

敦煌莫高窟における塩類の晶出と壁画の劣化

著者	朽津 信明, 段 修業
雑誌名	保存科学
号	32
ページ	28-34
発行年	1993-03-31
URL	http://id.nii.ac.jp/1440/00003481/



敦煌莫高窟における塩類の晶出と壁画の劣化

朽津 信明・段 修 業*

1. はじめに

日本の東京国立文化財研究所と中国の敦煌研究院では、1991年以後、合意書に基づいて敦煌莫高窟の壁画保存のための共同研究を行っており、その成果の一部は既に報告してあるとおりである^{1,2,3)}。筆者らは、これまでに地質学的見地から敦煌莫高窟のおかれている環境を観察し、その結果として、塩類の晶出が壁画剥落の大きな要因のうちの一つとなっていることを指摘した²⁾。本論文では、特にこの塩類晶出の問題に焦点を絞り、その原因を解明し、それに対する壁画保存のための対策について考察する。

2. 洞窟群と地形

概要 敦煌莫高窟は、中国西北部のタクラマカン砂漠の東の端に位置し、現在大泉河と呼ばれる河川によってつくられた古期扇状地堆積物を、新しい大泉河が侵食してできた崖の西側崖面に、高さ約40m、南北約2kmにわたって彫られている²⁾。年平均気温は9.4℃、平均年間降水量は32.9mm、年平均相対湿度は41%と報告されている¹⁾。

莫高窟では、5世紀から14世紀に至るまで描かれた壁画が全部で496ある洞窟に余すところ無く描かれている。それらの洞窟は、崖面における高さ（大泉河の水面からの垂直距離）によって、およそ3層に分類することができる（図1）。各層は、堆積物上面の地形的な凹凸とは無関係に、前を流れる大泉河の緩やかな傾斜に対してほぼ平行に分布する（図1）。このうち、日中共同研究のグループでは、上位に位置する窟と、下位に位置する窟の二つの洞窟に絞って、特に観察を進めている^{1,2,3)}。

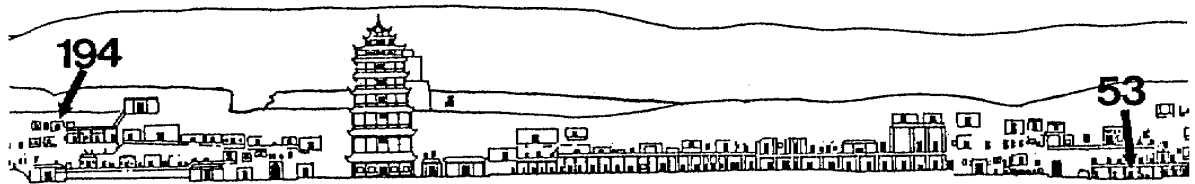


図1 敦煌莫高窟洞窟群相対位置図（孫儒僑氏の原図に加筆）

上位の窟 上位に位置する洞窟群は数の上では比較的少なく、横への並びもはっきりしないが、通常は古期扇状地堆積物上面の平坦面（地表面）からそう深くない位置に彫られている。沢の入り方に影響を受けている地表面の凹凸にもよるが、普通は地表面から10m以内に洞窟の天井があるようである。一方、上位の窟の下には一般に中位・下位の窟がある場合が多く、その床

*：敦煌研究院，中華人民共和國

面は、大泉河の水面より15m以上は上に位置している場合が多い。上位の洞窟群では、一般に上部の天井付近での壁画の剥落が観察されることが多く、逆に壁画下部の保存状態は良好である場合が多い。

日中共同研究の対象として選ばれた194窟は、北大仏殿（96窟）の南側77mに位置し、その入口は、北大仏殿入口中央から+13.6m、莫高窟前の大泉河に架かる橋の橋桁における水面から+20.9mの高さにある。194窟の上面には、侵食による小さな沢地形が形成されており、洞窟天井から地表面までの距離は僅か数m程度しかない。一方、下面には中位・下位の洞窟群が存在し、地下水からの影響は考えられない。

中位の窟 中位の洞窟群の上には、上位の窟がない場合でも厚さ10m以上の堆積物が存在する場合がほとんどである。また、中位の窟の下には下位の窟が存在する場合が多く、そうでなくとも中位の窟の床面は、大泉河における水面からは10m以上離れている場合が多い。中位の洞窟群は、一般に壁画の保存状態は良好で、壁画の上部にも下部にも剥落が認められる部分は少ない。

下位の窟 下位の洞窟群は、普通は大泉河の水面から10m以内の所に床面を持つ。一方、下位の窟の上には、一般には上位・中位の窟がある場合が多く、そうでなくとも古期堆積物上面の平坦面と下位の窟の天井面との間には、厚さ15m以上の堆積物がある場合が多い。下位の窟の天井付近では、一般に壁画の保存状態が良好であるが、逆に壁画の下部では剥落が観察されることが少なくない。

日中共同研究の対象として選ばれた53窟は、北大仏殿の北側210mに位置し、その入口は、北大仏殿入口中央から-6.8mの高さに、大泉河橋桁における水面から+2.5mの高さにある。53窟の上面には、中位・上位の洞窟群があるため、53窟は堆積物上面からはかなり奥深く（20m以上）に位置していると言える。地形的にも上方からの雨水の影響は考えられない。一方、下位に位置する洞窟の中でも、53窟付近の地表面は、相対的に周りの洞窟よりも低くなっているので（図1）、地表からの水が集まりやすい場所にあると言える。

3. 莫高窟における塩類の産状

莫高窟付近では蒸発岩と呼ばれる塩類の晶出が盛んであり、主なものとして、岩塩（Halite-NaCl）と石膏（Gypsum-CaSO₄・2H₂O）の2種類があることを記載した²⁾。

岩塩の産状 莫高窟付近では、岩塩の晶出はかなり普遍的に随所でみられる。例えば、大泉河の河原では、現在水流が観察される部分の側の水が干上がった部分で、随所に岩塩の晶出が観察される。

古期扇状地堆積物中でも、岩塩の晶出は顕著である。堆積物中で、粒子と粒子の間の隙間を埋めるように、岩塩が観察される場合がある。しかし岩塩の晶出は、堆積物全域で見られるわけではなく局所的に遍在して見られるに過ぎない。露頭規模で分布を調べても、垂直的にも水平的にも一定の傾向は観察されず、極めて不規則である。

洞窟内部で岩塩の析出が観察されたのは、既に報告したように194窟である²⁾。この窟の天井部は既に壁画や下地は剥落しており、1950年代に修復処置としてモルタルが塗られている。モルタルの塗られていない側壁では、直径5mm程度の粒状の岩塩が、塑土層と白土層との間に晶出して壁画を剥落させる要因となっている（図2）。析出物は、上部のものほど大きく密



図2 194窟における塩類の晶出と壁画の剥落
壁画上部ほど塩類晶出が密で、粒が大きい

に観察され、下部ほど小さくまばらになる傾向がみられる(図2)。

この他の上位の窟で観察される壁画上部の剥落にも、塩類の晶出が関係している可能性がある。例えば、3窟でも岩塩の晶出は報告されている⁴⁾。

石膏の産状 石膏の析出は、これまでのところは、洞窟外の河原や古期扇状地堆積物中では観察されていない。

唯一観察されたのが、53窟の洞窟内部においてである²⁾。53窟奥室の南側側壁及び東側側壁では、床面から約80cmの所を中心とその上下に、直径3mmから2cm程度の粒状の石膏の析出が観察される。析出物の大きさや分布の密度には、それほどはっきりとした傾向はみられない。

この他、下位に位置する洞窟では、かつては砂に埋もれていた洞窟が少なくなく、そのためと推定される壁画の剥落も見られるが、明らかにそれとは異なって、塩類の晶出による壁画の剥落と考えられる部分を持つ洞窟も存在する。分析はまだ行われていないが、これも石膏の可能性がある。

4. 実 験

塩類晶出は、水・岩石相互作用によって溶け出した岩石中の成分が、水分の蒸発にともなって析出することによって起きると考えられている⁵⁾。そこで、水・岩石相互作用をシミュレーションするために、室内実験を行った。すなわち、大泉河にて採取した水約50ml中に、洞窟の下地と同様な成分の粘土(鉱物組成は表1参照)を入れて放置した(図3)。

その結果、3日目くらいから、粘土の上部で粒状の白色物質の析出が始まり、20日目に水分が完全に蒸発したときには、直径1mm程度におよぶ析出物が粘土上部を覆うようにして広がっていた。実験終了後、粘土上部の粒状の析出物の部分と、析出物の見られない下部の粘土の部分からそれぞれ試料を採取した。

試料は、X線粉末回折によって鉱物分析を行った。X線粉末回折は、日本電子JDX-10PAにて30kV、15mAの条件下で、CuK α 線を用いて測定された。

分析の結果、粒状の析出物の部分からは石膏が検出されたが、粘土の部分からは石膏や岩塩などの塩類は検出されなかった(表1)。

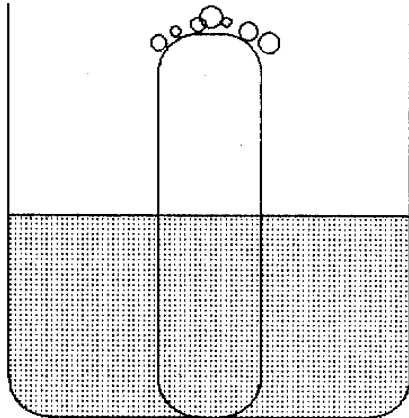


図3 蒸発岩形成の実験

表1 下地と実験により形成した析出物とのX線回折分析結果

試料	主要構成鉱物
53窟下地	石英 (SiO ₂), 方解石 (CaCO ₃), カオリナイト (Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄), イライト (K _{2-2x} Al ₄ [Si _{6+x} Al _{2-2x} O ₂₀](OH) ₄), 斜長石 ((Na,Ca)(Al,Si) ₄ O ₈), ドロマイト (CaMg(CO ₃) ₂)
析出物	石膏 (CaSO ₄ · 2H ₂ O)

5. 考 察

塩類の晶出 以上から、敦煌莫高窟における塩類の形成について議論する。まず、194窟では、岩塩の晶出が壁画剥落の大きな要因であった。194窟の天井が微地形としての沢底に位置し、また地表面から浅いところにある事実を考えると、194窟は、雨水の影響を受けやすい窟であると推定される。つまり、194窟で観察される岩塩は、本来周辺の扇状地堆積物中に含まれていた岩塩が一旦雨水によって溶かされ、壁面に再晶出しているものだと考えられるのである。現在の岩塩の析出が、壁面上部で大きくかつ密に観察される事実から考えると、過去に起きた天井部の壁画の崩落にも、塩類の晶出が原因のひとつとして関与している可能性が高い。また、既に指摘したように²⁾、1950年代に行われたモルタルによる修復処置は、染み込んできた雨水を側壁の壁面に逃すこととなり、壁面の表面に塩類を晶出させる一因になっていることが推定される。いずれにしても、年間降水量が僅かに32.9mmと言えども、雨水が壁画の劣化に大きく関与していることが推定され、194窟というのは、塩類風化という観点から考えて、極めて保存の難しい位置にある窟だということが言えよう。また同様に、その他の上位の窟で壁面上部に観察される壁画の剥落にも、雨水が関与している可能性が指摘でき、対策が望まれる。

一方、53窟での石膏の形成については、別の原因が想定される。大泉河をはじめとする莫高窟周辺の河川水には、硫酸イオン(SO₄²⁻)が異常なまでに多く含まれていることが既に指摘されている²⁾(表2)。実際、この水と洞窟の下地成分との反応で、石膏が形成されることが、実験によって確認された。つまり53窟

では、硫酸イオンに富んだ水が、洞内の岩体や下地やモルタルなどに含まれる炭酸カルシウム分と反応して、その結果として石膏ができたと考えるのが

表1 大泉河の水の陰イオン

試料	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
大泉河の水	463.19	3.46	824.20

単位はmg/l 段(1988)による

妥当であろう。それでは、大泉河の水は如何にして下地と反応するに至ったのであろうか。それを考える際に、興味深い事実がある。1979年の6月末から7月初めにかけて、敦煌周辺では記録的な豪雨があり、例外的に大規模な洪水が起きたという。そしてこの洪水の際に、53窟をはじめとする下位の洞窟のいくつかは、大々的に浸水したことが知られている。砂漠地域とは言え、歴史時代を通じて考えれば、壁画が描かれて以後現在に至るまでの間には、洪水によって下位の洞窟が浸水することは何度かはあったであろう。つまり、毛細管現象による地下水の吸い上げなどの、小規模かつ定常的な水の供給ではなく、洪水によって突発的に河川水が直接窟内に浸入することによって、洞内の炭酸カルシウム分と反応して石膏が形成されたと考えするのが妥当と思われる。この考えは、石膏の析出が、下位の洞窟で普遍的にみられるものではなく、53窟などの限られた洞窟でのみ観察される事実からも補強される。すなわち、浸水した洞窟でのみ、石膏の析出が観察されるのではないかと推定されるのである。このように考えると、壁画の劣化というのは、定常的に漸次進行していくものだけではなく、むしろ突発的な出来事によって急速に進行する場合もあるのではないかと考えられる。

保存対策 次に、こうした塩類の析出から壁画を守る方法について考察する。まず、中位の窟については、塩類晶出ということだけで考えれば問題はなく、特に対策は必要ないであろう。

次に、194窟をはじめとする上位の窟においては、雨水の浸透を防ぐことが本質的である。理想的には、南北約2kmにわたる洞窟群全てが雨水から保護されるのが望まれるが、現実問題としては、194窟などの特に地形的に雨水の影響を受けやすい窟から手をつけるのが先決であろう。そのためには、洞窟の天井に雨水を提供すると想定される既存の沢すじに、雨水が集中しないように新たなる水抜き道をつくるなどの対策が考えられる。また洞内においては、かえって水を遮断して壁画に悪影響を与えているモルタル類は取り去り、天井から、残存する壁画に影響のないように水を外に逃がすような、新たなる水みちをつくることが有効であろう。

一方、53窟などの下位の窟では、砂などで洞窟が埋まらないように対策をとることは勿論だが、塩類晶出の問題を考えれば、さらに洪水時に水が入り込まないように工夫が必要である。むろん景観を考え合わせた上で洞窟群周辺の整備を行い、例外的な大洪水が起きても河川からの水が流れ込まないだけの堤防を作っておくことが望ましい。

このように、遺跡の保存を考える際には、日常的・定常的な現象から遺跡を守ることを考えるだけでなく、非日常的・突発的な出来事まで想定した上での対策をとることが必要であると考えられる。

6. ま と め

- (1) 194窟では、岩塩の晶出が壁画剥落の重要な要因の一つとなっている。これは、岩体中に蒸発岩として含まれる岩塩が、雨水に一旦溶解して壁面で再晶出しているものと思われる。この窟以外でも、地表面付近にあって雨の影響を受けやすい洞窟では、壁画保存のために雨水対策を行うことが重要である。
- (2) 53窟では石膏の晶出が問題となっているが、これは、硫酸イオンに富んだ河川水が洪水によって窟内に浸入した時、洞内の炭酸カルシウム分と反応して形成されたものと考えられる。従って、頻度が少ないような災害についても、今後十分な配慮を行いながら、壁画の保存を考えていくことが重要であろう。

終わりに、本共同研究の推進にご協力いただいた多くの方々に深く御礼申し上げます。

引用文献

- 1) 三浦定俊・西浦忠輝・李実・張 軍：敦煌莫高窟における気象観測(1), 保存科学, 29, 1-7, (1990)
- 2) 朽津信明・段修業：敦煌莫高窟の地質環境, 保存科学, 31, 79-86, (1992)
- 3) 三浦定俊・張 軍・王宝義：敦煌莫高窟における気象観測(2), 保存科学, 31, 87-94, (1992)
- 4) 段修業・郭宏・付文麗：莫高窟第3窟泡疹状病害的研究, 敦煌研究, 26, 103-111, (1991)
- 5) 関陽太郎・平野富雄・渡辺邦夫：福島県小高町薬師堂石仏群の劣化と水・岩石相互作用, 岩鉱, 82, 269-279, (1987)
- 6) 段修業：対敦煌莫高窟壁画製作材料的認識, 敦煌研究, 16, 41-59, (1988)

Salt Crystallization and Deterioration of Mural Paintings in the Dunhuang Mogao-grottoes, Gansu Province, China

Nobuaki KUCHITSU and DUAN Xiuye*

Salt crystallization is often observed in Dunhuang, which is located on edge of the Takla Makan Desert. It is also found in some caves of the Mogao-grottoes as one of the main causes of the Deterioration of mural paintings.

Caves of the Mogao-grottoes are divided into three groups based on their location (the higher, the middle, and the lower groups). Paintings in the middle caves are generally well preserved without any salt crystallization. By contrast, the upper part of the paintings in the upper caves and the lower part of the paintings in the lower caves are often damaged by salt crystallization. Halite (NaCl) observed in Grotto No.194 (belonging to the higher group) is considered to have recrystallized on the paintings due to the action of rain water. Hence, it is necessary to prevent the upper caves from attack of rain water. On the other hand, gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) identified in Grotto No.53 (belonging to the lower group) might have been produced by the reaction between flood water with abundant SO_4^{2-} and calcite (CaCO_3) included in the groundwork or the first coating of the painting. This observation indicates that it is necessary to care for not only usual environment but also for irregular disaster to preserve a historical site.

* Dunhuang Research Institute, P.R.C.