

〔報告〕 手宮洞窟保存館内の温湿度環境調査

高見 雅三*・石崎 武志

1. はじめに

手宮洞窟は、小樽市街地の西側に位置し、近くには、小樽市総合博物館(旧小樽交通記念館)本館がある。手宮洞窟内には、国指定史跡となっている陰刻壁画(図1参照)が描かれおり、北海道に暮らしていた縄文文化の人々が、日本海をはさんだ北東アジアの人々と交流をしていたことを示す大変貴重な遺跡である。現在、手宮洞窟保存館(以下、保存館)の中に保存・管理されている。保存館内の温湿度管理に当たっては、カプセル(陰刻壁画を直接外気と触れさせないためにガラス張りの陳列ケースのこと)内と展示室内に温湿度測定装置が設置され、打点式のアナログ記録計により1分間隔でデータが記録されている。

しかし、保存館が建設されてから14年以上が経過し、記録計等のメンテナンスが困難になったこと、温湿度センサーそのものが劣化している可能性があること、カプセルの出入口戸の内側(展示室内側)にカビの発生が観測されたこと、アナログ記録により年変動やカビ発生の要因把握や傾向、またそのための解析が困難な状況にあることより、我々は、2009(平成21)年7月よりデジタルデータロガーを設置し、保存館内外の環境把握のための温湿度観測を開始した。

以下、その結果概要について示す。

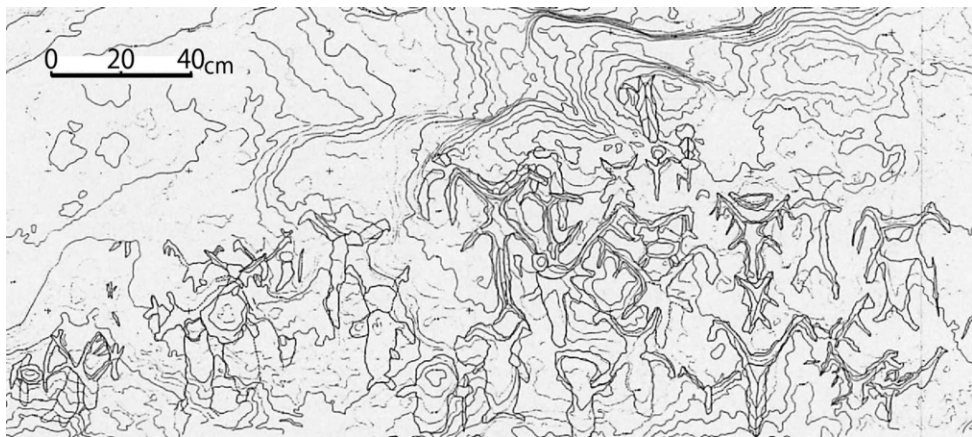


図1 手宮洞窟の陰刻壁画(小樽市¹⁾から抜粋)

2. 手宮洞窟について

小樽市¹⁾によれば、1866年(慶応2年)相模国(現在の神奈川県)の小田原から、朝里地区の

*北海道立総合研究機構

鯨番屋の建設に来ていた出稼ぎ石工の長兵衛が建築用の石を探していて偶然に、様々な模様が洞窟内の岩壁に刻まれている陰刻壁画を発見したと言われている。これらの彫刻は1878年（明治11年）、榎本武揚の視察により初めて学問的に価値がある貴重な遺跡として紹介され、学会の注目をあびることとなった。

その後、ジョン・ミルン（J.Milne：英国人：地震、地学者）は彫刻を模写し、翌年、初めて学術的な報告を行った。しかし、その頃には、彫刻を見ようと来た人達や、軟質の石材を採掘しようとする石工が、岩壁を壊したため、洞窟は浅くなり、次第に奥壁まで露出するようになり、またいたずら書きによる被害が発生した時期でもある。

1884年（明治17年）に理学博士の渡瀬莊三郎（後に省三郎）氏らにより、調査が行われた時は、まだ1880年当時の模写（陰刻は48個）と差異はなかったようである。しかし、1888年（明治21年）に理学博士の坪井正五郎氏の視察時には、新たにつけた疵および擦れた痕が多く、正しく原形を模写ができなかったようである。

1889年（明治22年）には、参観者に見やすくするために、彫刻に鑿を加え体裁よく深く彫り、さらに朱が入れられたため、枝葉のような線は消滅し、また原形と大きく変わり、深く彫ったものだけ残り、陰刻は27個となったようである。

1910年（明治43年）には、石炭積み出しのため高架栈橋建設により、洞窟上部に鉄道軌道を敷設することとなり、工事のために洞窟は大きく破壊され、崩れ落ちた土砂のために洞窟はかなり埋没したようである。

その価値が認められ国指定史跡となったのは、発見から55年後の1921年（大正10年）である。1949年（昭和24年）にはブロンズによる模刻と保存覆屋の整備が行なわれたが、保存覆屋の整備が行われるまでおよそ40年あまり、積雪寒冷な環境下にさらされていたことより、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われるおそれが懸念された。

そこで、石造文化財として保存策を施工するにあたっては、基盤岩石の風化にかかわる主要な要素と原因を把握する観点から、福田²⁾³⁾は、洞窟を構成する基盤岩石の風化程度を把握し、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い、また、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も実施した。その結果、最も破碎につながる温度幅は -4°C 以下 $\sim 4^{\circ}\text{C}$ 以上であることを示した。1983年11月 \sim 1984年4月までの現地観測で、日気温変動が -4°C 以下 $\sim 4^{\circ}\text{C}$ 以上となる回数は、計6回観測され、凍結破碎を引き起こす可能性を示唆した。しかし、洞窟前面を覆う仮設覆屋内では、日気温変動が -4°C 以下 $\sim 4^{\circ}\text{C}$ 以上となる変動は発生していないことから、外的条件としての温度変動をその幅を小さくし、また -4°C 以下 $\sim 4^{\circ}\text{C}$ 以上となる出現頻度も少なくするためには、外気と直接触れさせない覆屋が有効であると報告した。

また、小樽市¹⁾によれば、手宮洞窟周辺は、新第三紀鮮新世の高島層が分布しており、礫岩から始まり、これに砂岩や凝灰岩を混える下部の礫岩砂岩層と、主に紫蘇輝石普通輝石安山岩溶岩及び輝石安山岩質ハイアロクラスタイトからなる上部の安山岩溶岩とに区分される。一方、陰刻面背後の岩体は表面から9mの深さまでの間で、様相の異なる3つの風化ゾーンが存在するようである。第1風化ゾーン（0 \sim 0.5m）は軽石質凝灰岩で構成されているが、陰刻はこの表面に薄い層で残されている安山岩質凝灰角れき岩に施されている。このゾーンは特に表面側の風化が激しく、多くの亀裂が発生しており、岩体全体としてみた風化判定では「大」となっている。地下水はこの陰刻面の部分までは沁み込まず「不飽和」の状態にある。第2風化ゾーン（0.5 \sim 2.5m）は軽石質凝灰岩で構成されており、亀裂は殆どないが岩石に含まれる水は「ほぼ飽和」状態にある。背後の第3風化ゾーンからくる水を受け止め、進水する役目を果たして

いる。第3風化ゾーン(2.5~9.0m)は安山岩質凝灰角れき岩で構成され、割れ目の発達が著しく地下水が湧水する状況となっている。このように陰刻面背後の岩体では豊富な地下水の供給があるが、第2風化ゾーンが緩衝帯となっており、陰刻面までは水は沁みださない。しかし、一部は水蒸気となって陰刻面周辺から蒸散し、洞窟内に適度な湿気を形成している状態にあり、今後、温度と湿度を管理することにより、陰刻面に発生している亀裂の動きをより小さく押さえることができる。

以上の結果を受けて、1986(昭和61)年から保存修理事業が開始され、約10ヶの年歳月をかけて1995(平成7)年に保存館を建造し、現在に至っている。

3. 観測

3-1. 使用機器

データ回収時に、カプセル内への出入りする必要がある。頻繁に行うとカプセル内の環境を損なう可能性があることから、当初、T&D社製の無線通信タイプによる小型防水データロガーを採用した。しかし、測定を開始してから、機器の許容測定範囲を超える高湿度であることが判明し、無線回収はできないが、高湿度でも計測できる Onset 社製のデータロガーを新たに追加した。観測に用いた機器を表1に示す。

表1 使用機器一覧

用途	計測装置(メーカー)
岩盤(表面)温度	RTR052AL (T&D社製)
カプセル及び展示室(2)の温湿度	RTR053AL (T&D社製)
	ホボプロ v2 U23-001 (Onset社製)
	ホボプロ v2 U23-002 (Onset社製)

3-2. 測定位置

図2に示すように、カプセル内の岩盤と展示室内で露出している岩盤は繋がっているが、展示室とカプセルは、空間的にはガラスにより遮断されている。カプセルと展示室の温湿度環境や岩盤温度を把握するため、図2に示す位置に、表2で示す機器を設置した。なお、図2に示した装置名は、便宜的に当初設置したT&D社製データロガーの装置名を記載した。

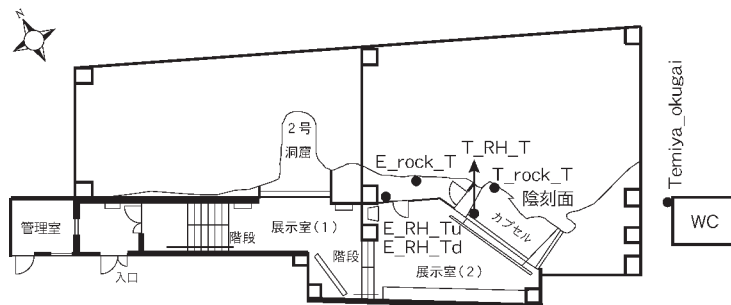


図2 保存館におけるデータロガー設置位置 (●はセンサー位置)

表2 使用機器、装置名、観測期間

場所	項目	使用機器	装置名	測定期間
展示室(2)	岩盤温度	TR052AL	E_rock_T	2009/7/19~
	温湿度	TR053AL	E_RH_Td	2009/7/19~
		TR053AL	E_RH_Tu	2009/7/19~
		U23-002	Temiya_Ed	2009/7/31~2011/8/30*
U23-002	Temiya_Eu	2009/7/31~		
カプセル	岩盤表面温度	TR052AL	T_rock_T	2009/7/19~
	温湿度	TR053AL U23-001	T_RH_T Temiya-T	2009/7/19~ 2009/7/31~2011/9/27*
館外 (外気)	温湿度	U23-001 U23-001	Temiya_okugai otaru_okugaiT&RH	2011/4/1~ 2009/2/1~**

*センサー不調による欠測 **旧日本郵船小樽支店における観測



図3 カプセル内の観測機器設置状況 (左) 温湿度, (右) 壁面表面温度

表2に使用機器, 装置名, 観測期間を示す。センサー不調により, 欠測が生じている観測点はあるが, 平成23年12月現在, 表2に示した全ての場所で観測は継続している。

次に, カプセル内の岩盤と展示室で露出している岩盤の温度を測定し, 岩盤の温湿度状況を把握する必要があるが, カプセル内には露出している岩盤に陰刻壁画があり, 新たに温度センサーを埋設するための工事が行えない。このため, 観測機器の設置に当たっては, 既設温湿度センサーカバーや既設金具 (図3左) を利用し, また, 岩盤温度測定用の温度センサーは既設センサーとほぼ同じ位置の岩盤に接触させた (図3右, 表2参照)。

展示室(2)において, 夏期に建物の鉄筋の梁で結露と思われる水滴や, 降雨後に床面が濡れているとの情報から, 高さによる影響を把握するために温湿度計を同地点で金網の柵 (床面から高さ42cm, 201cmの2点) に簡易固定した (設置位置は図2, 図4参照)。また, 展示室(2)に露出している岩盤温度測定においても, 新たに温度センサー埋設するための工事を行わ

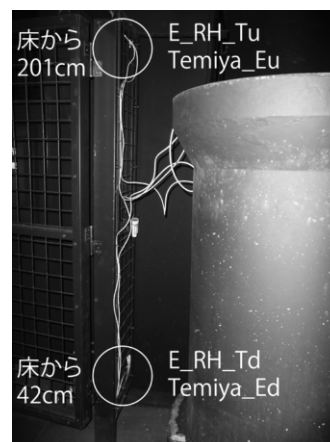


図4 展示室(2)の温湿度

ず、以前に工事などで開けられた約 $\phi 1.5\text{cm}$ 、深さ約11cmの穴に温度センサーを挿入し、粘土により展示室(2)の大気と遮断した。

4. 観測結果

上述したように、保存館内の湿度が非常に高く、当初設置した T&D 社製のデータロガーの湿度センサーは測定範囲を超える高湿度であったため、ここでは連続性の観点から Onset 社製のデータロガーによる温湿度測定結果を、カプセル及び展示室(2)の岩盤(表面)温度については、T&D 社製のデータロガーによる温度結果について、以下に示す。

4-1. カビの発生確認期日

カプセル内外のカビなどの発生については、休館日、冬季閉鎖を除いては、ほぼ毎日、管理人による目視で確認されている。これまでカビの発生は、カプセルへの出入り木製戸の展示室(2)側の表面で観測された。ここ最近のカビの発生確認は、表3のとおりである。なお、発生後は、薬注処理などを行わず、戸を取り外し、十分な天日干し処理が行われている。

4-2. 外気の温湿度

気象庁ではアメダス観測点小樽で気象観測が行われ、我々は保存館横(図2参照)と日本郵船小樽支店で外気温湿度観測を行っている。その結果、それぞれの1時間毎の外気温度測定結果から、寒暖の差は保存館横が最も大きく、次に旧日本郵船小樽支店、アメダス観測点であった。また、湿度変化についても温度と同じ傾向がみられた。

このことを踏まえ、全体の傾向を比較するため、アメダス観測点小樽の温湿度(日平均)と旧日本郵船小樽支店での外気温湿度結果(一時間間隔)を用いて検討する(図5, 6)。

4-3. カプセルにおける岩盤表面温度

図7にカプセル内の岩盤表面温度を示す。カプセル内の岩盤表面温度は、2010年のデータを見ると2月上旬に3.1℃まで低下し、9月上旬に20.5℃まで上昇している。また、2011年では、2月上旬に3.9℃まで低下し、9月上旬に19.4℃まで上昇している。閲覧室(2)の岩盤温度結果もほぼ図7と同じであるが、カプセルほど大気との機密性が高くないため、各期間の最低温度は展示室(2)の方が若干低く示す。しかし、何れも観測期間中、氷点下以下の記録はない。

表3 カビの発生確認期日

発生年	発生確認月日
2006年(平成18年)	6/29, 7/14
2008年(平成20年)	9/3
2009年(平成21年)	7/20, 7/24, 7/25, 7/29, 8/3

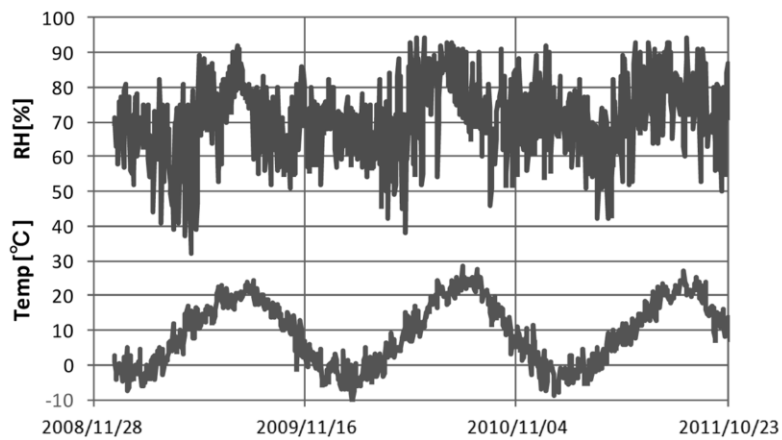


図5 アメダス観測点小樽の温湿度（日平均）

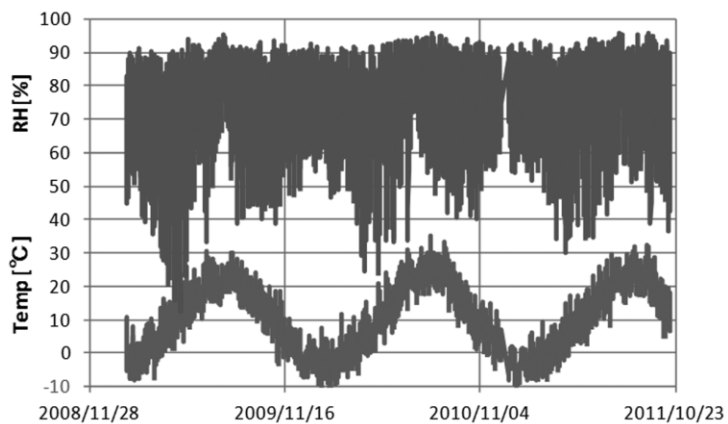


図6 旧日本郵船小樽支店横の外気温湿度

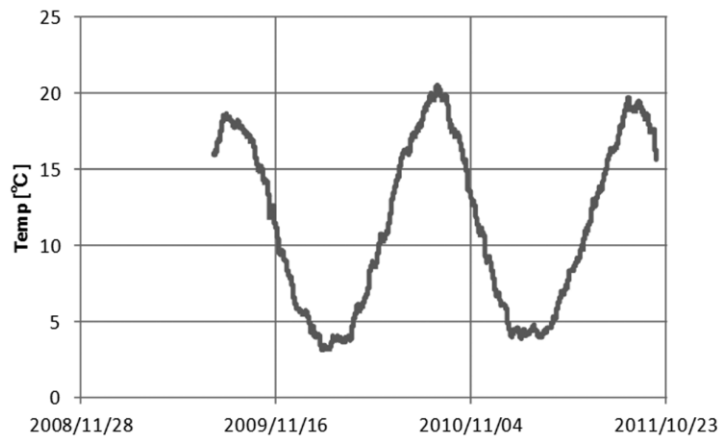


図7 カプセル内の岩盤表面温度

4-4. 展示室(2)及びカプセル内の温湿度

図8に展示室(2)内の温湿度(床面から約210cm)を示す。2009年の9月21日に短時間湿度は70%以下に低下が見られる他は、ほぼ90%前後を示す。またその中でも温度の高い夏の時期は、湿度も高くなっている。これは、岩石内の水の水分特性によるもので、温度が高くなるとそれと平衡する湿度が高くなるためと考えられる。

図9にカプセル内の温湿度を示す。展示室(2)とカプセル内の温度は、それぞれ日変化には差があるものの、季節変化は外気温度と正の相関がみられる。また、展示室(2)の湿度は、日変化とともに69~100%と非常に幅広い変化を示すが、カプセル内の湿度変化は非常に小さいことがわかる。展示室(2)とカプセル内の湿度にはスパイク状の変化が見られるが、これは、戸の開け閉めなど乱流による影響によると考えられるが詳細は不明である。また、カプセル内の湿度は、観測を開始してから温度と無関係に全体に湿度が高くなる傾向が見られる。

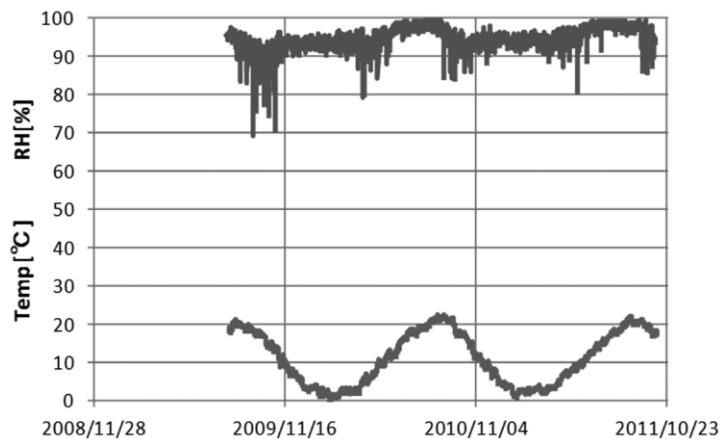


図8 展示室(2)内の温湿度(床面から約210cm)

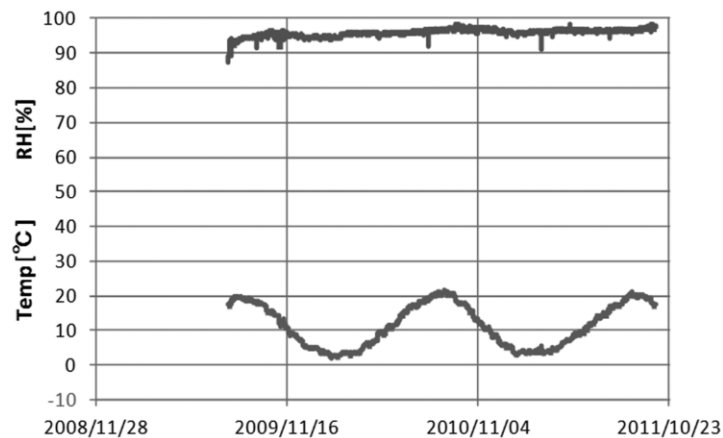


図9 カプセル内の温湿度

5. カビの発生確認日と温湿度環境の関係について

図5のアメダス観測点小樽の温湿度結果に、表3のカビの発生確認日(+)を重ねた図を図10に示す。

詳細に分析してみると、夏場で、外気の気温がその年の最高温度を記録する前後で、しかも気温が20℃以上の時で発生していることなどが分かった。また、降水量との相関も検討したが、有意な結果は得られなかった。

6. まとめ

保存館のカプセル内の温度や岩盤表面温度の挙動は、外気温度と相関がみられた。しかし、外気温度が-10~33℃の範囲であってもカプセル内の温度は2~21℃と、外気温度と比較すると変動(最高-最低温度)幅は狭い。すなわち、カプセル内では真冬は+12℃程度高く、真夏は-12℃程度低く、日変化幅も狭い。カプセル内の岩盤表面温度は、2010年のデータを見ると2月上旬に最低の3.1℃まで低下し、9月上旬に20.5℃まで上昇している。また、カプセル内の湿度は90~97%の範囲にあり、また日変化もあまりなく、ほぼ一定である。一方、温湿度計測開始前後以外に観測期間中のカプセル内外でのカビの発生は報告されていない。カプセル内の湿度は全体的に徐々に増加傾向がみられるが、これについては、センサーの劣化の可能性もあり、現在、センサーなどを交換するなどして、継続観測を行っており、経過などについては、別の機会に報告したい。

展示室(2)の温湿度の高さ変化は、保存館の冬期休館期間(11月4日~翌年の4月28日)とほぼ一致し、開館中に人の出入りやドアの開閉により、高さ方向に変化は生じることがわかった。

カビの発生については、2006年、2008年、2009年に報告がある。アメダス観測点小樽の外気温湿度結果から、詳細に分析してみると、カビの発生が確認されたのは、夏場で、外気の気温が最高温度を記録する前後であること、気温が20℃以上の時であることなどが分かった。また、降水量との相関も検討したが、有意な結果は得られなかった。

今回の調査結果では、保存館内の気温は展示室(2)、カプセルともに、氷点下になることはなかった。外的条件として温度変動をその幅を小さくし、また-4℃以下~4℃以上となる出現頻度も少なくするためには、外気と直接接触させない覆屋が有効であると福田^{2),3)}の報告を実証

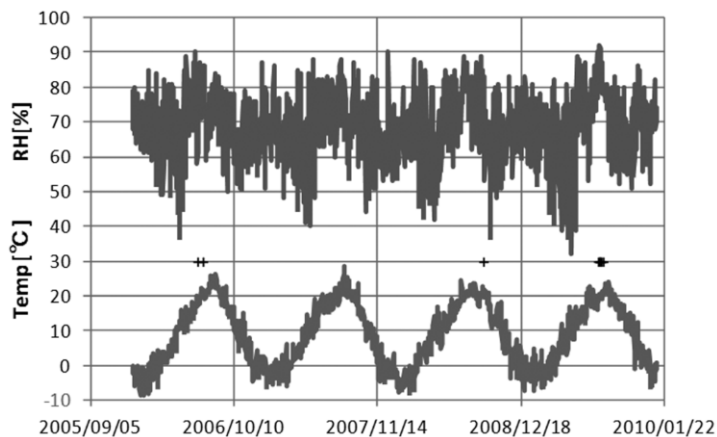


図10 アメダス観測点の観測結果とカビの発生確認日(+)の関係

した結果となった。しかし、旧日本郵船小樽支店における外気温度観測結果では、年に1～4回程度は出現していることから、文化財保存のために今後も引き続き保存館内外の温湿度観測を行うことが望ましい。

また、今回の調査では陰刻面にある亀裂調査は実施していないが、今後、長期保存を行う上で、カビの発生要因とその種の特定を実施するとともに、陰刻壁面の亀裂状況把握も行う必要はあると考える。

謝辞

本報告に当たって、機器設置に便宜を図っていただいた小樽市教育委員会、および現地調査やデータ回収にご協力を頂いた小樽市総合博物館学芸員の石神 敏氏に、この場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 小樽市：国指定史跡 手宮洞窟保存修理事業報告書, 1-205 (1985)
- 2) 福田正己：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, 北海道大学低温科学研究所低温科学, 物理篇43, 171-180 (1985)
- 3) 福田正己：石材の凍結劣化とその防止法, 科学研究費補助金試験研究(1)研究成果報告書—古建築の保存を目的とした石材の凍結劣化防止法の基準化—, 昭和62年～平成元年, 東京文化財研究所, 51-62 (1988)

キーワード：凍結融解 (freezing and thawing)；温湿度環境 (environment of temperature and humidity)；劣化(deterioration)；陰刻(hollow relief)；凍結融解サイクル(freeze-thaw cycle)

Study of Temperature and Humidity Conditions Inside the Conservation Facility of Temiya Cave

Masazo TAKAMI* and Takeshi ISHIZAKI

Temiya Cave is located at the west side of Otaru city. In Temiya Cave, which is designated as an important historical site, images are carved on the rock surface. After 14 years from the building of the conservation facility, the temperature sensors have deteriorated and it has become difficult to maintain the data logging system. In order to clarify the environmental condition, digital data loggers were set to measure temperature and humidity profile inside the exhibition room. From these measurements, it was found that temperatures in the exhibition case and on the rock surface changed in accordance with the outside air temperature. Temperature in the exhibition case changed from 2°C to 21°C when the outside air temperature changed from -10°C to 33°C. This shows that the temperature in the exhibition case did not decrease below 0°C.

Furthermore, fungi were found inside the door of the exhibition case in 2006, 2008 and 2009. By examining the outside air temperature obtained from AMeDAS station, it was revealed that fungi were found in summer when maximum temperature was recorded and the temperature in the exhibition case was over 20°C. In order to keep the carved rock surface in good condition, it is also necessary to monitor the deformation of the cracks on the carved surface, although it was not done this time.

*Hokkaido Research Organization