

講

座

## 石造文化財の保存

## 5. 石造文化財の保護のための環境制御

福田正己 (ふくだ まさみ)

北海道大学教授 低温科学研究所

## 5.1 はじめに

野外にある石造文化財の風化・劣化の発生は、石材の性質（力学的あるいは岩石学的な性質）とそれに作用する外力との組み合わせに依存する。同一の母岩からなる石造文化財でも、置かれた環境あるいは浸食営力が異なると、風化の様式もまた度合も異なってくる。日本の各地にみられる野外石造文化財の多くは、適当な強度と剝削の容易さから、第三紀凝灰岩（グリーンタフ）や第四紀の火山性噴出堆積岩が多く使われている。同じような火山性の母岩を用いた石造文化財でも、多雨多湿による風化が進行する九州と寒冷下の凍結破碎に影響される北海道では、劣化の様相が異なっている。石造文化財の保護策を立案する場合には、まずどのような母岩がどのような環境におかれて、どのような風化過程が進行するかを理解する必要がある。次に保存策を講ずる場合には、劣化した石材そのものに適切な処置を施して、補強する直接的な保存対策と、劣化に最も影響を与える外的な環境（風化営力）を人為的な制御で変更して風化の進行を可能な限り遅くする間接的な方法とがある。後者の方法を環境制御による石造文化財の保存法と呼び、本章では特に北海道での寒冷な環境下におかれた、野外石造文化財の保護を中心に、その具体的な事例を解説する。

## 5.2 北海道の野外石造文化財の劣化を促す環境要因

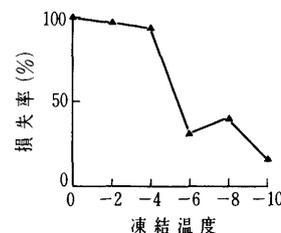
## 5.2.1 凍結破碎に影響する温度変化

小樽市手宮洞窟および余市町フゴッペ洞窟では洞窟面に約1600年前とされる陰刻された文様が残されている。いずれも洞窟入口は崖錐堆積物で長期間覆われ、手宮では明治初期、フゴッペでは昭和25年まで洞窟内陰刻は長期に密閉保存されていた。しかし、閉塞していた堆積物が除去され、外気にさらされてから、陰刻面の劣化が進行しはじめた。基盤岩はいずれも第三紀の凝灰角礫岩（最近の定義では水冷破碎岩）であり、寒冷環境下での劣化が著しい。すなわち、劣化に影響を与える外的営力としては、凍結作用が最も卓越する。

そこで、現在の気候環境下ではどのような凍結—融解の繰返しが発生しているかについて検討を加える。岩石が凍結で破碎されるのは、土の凍上現象と同じメカニズム<sup>1),2)</sup>による。岩石内に凍結面が進入すると、凍結前面に存在する過冷却した水（不凍水）の存在領域が形成される。不凍水はその化学ポテンシャルが低下しており、より高温側の未凍結領域との間にポテンシャル勾配が形成され、凍結面へ水分移動が生ずる。やがて凍結面で水

晶分離して岩石空隙を押し広げ、亀裂を伸張させる。これが凍結破碎の機構である。空隙を押し広げる氷晶の結晶力（凍上力）は、過冷却した不凍水の物理化学的な性質に依存する。低くなればそれだけ発生凍上力も大きくなる。こうした破碎機構を考慮すると、岩体を劣化させるのに有効な凍結破碎が発生するのは、基盤岩体の凍結温度に依存することが予想される。

基盤岩石が凍結—融解を繰り返す様式には二つある。すなわち冬季間に最深凍結に達してのち融解する季節サイクルと、日気温が0℃を前後して変動することによる凍結—融解サイクルである。季節および日サイクルの変動による凍結破碎では、到達する最低温度（凍結温度）が、大きな影響を与える。そこで小樽市手宮洞窟を構成する基盤岩の凝灰岩を用いて、凍結温度により破碎の発生度合がどのように異なるかについて実験を行った。使用した試料の有効空隙率は約35%で、弾性波伝播速度は1.7km/sで、かなり劣化が進行していた。この試料を5×5×5cmの立方体に整形し、水分飽和後に水分供給が可能な状態で以下の凍結実験を行った。凍結温度（最低温度）を-2, -4, -6, -8, -10℃に設定して凍結させ、+10℃で融解させる1日1サイクルの試験を行った。10サイクル後に、岩石試料の乾燥重量( $W_i$ )を秤量し、初期重量( $W_0$ )から $(W_0 - W_i) / W_0$ として損失率を算出した。図—5.1にその結果を示す<sup>3)</sup>。凍結温度が-4℃以下に低下すると、凍結損失が急増している。また、各凍結温度による10サイクル後の破碎状況の違いを口絵写真—15に示す。これらから明らかのように、1日1サイクルの凍結—融解の繰返しでは、その最低温度が-4℃になると、破碎が顕著になることがわかる。そこで、北海道内での岩石破碎に有効な凍結温度を-4℃と規定する。



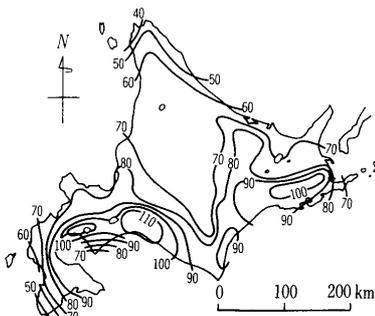
図—5.1 凝灰岩の凍結破壊度合と凍結温度との関係

## 5.2.2 北海道での岩石破碎に有効な凍結発生頻度

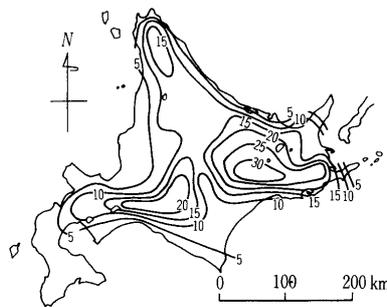
北海道内アメダス気象データに基づいて、0℃を前後する日気温変動と-4~+4℃の気温変動の出現頻度を図—5.2に示す<sup>4)</sup>。比較的冬季に

好天となる道東で20回を超えている。手宮・フゴッペ洞窟付近では、5回程度の出現頻度となっている。そこで実際に手宮洞窟の外壁での温度変動記録結果を図—5.3に示す。気象データから予測されたと同じく、1冬で6回程度の凍結—融解の繰返しを観測された。したがって外気にさらされた条件に置かれ

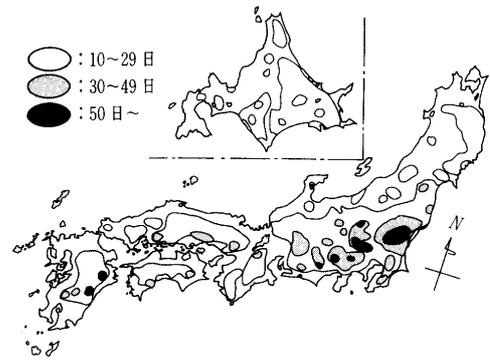
講座



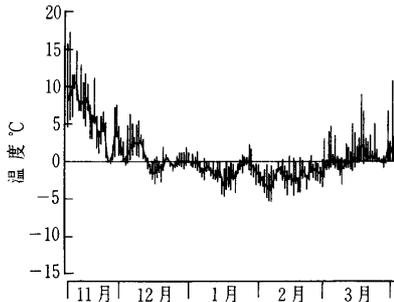
図—5.2(a) 北海道内で0°Cを前後して温度変動する頻度分布



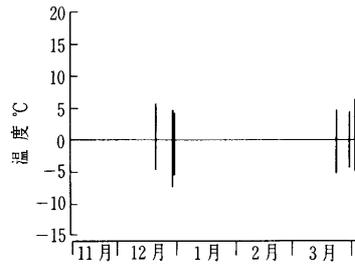
図—5.2(b) 北海道内で±4°Cを前後して温度変動する頻度分布



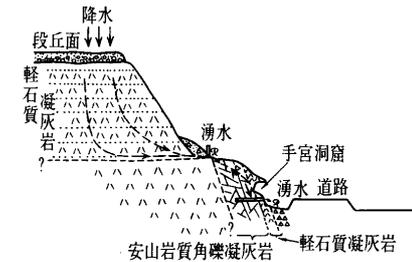
図—5.4 凍結破壊危険日の全国分布



図—5.3(a) 手宮洞窟の外壁温度の変動観測結果



図—5.3(b) 手宮洞窟の外壁温度の変動観測結果 (-4 ~ +4°C変動幅の出現頻度)



図—5.5 地下水の流動想定図

た、洞窟内の陰刻面は数10年の間に容易に破碎され、磨耗する危険性が示された。洞窟入口が長期間閉塞されていたことが、近年の発見まで、陰刻面を良好な状態に保つ理由といえる。この点が、環境制御による石造文化財保存法の検討のヒントを与えている。

5.2.3 本州の野外石造文化財の温度環境

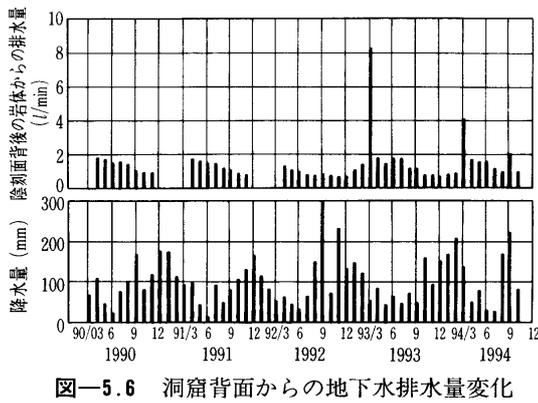
三浦・福田<sup>5)</sup>は、1983~1984年のアメダス気象データ(全国838箇所)を用いて、上述の-4°C~+4°Cの日気温変動日(凍結破壊危険日)の出現頻度の全国分布を算出した。その結果を図—5.4に示す。危険日出現日が10未満、10~29日、30~49日、50日以上との4段階に分類してある。この凍結破壊危険日の出現日数が全国で最も多いのは、北海道、東北、の北日本ではなく、関東北部である。茨城県北部の<sup>ダイコ</sup>大子では、11月末から4月始めまで、合計77日が出現した。寒冷期の2日に1日の割合で発生したことになる。埼玉県秩父でも70日で、九州大分県宇目で53日、宮崎県神門でも54日となった。既に図—5.2で示したように、北海道で最も寒冷な陸別では、31日と意外に少ない。

こうした北関東での凍結破壊危険日の出現頻度の高い理由は、冬季の気候条件に由来している。すなわち、太平洋側では好天が続くと、早朝に放射冷却現象のため、冷込みが厳しくなる。他方、日中は好天による日射量の多いことで、気温も上昇し、日較差の大きい温度変動となる。九州地方でも内陸で同様な条件が成立するので、北海道よりも冬季の凍結破壊危険日の出現日数が多くなる。しかし、この出現日数がそのまま、破碎による劣化にはならない。岩石の水分条件が整わない、すなわち乾燥状態にあれば、凍結破碎は生じないからである。

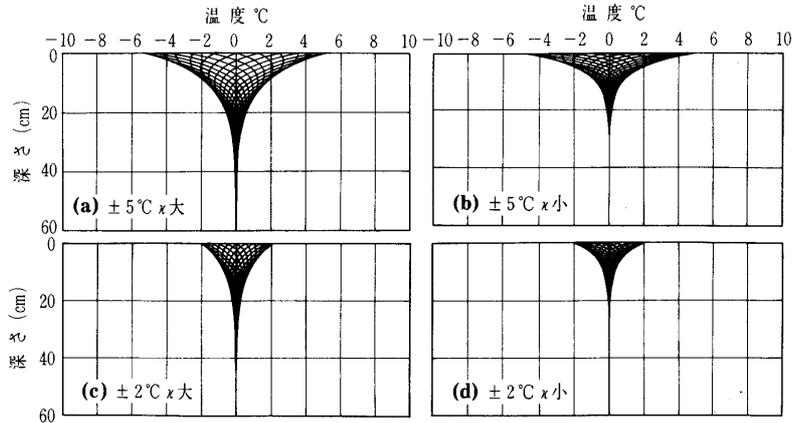
5.2.4 石材遺跡の保存の水分条件

前節の凍結—融解実験の際に、岩石試料に水分供給を行わない場合の凍結実験を行った。破碎に及ぼす含水条件を確認するためである。その結果を口絵写真—16に示す。使用した凝灰岩試料では、初期に水分飽和させ、-10°C~+10°Cの変動幅で10サイクルの凍結—融解を繰り返した。一方の試料は、水分供給を遮断し、他方には十分な水分供給を行った。その結果、水分供給のない場合にはほとんど破碎されなかった。この結果を野外の条件に適用すると、岩体へ水分供給がなされている場合には凍結破碎が顕著になることを示唆している。凍結破碎からの保護には、熱的な条件に加えて水分の供給条件についても、その制御が必要である。北関東での高い凍結危険日出現頻度も、冬季の乾燥状態を考慮するなら、北海道ほどには、凍結破壊を受けないことになる。

そこで具体的な岩体への水分供給制御の例として、小樽手宮洞窟の事例を述べる。洞窟への水分移動の様子を図—5.5に示す。岩体上部を構成する軽石質凝灰岩は下部の洞窟岩体の安山岩質凝灰角礫岩よりも多孔質で、浸透性も高い。そこで段丘面および斜面からの降水は上部から浸透し、両岩質境界で一部湧水として排水される。洞窟背面の岩体には亀裂が分布しているので、浸透地下水は洞窟面へ到達する。そこで、直接壁面を水分飽和させることを予防するために、洞窟の背面に斜め方向から水抜き用のボーリングを行った。ボーリング孔は直径66mmで、水平上向き5度の角度で長さ10mまで5本を掘削した。ボーリング孔からの地下水の浸透排水量の経時変化を図—5.6に示す。降水量の変動との対比を行うと、降水量が増加する9月には、排水量はその増加に対応していない。つまり基盤岩体全体が飽和することがな



図—5.6 洞窟背面からの地下水排水量変化



図—5.7 日温度変動の岩体内分布

い。毎年3月に排水量が急増するが、これは小樽地域の融雪期にあたっている。すなわち、前年12月から3月までの降水はほぼ降雪によるので、冬季総降水量は400 mm以上に相当する。これが3月末に一気に融解するため、岩体全体は水分飽和となり、ボーリング孔からの排水量も最大となる。既に図—5.3に示したように、3月は凍結—融解の気温変動幅が大きい時期に一致しており、凍結—融解による岩体の破砕発生危険が高まる。岩体への水分供給を遮断することは、その最大浸透量と温度変動が重なる北海道では、特に重要である。

5.2.5 基盤岩体内の温度変動

小樽市手宮洞窟や余市町フゴッペ洞窟では、冬季間に凍結—融解が岩体のどの位置まで及ぶかを評価する必要がある。前述したように、基盤岩体の凍結様式は、季節変動と日変動とがある。土壌や地盤の季節凍結の深さは、その地点の凍結指数で推定することができる。小樽市の場合には、凍結指数 ( $I_d$ ) は最大で400°C・日程度である。凍結深さ  $D$  (cm) は次の経験式で推定できる。

$$D = \alpha \cdot \sqrt{I_d} \dots\dots\dots (1)$$

ここで  $\alpha$  は岩石の空隙率と含水率で決まる定数で、特に乾燥していなければ、3~4である。したがって基盤岩体の斜面向きや傾斜を無視すれば、冬季の最大凍結深さは60~80 cmである。季節凍結の及ぶ深さでは、冬季に1回は凍結—融解サイクルを生ずることになる。

一方、日変動サイクルで凍結の及ぶ深さは以下のように推定することができる。ある変動幅 ( $A_0$ ) で、岩体表面が周期関数的 ( $A_0 \cdot \sin(\omega t)$ ) に変化したとする。岩石の温度拡散率を  $\kappa$  とすると、半無限体と仮定した基盤岩体内の温度変化は次式で表せる。

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

ここで  $A_m$  は日平均温度であるが、ここでは0°Cを中心とした温度変動を仮定するので、 $A_m=0$ となる。 $T$  は周期(1日)で、 $x$  は深さ (cm) である。温度拡散率は乾燥している場合には  $\kappa=1.0 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$ 、湿っている場合には  $3.0 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$  とする。

$A_0$  が  $\pm 5^\circ\text{C}$  と  $\pm 2^\circ\text{C}$  の場合について計算した結果を図—5.7に示す。凍結破壊の危険温度を  $-4^\circ\text{C}$  とすれば、その及ぶ深さは表面から数 cm に過ぎない。したがって、凍結破砕で岩体からブロック状に剥落するのは、日変動

ではなく、季節変動による場合であることが分かる。

5.2.6 その他の制御すべき環境要素

寒冷地域での野外石造文化財が凍結破壊の危険にさらされるのは、ある変動幅での温度変動と含水条件が各々の条件範囲に達する場合である。そこで、長期の保存策を講ずることは、このいずれかの環境要素を人為的に制御し、破砕の危険性を除去すればよい。温度(凍結)と水の制御のほかに、いくつかの外的環境要素についても、劣化破壊にどの程度かわるかを事前評価する必要がある。余市町フゴッペ洞窟では、隣接する函館本線を通行する列車による振動が及ぼす影響を検討した<sup>6)</sup>。また、小樽手宮洞窟では、前面にある道路を通行する車両による振動の影響を評価した。フゴッペ洞窟内では、列車の通過の際に、水平動の最大加速度は壁面の上部で約70ガルであった。これは気象庁の震度階では震度IVに相当する。

洞窟の床面では、約10ガルを記録したが、これは震度IIIに相当する。列車が通過しない雑微動は、表—5.1に示すような結果であり、これらの値から合成された水平動の加速度は0.14ガルに過ぎない。したがって、洞窟に隣接する鉄道線路の通過列車は、通常洞窟内振動の70~80倍に大きくなる。

表—5.1 雑振動計測結果 (フゴッペ洞窟)<sup>6)</sup>

	周波数 (cps)	速度 (kine)
上下	9	$0.39 \times 10^{-3}$
南北	29	$0.49 \times 10^{-3}$
東西	25	$0.58 \times 10^{-3}$

乾燥した状態での凝灰岩では、こうした大きな振動によって、表面から細粒の鉱物粒が剥落させられることがある。フゴッペ洞窟では、列車による振動での剥落を防止する対策が必要となる。実際には、鉄道線路の迂回などは不可能なので、振動による剥落防止には、洞窟内の壁面を乾燥させ過ぎないように配慮が必要である。

手宮洞窟の場合には、前面の道道を通過する大型車両走行時には震度II相当の振動 (45~28db)、普通乗用車走行時には震度I相当 (35~18db) の振動であり、壁面からの剥落に大きな影響を与えることはない。しかし

講 座

北海道では1993年、1994年と2度にわたってマグニチュード6.8という地震に見舞われた。先の阪神・淡路大震災の際にも、文化財の破損等の被害が多発したことを考慮すれば、野外石造文化財ではこうした地震時振動やその他の振動についても対策を講ずる必要がある。小樽手宮では、保存工事中の振動による破損防止の対策も取られた。

5.3 実施された環境制御による保存例  
(余市フゴッペ洞窟と小樽手宮洞窟)

5.3.1 フゴッペ洞窟の保存策の計画

昭和25年に洞窟入口を覆う崖錐堆積物が取り除かれ、奥行き約7m、幅6m、高さ7mの規模の洞窟壁面に多くの陰刻による壁面画が発見された。陰刻の刻込みは1.5cmであり、凝灰岩の特に緻密な部分に集中して分布していた。昭和29～30年の発掘調査で、洞窟床面下3mまでに遺跡面のあることが確認された。しかし、外気に触れることで、陰刻面の剝落や凍結破砕の危険性が指摘され、洞窟入口に仮覆屋を設置した。その後昭和43～45年に保存策を講ずるための基礎調査が文化庁の指導のもとに、余市町教育委員会によって実施された<sup>7)</sup>。

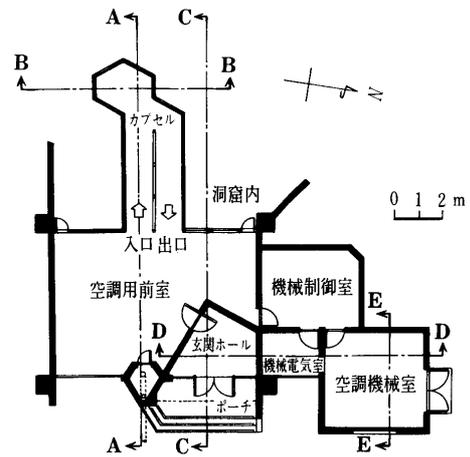
保存策のための基礎調査は以下の内容で行われた。

- ① フゴッペ洞窟遺跡調査—修復保存に先だって洞窟内床面の発掘調査。
- ② 洞窟内外の写真測量—陰刻面を正確に記録するため、写真測量による基礎図を作成。
- ③ 洞窟構成基盤岩石の調査—凍結と融解による破壊実験と外壁表面からの剝離測定。
- ④ 洞窟内部の温湿度測定—凍結出現頻度の確認。
- ⑤ 洞窟内部の振動測定—隣接する鉄道線路を走行する列車振動の影響評価。
- ⑥ 洞窟覆屋の設計—カプセル方式による保存法と覆屋の設計。

以上の各項目についての3か年の基礎調査から、洞窟陰刻の保存にあたって以下の点を考慮する保存策が具体化された。洞窟内の温度計測から、冬季には数回程度—4℃以下になることが判明した<sup>8)</sup>。また、基盤岩は風化が進み、力学的強度も低下していた。指標としての一軸圧縮強さは50～100 kgf/cm<sup>2</sup>であった。振動調査から、列車通過時にかなりの振動を受けることが分かった。そこで、採取した岩石試料を用いて振動による剝落実験を行った。その結果を表—5.2に示す。試料は2分し、一

表—5.2 フゴッペ洞窟の構成基盤岩  
(凝灰岩)の振動による剝落試験

周期(C/S)	加速度(ガル)	変化の状況
30	20	両者ともに変化なし
30	40	両者ともに変化なし
30	60	乾燥：粘土粒が剝離 湿潤：変化なし
30	80	両者ともに変化なし
30	100	乾：微粒が剝離 湿：変化なし
20	100	乾：中粒がかなり剝離 湿：変化なし
5	100	乾：中粒、細粒が剝離 湿：変化なし
2.5	100	両者ともに変化なし



図—5.8 フゴッペ洞窟保存カプセル平面図

方を乾燥し他方を水飽和とした。各振動時間は30分であった。この結果から、振動の影響は岩体が乾燥した場合に、剝落などの影響があることが判明した。したがって洞窟内を極度に乾燥させないような方式が考えられた。

洞窟の陰刻面はその考古学的な考察から続縄文期(4世紀)とされた<sup>9)</sup>。したがって1600年もの間、陰刻面が良好な状態に保たれた洞窟入口の閉塞状態を再現しながら、埋戻しをしないで公開する施設が検討された。その結果、図—5.8のようなカプセル構造の見学スペースを持つ覆屋が設計された<sup>10)</sup>。洞窟前面をの覆屋で、外界と熱的にもまた水分条件でも遮断し、洞窟内の温湿度は空調設備によりほぼ一定に保つようにした。温度の設定は、外気温との差を5℃以内とし、湿度は岩体の亀裂から自然に浸透する水により一定に保たれる。見学者は口絵写真—17にあるような、強化ガラス製のカプセル内を移動し、ガラスを通して陰刻面を観察できる。上記施設は昭和47年11月に完成し、以来冬季を除いて一般へ公開されて今日に至っている。

5.3.2 フゴッペ洞窟の環境制御による保存策の問題点

環境を制御し、洞窟入口が閉塞された過去の環境を再現しつつ、一般へ公開するというユニークな保存策と工事が完了して、24年が経過した。陰刻の彫込みがやや丸みを帯びる傾向が若干みられるものの、全体としては良好に保存されている。しかし、地震に起因すると思われる崩落が1箇所が発生し、貴重な陰刻面が部分的に損なわれた。これは北海道という地震多発地域では、十分にその危険性が予測されたことであり、今後新たな対策が必要であろう。さらに、予想しなかった問題として、陰刻面に苔が繁茂し始めた点である。これは、見学者のための照明の強度と生物的活動の抑制についての配慮不足に起因している。覆屋内の玄関ホールの窓が西向きであり、かつシャッターを上げた状態を長期に保っていたため、直達日射の影響で洞窟内に必要以上の光があたり、苔の繁茂をもたらした。さらに、覆屋と岩体との結合部の防水処理が、経時劣化し過剰の水分が洞窟内に供給され始めた。これも洞窟内での苔の繁茂を促進する一因となった。

環境制御による石造文化財として、テストケースであった余市町フゴッペ洞窟遺跡は、20余年が経過し当初の期待どおりの保存効果があったかどうか、基礎調査に匹敵するその効果についての評価の調査が必要となっている。

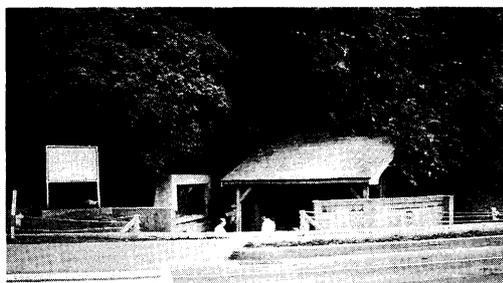
### 5.3.3 小樽市手宮洞窟の保存策について<sup>11)</sup>

手宮洞窟の陰刻面の発見は、1866年に開拓のための道路開削により、段丘崖の裾に堆積した崖錐を除去することで発見された。フゴッペ洞窟よりも陰刻は深く、また陰刻画も大型である。その後、近くに在住した石工「長兵蔵」が、洞窟の天井部を切り落とし、壁面はわずかに天井部を庇状に残して、外気にさらされるようになった。洞窟陰刻画については、明治初期の外国人教師ジョン・ミルンが古代文字説を唱え、多くの考古学的な関心を集めた。既に明治初期から、外気にさらされることによる破損・劣化が懸念され、1918年に仮覆屋が設けられた。1921年（大正10年）には、史蹟名勝天然物法により国指定の史蹟となった。以降、劣化防止のために、周辺環境の整備が繰り返され、昭和40年代には、メチルメタアクリレートによる合成樹脂処理も施された。しかし、劣化は進行し続けたため、1986年から保存修理調査委員会が発足し、様々な側面からの保存策の検討が加えられた。

フゴッペ洞窟をもとにして、環境制御による保存策と覆屋が1995年に完成した。

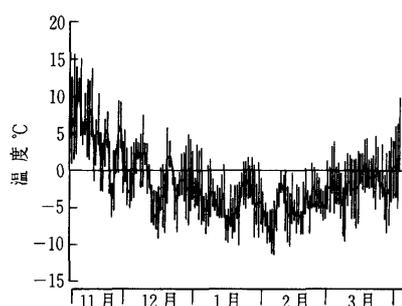
### 5.3.4 仮覆屋による保存策の評価

大正時代に設けられた仮覆屋は、写真—5.1にあるように、洞窟前面に高さ2.5m、幅5mで直接外気に触れ

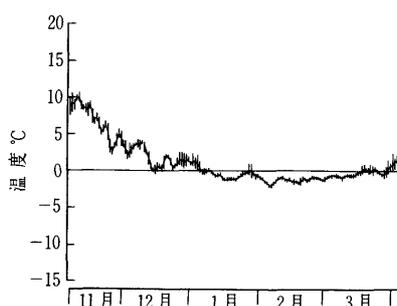


写真—5.1 手宮洞窟の仮覆屋（昭和61年撮影）

ないように設置された<sup>12)</sup>。しかし、仮覆屋前面にはガラス窓が設けられ、そこを通して内部が観察できるようになっているため、断熱性は十分とはいえない状態であった。そこで洞窟内の冬季温度変動を測定し、覆屋の効果を評価してみた。観測期間は図—5.3の外壁面の測定と



図—5.9(a) 仮覆屋内の洞窟気温変動



図—5.9(b) 仮覆屋内の洞窟壁面の温度変動

同時期である。洞窟内の壁面上部にある亀裂内に温度センサーを設置した。また、仮覆屋内の気温変動も併せて記録した。その結果を図—5.9に示す。洞窟内気温は冬季間には72回も0℃を上下する変動を示したが、岩体表面温度は0℃を上下する変動が25回あった。しかし、その変動幅は±1℃以内と小さく、凍結破砕を生じる危険性はなかった。したがって、内部の加熱などによる温度制御なしの仮覆屋は、洞窟内の岩体や壁面が凍結—融解で破損するのを防止するには、有効であったことが分かる。

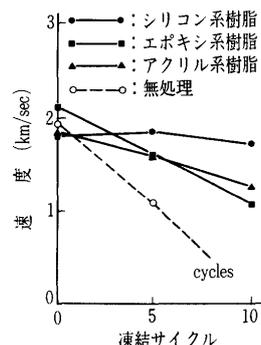
### 5.3.5 風化岩の合成樹脂処理の評価

保存調査を検討する過程で、風化した凝灰岩を合成樹脂処理する可能性を探った。基本的な立場では、フゴッペ洞窟にならって、環境制御による保存策を講ずる予定であったが、特に劣化の著しい場合には、部分的に合成樹脂処理を検討した。そのために、凝灰岩試料について、数種類の合成樹脂による強度補強効果実験を行った。用いた合成樹脂はアクリル系、エポキシ系、シリコン系の3種である。同一条件で合成樹脂を試験試料に含浸させ、その凍結破砕の度合を比較し、図—5.10にその結果を示す<sup>13)</sup>。-5~+5℃の凍結サイクルで、各サイクル後ごとに超音波伝播速度を測定した。強度と超音波速度には比例関係があるので、速度の低下から凍結による強度低下を評価することができる。無処理では、5サイクル後に粉砕されて速度を測定することはできなかった。シリコン系樹脂による場合が、10サイクル後も変化が少なく、凍結—抵抗性が高い。アクリル系、エポキシ系ともに凍結で強度が低下する傾向を示している。

この実験からシリコン系樹脂が最適であると判断されたが、樹脂を岩体表面に塗布することによる問題もあることが指摘された。手宮洞窟では、陰刻面の背後にいくつかの亀裂が入っている。赤外温度画像処理や地下レーダーによる探査から、亀裂は壁面に平行で、表面から10cm深さ程度にあり、しかも亀裂開口部から下方へ20~40cm深さに連続していた。したがって、岩体の亀裂を有効に樹脂で埋めるには、かなりの量の樹脂を浸透させる必要がある。この処置で完全に亀裂を樹脂で満たすことで、岩体背後からの水の浸透が遮断される。その結果、亀裂と樹脂の接合面で大きな水圧が生じ、亀裂ごと壁面を押し出すことが予想された。

### 5.3.6 手宮洞窟保存策の具体化

こうした壁面と岩体の亀裂構造を考慮し、直接的に樹



図—5.10 凝灰岩を用いた合成樹脂による処理効果

## 講 座

脂処置を施すことは見送り、当初の予定どおり、二重カプセル方式による保存法とその関連設備が設計された<sup>14)</sup>。フゴッペ洞窟での問題点を考慮し、具体的な環境制御ではいくつかの工夫が試みられた。

まず制御すべき壁面を含む空間を最小限とした。空調設備の大きさや制御のしやすさなどから、従来の仮覆屋をそのまま利用し、前面にペアガラスの窓を設けた。洞窟前面は新たに基盤岩体と一体となる構造の覆屋で包み込み、完全な二重カプセル化した。こうした設備で、見学者が持ち込む熱を最小とし、年間を通じて一定の温度となるように配慮した。

壁面空間では、極端な温度変動を起こさず、夏季には+15℃で冬季には+5℃となるように、温度制御を行った。春の融解期に、岩体背後からの浸透水の供給で、閉鎖洞窟壁面空間が過飽和とならないように、除湿器を稼働させ一定の湿度を維持した。

見学者用の照明は、可能な限り低く押さえ、また見学者の接近によって自動点灯するようにした。これで苔などの繁茂を防止することができた。

写真—5.2は完成した保存施設の外観であるが、周辺の景観との融合を配慮した構造を持つ。



写真—5.2 小樽手宮洞窟保存覆屋（1995年完成）

## 5.4 環境制御による石造文化財の保存の将来

### 5.4.1 環境制御の可能な場合の判定

ここで紹介した石造文化財保存策は、いくつかの限定された条件で、適用が可能となる。まず、保存対象の遺跡等が大き過ぎないこと。遺跡として長年に残されてきた環境条件を、人為的に再現することが、環境制御による文化財保存法の基本原則である。野外石造文化財は、基盤岩体と一体となっている場合が多い。そこに供給される水分や温度環境は、いわば基盤岩体そのものであり、それを制御するには、適切な規模でなければならない。対象が制御できる範囲を超えない規模である必要がある。

次に環境制御を基本とするには、石造文化財を劣化させる環境要素（特に支配的な浸食営力）をある程度の期間の観測から抽出する必要がある。構成岩体の岩石学的な特徴や、風化や劣化の度合判定、地下水浸透経路の推定、年間を通じた気象条件等、石造文化財を取り巻く環境の理解が欠かせない。

さらに学際的な調査班を編成し、現象の理解から土木工学的な施工までを一貫して総合的に検討する組織が必要である。こうした意味では、石造文化財の保存・修復

にあたっては、地盤工学が果たす役割は大きく、今後その中心的な位置を占めるであろう。

## 5.5 おわりに

環境制御による石造文化財の保存法は、まだ適用事例も少なく、また時間の経過による有効性の評価もされていない。文化財が数100～数1000年にわたって、安定に保存されるためには、有効な手法を試行錯誤なしに確立しなければならない。つまり失敗が許されない実験といえる。そのためには、保存策の企画・施工のみではなく、その後の長期にわたる追跡調査が不可欠である。現在の環境も数100年オーダーでは大きく変化している。地球環境の変動も考慮した、息の長い保存策でなければならない。時間スケールを長くとした研究指向が望まれる。最後に資料の提供では、小樽市教育委員会、余市町教育委員会、東京国立文化財研究所に協力いただいた。ここに記して感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 福田正己：岩石の凍結破砕の機構。石造文化財の保存と修復，pp. 12～18, 1985.
- 2) J.R. Blachere and J.E. Young: Failure of capillary theory of frost damage as applied to ceramics. J. of Amr. Ceram. Soc., 57, pp. 212～216, 1974.
- 3) 福田正己：小樽手宮洞窟洞窟壁面遺跡の凍結破損防止にかかわる基礎研究。低温科学，物理編，43, pp. 171～180, 1984.
- 4) 福田正己：北海道における凍結-融解の繰り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，pp. 75～86, 1982.
- 5) 三浦定俊・福田正己：凍結-融解サイクル出現頻度の全国分布。石造文化財の保存と修復，pp. 33～40, 1985.
- 6) 田治米鏡二・五十嵐亨・笹谷 努・殿内啓司・長能正武：洞窟内部の振動測定。史跡フゴッペ洞窟保存工事報告（北海道余市町）。pp. 26～30, 1973.
- 7) 余市町教育委員会編：史跡フゴッペ洞窟保存工事報告。p. 50, 1973.
- 8) 野村 豪：洞窟内部の温湿度測定。史跡フゴッペ洞窟保存工事報告（北海道余市町）。pp. 21～30, 1973.
- 9) フゴッペ洞窟発掘調査団：フゴッペ洞窟遺跡-岩壁彫刻と洞窟前庭部について-。史跡フゴッペ洞窟保存工事報告（北海道余市町）。pp. 6～9, 1973.
- 10) 岸谷孝一：洞窟覆屋の設計。史跡フゴッペ洞窟保存工事報告（北海道余市町）。pp. 31～45, 1973.
- 11) 北海道小樽市教育委員会編：国指定史跡手宮洞窟保存修理事業報告書。p. 205, 1995.
- 12) 菅谷英孝：手宮洞窟の歴史的環境。国指定史跡手宮洞窟保存修理事業報告書（北海道小樽市教育委員会）。pp. 30～39, 1995.
- 13) 三浦定俊・福田正己・西浦忠輝：合成樹脂による岩石の凍結破壊防止。石造文化財の保存と修復，pp. 23～29, 1985.
- 14) 竹中工務店北海道支店技術部：保存修理工事の経過と工事組織。国指定史跡手宮洞窟保存修理事業報告書（北海道小樽市教育委員会）。pp. 71～136, 1995.