

敦煌莫高窟の地質環境

著者	朽津 信明, 段 修業
雑誌名	保存科学
号	31
ページ	79-86
発行年	1992-03-30
URL	http://id.nii.ac.jp/1440/00003475/



敦煌莫高窟の地質環境

朽津 信明・段 修 業*

1. はじめに

敦煌莫高窟は、496ある洞窟に描かれた膨大な量の壁画でよく知られている。この貴重な壁画を保存するために、日本側の東京国立文化財研究所と中国側の敦煌研究院との間で、1991年より合意書に基づく共同研究が行われている。筆者らは、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する機会を得たので、その結果をここに報告する。

敦煌周辺の地形的特色については保柳¹⁾がまとめているものの、地質についての記載は行われていない。また、莫高窟が彫られている地層についての研究は、潘玉閃・馬世長²⁾によっていくつかの洞窟においてマイクロには行われているものの、周辺地域まで含めたマクロな視野に立った莫高窟の地質環境についての研究は、これまでには全く行われていない。ここでは、莫高窟周辺の地質環境を記載し、莫高窟のおかれている環境について議論すると共に、洞窟内で起きている地質現象、特に塩類の晶出の問題³⁾が壁画の劣化にどう関与しているかについて述べていく。

2. 莫高窟周辺の地質

概要 敦煌は、中国甘粛省の北西部、タクラマカン砂漠の東の端に存在し、北緯40.1°、東経94.8°に位置する(図-1)。敦煌の南側には、前震旦系の複合岩体とされる敦煌群が分布し、標高1,600 m から 1,700 m に至る三危山や鳴沙山らの山々を形づくっている。これらの山々の北側には、河川による広大な扇状地が形成されている。扇状地堆積物には、大きく分けて新期と古期の二種類があると思われ、それらは地形からも明確に識別が可能である。莫高窟は、敦煌市街地の南東約25 km にあり、前を「大泉河」と呼ばれる河が流れている。この大泉河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40 m、南北約2 km にわたって彫られているのが莫高窟である(図-2)。

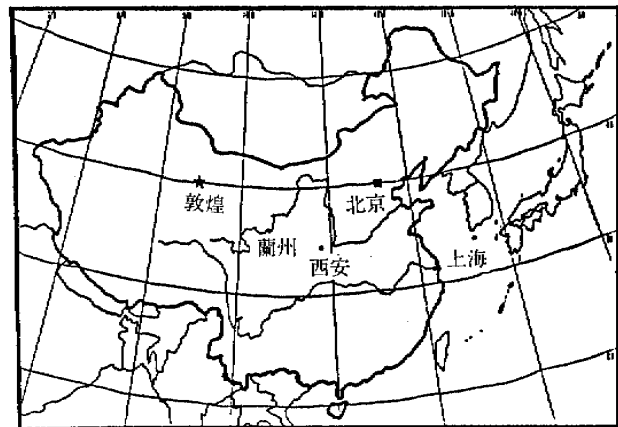
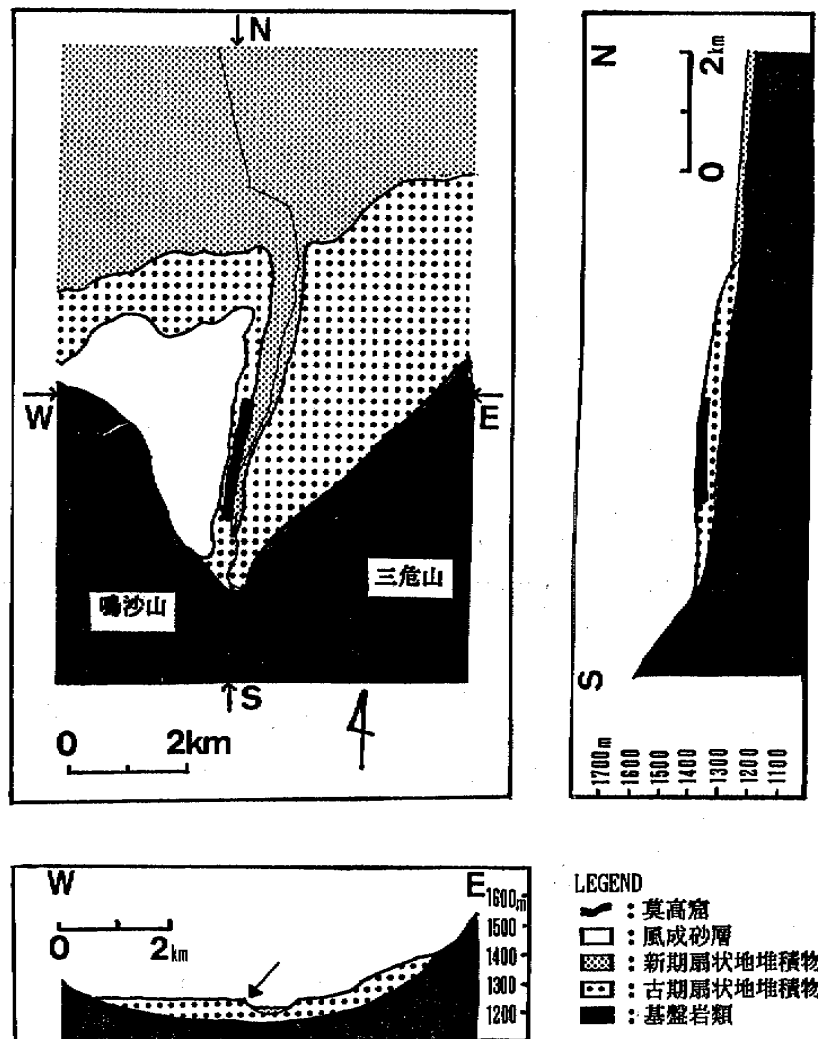


図-1 敦煌位置図

現在の敦煌は砂漠気候に属し、年平均気温は9.4°C、平均年間降水量は32.9 mm、年平均相対湿度は41%である³⁾。乾燥が激しく、大泉河でも水流が観察されることは稀である。

莫高窟周辺の地質図と断面図を図-2に示す。

* 敦煌研究院保護研究所



図一2 敦煌莫高窟周辺地質図及び東西・南北地質断面図

基盤岩類 甘肅省地質図⁴⁾で「敦煌群」と呼ばれている地層に相当すると思われる。同地質図によれば、敦煌群は前震旦系の複合岩類とされる。安西県東部から敦煌県の南部にかけて、北東一南西のトレンドを持って細長く分布する。莫高窟付近では、南側の三危山、鳴沙山らの山を構成して分布する。

岩体は、砂岩、泥岩、石灰岩、片岩、片麻岩、ホルンフェルス、大理石らによって主として構成され、花崗岩類の貫入も観察される。

古期扇状地堆積物 甘肅省地質図⁴⁾の「酒泉礫層」に相当すると思われ、同地質図によると第四紀の堆積物とされている。基盤岩類を不整合に覆いながらその起伏を埋めて、標高1,300 mから1,400 m程度に高位段丘面を構成して分布する、比較的固結度のよい礫層である。莫高窟の南約1.5 kmの大泉河沿いでは、この古期扇状地堆積物が基盤岩類を直接覆う不整合面が観察される。莫高窟は、この堆積物に彫られている。

この層は、成層する比較的固結度のよい厚さ10 cm程度の礫層から主になる。礫層は、一つの層の中では比較的淘汰度がよく、主として径3 cm程度の円礫を含む層と径0.5 cm程度の円礫を含む層との互層から成り、時折厚さ2 cm程度で淘汰度のよい砂層を挟有する。礫は、花崗岩、チャート、ホルンフェルス、大理石、砂岩、ペグマタイト等からなり、いずれもこの地

域の基盤岩類に起源を求めることができると思われる。

新期扇状地堆積物 甘肅省地質図⁴⁾では、「第四紀の礫、砂」と記載されているものに相当すると思われる。標高1,300 m から 1,100 m 程度までのなだらかな傾斜を持った低位段丘面を構成して分布する。この層は、未固結の砂礫層からなり、敦煌の町を中心とする広い地域に分布する。構成礫は古期扇状地堆積物とほぼ同様だが、こちらの方が一般に粒度が小さく、砂がちな印象を受ける。

風成砂層 甘肅省地質図⁴⁾では、「現代の堆積物」とされているものに相当すると思われる。莫高窟の上側の高位段丘面上にいわゆる砂漠を形成する。淘汰度がよく、主として石英、雲母、長石等の粒から構成される。

3. 塩類の晶出

3-1 洞窟外

砂漠地域に特有の地質現象の代表的なものとして、蒸発岩化作用が挙げられる。蒸発岩化作用とは、岩石と雨水などの水分との反応によって溶けだした成分が、水分の蒸発に伴って塩類として晶出する現象である。莫高窟周辺でも、塩類の晶出は至る所で観察される。例えば、大泉河の川原や用水路の側面などは、こうした塩類の晶出によって白色化している。また、莫高窟が彫られている古期扇状地堆積物中でも、堆積物の粒間を埋めて塩類が晶出している様子が特に堆積物上部でよく観察される。

敦煌研究院保護研究所前の大泉河川原にて、晶出した白色塩類を採集し試料とした(図-3)。

3-2 洞窟内

蒸発岩化作用による塩類の晶出は、莫高窟内部でも観察されることがある。塩類の晶出が岩体だけに留まらずに壁面まで及ぶと、壁画の顔料剥落の要因になるので注意が必要である⁹⁾。

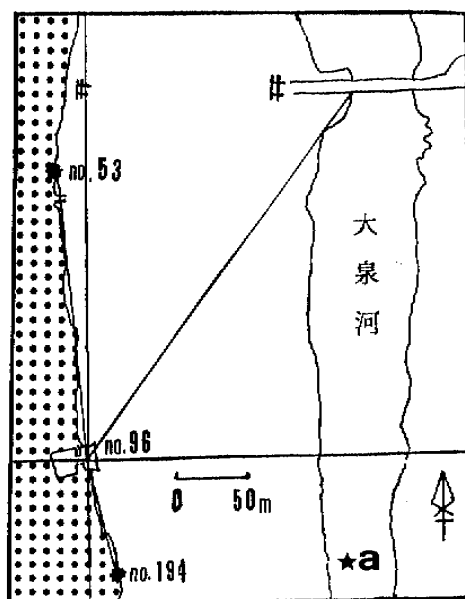


図-3 194窟及び53窟位置図
aは、大泉河川原における晶出塩類の採集地点。

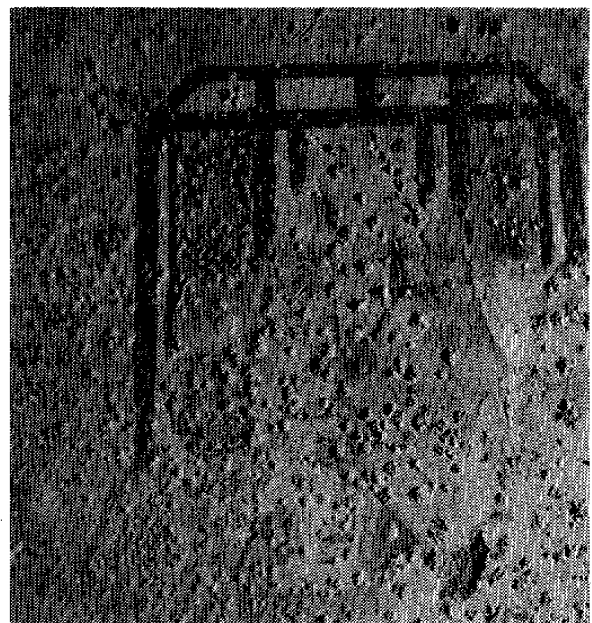


図-4 194窟奥室側壁上部における塩類の晶出
斑状に見苦しく壁画が剥落している。

実際、塩類の晶出に伴う壁面の劣化は、多くの洞窟で観察される。ここでは特に、日中共同研究の対象となっている⁵⁾ 194窟と53窟における塩類の晶出について述べる。

194窟 194窟は、北大仏殿（96窟）の南側77 mに位置し、その入口は、北大仏殿入口中央から+13.6 m、莫高窟前の大泉河に架かる橋の橋桁における水面から+20.9 mの高さにある（図-3）。194窟は、上中下と大きく3層に分けられる莫高窟の洞窟群のうちの上の層に存在する。

洞内に露出する岩体では、粒子と粒子の間を埋めるようにして白色の塩類が晶出しているのが観察される。この窟では、1950年代に修復が行われた際に天井付近に幅広くモルタルが塗られているが、そのモルタルの塗られていないオリジナルの壁面では、

奥室内の天井付近から南北両側側壁の上部にかけて、幅広い範囲に塩類の晶出が観察される。析出物は、直径5 mm程度の粒状で、塑土層と白土層との間に晶出して壁面を剝落させる要因となっている（図-4）。このため奥室側壁の壁面の上部は、斑状に見苦しく剝落している。

この窟では、露出する岩体の試料2点と壁面の析出物2点を採集した（図-5）。

53窟 53窟は北大仏殿の北側210 mに位置し、その入口は、北大仏殿入口中央から-6.8 mの高さに、大泉河橋桁における水面から+2.5 mの高さにある（図-3）。53窟は、3層ある莫高窟の洞窟群のうちの下層に存在する。

洞内に露出する岩体は、一般に多孔質で、塩類の晶出が観察される箇所は特に見あたらない。壁面に塩類の晶出が見られる部分は、主に南東側に集中している。南側側壁及び東側側壁には1950年代に行われたという補修に伴うモルタルが幅広く塗られているが、その下位では、最大径が2 cmにも及ぶ白色の結晶が粒状に随所で析出し、壁面を剝落させる要因となっている。析出物は、一般には塑土層の表面に晶出するが多いが、時に塑土層の内側に晶出する部分も観察される。

この窟では、露出する岩体の試料2点と壁面の析出物2点を採集した（図-5）。

4. 分析方法と結果

方法 採集された試料は、東京国立文化財研究所と敦煌研究院においてそれぞれ独立に、X線粉末回折法によって鉱物分析が行われた。X線粉末回折は、東京国立文化財研究所では日本電子 JDX-10 PA にて 30 kV、15 mA の条件下で、敦煌研究院では島津製作所 XD-3 A にて 30 kV、20 mA の条件下で、それぞれ CuK α 線を用いて測定された。

結果 東京国立文化財研究所と敦煌研究院では、ほぼ同様な分析結果が得られた。

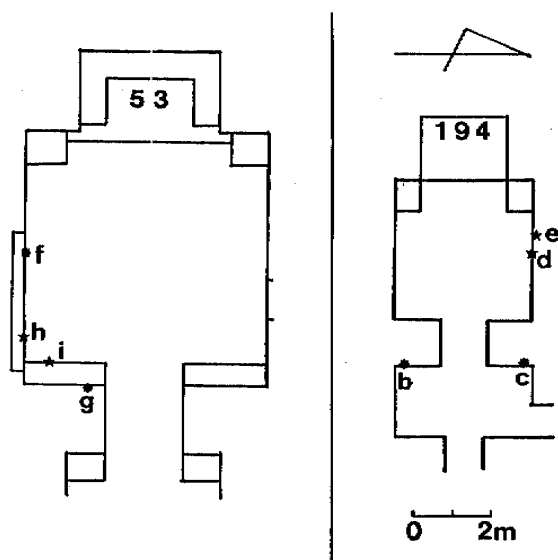


図-5 194窟及び53窟内における試料採集地点
b. 194窟岩体, c. 194窟岩体, d. 194窟
晶出塩類, e. 194窟晶出塩類, f. 53窟岩
体, g. 53窟岩体, h. 53窟晶出塩類（塑
土内部）, i. 53窟晶出塩類（塑土表面）

表一 X線粉末回折による分析結果

No.	説明	石英	方解石	斜長石	岩塩	カオリナイト	雲母類	ドロマイト	角閃石	輝石類	石膏
a	大泉河析出物	冊	+	冊	冊	±					
b	194窟岩体	冊	冊	冊	冊			+			
c	194窟岩体	冊	冊	冊	冊	+	±	冊			
d	194窟析出物	冊	冊	+	冊						
e	194窟析出物	冊	+	+	冊						
f	53窟岩体	冊	冊	冊		冊	+	冊	+		
g	53窟岩体	冊	冊	冊	*	+	+	冊	+	+	
h	53窟析出物										冊
i	53窟析出物	冊									冊

石英 (SiO_2), 方解石 (CaCO_3), 斜長石 ($(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_8$), 岩塩 (NaCl), カオリナイト ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), 雲母類 ($\text{K}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_{4-6}(\text{Fe}, \text{Al}, \text{Ti})_{0-2}[(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{20}](\text{OH}, \text{F})_4$), ドロマイト ($(\text{Mg}, \text{Ca})\text{CO}_3$), 角閃石 ($\text{NaCa}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_4\text{AlSi}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}(\text{OH})_2$), 輝石類 ($[\text{Ca}, (\text{Mg}, \text{Fe})]\text{SiO}_3$), 石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

(雲母類, 角閃類の化学組成は, 代表的なもの。実際にはもっと複雑な固溶体。)

量は, 冊>冊>冊>冊>冊>冊

*: 敦煌研究院では53窟岩体に岩塩も検出されたが, 東京国立文化財研究所では検出されなかった。

分析結果を表1にまとめて示す。大泉河に晶出していた塩類は, 岩塩 (NaCl) が主成分であった。次に194窟では, 岩体試料にも著しい量の岩塩が観察された。また壁面に晶出した塩類も, 194窟では岩塩が主成分であった。一方, 53窟岩体では, 敦煌研究院では岩塩が検出されたが, 東京国立文化財研究所では塩類は検出されず, 基盤岩類の造岩鉱物のみが観察された。また, 53窟壁面で見られた晶出塩類はいずれも岩塩ではなく, 純粋な石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) であった。

5. 考 察

以上から, 敦煌莫高窟のおかれている地質環境について議論する。莫高窟が彫られているのは, 固結度が比較的よいとは言え第四紀堆積物であり, 決して安定な岩体とは言い難い。また礫層で粒度も粗く, 一般論としては洞窟を彫るにはむしろ向いていない地盤であると言える。しかしながら, 敦煌周辺の地質を考えると, 基盤岩類は岩質が極めて不均質であるし, 新期扇状地堆積物は未固結なため, 洞窟を彫ることができるような地層は, この古期扇状地堆積物以外には存在しないのも事実である。実際, 莫高窟以外の敦煌周辺の著名な洞窟群 (例えば敦煌西千仏洞や, 安西榆林窟など) が彫られているのも, この古期扇状地堆積物相当層である。また地形的にも, 高低差のある急傾斜の崖が連続的に存在するのは, この古期扇状地堆積物を新しい河川が侵食した部分だけである (図-2)。こうしたことを考え合わせてみると, 地質学的には, 「莫高窟は, 敦煌市街地から近い範囲の中では洞窟群を彫るのに一番適した場所に作られた物である」と結論付けられる。しかし, 岩体がそれほど安定でなく, また上面で砂漠化が始まっている事実を考えると, 莫高窟の保存は決して容易なことではないであろう。

次に, 194窟と53窟の地質環境について議論する。まず, 194窟では岩塩の晶出が壁画剝落の大きな要因であった。これは, 洞窟外で観察される蒸発岩化作用と同様の現象が洞窟内でも進

行しているものだと考えられる。ただし194窟では、岩体自体に既に岩塩が含まれているため、直接的に雨水と岩体との相互作用によって蒸発岩化作用が起きているだけでなく、本来岩体に含まれていた岩塩が一旦雨水に溶かされて、壁面に再晶出している場合もあるものと思われる。いずれにしろ、年間降水量が僅かに 32.9 mm 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明らかになり、またその意味では、1950年代に行われたというモルタルの吹き付けが、かえって雨水を壁面に逃すこととなり、壁画の表面に塩類を晶出させる一因になっている点も指摘できよう。

一方の53窟では、岩塩ではなく純粋な石膏が晶出している。岩塩の晶出は、53窟岩体でも普遍的に見られるものではないようなので、あるいは蒸発岩化作用というのは、194窟などの上位の窟（すなわち雨水の影響の直接ある窟）にしか大規模には及ばないものかも知れない。それにしても石膏だけが晶出するという事実は、周辺の蒸発岩化作用から考えても特異であるため、地下水の影響と同時に、53窟だけの特殊な条件、例えばモルタルや下地などの人工的に付け加えられている要素の影響についても、今後は議論していく必要があるであろう。いずれにしろ、上位の窟と下位の窟とで晶出する塩類が違うという事実は、洞窟という環境下での蒸発岩の形成を考える上で重要な意味を持つものとして注目される。

6. ま と め

- (1) 地質学的に見て敦煌莫高窟は、「敦煌市街地から近い範囲の中では、洞窟群を彫るのに一番適した場所」に作られていると言える。
- (2) 194窟では岩塩の晶出が壁画剥落の重要な要因の一つだが、53窟ではむしろ石膏の晶出が問題となっている。
- (3) 特に53窟では、地下水の影響とともに、人工的に付け加えられた成分が壁画の劣化に関与している可能性についても考えていく必要があるだろう。

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。

参 考 文 献

- 1) 保柳睦美「敦煌を中心とする地域の自然環境」『敦煌の自然と現状』榎一雄編、大東出版社、1—64 (1980)
- 2) 潘玉閃・馬世長『莫高窟窟前殿堂遺址』26、文物出版社 (1985)
- 3) 三浦定俊・西浦忠輝・李夫・張拥軍「敦煌莫高窟における気象観測(1)」『保存科学』29、1—7(1990)
- 4) 中国科学研究院(編)『中華人民共和国地質図集』149、築地書館 (1980)
- 5) 東京国立文化財研究所『敦煌文化財の保存修復に関する調査研究 備忘録』289 (1991)

Geological Environment of the Dunhuang Mogao-Grottoes,
Gansu Province, China

Nobuaki KUCHITSU, and DUAN Xiuye*

A geological survey has been made in and around the Dunhuang Mogao-Grottoes, Gansu Province, China, as a link of the series of the conservation project of the great mural paintings in Dunhuang. Dunhuang is a famous oasis town on the Silk Road, situated on the eastern edge of the Takla Makan Desert. The southern part of Dunhuang Prefecture is composed of Mt. Sanwei and Mingsha, where Pre-Sinian complex rocks are distributed. There are two main fan deposits on the northern side of these mountains. The Mogao-Grottoes were dug on the cliff of the Older Fan Deposit of the River Daquanhe. We concluded that, as far as the geological environment is concerned, the Mogao-Grottoes are situated in the best position to dig grottoes in the vicinity of Dunhuang city area.

Salt-crystallization is often observed both inside and outside of the Mogao-Grottoes. Halite (NaCl), the main component mineral of the salts, is considered to be formed as a result of water-rock interaction and the following evaporation. The halite crystallization flakes off paint in some spots in the Grotto No. 194. On the contrary, gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) has been identified as the cause of the paint flaking off in the Grotto No. 53. It is unusual to observe only gypsum without halite in this area as evaporites; in addition to simple water-rock interaction, factors such as influence of artificial materials (e. g. plaster and mortar) should be considered.

* Dunhuang Research Institute, P. R. C.