

エジプト、ダハシュール北遺跡 発掘サイトの比抵抗構造

中川 康一*¹・岩崎 好規*²・城森 明*³・吉村 作治*⁴

1. はじめに

ダハシュール地区の遺跡発掘は、1996年の早稲田大学エジプト学研究所による予備調査に始まり、2008年、11月5日から12月6日の日程で、第16次調査が実施された。ダハシュール北遺跡はカイロ市の南約30kmのピラミッド遺跡群内にあり、トゥームチャペル(神殿付き貴族墓)とシャフト墓で特徴付けられている。ここでの地盤調査は、遺構の保全と構造物の安全性を確保するための基礎的資料を収集することが主な目的となっている。今回の調査は、早稲田大学エジプト学研究所とサイバー大学による「2008-Ⅲエジプト調査」に含まれるもので、物理探査と墳墓坑内の物理計測を主体とした地盤調査を実施したが、最初の調査であることから、詳細調査のための予備的なものとして位置づけられる。現場の計測条件を把握するために、簡単な電気探査と微動探査など、比較的軽装備で行えるものを準備した。当地域は砂漠地帯で地表が相当に乾燥していて、電気探査は困難であろうとの見通しであったが、ある程度の成果を得ることができたため、その結果について報告する。

2. 発掘サイトの地質学的背景

ギザ、アブ・シール、メンフィス、サッカラ、ダハシュールなどの遺跡群(世界遺産)は新規ナイル川河口のデルタの入口付近において、主として第三紀石灰質堆積岩および第四紀の原始ナイル川堆積物を覆う砂漠に形成された。Fig.1にこれらの遺跡群の位置を示す。また、Fig.2にはダハシュール周辺の地質図を示す。なおFig.1には、地質図に描かれている範囲を黒枠砂地で示した。これら堆積岩の基盤はこの周辺には見当たらないが、古生代から中生代に至る古い岩石がエジプト南部やスエズ湾に近い内陸部にみられ、地下深部にも存在している可能性がある。ダハシュール北遺跡は、比高が約30mの段丘の上に位置し、主に古第三紀石灰岩の上を第四紀ナイル川堆積物が覆い、さらにその上を風成砂漠碎屑物が堆積している。多数の墳墓のシャフト内観測から、発掘サイトではタフラと呼ばれる石灰岩デブリが風成砂とともに表層付近に分布し、その下位には部分的に結晶化した石灰岩をナイル川の氾濫性堆積物が覆うように分布している。この地域の墳墓の多くはこれらの地層を穿ってシャフトをつくり、地下数m~10m付近に埋葬室を形成している。

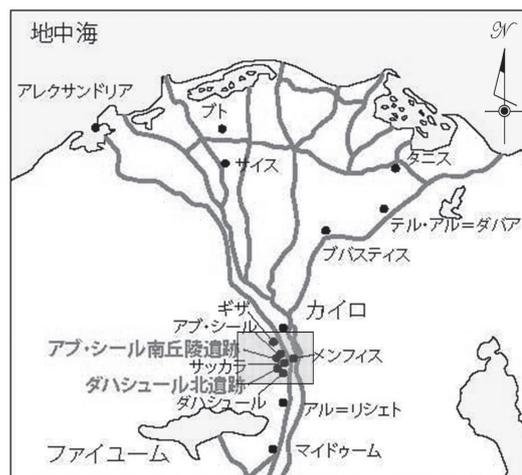


Fig.1 ダハシュール北遺跡の位置図
図中の砂目部は地質図 (Fig.2) の範囲を示す

* 1 大阪市立大学客員教授

* 2 (財) 地域地盤環境研究所専務理事

* 3 ネオサイエンス代表取締役

* 4 早稲田大学名誉教授

会社製)、100mのテイクアウトケーブル、スイッチボックスおよび電極であり、測線長は100mが2本、50mが一本で、鉄棒に銅メッキを施した電極(長さ約40cm、径約8mm)を用いた。電極間隔は100m側線では5m、50m側線では2.5mで、それぞれ1側線20電極配置となっている。

50mの側線の近傍には4本のシャフトがあり、それらのスケッチから地質構成が明らかになっていることから、地質構造と比抵抗断面の比較が可能となっている。計測には、4極法であるウエンナー法とエルトラン法を併用した(Fig.4)。砂漠地帯であるため、乾燥が激しく地中に電流が滲み込まない恐れがあったため、電極の接触抵抗を下げる目的で、電極の径より幾分大きな孔を空け、そこを塩水処理したベントナイトペーストで充たし、そこに電極を挿入した。この処理の効果は大きく、これが不完全な場合は計測不能となる場合が度々あった。計

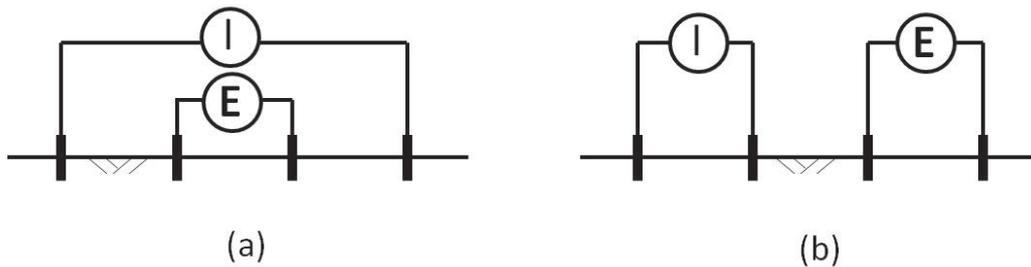


Fig.4 電極配置 (a): ウエンナー法 (b): エルトラン法
電極間隔はいずれも単位間隔の倍数



Fig.5 ダハシュール北遺跡における電気探査の実験風景
遠方に見えるピラミッドは赤ピラミッド。ケーブルは東西方向に敷設された測線 B-Line

測された見かけ比抵抗から、有限要素法および最小二乗法による2次元逆解析を行った。得られた比抵抗断面を Figs.6,7 に示す。図にみられるように、比抵抗の分布はそれほど単純ではないが、比抵抗の分布特性やその絶対値が数 $\Omega \cdot m$ から $1k\Omega \cdot m$ の範囲を示し、非現実的な値とはなっていない。

4. 比抵抗分布特性

この発掘地域一帯は古ナイル峡谷に隣接した台地となっていて、始新統～鮮新統の石灰岩が分布するが、その上に、風化した砂や石灰岩の碎屑物が1～2mの厚さで覆っている。調査地域は砂漠となっているため、地表は非常に乾燥しており、地表付近の高比抵抗分布にそれが反映されている。しかし、以下に示すように、いずれの場所においても地表下数mにもなると比抵抗は1ケタ以上低下していることが分かる。地下構造に関する地球物

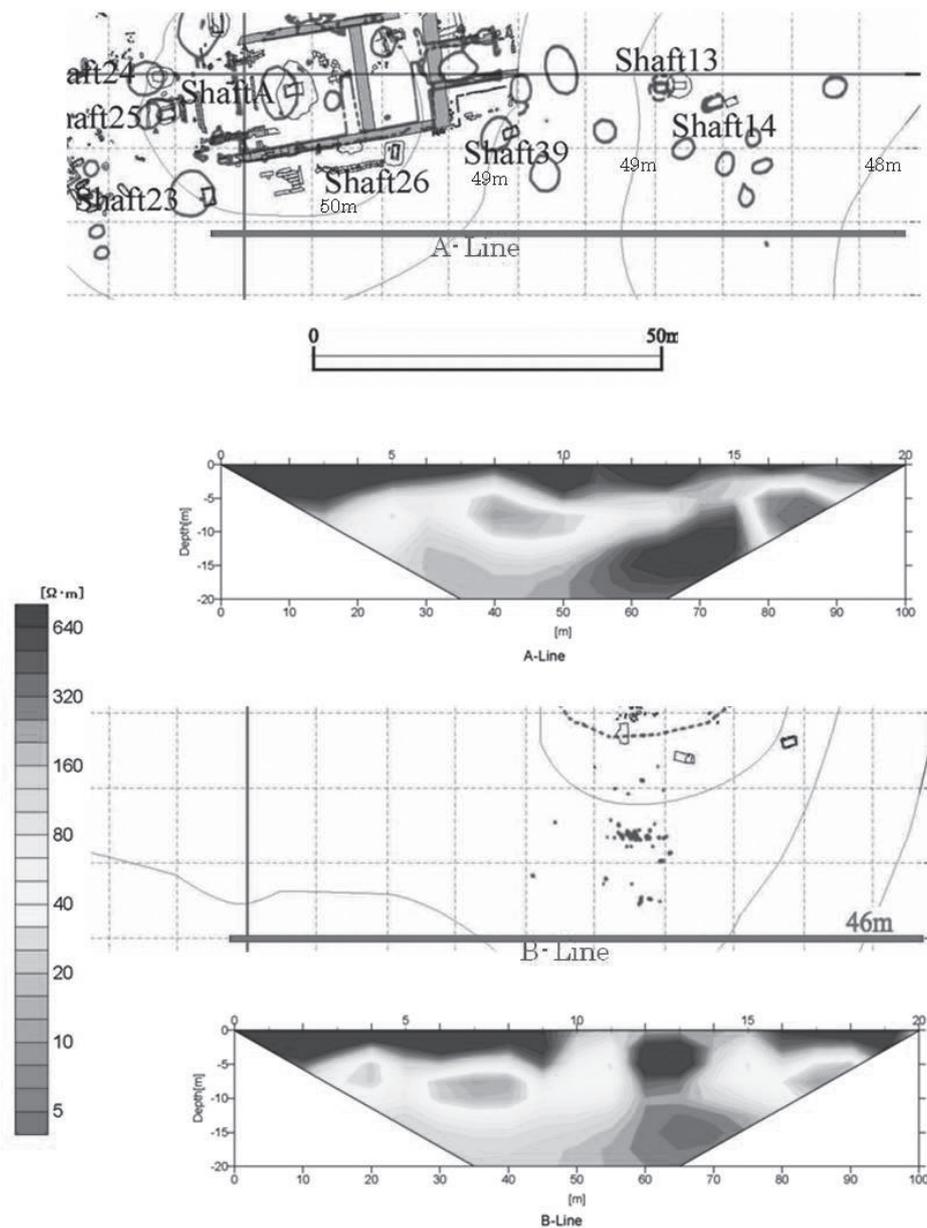


Fig.6 側線 A-Line および B-Line の位置図と比抵抗断面図

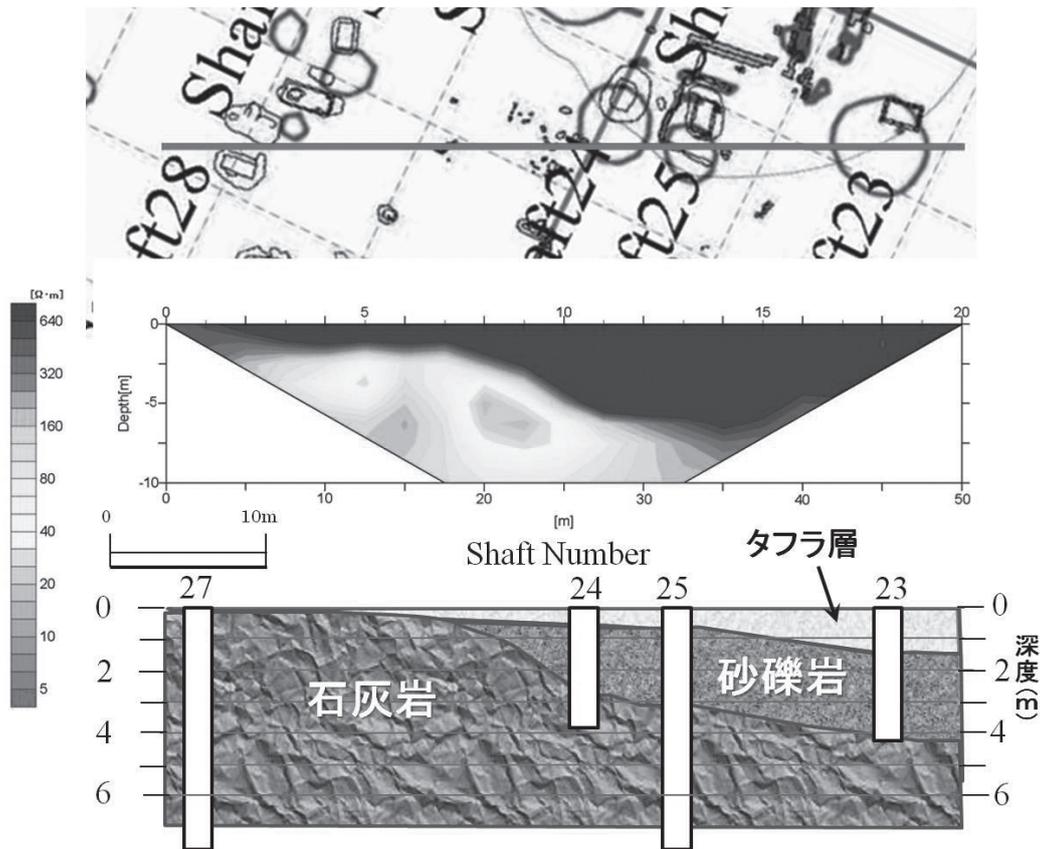


Fig.7 側線 C-Line の位置図と比抵抗断面図

理的データはほとんどないため精度の高い議論はできないが、地表面付近を除けば $100 \Omega \cdot \text{m}$ 以下となっており、通常の地盤の値とあまり変わらない。これらの一般的比抵抗は含水特性を反映している可能性が非常に高い。

側線 A および B-Line は Fig.6 に示されるように、シャフト A と呼ばれる竪穴式墳墓が存在する神殿の南縁とそのさらに約 70m 南を通る長さ 100m の東西側線となっている。これらの側線近傍には、現在までの調査で確認されたシャフトなどの地下空間は存在しておらず、それらの影響から逃れられることになるが、一方で地下構造に関する情報も得られないため、プロフィールの解釈に不確定要素を残す。A および B-Line の比抵抗断面図を、拡大した地形図とともに Fig.7 に示す。図に見られるように、地表面付近は数 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 以上となっており、乾燥によるものとみられる。また、地下 10m 付近に低比抵抗体が存在している。この低比抵抗体の上面については、地質構造の情報がないため定かではないが、地形面によく対応しているように見える。

側線 C-Line は側線 A-Line の西端から北西に 50m の長さで延びている。これに沿う比抵抗断面を Fig.7 に示す。この側線には、ごく近傍に 4 本のシャフトが存在し、それらの露頭スケッチが残されているため（たとえば、吉村他 2001）、比抵抗断面と地質構造を容易に比較できる。この 4 本のシャフトのスケッチを Fig.8 に示す。これらの図に見られるように、ここの地質構造の特徴として、側線の南東端から北西に向かって被覆層が薄くなっていく傾向が読み取れる。被覆層は最上部の砂漠風成層を含むタフラ層とその下部にあるナイル河の氾濫堆積物とみられる砂礫層から構成される。比抵抗断面をみると、低比抵抗体の上面と基盤の石灰岩の上面の形がよく似ていることが特徴的である。したがって、最上部の高比抵抗体は空隙率の大きな被覆層に相当している。これは一般の地域に存在する地盤の比抵抗特性とは対照的で、砂漠地帯の表層付近にみられる特有な現象である。また、一般には、石灰岩の比抵抗は大きいにもかかわらず、ここでは高比抵抗体を形成している。

高比抵抗部分が厚くなっている C-Line の南東部は地形的に高まりがみられ、上述した A および B-Line の特

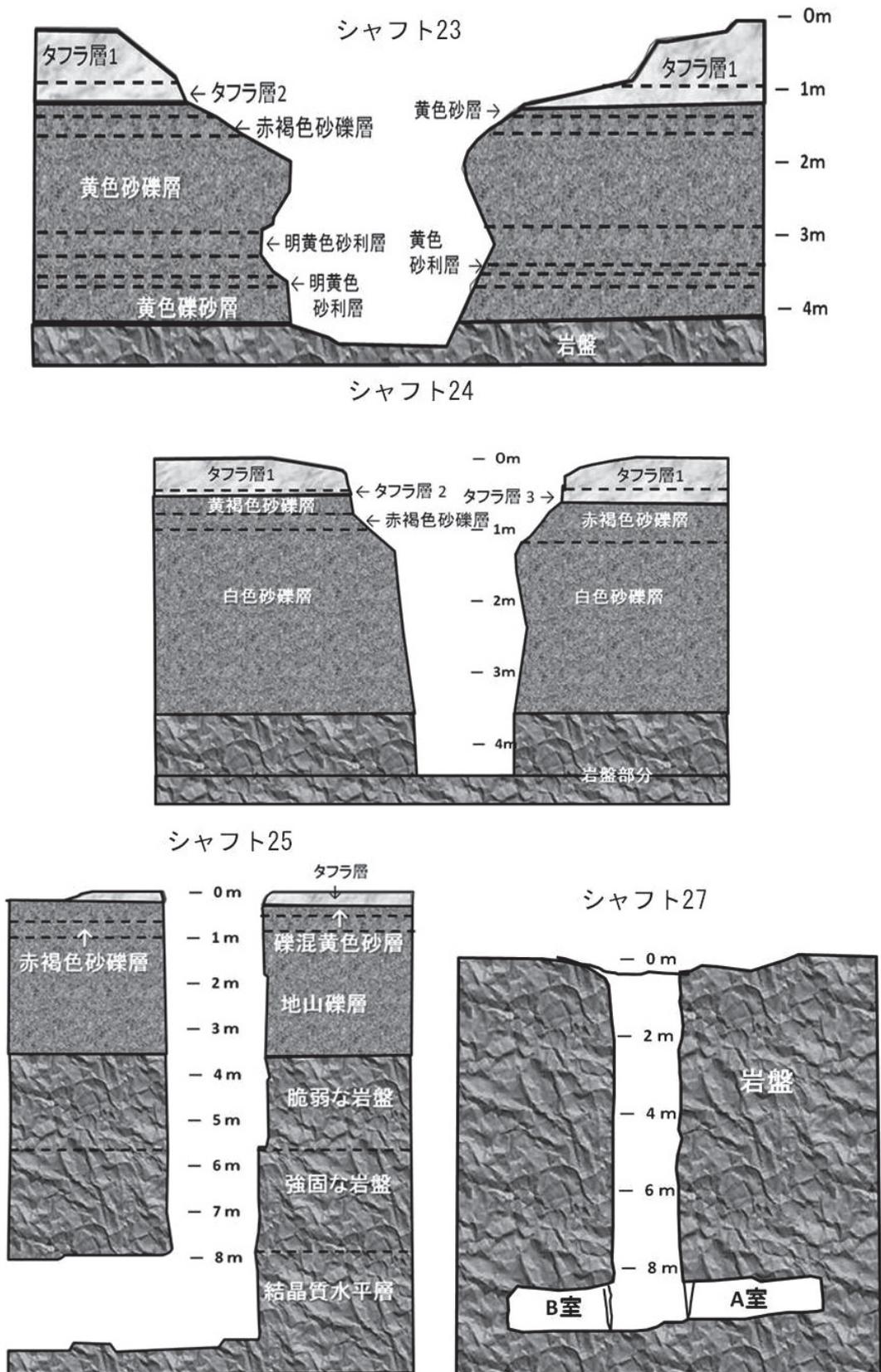


Fig.8 側線 C-Line の近傍に位置するシャフト内スケッチによる地質的記載

徴とは矛盾しているように見える。しかし、この高まりは、よくみると人工的な地形改変であることが分かる。つまり墳墓形成時に地下から排出された石灰岩の破片が溜まり積もってタフラ層を形成したものであろう。したがって、全体的な地形のトレンドは南東から北西に向かって、比高が増すような等高線配置になっていて、被覆層は基盤の窪んだ所に厚く堆積したものと考えると、地形と比抵抗分布の関係は C-Line でも矛盾しないことになる。

表層部において比抵抗はいずれも極端に高くなっていて、深度とともに低下する傾向にあり、これがいずれの断面においても普遍的であるように見えるが、さらに深度が増すと比抵抗はまた次第に増加し、結局深度数 m ~ 10m 付近で最小を示していることが分かる。これはいったいどのようなメカニズムになっているのであろうか。

地表付近で極端に比抵抗が上昇する現象は地盤中の含水率の減少と密接に対応するものと思われる。この遺跡は砂漠にあっても、地中では湿度がかなり高く、カビの発生こそないものの、金属は大変に腐食しやすい環境にあるという。Fig.9 は墳墓シャフト A 内の湿度の分布を気温分布とともに示す。図に見られるとおり、地中では気温はほぼ一定しているが、湿度は深さ 4 ~ 8m の範囲で劇的に変化しているのが分かる。これは、砂漠にあっても、地下深部から水分が十分に供給されていることをうかがわせる。しかしながら、深部の石灰岩中の水分は低空隙率のために電気伝導にそれほど貢献できないであろう。表層にある石灰岩の頂部付近を考えると、上載圧が低く、長期間高低差の大きな温度環境下におかれた場合、膨張・収縮の履歴から機械的風化が進行し、電気伝導に有効な空隙増加が見込める。また、地表面付近での間隙水の蒸発・供給の繰り返しにより、間隙水に溶存していた電解質が濃集することになり、ところによっては岩石表面に塩類が沈着することさえ観察される。したがって、今回の比抵抗分布の特性では、埋没している石灰岩の頂部が低比抵抗体として、電導を促進する役割を演じていると考えられる。一方被覆層では、大きな空隙の割にあまりにも含水比が低すぎ、連続した水分子の配列を完成できず、電荷を運ぶ有効なキャリアーとして機能できず高比抵抗になっていると考えられる。

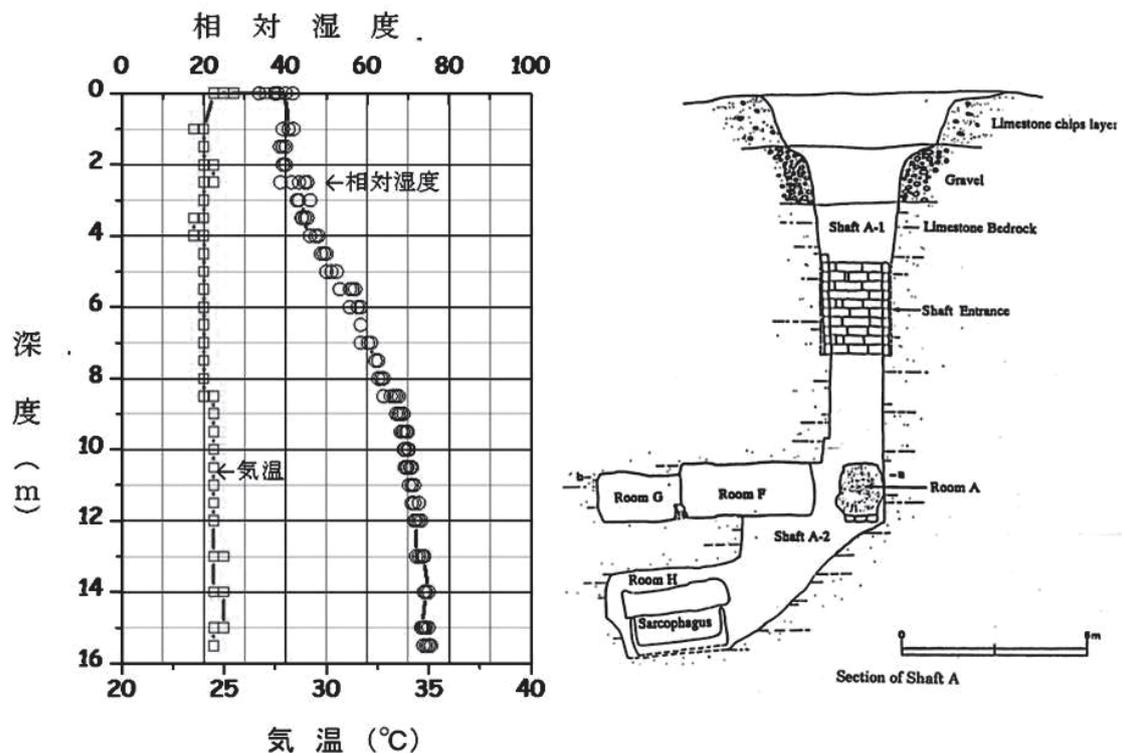


Fig.9 シャフト A 墳墓内の気温分布と湿度分布

5. おわりに

今回の調査で、砂漠でも電気探査が可能であることが分かった。今後さらに詳細な計測を実施して、地盤中の含水率分布と比抵抗の関係を明らかにし、水分の移動にかかわる遺跡の劣化問題を解決していく必要がある。

謝辞

この研究の遂行にあたり、科学研究費補助金基盤研究 (S)「エジプト、メンフィス・ネクロポリスの文化財保存面から観た遺跡整備計画の学際的研究」(研究代表者 吉村作治)の補助金の一部を使用させていただいた。また、現地における計測では、サイバー大学世界遺産学部の矢澤 健氏および早稲田大学研究員の馬場匡浩氏をはじめ多くの調査員の方々に多大なお世話を頂いた。これら関係者の方々に深く感謝申し上げたい。