

敦煌莫高窟の気象(2)

—1989年から1991年まで—

三浦 定俊・西浦 忠輝・張 拥 軍・王 宝 義

1. はじめに

中国の文化財保護に関する日中国際研究協力事業として莫高窟壁画保存のために、壁画の劣化状態、地質、地形、気象環境等に関する共同研究が1986年に開始され、1991年暮れには敦煌研究院と東京国立文化財研究所の間で、5カ年間にわたる共同研究のための合意書が調印された。著者らはその共同研究の環境研究班のメンバーとして調査研究を行ない、1990年に日中両国で予備的な発表を行なった¹⁾²⁾。本論では、1989年1月から1991年10月までの約3年間の気象の調査結果について報告する。なお今回の報告についても、内容の一部は中国側の研究者を主体として敦煌研究院から報告された³⁾。

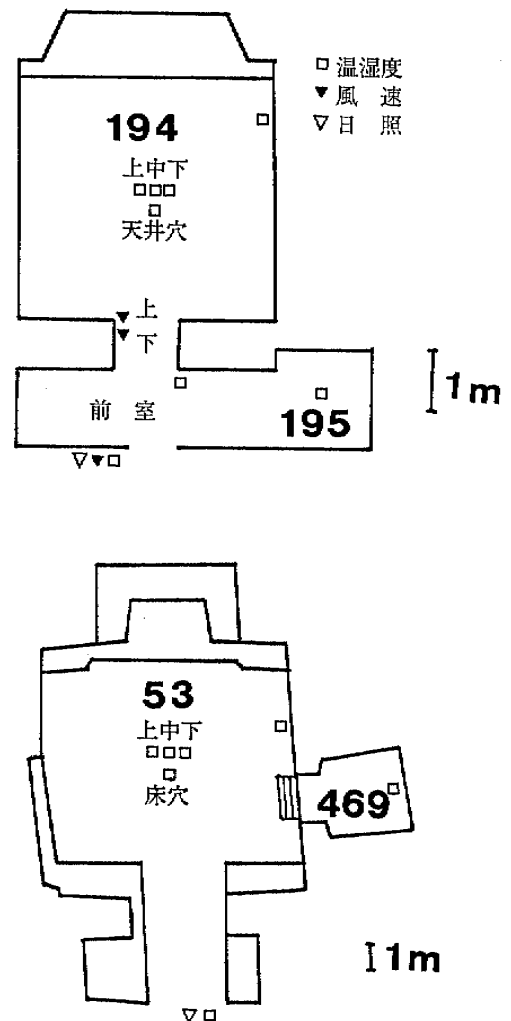
2. 測定箇所と測定方法

2.1 測定箇所

測定は、莫高窟全体では南よりの最上部（三層目）に位置する194窟と、北より最下部（一層目）の53窟で行なった。194窟の大きさは奥の部屋で概ね3.6m四方、高さ約3.3mで莫高窟としては小さな方で、入口右手にはさらに小さな側洞（195窟）を持っている。これに対して53窟は比較的大きな窟で、縦、横、高さ（天井の一番高い部分）とも約6.5m、やはり北側に小さな側洞（469窟）を持っている。469窟については開封前の窟内環境を推定するために、入口をポリエチレンシートと毛布で封じて測定を行なった。

測定は当初、194窟では窟奥、前室、入口扉上（外気）及び195窟と4箇所で温湿度を測定した。53窟では窟奥、入口扉上（外気）及び469窟の3箇所で温湿度の測定を行なった。この他、両方の窟の入口扉上で日照強度を測定し、194窟では窟内外の風速も測定した。

その後、窟内の温湿度の分布を調べるために、それぞれの窟の中央部で天井、中央、床面の3箇所、北側の壁面でも1箇所と測定位置を変更し、測定点数も増やした。さらに1991年5月からは、194窟の天井と53窟の床に穴を開け温湿度計を封



図一1 測定器配置図

入して、地中の温湿度の測定も行っている。

2.2 測定方法

温度の測定には白金測温抵抗体 (Pt 100 Ω)、相対湿度の測定には高分子薄膜型湿度計、窟外風速の測定には風車型自記風速計、窟内風速の測定には熱線式微風速計、日射量の測定には電気式直達日照計 (MS-100, 英弘精機) を用いた。

測定間隔は、1989年から1991年5月までは2時間 (12回/日)、1991年5月からは1時間 (24回/日) である。

測定値はデータマーク (LT 2001型, 1991年5月からは LS-3000 PtV 型, 白山工業) に記録した。測定値の読みだしは、ほぼ半年毎に携帯型コンピュータ (PC 9801 note, NEC) で行ない、現場でフロッピディスクに記録して持ち帰り解析した。



写真-1 194窟内でのデータ回収作業

3. 結 果

測定値は1日ごとにまとめて、平均値・最高値・最低値を計算し、さらにその値から月平均値と年平均値を算出した。194窟では日射の影響で日中の外気温度が実際よりも高く測定されるので、直射日光の当たらない53窟の入口扉上で測定した空気の温湿度を、外気の温湿度として用いた。3年間の測定結果を次ページの表1に示す。

毎年の記録には大きな違いがないので、1990年の記録を図化したものを図2から図7に示す。

4. 考 察

4.1 温 度

測定結果をみると、窟内の気温は奥に行くほど外気温に比べて、年変化の幅が小さい (図2, 図4)。表1には示さないが、日変化についても外気の年平均日較差が約 8°C であるのに対して、194窟前室で約 2°C 、194窟、195窟、53窟いずれも約 1°C と小さくなり、特に入口を封じた469窟では気温の日変化はほとんどなくきわめて安定している。

194窟内の日較差の季節による変化を調べると、秋から冬にかけては窟上部の月平均日較差は 1°C 以下なのに (図6)、窟下部では約 2.5°C と大きくなる (図7)。湿度の月平均日較差も窟上部では3%程度なのに、窟下部では6%前後と大きい。同じ傾向は、温度に関して53窟でも見られる。194窟の床面近くで測定した風速を調べると、秋から冬にかけての風速が春から夏にかけての風速より大きい。これらのことから、秋から冬にかけては冷たい外気が、床面を通過して窟の中に入ってきていると考えられる。

外気温が内部より高くなる春から秋にかけては逆の現象がみられ (図6, 図7)、暖かい外気が窟の天井を伝って窟内に入ってきて、窟上部の気温に影響を与えていると考えられる。

これらの測定結果を考慮すると、窟内には気温の変動にもなう緩やかな空気の流れが季節を通じて存在して、壁面からの水分蒸発を促進し、後に述べるような塩類風化を引き起こす一因になっているのではないかと思われる。

表一 1989年から1991年にかけての温湿度測定結果

1989年 月	外気		194窟		前室		195窟		53窟		469窟	
	温度(°C)	湿度(%)	温度(°C)	湿度(%)	温度(°C)	湿度(%)	温度(°C)	湿度(%)	温度(°C)	湿度(%)	温度(°C)	湿度(%)
1	-4.2	41	3.4	19	1.1	24	0.5	25	1.6	26	8.6	16
2	-0.2	24	3.6	12	1.8	18	1.6	18	2.8	19	8.6	16
3	6.6	19	6.2	15	5.9	18	5.6	18	5.9	20	6.7	18
4	13.8	21	10.7	22	12.3	22	11.3	22	10.2	26	8.9	23
5	21.4	16	15.7	19	19.2	18	17.7	17	14.1	24	11.8	27
6	23.5	28	19.3	32	22.5	29	21.4	29	16.9	38	14.9	40
7	25.3	33	21.9	38	25.2	33	24.1	34	18.8	46	17.1	50
8	25.0	26	23.2	26	25.6	25	25.2	24	19.7	33	18.4	38
9	20.6	27	22.1	24	22.8	25	23.2	23	18.8	31	18.9	38
10	15.0	29	19.2	18	19.4	21	19.8	18	16.1	24	17.8	27
11	4.0	25	12.3	12	10.5	18	10.0	15	9.2	19	14.9	15
12	0.9	36	8.4	18	6.8	23	6.0	22	6.0	24	11.6	16
年平均	12.6	27	13.8	21	14.3	23	13.8	22	11.7	28	13.0	27

1990年 月	外気		194窟		前室		195窟		53窟		469窟	
	温度(°C)	湿度(%)	温度(°C)	湿度(%)	温度(°C)	湿度(%)	温度(°C)	湿度(%)	温度(°C)	湿度(%)	温度(°C)	湿度(%)
1	-2.0	39	5.0	20	3.2	26	2.5	26	3.0	27	8.7	18
2	0.9	28	5.0	17	3.5	23	3.2	21	3.9	23	7.4	18
3	8.4	27	7.6	23	7.4	27	7.2	25	7.3	26	7.6	21
4	13.6	20	10.8	22	12.1	23	11.7	22	10.3	25	9.3	28
5	20.3	21	15.4	24	18.4	24	17.3	23	15.0	29	12.1	32
6	24.8	23	19.6	27	23.1	25	21.9	24	17.2	33	15.1	37
7	25.3	33	22.3	36	25.3	32	24.6	32	19.2	43	17.6	46
8	25.1	25	23.4	27	25.8	26	25.4	24	19.9	34	18.8	38
9	21.5	22	22.7	20	23.9	21	24.1	17	19.2	26	19.1	32
10	14.1	23	19.3	15	18.9	19	18.9	14	15.9	20	18.0	23
11	5.9	34	13.8	19	12.6	22	12.0	21	10.6	25	15.3	19
12	-1.7	36	7.2	16	5.5	22	4.5	21	4.5	25	11.2	16
年平均	13.0	28	14.3	22	15.0	24	14.4	23	12.1	28	13.4	27

1991年 月	外気		194窟		前室		195窟		53窟		天井六		床六	
	温度(°C)	湿度(%)	温度(°C)	湿度(%)	温度(°C)	湿度(%)	温度(°C)	湿度(%)	温度(°C)	湿度(%)	温度(°C)	湿度(%)	温度(°C)	湿度(%)
1	-1.8	32	4.9	16	2.8	22	2.3	21	3.2	23	8.5	16		
2	0.8	27	5.1	16	3.4	22	3.3	21	4.1	22	7.4	17		
3	7.8	31	7.9	26	7.1	30	7.1	29	7.3	31	7.5	23		
4	14.3	22	11.0	23	12.5	24	12.0	24	10.9	27	9.3	27		
5	15.6	18	14.2	21	16.4	20	15.8	18	13.5	23	11.1	25		
6	23.5	31	18.7	33	21.5	27	19.4	27	17.6	33	13.9	39		
7	26.7	31	22.4	31	25.3	26	23.3	26	20.8	31	17.0	38		
8	23.6	42	22.9	33	24.4	30	23.4	29	20.6	34	18.4	39		
9	19.5	29	21.5	20	21.9	20	21.5	17	18.5	23	17.8	27		
10	12.6	31	18.6	16	17.4	17	16.9	14	15.6	19	20.4	18		
11														
12														
年平均	14.3	29	14.7	24	15.3	24	14.5	23	13.2	27	20.3	27	14.5	26

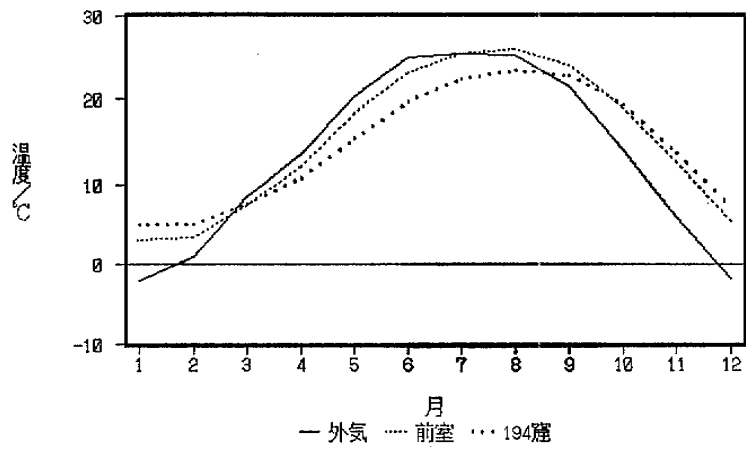


図-2 194窟における温度の年変化 (1990年)

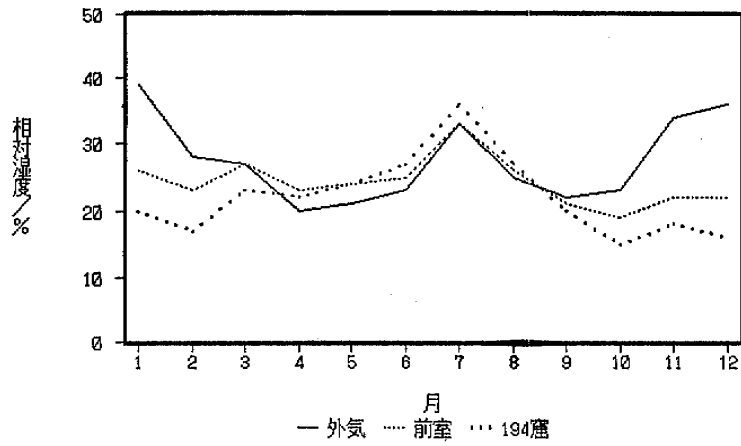


図-3 194窟における相対湿度の年変化 (1990年)

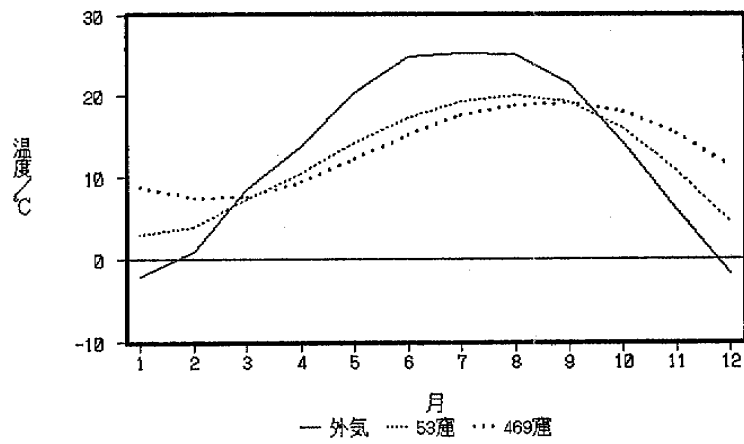


図-4 53窟における温度の年変化 (1990年)

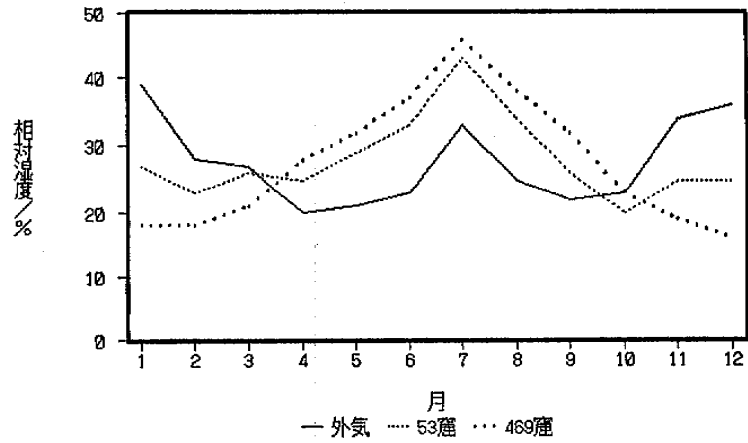


図-5 53窟における相対湿度の年変化 (1990年)

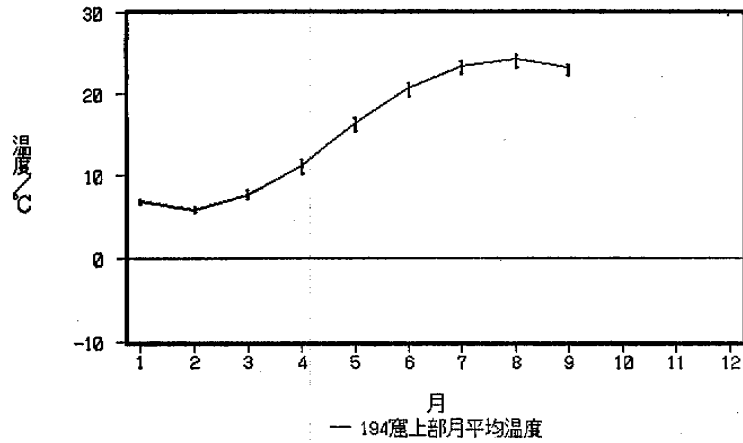


図-6 194窟内上部気温の日較差の年変化 (1990年)
(10, 11, 12月は欠測)

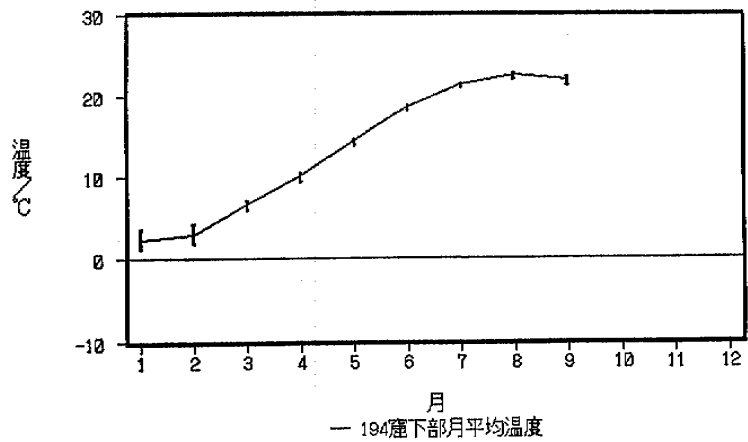


図-7 194窟内下部気温の日較差の年変化 (1990年)
(10, 11, 12月は欠測)

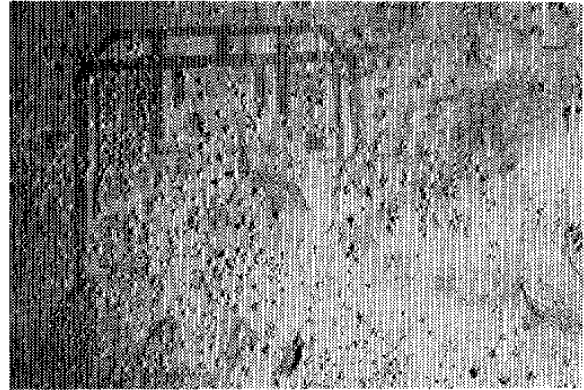
4.2 湿 度

窟内の湿度は、日変化こそ外気にくらべて小さいが、年変化でみると外気の変化幅とほとんど変わっていない。入口を封じた469窟内の湿度の年変化幅も、外気と同じかむしろ大きい(図5)。窟内の湿度が外気よりも高い6月から7月は、時折、雨が降る季節であることを考慮すると、窟内の湿度は雨水などの地中水によって支配されているのではないかと考えられる。

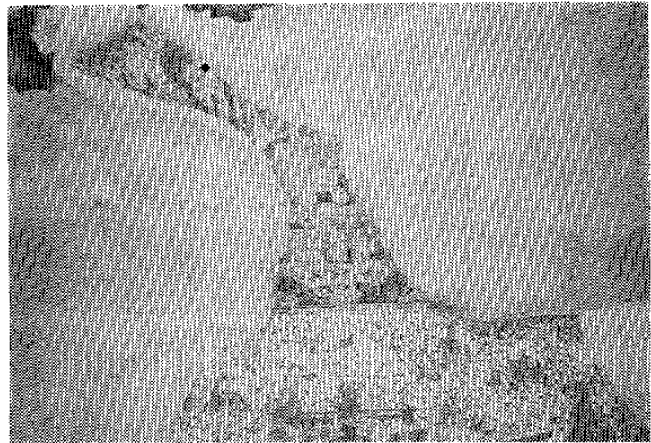
1991年5月から10月にかけて約半年間測定した、194窟天井と53窟床に開けた穴中の湿度を見ると(表1)、洞窟内の湿度が30%前後であるのに対して、地中湿度はどちらも常時75%前後と、砂漠地帯にしてはきわめて大きい。194窟では上からの雨水の影響、53窟では下からの地下水の影響があることをうかがわせる。

日本でも磨崖仏や装飾古墳などで、石や壁の表面が湿っていて空気が乾いている場合は、壁面から水分が蒸発して塩類が析出し表面を傷める、いわゆる塩類風化が起きることがある。莫高窟は乾燥地帯にあるが、地中の相対湿度が空気中より常に50%ほども大きく、しかも壁画の下地である岩石中には多量の塩分が含まれているので⁴⁾、塩類風化の危険性は大きい。

壁画を調べてみると、194窟では食塩の析出による壁画の斑点状の剝落(写真2)、53窟でも硫酸カルシウムの析出による剝落など、地中水に起因したと思われる壁画の損傷が見いだされた⁴⁾。特に194窟は天井部を石膏様のもので新しく補修しており(写真3)、それが原因となって塩類風化が促進されている可能性が強い。



写真—2 食塩による194窟の壁画の剝落



写真—3 194窟天井の補修跡と壁画の剝落

5. ま と め

敦煌莫高窟の第194窟と53窟で温度、湿度、風速、日照などを測定し、壁画のおかれている微気象について考察した。その結果、温度の日変化、年変化どちらも窟内の方が少なく安定していることや、温度の季節変動による緩やかな空気の流れが窟内にあることがわかった。湿度の日変化は、窟内の方が外気にくらべて少ないものの、年変化はどちらもほとんど変わらない。地中の相対湿度が空気中に比べて約50%も高いことから、地中水が壁面から常に洞窟内に蒸発して窟内の湿度を変化させていることが明らかになった。

敦煌でもごくまれではあるが大雨が降ることがあるので、特にそのような時に壁画の塩類風化が目立って起きるものと考えられる。すなわち、莫高窟のような乾燥した砂漠地帯であっても、水が壁画の劣化の主要な原因となっていることが、これまでの研究で明らかになった。

終わりに文化庁，東京国立文化財研究所，中国国家文物局，甘肅省文化庁，敦煌研究院の各関係者始め，本研究の推進に御努力頂いた多くの方々に深く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 李実，張拥軍，三浦定俊，西浦忠輝：敦煌莫高窟の気象観測，敦煌研究 No. 22，108—114 (1990)
- 2) 三浦定俊，西浦忠輝，李実，張拥軍：敦煌莫高窟における気象観測(1)—1988年春の温度・湿度変化について—，保存科学，第29号，1—7 (1990)
- 3) 張拥軍，王宝義，三浦定俊，西浦忠輝：敦煌莫高窟の気象観測(2)，敦煌研究 No. 30，(1992)(印刷中)
- 4) 朽津信明，段修業：敦煌莫高窟の地質環境，保存科学，第31号，79—85 (1992)

Climate at Dunhuang Mogao Grottoes (2)

—from 1989 to 1991—

Sadatoshi MIURA, Tadateru NISHIURA,
ZHANG Yongjun and WANG Baoyi

Temperature, humidity, wind velocity and sunshine were measured at caves No. 53 and No. 194 from 1989. Cave No. 53 is located on the lower level of a cliff and cave No. 194 is on the upper level. The climate data are recorded every hour (twenty-four times a day) in data loggers. The annual mean temperatures in 1990 were 12.1°C at cave No. 53 and 14.3°C at No. 194, while the annual mean humidities were 28% RH and 22% RH respectively. In order to measure the humidity in the rock of the caves, holes were dug in the ceiling of cave No. 194 and on the floor of cave No. 53. The results were as follows.

1. The temperature changes (daily and annually) and the daily humidity changes in both caves were much smaller than those outside.
2. Slow wind was observed at the floor of cave No. 194 due to seasonal temperature changes.
3. Humidity within the two holes was always kept at about 75% which is unusually higher than elsewhere.

The following can be deduced from an analysis of the results. The wall paintings of the caves deteriorated mainly by water even though Mogao Grottoes are situated in a desert region. Rain and ground water move through the rock of the caves; then water vaporizes from or near surface. The vaporization causes spotted flakings of the wall paintings by efflorescence of soluble salts. The efflorescence may be accelerated by wind in caves and by a wrong method of restoration.