

# 文化財と環境—高松塚古墳の壁画を中心に—

三浦 定俊

(東京文化財研究所)

## 1. はじめに

今日、人類の様々な活動による自然環境の破壊はオゾン層破壊、地球温暖化など人類だけでなく、地球に生きる様々な生命への危機をもたらしていることは広く喧伝されているが、人類が長い年月をかけて築き上げてきた文化遺産や芸術作品の破壊・損傷にもつながっていることは、それほど知られていない。

例えばオゾン層破壊が文化財保存の流れに大きな変化を与えた例がある。臭化メチルは、オゾン層破壊物質として生産と使用が規制された化学物質の一つである。臭化メチルはそのおよそ7割が農業用として土壌殺菌などに、残りの大半は検疫用に使用され、1%程の量が文化財の殺虫燻蒸剤として使用されていたが、先進国においては2004年末で全廃された。欧米など他の先進国では臭化メチルの全廃が文化財の保存に与える影響について、それほど問題とされなかったが、欧米と気候が異なって暑く湿った夏を持つ我が国は、シロアリ、キクイムシ、シバンムシ、カツオブシムシなどの昆虫によって引き起こされる文化財の被害が多く、臭化メチルに代わる手法の開発が焦眉の課題となり、文化財研究所は文化庁と協力して代替法の開発と普及に取り組んでいる。その際にはただ単に臭化メチルを他の薬剤に置き換えるという考え方ではなく、地球環境や人間の健康への影響が少ない方法を選択するという観点から、化学薬剤を使わない殺虫方法や、日頃の衛生管理を徹底して被害が発生しないための予防を中心にするやり方が、それまでの被害が生じた後の殺虫処置を中心とした考え方によって、世界的にも一般的な流れとなった。

ここでは環境の変化が文化財にどのような影響を与えているか、敦煌莫高窟壁画や高松塚古墳などの事例を挙げて述べる。

## 2. 気候変化の影響を受ける敦煌莫高窟壁画

### 2.1 敦煌の気候

敦煌は、北緯 40 度 8 分、東経 97 度 47 分、河西走廊の西端、タリム盆地の東に位置する。莫高窟は敦煌市街地の南東約 17 km にあり、海拔高度は 1,370 m と、日本でいえば軽井沢より高く、蓼科高原の白樺湖とほぼ同じである。敦煌の気候は砂漠気候に属し、年平均気温は約 10 度、年平均相対湿度は約 35%、年降水量はわずか 30 mm 程度で、日本の梅雨期の日降水量程度に過ぎない。今でも壁画が鮮やかな色で残っているのは、それだけ乾燥しているおかげである。また降水量が少ないにもかかわらず、年蒸発量は 2,400 mm にもおよび、降った水はすぐに蒸発して地表面にはほとんど留まらない。このため岩石中には、水が蒸発する際に取り残された食塩など可溶性塩類が多く含まれている。

莫高窟では「大泉河」と呼ばれる河の左岸（西側）段丘に、高さ約 40 m、南北約 1.6 km にわたって、500 以上の石窟が崖の上から下までおおよそ三層に掘られている。このうち壁画の現存する窟は 490 余りである。礫混じりの堆積層が大泉河によって浸食されてできた断崖に掘られた、石窟内部の表面は大変粗いので、表面を泥土で平らに整えてから壁画が描かれている。東京文化財研究所は、1986（昭和 61）年に敦煌文化財の保存修復に関して調査研究を始め、翌 1987（昭和 62）年からは、中国敦煌研究院と莫高窟の壁画、彩塑像の保存、修復についての共同研究を進めている。

### 2.2 洞窟内壁画の劣化

崖の上の洞窟群では壁画に斑点状の剥落が数多くあり、その剥落は天井面で著しい。我々が調査した 194 窟でも天井や南側の壁画で剥落が著しく、南北の壁画の上部には塩類の析出によるものと思われる斑点状の剥落が多く見受けられた。

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、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、もしその塩分が水に溶けて流れ出すことがあると、壁面で塩類風化が起きると考えられ、壁面表面に析出した物質を分析し

たところ、194窟では食塩、53窟では硫酸カルシウムが見いだされた。特に食塩については、岩石中に含まれていたものが雨水によって溶けだして、水の蒸発に伴い壁画表面で再度析出したと推定された。

敦煌の年平均降水量は30mm程度であるが、砂漠気候の特徴としてごくまれに年平均値に匹敵するほどの雨が一日に集中して降ることがある。日本では毎月ある程度の雨が降るのに対して、敦煌では秋から春にかけては降雨量がほとんどゼロの日が続く。そして一年の降水量のほとんどが6月から8月にかけて集中し、その時に塩類風化による壁画の剥落が引き起こされると考えられた。

### 2.3 敦煌地域の降水特性

大雨がどの程度の頻度で起きるか明らかにするために、1961年から1994年までの33年間の敦煌における気象データを検討し、各年における年降水量を求め、さらに最大日降水量と最大月降水量とそれが起きた月日を求めた。表1に敦煌における降水量の上位3番目までの極値と起時を記す。1979年には平年の3倍の降水があり、その年の7月だけで平年以上の月降水量で、6月30日には20.3mmの大雨が降るなど、1979年はきわだって雨の多い年であった。また1971年も降水量が多いが、その大半が7月にまとまって降っている。

このような大雨がどのくらいの頻度で起きるかを解析したものが、図1である。この図は横軸に降水量を、縦軸に再現期間をとり、それぞれの最大降水量をもたらず雨が、どのくらいの年間隔で起きる可能性が高いかを統計的に示している。これによれば1979年6月30日のように一日の降水量が20mmに及ぶような大雨が、敦煌ではおおよそ20年毎に起きる恐れがあることがわかる。そのような大量の雨が降ったときに、岩石中に含まれている多量の食塩などが一度に溶け出す。溶けだした塩は雨水と共に洞窟の中に流れ込み、水が壁面から蒸発するときに取り残されて析出し、ちょうど霜柱ができるように壁画の彩色層を下から押し上げて壊していく。また壁画を剥落させるだけでなく、洞窟入り口の岩や壁を崩落させる。我々が調査していた時にも、一日で多くの雨が降り、洞窟入り口周辺での崩落などが見られた。大雨による被害がたとえ百年に一度だったとしても、千年以上もの長い命を持つ莫高窟壁画の保存にとっては見過ごすことはできない。

さらに注目すべき点は1960年代の平均年降水量が29.3mmであったのに対し、1970年代には平均年降水量が51.0mmと大幅に増加し、1980年代にはやや減少しているが、年降水量が増加していくと雨による被害の頻度も高くなり、莫高窟壁画の保存にとって地球気候の変動は大きな問題であると考えられる。しかし1990年代以降は小雨の傾向にあるようで、敦煌の南5km、鳴沙山のふもとに広がる月牙泉がやがて干上がる恐れがあるという。月牙泉は三日月形の湖で、東漢(紀元25-220年)の史料「辛氏三秦記」にも記載がある観光名所である。1950年代には水深12m、野球のグラウンド程度の面積があった湖は今、水深1m以下、面積は半分以下に減少したという。敦煌市の人口増加や開墾による砂漠化の進行が原因といわれ、もともと水枯れが懸念されていたが、ここ5年ほど砂漠化が加速し、とくに今年は降水量が少ないため話題となった。温暖化に伴う気候変化によって雨の降り方のパターンが変わり、遺跡にとって様々な問題が起きている。

#### 2.4 気候変動と莫高窟壁画

敦煌莫高窟の歴史を振り返れば、砂漠化や多雨化などの地球規模の環境変動が、遺跡にどれほど大きな影響を及ぼして来たかを知ることができる。西域は、時代を通じていつも町が栄えていたわけではない。例えばタリム盆地では3世紀末から4世紀、8世紀末から9世紀、12世紀から13世紀といった時期は、それ迄栄えていた町が減った時代であった。莫高窟で最初の石窟が作られたのは碑文によると4世紀であるが、現存する最古の窟は5世紀初である。その後、北魏、西魏、北周、随、唐、五代、北宋、西夏、元と石窟の造営と改修が行われるが、莫高窟もまた13世紀あるいはそれ以前に寂れてしまった。

交通の要地である西域の町がある時期だけ栄えたのは、その時期に水が十分に得られて人が住めたからであり、見捨てられた理由は、水がもう得られなくなったからと考えるのが自然である。この地域は周囲の山地の雪原や氷河からの融水を水源としていて、流量は春から夏にかけての気温に左右される。そのため西域が栄えた時期は、地球規模の視点で見ると地球が温暖であった時期であり、寂れていた時期は地球が寒冷な時期に重なるのではないかと考えることができる。

海底の堆積物中の酸素同位体比の変動を調べることにより、数百万年にわたって、その時代が現在より暖かかったか、寒かったかを推定でき、それらの科学的データと古い文献などから、中国における過去 2,000 年の気温変動を再現することができる。それによれば AD600 年から AD1,000 年は温暖な時期であった。西域の河川の流水量変動を文献などで調査した結果によるとやはり AD600 年から AD800 年にかけて河川の流水量は多くなっていて、この時期、西域は温暖で豊富に水が得られて、人間にとって住みやすい土地であったことが伺える。莫高窟造営の最盛期はこの時期に重なっている。その当時は現在のように乾燥して気候の厳しい場所ではなかったから、多くの人々が敦煌に集まり、莫高窟も栄えたのではないかと想定できる。11 世紀以降、地球の気候が寒冷化するに連れて、西域は乾燥して人間にとってきわめて住み難い土地となり、莫高窟もほとんど見捨てられた土地となった。逆に言えば、それだからこそ現在に至るまで莫高窟は人に荒らされることなく、壁画が良く保存されたということもできる。

### 3. 高松塚古墳とその環境

#### 3.1 石室内気温の変化

1972 年に発見された高松塚古墳壁画は、1974 年から 75 年にかけて石室前に前室とその地下に空調用の機械室がある保存施設が建設された。その空調設備は前室のみを空調して石室内は空調しないシステムで、石室入口（盗掘口）脇（取合部）の土中温度と等しくなるよう温水（冷水）を前室の天井・壁・床面に張り巡らした銅管パネルに常時流す「パネル系」と、保存施設内に人が立ち入るときのみ高湿度の空気を前室に送り込む「空調系」の二つの系からなる。このため外界の影響を受けて土中温度が上昇すれば石室内の温度も上昇する。

この 30 年間の気温変化を見ると、1970 年代以降、奈良では外気温が上昇しつつあり、それに伴って石室内気温も上昇している。2001 年以降、壁面に発生したカビに対する処置を行うために頻繁に石室内へ入ったため、石室内気温の上昇が大きくなっているが、それ以前は石室内気温はほぼ外気温の上昇に沿って上がっている。奈良におけるこの外気温の上昇は、北半球全体の気温上昇と一致しているので、地域的なものではなく気候変化に関連していると考えられ

る。

フランスのラスコー洞窟でも同じような測定記録があり、両者が比較できる1978年から98年までの測定値について、21年間の平均値を平年値として、各年の気温の平均値と平年値との差（平年差）がこの間でどのように変わったかを示したものが図4である。ラスコー洞窟の方が高松塚古墳より地表面からずっと深い位置にあるので、年による変動は少ないが、変動のパターンは類似し、長期的に見るとラスコー洞窟においても高松塚古墳と同様、この間にやはり約1℃の温度上昇がある。

高松塚古墳でもラスコー洞窟でもほぼ同じ時期にカビによる被害が起きている。カビの発生はどちらも直接的には入口部での工事が原因となったのではないかと考えられているが、カビは温度が上昇すればそれだけ生育しやすくなるので、長期的な温度上昇もカビの拡大の一因となったことが考えられる。

土中には数多くの種類の微生物がいて、本来、石室内は湿気が高いのでカビが繁殖しやすい。しかし埋蔵された長い年月の間にやがて栄養分もなくなり、平衡状態に落ち着くことによって、新たなカビの発生がおさえられていたと考えられる。発掘されると、温湿度の変化や新たな栄養分の持ち込みにより発掘後に石室内でカビが発生する。そしてそのような変化要因が収まればまた平衡状態が回復して、カビの発生も収まる。しかし栄養分の蓄積や気温の上昇などカビが大変生育しやすくなった状態で、大きく平衡状態からはずれてしまうと、元の平衡状態に戻れなくなって、カビは急速に生育していくのではないかと考えられる。

### 3.2 発掘後の微生物環境の変遷

発掘後の高松津故古墳石室内での生物被害の発生状況とその対策について述べる。約1,300年以上もの長い期間、地中の安定した環境下にあった壁画は、発掘によって大きな環境変化を受け、その後に石室内で虫類の侵入やカビの発生が見られた。そのため、対策としてパラホルムアルデヒドをシャーレに入れて石室内に置いた。

1980年頃から石室内に布置したパラホルムアルデヒドが結露水によって溶解、気化しなくなった。カビの発生も多くなり、1980年暮れから81年にかけて

て大量に白色及び灰白色のカビが石室内に発生した。パラホルムアルデヒドを加熱蒸散させて燻蒸する方法を用いたところ、1982年以降カビの発生は漸減し、1985年にはようやくカビの発生を抑えることができ、いわゆる平衡状態に戻ったと考えられる。しかし画面の荒れ、黒線や赤色の薄れ、白虎、玄武周辺にはカビ痕と推定される汚れが残った。その後は2000年春まで年に1回、3月頃に定期点検を行い、その都度、見つかった数点のカビ処置を行う程度であった。

2001年春に取合部で行われた工事後にカビが大発生したので、取合部をくりかえし殺菌し、浮遊菌量が減少していることを確認した後、同年秋に石室内を点検したが、すでにカビは石室内にも発生していた。エタノールや防黴剤で処置し、カビは一旦沈静化したように見えた。この頃に加熱処理、紫外線処理、放射線処理、窒素封入や二酸化炭素置換による繁殖抑制、また酸化エチレン等燻蒸剤の使用も検討したが、石室入口となる盗掘口が高さ0.6m、幅0.9m程度しかないこと、石室の寸法も縦1.1m、横1m、奥行き2.7mと狭く、石材と石材の間に隙間があること、さらに壁画や作業者への影響なども考慮するとこれらの対策は採用できなかった。

2002年秋より再び取合部と石室内に複数種のカビが多量発生し、特に青龍下、東壁女子群像下に黒色の汚れが発生した。エタノールの噴霧や湿布とパラホルムアルデヒドの燻蒸処置を行って、この時のカビは一旦沈静化した。

2004年春からカビが再発生し、石室内の温度上昇とともに、夏にはカビを食するダニも発生した。このダニは虫類によって石室内に運ばれたと推定されるが、ダニの死骸にカビが生え、カビの胞子をダニが撒布するというサイクルでバクテリアや酵母なども含めた生物の繁殖が全体的に広がっている。

現在は墳丘を10℃程度に冷却して被害の発生を抑制しているが、温度を下げてカビはすこしずつ生育し、また壁面の汚れが残っている限りは、カビやバクテリア、虫などの栄養分となって、被害が広がる危険性は高い。そこで墳丘を発掘して石材ごと壁画を取り出し、環境の整った修理施設で壁画の修理を行う準備が、現在進められている。

#### 4. むすび

気候の変化が、遺跡の保存に大きな関係を持っていることを述べた。敦煌莫

高窟では、砂漠化と多雨化が大きな問題である。また古墳や洞窟のような環境では温湿度など環境の変化が小さく、栄養分も少ないので土中に数多くの種類の微生物がいて湿っていても、それらが微妙な平衡状態を保ってカビの発生がおさえられているが、気温の上昇や壁面に累積した汚れなどがあると、カビが生育しやすい条件が生まれ、何かのきっかけで大きく平衡状態が崩れると生物被害が拡大していく。それを防ぐには、平衡状態をできるだけ保つように周囲の環境を制御する必要があるが、そのことを数十年、数百年続けようとすることは大変困難なことである。

表 1. 敦煌における降水に関する 3 位までの極値と起時

	1 位	2 位	3 位
年降水量(mm)	105.5	79.2	65.2
起時	1979 年	1971 年	1973 年
月降水量(mm)	60.7	45.4	32.1
起時	1971 年 7 月	1979 年 7 月	1973 年 6 月
日降水量(mm)	27.1	20.3	19.7
起時	1971 年 7 月 9 日	1979 年 6 月 30 日	1976 年 7 月 6 日



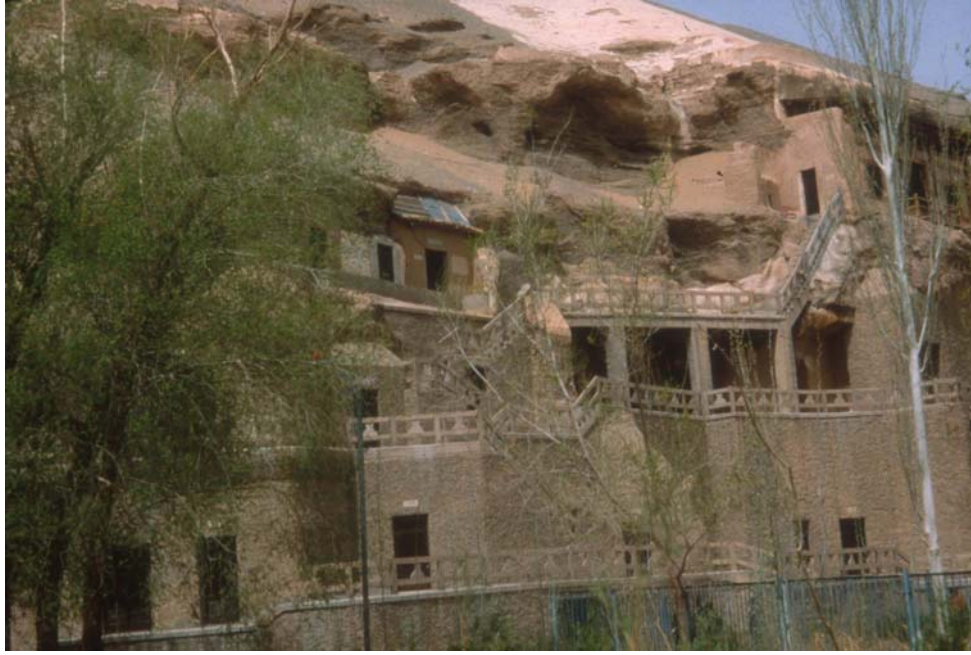


写真1. 敦煌莫高窟外観（中央上が194窟）



写真2. 食塩による194窟の壁画の剥落

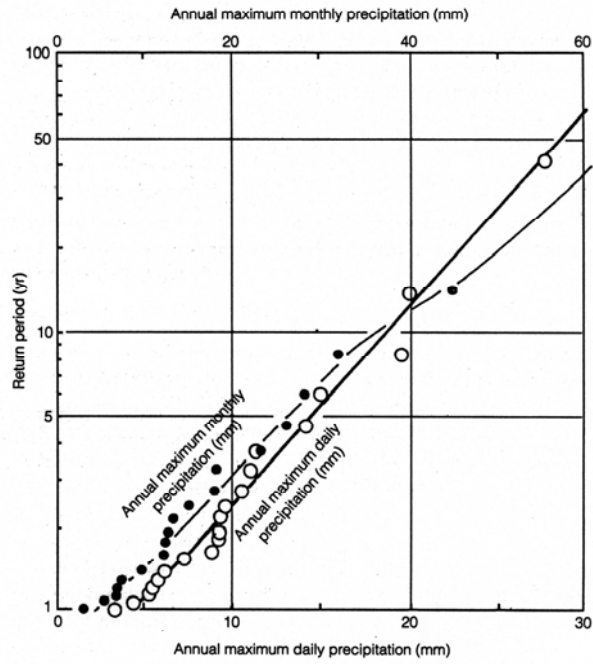


図1. 敦煌における年最大月降水量と年最大日降水量の再現期間

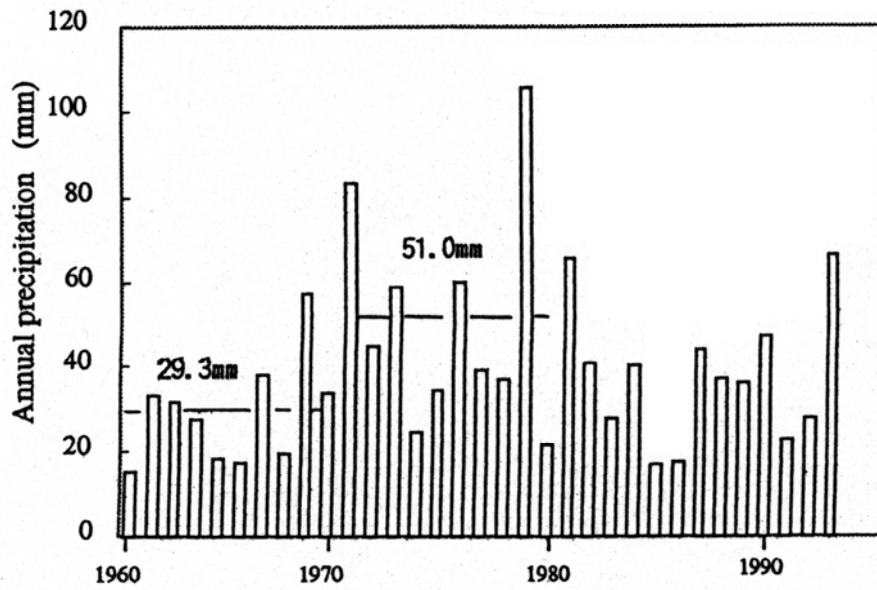


図2. 敦煌における年降水量の推移 (1961-1993年)

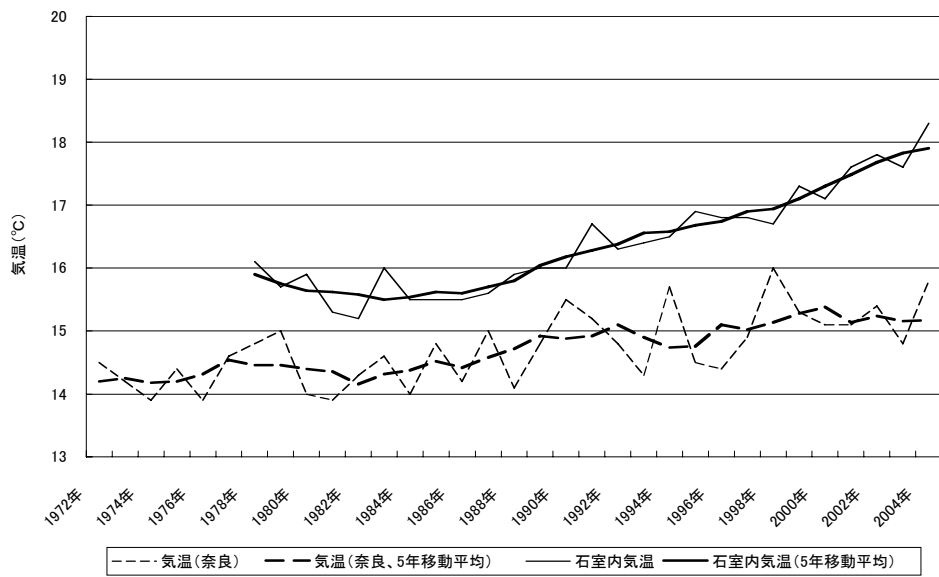


図 3. 高松塚古墳と奈良における年平均気温の変化

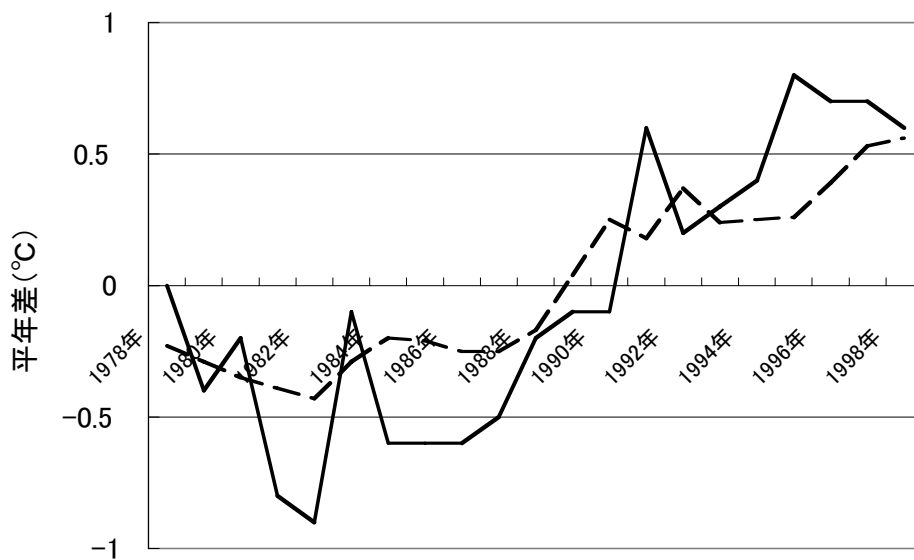


図 4. 高松塚古墳とラスコー洞窟における平年差の推移

実線：高松塚古墳（1978年からの平均値を平年値とした平年差）  
 破線：ラスコー洞窟（同上）