

エジプト、ダハシュール北遺跡における シャフト内温湿度計測結果について

岩崎 好規*¹・中川 康一*²

1. はじめに

2008年の調査は、早稲田隊の発掘現場の一つである「ダハシュール北遺跡」に集中して、2008年11月23日～12月2日まで各種の調査を実施した (Fig.1)。

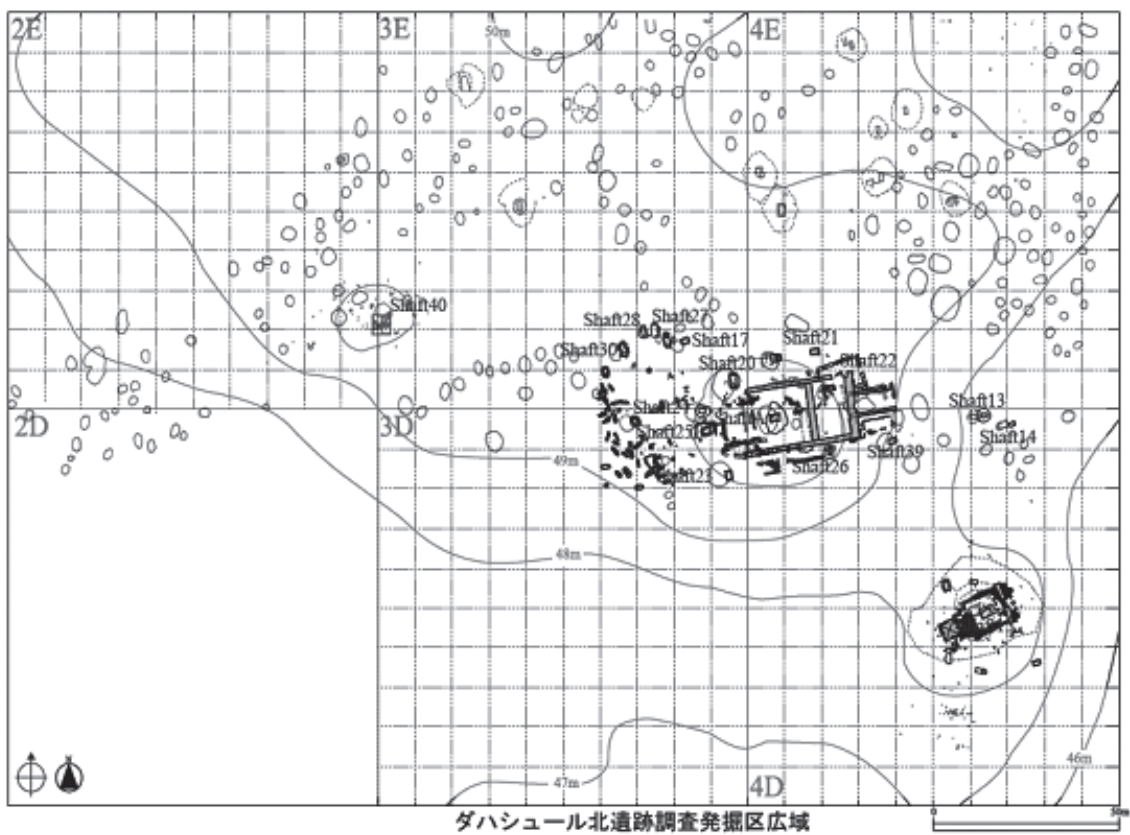


Fig.1 調査地

2. シャフト内部の温度・湿度の計測

シャフトから発掘された遺物の保存場所として、掘削の終了したシャフト内部が利用されている。シャフト内部には、塩分析出が見られ、遺物保存の環境条件を検討することは重要である。

* 1 (財) 地域地盤環境研究所専務理事

* 2 大阪市立大学名誉教授

シャフトのうち、シャフト A、シャフト 40、シャフト 17、シャフト 23、シャフト内部の温湿度分布を計測した。計測は、超小型の温湿度センサー (Fig.2) を使用して、地表からシャフト内部に降下させ、シャフト底部まで実施した。



Fig.2 hydrochron (ハイグロクロン)

(計測はセンサーを網袋に入れてメジャーテープに取り付け、0.5m ~ 1m ごと 5 分間定深度に設置し、シャフト底面まで低下させて回収した。)

(1) シャフト 17 における計測

シャフト 17 の計測事例を Fig.3 および計測結果を Fig.4 示す。

地表面付近の温度は、 $t = 31^{\circ}\text{C}$ であるが、シャフトの底部に行くに従って低下し、 $t = 24^{\circ}\text{C}$ で一定値を示した。相対湿度は、地表面では $\text{RH} = 20\%$ であったが、深度と共に増加して深度約 5m で $\text{RH} = 42\%$ の一定値を示した。このような計測で温湿度の深度変化を求めた。



Fig.3 シャフト 17 における温湿度計測の様相

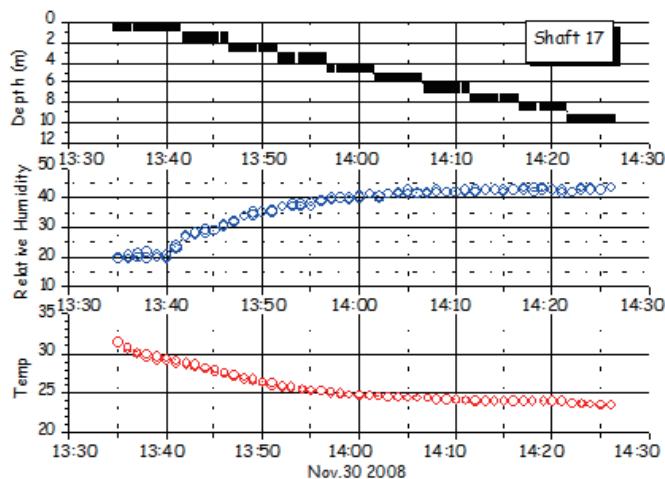


Fig.4 シャフト 17 の温湿度計測結果

(2) 地表面条件の異なる際の同一シャフト内部の温湿度

地表面温湿度の異なる午前と午後において、シャフト 17 内部の温湿度を計測した。その計測結果を Fig.5 に示した。

Fig.5 においては、午前 9 時から 10 時までと、午後 1 時 30 分から 2 時 30 分までの 2 つの計測事例を示した。温度計測結果を左側に示したが、午前における計測では、地表の外気温は $t = 21^{\circ}\text{C}$ に対して、午後では約 $t = 30^{\circ}\text{C}$

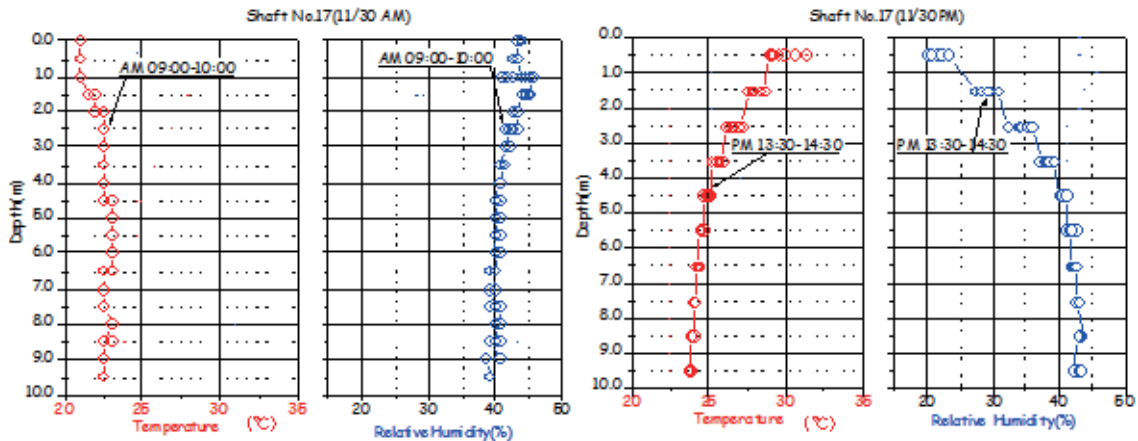


Fig.5 シャフト 17 の午前・午後の温湿度変化

であるが、シャフト深部においては、双方共に $t = 23-24^{\circ}\text{C}$ 程度に収束している。即ち、午前では、外気温はシャフト深部の温度に比較して低温であるが、午後においては高温である。

地表面の湿度は、午前中は $\text{RH} = 20\%$ と低く、午後は $\text{RH} = 43\%$ と高いが、シャフト内深部においては、約 $\text{RH} = 40-42\%$ と一定値が計測されている。

シャフト内の温湿度は、深部においては比較的安定しているようであるけれども、地表面の外気状態の影響を受けていることが分かる。

(3) 空気中の水分量

Fig.6 に空気中の水分量が一定の場合に、温度を変化させた場合の湿度変化を示した。ある一定の水分量の空気においては、温度が低下すると相対湿度は増大する。

シャフト 17 内部の温湿度の深度変化を温湿度チャートにプロットして Fig.7 に示した。シャフト内温湿度の午前および午後の変化を示したが、 1m^3 あたり $5-10\text{g}$ の含水量の範囲にあり、ほぼシャフト内の含水量は一定である可能性がある。

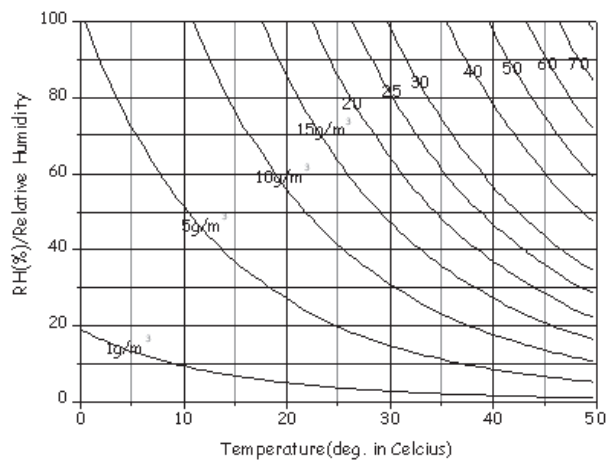


Fig.6 シャフト 17 の温湿度計測結果

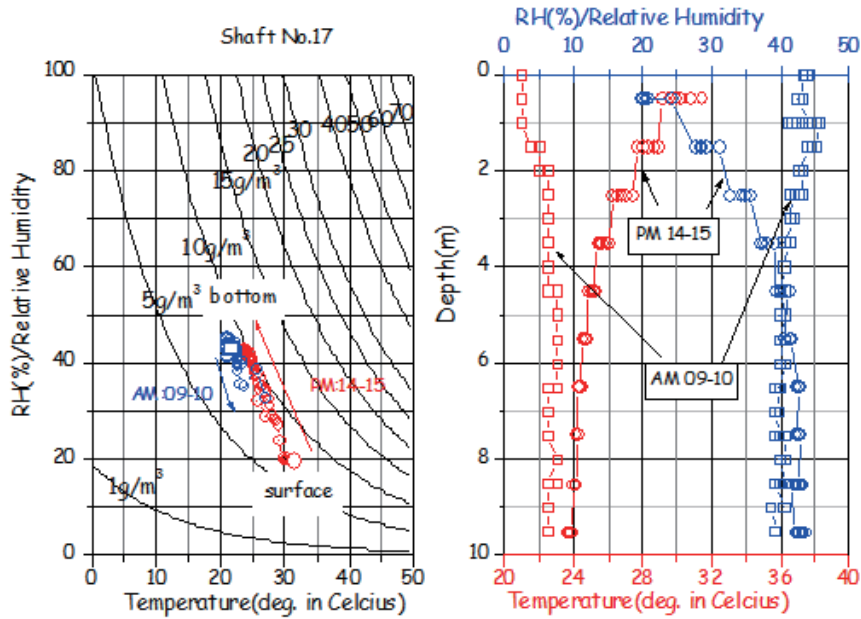


Fig.7 温湿度チャートにシャフト17の事例をプロットした場合

(4) シャフトAにおける計測

シャフトAにおいては、午前10時30分から、午後1時30分の間に計測を実施した。地表面の温度は $t = 27^{\circ}\text{C}$ 程度であるが、数mの深度で $t = 24^{\circ}\text{C}$ を示して、それ以深はほぼ一定値を示した。湿度は、地表面付近では $\text{RH} = 40\%$ であったが、深度と共に次第に増加して $\text{RH} = 75\%$ に達している。

シャフト17では、温度と湿度の深度変化は関連的であるが、シャフトAでは、温度一定の状態でも湿度のみが変化している。

Fig.8 に、シャフトA 内部における温湿度の時間計測結果、Fig.9 に深度との関係を示した。

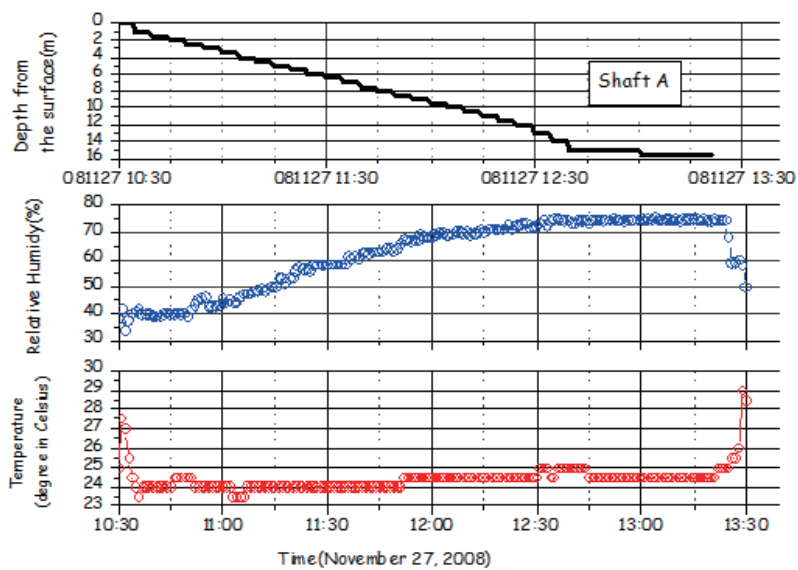


Fig.8 シャフトAにおける温湿度の計測結果

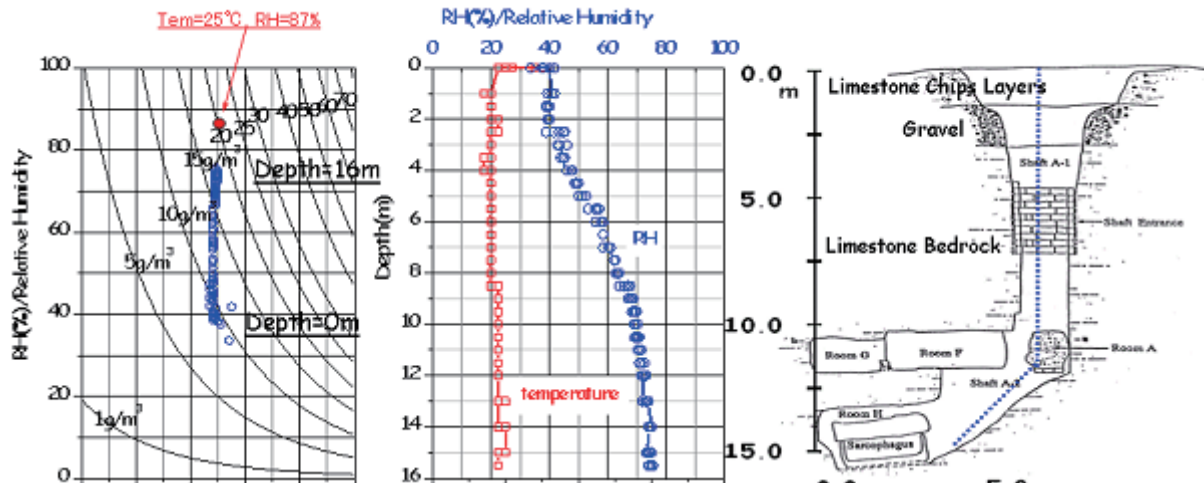


Fig.9 シャフト A における温度・湿度の深度変化

シャフト A においては、温度は一定であり、深度が深くなれば相対湿度が増大している。このことを、温湿度チャートにプロットすると、空気含水量は 10g/m^3 から 18g/m^3 に大きくなっていることが分かる。すなわち、シャフト A においては、シャフト内の空気の含水量が一定ではなく、深度によって増加していることが示されている。シャフトの構造との関係を見ると、地表面から約 4m までは、温度は直射日光下よりやや低い 20 度、湿度は 40% 程度の一定の温湿度であるが、4m 以深となると、温度はほぼ一定かやや微増するが、湿度は次第に増加している。特に 10m 以深の RoomH に至ると安定的に湿度は 75% 程度で一定を示している。

空気に含まれる水の量をみると、地下の浅い深度では 10g/m^3 程度であったものが、地下 10m から 15m の深度に至って約 15g/m^3 に増加している。Fig.10 は 2009 年度に計測されたシャフト A の下部における温湿度変化である。この 7 月から 10 月までの期間は、シャフト A は密閉状態となっており、シャフト部を介しての空気流入流出はないと考えてよい。Fig.10 には示していないが、シャフト A 上部に置かれた温湿度変化も、Fig.10 の下部と同じ温湿度値を示していた。

このことは、密閉された状態においては、シャフト A においてはほぼ一定の温湿度状態が保持されていたと考えられよう。この温度 25°C と湿度 87% が示す水分量を Fig.9 に示したが、 20g/m^3 の値となる。

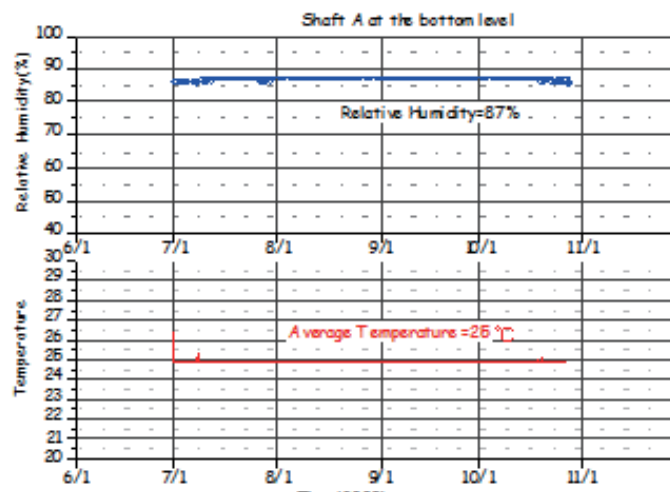


Fig.10 シャフト A 下部における温湿度変化

(5) 地表面付近の温湿度日変化

地表面付近における温湿度を把握するために、地表面および地表から10cmの深さの2地点において温湿度変化の計測を行い Fig.11 に示した。

計測は、2008年11月25日の午前11時から24時間にわたり、20分間隔で実施した。温度は午前9時から急激に上昇して、午後1時から2時の最高温度を示し、その後次第に低下して午前5時から6時頃が最低温度となる。地表面に比べて、地表面下10cm深度の温度変化は定性的には追従しているが、時間的な遅れと、最高温度と最低温度の振幅はそれぞれ小さく、減少している。

Fig.10 に、この計測結果を温湿度チャートに示した。地表部分 (GL00cm) と地表下約10cm (GL-10cm) の温湿度状態の開始点 (矢印↑で示す) から、右回りの履歴性を示し、空気含水量 $5 \text{ (g/m}^3\text{)}$ と $10 \text{ (g/m}^3\text{)}$ の間で変化している。温湿度が増大減少する際のセンサーの線形性からの乖離というヒステリシス特性を考

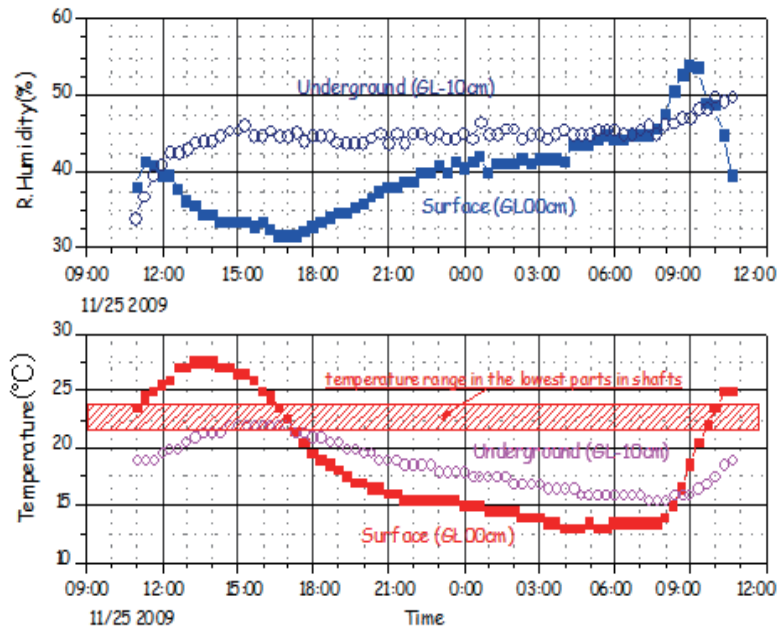


Fig.11 地表付近の温湿度変化

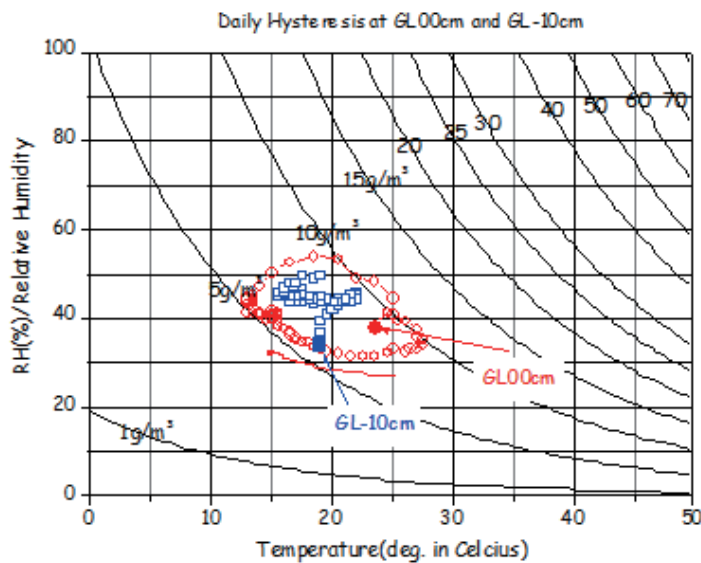


Fig.12 地表面付近の温湿度変化 (地表および地表から深さ10cmの点)

慮すると、 $5\text{-}10\text{g/m}^3$ の範囲で変化しているが、ほぼ、地表付近の空気の水分量は一定であるとみなせるのではないかと思われる。

Table 1 に、温湿度の地表面における最大値、最小値、差、および平均値を示した。

Table 1 地表面における温湿度変化

	温度				湿度			
	最大値	最小値	差	平均温度	最大値	最小値	差	平均湿度
	°C	°C	°C	°C	%	%	%	%
地表面	27.5	13.0	14.5	18.6	54.1	31.6	22.5	39.9
地表面 -10cm	22.0	15.5	6.5	18.6	49.9	34.0	15.9	44.8

地表面と比べて、10cm 深い GL-10cm の地中においては最高温度および最低温度の差は 14.5°C 減少し、出現時間は約 3 時間遅れている。平均温度は、地表および地中 GL-10cm では違いはなく、 18.6°C であった。シャフト深部の気温は約 24°C で、これは年間平均気温に近い。

Fig.11 に、シャフト内部深部における気温 ($22\text{-}24^\circ\text{C}$) の範囲も入れて示したが、地表の温度と比べると、午後 0 時前から 4 時までの約 6 時間は、地表面の方が高いが、残余の 18 時間は地表面の方が低い。

Fig.13 にダハシュールから約 30km 北方にあるカイロ地区における日最高気温と最低気温の各月平均値、月雨量変化 (<http://www.worldweather.org/059/c00248.htm>)、相対湿度 (理科年表 1999) を示した。カイロにおける気温の変化は、年間最高気温は 35°C 、最低気温は 9°C で、このデータからカイロの年間平均気温を求めると、 $t = 22^\circ\text{C}$ である。この年間平均温度は、ほぼシャフト内深部気温に近い値である。相対湿度は、降雨量に関連する。カイロ地区、年間雨量が約 25mm と少量であるが、乾季は 5 月から 10 月、雨季は 11 月から 4 月と考えられる。理科年表による相対湿度の年間変化を見ると、全体的傾向は雨季に相対湿度が増大しているが、詳細にみると相対湿度の最低値は乾季中ではなく、雨季後期の 4 月である。

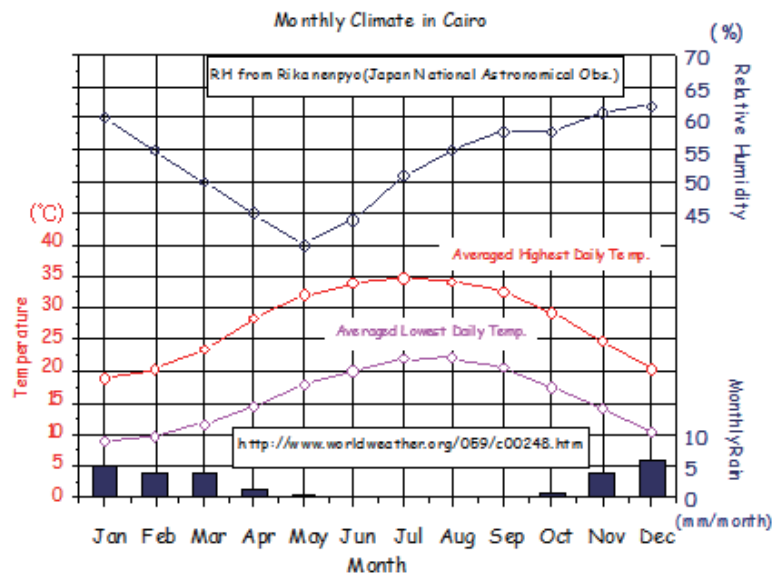


Fig.13 カイロ地区における各月平均気温および降水量

(6) 温湿度に関する考察

シャフト内部の温湿度分布を数個のシャフトで測定したが、その代表例として、シャフト 17 とシャフト A を示した。いずれの場合にも、シャフト上端部の内温湿度は、地表面付近の条件に影響を受けているが、深部においては一定値を示している。しかしながら、その一定値を示す深度はシャフト 17 においては深さ約 5m 以深であり、シャフト A においては深さ約 9m と異なっている。

Fig.7 の温度の深度分布を見ると、午前と午後では、その分布が異なる。すなわち、地表面から 5m 以深

ではほぼ一定の温度であるが、4m以浅ではシャフト地表面温度によって変化している。

掘削された遺物の保存場所としてシャフトの活用を考えるためには、シャフト内の温湿度状態を知る必要がある。シャフト内の温湿度は、シャフト内の空気流動、熱輻射、熱伝導などによると思われるが、今回のシャフト内外の温湿度計測結果によれば、比較的オープンなシャフトが外気と連続している状態の場合には、シャフト17でわかるように、温度や湿度は大きく変動するが、ほぼ、空気内の水分量は $5-10\text{ (g/m}^3\text{)}$ 程度で一定と考えられる。

深いシャフトにおいては、シャフトAにおける計測で判明したように、シャフトが閉鎖されている場合には、温度 25°C 、湿度 87% （空気水分量 $20\text{ (g/m}^3\text{)}$ ）という状態が維持されているが、シャフトが開放状態となると、地表面付近の水分の低い空気がシャフト内部の水分の高い空気と混合し、地表面付近から深さが増大するにつれて、 9 から $18\text{ (g/m}^3\text{)}$ に増大しているという計測結果が得られた。

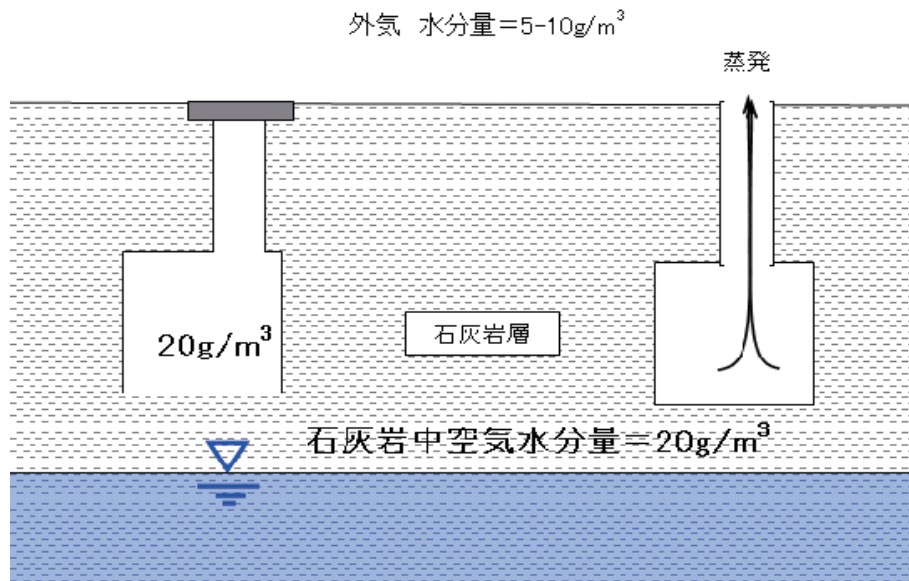


Fig.14 推定されるシャフト付近の温湿度環境条件

これらの結果から、シャフト付近の温湿度環境条件として次のように考えられる。

地下水位のレベルは不明であるが、外気空気の平均的な空気水分量は、 $5-10\text{ g/m}^3$ 程度でほぼ一定、また、地盤の主たる石灰岩層中の空気に含有している水分量は 20 g/m^3 程度で平衡状態にあると思われる (Fig.14)。

封鎖されたシャフト内の空気は石灰岩中の空気含有量と平衡の状況にあるが、シャフトの地表部が空気に開放されると、シャフト内の空気の比重が外気の比重に比べて軽い場合、シャフトの空気が浮上り、外気がシャフトに流入することで空気流動が発生すると考えられる。このようにして、水分の少ない外気がシャフトに流入すると、シャフト内の水分量は減少する。

もし、シャフトの地表面開口部が開放され続けられていた場合は、平均的に水分量の少ない外気に石灰岩内の空気に含まれている水分が移動し、さらに、地下水層から石灰岩層に水分が供給されることになる。

まだ十分に水分移動のメカニズムが解明されたわけではないが、以上のように、シャフト内部の相対湿度を決定しているものはシャフトの内壁の石灰岩層に含まれている水分の蒸発、シャフト内の水分移動であるが、これらの自然的環境のみならず、シャフト内での人間による代謝（発汗など）によるものなどがある。塩分結晶を避けるためには、相対湿度を対象とする塩化合物の限界値以上に保持する必要があるが、シャフトAにおける相対湿度は $40\% < \text{RH} < 87\%$ であった。

開口部を閉鎖した自然状態における平衡湿度は 87% が最大の相対湿度であるが、開口部を開放すればするだけ、相対湿度は低下すると考えられる。

また、シャフト内の人間の活動（人数および活動時間）は、シャフト内の温度を上昇させ、空気の化学組成を変化させるが、人間活動に関するシャフト内温湿度変化などを計測すれば、有効な対策を立てるための基本的な条件を検討することができよう。