



Title	敦煌莫高窟遺跡を構成する礫岩の凍結 : 融解実験
Author(s)	福田, 正己; FUKUDA, Masami; 張, 津生 他
Citation	低温科学. 物理篇, 47, 223-230
Issue Date	1989-03-10
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/18577">https://hdl.handle.net/2115/18577</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	47_p223-230.pdf



## 敦煌莫高窟遺跡を構成する礫岩の凍結—融解実験\*

福 田 正 己  
(低温科学研究所)

張 津 生  
(北海道大学中国政府派遣研究員 中国科学院蘭州水河凍土研究所)  
(昭和 63 年 10 月受理)

### I. はじめに

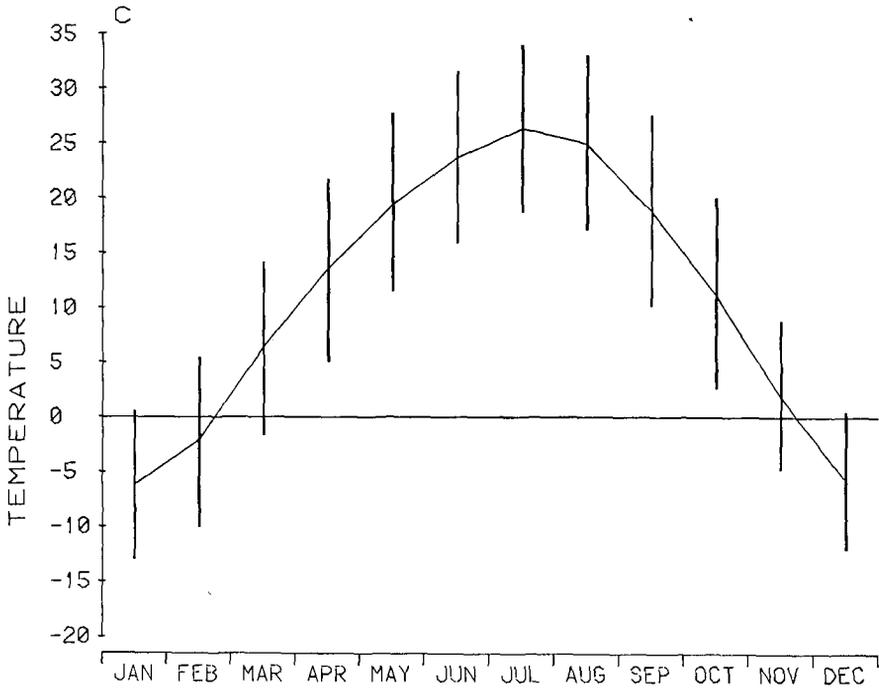
中国西北部の乾燥地域に位置する敦煌には、4 世紀から 14 世紀にわたる仏教壁画で世界的に著名な莫高窟遺跡がある。19 世紀末までは遺跡の存在は知られていなかったが、外国の遠征調査によってその膨大な仏典が発掘され、東洋史とくに仏教の伝来に関する貴重な歴史遺跡となった。近年は、外国人にも遺跡は公開されているが、厳しい環境条件と見学者の増加によって、遺跡の劣化・崩壊が懸念されてきた。今後恒久的な保存策を構ずるための基礎調査として、莫高窟を構成する基盤礫岩を現地にて採取し、これを用いた凍結融解実験を行った。

### II. 敦煌周辺の自然環境条件

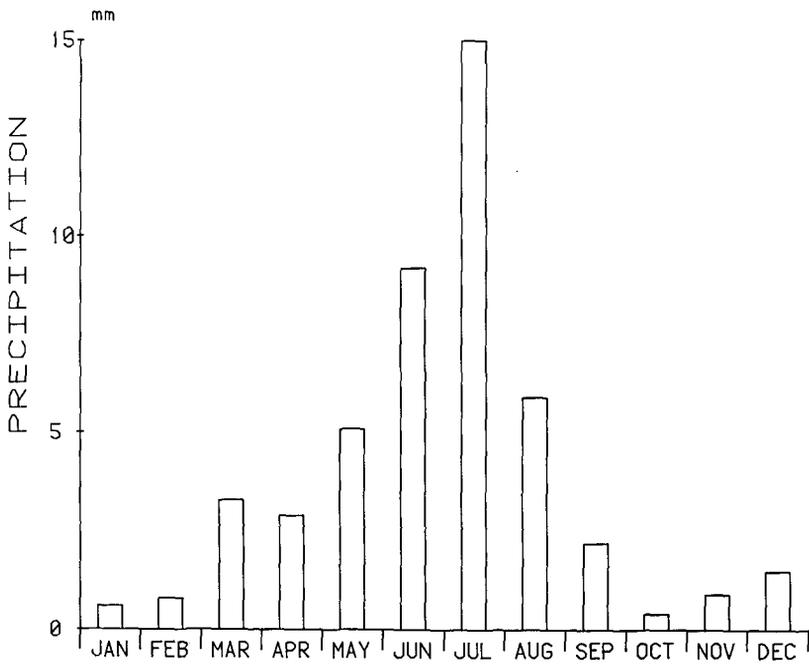
敦煌は北緯 40 度 8 分、東経 94 度 47 分に位置し高度は 1,100 m である。中国甘粛省の西縁でゴビ砂漠の東端である。気候区では砂漠気候に属する。南側には 5,000 m を超える初蓮山脈が走り、山稜部に発達する氷河からの融解水を水源とするオアシスに敦煌は立地している。

年間の気温変動を第 1 図に示す。月平均最高—最低気温で変動幅を示し、平均気温を結んで年間変動を表す。年平均気温は 11°C であるが、最寒月 (1 月) は -6.2°C となり、最暖月 (7 月) は +26.3°C である。月平均気温から凍結指数を算出すると、約 430°C・drys となる。この値を北海道内の都市と比べると、釧路の場合に近いが凍結期間はおよそ 1 ヶ月短い。大陸性気候と砂漠気候のため、夏は暑く年較差は 32.5°C にも達する。乾燥の度合は第 2 図の月別降水量からも推し量ることが出来る。年間降水量は約 50 mm に過ぎない。降雨期は 6, 7, 8 月であるが、砂漠気候の特徴的な降水パターンとして、1 回の降雨で年間降水量に達する程の強い雨量強度を呈する。以上の気温と降水量の変化からは、冬季には寒さが強いものの乾燥しており、基盤岩石の凍結—融解破壊の影響はさほど影響しないように思われる。しかし、時として冬の初めに 10 mm 程度の降水をみることがあり、この季節は曇天が続いて蒸発量も少なく抑えられる。このため基盤は長期間含水状態となることもある。この時期の日気温変動は大きいので、この状態での凍結—融解の繰り返しもかなりの頻度で生ずる。遺跡にとっては、ある例外

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第 3176 号



第1図 敦煌における気温の年間変動



第2図 敦煌における月別降水量と年間変動

的な年であっても、一旦凍結破損が生ずると、それが致命的な損傷にないかねない。したがって、凍結—融解の繰り返しと乾燥—湿潤の繰り返しで、基盤礫岩がどのような破壊を生ずるかを室内実験によって、事前評価する必要がある。

莫高窟は敦煌郊外を流れる大泉河沿いに形成された河成段丘にうがたれている。段丘の比高は50~60mであるが、厚く堆積した礫層の堆積時期は不明である。層理はあまり発達せず、また部分的に細粒の砂層を挟むことなどから、河の流量変化の大きい堆積条件が推定される。

構成礫はほとんどが円礫であり、礫種は砂岩—泥岩である。層内の礫の配列には規則性(インブリケーション)も見られる。礫のマトリックスは石灰質であり、水を含むと固結が緩んで、容易に剝離する。莫高窟はこの礫層をうがち抜いて造られた。窟内の礫層面に漆喰を塗り込めて壁面とし、この上に彩色して壁画が描かれている。

礫層が風化して劣化することで、洞窟上部が剝離したり、オーバーハングしており、また崖も侵食退している。第3図は莫高窟上部の風化の著しい部分を示している。その部分を拡大したのが第4図である。礫層のなかの砂質部分が選択的に剝離していることがわかる。風化し剝離した礫と砂は、強い風で容易にはぎ取られる。礫層の上を塗り込めた漆喰が剝離することもある(第5図)。



第3図 敦煌莫高窟の基盤礫層の風化侵食の様子(下部の崖部には剝落防止の壁が造られている)



第4図 莫高窟上部の段行礫層の侵食状況(砂質部が選択的に侵食剝離している)

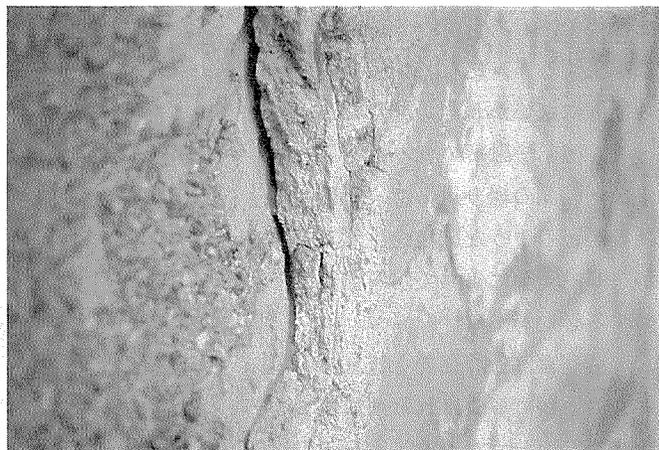
### III. 実験の内容と結果

#### 1. 岩石試料の処理

現地で採取した礫(約4kg)は、まず2分し、その半分については合成樹脂による処理を

施した。無処理の礫はさらに2分して凍結—融解，乾燥—湿潤の繰り返し実験を行った。実験の手順は次の通りである。

- ① 110°Cで24時間乾燥させる。乾燥重量 ( $W_d$ ) をはかる。
- ② 室温で真空脱気しながら，24時間水中に放置して，完全に水飽和させる。水中 ( $W_s$ ) と空中 ( $W_0$ ) 重量をはかる。



第5図 礫層の上に塗り込めた漆喰の剥離した状況

乾燥—湿潤実験では①と②を繰り返す。

- ③ 凍結—融解実験では  $-10^{\circ}\text{C}$  で凍結させた後，①以降を繰り返す。

すなわち，凍結—融解実験では乾燥—湿潤の繰り返しに，凍結の作用が重複することになる。いずれのサイクルでも，礫の塊から砂粒や細かい礫が剥離して落ちてくる。そこで各サイクル前後の乾燥重量の差から，剥離した分を算出し，サイクル毎にこれを加算して，累積重量損失率（初期乾燥重量との比）を求めた。

次に合成樹脂処理の手順について述べる。使用した合成樹脂はシリコン系のメチルトリエトキシラン (Methyle Triethoxy Silane) である。この樹脂による凍結破壊防止効果についてはすでに報告した<sup>1-3)</sup>。この樹脂は溶液状態での粘性が低くて浸透性がよく，常温で固化するなどの特徴がある。処理はまず樹脂をトルエン，メタノール混合溶剤に溶かして約35%溶液とする。この中に岩石試料を入れて約1分間浸漬した。また比較のために，従来から風化した岩石の強化処理剤として用いられてきた，珪酸カリウム  $\text{K}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$  ( $n=3.8$ ) による処理も行った。この20%水溶液に約2分間浸漬して処理した。処理ののち各々2分して，それぞれについて凍結—融解と乾燥—湿潤の繰り返し実験を行った。

## 2. 実験の結果

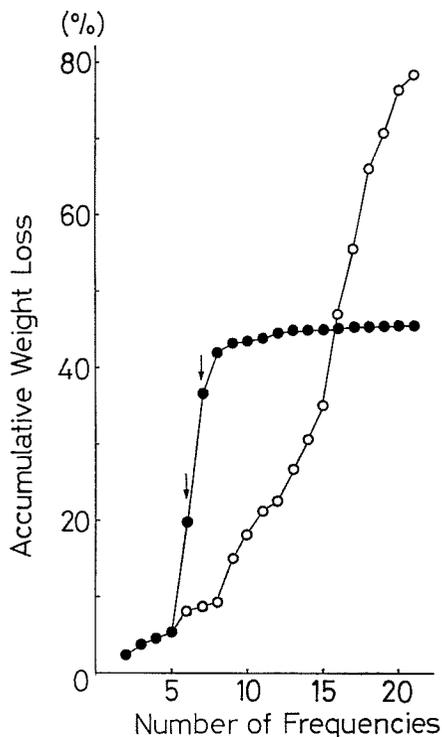
無処理の試料についての結果を第6図に示す。まず5サイクルまでは，両方の試料について乾燥—湿潤を繰り返した。5サイクル後，一方の試料は凍結—融解を繰り返させ，他方は乾燥—湿潤の繰り返しを継続させた。乾燥—湿潤の繰り返し過程で，図中矢印の部分(6, 7サイクル)では，乾燥ののち礫表面に緩んでいた細かい礫や砂を手で払い落とした。すなわち，乾燥—湿潤ののちに野外では強風で表面が吹き払われることに対応するような，外部からの衝撃を加えた効果を与えた。図で明らかに示されているように，このサイクルでの損失は大きくなっている。8サイクル以降では，再び乾燥—湿潤の繰り返しだけで衝撃は加えていない。この変化傾向線から，乾燥—湿潤の繰り返しでは直接に礫岩を破碎したり，表面から砂礫が剥離されたりしないが，一旦外部から衝撃が加えられると脆く崩れることがわかる。

凍結—融解の繰り返しでは，破壊損失の増加傾向は直線的になっている。すなわち，ほぼ

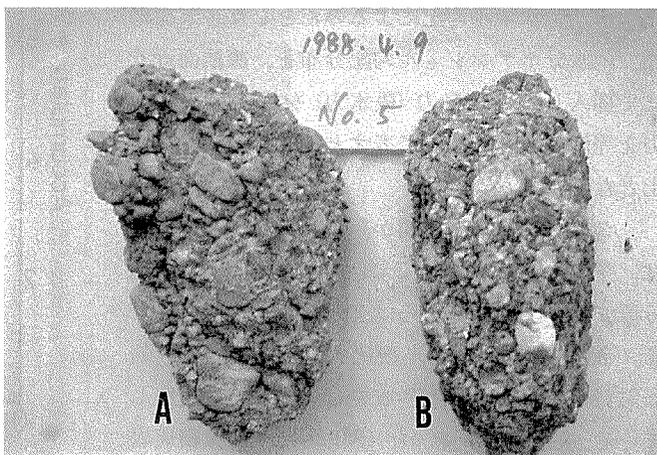
一定の破壊と剝離作用が働いていることになる。1サイクル毎の損失率は約7%である。第7図に実験過程の岩石試料の剝離状況を示す。A、Bの試料は乾燥—湿潤を5回繰り返した。第8図は16サイクル後で、Aは乾燥—湿潤を16回繰り返した。Bは5回の乾燥—湿潤のうち、凍結—融解を11回繰り返した場合である。Bの試料の周辺には、凍結で剝離した細粒や砂や礫が散乱している。第7図と第8図の比較からも、実験に用いた礫岩は凍結—融解による作用で容易に破損・剝落しやすいことがわかる。

樹脂で処理した礫岩試料を用いた実験結果を第9図に示す。シリコン系樹脂での処理した場合には、凍結—融解と乾燥—湿潤の繰り返しによって、ほとんど剝離による重量損失は生じていない。ところが、珪酸カリウムで処理した場合には、凍結—融解の繰り返しによって、顕著な剝離が生じている。1サイクルあたりの損失率は4%から8%にも達しており、第6図と比較すると、無処理の場合と変わらない。つまり、処理効果が発現していない。シリコン系樹脂で処理した場合には、ほとんど凍結—融解では剝離されないことがわかる。

以上をまとめると、莫高窟の基盤を構成する礫岩は、凍結—融解に繰り返しで容易に剝離されるが、乾燥—湿潤の繰り返しによっても幾分剝離される。乾—湿の繰り返しした上に外部からの衝撃が加えられると、礫岩から砂粒や細礫がより多く剝離される。その度合は、凍結—融解の繰り返しによるのと同程度である。礫岩をシリコン系樹脂と珪酸カリウムで処理した場合、シリコン系樹脂による試料は、凍結—融解と乾燥—



第6図 凍結—融解と乾燥—湿潤の繰り返しによる砂と礫の剝離損失 (樹脂処理しない礫岩)  
 ○ 凍結—融解の繰り返し  
 ● 乾燥—湿潤の繰り返し  
 ↓ 外部衝撃



第7図 乾燥—湿潤の繰り返し実験中の礫岩試料 (樹脂処理せず)  
 5サイクル後  
 A: この後も乾燥—湿潤を繰り返す  
 B: この後は凍結—融解を繰り返す

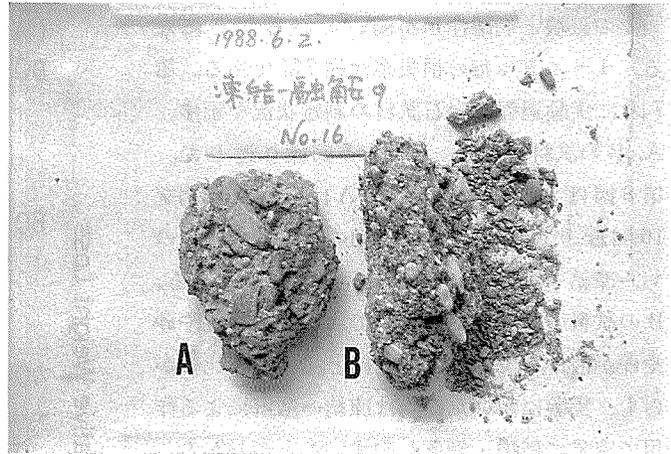
湿潤の繰り返しによっては、ほとんど剥離されなかった。珪酸カリウムによる処理では、凍結—融解の繰り返しによる剥離の防止効果は見られなかった。

#### IV. 考 察

##### 1. 凍結による礫岩の剥落

凍結—融解や乾燥—湿潤の繰り返しで、礫岩から砂や細礫が剥離する機構と、シリコン系樹脂による処理が剥離防止に有効となる理由について検討する。乾燥—湿潤の繰り返しで剥離が生ずるのは、礫岩に含まれる粘土鉱物の膨潤によるものであろう。その作用力は凍結による場合よりも小さい。そこで主な破壊に関わる外力は、凍結あるいは凍上によるとする。Fukuda (1983)<sup>4)</sup> は凝灰岩の凍結過程で、水が凍結面に向かって移動することを実験結果から示した。水分移動が引き起こされるのは、凍結面付近には凍土と同じように不凍水が存在し、温度勾配に沿った化学ポテンシャル勾配によるのだとした。末凍結側での水分ポテンシャル勾配分布を、凍結面近くまで挿入して、駆動力(吸水力)を推定し、その力を等価の負の水頭圧で表すと、1,000 cm H<sub>2</sub>O 以上となる。

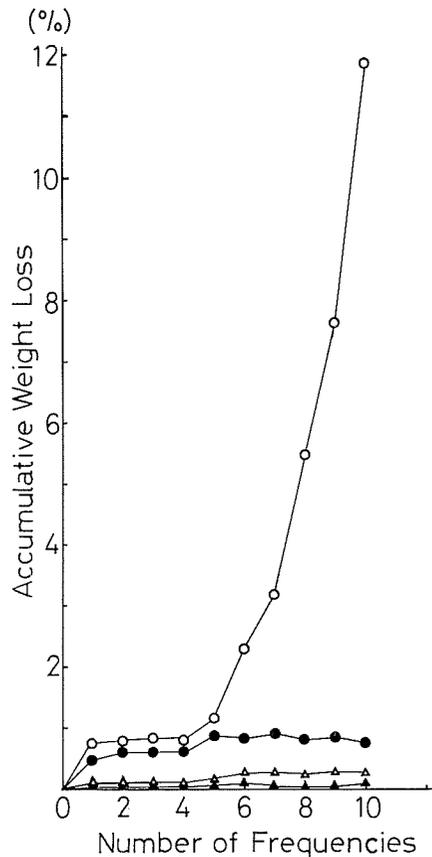
このように末凍結側から吸い寄せられた水は、空隙などを満たして氷となる。すなわち氷晶分離する。土の場合ならば、氷レンズが形成される。福田ら (1984) は、凝灰岩の凍結実験で、岩石試料中に氷レンズの形成されているのを観察している。Akagawa *et al.* (1988)<sup>5)</sup> はやはり凝灰岩中に氷レンズの成長を観察し、その規模が凍上した凍土にほぼ等しいことを指摘した。これらの実験事実から、岩石の凍結破壊は、土の凍上現象と同じ破壊機構によるものと考えた。岩石が破壊さ



第8図 実験中の礫岩試料からの剥離状態

A: 乾燥—湿潤を16回繰り返し

B: 凍結—融解を11回繰り返し



第9図 凍結—融解と乾燥—湿潤の繰り返しによる砂と礫の剥離損失

○印 珪酸カリウム処理 凍結—融解  
●印 珪酸カリウム処理 乾燥—湿潤  
△印 シリコン樹脂処理 凍結—融解  
▲印 シリコン樹脂処理 乾燥—湿潤

れるのは、水晶分離による作用力（凍上力）が、岩石の破壊強度を超えることで発生する。凍結した凝灰岩の引っ張り強度は、数 MPa である。従って、凝灰岩に作用した凍上力はこれよりも大きいであろう。Welder and Hallet (1985)<sup>6)</sup> は、岩石が凍土作用を受ける場合の、最大の凍上力を推定した。それによると、岩石内の割れ目が成長しつつある時に、岩石に働いている氷の圧力は 12 MPa にも達する。これは Akagawa らの実測値よりも大きい。今回実験に用いた礫岩の引っ張り強度は測定されていないが、劣化の程度から推定して数 100 kPa 程度であろう。また、礫岩の性質として、構成する礫と間を埋める膠着物質では後者の強度ははるかに小さいので、凍結によって細礫や砂粒は容易に剝離されるであろう。

## 2. シリコン系樹脂による剝落防止効果

第 9 図に示されているように、今回実験に用いた礫岩では、シリコン系樹脂を処理することで、凍結—融解の繰り返しで剝落することが防止された。この防止効果が何に起因するかを検討する。一般には、岩石の強度を増加させる（固化する）ことをねらって、劣化した石造遺跡に合成樹脂を用いて崩壊防止処理を施す。福田ら (1984) は、さまざまな種類の合成樹脂で処理した凝灰岩の引っ張り強度を測定して、この固化の度合を比較した。無処理の凝灰岩の引っ張り強度は 1.2 MPa であったが、アクリル系樹脂で処理すると、1.6 MPa 程度まで増加した。シリコン系樹脂では 1.4 MPa となり、さほどははっきりとした固化（強度増加）は認められなかった。

ところが、凍結—融解を 20 回繰り返したところ、シリコン系樹脂で処理した岩石試料以外は、かなりの部分が破砕された。さきに述べたように破壊に関わる凍上力は、これらの処理後の強度よりも大きい。シリコン系樹脂で処理した試料のみが破壊されなかったのは、その強度が十分に大きくなったからではない。他の樹脂による処理とシリコンによる処理で最も異なる性質変化は、岩石の吸水性である。III. 1. で記述した手順で得られる諸量から、岩石の吸水率 ( $n$ ) を次のように算出する。

$$n = (W_0 - W_a) / W_a \quad (1)$$

無処理の礫岩では  $n=0.09\sim 0.1$  であるが、シリコン系樹脂で処理すると、 $n=0.04\sim 0.05$  まで減少する。珪酸カリウムでは  $n=0.07$  であった。吸水率の低下は凍結過程での水分の移動を阻止することを示唆している。岩石の凍結実験で、乾燥状態と含水状態でも水分補給のない条件では、凍結破壊は発生しないことがすでに報告されている<sup>7)</sup>。

この実験事実から、シリコン系樹脂による凍結防止効果は、岩石内の水分透水性の低下あるいは吸水率の減少に起因することが明かになった。むしろ、実際に莫高窟の基盤礫岩にシリコン系樹脂を適用するには、最適の浸透量を決めることなどの実験的な裏づけが必要である。

## V. ま と め

敦煌莫高窟の遺跡を構成する礫岩の、凍結—融解の繰り返しによる剝落と劣化についての実験を行った。含水状態で、礫岩を凍結—融解と乾燥—湿潤を繰り返した。その結果、凍結—融解の繰り返しで、著しい細礫と砂粒の剝落が観察された。こうした破損を防止する目的で、礫岩にシリコン系樹脂を塗布する処理を施した。処理ののち、凍結—融解と乾燥—湿潤の繰り返し

返し実験を行ったが、剥落はほとんど生じなかった。比較のために、珪酸カリウムによる処理試料についても実験を行ったが、剥落防止効果は認められなかった。以上の基礎的実験結果に基づいて、今後さらに具体的な遺跡保存策を講ずる必要がある。

本研究、とくに現地での試料採取にあたっては、文化庁および中国文化部、敦煌研究院の協力を得た。また、樹脂処理については、東京国立文化財研究所保存科学部、西浦忠輝・三浦定俊主任研究官の協力を得た。あわせて感謝の意を表します。

## 文 献

- 1) 福田正己・三浦定俊・西浦忠輝 1982 石造遺跡の凍結—融解による破壊と樹脂による防止効果の実験。雪氷, **44**, 101-103.
- 2) 福田正己・三浦定俊・西浦忠輝 1983 石造遺跡の凍結—融解による破壊と樹脂による防止効果の実験(その2)。雪氷, **45**, 201-204.
- 3) 福田正己・三浦定俊・西浦忠輝 1984 石造遺跡の凍結破壊と樹脂による防止効果の実験。保存科学, **23**, 1-12.
- 4) Fukuda, M. 1983 The pore pressure profile in porous rocks during freezing. Proc. 4th Intern. Conference, on Permafrost, 322-327.
- 5) Akagawa, S., Goto, S. and Sito, A. 1988 Segregation freezing observed in welded tuff open system frost heave test. Proc. 5th Intern. Conference on Permafrost, 1030-1035.
- 6) Walder, J. and Hallet, B. 1985 A theoretical model of the fracture of rock during freezing. *Geol. Soc. of Amer. Bull.* **96**, 336-346.

## Summary

Subjected to a severe climate, historical remains of paintings and carvings on the wall in Dunhuang Cave located in northwestern China have sustained damage to the degree calling for urgent conservation. The damage includes the disintegration of the bedrock consisting of Quaternary fluvial sediments characterized as conglomerate. The freezing-thawing and wetting-drying cycles, which frequently occur under the present climatic conditions at the site, have caused granule and gravel to exfoliate out of the conglomerate bedrock. As a result, these ablations have inflicted severe harm on the paintings and carvings there.

For future conservation treatment, the present authors sampled conglomerate specimens out of the bedrock and experimented them under freezing-thawing and wetting-drying cycles in the laboratory. The freezing-thawing cycle under water-saturated conditions caused rock specimens to exfoliate as much as 7% of the weight at each cycle. Meanwhile, the wetting-drying cycle also resulted in the exfoliation, but the amount of ablation was smaller than that of the former. However, distinctive ablation took place when a rock specimen was impacted by hands under dry conditions.

To evaluate treatment for future conservation rock specimens were treated with two kinds of synthetic resins to be subjected to the freezing-thawing and wetting-drying cycles in the laboratory. As to the degree of exfoliation, one of rock specimens treated with silane resins was smaller than other specimens treated with other resins. For the protection of the specimens against frost after the treatment with silane resins it is likely that a hardening effect does not count for much, but the impeding effect of water migration through samples is more important as a cause of damage.