

数種の岩石の凍結融解および凍上 に伴う変形挙動

小玉 齊明¹・赤川 敏²・藤井 義明³・石島洋二⁴

¹正会員 幌延地圏環境研究所 (〒098-3207 北海道天塩郡幌延町栄町5番地3)

E-mail:nariaki.kodama@mb.megafit.net

²正会員 北海道大学大学院 工学研究科北方圏環境政策工学専攻 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

³正会員 北海道大学大学院 工学研究科環境循環システム専攻

⁴幌延地圏環境研究所

稲田花崗岩、白浜砂岩、支笏溶結凝灰岩、層雲峡溶結凝灰岩の4岩石を用いて最大40回の凍結融解サイクルを与えた。その結果、2種の溶結凝灰岩の供試体中央部が破断し、白浜砂岩では破断面は生じないもののサイクルを重ねるごとに供試体の膨張が確認された。また、凍上試験はこれらに幌延珪藻質泥岩を加えた5岩石で行い、粘土鉱物や珪藻・珪藻鉱物に細孔径が多い白浜砂岩および幌延珪藻質泥岩で、アイスレンズを生成する顕著な凍上が生じることを確認した。白浜砂岩の凍結融解でみられた緩やかな膨張はこの凍上によるものと考えられる。溶結凝灰岩では、空隙率・平均細孔径・透水性が共に高い為、空隙水の凍結に伴って不凍水圧が上昇し、破砕に至ったと考えられる。

Key Words :rock, deformation, freeze-thaw, frost heaving, unfrozen water

1. 緒言

岩盤表面近傍において、氷点以上では熱応力や応力腐食等に起因した微小亀裂の進展による強度低下^{1,2)}が、氷点下では空隙水の凍結による体積膨張や凍上による劣化³⁾が生じ得る。このような局所的な劣化が歳月を経て、急崖を大規模な岩盤崩落の生じやすい形状にさせる可能性がある。地下水が供給されている寒冷地の岩盤において、表面の凍結に伴う地下水の流路変化が不連続面周辺の飽和度を上昇させ、岩盤を劣化させる可能性もある。

氷点下における地盤の力学的特性に関する研究は陸地の14%といわれる永久凍土地域での油田やパイプラインの等の開発、寒冷地における鉄道凍上害対策を目的として1970年代から発展を続けてきた³⁾。岩石では花崗岩や安山岩、凝灰岩等で、凍結及びその後の温度低下に伴う強度増加⁴⁾や破壊靱性値の増加⁵⁾が確認され、これが気乾状態より含水飽和状態で顕著⁶⁾なことから、氷が膠結物質となって力学的特性に影響すると推測される。また、含水状態の岩石を凍結-融解サイクルに供すと、内部の亀裂が増加して強度が低下する⁷⁾ことも知られ、これには氷点下で凍結せずに空隙中に存在し、試料中の温度勾配により流動する不凍水が関与していると考えられている⁸⁾。不凍水の挙動については、次の2通りが考え

られる。主に透水性が低い場合、最大で9%の体積膨張が起こる空隙水の生成により残存する不凍水による空隙水圧が十分に発散されずに微視的な破壊が進展し、強度低下をもたらす可能性がある。逆に透水性の高い試料では、この空隙水が速やかに排水され過剰な水圧は発生しないが、一部の土と同様、アイスレンズと呼ばれる氷結層に空隙水が集中し、このときの吸水量に応じた大きい変位を伴う凍上現象が発生する場合がある。赤川³⁾は大谷石(流紋岩質溶結凝灰岩)と土およびモルタルの凍上についてまとめ、岩盤の凍結部と非凍結部の境界付近に凍上が起こり、不連続面が形成される可能性を示唆している。

本研究では、数種の岩石を用いた凍結融解試験と凍上試験で、温度変化による各岩石の変形挙動を調べ、これと比表面積・不凍水含有率の変化を関連させて、それぞれの特徴を考察する。

2. 岩石試料

(1) 鉱物組成

稲田花崗岩(茨城県笠間市稲田産, IG)は結晶質の火成岩で、粒径は最大5mm程度である。

白浜砂岩（和歌山県西牟婁郡白浜町産，SS）は石英—長石質の細粒砂岩（平均粒径 0.1 mm 程度）に分類され、石英等の粒子周辺にイライトが付着している。

支笏溶結凝灰岩（北海道札幌市南区産，SW）はガラス質で軽石や泥岩等の介在物が多数含まれる。

層雲峡溶結凝灰岩（北海道川上町層雲峡産，SOW）は直径 15 mm 以下の安山岩・溶結凝灰岩からなる岩片を多く含み、基質は微細なガラスや鉱物片を含む火砕物からなる。含水するともろい。柱状節理の発達する急崖表面から 5 m 奥部の、通年に亘り 6～7℃の温度下にある岩盤から採取したもので、長期間に及ぶ凍結融解履歴を被った可能性は低い。

幌延珪藻質泥岩（北海道幌延町産，HM，深度約 300 m 声間層より採取したコアを整形）は主に珪藻遺骸からなり、調湿性や断熱性、遮音性、脱臭性などに優れ、工業材として利用されている。その組成には 2 次鉱物としてシリカ鉱物が含まれ、深度とともに Opal-A から Opal-CT へ相変化する。

前 3 者は 30 cm 角のブロックから、後 2 者は原位置より採取したボーリングコアより整形した。これらの組成を主な鉱物・岩片について表-1 に示す。ここで、稲田花崗岩以外の岩石は、薄片写真の約 600 ポイントのモード測定によるもので、結果に空隙の一部が含まれている。

(2) 比表面積・細孔径分の布測定

凍結進行に伴う力学的特性の変化と空隙構造の関係に着目し、高速比表面積・細孔分布測定装置（Quantachrome Instruments 社製，NOVA1000）を使用して、窒素ガス吸着による比表面積測定（BET 法）および細孔径分布測定（BJH 法）を行った。同手法は水銀ポロシメーターより細かい半径 1 nm～数十 nm に相当する空隙の測定に適するとされる¹⁰⁾。

各岩石について、図-1 に有効空隙率を、図-2 に比表面積を示す。比表面積は幌延珪藻質泥岩と白浜砂岩でその値が大きく、白浜砂岩の値は顕著な凍上性を示すシルト質土の値に近い。また、これらの図から 2 種の凝灰岩は砂岩と比較して有効空隙率は大きいものの、比表面積が小さいことがわかる。稲田花崗岩に関しては試料の全表面積が 1 m² を満たしておらずデータの信頼性は低い。なお、本測定は図-3 のように、小石状に砕いた 6 g 程度の試料で行った。

BJH 法で算出された試料 1 g に含まれる細孔半径の容量を凍結融解前後について併せて図-4 に示す。介在物の影響等、信頼性に関する検討はなお必要であるが、同図において凍結融解の影響により白浜砂岩では半径 8 nm 以上の細孔量が増加し、支笏溶結凝灰岩では 1～6 nm の細かい径の空隙が増加したように見える。層雲峡

溶結凝灰岩では凍結融解前後に顕著な差異は認められない。

(3) 不凍水含有率

RESONANCE 社製 MARAN Ultra を使用して、水分子中のプロトン量を測定する核磁気共鳴法（Nuclear Magnetic Resonance）により、-0.3℃から-20℃までの温度下で計測した試料中の不凍水含有率（供試体体積に対する不凍水体積の比）を図-5 に示す。空隙の少ない稲田花崗岩では氷点未満の温度領域で精度の良いデータは得られなかった。他の岩石では温度の低下とともに不凍水が減少した。これらの岩石では、凍結融解前後の差異は小さく、加えて昇温時ならびに降温時のデータに大きな違いは認められなかった。なお、白浜砂岩と幌延珪藻質泥岩では、0℃付近で顕著に不凍水率が変化している。層雲峡溶結凝灰岩は磁性を持つため計測不能だった。

表-1 各岩石の主な鉱物組成 (%)

IG ⁹⁾		SS		SW	
Quartz	33.7	Quartz	30.8	Glass	44.2
Pl	32.1	Ilite**	24.6	Pore	37.2
Ort	30.1	Pl	18.4	Pumice*	9.1
Biotite	3.8	Opal**	8.6	Pl	4.9
		MS*	4.6	MS*	2.2
SOW		HM			
Pore	25.2	Opal**	49.1		
Pl	24.2	Diatom*	43.9		
WT*	15.3	Pl	2.7		
Andesite*	12.0	Pyrite**	2.5		
Glass	9.1	Pore	1.0		

Pl: Plagioclase, Ort: Orthoclase, MS: Mudstone, WT: Welded tuff, *は岩片,

**は 2 次鉱物を示す。

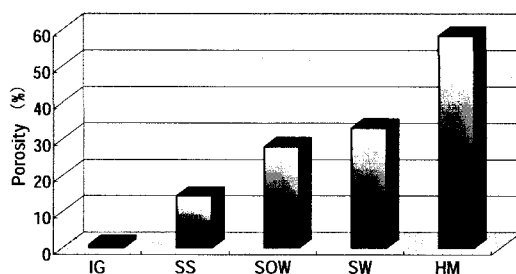


図-1 各岩石の有効空隙率 (%)

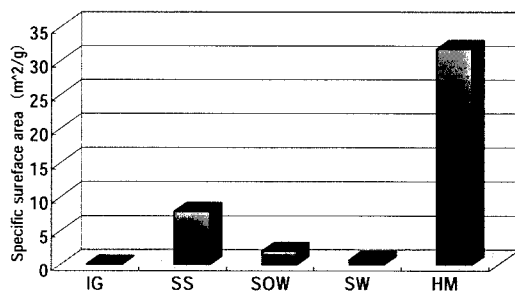


図-2 各岩石試料の比表面積

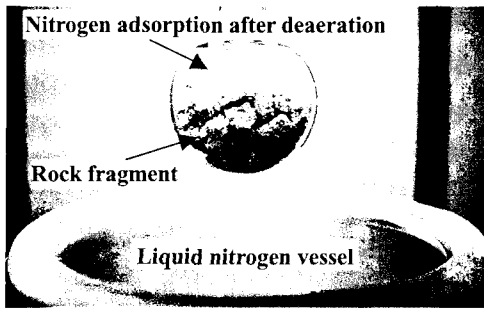


図-3 比表面積・細孔分布測定に用いた小粒の岩石試料

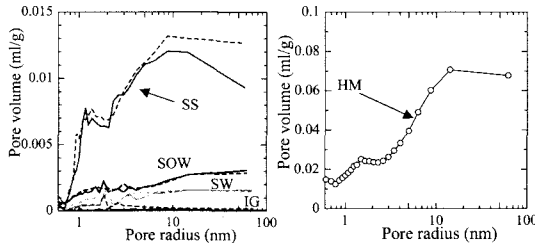


図-4 各岩石の細孔半径の分布

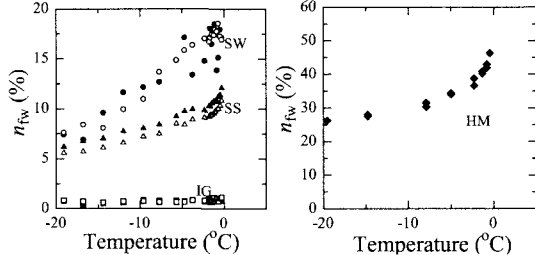


図-5 不凍水含有率 n_{fw} と温度の関係 (中塗り: 凍結融解前, 白抜き: 凍結融解後)

3. 凍結融解試験

(1) 試験方法

含水飽和状態の稲田花崗岩、白浜砂岩、支笏溶結凝灰岩、層雲峡溶結凝灰岩（急崖表面から5mの試料）を直径50mm、長さ25mmに整形し、室温 $2 \pm 2^\circ\text{C}$ の低温室内で $+5^\circ\text{C} \sim -18^\circ\text{C}$ の凍結融解履歴を与えた。ここでは凍結膨張による複雑な熱応力分布の発生を防ぐ為、軸方向のみに温度勾配が発生するように上下端面に接するペDESTAL（図-6、図-7）に設定温度（上下端面の初期温度差を 1.25°C とし、それぞれ 2.0°C/h の速度で、供試体中の温度勾配 0.05°C/mm 、図-8）の不凍液を循環させた。稲田花崗岩と白浜砂岩で40回、支笏溶結凝灰岩と層雲峡溶結凝灰岩で20回の凍結融解を繰り返す、この時の供試体長変化をレーザー変位計（KEYENCE社製、LC-2420/LC-2450、分解能 $0.5 \mu\text{m}/0.01 \mu\text{m}$ ）で計測した。なお、飽和状態を保つ為、未凍結時の各岩石にはペDESTALを通じて約50cmの圧力水頭が負荷され、層雲峡溶結

凝灰岩と支笏溶結凝灰岩では差圧計（共和電業社製、PD-100GA、定格10kPa）で吸排水量も計測した。

(2) 試験結果

40サイクルを与えた稲田花崗岩と白浜砂岩には目視による供試体形状に変化は認められなかった。それに対し、2種の凝灰岩では初回の凍結時に試料中央部に巨視的な破断面が形成され、凍結融解を繰り返すにつれて、その周囲の損傷が拡大した（図-9）。

図-10に試験開始時を基準として、凍結融解過程における供試体膨張量の経時変化を、凝灰岩では吸水量のデータを併記して示す。同図より、各岩石で凍結・融解による試料の膨張・収縮挙動が確認できる。これら変位には、供試体の凍結膨張変位、生成した破断面や微小亀裂間の水の体積膨張に加え、供試体・ペDESTAL間の水の体積膨張や試験装置変形量が寄与していると考えられる。残留変位の無い稲田花崗岩では、相対的に試験装置の変形や供試体外の水の影響が大きいのと思われる。白浜砂岩では、凍結融解を重ねるに従って徐々に残留変位が増加し、1回毎の凍結に伴う膨張量も増大する傾向にある。凝灰岩は、共に初めの数サイクルで大きく変位し、その後、緩やかに残留変位が増加するものの、1回毎の凍結に伴う膨張量は、ほぼ一定である。両岩石ともに凍結融解を重ねるに従い、徐々に吸水量が増加した。

図-11に2種の凝灰岩について、試験開始直後の2凍結融解サイクルでの、変位と吸水量および温度変化の経時変化を示す。2岩石は共に2時間程度の凍結膨張時に排水し、その後の低温域でほぼ定変位を保ち、ペDESTALの融解とともに吸水を開始している。このとき、空隙氷の融解に伴う緩やかな試料の収縮に加え、亀裂間の氷の融解に伴い体積減少分を吸水し、直後に破断面以上の試料自重落下によると思われる僅かな排水が生じる。同様の吸排水挙動は各サイクルで観察された。

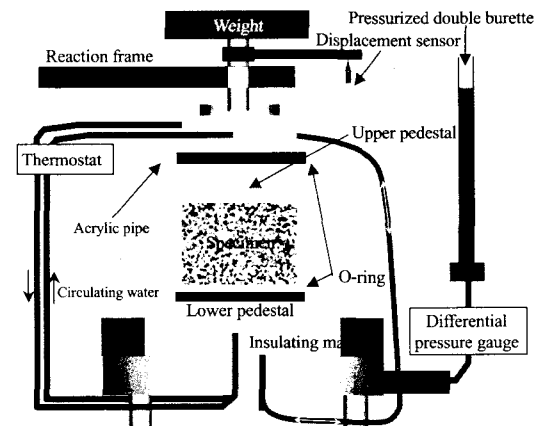


図-6 凍結融解試験装置の概略図

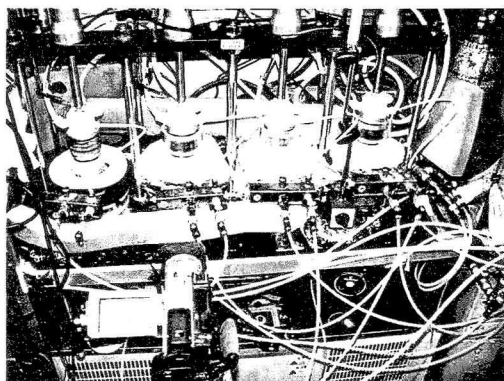


図-7 試験の様子 (4試料同時に実施)

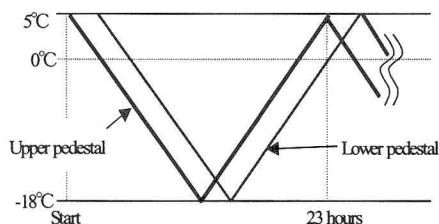


図-8 凍結・融解過程で上下ペDESTALに与えた設定温度の経時変化 (1サイクル分)



図-9 凝灰岩に生じた亀裂 (左:層雲峡溶結凝灰岩,右:支笏溶結凝灰岩)

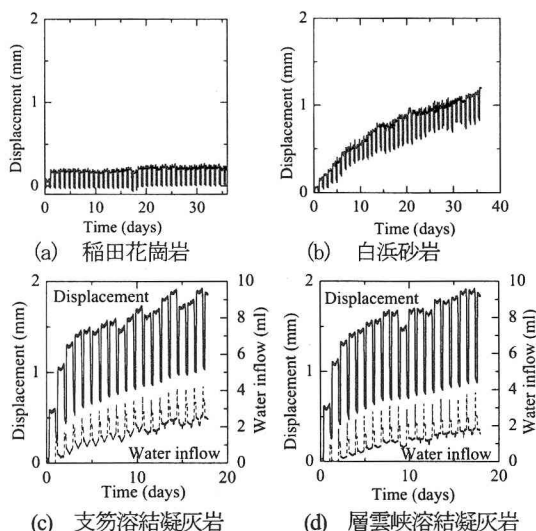
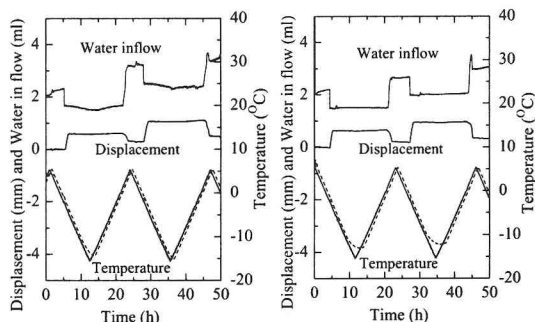


図-10 供試体膨張量と吸水量



(a) 支笏溶結凝灰岩 (b) 層雲峡溶結凝灰岩

図-11 開始から2サイクルの膨張量と吸水量

4. 凍上試験

凍上は粘土のほか、シルト、土丹で確認されており、そのメカニズムに関して、いくつかのモデルが提唱されている。赤川³⁾は、 0°C 線よりやや低温側で、間隙氷圧が上載圧と粒子の引張強度の和を上回った時に粒子骨格が破断、引張強度分の応力が消滅するために破断面近傍が過冷却となり、未凍結側の間隙水がフローゼンフリンジ (0°C からアイスレンズの成長面間の領域) を通ってアイスレンズ成長面へ供給され、アイスレンズが成長すると考察している。これに対し、単に間隙の水分が凍結することによる体積膨張に起因した破壊が生じる場合には、アイスレンズとして間隙氷を肉眼で確認することはできないと述べている。

本研究では、下記の5岩種について凍上試験を行った。装置は凍結融解試験と同じものを用い、凍上が生じ易くする為、供試体中心部付近における 0°C 線を上部ペDESTAL 5.5°C 、下部ペDESTAL -8.5°C に固定し、変位量を約19時間モニタリングした。

試験の結果、図-12に示すように、白浜砂岩と幌延珪藻質泥岩で凍上による変位が確認され、図-13のようなアイスレンズが確認された。一方、支笏溶結凝灰岩、層雲峡溶結凝灰岩、稲田花崗岩に関しては凍上が確認されず、破断面も形成されていないが、支笏溶結凝灰岩では凍結時に膨張が認められた。2種の凝灰岩で測定した吸排水量にも凍上試験中の変化は認められなかった。

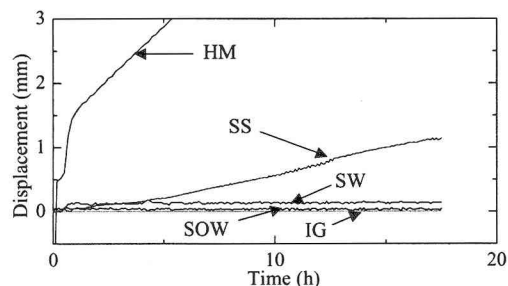
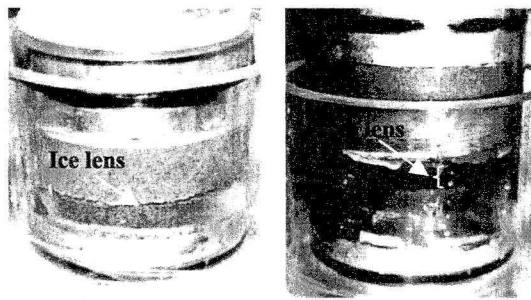


図-12 凍上量測定における変位の経時変化



(a) 白浜砂岩 (b) 幌延珪藻質泥岩
図-13 凍上試験におけるアイスレンズの発生

5. 考察

(1) 凝灰岩試料の中央で亀裂が生じた理由

本研究では、モルタル試料内部の凍結時の温度分布、および、冷却速度と凍結面の進行速度の関係を参考に上下ペDESTAL間の温度勾配と温度変化速度を決定して凍結融解試験を実施した。その結果、稲田花崗岩以外の3岩石で変位の増加がみられ、このうち層雲峡溶結凝灰岩と支笏溶結凝灰岩の2岩石で初回の凍結に伴って供試体中央部に破断面が生じた。ビデオカメラによる観察の結果、常温から温度が低下し、上部ペDESTAL-3.8℃、下部ペDESTAL-2.5℃になった時、破断面が形成され、さらに凍結時の排水がペDESTALの凍結に伴って停止した直後より、供試体が膨張を開始したことが分かった。

水は氷への状態変化で9%体積膨張する。-1℃の閉じた領域で、間隙氷の体積膨張に伴い発生する不凍水圧は13 MPa程度にもなると推定される¹⁰⁾。不凍水含有率の多い(図-5)支笏溶結凝灰岩では、排水路が凍結して閉ざされた後に凍結する不凍水が多く、逃げ場を失った不凍水圧は上昇し、ある弱面の引張強度を超えて割裂面を形成させたと推測できる。これは層雲峡溶結凝灰岩でも同様と思われる。稲田花崗岩は、空隙率が小さく引張強度も十分大きく、このような劣化が確認できなかった。

(2) 凍結膨張と吸・排水量

凍結融解における2つの凝灰岩の吸・排水量は図-11に示した。試験終盤のあるサイクルの凍結過程における試料の体積変化 dV_{exp} (変位に断面積を乗じ、稲田花崗岩の膨張を試験装置の変位とみなして引いた値)と、 dV_p (飽和岩石中の水の体積膨張量で供試体体積に空隙率と水の体積膨張率0.09を乗じた値)は表-2のようになる。破壊が凍上である場合、アイスレンズの生成により dV_{exp} が dV_p より遥かに大きくなるはずであるが、ここで得られた dV_{exp} と dV_p は同じオーダーであり、凝灰岩の破壊のメカニズムは凍上ではなく、水の凍結に伴う体積

膨張であることが裏付けられたといえる。

また、図-10より、凍結融解試験を通じて2凝灰岩は膨張しながら徐々に吸水するものの、サイクル毎の変位・吸水量に大きな変化は無い。これに対し、白浜砂岩では試料が膨張するとともに、サイクル毎の変位量が徐々に増大している。5章の結果を踏まえ、白浜砂岩では巨視的な破断面が確認されなかったものの、局所的に凍上が発生して試料内部が僅かずつ劣化し、微小亀裂の発生とともに含水量を増加させたものと考えられる。

(3) 破壊のメカニズム

凍結時の破壊面と圧裂引張(常温)での破壊面を、粗さを表す指標のひとつであるステープネス¹²⁾で比較した(図-14)。ここでは、破断面中央部15mm角の領域を測定の対象とし、縦横2方向について0.1mm毎に求めたステープネスの平均値で評価した。介在物の存在による結果のばらつき等、検討の余地はあるものの、幌延珪藻質泥岩では、この値が圧裂引張破壊より凍上破壊で小さく、支笏溶結凝灰岩で圧裂引張破壊より水圧破壊で大きかった。引張における岩種間の差が小さいことから、これらの結果は、凍上と水圧破壊における亀裂進展のメカニズムが異なることを示唆するものと思われる。

(4) 岩石ごとの特徴のまとめ

- ① 稲田花崗岩 空隙率が小さく、比表面積測定等において十分な精度の測定結果は得られなかった。凍結融解に伴う変位にも目立った変化はなく、本研究で被った温度範囲と繰り返し回数での劣化は確認できない。
- ② 白浜砂岩 粘土鉱物を多く含む白浜砂岩は、小径の細孔が多く比表面積も幌延珪藻質泥岩に次いで大きい。凍上試験で凍上が確認されたが、凍結融解過程における膨張変位も凍上によるものと思われる。

表-2 凍結時の体積変化 (ml)

Rocks	dV_{exp}	dV_p
Shikotuzawa welded tuff	1.57	1.46
Sounkyo welded tuff	1.38	1.20

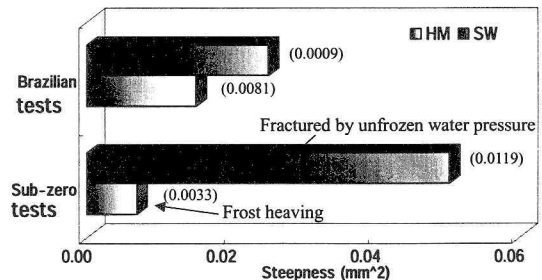


図-14 凍結状態と圧裂引張による破断面粗さの相違 (値は平均値で括弧内に標準偏差を示す)

③ 支笏溶結凝灰岩 ガラス質で比表面積が小さく、空隙表面が粘土鉱物と対称的に滑らかだと推測される。凍結融解による僅かな細孔増加は、ナノレベルの破碎が蓄積している可能性を示唆するものである。

④ 層雲峡溶結凝灰岩 支笏溶結凝灰岩と同様に凍上性は示さなかった。凍結に伴う巨視的な破断面の形成は、間隙水の凍結に伴う膨張による不凍水圧の上昇、既存の亀裂等の弱部への引張応力の集中によると考えられる。

2 凝灰岩にみられた割裂と同様の機構が、原位置で生じる可能性を指摘できる。例えば、急崖根元に含水比の高い弱層部が存在する場合、冬期の日中、直射日光で表面部が融解し、夜間に表面から再凍結する。このとき、深度数 cm の地点で逃げ場を失った間隙水の圧力は、凍結面の進行により増加し、壁面と平行（凍結進行方向に垂直）に岩盤を劣化させ、一部を地山から剥離させる可能性がある。このような剥離が長年に亘って繰り返された場合、力学的に不安定なオーバーハングを形成し、ついには大規模な岩盤崩壊が発生する可能性も考えられる。

⑤ 幌延珪藻質泥岩 顕著な凍上性を示した。珪藻や珪藻鉱物が主な組成である同岩石の空隙率と比表面積がともに大きく、特に小径の細孔量が多く存在することが要因のひとつに挙げられる。

6. 結言

5 種類の岩石で凍結融解試験と凍上試験を行い、空隙率、比表面積、細孔分布、0℃から-20℃における不凍水含有率も測定した。白浜砂岩と幌延珪藻質泥岩に凍上特性があることを見出し、非凍上性岩石との比較より、粘土鉱物や珪藻・珪藻鉱物に小径の細孔が多いことを原因のひとつにあげた。また、平均細孔径が大きい凝灰岩で間隙水の凍結に伴う不凍水圧の上昇による破碎が生じ易いことを示し、凍上とともにこれが寒冷地における初冬期や融雪期の岩盤崩落の一要因となり得ると考察した。

謝辞

薄片の顕微鏡観察と X 線解析では北海道大学環境地

質学研究室米田哲朗教授のご協力を得た。幌延珪藻質泥岩試料は JNC（現・日本原子力研究開発機構）より頂いた。破断面形状観察では北海道大学岩盤力学研究室修士課程の大井手由佳氏に協力頂いた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 小玉齊明, 藤井義明, 石島洋二: 稲田花崗岩と白浜砂岩の水中における緩やかな亀裂進展現象に対する温度の影響, 土木学会論文集, No. 778, pp.195-204, 2004.
- 2) 小玉齊明, 藤井義明, 藤田泰之, 石島洋二: 水中における稲田花崗岩と白浜砂岩の変形・破壊挙動に関する温度の影響, 資源と素材, Vol. 119, pp.461-468, 2003.
- 3) 赤川敏: 土・岩・モルタルの凍上現象とそのアイスレンズ発生 of 巨視的メカニズム, 日本氷雪学会誌氷雪, 66 巻 2 号, pp.149-161, 2004.
- 4) 稲田善紀, 八木則男: 低温の影響を受けた岩石の力学特性, 材料, Vol.313, pp.979-985, 1979.
- 5) Dwivedi, R. D, Soni, A. K, Goel, R. K. and Dube, A. K.: Fracture toughness of rocks under sub-zero temperature conditions, *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.37, pp.1267-1275, 2000.
- 6) 松永烈, 木下直人: 岩石の低温における機械的性質—LNG の地下貯蓄に関する基礎的研究(第一報)—, 日本鉱業会誌, 97, No.6, pp.431-436, 1981.
- 7) 藤井義明, 宮下尚志, 石島洋二, 川北稔: 北海道の急崖を構成する岩盤の力学特性, 地盤工学会論文報告集, Vol.42, No.3, pp.129-136, 2002.
- 8) 福田正己, 松岡憲知: 凍結過程での岩石内の水分ポテンシャル分布について, 低温科学物理編, 第 41 巻, pp.217-224, 1982.
- 9) 笹田政克: 稲田みかづ, 地質ニュース, Vol.441, pp.34-40, 1991.
- 10) 宮澤浩司, 森本昌文: ガス吸着法・水銀王入法による機能性多孔材料の微細構造評価, *Yuasa-JIHO*, NO.94, pp.1-6, 2003.
- 11) Akagawa, S., Fukuda, M.: Frost Heave Mechanism in Welded Tuff, *Permafrost and Periglacial Processes*, Vol. 2, pp.301-309, 1991.
- 12) 村田澄彦, 齊藤敏明: フラクタルモデルによる岩盤不連続面の表面粗さ評価法について, 資源と素材, Vol.113, No.7, pp.555-560, 1997.

DEFORMATION BEHAVIOR OF ROCKS DUE TO FREEZE-THAW TESTS AND FROST HEAVING TESTS

Nariaki KODAMA, Satoshi AKAGAWA, Yoshiaki FUJII and Yoji ISHIJIMA

Freeze-thaw tests and frost heaving tests were carried out for several saturated rocks. Two welded tuffs were fractured at the center in the first cycle of the freeze-thaw test and Shirahama sandstone continued to expand in the freeze-thaw cycles. It can be considered that this is due to the effects of the unfrozen water. Failure of welded tuffs that have a large permeability can be explained with the increasing of unfrozen water pressure at the center of the specimen. Furthermore, frost heaving ability of Shirahama sandstone and Horonobe mudstone, which contain large amount of Cray minerals, as confirmed. A gradual frost heaving during the freeze-thaw tests was implied.