

〔報文〕 敦煌莫高窟第 53 窟の窟内環境 — 温湿度実測調査と気流解析 —

宇野 朋子・森井 順之・薛 平*・張国彬*・侯文芳*

1. はじめに

敦煌莫高窟第53窟では、東京文化財研究所による敦煌研究院との共同研究が1986年より継続されており、土壁内に塩類が存在するなど、壁画の劣化の要因の一つである塩類析出の問題について多くの調査がなされてきた¹⁾。2004年に実施された第53窟の壁画の保存修復の際には、修復に使用した材料が原因となり塩類が析出するという問題が生じていた²⁾。塩類の挙動は、特に壁近傍での相対湿度変動つまり窟内部の環境の影響を受け、また、窟内部の環境は、外気温湿度の変化や降雨などの屋外の環境変化に左右される。環境変化から生じる劣化を予防するためには、まず要因となる窟内部の環境変化を詳細に把握することが必要である。

本研究は、窟内部での温湿度の分布に注目し、窟内部の環境計測と数値流体解析を行い、季節ごとの窟内部の環境変化を理解することを目的としている。第53窟では、2003年から2005年にかけて実施された修復作業に伴い、修復作業中の環境変化を把握するために、2003年から窟内部の温湿度計測、壁含水率の計測などの調査が実施され、現在まで継続してデータが蓄積されてきている^{3,4)}。本報では、これらのうち窟内部の温湿度の実測結果をもとに、窟内部の年間の温湿度変動、修復作業時の環境変化について報告する。さらに、夏季、冬季における窟内部での空気の流れを把握するために実施した数値流体解析の結果を示す。

2. 調査対象地域と石窟の概要

敦煌莫高窟（北緯40.1° 東経94.8°）はタクラマカン砂漠の東端にあり、砂漠気候に属している。2004年の夏季7月の平均気温は、敦煌近隣（北緯40.2° 東経94.7°）で測定されているデータ⁵⁾によると、日平均値が25.8℃、日最高値は33.2℃、冬季1月は日平均値が-7.4℃、最低値は-14.5℃であった。降水量は非常に少なく、年積算値は35.8mmであった。相対湿度は年間の平均値が35%と非常に低い。

第53窟は莫高窟の崖の最下層に位置し、幅約6.5m、奥行き約6.5mの方形の洞窟で、天井最高部での高さは約6.3mである（図1）。石窟は入り口から甬道を通って3.6mほど奥まったところにある。北壁のやや東寄りの位置に2m四方の小さな側洞（第469窟）があり、西壁には高さ約1.3mの位置に幅2m、高さ3m、奥行き約2mの仏龕がある。入り口の扉はアルミ製で上下それぞれの端にスリットが入っている（図2）。

3. 環境調査の概要

2003年から2005年までの第53窟における環境調査は、敦煌研究院保護研究所の環境研究グループと共同で実施された。窟内部の11点（中央部：天井下10cm、床上300cm、150cm、10cm、床下30cm、北壁：中央下部、北東角、北西角、南西角、南東角：それぞれ床上150cm、第469窟）において空気温湿度の計測を行った。計測には、小型の温湿度計HOBO H08-032-08を使用し、床下の計測のみHOBO H08-003-02を使用した。

*敦煌研究院保護研究所

4. 窟内部の温湿度の測定結果と考察

4-1. 窟内部の温度変動

図3に2004年1年間の第53窟の空気温度、相対湿度、絶対湿度の変動を、外気の温度および相対湿度の値と共に示す。窟中央の床上10cm、床上150cm、天井下10cmの1時間ごとの瞬時値および外気の日平均値である。

窟内部の温度は、3月から9月にかけては外気よりも低く、10月から2月にかけては外気よりも高い。温度の年変動は、外気は6・7月に高く、12・1月に低いのに対して、窟中央（床上150cm）では、7・8月が高く1・2月が低い傾向にあり、外気よりも1ヶ月程度の遅れが生じている。窟内部の環境が外気の影響を受けにくいこと、かつ、周囲が熱容量の大きな厚い崖壁であるために、窟内部の温度変動が緩和され、季節的な遅れが生じたと考えられる。

窟内部の上下方向の温度は、一年を通して、床付近で低く天井付近ほど高い分布が形成されていた。1日の変化では、4月から9月は上部（天井下10cm）での変動幅が大きく、下部（床上10cm）で小さい。逆に、11月から2月にかけては、上部での変動がほとんどなく、下部で大きい。このような温度変動は、外気温度の平均値と関連しているとみられる。つまり、上部での温度の日変動が大きい4月から9月は、外気温度の日平均値が窟内部（床上150cm）の温度よりも高く、下部での変動が大きい11月から2月には、外気温度の日平均値が窟内部（床上150cm）の温度よりも低い時期である。3月や9月のように、窟内部の温度の平均値が、外気温度の平均値と同程度の時期には、上部、下部ともに変動している。この時期は、日中に上部（天井下10cm）で変動が生じ、夜間には下部（床上10cm）で生じている。

図4と5に、7月（夏季）と12月（冬季）の石窟中央で計測した上下方向の温湿度の結果を示す。夏季（図3）は、上部（天井下10cm）の温度が20℃から22.5℃の間で変動し、日変動幅が約2.5℃であるのに対して、床上300cmでの変動幅は0.8℃、床上10cmでは0.4℃と、下部ほど温度が低くまた変動が小さい。この期間の外気温度は最高で34.6℃（2004年7月30日の最高気温）を記録しており⁹⁾、窟内部よりも10℃以上高い値であった。

冬季（図5）は逆に、床上10cmで4.6℃から6.6℃と変動し、日変動幅が2℃であるのに対して、床上150cmでは1.2℃、床上300cmでは0.8℃、天井下10cmでは0.3℃と、上部ほど変動幅が小さい。

水平方向では、入り口に近い東側が西側より、夏季では0.5℃程度高い傾向にあり、冬季ではほぼ同程度の温度であった。

窟内部での温度変化の要因としては、内外の温度差によって生じる外気の流入（自然換気）

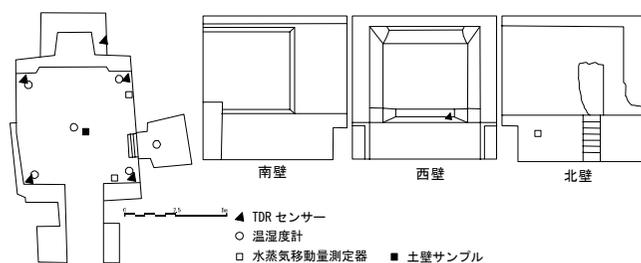


図1 第53窟の平面および立面図



図2 窟入り口のアルミ製扉

が考えられる。たとえば、敦煌の夏季の外気温度は35℃程度まで上昇し、窟内部（20℃前後）とは10℃以上の温度差ができる。このときの窟内外の温度差によって自然換気が生じ、扉の上スリットから高温の外気が流入し、また下スリットから低温の空気が流出する状況であると考えられる。窟の床面は扉の下スリットより低い位置にあるため、窟内部の下部では高温の外気の影響を受けにくく、温度変動が小さいと考えられる。また、夜間から早朝にかけては、窟内外の温度差が小さくなり、換気量が減少することによって、温度変動が小さくなると考えられる。

一方、冬季は、外気が窟内部よりも低温となるため、下スリットから冷気が流入し上スリットから暖気が流出する流れとなり、その流入した冷気は通路床面を流れ、石窟の下部に溜まる。

石窟は厚い岩盤に穿たれているために、窟壁内部の温度は、夏季も冬季も恒温となっていることが考えられる。そのため、いったん上昇（低下）した空気も、夏季は夜間（冬季は日中）に内外の温度の差が小さくなり、自然換気による換気量が減るため、石窟壁の内部の温度にまで低下（上昇）すると考えられる。

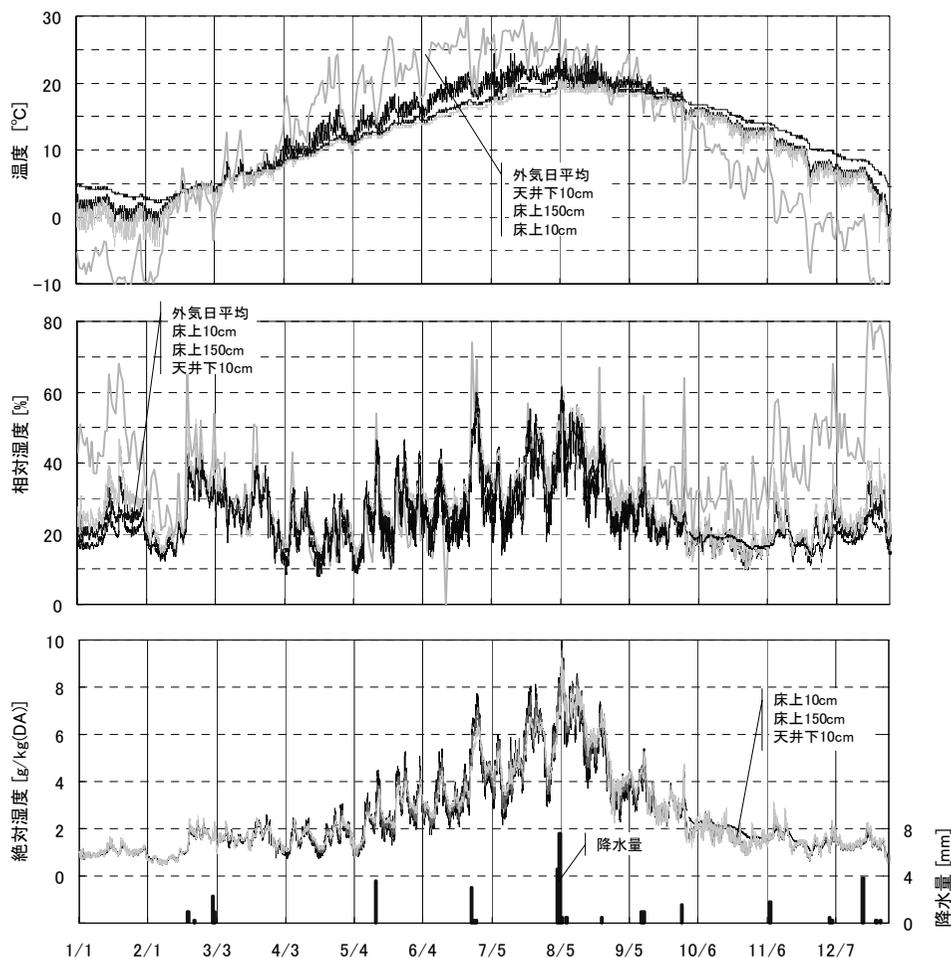


図3 中央上下方向の温度および相対湿度と外気温湿度の日平均値（2004年）

4-2. 窟内部の相対湿度と絶対湿度変動

相対湿度は、外気の相対湿度の変動に合わせて変化している。図3に外気の降水量（日積算値）を合わせて示す。

敦煌の平均の年間降水量はわずか30mm程度であり⁹⁾、年間いずれの季節にも観測されている。1回の降水は数ミリ程度で、1日もしくは3日程度連続することがある。外気温度が低く相対湿度が比較的高い冬季を除くと、外気の相対湿度の上昇は、降水が観測される日に記録されていた。この時期、相対湿度は、降水のない場合は20%から30%程度であるが、降水があると50%から60%程度まで上昇し、降水のない翌日から数日後には、20%から30%の値に戻っている。このことから敦煌では、降水時に一時的に相対湿度が高くなるのが特徴といえる。

窟内部の相対湿度は、一年を通してみると、外気の相対湿度の変動と同じように変化しており、外気湿度が高い日に窟内部の湿度も高い傾向にある。絶対湿度も同様である（図3）。夏季では、窟内部の絶対湿度は、外気の相対湿度の高い日に上部（天井下10cm）の絶対湿度が上昇し、温度変動が小さい下部（床上10cm）では変化が小さい。冬季は、外気の相対湿度の変動は大きい、窟内部での絶対湿度の変動はほとんどない（図5参照）。外気と窟内部の絶対湿度が共に非常に低いために、結果的に窟内外での絶対湿度差が小さいことが要因といえる。また、温度の変動がほとんどない上部（天井下10cm）では、湿度の変動は、他の測定点に比べて緩やかであり、温度の変動が小さいことに加えて、周囲壁での吸放湿の影響が認められる。

4-3. 修復作業時の窟内部の温湿度

第53窟では、2004年、2005年夏季において、北壁の壁画の修復作業が実施された。図6に2004年8月12日から15日の窟内部の水平方向の空気温度および絶対湿度の変化を示す。修復作業時には、10名前後の作業員が作業をしており、数台の白熱灯照明器具が使用されていた。

窟内部では、作業を実施していたと思われる9:00から11:00ごろと13:00から15:00ごろの間に、2℃から3℃の温度の上昇と1.5g/kg(DA)程度の絶対湿度の上昇がみられる。修復作業を行っていない平常時は入り口に近い東側が西側よりも0.5℃から1.0℃程度高い。修復作業時は、作業が行われていた北側の温度上昇が大きく、南東での温度上昇が小さい結果となっていた。測定箇所ごとの絶対湿度の差は小さい。

作業中に上昇した温度と絶対湿度は、作業終了後から約6時間から半日程度かけて作業前の値近くまで低下している。このように、修復活動による環境変化は外気によって引き起こされる変化に比べて大きいといえる。特に相対湿度は、作業によっては60%程度まで上昇することもあった（図3参照）。温度上昇による急激な乾燥や、作業による湿度の上昇は塩類の析出のような問題の原因となりうるので、作業人数や時間に注意が必要といえよう。

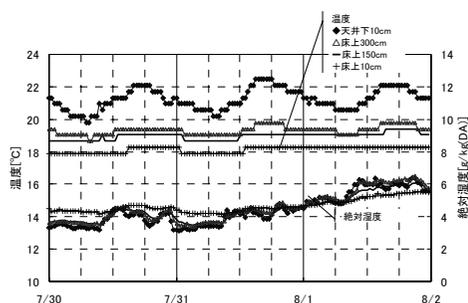


図4 中央鉛直方向の温度および絶対湿度（夏季）（2004年7月30日～8月1日）

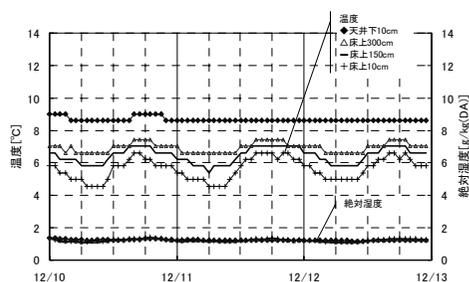


図5 中央鉛直方向の温度および絶対湿度（冬季）（2004年12月10～12日）

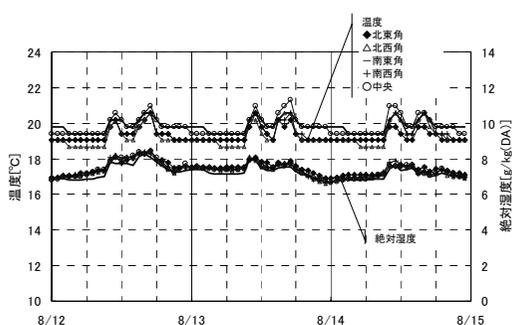


図6 水平方向の温度および絶対湿度
(北壁修復期間中・夏季2004年8月12～15日)

5. 流体解析による窟内部の温度変動の検討

5-1. 解析条件

窟内部での温度の分布の季節変動を把握するために、数値流体解析ソフトSTREAMを用いて、窟内部の空気の流れの解析を行った。

解析対象領域を窟内部とし、石窟は6.5m四方、高さ6.3mと簡略化して扱った。開口部にアルミ製の扉を設定した。扉の上下のスリットはそれぞれでひとつの開口（スリットの間隔をもとに開口率40%と設定）とした。境界条件として、扉の外側に外気温度を設定し、空気の流出流入の条件と与えた。窟内部の壁面には、第1種境界条件（温度指定）を用い、石窟中央の測定結果から日平均値をもとに設定した。夏季の日中の環境解析では、初期値として、7月30日12:00の温度の測定値を、外気は同日の最高気温である34.6°Cを用いた。窟内部の壁面表面には同日の平均気温を与え、それ以外の壁面は断熱とした。冬季の解析では、初期値として12月10日12:00の温度の測定値を、外気は同日の最高気温5.5°Cを設定した。

5-2. 解析結果

夏季の窟の中央部での温度分布と風速分布を図7に、冬季の結果を図8に示す。夏季の上部と下部の温度はそれぞれ約22°C、約19°Cとなっており、夏季の実測の傾向を再現できており、同様に冬季の上下分布についてもほぼ再現できているといえる。

夏季の窟内部には、上スリットから高温の外気が窟内部に流入していることが確認された。外気は、上部へ流れ込み、窟の上部から下部へ温度成層ができていく。また、風速分布の結果

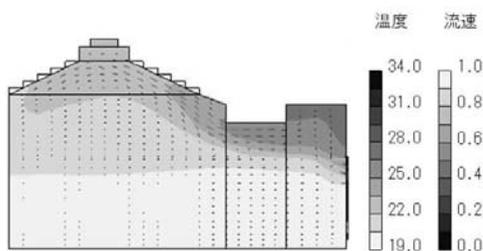


図7 夏季の温度分布と風速分布

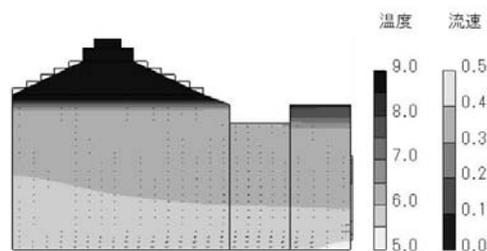


図8 冬季の温度分布と風速分布

では、入り口の上スリット部分で0.6m/s程度の風速が、また、天井の東側で0.4m/s程度の微風があることが観察された。冬季は、下スリットから冷気が入り、石窟の下部に溜まることが明らかとなった。入り口の下部では、風速0.2~0.3m/sの流れが生じている。

第53窟では、夏季と冬季で空気の流れが逆となり、夏季には上部で冬季には下部で、わずかな気流が生じていることが確認された。このような状態は同様の扉を使用しているほかの石窟でも生じていると考えられる。

6. まとめ

窟内部の複数箇所、長期間の温湿度計測を行い、外気の流入や窟内部での修復活動によって生じる環境変化について検討した。また、数値流体解析を実施し、詳細に窟内部の気流性状を把握した。窟内部での季節的な温度変動について明らかにし、扉に設けられたスリットを通じた自然換気により、窟内部の環境が影響を受けていることを明らかにした。

実測に加えて、このような数値流体解析を実施することにより、現状把握のみならず、保存対策を行った際の変化を予測や過去の状態を予想することが可能となる。ただし、定量的な判断をするためには、現在は測定できていない風速や表面温度などの計測を行い、解析結果と比較検討し解析結果の精度を向上させることが今後の課題である。

現在の石窟外観と入り口の扉とは、近年になって設けられたもので、第53窟は長い年月にわたり、現在とは異なる厳しい自然環境のもとにさらされていたと考えられる。今後は、石窟が整備される以前の環境を解析によって明らかにし、壁画の劣化との関連を調べ保存対策に活用したい。また確認されている塩類の種類や性質を踏まえて、作業人数や時間によって変化する窟内環境について0数値解析を用いて予測し、具体的かつ適切な修理計画の提案につなげたい。

参考文献

- 1) 谷口陽子, 森井順之, 陳港泉, 蘇伯民: 敦煌莫高窟53窟仏龕周辺における土壁中の可溶性塩類について, 保存科学44, 127-134 (2005)
- 2) 田畔徳一, 犬竹和: 敦煌莫高窟53窟壁画の保存修復に関する現地調査報告, 1-6, 敦煌壁画保存修復事業に関する日中共同研究報告書 (2003~2003年度), 東京文化財研究所 (2003)
- 3) 独立行政法人文化財研究所東京文化財研究所: 敦煌莫高窟壁画保存修復に関する日中共同研究2005 (2006)
- 4) 宇野朋子, 森井順之, 薛平, 張国彬, 侯文芳: 莫高窟代53窟の石窟内環境調査, 敦煌壁画の保存に関する日中共同研究2006, 52-67 (2007)
- 5) World Weather-Local Weather Forecast; <http://www.tutiempo.net/en/Climate/asia.htm> (2007年4月)
- 6) 高橋英紀, 岡田創造, 三浦定俊, 張拥軍, 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33, 27-34 (1994)

キーワード: 窟内部環境調査 (Investigation of thermal environment inside caves) ; 温度分布 (temperature distribution) ; 気流解析 (fluid analysis)

Environmental Investigation of Cave 53, Mogao Grottoes - Environmental Monitoring and Fluid Analysis -

Tomoko UNO, Masayuki MORII,
XUE Ping*, ZHANG Guobing* and ZHAO Linyi*

Environmental investigation at Cave 53, Mogao Grottoes, has been conducted from 2004. Air temperature and relative humidity at several points in the cave were measured from 2003 to 2006. Based on measurement results, the distribution of the temperature and humidity through the year and the change of the environment during conservation work were analyzed. Moreover, fluid analysis was conducted to understand the air movement inside the cave both in summer and in winter.

The vertical distribution of temperature at the center of the cave was observed both in summer and in winter. The temperature change at the upper side was large and that at the lower side was little in summer, while that at the upper side was little and that at the lower side was large in winter. From this result, it is assumed that the outside air enters into the cave through the upper slit on the entrance door and goes out through the lower slit in summer. And this phenomenon was clarified by fluid analysis.

The increase of 2 - 3 deg.C of temperature and that of 1.5 g/kg(DA) of humidity ratio were observed during conservation work. After conservation work, it took 6 - 12 hours until the temperature and humidity ratio returned to the value before conservation work. The environmental change caused by conservation work was larger than that caused by natural ventilation. Since the relative humidity increased over 60% during conservation work, the number of workers and the duration of the work should be considered.

*Dunhuang Academy, Gansu Province, China

