

岩盤表面の水分蒸発量とエジプト・大スフィンクス劣化機構に関する研究
STUDY ON THE ESTIMATION OF THE EVAPORATION FROM ROCK SURFACE IN GREAT SPHINX

谷本親伯¹⁾・中島伸一郎²⁾・梶谷昌世³⁾・岸田 潔⁴⁾
Chikaosa TANIMOTO, Shinichiro NAKASHIMA,
Akiyo KAJITANI & Kiyoshi KISHIDA

Abstract

Great Sphinx-Giza, Egypt, has been seriously weathered and it needs good plan for restoration and preservation. In this paper, as considering that the water transportation around the rock surface is one of weathering factors, we have carried out the evaporation measurement on the rock surface in the Sphinx site and tried to estimate the mechanism of the water erosion. From this survey, we have confirmed that the vapor transportation works in the arid region, the Sahara, and especially, the amount of vapor moved from the major fault, which we could find in the Sphinx site, to the atmosphere all day long is very remarkable.

1. はじめに

エジプト・ギザ地区の大スフィンクスは、現在著しい風化を受けており、修復保存方法の確立が急がれている。このスフィンクスの風化では、強い日射、強風、日周期的な乾湿の繰り返しなどの過酷な気象条件の下で、岩盤内外を水分が激しく移動するため、化学的風化、スレーキングおよび塩類風化などが生じていると考えられる。そこで本研究では、スフィンクス周辺の岩盤表面上に温湿度・風速センサを設置し、蒸発量を連続的に測定することによって、水分移動の時間的変化、岩質・き裂の度合いと水分移動の関係を定量的に把握しようと考えている。本報告では、1995年の夏期2週間（7月24日～8月6日）にわたり、スフィンクス周辺岩盤で行った蒸発量測定結果について報告する。同時に、本研究で用いている蒸発量測定装置の精度を確認および蒸発量を算定するための層流・乱流について検証するための、現在室内実験を行っているのでその結果の一部もあわせて報告する。

2. 測定原理

岩盤表面の直上において大気中の水分密度、すなわち絶対湿度 [g/m^3] の鉛直方向分布は図-1 に示すような分布となる¹⁾。この高さ方向の絶対湿度の差によって水分移動が起きる。表面の極近傍では風速の影響は小

¹⁾ 正会員 京都大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻

²⁾ 学生員 京都大学 工学部土木工学科

³⁾ 学生員 京都大学 工学部交通土木工学科

⁴⁾ 正会員 京都大学助手 大学院工学研究科土木工学専攻

さく、図-1の下部に見られるような直線分布となる。
この領域は層流層であり、水分移動はおもに分子拡散によって行われる。したがって層流層内において岩盤表面からの高さの異なる2点で絶対湿度を計測すれば、次式によって蒸発量 E が算出できる³⁾。

$$E = -D_m \frac{Q_1 - Q_2}{n_1 - n_2} \quad (1)$$

ここで、 D_m は分子拡散係数、 n は岩盤表面からの高さ、 Q は高さ n で計測される絶対湿度である。

一方、表面からある程度離れると、風速の影響が無視できなくなり乱流の影響を受けることになる。乱流層内では図-1の上部に示されるように絶対湿度分布は対数則に従い、水分移動は乱流拡散によって行われる。よって、乱流層内では高さの異なる2点での絶対湿度と、高さが既知である点での風速を計測すれば、次式によって蒸発量 E が算出できる³⁾。

$$E = -K \frac{Q_1 - Q_2}{n_1 - n_2} \quad (2)$$

ここで、 K は風速と地表面粗度に依存する乱流拡散係数である。

今回の現場計測では、図-2に示すようなセンサユニットを用いた。このセンサユニットによって岩盤表面からの高さ3mm、13mmでの絶対湿度と、高さ1cmでの風速が計測される。ここで問題になるのは、高さ3mm、13mmでの計測点それぞれが層流層に含まれるのか、乱流層に含まれるのか、あるいは層流層と乱流層をまたいでいるのかという点である。本来ならば各計測地点において絶対湿度の鉛直分布を調べ、層流層か乱流層かを確かめる必要があるが、今回の計測ではそれを行わなかったため、2点が層流層に含まれる場合と、乱流層に含まれる場合の2つの場合について蒸発量の算出を行った。

3. 蒸発量測定結果

スフィンクスピットの概要図を図-3に示す。蒸発量の測定は、スフィンクスピット内の壁（南壁・西壁・北壁）および床部分の岩盤に対して行った。スフィンクス本体に対しては計測を行わなかったが、本体を形成する石灰岩層と壁および床部の石灰岩層は連続しており、同様の風化を受けていると考える。また、同時にすべての計測地点を計測したわけではないが、計測期間中は気象条件が一定だったため、計測日の違いによる大気条件の差異はないものとする。

蒸発量の経時変化の例を図-4に示す。これらの図において、正の蒸発量は岩盤表面から大気に向かって

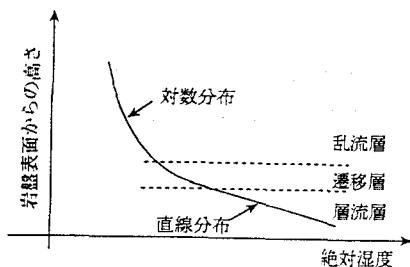


図-1 絶対湿度の鉛直分布

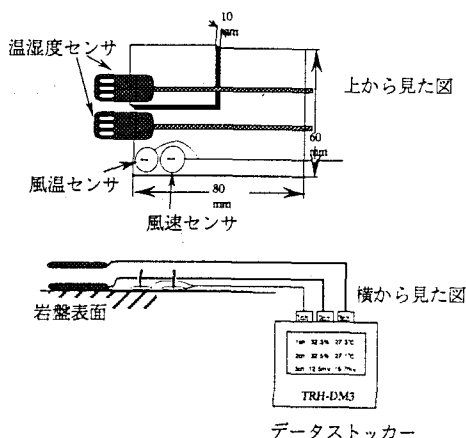


図-2 センサユニット概略図

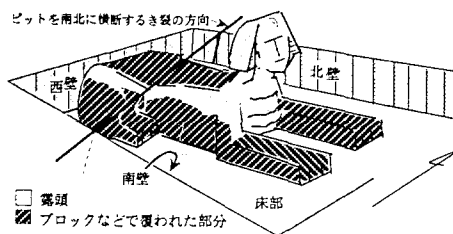


図-3 スフィンクスピット

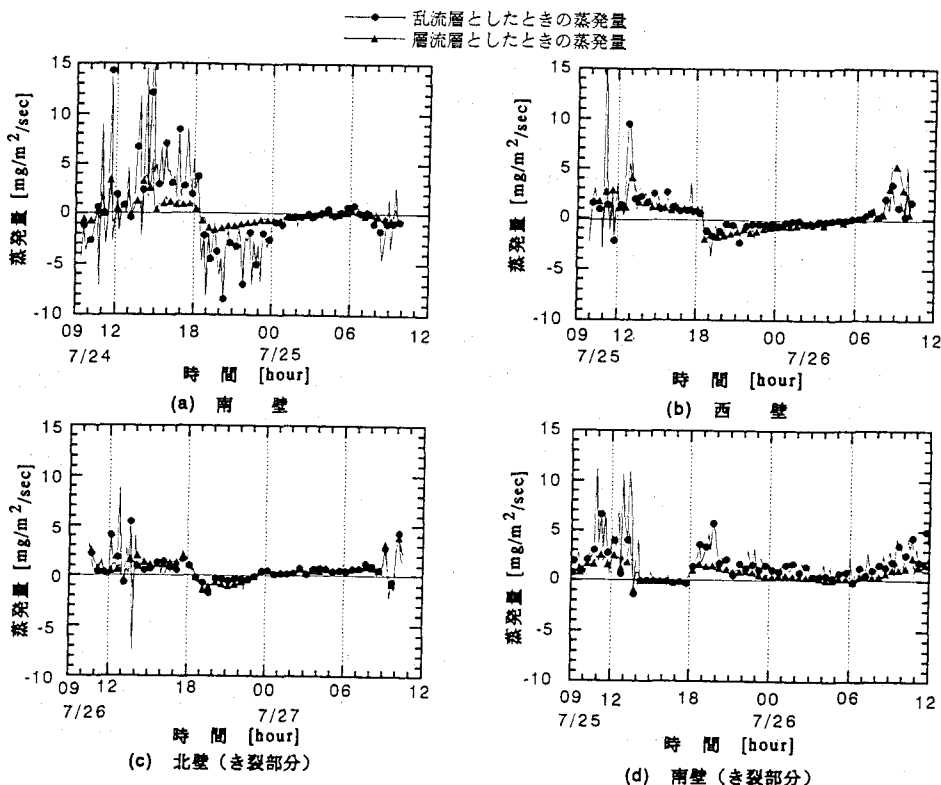


図-4 蒸発量の経時変化

水分が移動することを示し、負の蒸発量は大気から岩盤に水分が吸着することを示す。絶対湿度を計測する2点が層流層に含まれる場合と乱流層に含まれる場合を比べると、いずれの計測地点に置いても経時変化にはそれほどの違いは見られない。ただし、風速が 0.5m/sec 以上になると、風速の変動の影響があらわれている。図-4から、一日の中で蒸発から吸着に転ずるのは18時～19時であることが読みとれる。この時期の日没は21時頃であり、日没の2時間ほど前に吸着が始まることになるが、これはスフィンクスピットが3～5mの高さの壁に囲まれた構造になっているため、日没より前に陰に入ってしまうためである。

図-4(a), (b)では24時間内の蒸発量と吸着量のバランスがとれており、これらの地点では夜間に岩盤に吸着した水分が、そのまま日中の日射によって蒸発していると考えられる。つまり、日周期的な水分の循環が存在しているわけである。このような水分の循環が存在するのは、ギザ地区が降水量が非常に少なく（カイロの年間降水量は 21.8mm ）、かつ植生がないので夜間の蒸散による大気への水の移動がないためである。一方、図-4(c), (d)では蒸発量が吸着量を上回っている。これらの地点では大気と岩盤間の水分の循環に加えて、岩盤内部からの水の供給が存在することが推察できる。これらはスフィンクスピットを南北に横断する大きなき裂上で計測したものであり、地中の水分がこのようなき裂内を上昇してきていると考えられる。

4. 室内実験

本研究で用いている測定方法は、地下空洞内など大気状態が非常に安定した状況に置いては精度良く蒸発量が測定できることが渡辺らによって確認されている⁹⁾。しかしながら、この測定方法をスフィンクス周辺

のような大気状態の変化・変動が非常に大きい条件下で適用が可能であるかどうかは確認されていない。また、今回の現場計測では絶対湿度を計測する2点とともに層流層あるいは乱流層に含まれるとしたが、その仮定がどのような風速の範囲で成り立つのかは未確認であった。

そこでこれらの確認のために、条件の明確な室内においていくつかの実験を行っている。実験は、室外気の影響を受けにくい構造の実験室で行っており、実験中の室内温度・湿度の変化はほとんどない。まず、温湿度センサの湿度計測精度を確かめるために、無風状態での水面およびしめった砂（含水比約22%）の表面からの蒸発量測定を行った。図-5に示すように試料を入れたパレットの下に電子天秤を置き、実験前と実験後のパレットの重量変化を測定し、その重量変化量を実蒸発量とする。同時に、蒸発量測定装置をパレットの中心直上に設置し蒸発量を測定する。試料表面からのセンサの高さは、水の場合は、4mmと10mm、湿った砂の場合は10mmと15mmに設定した。

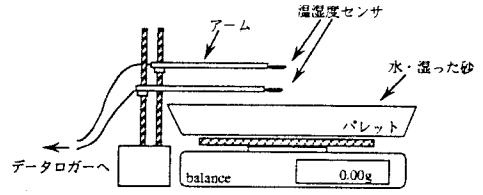


図-5 室内実験模式図

図-6(b)（湿った砂の場合）では、時間が経過するにつれて、測定値は実蒸発量よりも小さめの値を取っている。これは、パレット上では鉛直方向に一樣な蒸発が起きているという仮定のもとで蒸発量を測定しているのに対し、実際はパレットの縁に近づくにしたがって鉛直方向だけでなく水平方向にも水分が拡散するので、縁の方が蒸発量が多くなっているためであると考ええる。本研究のように、き裂などの非常に狭い領域からの蒸発量を測定する場合には、この水平方向の水分拡散の影響はさらに大きくなると考えられる。この点は今後の課題である。

5. おわりに

本研究では、スフィンクスの水による風化の状況を定量的に把握するために、スフィンクス周辺岩盤の表面からの水分蒸発量を測定した。その結果、岩盤と大気の間で日周期的な水分の循環があること、スフィンクスピット内を南北に横断するき裂部分では、地下からの水分の供給が存在することを示す結果を得た。しかしながら、現場計測の結果を解釈する上で、岩盤表面に形成される層流層の厚さの確認と、測定装置の

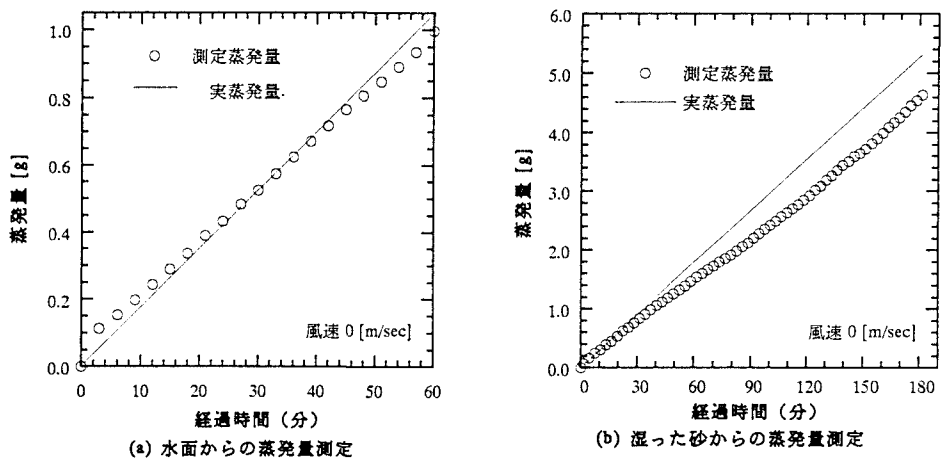


図-6 蒸発量測定精度の確認

精度の確認は不可欠である。蒸発量の測定精度を確認するために行った室内実験では、非常に単純な条件下ならば75%以上の精度で測定が可能であることが確認された。ただし、温湿度センサの湿度に対する応答特性の違いが蒸発量測定に大きく影響するので、実験前には十分なキャリブレーションが必要である。

現段階の室内実験では、以上のような非常に単純な状況下における測定精度の確認しか行っていないが、今後は風速や試料の乾燥度を変化させたときの測定精度の確認と、風速と層流層の厚さとの関係の調査を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 竹内清秀・近藤純正：大気科学講座1 地表に近い大気，東京大学出版会，pp. 97，1991.
- 2) 武田・上田・安田・藤吉：気象の教室3 水の気象学，東京大学出版会，pp. 135，1992.
- 3) 同上，pp. 142.
- 4) 渡辺邦夫ほか：（例えば）蒸発量計測によるトンネル壁面からの湧水量の測定，応用地質30巻4号，pp.11-18，1989.