

# 敦煌莫高窟と礫岩内部における 水分供給に関する研究

谷本泰雄<sup>1\*</sup>・谷本親伯<sup>1</sup>・小泉圭吾<sup>1</sup>・舩屋 直<sup>2</sup>・李 最雄<sup>3</sup>・王 旭東<sup>3</sup>

<sup>1</sup>大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻（〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1）

<sup>2</sup>ハイテック株式会社（〒532-0003 大阪府大阪市淀川区宮原 2-11-9 白鳳ビル4F）

<sup>3</sup>中国敦煌研究院保存研究所（Dunhuang Academy, Dunhuang, Gansu Province 736200, China）

\*E-mail: yasuo@civil.eng.osaka-u.ac.jp

砂漠気候に属する中国敦煌莫高窟には、第四紀の礫岩の堆積層に建造された石窟が現存している。本研究では、石窟内と礫岩内部の温湿度計測から石窟の塩類風化の原因となる石窟全体における水分供給について検討した。特に塩類の吸着現象によって供給される水蒸気量と塩類の吸着水から、石窟全体での水分環境について検討した。壁面では、降雨時にNaClの臨界湿度75%以上となり、潮解現象が確認された。礫岩内部の深度20cm以深では、年間を通して相対湿度が約80%以上となり、NaClが潮解を繰り返し、水分供給があることが確認された。深度20cm以深のNaClは、年間を通して液相で存在するため、石窟内で水分と塩類の移動が発生し、塩類風化が徐々に進行していると考えられる。

*Key Words : Dunhuang Mogao Grottoes, salt accumulation, dewdrop, deliquescence*

## 1. はじめに

敦煌莫高窟は、敦煌市の南東20km、ゴビ砂漠とタクラマカン砂漠の間に位置している。敦煌周辺の気候<sup>1)</sup>は、砂漠気候に属し、年平均気温11.1℃、年平均湿度35.8%（大阪大学計測2000年～2006年）である。また年平均降水量は25.6mm（大阪大学計測2000年～2006年）である。また年間降水量は、6～8月に集中している。1987年に世界遺産に登録された莫高窟には、第四紀の礫岩の堆積層に4世紀～14世紀にかけて建造された492の石窟、45000m<sup>2</sup>の壁画および約2000体の塑像が現存している。莫高窟の壁画は、礫岩表層から下地層、地色層（白粉層）および顔料層で構成<sup>2)</sup>されている。現在、莫高窟では、壁画の劣化が大きな問題となっている。

莫高窟における壁画の劣化<sup>2)</sup>には、鳥害、鼠類の害、虫害、退色、変色、傷、黴害、燻ぶ、空洞、亀裂、ひび割れ、剥落、鱗片状剥離および塩類風化が挙げられる。特に黴害と塩類風化は、石窟内と礫岩内部の水分環境が大きく関係している。黴害とは、石窟内の温湿度の上昇に伴い、壁画の構成材料を媒体として黴が繁殖し、壁画を腐食させる現象である。塩類風化とは<sup>2)</sup>主に点状塩害と疱疹状塩害に分類される。点状塩害とは顔料層が微小の点状に剥離する現象である。これは、石窟内

から顔料層への水分供給と白粉層および顔料層に含まれる水分により塩類の溶解と蒸発が誘発され発生する。疱疹状塩害とは、白粉層や顔料層が疱疹状に剥離する現象である。これは、礫岩と下地層に供給される水分により、各材料に含まれる塩類が壁画表面に析出することで生じる下地層の体積増加が原因として挙げられる。壁画構成材料内部と礫岩内部に含まれる塩類としては、主として芒硝(Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)、石英(SiO<sub>2</sub>)、方解石(CaCO<sub>3</sub>)および塩化ナトリウム(NaCl)の塩類<sup>3),4),5),6)</sup>（大阪大学計測）が挙げられる。

莫高窟における塩類風化には、降雨による莫高窟前面を流れる大泉河の洪水、莫高窟前面に設けられた植林への灌漑用水、礫岩内部からの地下水、壁画作成・補修材料に含有した水分および石窟内の空気中からの水分供給が関係している。

高橋ら<sup>7)</sup>は敦煌周辺の降雨特性を調査した。1979年には7月の月降水量が45.4mmに達した。この月、莫高窟前面を流れる大泉河の洪水によって、最下層の石窟内に土砂が流入したとの記録がある。

壁画への空気中からの水分供給を把握するためには、石窟内の温湿度計測が必要となる。石窟内の温湿度計測は、三浦<sup>8),9)</sup>、山根<sup>10)</sup>および山崎<sup>11)</sup>によって行われている。三浦は194窟と53窟の石窟内と地中の温湿度計測から、各石窟の温湿度特性を示した。山根は72窟と108窟を対象として、石窟

内の温湿度計測を行い、壁面における結露と塩類の潮解現象を考慮した石窟内の水分環境について検討した。また山崎は、72窟と108窟における礫岩の透湿性に関する物性計測と礫岩内の温湿度計測から、礫岩の透湿性について検討した。

塩類は、空気中の相対湿度が塩類固有の臨界湿度に達すると水蒸気を吸着して溶解し、飽和塩溶液を形成する潮解現象<sup>12),13),14)</sup>が発生する。そのため石窟内の塩類風化の原因調査には、石窟内と礫岩内の温湿度環境だけでなく、壁面と礫岩内部での結露、塩類の吸着現象(潮解)による水蒸気の供給に着目する必要がある。

本研究では、礫岩の試料採取が困難であるため、莫高窟周辺と石窟内の温湿度計測の結果から、壁画表面での結露と塩類の潮解現象の発生について検討した。また石窟内と礫岩内部の温湿度計測をもとに礫岩と壁画構成材料に含まれる塩類に供給される水蒸気量を検討した。これらをもとに、石窟全体における水分環境について検討した。

## 2. 温湿度計測の概要

### (1) 温湿度計測対象石窟

図-1に対象石窟の72窟と108窟の位置関係を示す。72窟は九層樓の北側、108窟は九層樓の南側の下層に位置する。72窟の大きさは6.5m×6.5m×4.2m、108窟は10m×11m×5mである。莫高窟周辺の気象は、崖下の72窟の前に気象観測装置(フェニックス社製)を設置し計測した。なお、以下に述べる外気とは崖下の計測結果を指す。

### (2) 石窟内温湿度計測

対象石窟は72窟と108窟とした。計測期間は2001年4月～2002年2月とした。計測位置は石窟内の入口付近にあたる東側と奥にあたる西側とした。

### (3) 礫岩内部の温湿度計測

礫岩内部の塩類に供給される水蒸気量を検討するため、礫岩内部の温湿度計測を行った。センサーは神栄社製のTHP-23とTHP-24を用いた。計測方法は直径2.5cm、深さ20cmの穴を開け、センサーを3つで1つのユニットとし0cm、10cmおよび20cm

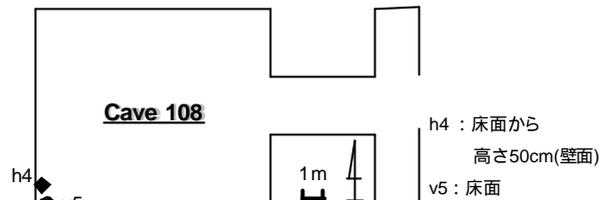


図-2 礫岩内部における温湿度計測位置

の温湿度を計測した。センサーは、透湿性シート(SF-150)で保護した。対象石窟は108窟とした。図-2に計測位置を示す。v5は床内部、h4は壁内部である。計測期間は2002年10月～2003年8月とした。

## 3. 石窟の水分環境に関する検討

石窟内と礫岩内の温湿度計測結果をもとに石窟における温湿度環境の特徴について検討した。また、塩類の吸着現象(潮解)による壁面と礫岩内部への水蒸気の供給に着目した、石窟全体における水分環境について検討した。

### (1) 石窟内の水分環境

#### a) 石窟内の温湿度特性

図-3 (a), (b)に72窟と108窟での温湿度の計測結果を各月における平均値で示す。以下に各月の気温と相対湿度を月平均気温および月平均相対湿度と表す。入口付近では、夏8月に72窟の月平均気温が21.5℃、108窟が17.8℃であり、72窟が108窟より約3.7℃高かった。また冬12月においては、72窟で月平均気温が-4℃となり108窟の約4.8℃に対して72窟が約9℃低かった。つまり月平均気温の年間変動が外気で約35℃、72窟で26℃、108窟で14℃であり、72窟が気温変動の激しい石窟であった。

月平均相対湿度は、72窟が冬1月に45.2%となり、最も相対湿度が高くなるのに対して、108窟では最も高くなるのが夏8月の43.3%であり、月平均相対湿度が最高値を計測する時期が異なった。崖下のWS-Tで計測した外気の相対湿度も72窟と同様に、冬12月に62.8%となり年間を通して月平均が最高湿度となった。月平均気温は、冬12月に外気で-8.6℃、72窟で-4℃、108窟で4.8℃となり、外気と72窟の気温が108窟に比べ極端に低かった。そのため72窟と外気の相対湿度は、108窟が夏に月平均で最高を計

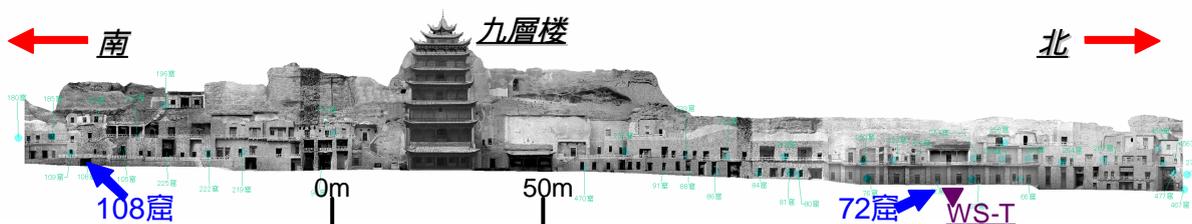


図-1 石窟位置関係

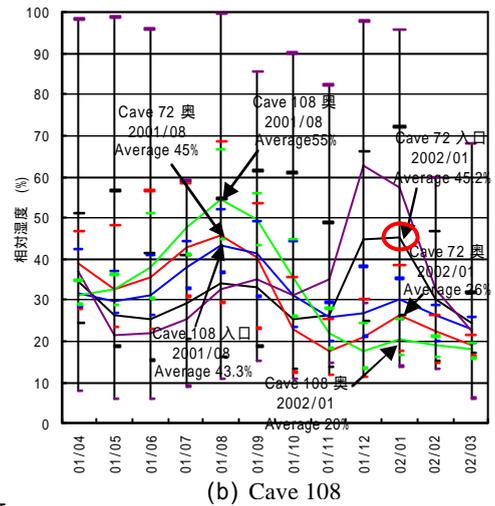
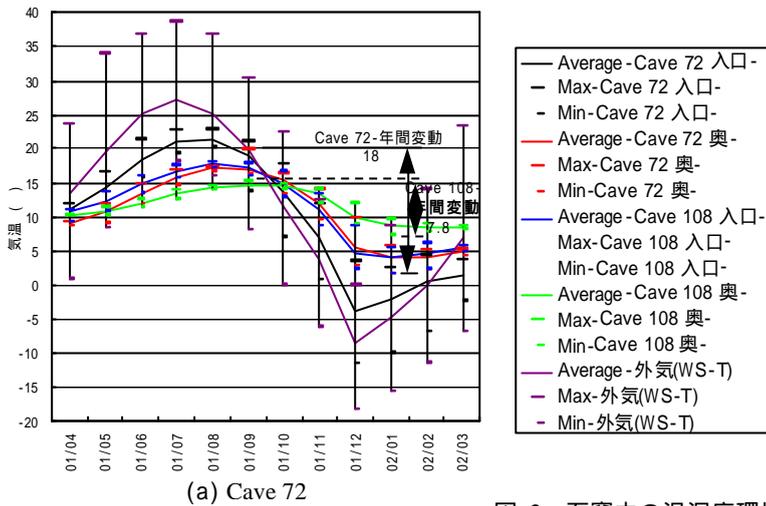


図-3 石窟内の温湿度環境

測するのに対して、108窟よりも極端に気温の低くなる冬に高くなったと考えられる。また石窟の体積は、72窟が108窟と比較して約1/4である。気温に影響される相対湿度が外気と同じ変動を示していることから72窟は108窟より外気との空気循環が活発であると考えられる。

b) 壁面における結露とNaClの潮解現象

NaClの臨界湿度は75%であり、莫高窟で確認された他の塩類と比較して低湿度である<sup>11),12),13)</sup>。そのため相対湿度75%を塩類の潮解現象の臨界湿度とした。本研究では結露と潮解現象の判断結果を空気中の水蒸気圧と壁面温度に相当する飽和水蒸気圧の関係から壁面での相対湿度として表した。壁面での相対湿度が100%で結露，75%以上でNaClの潮解現象が発生していると判断した。水蒸気圧と飽和水蒸気圧は，石窟奥の気温と相対湿度の計測結果をもとに算出した。

対象石窟は72窟と108窟とした。冬は石窟内より礫岩内の温度が高いため壁面での結露とNaClの潮解の発生する危険が極めて低い。そのため対象期間は2001年7月～2001年9月とした。壁面温度は，南西隅壁面（h4）の深度0cmの温度を適用し，2001年9月，2002年7月～8月および2003年7月～8月の各計測日時における深度0cmの温度の平均値を用いた。

図-4に壁面での結露とNaClの潮解現象の判定結果を示す。72窟と108窟ともに結露の発生は確認されなかった。特に108窟では，相対湿度75%以上にならなかった。

72窟では，8月1日～5日にNaClの潮解現象が発生したと判断され，壁面の相対湿度が最高で83%に達した。連続時間は，最大98時間で4日間を超え，降雨の計測された時間帯と一致した。つまり，外気との空気循環が活発な72窟のような石窟では，外気的水分環境の高まりに伴い，石窟内の水蒸気環境が高くなり，壁面への水分供給が発生する危険性が高まると考えられる。

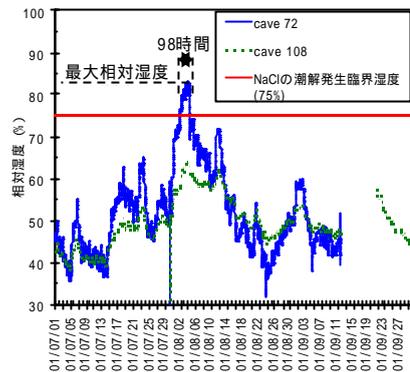


図-4 壁面での結露と岩塩（NaCl）の潮解現象の判定

(2) 礫岩内部の水分環境

図-5と図-6に108窟の南西隅の壁面（h4）と床面（v5）における深度0cm，10cmおよび深度20cmの温度と相対湿度の月平均値を示す。以下に各月の温度と相対湿度を月平均温度および月平均相対湿度と表す。壁面（h4）の月平均温度は，夏8月に深度0cmで14.1，深度20cmで13.5 となり，深度0cmが約0.6 高かった。逆に冬2月では深度0cmで9.0，深度20cmで9.7 となり，深度0cmが約0.7 低かった。床面（v5）も10月に月平均温度は深度0cmで14.1，深度20cmで13.8 となり深度0cmが0.3 高かった。冬2月では深度0cmで9.7，深度20cmで10.2 であり，深度0cmが0.5 低かった。

このように夏における月平均温度は，壁面（h4）と床面（v5）ともに浅部が深部より高かったのに対して，冬では浅部が深部より低くなっていた。空気熱伝導率<sup>15)</sup>は0，1気圧の条件で0.024 (W/mr K)であるのに対して，莫高窟の礫岩は山崎<sup>11)</sup>によると0.275 (W/mr K)であった。つまり礫岩は，空気に比べ熱量が伝わり難い。そのため深部は年間での温度変動が小さく，浅部と深部での年間の温度関係が変化したと考えられる。

図-6に示すように深度20cmでの相対湿度は，年間を通して壁面（h4）が約80%，床面（v5）が約94%で安定していた。

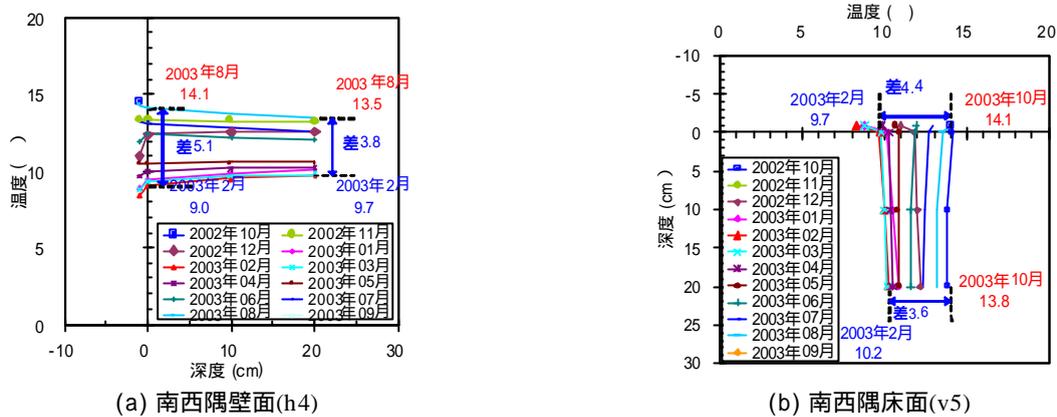


図-5 礫岩内部における温度環境

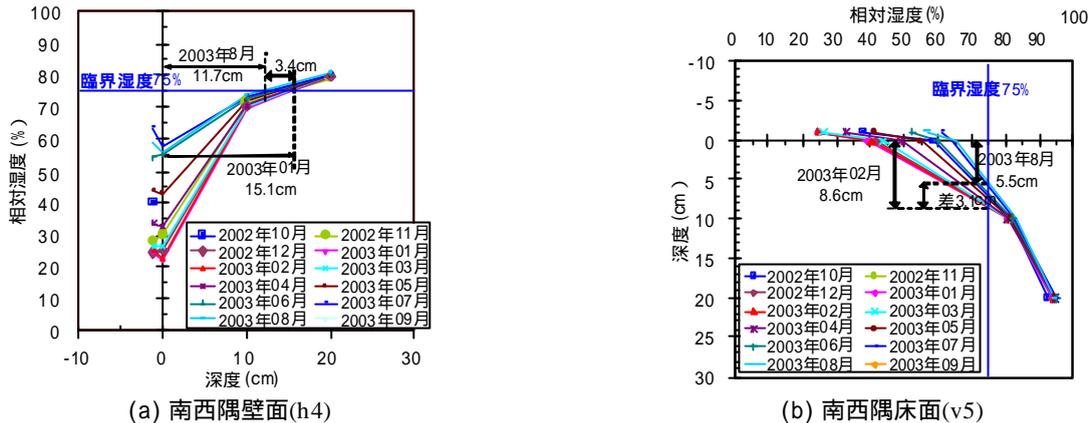


図-6 礫岩内部における相対湿度環境

夏の2003年8月に壁面（h4）の深度0cmは、月平均温度14.1℃，月平均相対湿度55.5%であり、1年のなかで温湿度が高かった。そのため礫岩内が高湿度となり、潮解現象発生深度が11.7cmと年間で最も浅かった。また冬の2003年1月に深度0cmは月平均温度9.4℃，月平均相対湿度21.9%と温湿度が低くなり、潮解現象発生深度も15.1cmと深く、夏の2003年8月と比較して約3.4cm深かった。床面（v5）においても壁面（h4）と同様に2003年8月に深度0cmは、月平均温度13.5℃，月平均相対湿度65.2%と温湿度が高いために潮解現象発生深度が5.5cmと浅い領域に達していた。2003年2月では、月平均温度9.7℃，月平均相対湿度40.5%と温湿度が低いため潮解現象発生深度が8.6cmと2003年8月と比較して約3cm深かった。以上より、礫岩内のNaClの潮解現象は、夏に年間を通して最も浅部にまで進行することが確認された。

この2つの計測地点での相対湿度は、年間を通して75%以上であった。つまり深度20cm以深では、相対湿度75%以上であるため、NaClが潮解現象によって溶解し、NaClの飽和溶液が存在している。

壁面（h4）と床面（v5）での相対湿度は、床面（v5）が壁面（h4）より年間を通して各深度で月平均相対湿度が約10%高かった。壁面（h4）では大部分で礫岩が露出しているが、床面（v5）では壁面側20cmを除いてモルタルが打設されている。水蒸気の透湿性を表すモルタルの湿気伝導抵抗は、

礫岩に比べて高い<sup>11)</sup>。また両地点の各深度での温度に大きな差が見られなかった。つまり床面（v5）は、壁面（h4）と比較して透湿性が低いため、高湿潤環境である。よって、床面（v5）の相対湿度が壁面（h4）より高かったと考えられる。

### (3) 礫岩内部の水蒸気量

対象地点は、図-2に示した108窟の南西隅壁面（h4）と床面（v5）とした。対象期間は、2002年10月～2003年8月とした。図-7（a）、（b）に壁面（h4）と床面（v5）における各月の礫岩内部の比湿を示す。比湿は空気中の水蒸気の質量と空気全体の質量との比を表す。壁面（h4）の比湿は、深度0cmで夏8月に6.57(g/kg)、冬1月に1.85(g/kg)となり、年間に約4.7(g/kg)の変動を示した。深度20cmでは、夏8月に9.20(g/kg)、冬2月に6.97(g/kg)となり、年間に約2.2(g/kg)の変動を示した。また床面（v5）における比湿は、深度0cmで夏8月に7.45(g/kg)、冬1月に3.48(g/kg)であり、年間に約4(g/kg)の変動を示した。深度20cmでは、10月に10.64(g/kg)、2月に8.54(g/kg)となり、年間に約2.1(g/kg)の変動を示した。以上より、深度20cmの水蒸気量は、深度0cmに比べ年間を通して比較的安定していた。

相対湿度の変化によるNaCl結晶表面における水蒸気の吸着<sup>16),17),18),19)</sup>は、相対湿度38.4%以上で発生する。よって礫岩内のNaClに供給される水蒸気量は、礫岩内の相対湿度とNaCl結晶表面にお

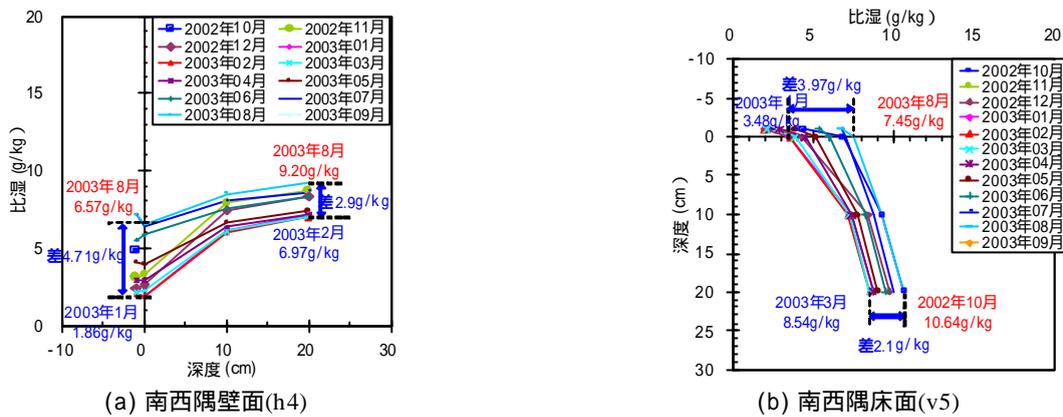


図-7 礫岩内部における水蒸気環境 -比湿-

ける水蒸気の吸着が始まる相対湿度38.4%に相当する水蒸気量の差で表される。

計測日時は壁面 (h4) では礫岩表層と深部の水蒸気圧の差が最大, 最小となる2002/11/29, 2003/7/15, 床面 (v5) は2002/11/30, 2002/10/5とした。表-1に礫岩内のNaClに供給される最大の水蒸気量を表す。壁面 (h4) と床面 (v5) とともに2003/7/15と2002/10/5においてNaClに供給される水蒸気量が各深度において最も大きくなった。床面 (v5) が壁面 (h4) よりもNaClに供給される水蒸気量が高い傾向を示した。この時期, 床面 (v5) の水蒸気量は, 深度20cmで6.20(g/kg)となり壁面 (h4) の4.51(g/kg)と比較して約1.7(g/kg)高くなり, NaClに供給される水蒸気量の差が各深度と比較して最も大きくなった。

(4) NaCl 結晶表面での吸着水の状態変化

石窟内と礫岩内部の温湿度環境の検討をもとに礫岩内部の水分とNaCl結晶表面における水蒸気の吸着によるNaCl結晶表面の状態変化について検討した。図-8に夏における礫岩内部のNaCl結晶表面の吸着水による礫岩内部の水分状態を示す。表-1をもとに, 礫岩内のNaClに供給される水蒸気量を図-8に示した。対象地点は108窟の壁面 (h4) とした。対象日時は2003/7/15 18:23とした。

表-1 礫岩内部における水蒸気供給量

|                |      | h4                 |                    | v5                 |                    |
|----------------|------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                |      | 2003/7/15<br>18:23 | 2002/11/29<br>5:54 | 2002/10/5<br>20:28 | 2002/11/30<br>6:55 |
| 水蒸気量<br>(g/kg) | 石窟内  | 3.553              | 0.870              | 2.701              | 0.854              |
|                | 0cm  | 2.425              | 3.478              | 4.763              | 4.725              |
|                | 10cm | 3.768              | 6.203              | 5.994              |                    |
|                | 20cm | 4.513              |                    |                    |                    |

| 石窟内      | NaClに供給される水蒸気量 |                    | NaClの状態              | 水分状態                         |
|----------|----------------|--------------------|----------------------|------------------------------|
|          | 相対湿度           | 水蒸気量               |                      |                              |
| 石窟内      | 70%            |                    |                      | 水蒸気                          |
| 13.84 cm | 70% - 75%      | 2.43 - 3.95 (g/kg) | イオンの溶解<br>結晶の融合      | 三次元凝縮<br>液相<br>飽和塩溶液         |
| 20cm     | 75% - 80.5%    | 3.95 - 4.51 (g/kg) | イオンの移動(長距離)<br>結晶の融合 | 三次元凝縮<br>液相<br>飽和塩溶液         |
| 20cm 以上  | 80.5% 以上       | 4.51 (g/kg) 以上     | 水分子の三次元的凝縮<br>結晶の融合  | 三次元凝縮<br>液相に水を吸収する力<br>飽和塩溶液 |

図-8 礫岩内部の水分状態 -2003/7/15 18:23 夏-

相対湿度に伴うNaCl結晶表面の吸着水によるNaCl結晶表面の状態変化は, 新藤<sup>16)</sup>, 党<sup>17)</sup>, 近沢<sup>18)</sup>によってNaClが潮解現象を起こす相対湿度75%以下の相対湿度38.4%から発生することが確認されている。図-8に示すように2003/7/15 18:23の礫岩表層の深度0cmでは, 相対湿度が70%を超えており, NaClが水蒸気を吸着していると考えられる。図-8のNaClに供給される水蒸気量として示すようにNaClによって供給される最大の水蒸気量は, 深度0cmからNaClの潮解現象が発生する臨界湿度75%となる深度13.8cmで2.43(g/kg)~3.95(g/kg)となった。このときのNaClは, 結晶表面で水蒸気の吸着によるNaClの飽和溶液の液相が形成され, カチオンのNa<sup>+</sup>とアニオンのCl<sup>-</sup>の移動が遠距離におよび, 近接するNaClの結晶の融合が発生する。また融合したNaClの結晶間で広領域にわたるイオンの移動が発生する。深度13.8cm以深では相対湿度が75%以上となり, NaClの結晶が潮解現象を起こし溶解する。図-4で示したように108窟では, 壁面におけるNaClの潮解現象は確認されなかったが, 72窟では, 壁面で臨界湿度75%以上になることが確認された。つまり夏では, 礫岩内全体でNaClが潮解現象を起こし, NaCl結晶による水蒸気の吸着だけでなく飽和溶液の液相による吸着が生じる。これに伴い, 隣接するNaClの結晶の融合が生じ, 広領域にわたってNa<sup>+</sup>とCl<sup>-</sup>の移動が発生している。

夏と冬ともに深度20cm以深では, 年間を通して

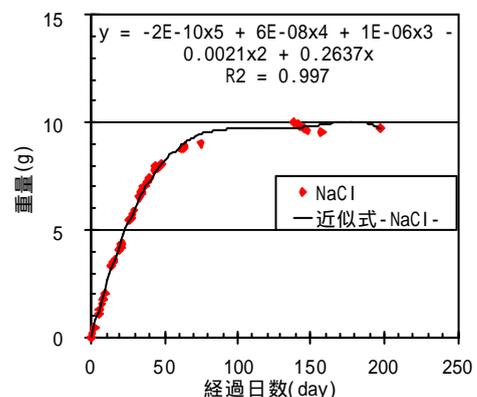


図-9 NaCl-1gあたりの水蒸気吸着量

相対湿度79%以上の環境であった。

NaCl 1gあたりが吸着しうる水蒸気量を把握するため、NaCl 3gを相対湿度100%の環境下で約200日放置し、NaCl 1gあたりの水蒸気吸着による重量変化を計測した。図-9に経過日数に対するNaClの重量を示す。その結果、50日までは、NaCl 1gあたりが吸着しうる水蒸気量は線形関係で増加したが、50日以降重量変化が穏やかになり約100日目に約10gで一定となった。NaCl 1gあたり最大で10.08gの水蒸気を吸着しうる事が確認された。

以上より、深度20cm以深では、年間を通して相対湿度79%以上の環境であるため、礫岩に含まれるNaClが、吸着可能な水蒸気量を超えて飽和溶液から溶液に移行していると考えられる。つまり深度20cm以深のNaClは、年間を通して液相で存在していると考えられる。

#### 4. まとめ

- 1) 72窟は外気との空気循環が活発である。
- 2) 結露は発生しなかったが、72窟壁面でNaClの潮解現象による、水分供給が発生している。
- 3) 夏、相対湿度75%以上となる深度13.84cm以深でのNaClに供給されうる水蒸気量は、少なくとも3.95(g/kg)であった。
- 4) 夏の降雨時、空気循環の活発な石窟では、壁面と礫岩内部への水分供給が発生していた。
- 5) 深度20cm以深のNaClは、年間を通して液相(潮解)の状態が存在していると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 甘肅省測繪局：甘肅省地図冊，甘肅省地質出版社，p.62，1982.
- 2) 東京文化財研究所：日中壁画修復用語集，p.59，2002.
- 3) 張明泉，張虎元，曾正中，李最雄：敦煌壁画塩害及其地質背景，敦煌研究文集 石窟保存篇 上 敦煌研究院編 甘肅民族出版社，pp.356-367，1993.

- 4) 北野康，馬淵久夫，三浦定俊，西浦忠輝，佐野千絵，朽津信明，門倉武夫，日下部実，段修業：敦煌周辺の天然水と中国の砂漠の析出塩の化学組成，保存科学 No.33 別版，pp.1-26，1994.
- 5) 朽津信明，段修業：敦煌莫高窟の地質環境，保存科学 No.31，pp.79-85，1992.
- 6) 朽津信明：敦煌莫高窟における壁画の塩類風化，土と基礎 Vol.45No.4，pp.47-52，1997.
- 7) 高橋英紀，藤田創造，三浦定俊，ZHANG Yongjun，王宝義：敦煌莫高窟の気象(3)-敦煌地域の降水特性，特に莫高窟の保存にかかわる大雨について-，保存科学 No.33，pp.27-34，1994.
- 8) 三浦定俊，西浦忠輝，李実，ZHANG Yongjun：敦煌莫高窟における気象計測(1)-1988年春の温度・湿度変化について-，保存科学 No.29，pp.1-7，1990.
- 9) 三浦定俊，西浦忠輝，ZHANG Yongjun，王宝義：敦煌莫高窟の気象(2)-1989から1991年まで-，保存科学 No.31，pp.87-93，1992.
- 10) 山根仁：敦煌莫高窟周辺環境と窟内微気象に関する考察，大阪大学工学研究科修士論文，pp.3-4，2002.
- 11) 山崎誠之：敦煌莫高窟周辺地盤の水分透過性に関する研究，大阪大学工学研究科修士論文，2002.
- 12) 猿橋勝子，池田長生：化学小事典第4版，p.240，三省堂，2001.
- 13) Douglas M. Considine, Glenn D. Considine (今井淑夫訳)：科学大百科，p.627，朝倉書店，1997.
- 14) Edward W. Washburn, P.H. D.: *International Critical tables of numerical data, physics, chemistry and technology vol. 1*，p.67，McGRAW-HILL BOOK COMPANY, Inc., 1926.
- 15) 銚井修一，池田哲朗，新田勝通：建築環境工学 熱・湿気・換気，p.31，p.34，pp.92-99，朝倉書店 2002.
- 16) 新藤 斎：結晶表面，日本海水学会誌 Vol.51 No.1，pp.12-19，1997.
- 17) 党 弘之，鍵和田賢一：塩化ナトリウムの固結機構の解明，日本海水学会 Vol.53 No.3，pp.185-194，1999.
- 18) 近沢正敏，武井 孝：粉粒体の表面化学と付着現象，日本海水学会誌 Vol.41 No.4，pp.168-180，1987.
- 19) 上平 恒：水の分子工学，pp.175-178，講談社，1998.

## THE STATE OF WATER AND SALTS IN THE DUNHUANG MOGAO GROTTOES

Yasuo TANIMOTO, Chikaosa TANIMOTO, Keigo KOIZUMI,  
Tadashi MASUYA, LI Zuixiong and WANG Xudong

Mogao Grottoes in Dunhuang, China, the World Heritage, have been suffering severe detachment and deterioration of murals from the salt accumulation on, in, and behind murals. The objective of the study is to clarify the movement of moisture content and salt substances in conglomerate as the bedding rock formation. Dewdrop was not found in Cave 72 from our measurement, but the deliquescence of NaCl was recognized at the depth of more than 20cm from the surface in conglomerate. In conclusion, the moisture content supplied through pores and discontinuity in conglomerate is considered as one of the main causes of the movement and accumulation of salt.