



Title	小樽手宮洞窟壁面遺跡の凍結破損防止にかかわる基礎研究
Author(s)	福田, 正己; FUKUDA, Masami
Citation	低温科学. 物理篇, 43, 171-180
Issue Date	1985-03-18
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18511
Type	departmental bulletin paper
File Information	43_p171-180.pdf



小樽手宮洞窟壁面遺跡の凍結破損防止にかかわる基礎研究*

福田正己
(低温科学研究所)
(昭和59年10月受理)

I. はじめに

小樽市手宮洞窟内の壁面には、古代文字として知られている陰刻壁画がある。およそ100年前に発見されて以来、寒冷な環境下にさらされており、一部劣化が進行して将来に全体が破損して文化財的な価値が失なわれるおそれもある。そこで、この石造文化財に保存策を施工するにあたって、基盤岩石の風化にかかわる主要な要素と原因を知る必要がある。つまり、保存策は風化を引き起す主要な要素を除去することで確立されるからである。

以上の観点から、洞窟を構成する基盤岩石の風化程度を把握し、また凍結—融解の繰り返し頻度などの外的要因についての現地観測を行なった。すなわち、保存にかかわる基礎調査は、現地での気象等の観測と採取した岩石試料を用いた低温室内の各種試験から成り立っている。本報告では、これらの観測結果及び実験結果とそれらに基づく解析結果について述べる。

II. 実験の内容

1. 現地での凍結—融解頻度の測定

凍結—融解の繰り返し、基盤岩石を劣化させることが観測されている¹⁻³⁾。そこで現地での冬季間の気温と基盤岩石内の温度を測定して、実際に出現する凍結—融解の繰り返し回数を知り、外的な劣化促進の条件としての温度変化を評価する。0°Cを上下して変動する温度変化は、日変化と季節変化があるが、ここで問題とするのは基盤表面付近なので日変化に着目する⁴⁾。また、変動の幅がある一定以上でなければ、凍結破壊につながるような温度変化はごく表層部に限られる。そこで、単に0°Cを上下する変動のみならず、その変動幅がどの程度かを考慮する必要がある。

現地での温度測定と記録は次の要領で行なった。測温抵抗体 (Pt100Ω) を用いて、洞窟仮設覆屋の内側・外側の気温と岩体表面付近の各々2点、合計4点にそれらを設置した。外気温は覆屋のひさし下で、直接日射の当たらない風通しの良い地点で測定した。地表面から2.6 m高さであった。外側の基盤岩体のクラック内に、およそ6 cm深さまで測温素子を埋設し、エポキシ樹脂で固定した。基盤岩体は西向きで、かなりの日射があるものと予想された。洞窟は仮設木造の覆屋でおおわれており、直接外気と触れることはない。この覆屋内高さ1.8 m位置で気温と

* 北海道大学低温科学研究所業績 第2685号

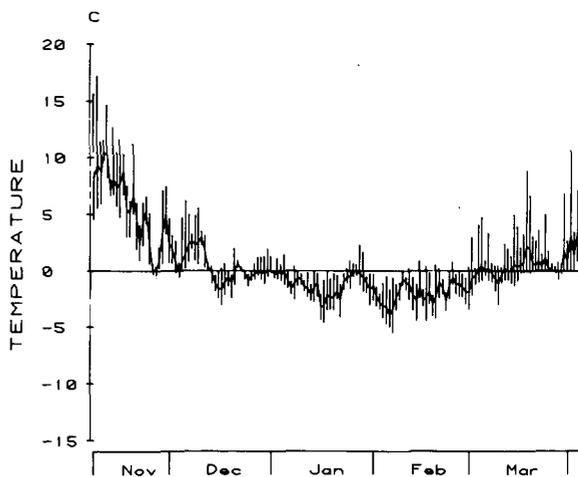
クラック内の岩体温度を測定した。温度記録はC-MOSメモリー式データレコーダー（早坂理工製）に毎1時間ごとに集録された。測定の期間は、11月7日より4月4日までであった。集録されたデータはさらにコンピュータハイインターフェイスを通じて転送され、フロッピーディスクに取められた。

2. 測定結果

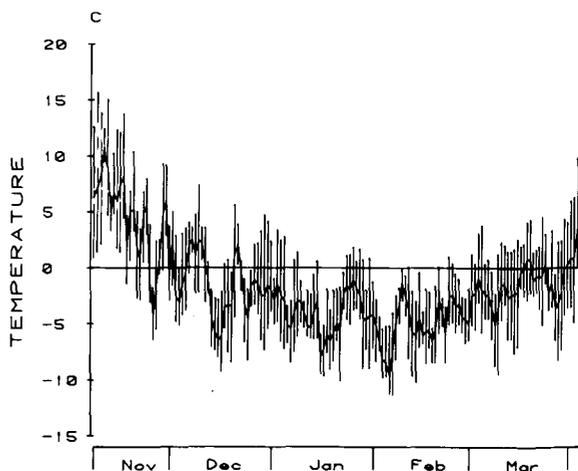
各4点のすべてのデータによって、日平均気温と算出し、あわせて日最高、最低温度によって日変動幅を算出した。その結果を第1図～第4図に示す。これらの図は各測点の冬季間の温度変動の概要を表わしている。外気温（第1図）、外部露岩（第2図）、洞窟内気温（第3図）の変動は相互に類似している。外気温は測温素子の取り付け位置がひきし下であったため、日射の影響を受けず日変動幅も小さい。これと比べて外部露岩では、日射の影響を受けて日変動幅が大きい。1月～2月ではほぼ 0°C 以下の状態を保っていた。第3図の洞窟内気温変動では、外気温（第1図）と類似しているが、12月下旬～1月中旬に外気よりもかなり温度が高い。これは覆屋のガラス窓を通じた日射があり、温度効果のために覆屋内に暖気が残ったためである。

次に日平均温度について、外部気温と露岩内温度を比較する。（第5図）気温よりも露岩温度の方が低くなっているが、これは北西向きで覆屋による日影とならないために、夜間の放射冷却の効果を受けやすいためである。とくに好天の2月はじめでは、気温よりも 5°C 以上も低くなっている。第6図は仮設覆屋内の気温と壁面温度変動を示すが、第5図と比べてみると、 0°C 以下の凍結期間も短かく仮設ながら外気の厳しい冷却がやわらげられていることがわかった。

ところで、凍結破砕にかかわるのは、 0°C を上下して変動する出現頻度とその変動幅である。そこでまず 0°C を上下して日変動した出現頻度を外部気温、露岩、洞窟内気温、



第1図 外気の日平均温度と変動幅



第2図 外部露岩表層の日平均温度と変動幅

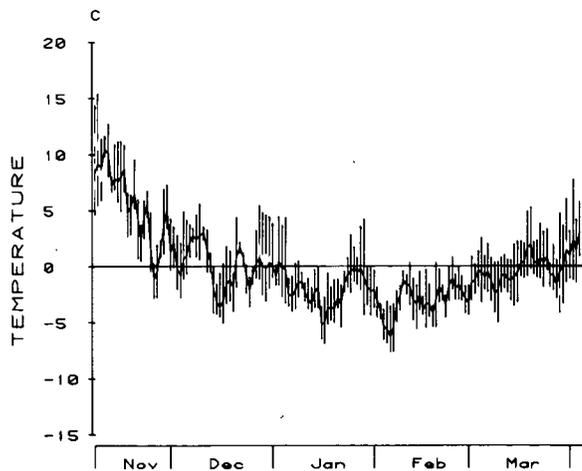
そして洞窟壁面クラックについて調べた。(第7図～10図) 外気温と露岩を比較すると、露岩の方がはるかに変動幅も大きく、また出現頻度も多い。3月中～下旬にとくに出現頻度が多くそして変動幅も大きいことがわかる。洞窟内の気温変動は外気よりも変動幅が小さい。壁面クラック内は変動幅も小さい上に、出現頻度も少なくなっている。これは、仮設ながら覆屋が凍結破損防止に十分に効果のあることを示している。

岩石が凍結破砕を受けるには、ある一定温度まで冷却されることが必要である。そこで 0°C を上下する変動ではなく、凍結破砕に有効な変動幅以上での日変動の出現頻度としてみる。変動の幅は後の低温室内実験からより厳密に規定するが、ここではあとあえず -4°C 以下 $+4^{\circ}\text{C}$ 以上の変動幅とする。外部露岩の場合を第11図に示すが、12月下旬と3月下旬に合計6回出現した。すなわち、外部の露岩では、1冬に6回程度の凍結破砕を十分に生ずる凍結一融解を繰り返したことになる。とくに3月下旬には融解水の供給があり、もう1つの重要な破壊因子の含水条件が満たされている。また変動の幅が大きいと、凍結一融解が基盤岩体の深くまでにおよぶことになる。そこで現地で採取した岩石試料を用いて、温度拡散率を測定して、基盤岩体内の温度変動分布を推定した。

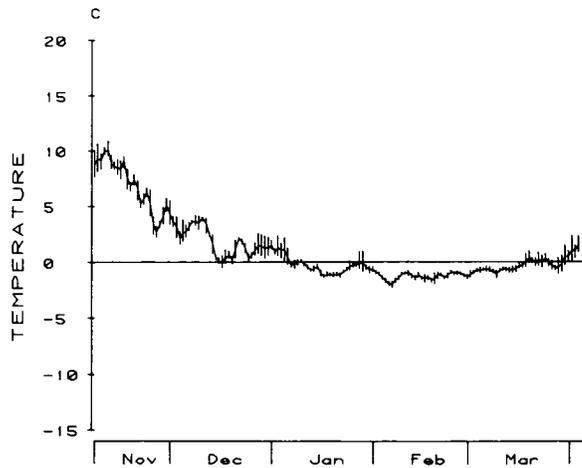
推定は次の手順で行なった。ある変動幅 A_0 で、岩石の表面温度が周期関数 $A_0 \sin(\omega t)$ として変化する。岩石の速度拡散率を κ とするなら、半無限体とした基盤岩石内の温度変化は次式で表わさせる。

$$\theta = A_m + A_0 \exp(-x \sqrt{\pi/\kappa t}) \cdot \sin\{(2\pi/T) \cdot t\}$$

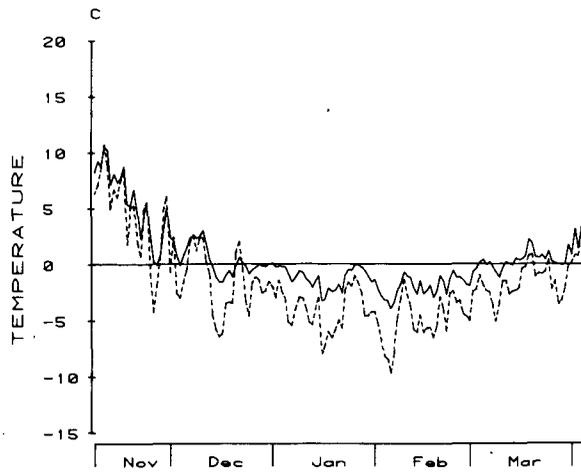
ここで $A_m = 0^{\circ}\text{C}$ である。 A_0 は温度変動幅、 T は周期(1日)、そして x は深さ(cm)である。実測によって温度拡散率は乾燥の場合 $\kappa = 1.0 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ 、湿っている場合 $\kappa = 3$



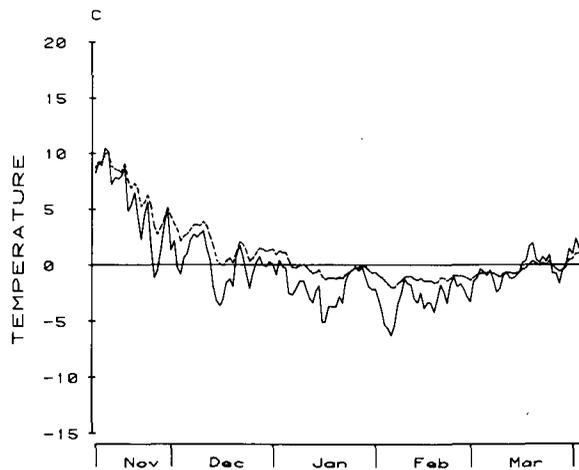
第3図 洞窟仮設覆屋内の気温の日平均と変動幅



第4図 洞窟内壁面クラック内温度の日平均と変動幅



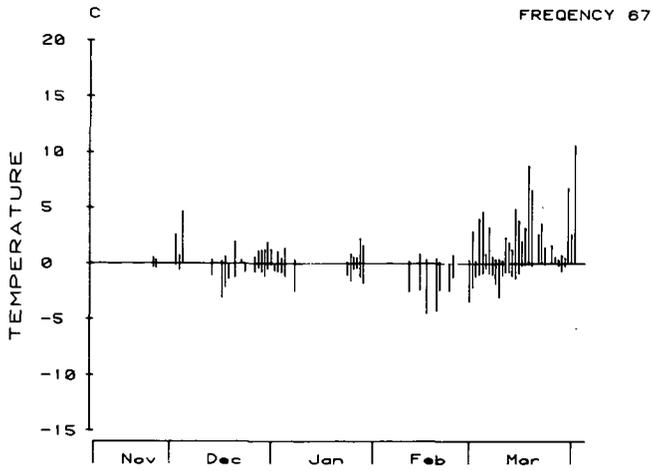
第5図 外部気温と外部露岩表層温度との比較（日平均温度）
 実線：外気温
 点線：露岩表層温度



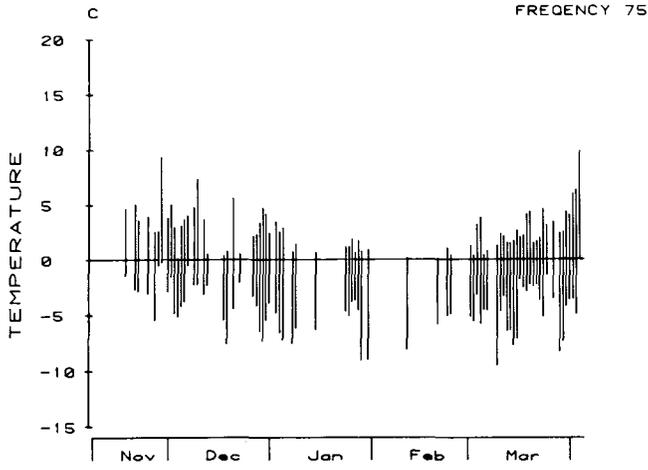
第6図 洞窟仮設覆屋内の気温と壁面クラック内温度との比較（日平均温度）
 実線：洞窟内気温
 点線：洞窟壁面クラック内温度

$\times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ として得られた。そこでこの2つの κ を用いて、 A_0 が 5°C と 2°C の場合について各々計算してその結果を図示する(第12図)。湿って $-5 \sim +5^\circ\text{C}$ と変動すると、その変動は20cm深よりも下までに達している。つまり、基盤岩体へ凍結・融解の及ぶ深さは、岩石の含水条件と表面変動幅で決まり、野外の実測から3月下旬には20cmよりも深いと予測された。

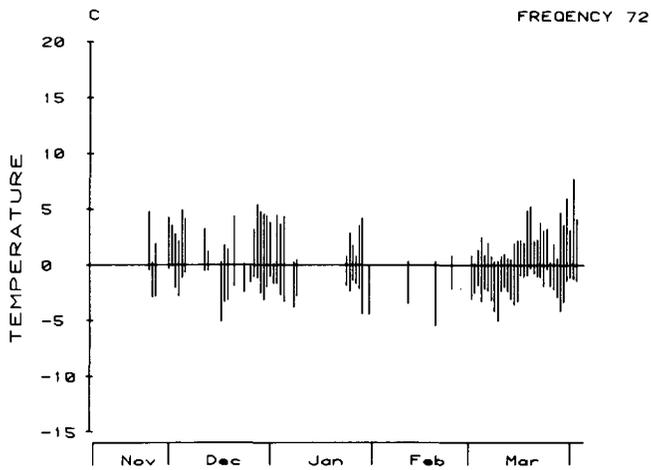
現地での観測結果は次のようにまとめられる。冬季間の洞窟内外での気温と基盤岩石内表面付近温度の変動記録から、外部基盤岩石は20cm深さにおよぶ凍結・融解の繰り返しは6回あった。これと比べて洞窟内の壁面は、ほとんど凍結・融解することがなかった。これは仮設覆屋によって洞窟が外気と遮断されているためである。



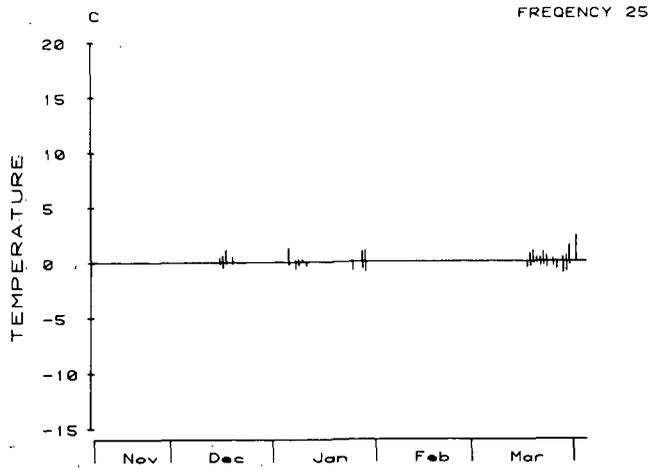
第7図 0°Cを上下変動した日の出現頻度(外部気温)



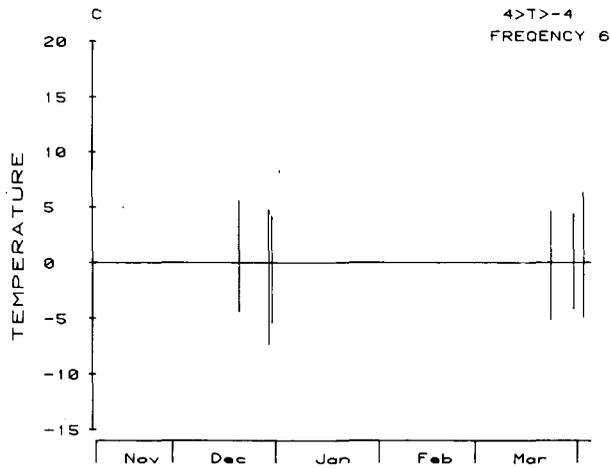
第8図 0°Cを上下変動した日の出現頻度(外部露岩表層部)



第9図 0°Cを上下変動した日の出現頻度(洞窟仮設覆屋内気温)



第10図 0°Cを上下変動した日の出現頻度(洞窟内壁面クラック内温度)

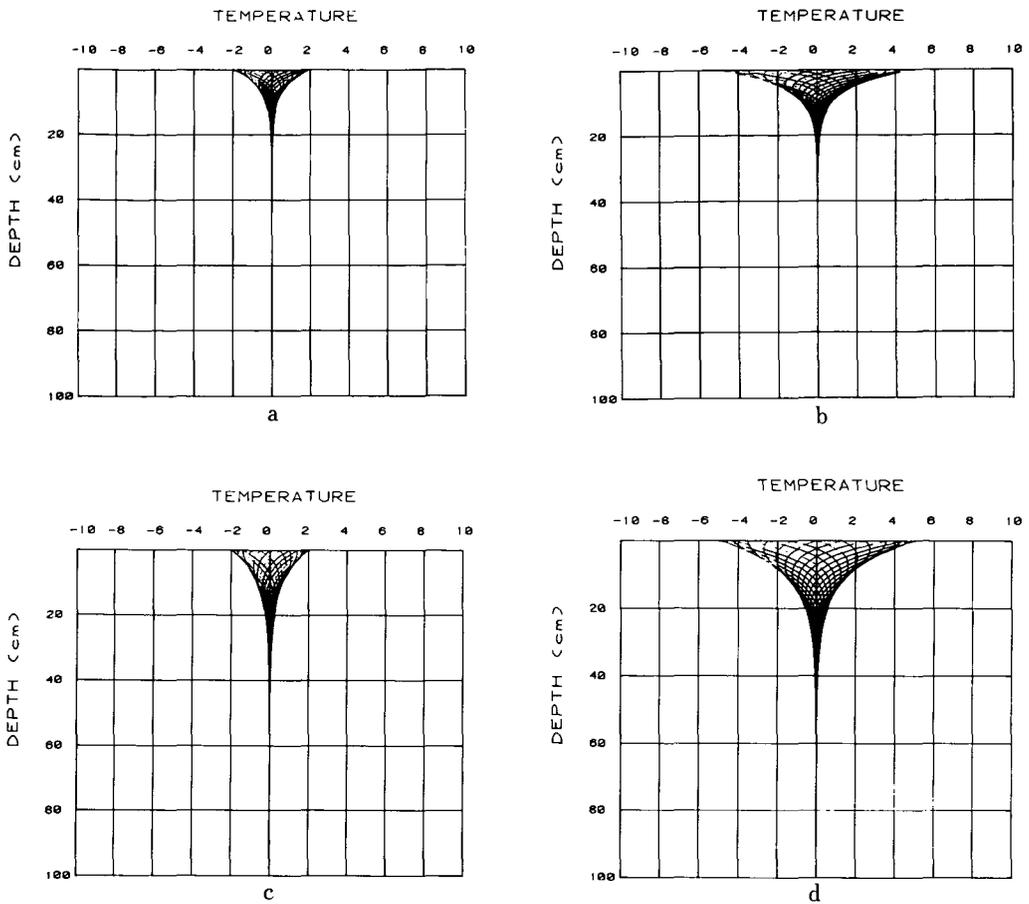


第11図 +4°C ~ -4°C 変動幅の出現頻度(外部露岩表層部)

Ⅲ. 岩石試料による凍結-融解実験

1. 構成する基盤岩体の岩質

小樽手宮地域の基盤岩石は古第三紀系の凝灰岩である。岩質上の特徴は、福田⁵⁾(1983)が調査した小樽奥沢の凝灰岩と類似している。岩質の凍結-融解への抵抗性を指す示数として、Fukuda³⁾(1979)は空隙率($n\%$)と超音波伝播速度(V_p km/sec)との間に $V_p = an^b$ (a , b は定数)の関係を見いだした。そして $V_p \leq 2$ km/sec $n = 20\%$ になると、凍結-融解で容易に破碎されるとした。手宮洞窟の構成岩石試料によって測定したところ、 $n \doteq 50\%$, $V_p = 1.7$ km/secの値を得た。前述の判定基準によれば、 $-5^\circ\text{C} \sim -5^\circ\text{C}$ の凍結-融解の繰り返りで破壊されうる岩質である。



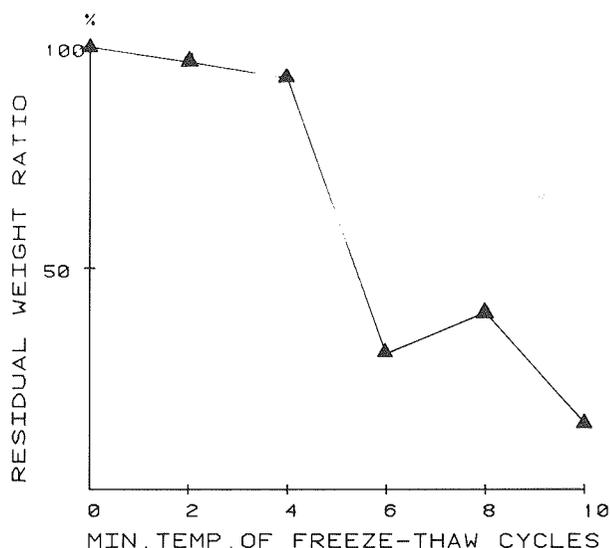
第12図 表面温度変動の岩体内への拡散
 a: 乾燥した状態, $-2 \sim +2^{\circ}\text{C}$
 b: 乾燥した状態, $-5 \sim +5^{\circ}\text{C}$
 c: 湿った状態, $-2 \sim +2^{\circ}\text{C}$
 d: 湿った状態, $-5 \sim +5^{\circ}\text{C}$

2. 凍結-融解の条件

岩石が水で飽和された状態で凍結すると、岩石内に凍結面へ向う水流が生じ、凍上作用で破壊されることが知られている。空陳率の高い凝灰岩ではとくに破碎の度合が著しい。一方で、岩石内の水にも 0°C 以下で凍結しない不凍水の存在することが知られている。不凍水の存在と、岩石内の水流とを考慮するなら、岩石が凍結する温度と水の供給条件で凍結破壊の状態や程度が異なることが予想される。そこで、低温室での凍結-融解試験を行なう条件として、凍結温度が凍結破壊に与える影響を事前に評価しなければならない。以上の目的で次の実験を行った。

現地で採取した岩石試料を $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}$ 立方体に整形する。含水率と超音波速度 (V_p) を測定ののち、水飽和の状態で水分供給が可能となるよう、底部にガーゼを敷いて水を満した容器に入れる。その後 -2°C , -4°C , -6°C , -8°C , -10°C に最低温度を設定して、

凍結させ +10°C で融解させる 1日 1 サイクルの凍結-融解を 10 サイクル繰り返した。以上の試験ののち、乾燥させて破碎で損失した重量 (W_1) を測る。試験前の乾燥重量を (W_0) とすると、 $(W_0 - W_1)/W_0$ として残存損失率を算出した。その結果を第 13 図に示す。凍結温度が -2°C の場合にはほとんど破壊されていない。-4°C においても破壊損失は小さい。-6°C 以下で急に破壊が著しくなることが示されている。-8°C で少し損失が減少しているが、これは試料岩石自身のばらつき(強度や空隙率)によるのであろう。凍結後の試料の破壊状況を第 14 図に示す。以上の実験と野外での観測結果から -4°C ~ +4°C の変動幅がこの岩質の凍結抵抗性への有効な条件であることが判明した。



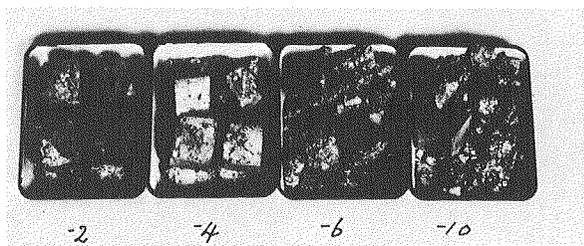
第13図 凍結温度による破損残存率の違い(10サイクル後)

つまり、洞窟壁面が飽水条件で-

4°C以下まで冷却されて凍結する場合には、破壊されやすい条件になっていると云えよう。

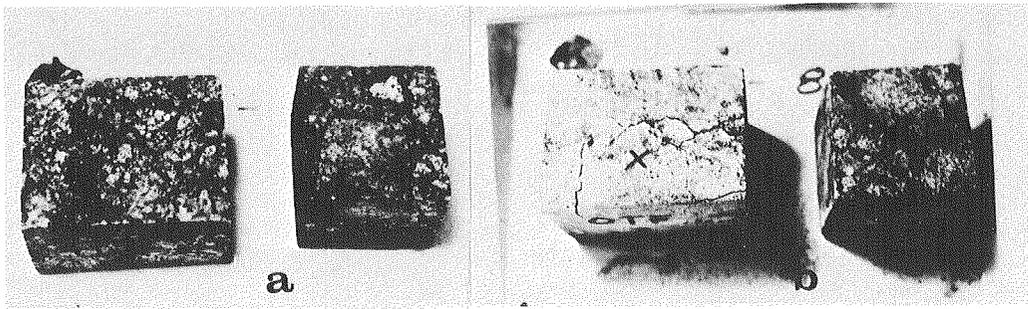
3. 合成樹脂による凍結破壊の防止効果

すでに多く報告したように、風化し劣化した岩石をシリコン系樹脂(メチルエチルトリキシラン, SS-101)で処理すると、凍結破壊への抵抗性が増すことが知られている。そこで手宮洞窟の場合にも、この樹脂による効果が生ずるかどうかの判定試験を行なった。使用した樹脂とその処理法は、福田ら^{6), 7), 8)}(1982, 83)の報告事例に従っている。処理後の含脂率は、12~8%であった。他の樹脂(たとえば、アクリル系やエポキシ系)と比べて、シリコン系樹脂は岩石への浸透性にすぐれている。



第14図 凍結温度による破損状況の違い(10サイクル後)

前述の凍結-融解試験と同じ条件(-10°C ~ +10°C)で10サイクル繰り返した。その結果を第 15 図に示す。1つのサンプルでは底部にクラックが形成されていた。しかしそれ以外の破碎や剥離は見られなかった。つまり、他の岩質の例と同様に、シリコン系樹脂による凍結破壊の防止効果が期待できる。なぜシリコン系樹脂に効果が生ずるかは、その強度の増加でなく水の浸透性によることがすでに報告されている。したがって、すでに劣化が著しく、凍結による作用以外の機械的衝撃によって破碎されやすくなっている場合には、固化効果のある他



第15図 シリコン系樹脂による処理の効果
a : 試験前
b : 10サイクル後 (凍結温度 -10°C)

の樹脂との併用を考慮すべきであろう。

IV. ま と め

小樽手宮洞窟内の陰刻壁面を保存するための基礎調査を行なった。風化で劣化した凝灰岩体は、冬季間の凍結-融解の繰り返しによって容易に破碎される。そこで凍結による破損を防止するために、作用する外的条件、すなわち岩体と周辺の温度変動について現地観測を行なった。その結果、凍結破碎に有効な温度幅を $-4^{\circ}\text{C} \sim +4^{\circ}\text{C}$ 以上とすると、冬季間に6回出現することがわかった。洞窟前面を覆う仮設覆屋内では、こうした変動は発生しない。外的条件としての温度変動をその幅を小さくし、また出現頻度も少なくするのに、この仮設覆屋が有効なことがわかる。

現地で接取した構成凝灰岩の物性値(超音波速度と有効空隙率)を測定した。これらの値は、岩石の劣化が進行し空隙が拡大増加していて、凍結によって破碎されやすい状態にあることを示している。そこで、異なる凍結温度のもとでの凍結-融解の繰り返し試験を行なった。凍結温度が -2°C 、 -4°C の場合には、10サイクルまでの破壊損失は少なく、 -6°C 以下では破碎が著しくなった。したがって、野外の条件としては、 -4°C 以下まで冷却凍結することが破碎の主原因となるものと思われる。またシリコン系樹脂を用いて処理すると、凍結破碎への抵抗性が大きくなった。これは他の風化劣化岩石と同様に樹脂の適用が有効であることを示唆している。

以上の野外観測結果と室内実験の成果を基にして、今後の有効な保存策とその施工が行なわれるものと期待される。

本報告にあたって、調査結果の発表の許可を与えていただいた小樽市教育委員会社会教育課に感謝の意を表わします。また低温科学研究所木下誠一教授からは多くの示唆と助言を受けた。併せて感謝の意を表わします。

文 献

- 1) 岩塚守公・福田正己 1974 岩石風化についての観察と実験——とくに史跡の保存に関連して——. 地学雑誌, 83, 59-67.
- 2) 福田正己 1974 凍結-融解による岩石の風化. 低温科学, 物理篇, 32, 243-249.
- 3) Fukuda, M. 1979 Some observations about rock Weathering by frost upon the well carvings Fondation Francaise Detudes Nordique, Actes et Documents, 6, 73-79.
- 4) 福田正己 1982 北海道における凍結-融解の繰り返し出現頻度の分布. 北海道全域における積雪の分布と特性ならびにそれが地面凍結, 植生, 昆虫生態に及ぼす影響に関する研究, 77-86.
- 5) 福田正己 1983 小樽市立博物館外壁石材の凍結-融解試験. 低温科学, 物理篇, 42, 163-169.
- 6) 福田正己・三浦定俊・西浦忠輝 1982 石造遺跡の凍結-融解による破壊と樹脂による防止効果の実験. 雪氷, 44, 101-103
- 7) 福田正己・三浦定俊・西浦忠輝 1983 石造遺跡の凍結-融解による破壊と樹脂による防止効果の実験(その2). 雪氷, 45, 201-204.
- 8) 福田正己・三浦定俊・西浦忠輝 1984 石造遺跡の凍結破壊と樹脂による防止効果の実験(第2報). 保存科学, 23, 1-12.

Summary

The carvings on the wall of the cave of Temiya were found as one of most important historic remains in Hokkaido more than 90 years ago by the excavation of the inlet of the cave, where the soil and gravel had deposited. After the excavation the carving have been damaged, as the carvings have been exposed to the severe cold climate, and frost shattering has occurred on the wall. The present author conducted on-the-spot investigations measuring temperatures at various points at the site to preserve the cave and carvings. The numbers of freezing-thawing cycles were counted at several point both inside and outside of the cave based upon the results of temperature measurements. If rocks of the wall freeze and thaw at temperatures fluctuating between the maximum of $+4^{\circ}\text{C}$ and the minimum of -4°C , the rocks tend to break up. The numbers of freeze-thaw cycles counted in this critical temperture range were six in total during the observed period in 1983-1984 winter season.

Meanwhile, rock specimens were sampled from the bedrock of the cave and their frost resistances were tested in the laboratory. Besides, the effective porosity and the velocity of ultrasonic wave propagation through the specimens were measured. These results indicate that this type of rock is very frost susceptible under conditions in which water is supplied to it. Some of the specimens were treated by the synthetic resin called SS-101. Then they were subjected to freezing-thawing cycles with a water supply in the laboratory. As a result, no damage occurred to them. Based upon the field investigations and the laboratory experiments, the most effective methods were suggested by the auther for the preservation of the carvings on the wall.