

「北海道開拓の村」の歴史的建造物の壁面劣化調査

高見 雅三*・石崎 武志

1. はじめに

「北海道開拓の村」は、昭和58年4月16日に、明治・大正の北海道の建造物を保存、展示し永く後世に伝えるとともに、開拓の歴史を体験的に学ぶことのできる野外博物館として開村されている。ここの歴史的建造物の漆喰壁には写真1・2に示したような劣化が見られる。



写真1 開拓の村にある剥落した漆喰壁の建造物（旧武井商店酒造部の土蔵）



写真2 開拓の村にある剥落した漆喰壁の建造物（旧大石三省堂支店の土壁）

これらの劣化の原因は、壁面の凍結・融解の際の凍上現象によると考えられる。一般にその要素は、水、温度、物質の3つである。水（雪）や温度（寒さ）については、北海道は寒冷環境下であり、また物質については、土壁であることから凍上しやすい材料であるため、上記の3つの条件は整っていると言える。しかし、水と温度の2つの要素がいつどのように関連するのか、また、この3つの条件以外に他に誘因となるものが存在するのかなど土壁の劣化のメカニズムを解明するためには、これらの3条件をそれぞれ定量的に把握する必要がある。

まず、劣化の現況を把握するため、石造及び漆喰土壁の建造物劣化の現況調査を行い、次に、石造建造物の旧小樽新聞社周辺で温湿度・風速・日射量などの微気象観測を開始した。旧小樽新聞社の壁面においては、全方位（東西南北面）の壁面温度を連続測定した（図1・2）。

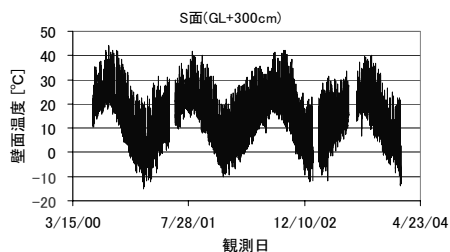


図1 旧小樽新聞社の南壁面の表面温度の観測結果

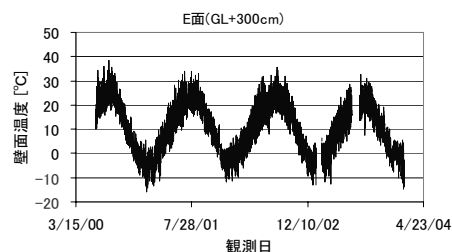


図2 旧小樽新聞社の東壁面の表面温度の観測結果

*北海道立地質研究所、保存科学部協力研究員

福田ら¹⁾は、凝灰岩の凍結破碎実験から -4°C 以下、 $+4^{\circ}\text{C}$ 以上の変動幅が、岩石の凍結破碎に寄与することを示した。石崎ほか²⁾は、2000年秋～2001年春の観測結果から旧小樽新聞社の凍結－融解の繰り返し回数を算出した。この結果、南壁面の回数は他の壁面と比べて多いこと、春先に南壁面のみ着雪が目視観測されたこと、建材が空隙率の高い凝灰岩であることなどから、南壁面は凍結破碎を引き起こす3条件が充分整っていると報告した。また、一度劣化し、剥落した壁表面は凹凸(写真2)となるため、着雪しやすくなることから、これが相乗効果として南壁面の劣化をさらに進行させていると結論づけた。

その後、南面の凍結－融解の繰り返しを算出した結果を表1に示す。これまでの結果と同様に南壁面での出現回数は多く、剥落状況調査結果(写真3)と一致している。しかしながら、西面に面した建物の玄関付近や窓周辺で凸部の飾り付け等ある箇所では、劣化し剥落した形跡は目視観測できるが、石材の剥落は、南面以外では観測されていない。



写真3 旧小樽新聞社南面の劣化状況

表1. -4°C 以下 $+4^{\circ}\text{C}$ 以上の変動幅の出現回数

シーズン	南壁面	東壁面	北壁面	西壁面
2000/11-2001/3	64	14	12	24
2001/11-2002/3	22	0	2	15
2002/11-2003/3	27	5	3	8
2003/11-2004/3	33	13	9	11
計	146	32	26	58

漆喰土壁の建造物においても、石造建造物の劣化のメカニズムと同様に南面の凍結－融解サイクルの出現回数に関与していると推測されるが、日光や雨を防ぐための庇があること、漆喰そのものは、透水性は低くかつ非凍上性材料であり、また土壁そのものの含水率も低いことが予測されるなど、石造建造物のように凍結破碎を引き起こす3条件が充分整っているとはいえない。

我々は、村内で漆喰建造物(渡邊商店)の補修工事が行われていることに着目し、土壁、漆喰土壁中の水分移動、冬季における水分の凍結、それらに伴う表面の劣化のメカニズムを明らかにするために、補修現場内で、同質の材料・同様の施工法による試験土壁(以下、試験壁)を作製し、施工毎にどのように水分が土壁内部に浸透・乾燥するか、その過程をTDR(Time Domain Reflectometry)による土壌水分測定装置により自動計測した。その結果、ソフトウェアDelphin4によるシミュレーション結果と実測結果が良く対応することを報告した(Ishizaki et. al.)³⁾。

その後、試験壁を野外に設置し、土壁内の水分量の把握とともに、劣化との関連について、定量的に検討したので、以下に報告する。

2. 試験壁の構造とセンサー埋設位置

試験壁の木枠の外形は、長さ108cm×幅15cm×厚さ4cm×2枚の木板と長さ100cm×幅15cm×厚さ4cm×2枚の木板で1辺108cmの正方形の大きさである(図3)。

内部構造は、木枠の内側(1辺100cmの正方形)にφ1cm程度の根曲がり竹を縦4本、横5本を骨組みの芯として、外枠内側の切り込みに固定させたのち、芯の間にφ5mm程度の葦を2本ペアーとして約3cm×3cm程度の格子状になるように縦21組、横17組を麻ひもで固定した(写真4)。土壁の基礎となる骨組みは、表(おもて)面となる木枠面からほぼ9cm、裏面となる木枠面からほぼ5cmの位置に設置した(図3右参照)。

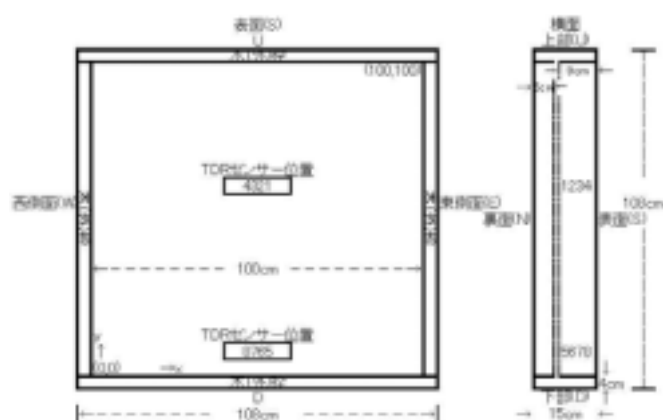


図3 試験壁のサイズとTDRセンサー位置図(概念図)
(U)---Up : (D)---Down : (E)---East : (W)---West : (S)---South : (N)---North
図上の座標は、表面(S)からみて、左下隅が座標の原点(0,0)とし、
右上隅を(100, 100)とした。座標単位はcm。



写真4 各工程毎の写真
左段：左から試験壁骨組み、だんご付け(下塗り)、大むら直し(中塗り)；
右段：左から小むら直し(中塗り)、仕上げ(上塗り)直後の写真

試験壁は、製作工程の呼び名は、施工業者に準じ、だんご付け(下塗り)、大むら直し(中塗り)、小むら直し(中塗り)、仕上げ(上塗り)の4工程で作成した。試験壁の厚さ方向と水平方向の水分分布を把握するために、TDRセンサーは施工毎に試験壁面のほぼ中央と下部に埋め込んだ(図3)。まず、写真4に示す骨組みにNo.1(中央部)、No.5(下部)を固定し、次にだんご付け(下塗り)し、No.2(中央部)、No.6(下部)はだんご付けの仕上げ表面にそれぞれ埋め込んだ。同様に、大むら直し(中塗り)を行い、その仕上げ表面にNo.3(中央部)、No.7(下

部)を埋め込み、最後に小むら直し(中塗り)後の仕上げ表面にNo.4(中央部),No.8(下部)を埋め込んだ。最終表面仕上げ(上塗り)には漆喰を用いた。通常1~2mmと薄いため、漆喰にはセンサーを埋め込んでいない。

試験壁は2002年8月2日に屋外へ移動し、一般的な屋根勾配でかつ一般的な長さの庇からなる屋根を取り付け、背面には、補修された渡邊商店に用いた、表面を焼いた雪害用の木質板を取り付けた(写真5)。



写真5 屋根を付けて屋外に再設置した試験壁と計測機器の外観

3. 試験壁の観測結果

3-1. 温湿度機器と測定結果

写真5に示すように試験壁は薄く十分な室内空間はないが、本来室内側となる壁の内側の空間の温湿度(以下、試験壁内の温湿度)環境、と試験壁周辺の外気の温湿度(以下、外気の温湿度)環境を比較するため、それぞれ温湿度計を設置した。前者の温湿度測定記録計には、コーナシステム(株)製のKADEC-HTVを、湿度センサーには、湿度感知素子に湿度変化に対してその電気的特性を変化させる静電容量式高分子箔体センサーを、温度センサーには、温度感知素子にPt100Ω白金抵抗を用いたKDC-S2-Vを使用した。また、後者の測定器には、Onset製の野外用ロガーホボH8プロを用い、直接雨風が当たらないよう、シェルターに入れ、試験壁の側面(東面)に設置した(写真5)。

図4に試験壁内の温湿度と図5に外気の温湿度の測定結果を示す。湿度は、ともに、同じような挙動を示すが、外気の温湿度の方が、変化の幅は大きい。また、ともに5月初旬頃がその年で最も低い湿度を示す傾向にある。温度については、試験壁内の温度と外気の温度はともにほぼ同じ挙動を示すが、外気の方が変化幅は広い。なお、外気の湿度には、段差(2003年6月8日)が見られるがこれは、温湿度計の交換によるものである。

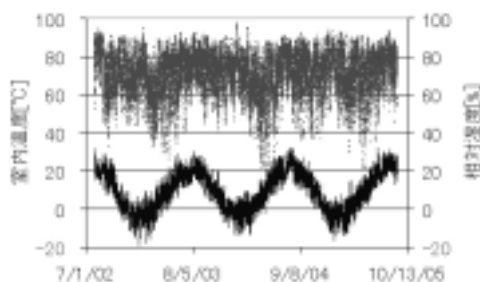


図4 温湿度計測結果(試験壁内の温湿度)

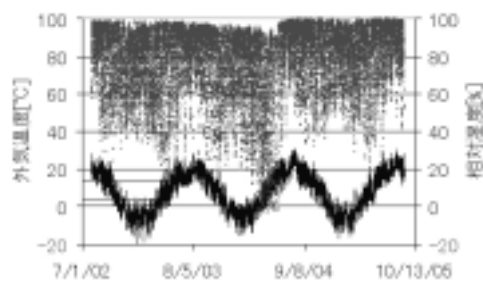


図5 温湿度計測結果(試験壁周辺の外気の温湿度)

3-2. 体積含水率の測定結果

TDR土壌水分測定には、CAMPBELL SCIENTIFIC INC製のTDR100と同社のデータロガーCR10Xを用いた。CR10Xは本体内部にメモリーとCPUを内蔵しており、予めプログラムすることにより様々な計測・制御・記録を自動的に行える装置である。また、データ回収には、CR10X用サポートソフトウェアPC208Wを用い、データ回収時の計測波形収集や土壁内の電気伝導度(EC)測定には、TDR100用のサポート用ソフトウェアPCTDRを用いた。なお、IMKO製のポータブル水分計TRIME-FM3とサーフェスプローブTRIME-S3Fを用いて、試験壁の面的な体積含水率を測定した。

図4・5に示したように、試験壁内の温湿度や外気の温湿度は変化に富むが、野外に設置した後の試験壁の中央部と下部の体積含水率は、やや差違は認められるが平均的にはほぼ5%前後で推移し、この結果は、ポータブル水分計の結果とほぼ一致する。また、融雪期における壁内部(No.1, No.5)の水分量は、他のセンサーよりも高く示すような傾向はみられるが、試験壁内の温湿度、外気の温湿度、降水量などと顕著な応答は検出できない。

まとめると大まかに以下の通りである。

- (a) No.1とNo.5の体積含水率の平均値、標準偏差ともに、No.1<No.5である。
- (b) No.2とNo.6の平均的な値は、No.2≒No.6で、標準偏差はNo.2<No.6である。
- (c) No.3とNo.7の平均的な値、標準偏差ともに、No.3>No.7(平均値はほぼNo.3≒No.7であるが、標準偏差は、No.3>No.7)である。
- (d) No.4とNo.8の平均的な値は、No.4<No.8で、標準偏差はNo.4>No.8である。

一方、高見・石崎(2002)は、制作過程で以下のようにまとめている。

- (1) だんご付け(下塗り)・大むら直し(中塗り)は、吸水性・伸縮性共に大きい。
- (2) 小むら直し(中塗り)・漆喰仕上げ(上塗り)は、吸水性・伸縮性共に小さい。
- (3) 砂質分が多くなると伸縮性は小さくなる。

このことから最も内部の水分量が多くなる結果と矛盾しない。測定場所の相違については、主として重力の影響を受けるが、必ずしもそうでない結果が得られていることから、詳細については今後検討する必要がある。

4. 現地観測結果

4-1. 開拓の村の観測結果

試験壁は2002年8月2日から野外に設置してから表面観測を行っている。その結果、2004年3月28日に初めて南西左隅に亀裂を確認した(写真6)。また、周辺の木枠に水染みと思われる跡も観測された。冬期は雨が降らないことから融雪水による染みと推測されるが、その根拠となる着雪はこの年には確認できなかった。

2005年2月11日に試験壁表面下部に着雪を確認した(写真7)。特に水染みが観測された南西角に多く着雪を観測した。このことにより、水染みは融雪水による可能性が高く、また、3条件のうちの寒さがある時期に水の供給となる着雪が確認できたことは、劣化のメカニズムを解明する上で非常に重要である。特に着雪が多く観測された部分は、亀裂が生じた場所である。このため、この部分は、測定結果以上に高くなっている可能性が高い。



写真6 試験壁左隅(南西下角)で生じた亀裂
(2004/3/28撮影)と水染み

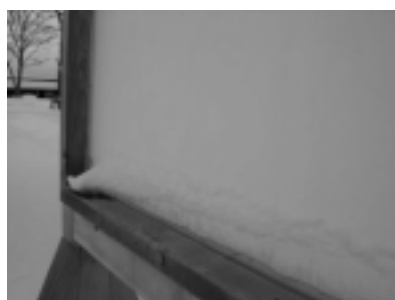


写真7 着雪した試験壁(2005/2/11撮影)

4-2. 他の地域の観測結果

凍結・融解による劣化の条件は、上述したように凍上の3条件に支配されるが、問題は寒さのある時期に水の供給があればどのようなことが起こるかについて、その実測例について示す。

調査地は北海道千歳市の苔の洞門である。苔の洞門は、樽前山の支笏湖側山麓を刻む涸れ沢の下流に位置し、その名称は切り立った谷壁に密生する苔に囲まれた景觀に由来している。苔の洞門を構成する岩盤は弱く溶結した凝灰岩で、洞門内には、火砕流堆積面の傾斜方向に直交する冷却節理が数多く見られる。融雪時期では写真8のように、節理内には氷が、また、岩盤表面は氷で覆われる様子が観測される。しかしながら、洞門を構成している溶結凝灰岩の体積含水率は、未凍結時では5~15%程度であり、それだけでは説明できない。周辺の地形測量や状況観測した結果、融雪水の再凍結によるものと結論づけた。

図6に積雪深さと開口幅変位の関係を、図7に壁面温度と開口幅変位の関係を示す。亀裂は、岩盤表面温度が0℃以上になり始めると徐々に開き始め、積雪が消滅する頃には急激に開き、岩盤表面温度の最低温度が0℃以上になるとその変位はしだいに小さくなる。すなわち、融解水と寒さの供給がある融雪期間は、亀裂内で氷が成長し、亀裂を拡げるが、融解水の供給あるいは冷熱源がなくなると亀裂は拡がらないことを示している。

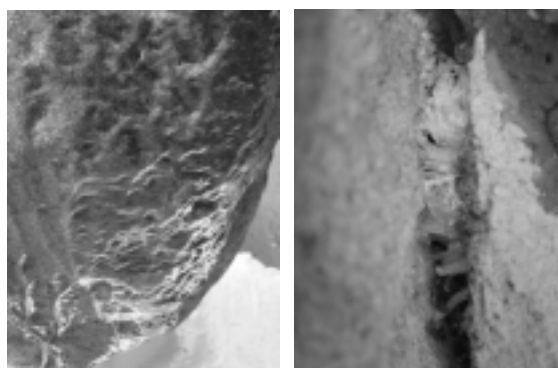


写真8 水で覆われた岩盤表面と節理内の氷

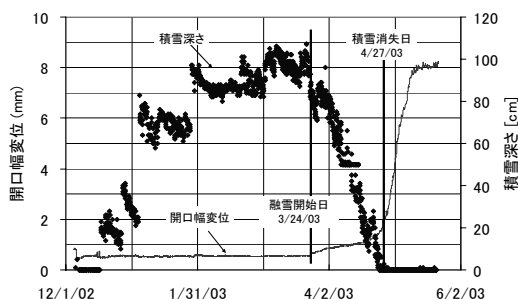


図6 積雪深さと気温の関係

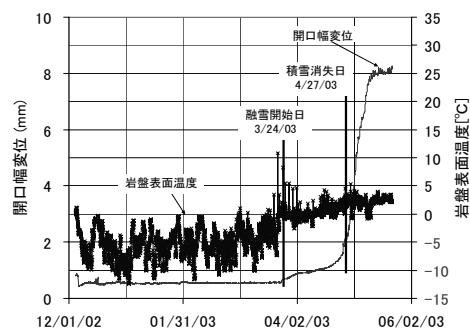


図7 岩盤表面温度と開口幅変位の関係

5. まとめ

北海道開拓の村で試験壁を作製し、施工毎に土壁内の水分量を測定した結果、土壁の基礎的なデータ収集できた。その結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 開拓の村にある漆喰土壁の建造物の劣化は、石造建造物と同様、南壁面で多く発生している。その多くは、土壁の下部あるいは木枠との境界部分などで見られる。
- (2) 2002年8月に屋外に設置後の試験壁内部の水分量は、晩冬から春季にかけて壁面の下部の方が若干高い結果を示すものの、全体的には体積含水率で5%程度と低い値を示す。
- (3) 2004年3月に、左隅(南西角)に亀裂、2005年2月に試験壁下部に着雪を確認した。この場所は、構造的に木枠が交わる角で、条件が整えば両面から水分供給が可能な場所であり、また、凍結-融解サイクルの出現頻度の高い南面と西面にもあたる。
- (4) 北海道では、オホーツク高気圧が弱まった春先には、南風が吹き、湿った雪が降ることがある。このため、写真7に示したように雪が壁下部等に着雪し、それが日中融雪する、または、屋根からの融雪水が南風により壁面下部や木枠を湿らせる。このことはTDRによる連続観測結果から融雪時期は試験壁の下部の方が比較的含水率が高くなることに対応している。
- (5) 連続測定の結果、土壁は体積含水率で約5%と非常に乾燥していることが判明した。また、施工時の結果から、より内部の方が吸水性・伸縮性共に大きいことから、木枠との隙間などから入り込んだ融解水は内部まで吸い寄せられる。
- (6) 土壁内部に留まった水分は、気温の低下とともに再凍結する可能性は高い。これが春先に何度も繰り返されることにより、劣化させ漆喰壁に亀裂を生じさせたと考えられる。
- (7) 上記の結果を裏付けるように、凝灰岩からなる崖で融雪水が亀裂内に流れ込み、再凍結することにより開口幅が変化し、供給源となる熱や水がなくなると変位しなくなる結果が得られており、このような変位は、融雪期にしか見られないことなど、開拓の村の結果とよく一致する。
- (8) これらの結果から、壁面が劣化する要因は、壁面内部への水の浸透であり、劣化を防止するためには、表面からの水の浸透を防止することが重要であることがわかった。

謝辞

調査にあたっては、北海道開拓記念館の小林幸雄氏、小林孝二氏、北海道開拓の村学芸員の中島宏一氏に協力を頂いた。苔の洞門調査結果については、北海道立地質研究所の石丸 聡研究員から提供を頂いた。ここに、記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 福田正己：小樽手宮洞窟壁面遺跡の凍結破砕防止に係わる基礎的研究，低温科学物理編，43，171-180 (1984).
- 2) 石崎武志・高見雅三：北海道開拓の村の歴史的建造物の壁面劣化調査，日本文化財科学会第19回大会研究発表会要旨集，108-109 (2002).
- 3) Ishizaki, T., Takami, T., Grunewald, J., Plagge, R. and Fechner, H.: Deterioration mechanism of stone and earthen wall in Historical Village of Hokkaido, Proceeding of the 2nd International Conference on Building Physics, 283-290 (2004).

キーワード：歴史的建造物 (historical building)，凍結劣化 (frost damage)，北海道開拓の村 (historical village of Hokkaido)，凝灰岩 (tuff)

Deterioration Mechanism of Historical Buildings in the Historical Village of Hokkaido

Masazo TAKAMI* and Takeshi ISHIZAKI

Historical stone buildings and traditional Japanese buildings with earthen walls suffer from frost damage in the Historical Village of Hokkaido. It can be said that there are three factors for frost damage: temperature, water content and properties of materials. In order to clarify the deterioration mechanism of stone and earthen walls, surface temperature of stone walls and water content inside the earthen model wall were measured at set time intervals in addition to climatic factors. The surface conditions of the stone and earthen walls were observed periodically. Observation revealed that the south wall surface deteriorated more severely than the walls facing other directions. The surface temperature measurement of stone walls showed that the number of freeze and thaw cycles was larger at the south wall than at the other walls, and this corresponded well with the observation. The water content inside the earthen model wall showed about 5%.

In early spring, accreted snow was observed on the surface of stone walls and the earthen model wall. As a result, it was found that when snow melts in the daytime, snowmelt water infiltrates into the inside of the earthen wall and remains there. As the temperature drops in the nighttime, it re-freezes inside the walls. In this way, frost damage by freezing and thawing occurs in the village.

In order to reduce the risk of frost damage, it is necessary to reduce the freeze-thaw cycles and keep the water content lower than the critical value because it is very difficult to change the properties of the materials to non-frost susceptible ones. It is also necessary to prevent water entering the walls in order to protect the walls from deterioration.

*Geological Survey of Hokkaido, Japan

