧縮試験・圧裂引張試験を行った。

供試体は、一軸圧縮試験用として直径 35mm、長さ 70mm の円柱形を、圧裂引張試験用として直径 60mm、長さ 30mm の円柱形をそれぞれ用いた。

載荷装置には万能材料試験機を用い、一軸圧縮試験では低温用ひずみゲージを供試体側面中央に貼付け、対辺 2 アクティブゲージ法 3 線式を用いて軸・周ひずみを計測した。供試体の冷却には、熱伝導率測定用低温槽を用いた。

4. 研究成果

(1) ベレア砂岩と姫神花崗岩の熱拡散率測定結果

図 4 にベレア砂岩の供試体温度と熱拡散

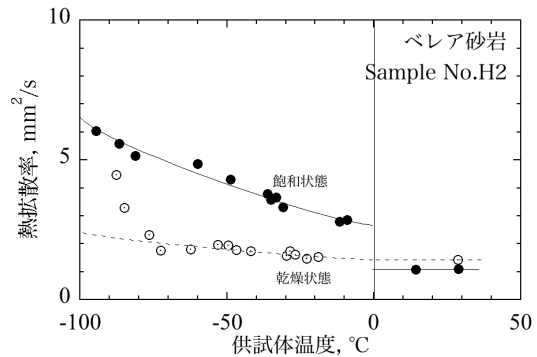


図 4 ベレア砂岩の供試体温度と熱拡散率の関係

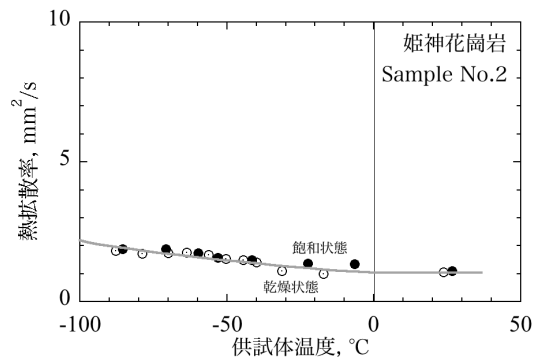


図 5 姫神花崗岩の供試体温度と熱拡散率の関係

率の関係を示す。同図には、常温下で測定した供試体の熱拡散率も合わせて示した。乾燥ベレア砂岩の熱拡散率は、常温(約 1.4mm²/s)、から-20 (約 1.5mm²/s)に冷却しても大きな変化は見られない。さらに-20°Cから-75 へ冷却すると熱拡散率は 2.3mm²/s へと微増する傾向を示した。一方、飽和ベレア砂岩の熱拡散率は、常温(30、15)では約 1.1mm²/s で変化しないが、-10 に冷却すると約 2.8mm²/s に急増した。さらに-10°Cから-95 へ冷却すると、熱拡散率は 6.0mm²/s まで増加する傾向を示した。飽和ベレア砂岩において、常温から-10 かけてみられた熱拡散率の急増は、間隙水の凍結による影響、-10 から-95 にかけてみられた熱拡散率の増加は、乾燥ベレア砂岩の熱拡散率の変化に間隙水の熱拡散率の変化挙動が加わったものだと考えられる。

図 5 に姫神花崗岩の供試体温度と熱拡散率の関係を示す。同図には、常温下で測定した供試体の熱拡散率も合わせて示した。乾燥姫神花崗岩の熱拡散率は、常温(約 1.1mm²/s)から-20 (約 1.0mm²/s)へ冷却しても大きな変化は見られない。さらに-20°Cから-85 (約 1.8mm²/s)へと冷却すると熱拡散率は微増する傾向を示した。一方、飽和姫神花崗岩の熱拡散率は、乾燥姫神花崗岩と同様の傾向を示した。飽和姫神花崗岩の間隙率は約 1%と小さいことから、熱拡散率に及ぼす間隙水凍結の影響は非常に小さいと考えられる。

(2) 凍結過程における飽和岩石の熱拡散率

に及ぼす間隙構造の影響

ベレア砂岩と荻野凝灰岩のSEM画像を図6、図7にそれぞれ示す。間隙率が小さく、透水係数が大きいベレア砂岩は、図6より造岩鉱物間の間隙(μm オーダーの孔)が多いことが確認できる。また、図4より飽和ベレア砂岩の熱拡散率は0以下に冷却すると急増する挙動を示す。したがって、鉱物粒子間に存在する水の凍結は飽和岩石の熱拡散率温度依存性に大きな影響を及ぼすと言える。

一方、間隙率が大きく、透水係数が小さい荻野凝灰岩は、図7より粘土鉱物間の間隙(nmオーダーの細孔)が多いことが確認できる。また、図2より飽和荻野凝灰岩の熱拡散率は-100に冷却しても変化を示さない。したがって、粘土鉱物に保有される水の冷却は飽和岩石の熱拡散率温度依存性に全く影響を及ぼさないとと言える。

以上で示したベレア砂岩と荻野凝灰岩の結果より、凍結過程における飽和岩石の熱拡散率に及ぼす間隙構造の影響については、「鉱物粒子間に存在する水」と「粘土鉱物に保有される水」の2つに分けて議論する必要があること、「粘土鉱物に保有される水」は熱拡散率の温度依存性に関与しないことが示された。そこで、この理論が造岩鉱物間の間隙と粘土鉱物間の間隙の両方を有する岩石においても成立するのか、飽和来待砂岩の結果を用いて検証を行った。

図8に来待砂岩のSEM画像を示す。間隙率がベレア砂岩以上、荻野凝灰岩以下にあり、透水係数が荻野凝灰岩と同程度である来待砂岩は、図8より間隙の大多数が粘土鉱物間の間隙であり、所々に少数の造岩鉱物間の間隙が存在することが確認できる。その結果、飽和来待砂岩の熱拡散率は0以下に冷却すると徐々に増加する挙動を示す(図1, 0から-50の温度範囲)。一般に、水はその体積が小さくなると凍結温度が低下することが知られている。したがって、来待砂岩で確認される熱拡散率の緩やかな増加は、造岩鉱物間の間隙サイズのバラツキを用いることで説明することが可能である。一方、飽和来待砂岩の-90における熱拡散率は、飽和ベレア砂岩の1/10程度しか増加しない。これは、来待砂岩の間隙の大多数が粘土鉱物間の間隙であり、粘土鉱物間の間隙水凍結は飽和岩石の熱拡散率温度依存性に全く影響を及ぼさないことが原因であると、間隙率に対して熱拡散率の増加が小さいことについても説明することが可能である。

以上のことより、間隙水を「鉱物粒子間に存在する水」と「粘土鉱物に保有される水」に分けること、「鉱物粒子間に存在する水」に関しては粒子分散系複合材料として、凍結過程における飽和岩石の熱拡散率を推定可能であることを明らかにした。

(3) 荻野凝灰岩の間隙水凍結温度の推定 各供試体温度における荻野凝灰岩の一軸

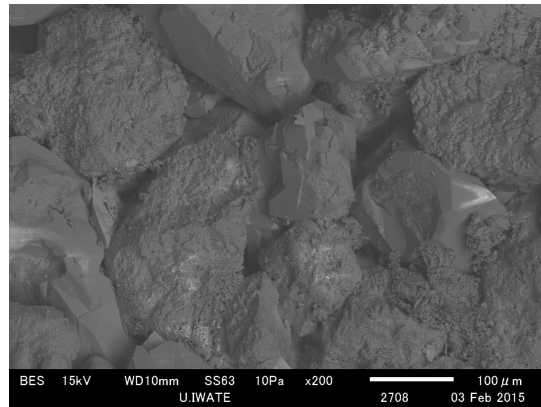


図6 ベレア砂岩の顕微鏡画像

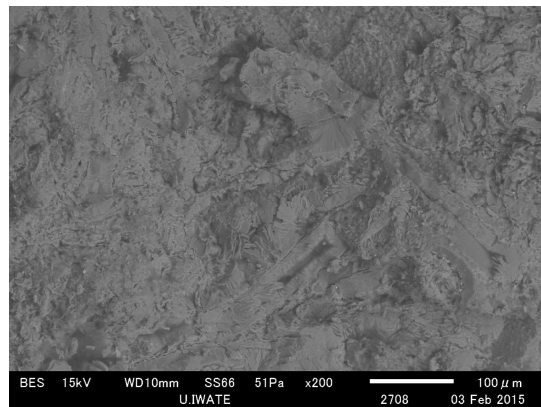


図7 荻野凝灰岩の顕微鏡画像

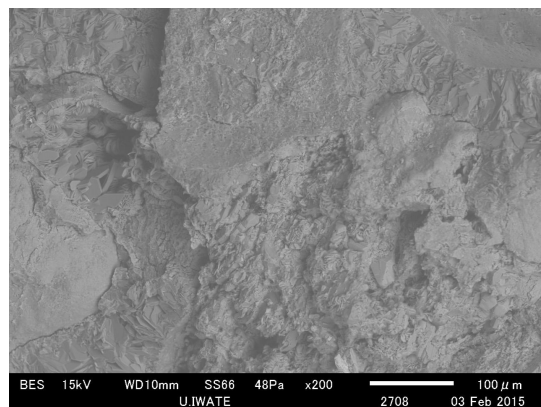


図8 来待砂岩の顕微鏡画像

圧縮強さを図8に示す。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し、-170における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。

図9に供試体温度とヤング率の関係を示す。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にかけて減少し、その後-170にかけて急激に増加する挙動を示す。その結果、-170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。

図 10 に供試体温度とポアソン比の関係を示す。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 でほぼ同じ値となる。

各供試体温度における荻野凝灰岩の圧裂引張強さを図 11 に示す。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加する挙動を示し、-170 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。

以上の結果より、荻野凝灰岩における間隙水凍結の有無を考察する。

低温下における湿潤凝灰岩の圧縮強さ・引張強さの変化(図9・図12)より、温度の低下にともない間隙水は凍結していると考えられるが、この結果からは間隙水の凍結温度を推定することは難しい。しかし、変形特性(図10・図11)をみると、-50 を境にヤング率は減少から増加へ、ポアソン比は増加から減少へとそれぞれ転じており、この変化傾向は間隙水の凍結が原因と考えられる。したがって、間隙水の凍結温度は-50 付近であると推定することができる。

しかし、飽和岩石と乾燥岩石の強度差を間隙氷が受け持つ強度と仮定すると、飽和荻野凝灰岩の強度差は-170 で約 200MPa にまで達している。一般に、多結晶氷の圧縮強さは 10MPa 程度⁴⁾であることが知られており、飽和凝灰岩の圧縮強さの増加のメカニズムについては、「粘土鉱物に保有される水」の凍結にその原因を求めることはできず、粘土鉱物そのものが変質している可能性も示唆される。

さらに、飽和凝灰岩は間隙率が高いにも関わらず、熱拡散率は温度依存性を示さないこと¹⁾、粘土鉱物内の吸着水・層間水は、ペントナイトの結果ではあるが、-70 以下に冷却しても不凍水が残存するという報告⁵⁾もあることから、「粘土鉱物に保有される水」は凍結していない可能性も否定はできない。

したがって、-50 付近で凍結したと推定された間隙水とは、荻野凝灰岩に存在する、熱拡散率温度依存性に影響を及ぼさない程度の極少量の「鉱物粒子間に存在する水」が、-50 までに凍結したと考えることが、現時点では妥当である。

以上の考察より、荻野凝灰岩における「粘土鉱物に保有される水」の凍結の有無については、明確な結論を得ることができなかった。したがって、今後の検討課題である。

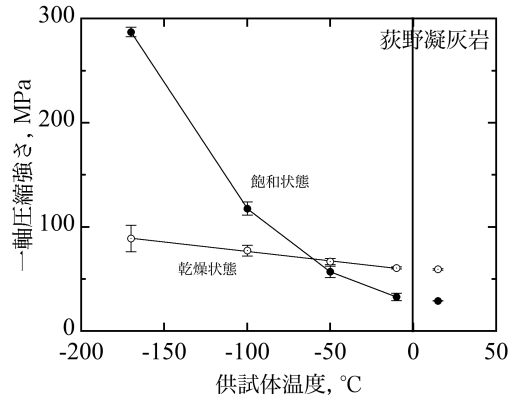


図9 供試体温度と一軸圧縮強さの関係

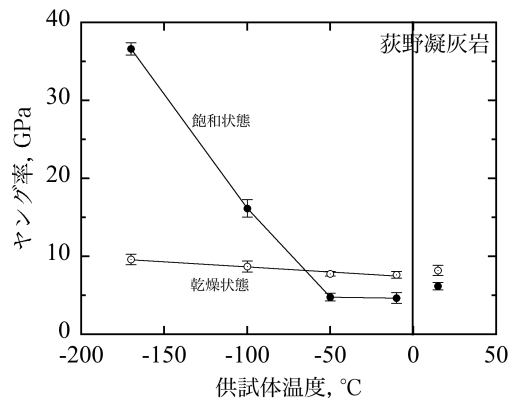


図10 供試体温度とヤング率の関係

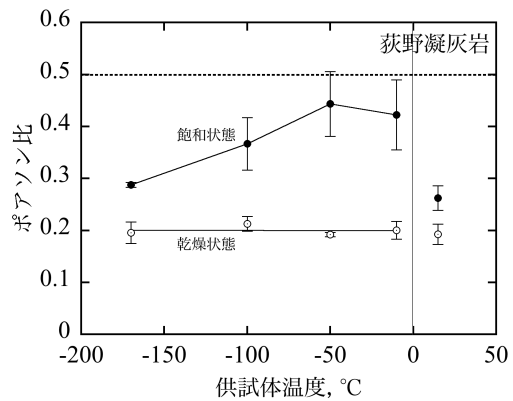


図11 供試体温度とポアソン比の関係

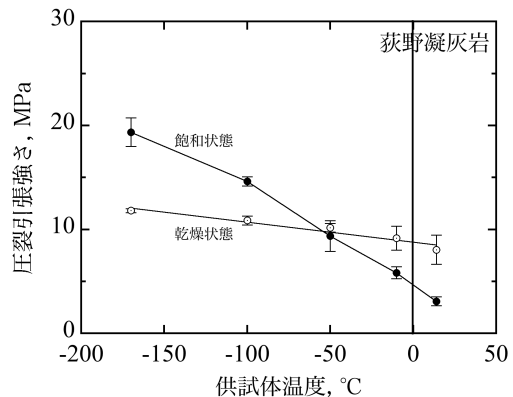


図12 供試体温度と圧裂引張強さの関係

<引用文献>

- 1) 鴨志田直人, 大河原正文, 吉田恭平, 阿部正良: 凍結状態にある岩石の任意加熱法を用いた熱拡散率の測定, Journal of MMIJ, 129(7) (2013), 492-498
- 2) 飯田嘉宏, 重田治彦, 秋元久雄: 任意加熱による熱物性値の測定法に関する研究: 第3報, 円柱状または中空円柱状試料における温度伝導率と熱伝導率の測定, 日本機械学会論文集B 48(425) (1982), 142-148
- 3) 今井忠男, 山口伸次, 鴨志田直人, 杉本文男: 任意加熱法による岩石コアおよび岩盤の熱拡散率の測定方法, 応用地質 45(4) (2004), 174-182
- 4) GOLD, L.W.: Engineering properties of fresh-water ice, Journal of Glaciology, 19(81) (1978), 197-223
- 5) Tomasz Kozlowski: 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 78 (2012) 89-96

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 8件)

鴨志田直人, 齊藤剛, 極低温下における荻野凝灰岩の力学的性質, 日本材料学会第66期学術講演会, 2017.5.27-28, 名城大学天白キャンパス(愛知県名古屋市)

鴨志田直人, 齊藤剛, 一軸圧縮試験の結果を用いた荻野凝灰岩の間隙水凍結温度の推定, 平成28年度資源・素材関係学協会合同秋季大会, 2016.9.13-15, 岩手大学理工学部キャンパス(岩手県盛岡市)

鴨志田直人, 低温液化燃料の岩盤内貯蔵-低温下における岩石の熱力学的性質-, 平成28年度化学系学協会東北大会(招待講演), 2016.9.10-11, いわき明星大学(福島県郡山市)

鴨志田直人, 阿部正良, 低温下における岩石の熱拡散率と有効間隙率の関係, 平成27年度資源・素材関係学協会合同秋季大会, 2015.9.8-10, 愛媛大学城北キャンパス(愛媛県松山市)

鴨志田直人, 阿部正良, 飽和含水砂岩の極低温下における力学的性質~極低温液化燃料の岩盤内貯蔵に関する基礎的研究~, 第2回岩石力学・岩盤工学に関する若手研究者会議, 2015.9.4-5, 火の国ハイツ(熊本県熊本市)

鴨志田直人, 阿部正良, 極低温下におけるベレア砂岩の力学的性質, 日本材料学会第64期学術講演会, 2015.5.23-24, 山形大学米沢キャンパス(山形県米沢市)

吉田恭平, 鴨志田直人, 大河原正文, 凍結

過程における岩石の熱拡散率に及ぼす間隙構造の影響, 平成26年度資源・素材関係学協会合同秋季大会, 2014.9.15-19, 熊本大学黒髪南キャンパス(熊本県熊本市)
鴨志田直人, 飽和含水砂岩の極低温下における力学的性質, 第1回岩石力学・岩盤工学に関する若手研究者会議, 2014.7.26-27, 愛媛大学工学部(愛媛県松山市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鴨志田 直人 (KAMOSHIDA Naoto)
岩手大学・理工学部・助教
研究者番号: 00400177