

6. 地質・地盤学的研究

エジプト、メンフィス・ネクロポリスの文化財保存問題の 地質・地盤学的観点からの予察的考察

岩崎 好規*

1. はじめに

2007年度の現地調査においては2月3日～2月12日の期間で、早稲田大学の調査隊が活動しているダハシュール北遺跡を中心として、サッカラ、メンフィス、アブ・ロアシュ、カイロ東部採石場ツアーを視察した。また、地質博物館に行ってエジプトの地質図の資料に入手方法などを確認した¹⁾。

2. カイロ付近の地質

今回の予察的視察の範囲の地質図をFig.1に示した。当該地域の概説を、*A Traveler's Guide to the Geology of Egypt*にしたがって以下に行った (Sampsell 2003)。

Alluvium: ナイル川の周縁部には、ナイル川に沿う氾濫平野を構成するナイル沖積層 (Floodplain/Nile Alluvium) が広がっている。現在～1.25万年前を中心に、更新統 (Pleistocene: 1.25万年前～180万年前)、鮮新統 (Pliocene: 180万年前～540万年前)、中新統 (Miocene: 540万年前～600万年前) などの地層が広がっている。

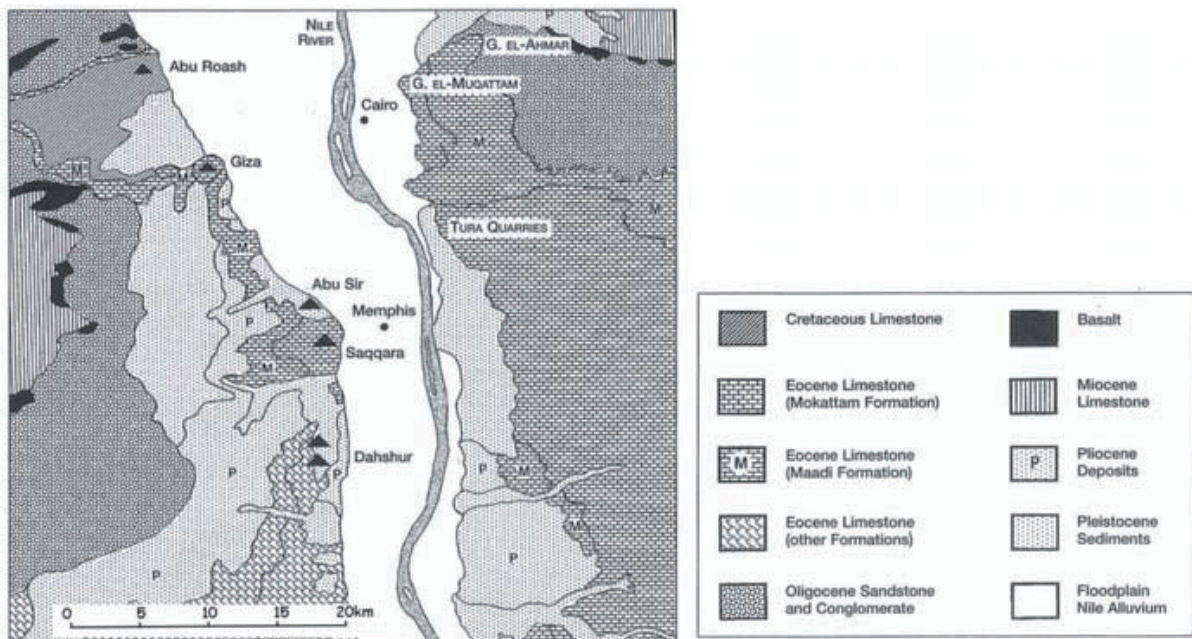


Fig.1 カイロ地区地質図 (縮尺約 1:500,000)(Sampsell 2003 より)

* (財) 地域地盤環境研究所専務理事

ナイル川周辺を含むエジプト地域の地質は、地表面に露出している岩石や、石油掘削や水井戸のために掘られたボーリング結果から次第に判明したが、それによれば、エジプトの地質は3つの地層からなる1種の岩石サンドイッチであるといえる。深部に見られる古い地質から若い浅部の地層は、①火成岩や変成岩などの基盤岩類、②中間の砂岩、そして最上部の③石灰岩である。このような地層が形成されると、その後、侵食が始まるが、海面上に露出されると特に激しい。このような侵食を受けつつ、また、新たな堆積が始まるので、ある箇所で見られるその地域の基盤岩の種類は、どのような岩が形成され、その後の侵食と堆積の過程によって変化する。

ロックサンドウイッチの中間層である砂岩層は、通常ヌビア砂岩層 (Nubian Sandstone) と呼ばれる。これは、昔ヌビアと呼ばれたエジプト南部やスーダン北の地表に見られ、8千万～9千万年前の地質時代 (白亜紀 (Cretaceous : 1億4400万～6500万年前) 後期) の堆積であるとされている。ヌビア砂岩層は、エジプト南部に見られるが、エジプト全面積の1/3の面積に渡っている。

エジプト北部においては、このヌビア砂岩層は、それより若い地層によって覆われている。頁岩 (shale stone) やチョーク (chalk) と呼ばれる白い石灰岩が見られ、これらは白亜紀に形成されたものであるので、Cretaceous limestone/shale stone と呼ばれている。

白亜紀の後の第三紀の始新世 (Eocene : 5500万年～3800万年前) の時代に非常に厚い石灰岩層が形成されて、これはサンドウイッチの最上部層となった。この石灰岩層は、エジプト中部からカイロ付近の北部までの地表に現れている。このような石灰岩は海水下の環境で形成されることから、当時アフリカ大陸の東北面にあったとされるテチス海 (Tethys Ocean) の海進によって、アフリカ大陸が海面下となったと推定されている。

また、この石灰岩の層厚は地域によって大きく変化しており、このような石灰岩の層厚変化から、白亜紀の終末時に、エジプトは南北圧縮の地殻応力を受けたためと思われる、東西方向を軸とする大きな褶曲構造を生じた結果であると考えられている。

「サンドウイッチ岩」の3つの岩層のうち、中層および上層の砂岩層および石灰岩層は、堆積岩であって水中あるいは海中で形成されるものであり、これらの岩石の形成された時代の数千万年前以降、テチス海がアフリカ大陸北端のエジプトを覆っていたと考えられる。

さらに、砂礫層の形成は陸域に近い水辺での堆積結果であることを考えると、エジプトは海によって水没したり、陸上に露出したり、堆積環境が交互に繰り返し変化していたことを示している。ヌビア砂岩層が形成された状況は、テチス海が南への海進、海退を繰り返し、エジプト南部から北部にかけて南からの砂礫が堆積したものであると考えられる。

このヌビア砂岩からわずかに残されていた花粉の分析から、当時の気候は温暖湿潤～やや湿潤の気候であったと推定されている。北に向けて移動していたアフリカ大陸の北部に位置していたエジプトは、この頃、赤道直下にあったのである。頁岩層の存在は、粘土層の堆積を意味し、厚い地層ならば深く、薄いものならば、浅い沼地や潟などでは水が動かないので小さな粒の粘土やシルトが堆積する堆積環境があったことを示している。

このように、エジプト地域が、しばしば陸化と水没とを繰り返す原因は、第3紀以降に4～5万年ごとに繰り返される氷期による海水面変動 (200mに達する) と地殻運動による上下運動の組み合わせと考えられる。

石灰岩の形成は、深い海の底で、サンゴや貝殻などを起源とする碎片が堆積して、炭酸カルシウムを主成分とする堆積岩である。石灰岩が陸化すると、酸によって容易に解けてしまい、鍾乳洞などを形成する。深海掘削船グロマーチャレンジャー号が地中海を掘削した (1970年代) 結果によると、地中海は深さ2500mの盆地状となっており、600万年～540万年前には干上がっていたとされる。現在のカイロでの地震探査によって、狭い幅ではあるが、2500mの深さがある峽谷谷地形の存在が確認された。河口から1200km上流のアスワン・ハイ・ダム地点においても、狭いが300mの深さのある谷が確認されている (シュー

2003)。

中新世の終期 (Miocene : 24.6 万年前 ~ 5.1 万年前) 以降では、アフリカ北部のエジプト地域は、ほぼ、陸化して深い海となることはなかったと考えられているが、陸化後においては、風化が進み、風化によって細粒化した地質が、ナイル川を中心とする河川流や洪水による流出によって広範囲に新しく堆積した。図 1 に示してある鮮新統 (Pliocene) から洪積世 (Pleistocene) の新しい堆積層がこれらの地層にあたる。

3. ダハシュール地点

地表地質は、Fig.1 からは更新統堆積層 (Pleistocene sediment) の若い地層で覆われている。

ダハシュール地点の地表は、未固結の砂礫層 (自然堆積かあるいは発掘によるものかは不明) に覆われている。また、シャフト A の遺構周縁にはナイルシルトを固めた日乾煉瓦があった (Fig.2)。これらの土質を顕微鏡写真で比べてみた。写真は、1mm 方眼紙 (写真の中に方眼が見える) の上に試料をそのまま載せて観察、撮影した。

Fig.3 に洪積層の土を示した。透明感のある粒子は石英で、最大の粒径は約 1mm 程度、最小で 0.1mm 程度である。角ばったものは少なく、多くは丸みを帯びている。茶褐色を呈する粒子は長石であると思われる。小さな黒い粒子も見られたが、磁石に反応がなかったので、酸化マンガンの可能性が高い。

Fig.4 にナイルシルト日乾煉瓦の顕微鏡写真を示した。シルトは、粒径が 0.06mm 以下、0.005mm 以上の土を指すが、0.06mm かそれ以上の大きさの粒子もみられる。



Fig.2 ナイルシルトの日乾煉瓦

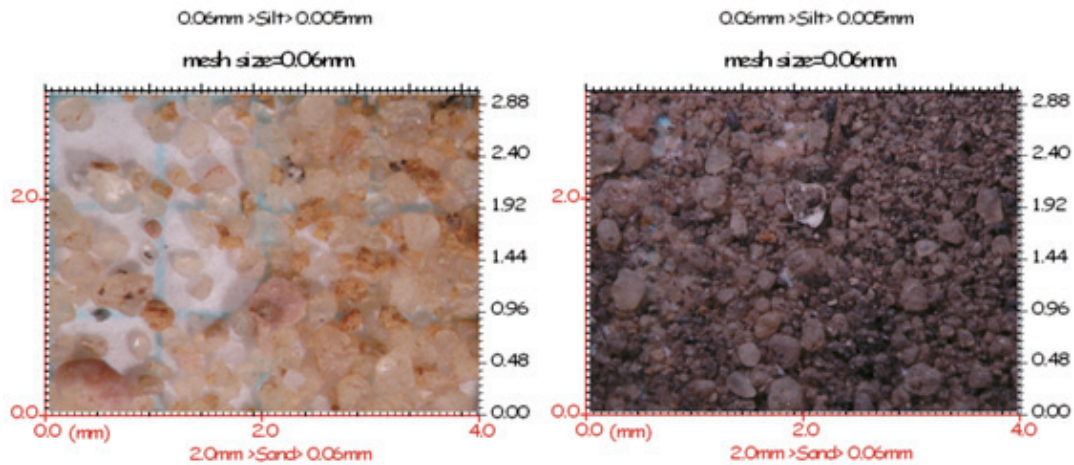


Fig.3 地表の砂層 (約 20 倍)

Fig.4 ナイルシルトの日乾煉瓦

4. シャフト A

シャフトの入口付近は、約3mの層厚で、①石灰岩破碎層、②赤褐色砂岩層の下に③石灰岩層があることが、すでに報告されている。

ダハシュール北遺跡の約7mの層厚の石灰岩層の下に、横穴遺構があり、A室からG室までの部屋がある。これらの部屋の壁をみると、赤色を呈するシルト～粘土岩の互層が存在している。さらに、斜坑を下ってH室に下りると、このシルト～粘土岩の互層が続いているが、赤色は消滅し、黄褐色を呈している。④のレベルの部屋の壁の表面は黒色となっているが、火を焚いたことに起因する煤が付着したものであるという。

A室の壁面は煤で黒くなっているが、5～10cm程度の層厚のシルト粘土岩層が互層を形成している。天井部は石灰岩層で、亀裂が数本見られる。亀裂の幅は数mm程度で小さいが、直線的に長いことは、この亀裂は構造的な原因によっていることを示している。地下に空間を掘削する前にすでに出来ていたものか、あるいは、その後形成されたのかは不明である。これらの地下室は1999年に発掘されてから、天井を木製の支保で支える工事が実施されている。すでに7年経過していることから、安定的であると考えられるが、この安定性が将来も保証されるものではない。この亀裂は、構造的であればかなり深いものであろうと考えられるが、どの程度の深さなのかも不明である。

E室においては、天井部の岩層に水平剥離層が形成されていたのか、あるいは、長いスパンの天井で中央部が重力で垂れ下がり、剥離したのか、不安定となった天井部が落ちている。

また、天井を支えている石柱は痩せ、壁の煤などが剥離しているのは、このような部分には鉛直応力が集中して、崩壊が進んだ可能性がある。

シャフトAの内部においては、壁面のところどころに、Fig.5に示すような塩類の析出を示す針状の物質の形成が見られている。シャフトAの剥落していた岩石および、シャフト103の発掘中の排土の中から採取した岩石試料の蛍光X線分析を、(財)元興寺文化財研究所の増澤文武博士のご紹介により、同研究所保存科学研究室研究員山田卓司氏に依頼して実施した(分析結果は付録に掲載)。

その結果、次のことが判明した。

①、②、および③は、シャフトA、⑤はシャフトAの最下室(H室)、④は石灰岩、⑥および⑦はシャフト103からの試料である。

蛍光X線による分析によると、石灰岩の④はカルシウム(Ca)成分が卓越し、③や⑤はカルシウム(Ca)があるが、③では鉄(Fe)成分に、また⑤は硫黄(S)成分に富んでいることが分かる。

⑦は、粘土岩であるが、鉄(Fe)成分の多いことが示されている。このように、蛍光X線分析は、エジプトの岩種の同定のための基本的な手法であることが分かる。

シャフトAの地下室の地盤工学的安定性を検討するためには、

- ・地盤力学的特性を知るためのシャフト壁面の地盤調査
- ・現状の安定性を確認するための天井の沈下量を自動的に計測するか、あるいはダイヤルゲージで読み取るかして年間計時変化を記録する。できれば、1時間1回、年間を通じての記録が望ましい。
- ・気温や湿度などの変動量も同時に計測して、天井の沈下との関連を検討する。
- ・天井の沈下量が、弾性的に挙動していれば安全であるが、クリープ的挙動が見られれば、天井の支保工を実施する必要がある。

5. ダハシュールのガス井戸

ダハシュール遺跡の入口から早稲田隊の発掘現場に至る道で、ガス採取井の設置が認められた。どの程度の採取深度かは不明であるが、通常、ガスの採取を行うと、地盤沈下が発生する。ガス採取井周辺には、1.5km

以内に3基のピラミッドが見られる。沈下の弊害がピラミッドの構造体に及ばないように、地盤沈下のモニタリング体制を実施する必要がある。

6. サッカラ階段ピラミッド

階段ピラミッドは、周囲を見て回ったが、ピラミッドに使用されている岩石自体が激しい風化作用によって、石灰岩ブロックが崩壊している。

Fig.6にその例を示したが、左側はウロコ (scale) 状になって崩壊が進んでいる状況であり、右側は層理面の結合が弱体化して風化が進んでいる。

風化の原因には、塩類析出などの化学的な原因など種々の原因があるが、ここでは、もともとの層理面に堆積した堆積物と周囲の地質の温度の膨張収縮特性が異なるために、乾燥気候地帯で見られる岩石をつくる鉱物間の結合がゆるまって崩壊する物理的風化 (physical weathering) または機械的風化 (mechanical weathering) と呼ばれるものであると考えられる。

Fig.7に階段状ピラミッドにみられる崩壊の一例を示した。トンネル状の空洞化が進んでいるが、際どい状態で安定している。緊急対応としての木製支保工を構築して、空洞の進行崩壊を防止する必要がある。

7. ウナスのピラミッドへの参道の積石擁壁

ジェセル王のピラミッド南側に、ウナス王のピラミッドがある。東側から入る参道は石畳であるが、参道の南側は積石擁壁となっている。この擁壁はかつては埋もれてしまっていたが、最近掘削したようで、積石が地表面に出ている。

ウナス王のピラミッドへの参道の南側擁壁をみると、参道に沿ってはみだしているように見える。さらに、積石の多くに縦割れ亀裂が入っている。

Fig.8に、亀裂の数例を示したが、これらの亀裂は比較的新鮮である。掘削されたための乾燥による収縮という原因も考えられるが、それほど単純なものではなく、Fig.8の左側の写真の亀裂は下に開いているし、右側の写真では亀裂の右側がやや左側に比べて、沈下している。埋没状態から解放されたための応力再配分によるものと考えるのが、自然であるが、このまま落ち着くのか、あるいは、こういう破壊が進行するのかが問題である。

亀裂の変動を計測するモニタリングを実施する必要があるだろう。

8. 結論

今回の予察は、目視を中心としたが、地盤工学的な安定のための必要な対策工を議論するためには、気象系の観測とともに、変位や亀裂の拡大/縮小のモニターの実施が望ましい。さらに、地点の地質地盤構造とその力学的特性の理解も基礎的で重要な条件である。



Fig.5 塩析出



Fig.6 階段ピラミッドにみられる石灰岩の風化（左：ウロコ状風化 / 右：層理面剥離）



Fig.7 階段ピラミッド南面の空洞崩壊



Fig.8 ウナスのピラミッドへの参道の南側擁壁の積石の亀裂

註

- 1) 調査にあたっては、長谷川奏氏（早稲田大学エジプト学研究所客員准教授）および河合 望氏（早稲田大学理工学術院客員准教授）にお世話になった。さらに、増澤文武（財）元興寺文化財研究所名誉研究員および高梨洋一郎サイバー大学世界遺産学部教授にも現地視察を同道することができ、教わるが多かった。

【付録】

ダハシュール採取岩石等の蛍光 X 線分析

これは（財）元興寺文化財研究所の保存科学研究室研究員山田卓司博士によるものである。

1. 目的

シャフトごとにおける層構造を解析する方法として、蛍光 X 線分析装置（以下、XRF）の利用が可能か検証するため、岩石の XRF による元素の同定を行った。

2. 測定装置と測定条件

装置は、株式会社セイコーインスツルメント SEA5230 を使い、モリブデン（Mo）管球、コリメータ φ1.8mm、励起電圧 45kV、真空中で X 線を 300 秒間照射した。

3. 測定方法

任意の層から採取した岩石等の蛍光 X 線分析を行い、検出される元素から違いを検証した。現地での非破壊分析を目標としているため、岩石の研磨等を行わず、測定箇所表面に X 線を照射し、表面の元素を分析した。

4. 測定結果

測定結果を以下の表にまとめる。赤字で示したのは、考察に用いた元素の XRF 強度である。

Table 1 XRF 測定結果一覧

（上表に検出された元素の性質を示し、下表に元素のラインにおける XRF 強度を示す。）

Z	元素	元素名	ライン	ROI (keV)
11	Na	ナトリウム	K α	0.92-1.16
12	Mg	マグネシウム	K α	1.13-1.38
13	Al	アルミニウム	K α	1.36-1.61
14	Si	ケイ素	K α	2.17-2.44
16	S	硫黄	K α	1.61-1.87
17	Cl	塩素	K α	2.48-2.76
19	K	カリウム	K α	3.17-3.46
20	Ca	カルシウム	K α	3.54-3.84
22	Ti	チタン	K α	4.35-4.66
23	V	バナジウム	K α	4.79-5.11
26	Fe	鉄	K α	6.23-6.57
37	Rb	ルビジウム	K α	13.16-13.59
38	Sr	ストロンチウム	K α	13.92-14.36

元素	① (cps)	② (cps)	③ (cps)	④ (cps)	⑤ (cps)	⑥ (cps)	⑦ (cps)
Na	-	-	-	-	-	8.160	8.023
Mg	-	-	-	8.364	-	-	-
Al	48.680	31.530	22.928	11.283	-	41.123	24.977
Si	180.429	209.268	149.649	50.221	-	164.934	94.101
S	21.760	14.587	15.548	19.256	203.793	37.968	31.485
Cl	57.384	26.592	14.422	14.107	-	78.684	75.890
K	18.037	20.675	23.718	-	-	14.953	10.766

Ca	18.408	201.134	881.711	1387.238	845.676	23.763	15.644
Ti	44.539	26.887	9.173	-	-	36.453	27.998
V	-	-	-	-	-	-	9.727
Fe	605.414	608.857	334.709	38.163	12.397	771.025	1815.520
Rb	27.905	24.279	159.802	-	-	27.558	16.265
Sr	132.450	56.701	15.548	197.391	-	41.095	19.806

なお、モリブデン (Mo) 管球であるため、S の強度値は Mo ピークと重なっている。

5. 考察

採取箇所の位置情報等がないため、特徴があった岩石について記述する。

①・②・⑥は検出強度にやや変動はあるものの、砂や礫等に見られるピーク比率である。②でややカルシウム (Ca) が強く、⑥でナトリウム (Na) をわずかに検出している。(ナトリウム (Na) やマグネシウム (Mg) は、XRF では検出し難く他の分析方法による検証を必要とする。)

③・④は、カルシウム (Ca) が強く検出された。対となる陰イオンは、特徴的な元素が検出されていないため、XRF では検出されない炭素及び酸素を含む炭酸イオンを主とすると考えられるが、複合的な塩 (カルシウム化合物) を形成している可能性が高いと考えられる。化合物の同定には、X 線回折等の分析が必要である。

⑤は、硫酸カルシウム (CaSO₄) が結晶化している可能性が考えられる。炭酸イオン等との複合的な塩を形成している可能性も高いため、詳細には X 線回折等で検討する必要がある。

⑦は、鉄 (Fe) が強く検出されていることから、酸化鉄を主成分とする層であることが分かった。

現在のところ、ハンディ型 XRF でカルシウムや硫黄を検出することは難しいことや定量性に問題があるため、現場での測定にはいくつかの課題が残る。例えば、現在市販されているハンディ型 XRF では、鉄を基準にした層構造解明において、鉄の検出強度のみしか測定できず、ケイ素と鉄の強度比等が議論できない等の問題が生じる。

一方、可搬型 XRF (アワーズテック製等) ならば、カルシウムや硫黄も検出でき、ケイ素と鉄の強度比も議論できるが、約 100 kg の重さ等から可動性はハンディ型 XRF に比べて格段に劣る。(山田卓司)