

## 25. ヌビア砂岩帯水層をめぐって (1)

### (1) はじめに

ヌビア砂岩帯水層系 (Nubian Sandstone Aquifer system) は世界最大規模の帯水層システムである。その分布域はサハラ砂漠の東にあって、リビア、エジプト、スーダン、チャドの4か国にまたがる広大な面積を占めている。ところでここでいうヌビア砂岩帯水層系とは先カンブリア系を基盤とし、その上に重なる古生界から下部新生界にいたる地質時代の帯水層群を一括呼称したもので、正確には Nubian Sandstone Aquifer (NSA) と Post Nubian Aquifer (PNA) に分けられる。しかし一般にヌビア砂岩というと前者、つまり古生界から中生界までの地層を指すことが多いので、ここでもその慣例に従うことにする。

さて、世界各地にはこのような複数の国にまたがる帯水層システムは数多くあり、その開発をめぐる国際紛争はこれまでもみられるが、今後はさらに増大することが予想される。今回はこのことに視点を置いたうえで、ヌビア砂岩帯水層について、考えてみることにした。なお本題に関しての筆者の現地経験はエジプトに限られるので、上記の問題にかかわる情報の偏り、あるいは認識不足があるかも知れない。ご指摘、ご教授いただければ幸いである。

### (2) ヌビア砂岩について

ヌビア砂岩の分布域は 2,200,000km<sup>2</sup> という広大なもので、そこには 150,000 km<sup>3</sup> という膨大な量の化石水が包蔵されている。

ヌビア砂岩は大陸縁辺堆積物とされ、層厚は表1のように最大 5,000m 以上に達している。堆積物はほとんど変成を受けていない砂岩、泥岩、礫岩からなり、上部には頁岩、磷酸塩質岩、石灰岩などが夾在する。地層群は水平か、やや北に向かって緩く傾斜していて、上部は主として風成堆積物によって覆われているが、エジプト西部砂漠地帯の陥没盆地の崖壁 (写真1) や風蝕性の残丘 (写真2) ではその露頭をみることができる。



写真1 ヌビア砂岩の露頭 (陥没崖)



写真2 ヌビア砂岩の露頭 (風蝕残丘)

表 1 ヌビア砂岩の層

	最少層厚(m)	最大層厚(m)
中生界		
白亜系	80	1,464
ジュラ系		835
三畳系		28
古生界		
二畳系		295
石炭系	244	732
デボン系	100	1,160
シルル系	130	150
オルドビス系	}	}
カンブリア系		
計	792	5,664

エジプト西部砂漠地域のヌビア砂岩の地質時代と、それぞれの層厚は大略表1のようになっている。

ヌビア砂岩は一般には固結度が著しく高く、写真3に見るように、完全に非帯水層の特徴を示している一方、写真4のようになんまりルーズなところや亀裂の多いところもあって、ここに殆ど更新されない化石水性の被圧地下水が存在する。

エジプトでは帯水層とされているものは大きく3~5層準に認められており、井戸は深いものは2,500mに達する。



写真3 ヌビア砂岩の近接写真（硬質部）

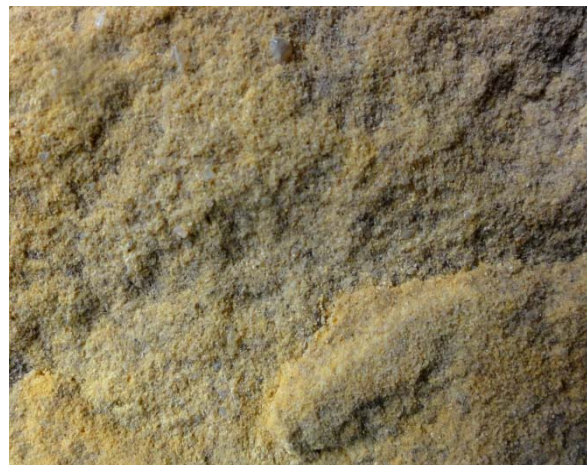


写真4 ヌビア砂岩の近接写真（軟質部）



写真5 自噴井(ダフラオアシス)

この地方の地下水開発が盛んになりだしたのは1960年代からであるが、その当時は写真5にあるような自噴井が数多く見られた。当時でも稀な例と思われるが、それらの中には写真6のように自噴高が地上40mといった途轍もなく大規模なものもあった。

このような高圧地下水を胚胎する地層が地下に伏在するという事は、当地域の地下水環境の大きな特徴といえる。

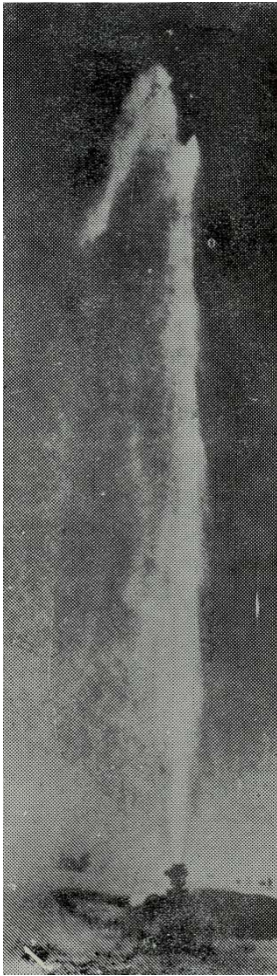


写真 5 はエジプト西部砂漠のダフラオアシス(Dakhla Oasis) の自噴井で、深さ 1,224m、自噴量 9,000m<sup>3</sup>/日、水温 41.3℃と、我が国でいえば第一級の温泉である。筆者の訪問当時、実際に沐浴を楽しむ人たちの姿をよく目にした。

写真 6 は、西部砂漠の中心部にあたるファラフラオアシス(Farafra Oasis)の自噴井で、自噴量は一日 22,500 m<sup>3</sup>以上に達した。なおこれは 1966 年に掘削されたものである。

水質は表 2 にあるように総溶解固形分が多く、地下水の滞留時間の永さを象徴している。そのまま飲んだらたちどころに腹をこわすような代物である。実は旅行中あまりの喉の渇きから、この水をつい一口飲んでしまったが、その効果はてき面で、一週間以上ひどい目に合ってしまった。

表 2 エジプト西部砂漠地帯の深層地下水の水質

	採水層	TDS	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>++</sup>	Ca <sup>++</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>++</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
ファラフラ・オアシス	上部白亜系	370	21	86	12	17	143	23	112
カルガ・オアシス	〃	800	27	89	31.6	62.4	236	104.9	95.8
〃	〃	1580	65	480	7.8	30	540	20	200
シワ・オアシス	〃	1646	-	457	14	63	535	56	517

写真 6 大規模自噴

### (3) Desert Depression と地下水

上記のように高温、高圧、高濃度といった地下水の性格を規定している地質・地形環境と、そこでの地下水の動態はどのようなものなのであろうか？このことに関係すると考えられるいくつかの事象を整理してみる。

#### a) Desert Depression について

砂漠のオアシスの典型は Desert Depression にみることができる。成因や地形は多様で、playas, pans, flats, dayas, deflation basins などさまざまなものがある。

図 1 には主な成因 3 つが示されている。上が構造運動によるもの、中が溶解—陥没、下が風の作用に

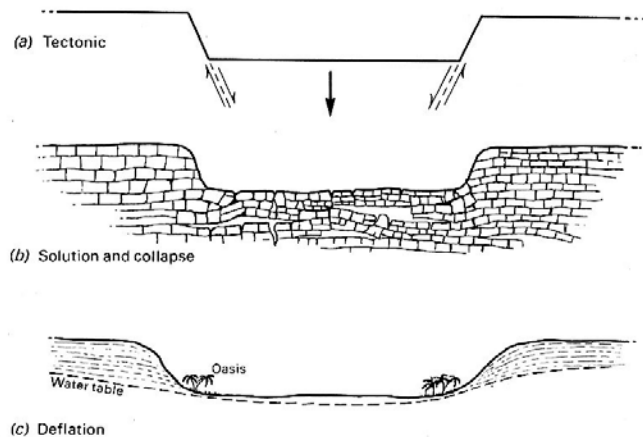


図 1 Desert Depression の成因

(Andrew Goudie and John Wilkinson(1980) :

The warm desert environment による)

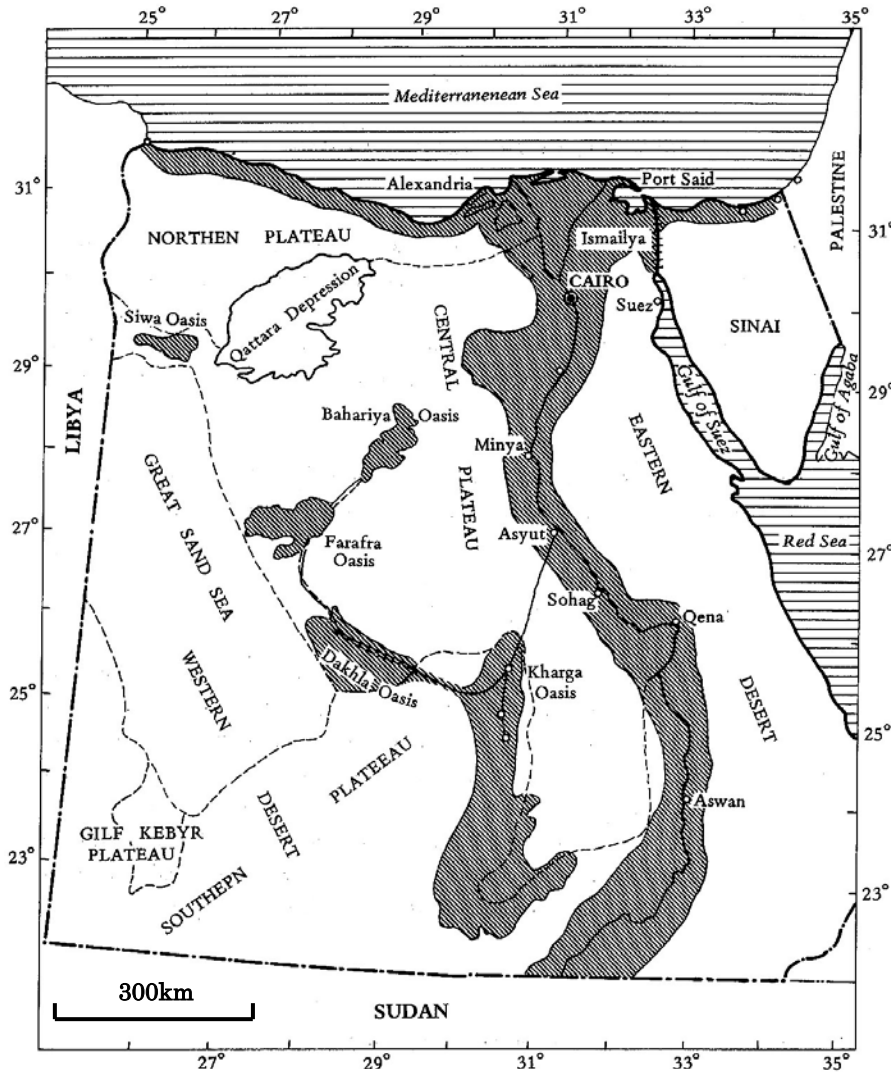


図2 エジプト西部砂漠地帯の Depression

よるもの、である。エジプト西部砂漠にある Depression (図2) はその規模と形態からみて構造運動による陥没、と考えられるが、一部には溶解による陥没も存在する可能性もある。なお中には風成による小規模の Depression も存在し、陥没型の Depression に重合するかたちになっているものと考えられる。

いずれの成因に依るものとしても砂漠の Depression の存在はその地下水動態に重要なかわりを有している。

b) オアシスの世界

エジプト西部砂漠地帯のオアシス群は基本的には上記のように陥没型の Desert Depression と考えられるが、ほかにナイル川の旧河跡にその起源を有するという考えもあるようである。あるいはその両者は一体的とも考えられる。筆者はこのような地形をイエメンや UAE でも見てきたが、エジプトのものは規模が大きく、その自然のありさまは感動的である。その中のカルガオアシス、ダフラオアシスへの旅を以下に紹介する。

エジプトの首都カイロからナイル川に沿って遡り、Asyut (アシュート) で分かれて西に向かい、西部砂漠地帯に入ると、その先はどこまでも続く岩と砂の荒漠とした台地が展開する。また所々にヌビア系からなる山や丘を見る。4時間以上もひた走りに走って、夜9時過ぎにようやくカルガオアシス (Kharga Oasis) の入り口に到達する。そでの厳しい検問を受けたのち、デプレッションの急坂を幾重にも曲がって下り、ようや

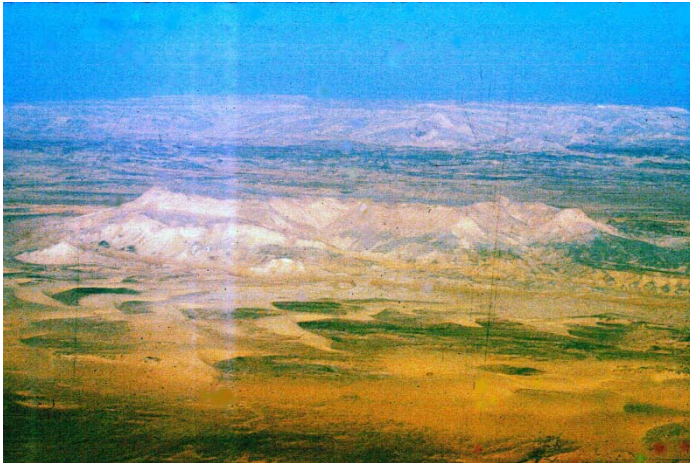


写真7 カルガオアシスの俯瞰 (遙か彼方が陥没崖)

くオアシスの世界に到達する。陥没崖の高さは、300m 以上はあろうか (写真7)。

カルガオアシスは南北に細長く、160 km以上もあるから東京から静岡までを優に超える。一方ダフラオアシスはこれと直交したかたちに東西に長く、80 kmほどで、その北縁は石灰岩質岩石からなる見事な陥没崖によって限られている。これらの中には小さな Depression が幾つもある。

それぞれが写真8のようにオアシスをかたちつくっていて、そこには自然の湧き水 (図3の着色部分) や、それをめぐる人々の生活がある (写真9)。中には昔の掘り抜き井戸も存在し (写真10)、ヌビア砂岩帯水層の被圧面が Depression 面より高いことを示している。



写真8 オアシスの湧き水と水路(ダフラオアシス)

オアシスにはかなり古い時代のものと思われる廃墟が存在する (写真11)。恐らく塩分濃度の高い湧き水による灌漑が続いて耕作不能となり、人々はその地を離れたのかもしれない。



写真9 オアシスの世界 (ダフラオアシス)

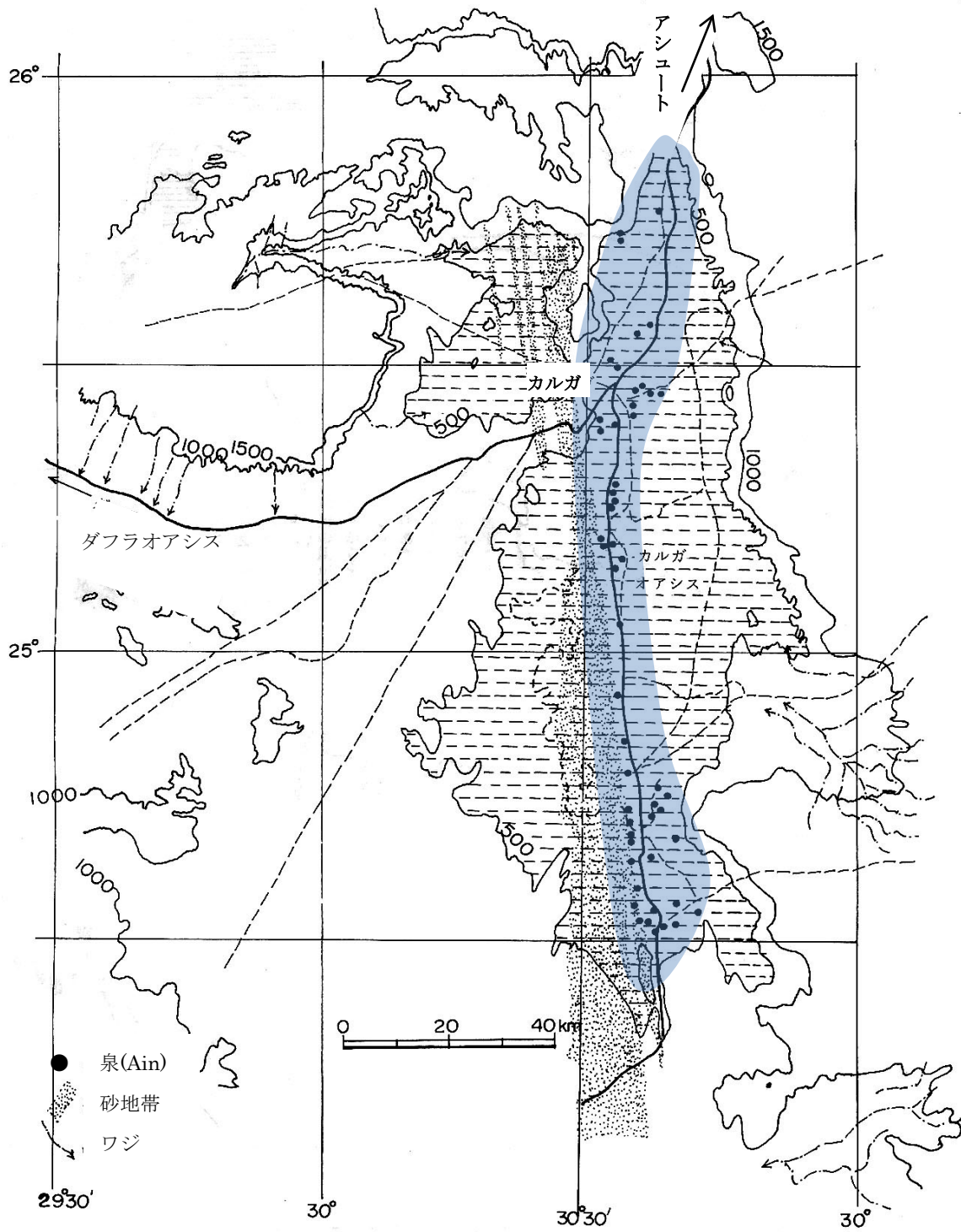


図3 カルガオアシスの地形と湧水

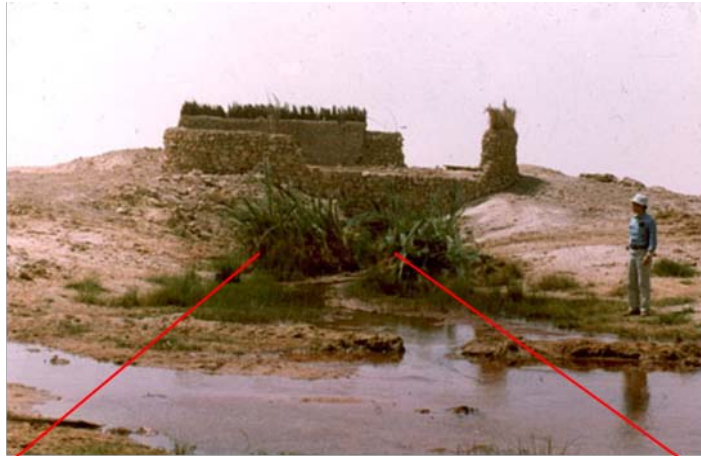


写真 10 オアシスの中の自噴井  
(カルガオアシス)



写真 11 オアシスの中の廃墟  
(カルガオアシス)

日干し煉瓦を積んで囲ってある中に下の写真にあるような自噴井がある。この井戸が新しいものではないことは、そのケーシングとして、二つ割りにされたナツメヤシの幹を削り貫いてつくられた筒が挿入してあることから理解できる。案内の人に聞いてみたが、この井戸の詳しいことは知らないという。もちろん深さなどは分からない。筆者の想像であるが、人力で掘ったものであるから、そんなに深いものではなく、せいぜい数十メートル、つまり砂丘砂の厚さぐらいであろう。

その下には多分湖沼成の粘性土層があり、これを突き破ることによってその下にあるヌビア砂岩帯水層の被圧地下水を自噴させたものであろう。この工法はたまたま、エジプト北部のサルヘイヤ地区でみた原始的な井戸の掘り方から類推したもので、サンドベイラー (sand bailer) と我が国江戸時代の“揉み貫き井戸” 様の工法を組み合わせたようなものと思われる。なおこの自噴水は垂れ流しで、現在はあまり利用されているようには見えなかった。

廃墟前面の水は灌漑地の塩分土壌を再生するためにリーチングした水が溜まったもので、塩分濃度が極めて高い。このような溜め池はこの地方の各所で見られる。なお手前のマウンドは墓地遺跡。

c) ダフラ (Dakhla) オアシスにみる人と地下水

ダフラオアシスはエジプト西部砂漠地帯にある 7つのオアシスのうちのひとつで、ナイル川から西へ 350 km離れたところにある。東西 80 km、南北 25 kmと細長く、その北縁は高さ 500m を越える陥没崖に限られていて、その先は石灰岩からなる標高 1,000m 以上の丘陵性の台地がオアシスを縁取るようにして東西に続いている (図 4)。

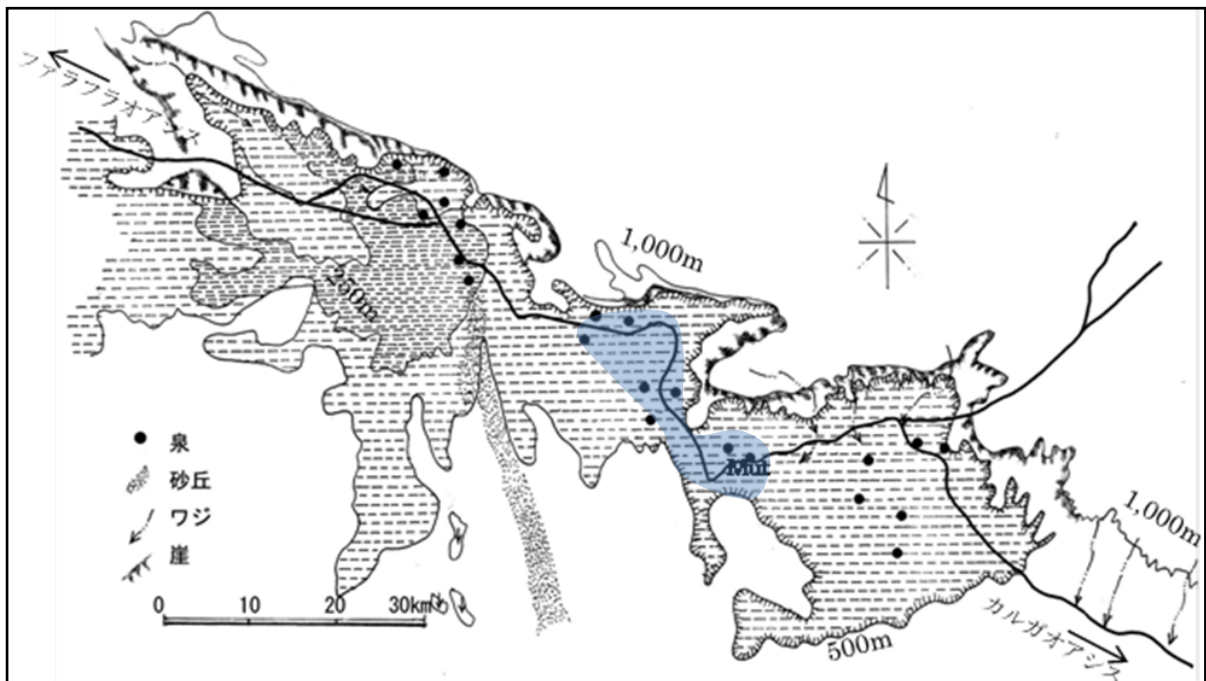


図 4 ダフラオアシスの地形と湧水

(陥没崖の麓に沿って湧泉が並んでいるのに注目。着色部分は深井戸密集地帯、図 7 参照)



写真 12 ダフラオアシスにみる涸渴した湧水群の跡

(かつては 700 箇所を数えたというが、現在はその殆どは涸渴した)

このオアシスからは 15 万年前とされる人骨化石が発見されていることから、この地に人間が住み着いたのは非常に古い時代と考えられている。下って紀元前 2500 年ごろのファラオの時代にはこの地方もその版図にあったということであるから、かつては人間の生存を拒絶するような乾ききった世界ではなく、水が得やすい環境にあったものと思われる。実際その痕跡は



写真 12 の湧水群跡に見ることが出来る。なお先史時代にはこの地域に巨大な湖も存在したといわれ、また付近の露岩には新石器時代のものとされる、象、バッファロー、シマウマ、ダチョウなどの岩画が刻まれている。

この湖や湧水は時代を経るにしたがって枯渇し、人々は水を求めてナイル川方面に移住したが、一部がここに留まり、現在のオアシスの先住者になったというわけである。

地下水位の低下を追って、ここでは独自の取水方法が考案されたという。“Saqiya”と称するのがそれで、図 5 のように水平に回る歯車を水牛に引かせ、その力を鉛直方向に回転する歯車に伝えて、これに取り付けた粘土製の壺によって水を汲み出すというものである。

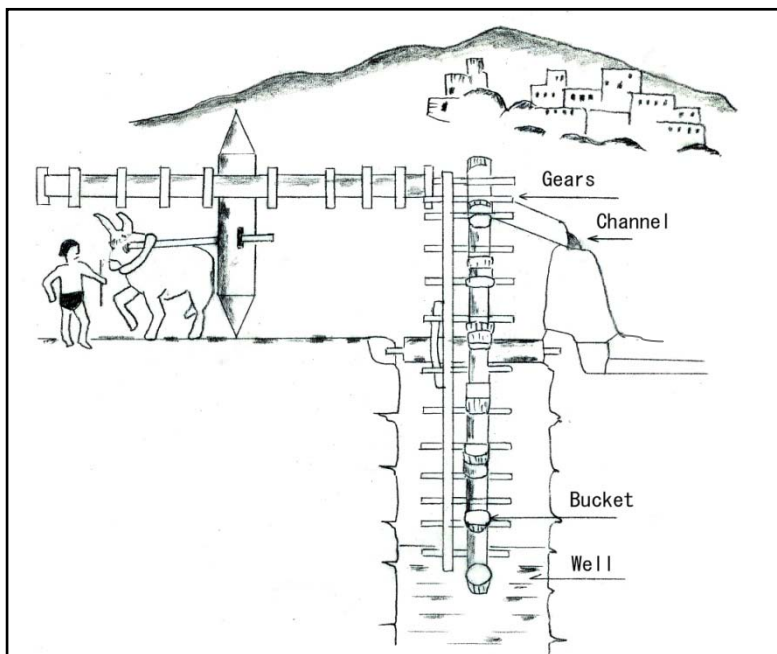


図 5 Saqiya の概念図 (筆者加筆)

(Randall.Fegley(2004): The History of Water Pumping による)



写真 13 ナイル川沿岸の水路から灌漑地への灌水作業

面白いことにナイル川沿岸の灌漑地でも、写真 13 のように水汲みの部分が進歩しただけで、同じような構造のものが今日でも使われている。上述のように、そのルーツはこのオアシスにあるのだろうか？

地下水位の低下は大深度掘削機 (写真 14) の導入とともに始まり、井戸数の増加、掘削深度の増大とともに加速化してきた。

2007 年の資料によればこのオアシスの井戸数は 238 本を数え、そのすべてがヌビア砂岩帯水層から取水している。井戸深度は浅いもので 200m、深いものでは 1,200m 以上に達している。総揚水量は日量 51 万  $m^3$  で、1 井戸あたりの平均は 2,150 $m^3$  という値である。これは我が国の深井戸に比べて大きな値と言える。



写真 14 ダフラオアシスにみる大深度掘削機  
(新規開発の大規模農地。前方の陥没崖は石灰岩)

図 6 は大深度掘削機による地下水開発が盛んになりだした 1960 年代の水位低下状況を示したものであるが、すでにこの時点でオアシス中央部での激しい水位低下が始まっている。

この傾向は現在に至るまで続き、特にオアシス中央部の井戸密集地帯での顕著な“ラップ状”の水位低下域(図 7)の存在に引き継がれている。

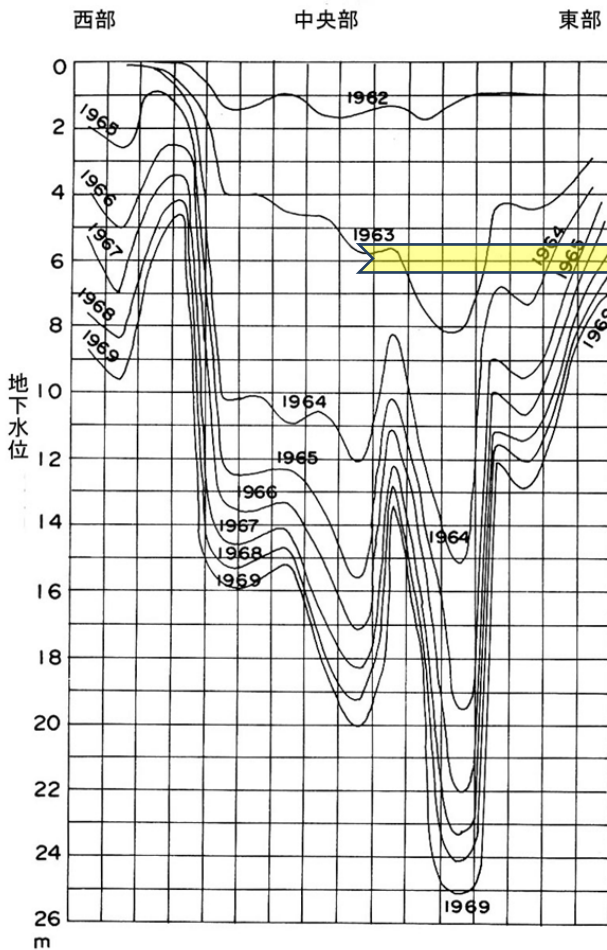


図 6 ダフラオアシスの地下水位低下状況

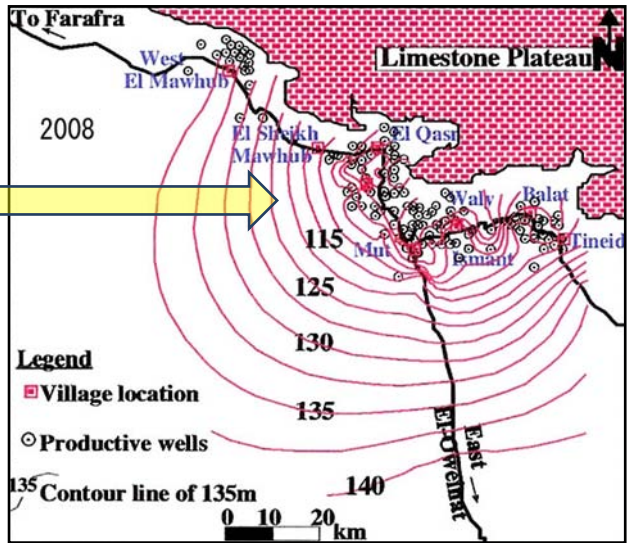


図 7 井戸密集地帯の水位低下状況 (図 4 参照)  
(Gad M. I, A. E. El Sheikh and El Osta. M. M. (2011) :  
Optimal management for groundwater of Nubian aquifer  
in El Dakhla depression, Western Desert, Egypt による)

この地域の地下水位は 1960 年代にはじまる地下水開発以来低下し続け、総低下量は 30m 以上に達している。



写真 15 灌漑地の塩分集積とリーチング



写真 16 リーチングの水が集まって出来た塩湖  
(周辺は堤防で囲ってある)

地下水による灌漑地の面積は年々増大し、現在は  $100 \text{ km}^2$  に達しているものと思われる。

灌漑は農地の疲弊、衰退に繋がるといわれているが、その現実には筆者が現地を訪問した 30 年前にはすでに始まっていた。問題は塩分集積と“人造塩湖”の出現である。(写真 15、16)

なおここで言う“人造塩湖”とは塩分が集積して耕作不能になった土地を再生するために塩分をリーチングした水が窪地など集まってできたものを指しているが、中には巨大なため池を造って大掛かりに行っているケースが見られる。筆者が訪れた時は大規模なリーチング排水が行われ始めたばかりのことであったが、現在はこれが巨大な塩湖に成長した(写真 17、18、19)。

湖底に沈積してできた塩の層が不透水層の役割を演じているため、このような現象が生

じたものと思われる。

リーチングのために使用される水も勿論地下水であるから、乾燥地農業では地下水を余計に消費し、灌漑水路の他に排水路も造らなければならないという 2 重苦が伴うことになる。これらの軽減策として、エジプトでは 30 年以上も前から点滴栽培(写真 20)や、耕地整理に合わせた多孔質の排水パイプの設置工事(写真 21)を積極的に進めていて、エジプト人気質の一端を現地にみた感じがした。

さて、先にヌビア砂岩帯水層の地下水は高温だということを述べたが、旅行ガイドによると、ダフラオアシスには温泉源が 600 を数えるといわれ、それを利用した温泉リゾートが最近この地に出現した(写真 22)。これはオアシスを訪ねる観光客に人気があるということだが、地下水資源の枯渇と、塩分集積に拍車がかかるのではないかと懸念される。



写真 17 巨大な人造塩湖 (ダフラオアシス)



写真 18 ポンプ機場



写真 19 リーチング水の排水口



写真 20 節水農業としての点滴灌漑  
(ダフラオアシス)



写真 22 オアシスに出現した温泉リゾート  
(ダフラオアシス)



写真 21 リーチングパイプの設置  
(ダフラオアシス)