

石造遺跡の凍結破壊と樹脂によるその防止効果の実験

石造文化財の凍結—融解による劣化とその防止法に関する研究(Ⅰ)

福田 正己*・三浦 定俊・西浦 忠輝・松岡 憲知**

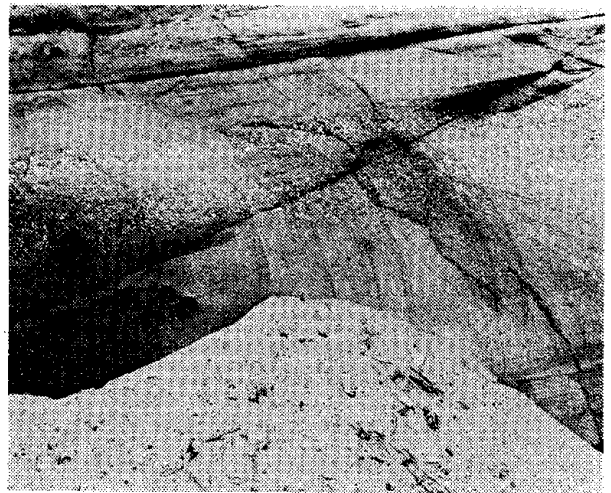
1. はじめに

野外における石造遺跡の劣化の防止策を講ずるにあたって、その有効性をあげるには、劣化の過程と機構をまず把握する必要がある。劣化破損の原因と条件を知ることで、その効果的防止策をたてることが可能となるからである。石造物が破損を受ける原因の一つに凍結作用がある。ここでは、凍結破砕の防止を目的とした樹脂処置の方法について、凍結破砕の機構や条件を考慮して、その有効な方法の開発のための実験を行なった。

保存工事の対象となる遺跡は、野外磨崖石仏像などがあるが、岩質は凝灰岩などいわゆる軟岩となっている。このため、凍結融解の作用で容易に破砕される。そこで破損防止の対象岩質としては、よく用いられている凝灰岩と安山岩を選ぶことにする。はじめに、実際に野外で生じている凍結融解の事例を挙げて、その破砕の条件を検討する。

凍結—融解で凝灰岩が破砕されている実例として、北海道余市町フゴッベ洞窟の外壁の状況を図—1に示す。古第三紀の凝灰岩の露出面から、冬季間に剝落した岩屑が堆積している。この露岩表面温度の実測結果を図—2に示す。凍結が岩体の20~30 cm までに達する温度変化は、表面温度で $+4^{\circ}\text{C} \sim -4^{\circ}\text{C}$ 程度の変動幅が必要である¹⁾。このような温度変動の出現頻度は、北海道では年間数10回にもおよぶ。また九州においても、斜面の向きや放射冷却によって、岩体表面が凍結融解を繰り返す。このため野外遺跡が著しく冬季間に破損を受けることが観察されている。

岩石が凍結で破砕される条件としては、次の3つがある。岩質・寒冷度・水分供給。はじめに岩質の条件を検討してみる。ち密な岩石は強度も大きく凍結破砕を受けにくい。風化の進んだ岩石は、内部の空隙も多くもろい。後に詳しく述べるが、凍結破砕の機構から凍結過程で岩石中の水の流れが生じている。すると、岩石中の水流フラックスをある量にするためには、空隙が拡大し相互に連結しあっている必要がある。とすると、凍結破砕を受けやすい岩質とは、ある空隙率よりも大きいという指標が使えることになる。そこで、岩石の鉱物粒子の結合力を表わす物性値として、弾性



図—1 凍結—融解による凝灰岩露頭の剝離と堆積物(北海道余市町フゴッベ洞窟外壁)

Fig. 1 Ablated deposits from Tuff bed-rock outcrops due to freeze-thaw cycles (Yoichi, Hokkaido)

* 北海道大学, 低温科学研究所(昭和56年度招へい研究員)

** 筑波大学, 地球科学系大学院

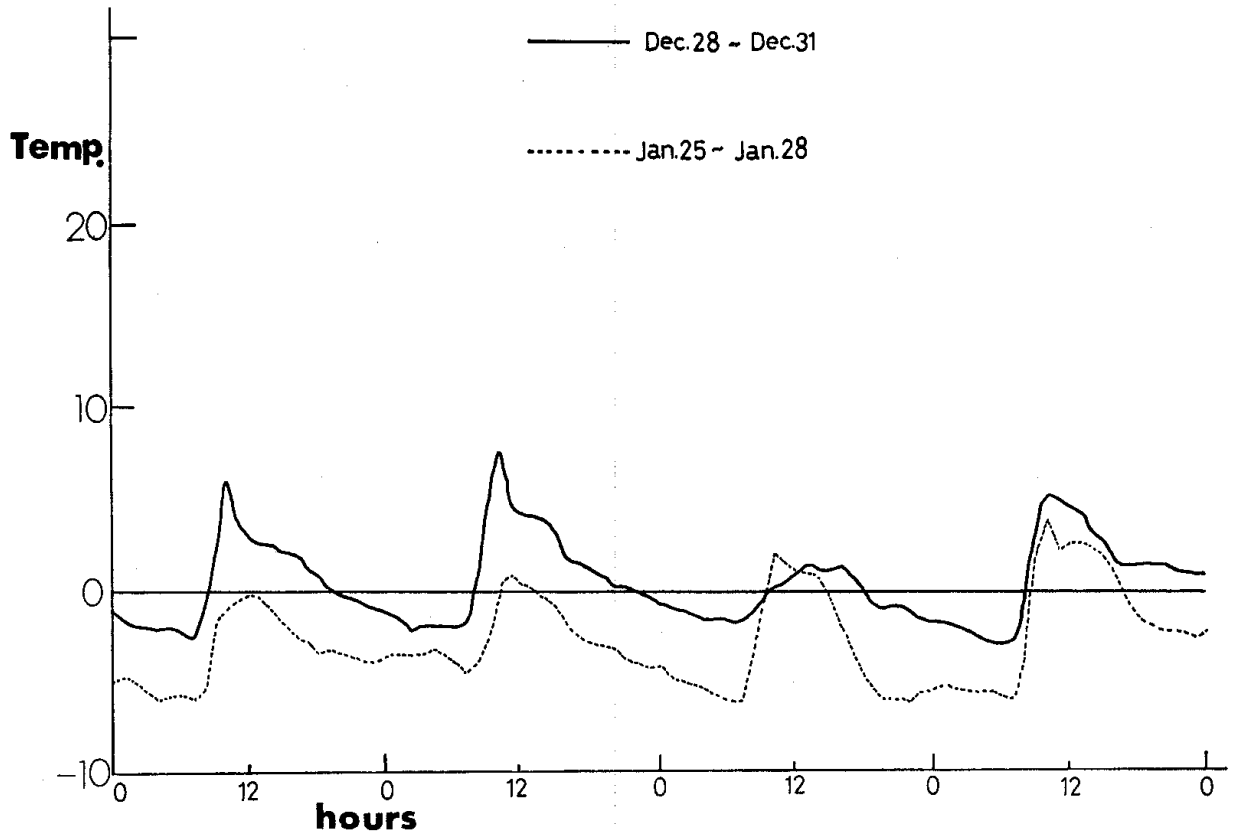


図-2 冬季間の露岩表面温度変化（北海道余市町）

Fig. 2 Temperature alternation measured on the surface of bed rock, Yoichi, Hokkaido

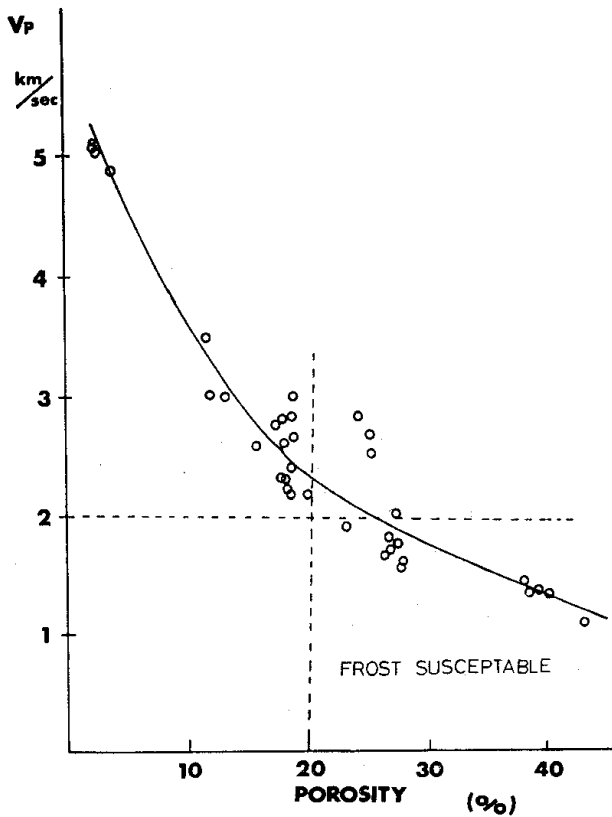


図-3 岩石の空隙率と超音波速度(V_p)の関係

Fig. 3 Porosity v. s. Ultrasonic Propagation velocity (V_p) through rocks

波の伝播速度（超音波速度 V_p ）を測定し、あわせて空隙率を測定して両者の関係を得る（図-3）。そして $n = b \cdot V_p^a$ なる経験式が得られた²⁾。これらの岩石試料を $+10^\circ\text{C} \sim -10^\circ\text{C}$ 変動幅 1日1サイクルの凍結-融解試験にかけて、20サイクルまでで破碎されたかどうかを判別した。その結果、空隙率が20%を越える岩石では、凍結-融解で破碎されることが判明した。以上の予備実験から、破碎条件のうちの岩質については、対象とする岩石の空隙率が20%をこえるかどうかという指標で表わせることになる。多くの石造遺跡に用いられている凝灰岩では、空隙率が30%以上の例が多く、破碎防止の必要性のあることがわかる。

3条件のうちの寒さについては、岩石内の水分が凍結し、なおかつ水分移動の生ずるような期間低温条件にあることと規定される。野外での観察結果から、 -4°C 前後までの冷却が必要となる。また岩石内の含水条件と水分の供給条件も、凍結破碎が著

しくなる重要な条件である。この岩質、寒冷度、水分条件のいずれかあるいはすべてについて破碎条件となる要素を除去すれば、破碎防止することになる。

2. 本研究の目的

石造遺跡の凍結破碎が3つの条件で生ずることを述べたが、防止の方法は、これらの条件から破碎の要因を取り除くことで確立される。そこで次に一般的な保存法と今回の樹脂処置の方法とを、3条件の主要素の除去という視点で比較する。石造遺跡の保存策の施工例として、北海道余市町フゴッペ洞窟の事例がある。これは奥行10数mの洞窟壁面上の陰刻像の保存を目的としている。構成岩質は古第三紀凝灰岩で、3年間の予備調査から冬季間の凍結—融解による破碎と剝離が観察された。具体的防止策として、外気との熱と水分の交換をしゃ断する覆屋で洞窟内をカプセルでおおうという方法がとられた。洞窟内の温度は空調設備によって年間を通じて一定(+15°C)に保ち、恒温恒湿条件とした。つまり3つの条件のうち、寒冷条件を除去して凍結破碎を防止したことになる。このように外的な気象条件を制御して凍結を防ぐ方法を、「環境制御」による保存策ということが出来る。しかし、対象となる遺物が大きくて、全体をおおうような施工物を取りつけられない事例がある。すると、3つの条件のうちの、岩質と水分の条件を変えることで、破碎を防ぐ必要がある。水分の条件としては、水ぬき工事による遺物構成岩体への水分供給のしゃ断で破碎が防止される。岩質については、今回の研究目的である、樹脂処置による方法で、破碎されやすさを減ずることが出来る。直接に構成岩体に樹脂処置を加えて、破碎されやすかった岩質を変えるという方法が、使用する樹脂等でどのような効果が生ずるかを評価しようとするのが主な目的である。実際に、野外の石造遺跡の保存工事を行うにあたっては、環境制御の方法と樹脂処置とを並行し、破碎にかかわる3つの条件すべてについて、その要因を除去することが肝要である。その理由は、岩質のみを考慮しても、長期間にわたって防止することはむずかしいからである。したがって、今回の報告も樹脂処置の効果のみを、室内実験の結果から判定するものであり、実際の保存策等の施工計画では、全体の条件や規模を検討して処理を行うべきと考える。

3. 実験の概要

3-1 試料に用いた岩石と岩質

樹脂処置の効果を評価するために、2種の岩石を用いた(表-1)。図-3によれば凝灰岩は凍結破碎を容易に受けることが予想される。安山岩は、凍結による破碎を受ける岩質の限界にあり、凍結—融解サイクルが多くなると破碎を生ずることがある。この2種を選定した理由は、多くの石造遺跡で用いられていること、樹脂処置効果が岩質あるいは空隙率に依存するかを判定することにある。岩石試料は直径5cm高さ5cmの円筒形に整形された。

表-1 実験に用いた岩石試料とその物性値
Table 1 Stones for the experiment and their characteristics

岩種(通称) Specie (Local name)	空隙率 Porosity	超音波速度 Vp
安山岩(福島県産「白河石」) Andesite (Shirakawa stone)	21.7%	2.91 km/sec
凝灰岩(栃木県産「大谷石」) Tuff (Oya stone)	35.0	2.20

各サンプルのうちで、空隙率による樹脂の浸透性の違い、およびその凍結抵抗性を比較するために次の劣化促進処理を行なった。5×5×5 cm の直方体に整形した岩石試料を、10% Na₂SO₄ 水溶液に4時間浸漬させ、次に105°Cで20時間乾燥させる工程を1サイクルとし、合計3サイクルの処理した。その結果、安山岩では有意な劣化処理の効果は表われなかったが、凝灰岩では次のように物性値が変化し、劣化促進処理の効果が認められた。

$$V_p \quad 2.37 \text{ km/sec} \xrightarrow{\text{劣化処理}} 1.94 \text{ km/sec}$$

$$\text{空隙率} \quad 34.4\% \xrightarrow{\text{劣化処理}} 37.0\%$$

3-2 用いた樹脂の種類と処置方法

岩石処置用樹脂としては、石造文化財の処置に通常用いられるものとして、エポキシ樹脂、アクリル樹脂、シリコン樹脂（シラン）の3種とした。岩石処置の際の配合は以下に示す通りである。

○エポキシ樹脂

アラルダイト	CY-230	10部
エポメート	B-002	5部
トルエン		60部

○アクリル樹脂

パラロイド	B-72	15部
トルエン		85部

○シリコン樹脂（シラン）

SS-101*		100部
触媒	C	3部

* メチルエトキシシラン低重合体の約35%トルエン・メタノール混合溶媒溶液

処置は、岩石試料を乾燥後、樹脂溶液中に2時間浸漬し、2日以上風乾の後熱風乾燥する方法で行ったが、その結果得られた含浸量を固型分としての含浸率で示せば、表-2の通りである。

表-2 樹脂含浸率
Table 2 Resin content by the impregnation treatment

樹脂 (Resin)	安山岩 (Andesite)		凝灰岩 (Tuff)	
	無処理 (Untreatment)	劣化処理 (Deterioration) treatment	無処理 (Untreatment)	劣化処理 (Deterioration) treatment
エポキシ樹脂 (Epoxy resin)	1.1%	1.3%	2.6%	2.9%
アクリル樹脂 (Acrylic resin)	1.9	1.8	3.8	4.3
シリコン樹脂 (Silane)	3.6	3.8	7.0	8.1

$$\text{含浸率 (Resin content)} = \frac{Wd_2 - Wd_1}{Wd_1} \times 100 (\%)$$

Wd₁; 処理前, 乾燥時重量 (Weight before treatment)

Wd₂; 処理後, 乾燥 (樹脂固化) 後重量 (Weight after treatment)

3-3 凍結-融解の条件

岩石試料の凍結融解試験は、次の条件で行なった。低温実験室の温度は、 $-10^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ の変動幅で1日1サイクル変化させる。岩石試料は底部に水を入れた容器にならべておく。凍結過程では下方から水分供給されるようにしておく。実験開始前に 105°C で24時間乾燥させる。乾燥重量を測定のものち、超音波伝播速度 (V_p) を測定する。次に真空ポンプに連結して脱気減圧したデシケーター内に水浸した試料を入れ、24時間放置させて水分飽和させる。飽和重量と水中秤量の重量を測定して空隙率を算出した。凍結-融解の開始前、および5、10サイクル後に以上の手順で空隙率と V_p を測定した。

4. 実験結果

4-1 安山岩の事例

3種類の樹脂処置をした場合と無処置の試料による実験結果を図-4に示す。変化の度合の指標として超音波速度 V_p を用いている。凍結開始前での V_p は、無処置のもの (N) が小さくなっている。これは樹脂浸とうによる効果がわずかに V_p に反映していることを表わす。しかし、 E (エポキシ樹脂処置) では無処置と変わらず、樹脂処置で変化していない。次に凍結-融解サイクルによって V_p がどう変化したかを比較する。 E がわずかに減少する傾向を示すものの、他の試料ではほとんど変らない。また樹脂処置の相違もなく無処理のものも変化していないことから、安山岩の場合には、樹脂処置の効果は表われなかった。これは、安山岩の空隙率が約20%で、凍結抵抗性をそなえていたこと、樹脂の浸とうが少なかったことによるのであろう。

4-2 凝灰岩の事例

凝灰岩では、劣化促進処理によって空隙率が有意に増加した。そこで樹脂による効果が空隙率に依存するものと仮定し、劣化促進した試料と無処理の試料の比較を行なった。図-5は無処理の試料を用いた結果であり、図-6は劣化促進処理した試料の場合である。両者の0サイクル、つまり凍結前を比較すると、劣化促進処理で V_p が低下し、また樹脂処置によっても V_p は変化していないことがわかる。樹脂処置による V_p の増加効果は生じていない。図-5でアクリル樹脂処置 (A) 試料の V_p が小さいが、これは用いた試料の V_p のばらつきによる。5サイクル時で、シリコン樹脂処置試料 (S) を除いて、すべて V_p が低下した。10サイクル時では、破碎のために試料の形状がくずれて V_p を測定できない試料もあった。 S については、10サイクル後でも V_p は変化しなかった。

図-6の劣化促進処理した試料では、 S

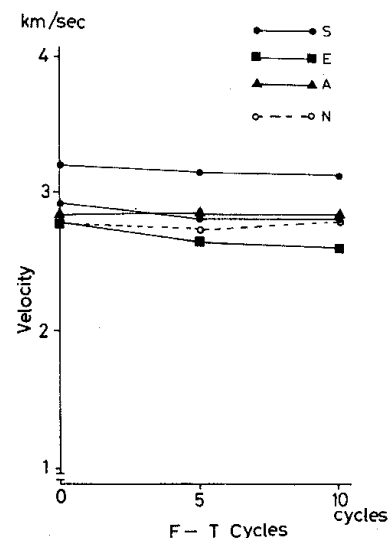


図-4 凍結-融解サイクルによる V_p の変化 (安山岩)

S : シリコン樹脂処置
E : エポキシ樹脂処置
A : アクリル樹脂処置
N : 無処置

Fig. 4 V_p changes due to freeze-thaw cycles (Andesite)

S : treated by silane
E : treated by epoxy resin
A : treated by acrylic resin
N : untreated

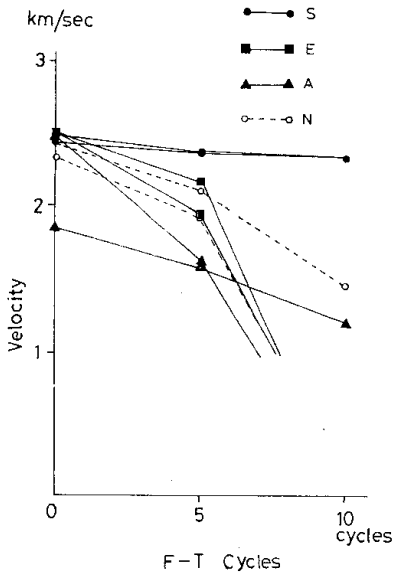


図-5 凍結-融解サイクルによる V_p 変化 (凝灰岩)

S, E, A, N; 図-4に同じ

Fig. 5 V_p changes due to freeze-thaw cycles (Tuff)

S, E, A, N; Same as Fig. 4

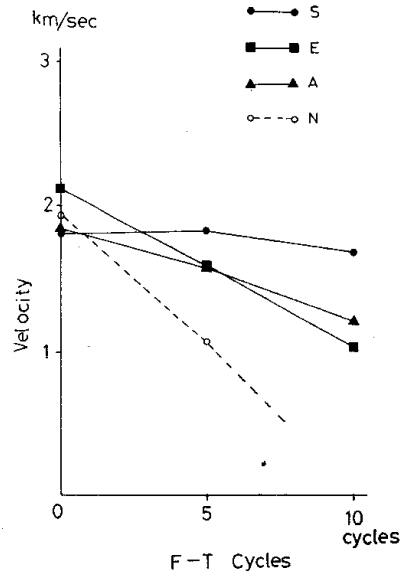


図-6 凍結-融解サイクルによる V_p 変化 (凝灰岩; 劣化促進処理)

S, E, A, N; 図-4に同じ

Fig. 6 V_p changes due to freeze-thaw cycles (Tuff-artificially deteriorated)

S, E, A, N; Same as Fig. 4

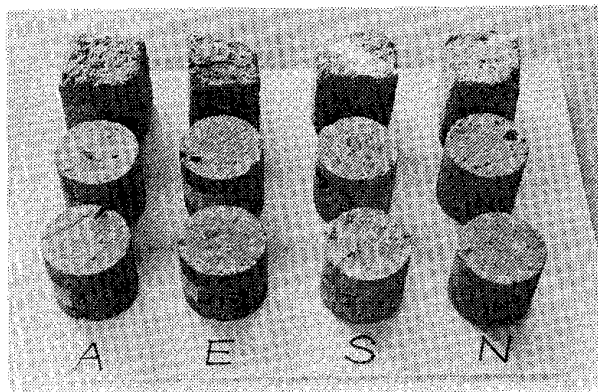


図-7 凍結実験前の凝灰岩試料

A, E, S, N; 図-4に同じ

Fig. 7 Tuff samples for freeze-thaw cycle test (Before Test)

A, E, S, N; Same as Fig. 3

以外は明らかな V_p の低下が見られた。S 試料でもわずかではあるが V_p の低下傾向があらわれている。図-5と比較して、樹脂処置した試料はすべて、ある程度の形状を保っていた。これから判断すると、空隙が30%を越えるような岩石では、空隙率が高い程樹脂処置の効果がはっきりする傾向がうかがえる。

次に試料の凍結破碎の状況を示す。図-7, 8, 9 に各サイクル時の凝灰岩試料の外観形状を示す。立方体の試料は劣化促進処理したものである。5サイクル時にはSを

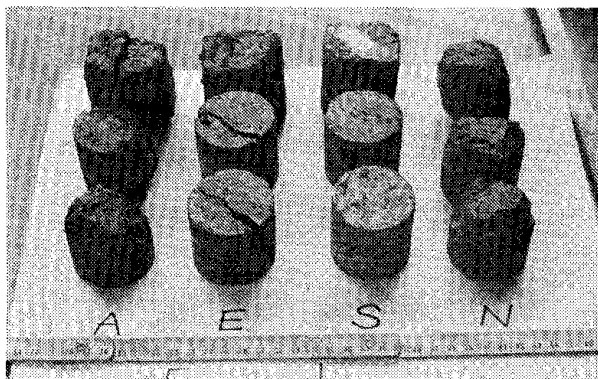


図-8 5サイクル凍結-融解後の凝灰岩試料

Fig. 8 After 5 cycles of freeze-thaw

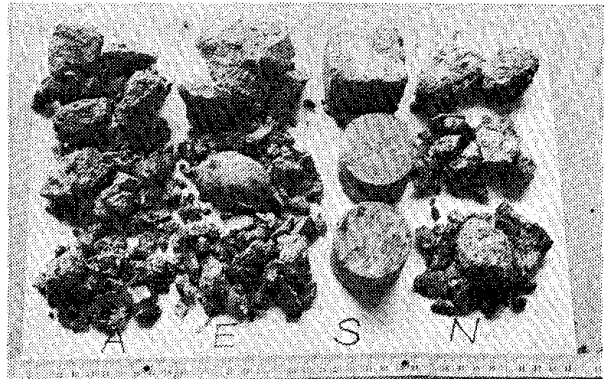


図-9 10サイクル凍結-融解後の凝灰岩試料

Fig. 9 After 10 cycles of freeze-thaw

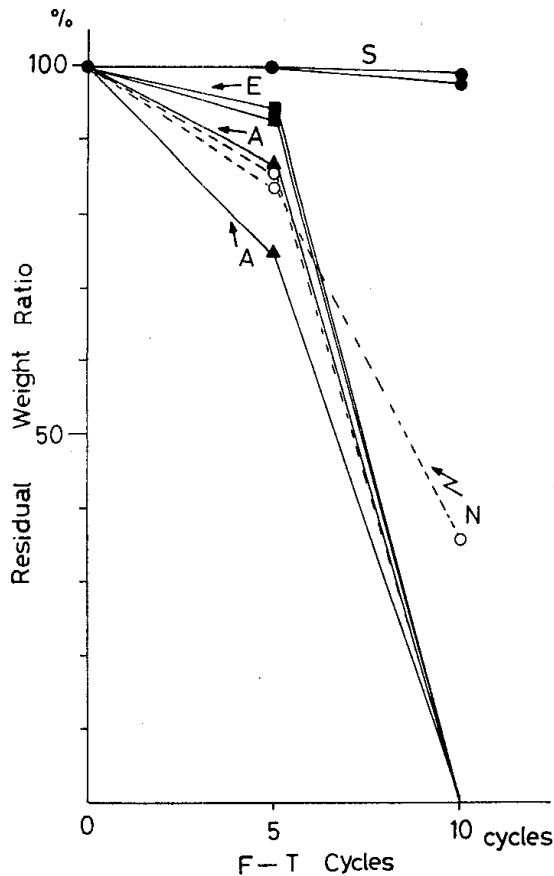


図-10 凍結-融解による破損残存率(凝灰岩)
 Fig. 10 Residual weight ratio of test samples due to freeze-thaw cycles (Tuff)

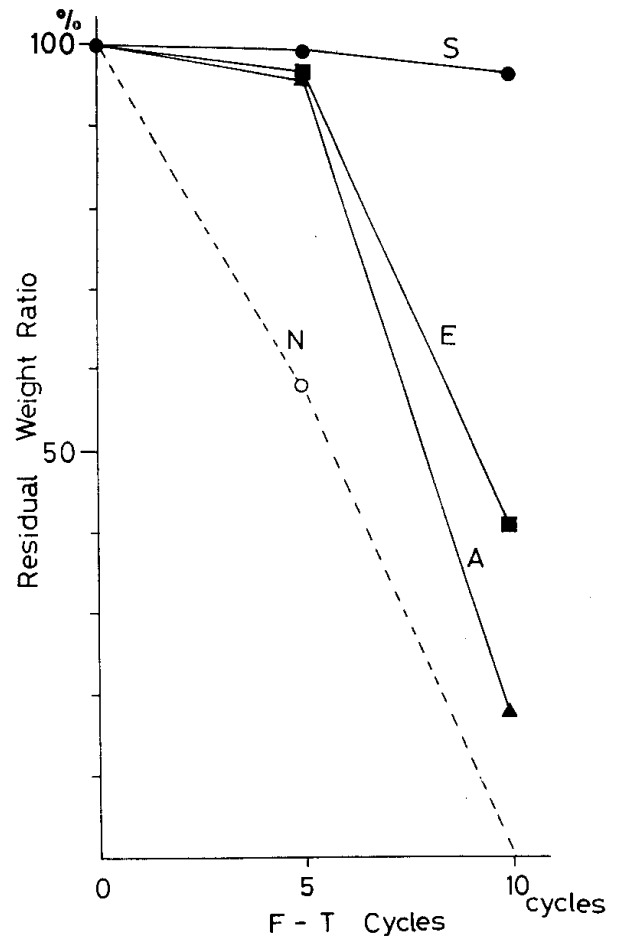


図-11 凍結-融解による破損残存率(凝灰岩劣化促進処理)
 Fig. 11 Residual weight ratio of test samples due to freeze-thaw cycles (Tuff artificially weathered)

除いて、凍結破壊が生じている。10サイクル時には、S 以外の全試料は凍結破壊された。5サイクルと10サイクル時を比較する

と、試料の形状は変わらず、円筒の両端面や立方体の稜の部分が剥離され、次に全体が破碎される段階をへている。そこで、試料の形状が残る部分の乾燥重量と元の試料の乾燥重量の比率をとって、残存比として示したのが図-10と図-11である。図-11は劣化促進処理した試料の結果を示している。両方の図に共通して、5サイクル時での残存量が多く、10サイクルでほとんど破碎されて、元の形状が残らないことがわかる。S はいずれの場合も破碎損失量はごくわずかであった。

以上の実験結果から、凝灰岩を試料とした樹脂処置では、シリコン樹脂の使用例は凍結-融解による破碎防止効果がきわめて大きいことがわかった。そこで次の考察でシリコン樹脂処置の有効性が何に起因するかを検討する。

5. 考 察

樹脂処置による凍結破碎防止効果の機構を考える場合、岩石の凍結破碎機構そのものを良く理解しなければならない。そこで、まず岩石の凍結破碎の機構を示唆する実験を行ない、次にその結果を樹脂処置した事例に適用してみる。

5-1 岩石の凍結破碎機構とその実験的検証

従来、岩石が凍結で破碎される原因は、岩石内の水の凍結時体積増とされていた³⁾。ところが自然条件のもとでは、岩石の空隙内に水が完全に満たされることはない。水の体積増は空隙内の空気部分に逃げてしまい、岩石へ膨脹圧が作用しない⁴⁾。凍結時の破碎には、岩石内での水流があり、凍結面への水の集積が生ずるのだとする土の凍上力と同様の考え方が示された⁵⁾⁶⁾。発生する凍上力が岩石のせん断強度を越えれば破碎される。すると、凍上力は何によって規定されてくるかが問題となる。岩石の凍結過程での水分移動は、凍上力に関連する。凍上力そのものを規定しないで、凍結時の水分移動を把握すれば、凍結破碎の機構や条件を推しはかることができる。そこで、凍結時の岩石内水分移動に関する実験を行なった。

5-2 実験の概要

実験に用いた岩石試料は、前述の凝灰岩である。直径 5 cm 長さ 15 cm の円筒試料に整形した。凍結過程での岩石内の水分移動を測定するには、2つの方法がある。岩石内の含水量を測定するためにポーラスカップを試料内に挿入し、含水量に関連した不飽和間隙水圧を測定する方法である⁷⁾。これは、凍結時の水分量変化を、試料を破壊することなく連続的に測定が可能な方法である。次に岩石試料内に温度センサーを入れて、所定の位置まで凍結線が到達したら、1 cm 厚みごとに試料を切断して乾燥させて含水量の分布を得る。1回の実験では、凍結線の1つの位置の場合しか得られないので、凍結に伴う連続的变化を得ることはできない。この2つの方法による実験の内容を次に述べる。

ポーラスカップを挿入する方法の実験概略図を図-12に示す。円筒試料をたてて、下端を水分供給容器に浸す。上端面には凍結板を置く。冷却用ブラインを循環させて上方から凍結させる。上端面から 3, 5, 8 cm 位置にポーラスカップを埋め込む。ポーラスカップの水圧変化は、接続した圧力変換器で増幅して、データローガーに入力する。凍結線の位置は、上端面から 1 cm ごとに埋め込んだ熱電対による温度分布から得られる。これらの測定値は水分張力

(負の間隙水圧) 値と合せて、小型コンピュータシステムによって一定時間ごとに測定された。

凍結線の位置ごとに切断して含水量を測定する実験では、1 cm ごとに埋め込んだ熱電対による温度分布から位置の推定を行なった。所定の位置に達すると、直ちに -15°C の低温室内で、ダイヤモンドブレードカッターで 1 cm 厚みごとに切断する。そして各々を 10°C で 24 時間乾燥させて含水量の分布を得た。

5-3 実験結果と考察

凍結線の進行速度の小さい場合 (0.2 cm/hour) の水分張力値経時変化を図-13に示す。不飽和の土と同じように、水分張力は負の値となるが慣例に従って負の符号を付けずに、水頭高圧力単位 ($\text{cm H}_2\text{O}$) として表わす。凍結線が 3 cm 位置に近ず

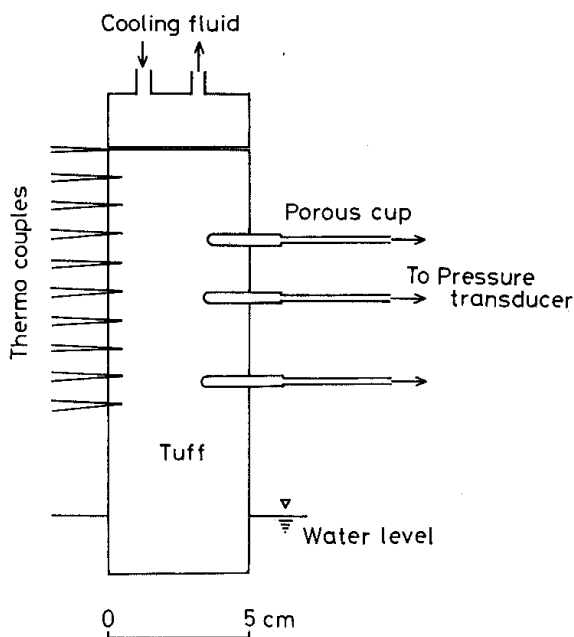


図-12 岩石内の水分張力測定装置

Fig. 12 Diagram of apparatus used to measure pressures in a freezing rock

くにつれて水分張力は増加している。5 cm 位置でも15時間経過後から増加しはじめた。水分張力が大きくなることは、岩石内の水が減少する、つまり乾燥することを意味する。凍結線に近い上方ほど水分張力が大きいことは、上方に向う水の流れが存在することになる。水分張力の位置ごとの差（動水勾配）は上向きとなっている。

図-14に岩石内の水分張力分布の経時変化を示す。3~5 cm 間の動水勾配は、凍結初期で急増しているが4時間以後はほぼ一定となっている。この一定となった動水勾配に沿って下方から水が凍結線へ移動し、凍結層内で水が析出してこの時の凍上力で岩石は破碎される。

凍結によって破碎されなかった安山岩の事例を図-15に示す。凍結線が近づくても、水分張力は増加せず、上向きの水流が存在していないことが示唆された。ところで、凍結線へ水を吸い上げる駆動力については、現在のところ明確に規定されていない。土の凍結との類推を行うと、岩石空隙内の水が鉱物粒子表面への吸着や溶存物質の濃度などで化学ポテンシャルが低下していることに起因する。この化学ポテンシャルの低下した水と、下方のバルクな水の間、水を吸い上げる圧力差が生じて水が吸い上げられるのだとされる。凍結で岩石が破碎されるのは、この吸い上げる駆動力（吸水ポンプにたとえる）が大きい岩質と空隙が多くて透水係数の大きい岩質に限られる。凍結破壊を防止するには、樹脂処置で固化して凍上力に耐えるようにするというよりも、岩石空隙内の表面状態を変えて吸水能力を低下させ透水係数を小さくする方がより本質的な防止法といえる。

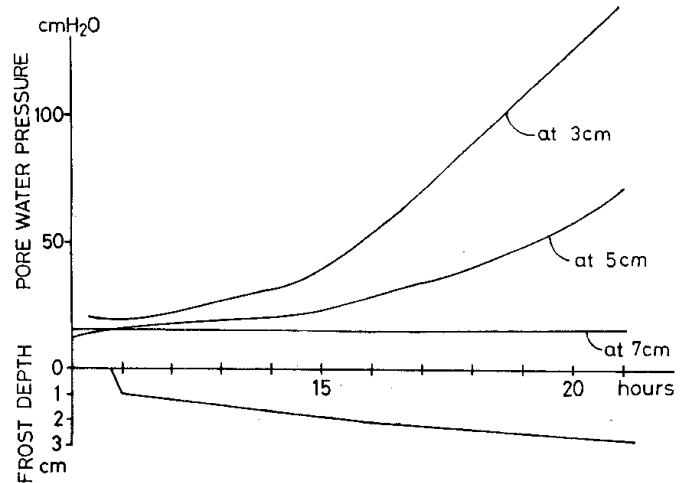


図-13 凍結過程における岩石内の水分張力変化(凝灰岩)
Fig. 13 Typical result of experiment using Tuff sample

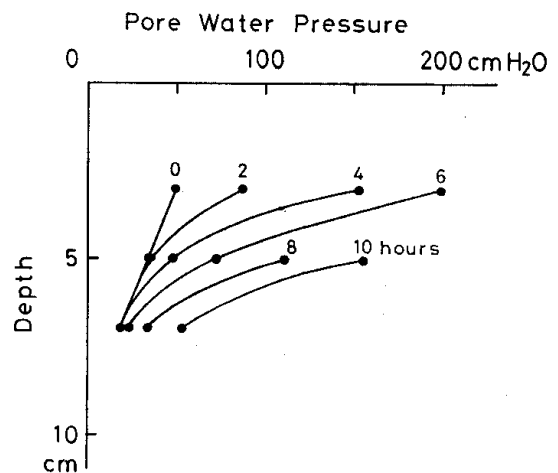


図-14 凍結過程での岩石内水分張力分布の変化(凝灰岩)
Fig. 14 Pore water pressure profiles in Tuff sample during freezing

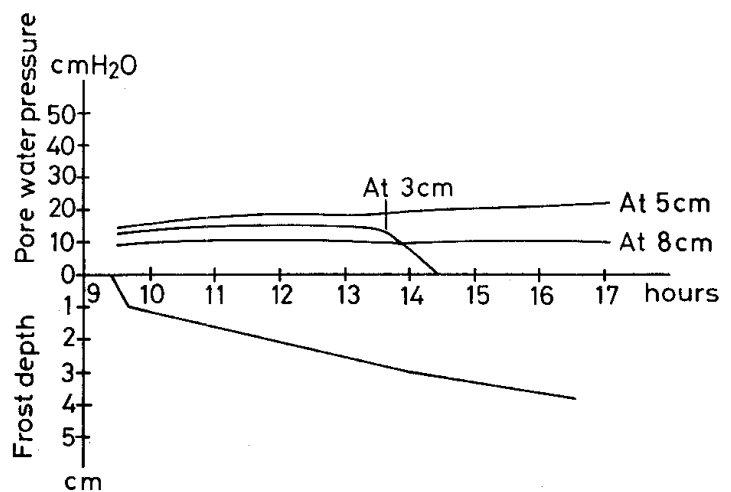


図-15 凍結過程における岩石内の水分張力変化(安山岩)
Fig. 15 Typical result of experiment using Andesite sample

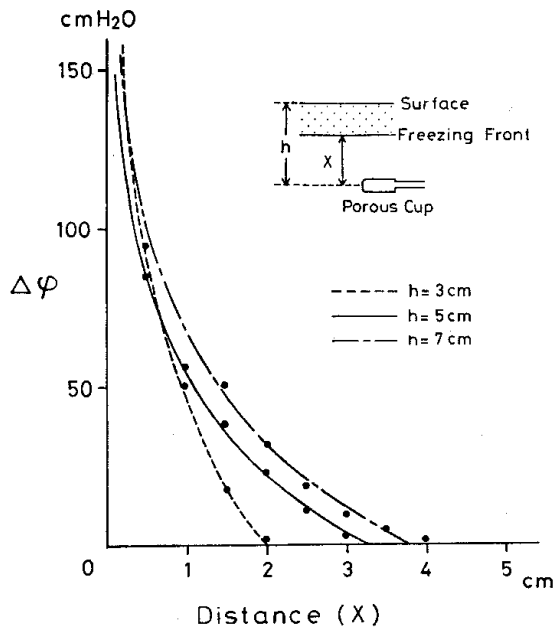


図-16 凍結線下の水分張力の推定
Fig. 16 Increase in pore water pressure as a function of distance from freezing front

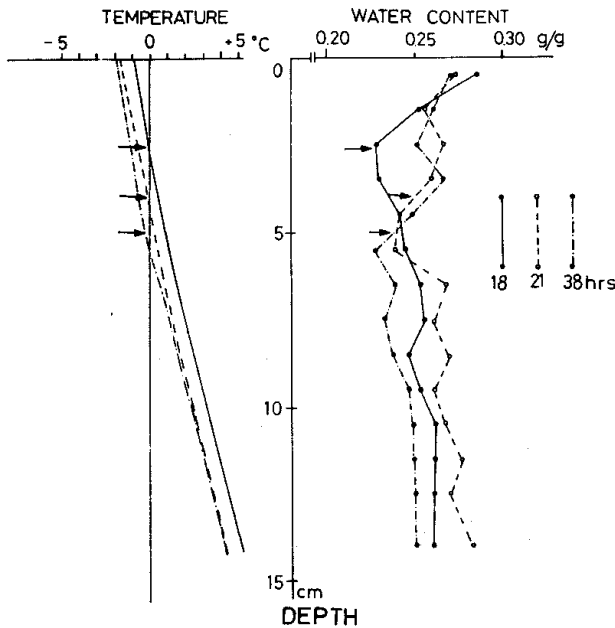


図-17 凍結に伴う岩石内含水量分布の変化
Fig. 17 Water content profiles of freezing rock

凍結線での吸水能を推定するために、図-16に示す実験解析を行なった。横軸は水分張力を測定しているポーラスカップと凍結線までの距離である。たて軸は水分張力の増分を示す。凍結線が近付くにつれて水分張力は増加する。凍結線直下では大きな水分張力のために、ポーラスカップを通じて空気の流入が生じて水分張力を測定することができない。そこでこの図の各点をむすぶ関数近似式を得て、 $X=0$ すなわち凍結線での水分張力増加分を内挿して求める。その結果水分張力増は $1000\text{cm H}_2\text{O}$ にも達して、凍結線直下に大きな吸水能が存在することが予測される。

凍結線が一定位置に達するごとに、試料を切断して水分量分布を得る第2の方法による実験結果を図-17に示す。温度分布によって凍結線位置を推定し矢印にして表わしてある。時間経過ごとに凍結線が下方に移動していることがわかる。いずれの場合も凍結側で含水量が増加し、凍結線直下の未凍結側で減少する傾向がある。これは前述の水分張力変化の傾向と一致する。すなわち凍結線直下に吸水能が存在し、下方から水が移動してくることを示唆している。

以上の2つの実験から、凍結破碎を生ずる凝灰岩では、凍結過程で凍結線への水分移動と凍結側への集積があり、このため破碎されるという機構が推定された。

5-4 樹脂処置の効果とその理由

4で述べたように、凝灰岩について3種類の樹脂を用いた凍結破碎実験では、シリコン樹脂が有効であることが示された。そこで凍結破碎機構に基づいて、その理由を考察する。まず樹脂処置による固結化(強度増加)がどの程度であったかを判定する。つまり、樹脂処置の効果が、強度増によるかを判定する。

岩石の強度(一軸圧縮)と超音波速度(V_p)の間には、次のような経験的な関係式が得られている⁸⁾。

$$q_u = 10 \cdot V_p^3 \dots\dots\dots(1)$$

q_u : 圧縮強度 ($\text{kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$) V_p : 速度 ($\text{km} \cdot \text{sec}^{-1}$)

表一 3 樹脂処置による V_p の変化 (凝灰岩 ; 3 個平均値)

Table 3 V_p changes due to resin-treatment (Tuff ; Ave. of 3 pieces)

樹脂処置 (Resin treatment)	超音波速度 (V_p)
無処置 (Control)	2.37 km/sec
エポキシ樹脂 (Epoxy resin)	2.49
アクリル樹脂 (Acrylic resin)	2.46
シリコン樹脂 (Silane)	2.38

表一 4 水置換による空隙率測定 (凝灰岩 ; 3 個平均値)

Table 4 Porosity of the resin-treated samples measured by water substitution (Tuff ; Ave. of 3 pieces)

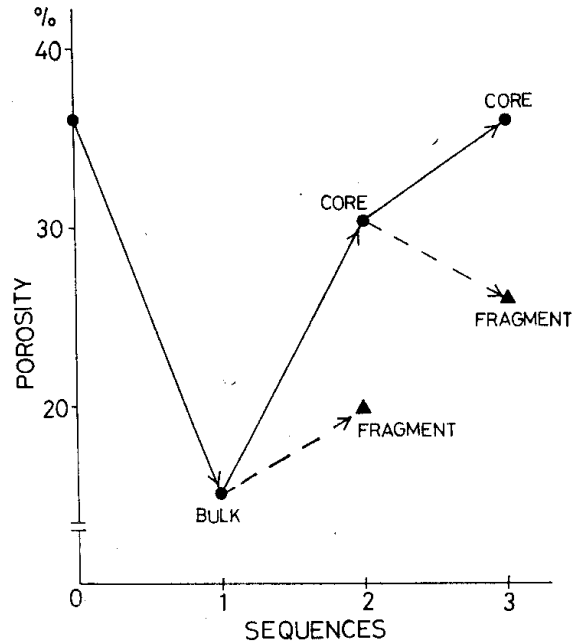
樹脂処置 (Resin treatment)	空隙率 (Porosity)
無処置 (Control)	34.5%
エポキシ樹脂 (Epoxy resin)	30.7
アクリル樹脂 (Acrylic resin)	33.8
シリコン樹脂 (Silane)	11.5 [30.4]*

* 水でなくケロシンによる置換

* Measured by kerosene instead of water

したがって樹脂処置前後の V_p で、強度の変化が予測されることになる。実験結果を表一 3 に示す。これに(1)式をあてはめて、樹脂処置で強度がどれだけ増加したかを推定するとエポキシ、アクリル樹脂で10%程度、シリコン樹脂ではほとんど変化せず、強度の増加が生じていないことがわかる。次に空隙への樹脂の浸透度を比較するために、空隙率を測定した。測定の方法は、はじめに 105°C で24時間乾燥後、脱気減圧下で水分飽和を行なった。その結果を表一 4 に示す。アクリル樹脂では空隙率がほとんど変っていない、エポキシ樹脂でも空隙率の減少は4%弱にすぎない。つまり空隙内への樹脂の充てんは少ない。ところがシリコン樹脂では11%まで減少し、見かけ上空隙への充てんが多いことになる。そこで表最下段にあるように水に代ってケロシンで空隙置換をして空隙率を算出すると約30%になり、エポキシ樹脂と同じ程度となった。

そこで、シリコン樹脂による処理で岩石内への水分浸透を阻止する効果があることが予測された。これを確認するため、次の実験を行なった。5×5×5 cm 立方体と直径 5 cm 高さ 5 cm の円筒形の岩石試料を用いてシリコン樹脂処置を行なう。この状態で水置換による空隙率を測定する。次に円筒試料の両端を 5 mm 厚さで切断する。また立方体では各面を 5 mm 厚さ



図一 18 シリコン樹脂の浸透と深さの違いによる空隙率の変化

Sequence 0 : 樹脂処置前 (Before treatment)

Sequence 1 : 樹脂処置後 (After treatment)

Sequence 2 : 5 mm 厚切断 (Cutting off the surface layer <5 mm>)

Sequence 3 : 5 mm 厚切断 (" <Another 5 mm>)

Fig. 18 Estimation of the absorbed thickness treated by silane

に切断する。切断破片と残部本体との空隙率を測定する。さらに 5 mm 厚さに切断して空隙率を測定する。その結果、立方体の例を図-18に示す。初期の空隙率36%が樹脂処置で低下した。(横軸 sequence 1)。これは試料表面の樹脂で水の浸とうが阻止されたためである。5 mm 切りとると (sequence 2), 残部本体の空隙率が増加する。つまり中心部の樹脂浸とうの不十分な部分が含まれているからである。さらに 5 mm 切ると (sequence 3), 中心部の空隙率は処置前に戻る。このことから、シリコン樹脂の浸とうの深さは 1 cm 程度であることがわかる。図-19と図-20は、この状態をあらわしている。水に浸けると、樹脂があまり浸とうしていない部分は、水にぬれて暗色に変る。すなわち、樹脂の浸とう状態が肉眼で識別することができる。

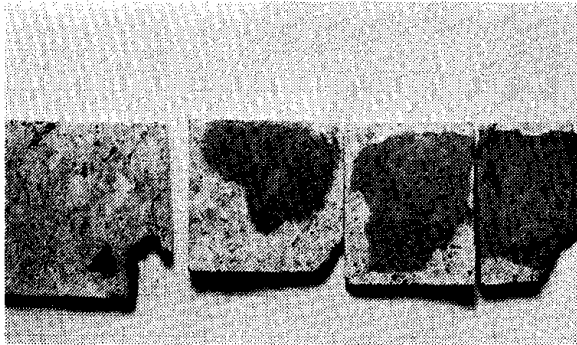


図-19 シリコン樹脂の凝灰岩への浸とう状態 (左から 5 mm 内側面, 暗色部が未浸とう部分)

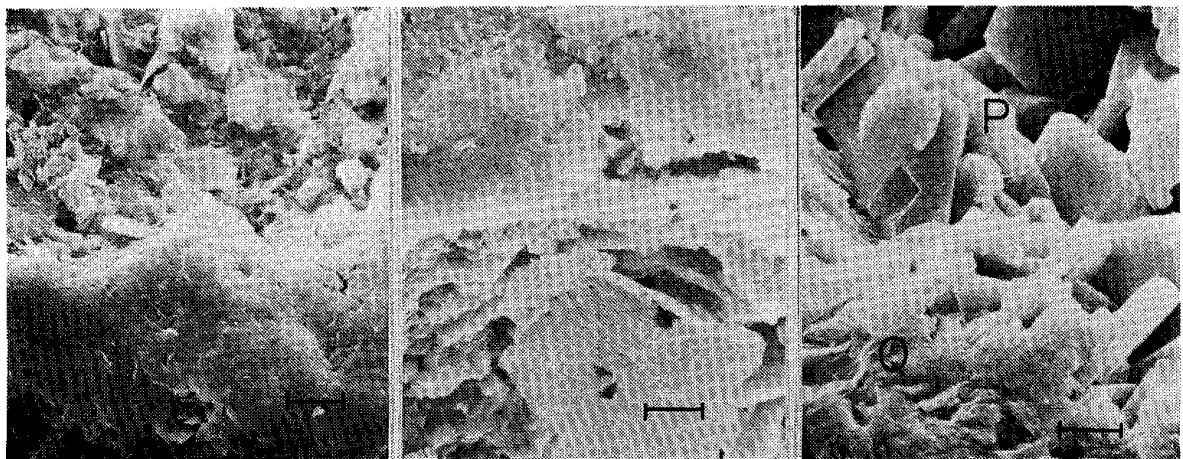
Fig. 19 Absorbed silane in Tuff (From left, outer to inner section, dark portion indicated non-absorbed area)



図-20 シリコン樹脂の凝灰岩への浸とう状態
Fig. 20 Absorbed silane in Tuff

シリコン樹脂と他の樹脂との差は、強度増加効果や空隙への充てん度ではなく、岩石表面の樹脂浸とう層を通して水の浸とうを阻止する撥水性にあることが以上の実験結果から判明した。

直接的に各樹脂の浸とう状態を観察するために、試料を樹脂処置して表面構造を走査電子顕微鏡写真にとって観察した。その結果を図-21に示す。エポキシ樹脂とアクリル樹脂では、空隙内壁に樹脂が付着している。シリコン樹脂では P【の部分樹脂が付着していない空隙内部である。空隙内に 2 次的に風化過程で成長した結晶がみられる。Q の部分が樹脂付着部分である。シリコン樹脂の結晶は認めることはできな



Epoxy resin

Acrylic resin

Silane

図-21 樹脂処理した凝灰岩の走査電子顕微鏡写真 (スケール; 5 μ)

Fig. 21 SEM photos of resin treated Tuff (scale; 5 μ)

った。この写真から、樹脂の空隙内付着状況では大きな相異はみられない。また空隙内部を充てんするような浸透でないことがわかった。したがってシリコン樹脂が凍結破碎の防止効果の高いことは、凍結過程での水分の岩石内への流入と流動が阻止されることに起因している。また樹脂の浸とも、空隙内表面に付着しており、空隙全体を充てんすることはない。これらの特徴は、遺跡の保存にとっていくつかの利点となる。

6. 結 語

風化した石造遺跡を凍結破碎から保護するために樹脂を用いるが、有効性の高い樹脂とその理由について実験を行なった。岩石の凍結破碎の機構が、凍結時の岩石内水分移動と集積によることが実験で確認された。そこでこの機構を考慮して、樹脂による破碎防止の理由をさぐってみた。異なる3種の樹脂を用いて処理後の凍結抵抗性の実験で、シリコン系樹脂メチルエトキシシラン (SS-101) が有効であることがわかった。樹脂処置の効果は、樹脂による固結化によるのではなく、岩石内への水の浸とうの阻止によるものと考えられた。それは、樹脂処置で強度に関連した超音波速度 (V_p) には変化が生じていないこと、凍結破碎の主因である凍結過程での水分移動が生じないことから示唆された。

今回の実験での処置方法では、岩石内に浸とうした樹脂層の厚さは、1 cm 程度であった。また樹脂は空隙全体を充てんせず、空隙を通じて空気等の流入出があると予想される。これは、実際の遺跡への適用にあたって、いわゆる岩石が「呼吸」できる状態にあり有利な点となる。こうした樹脂を野外遺跡へ適用するためには、今後以下のような問題について検討を加える必要がある。

- ① 基盤岩体に刻み込まれた遺跡へ、有効な量の樹脂を含浸させる方法の確立
- ② 経時変化、とくに樹脂の疎水性がどの程度安定に保たれるかの予知
- ③ 樹脂処置と並行した周辺環境の制御
- ④ 基盤岩体への水の流入をシャ断するような水抜き工事の併用
- ⑤ 試験地域の選定と、長期間の観測

以上の点については、今後関連する機関と協力して、将来試験地域での実験を行う必要がある。今回の研究実験は、筆者の1人(福田)が昭和56年度招へい研究員として東京国立文化財研究所で行なった共同研究の成果をもとにして、北大低温科学研究所での成果とあわせてまとめたものである。実験にあたっては、東京国立文化財研究保存科学部長江本義理氏、低温科学研究所長木下誠一教授に多くの御教示を頂いた。また、アメリカ寒地工学研究所 (CRREL) の熊井基博士には、岩石試料の走査電子顕微鏡写真を撮影していただいた。これらの方々に感謝の意を表わします。

文 献

- 1) 福田正己：北海道における凍結—融解の繰返し出現頻度の分布，昭和54—56年度北海道大学特定研究経費成果報告書，75-86 (1982)
- 2) Masumi Fukuda : Some observations about rock weathering by frost upon the wall carvings, Fondation Française D'études Nordique Actes et Document No. 6, 73-79 (1979)
- 3) C. D. Ollier : Weathering, Oliver & Boyd co. Edinburgh, pp 304 (1969)
- 4) S. E. White : Is frost action really only hydration shattering ? : A review, Arctic and Alpine Research, 8, 1-6 (1976)
- 5) D. H. Everett : The thermodynamics of frost damage to porous solids, Transactions of the Faraday Society, 57, 1541-1551 (1961)
- 6) 福田正己：凍結—融解による岩石の破碎機構論，地形，1, 89-95 (1980)

- 7) 福田正己：凍上過程での土中の水分ポテンシャル分布について，雪氷，**21**, 33-40 (1980)
- 8) 大久保彪・寺崎晃：岩石の物理的性質と弾性波速度，土と基礎，**19**, 31-37 (1971)

The Breaking of Stone Remains Caused by Freezing and Its Protection by the Treatment with Synthetic Resins

—Studies on the Deterioration of Stone Caused by
Freeze-thaw Cycles and Its Preservation (I) —

Masami FUKUDA, Sadatoshi MIURA, Tadateru NISHIURA
and Tomokazu MATSUOKA

In the cold environment, the disintegrations of rocks due to freezing are often taken place. And various damages upon historic stone remains are caused by these disintegrations. The present authors conducted the freezing experiments using a frost susceptible rock to examine the effectiveness of synthetic resins for the preservation. In the experiments a Tertiary Tuff from Tochigi prefecture, Central Japan was used. Rock specimens were treated by the impregnation with three kinds of synthetic resins (i. e., silane, epoxy and acrylic resin), then exposed to the alternation of temperatures in the cold room.

The porosities and ultrasonic velocities of specimens were measured at every 5 cycles of freezing-thawing. Through the experimental runs, no breaking or changes of physical properties were observed on the specimens treated by silane, while the other two resins showed no preservative effects to frost shattering.

The differences among the resins in preservative effectiveness might be explained based upon the mechanism of frost shattering, which is known as the model of coupled heat and moisture flows in rocks during freezing. Some verificative experiments were also conducted. And water migrations through rocks were monitored on an untreated specimen. No water migrations, however, were observed through a specimen treated by silane. The impregnated silane into pores of rocks impedes the water flow during freezing. And no excess water accumulated in the frozen portion of rocks. Once water accumulates in frozen portion in rocks, the segregation forces of ice caused the disintegration of rocks. The preservative effectiveness of silane to frost shattering is explained as the impeding effect of water flows in freezing rocks.