

## 26. ヌビア砂岩帯水層をめぐって (2)

### (4) ヌビア砂岩帯水層(NSA)の広域地下水系

前号の最初にヌビア砂岩帯水層系 (Nubian Sandstone Aquifer System=NSAS) について触れたが、以下にこれについてやや詳しく述べておくことにする。

ヌビア砂岩帯水層系は下位、かつ広域に分布するヌビア砂岩帯水層 (Nubian Sandstone Aquifer =NSA)と、その上位で分布が北部 (地中海側) に限られる後ヌビア帯水層 (Post Nubian Aquifer=PNA) の2者から構成される。もちろん地下水資源としては前者が重要な位置を占めている。

両者は図8の模式図にあるように、下流側ではNSAとPNAを限る低透水性層 (上部白亜系～下部第三系)の存在によって上下に分離されるが、水理的には連続していて、被圧性の高い下方から上方に向かって地下水が漏出するかたちとなっている。なおヌビア砂岩帯水層は図にあるように南部では不圧性であるが、北部では被圧性を示す。先に紹介した高圧地下水はこのような構造を反映したものである。

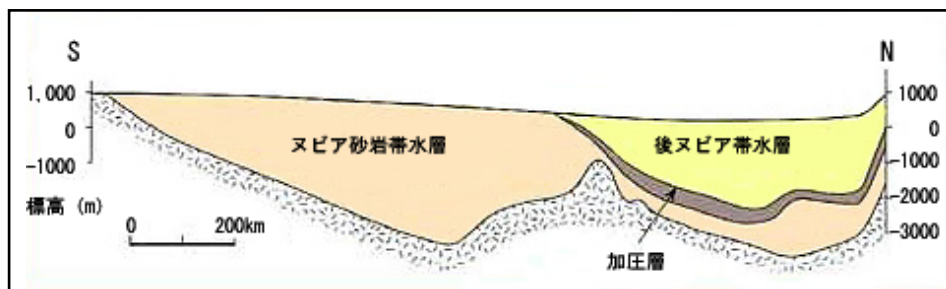


図8 ヌビア砂岩帯水層系の模式図

(Bakbakh, M. (2006): Nubian Sandstone Aquifer System による)

ヌビア砂岩帯水層系の殆どすべてについて云えることだが、そのおもな涵養は第四紀後期 (更新世～完新世) の多雨期にあつて、それ以外には殆ど行われないうまま現在に至っている。すなわち C<sup>14</sup>年代などからヌビア砂岩帯水層系の地下水の大半は 10 年以上のもものとされ、さらに深い帯水層のものでは 200 万年に達するであろうといわれている (Himida 1969 cited in Zektser / Everett 2004, 221)。

ヌビア砂岩帯水層(NSA)における広域地下水系は、写真22の衛星画像、図10に図示の諸情報から、明確に把握することができる。すなわち、最上流に位置する閉鎖湖のチャド湖や周辺の干上がった湖のあるチャド盆地は独立した一つの地下水盆を形成し、他はリビア側、エジプト側、スーダン側に向かって大きく3つに分かれる地下水系が推定される。それらの分水界にあたる場所が涵養域になるが、その年間降水量は 20～50 mm、あるいはそれ以下で、水収支上ヌビア砂岩帯水層への流入は殆ど無視できる量といつてよく、したがって自然流出も限られている。言い換えれば図9にみる地下水状態は上記の多雨期以降現在に至るまで平衡に達していないと云える。

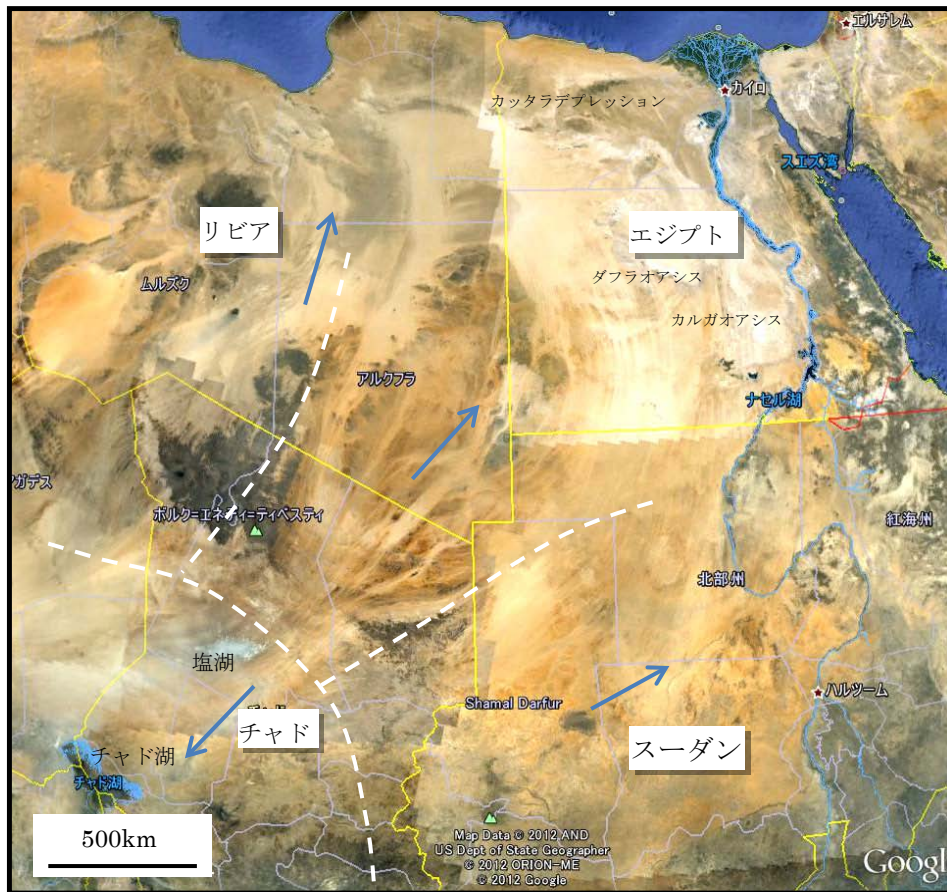


写真 22 衛星画像から読み取れるヌビア砂岩帯水層の広域地下水系

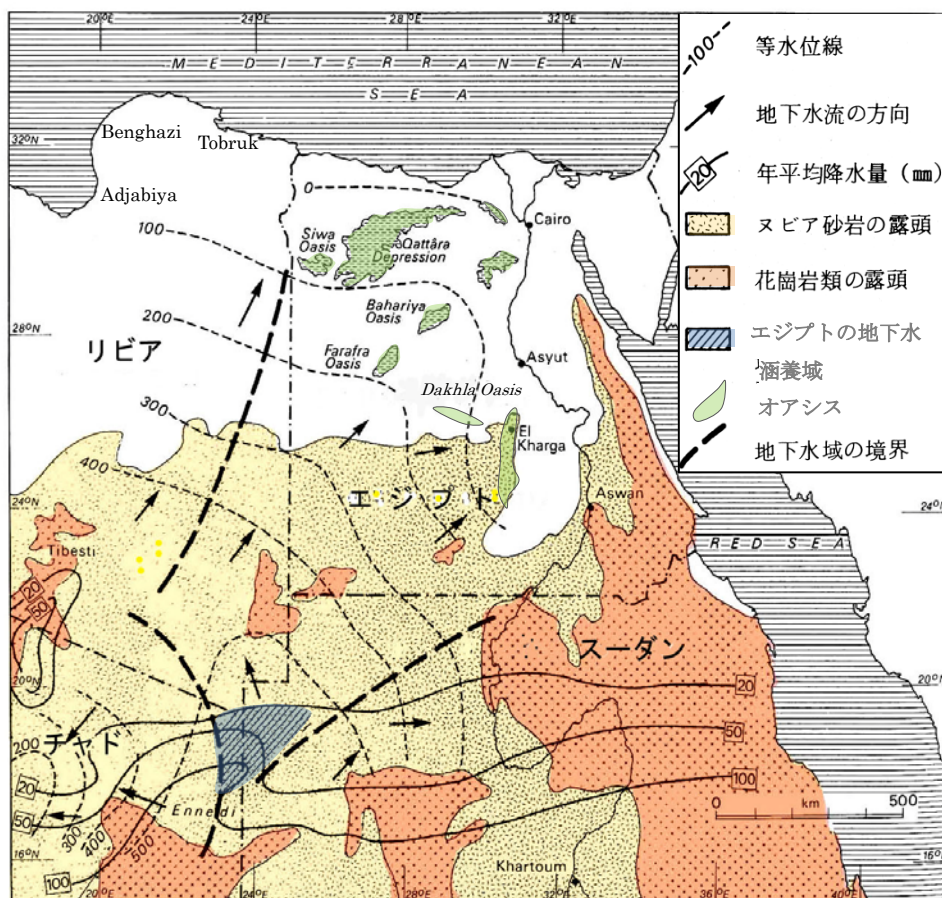


図 9 ヌビア砂岩帯水層の分布と地下水の流動状況及びその地下水流出域（オアシス）  
 (Andrew Goudie and John Wilkinson(1980) : The warm desert environment に一部加筆)

エジプトからリビアにいたる地中海沿岸地域を例とし、このことについて考えてみる(図10)。この辺りの沿岸部は石灰質砂州、ワジ、プラヤ、サブカに堆積する第四紀層からなり、その背後には新第三系の砕屑岩と、その上部に堆積する石膏、炭酸塩岩類からなる台地が広がる。ここにローカルな地下水の流れがあって、地中海沿岸部にみる数多くの泉の水を支えている。

ヌビア砂岩帯水層は、これらの地下にあって、その地下水はカタラデプレッションから西へ、シワオアシス、アル・ジャグブープオアシスと東西に配列する陥没盆地群に向かって流出するかたちとなる。これらの陥没盆地は、かつては淡水を湛えていた時代もあったが、現在は一部を除いて水面を見ることはない。リビア側にも無数の小さな盆地やワジが分布しているが、いずれも干上がったものばかりである。このように、後ヌビア帯水層を含むヌビア砂岩帯水層系の地下水は、上記の地域<sup>脚注)</sup>でその大半が蒸発によって失われることになり、特に広大なカタラデプレッション地域にはそれに起因する地下水面のシンクが形成されている(図11)。その最低部は海面下90mに達している、地下水質は東部から西部に向かって、brackish→saline→hyper saline と変化する傾向が認められ、ナイルデルタ方面からの地下水流入が示唆される。

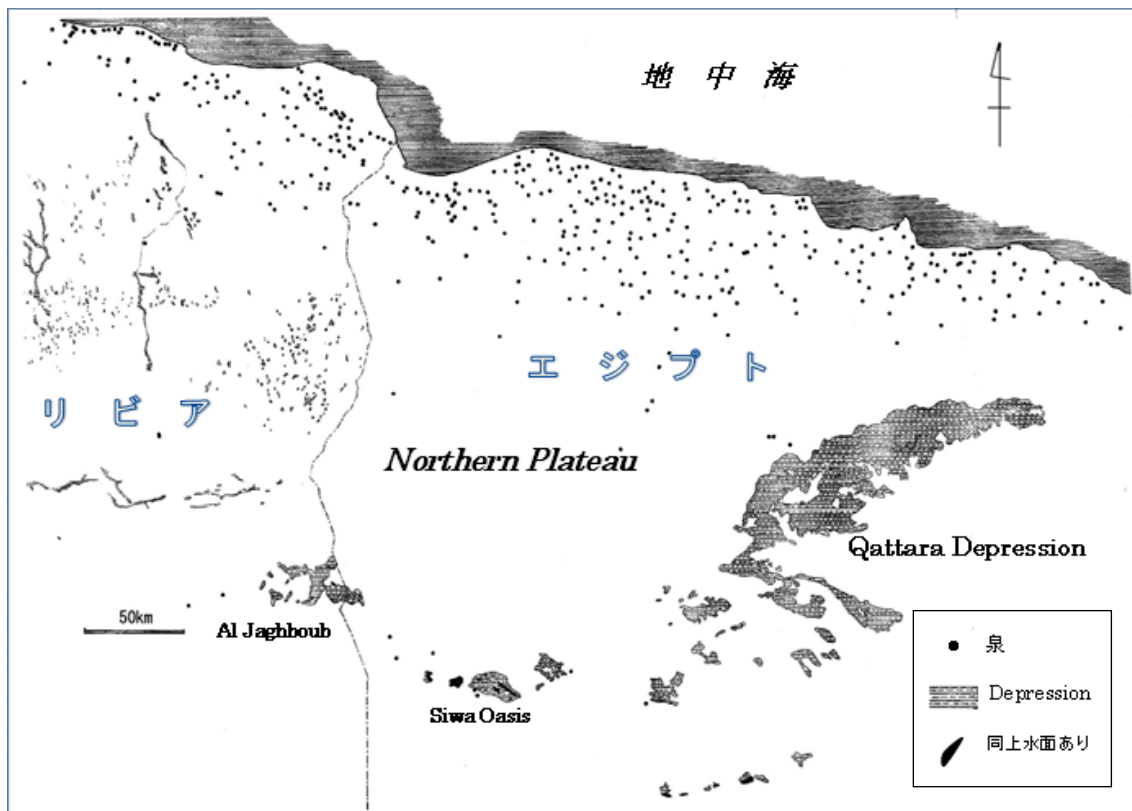


図10 地中海沿岸地方のデプレッションと泉  
(新藤静夫原図)

脚注：エジプトのカイロからリビア西部のアジャビヤ(Ajabiyah)にいたる地中海沿岸地域を指す。

FAO Corporate Document Repository ; Groundwater Management の中で、この地域を指した、“The large and deep evaporative area” の表現が目を引く

なおカッタラデプレッションは広大な面積と、海拔-133mという地形の特徴を活かして、地中海から海水をトンネルによって導水し、落差を利用して電力を得ようという壮大な計画が昔からあるが、その一方で本来の水循環系の変化に伴うマイナス面も問題にされている。

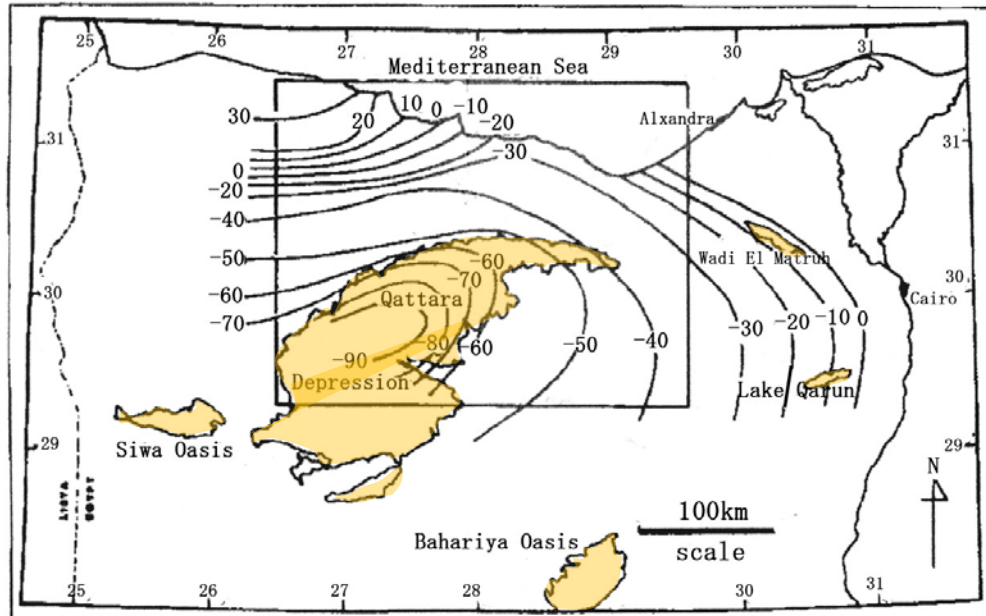


図 11 カッタラデプレッション地域にみる後ヌビア帯水層の地下水面シンク  
(Zein S.Rizk and Arden D.Davis(1990) : Impact of Proposed Qattara Reservoir on the Moghra Aquifer of Northwestern Egypt による)

#### (5) ヌビア砂岩帯水層をめぐる諸問題

図 12 はヌビア砂岩帯水層系の水文地質構造と広域地下水系のモデルにエジプトおよびリビアで進められている“巨大水プロジェクト”の位置を重ね合わせて示したものである。エジプトにおけるプロジェクトは西部砂漠開発計画 (New Valley Project) として 1997 年にスタートしたもので、ナセル湖の完成を契機としており、またリビアにおけるプロジェクトは大規模人工河川計画 (The Great Man-Made River (GMR)) として 1984 年にスタートしたもので、南部リビアの砂漠地帯で発見されたヌビア砂岩帯水層系の淡水地下水を水源とした大規模水供給計画<sup>脚注)</sup>を主たる目的としている。このような巨大プロジェクトがいずれ地下水の様態に変化をもたらすことは大いにあり得ることで、そのことを懸念する意見も多く出されている。またそれだけに留まらず、図 12 にあるように、ともにヌビア砂岩帯水層系の地下水を対象としているため、国境を越えた地下水 (Trans-boundary Aquifer) 紛争も懸念されている。

人為営力による地下水の様態変化は、水循環の時間スケールの短縮、また空間スケールの拡大を意味する。このような視点から、まず上記 2 つの巨大プロジェクトが抱えている問題を整理し、最後に今後の課題について考えてみたい。

脚注：大規模灌漑、工産業、生活水の確保を目的としたもの。

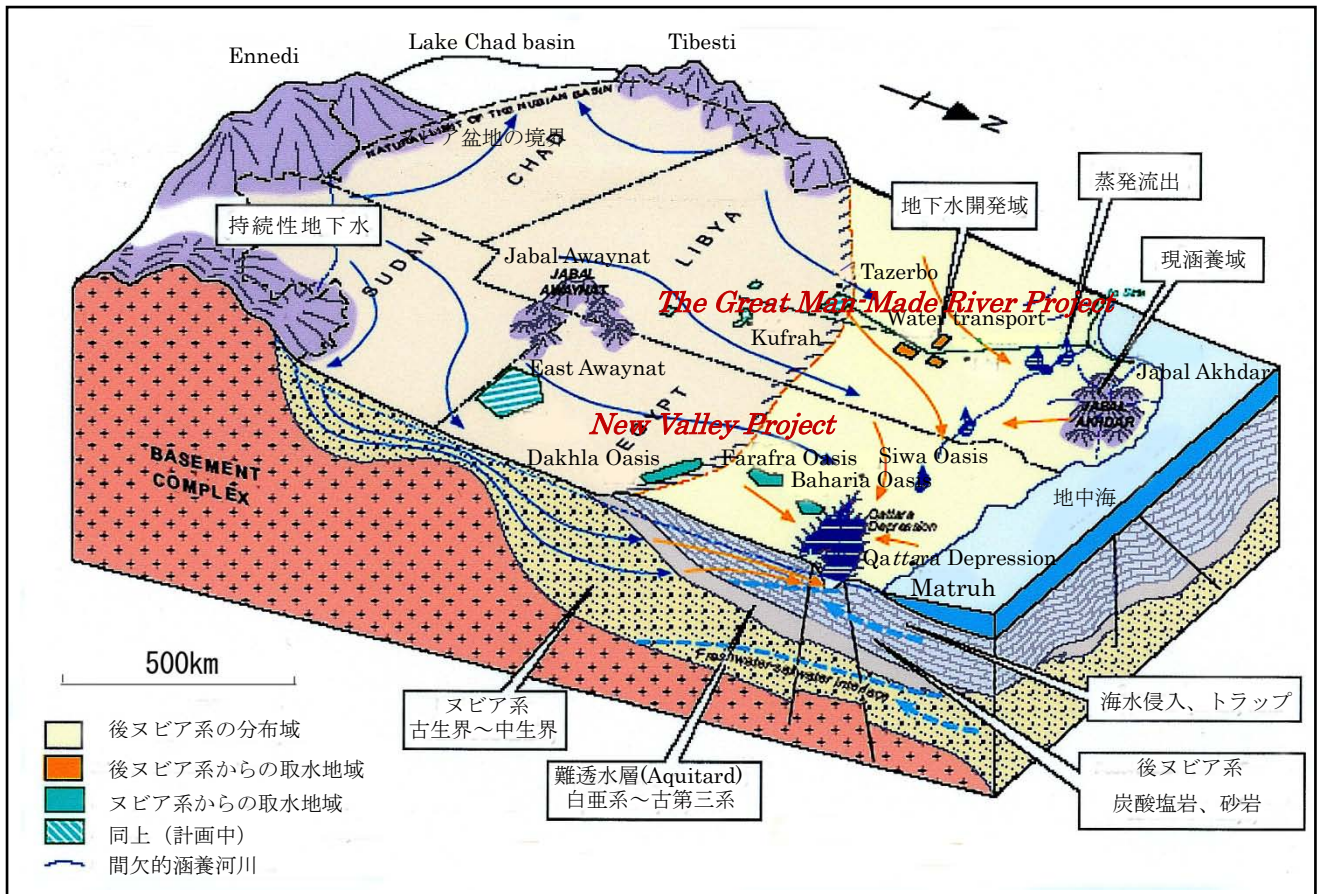


図 12 ヌビア砂岩帯水層系の広域地下水流動モデルと地下水開発計画

(出典 : Martina Muller, Claudia Dengler, and Felix Leicht: The Nubian Sandstone Aquifer System)

(図中のラベル、凡例は原図を簡略化して示した)

### a) New Valley Project (エジプト)

1969 年ごろから始まり、1997 年にさらに規模を拡大して決定されたこのプロジェクトはナイル川の沿岸地域を含む広大なもので、写真 23 にあるように、ナセル湖の上流 8 km にあるトスカ (Toshka) に設置されたポンピングステーション (Mubarak Pumping Station) から湖水をくみ揚げ、写真 23、24 の水路 (Toshka Canal, 別名 Sheikh Zayed Canal) によってプロジェクト地域に導水しようとするものである。灌漑用としてのほかに産業用としての利用や、急激に増加する人口対策としても期待されたものであった。

筆者がこのプロジェクトの中心地であったカルガオアシスを訪問したのは 1981 年のことであったから、まさに開発の緒についたばかりで、まだ導水路建設の前になる。トスカのステーションが全体の中心地として機能しだしたのは 2005 年のことである。

ところで 1990 年代に入ってからこの水路への導水が開始されたが、その影響で 1998 年 12 月に東部のデプレッションから水が溜まりはじめ、1999 年の終わりごろまでにこれが漸次西方に移動していった。そして 2000 年から 2001 年には最も西方のデプレッションが湖水化し、この地域に“トスカ湖沼群”が出現した。しかし、2006 年頃から今度は逆に西方のものから湖水位が下がりはじめ、枯渇してきたとの経過が報告されている。



写真 23 エジプト・ニューヴァレイ計画とトスカ湖群 (□は写真 24 に対応)

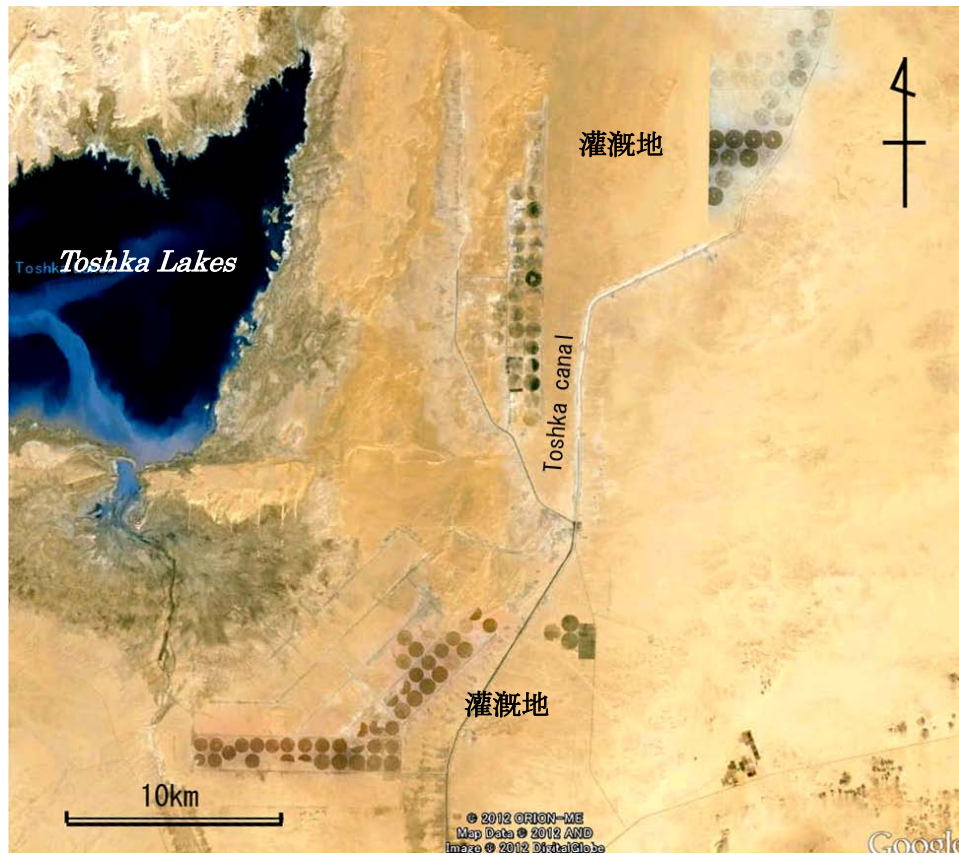


写真 24 トスカ導水路と灌漑地

これ以上の詳細な資料は得られないが、20年足らずの期間で100kmにわたる範囲の地下水位が上昇したという事実は注目すべきことで、このプロジェクトは失敗だったという指摘もある。すなわち、

- ① もともこの地方は塩分濃度の高い土地であり、上昇した地下水位によって、塩分集積が進み、これが農耕の障害になってきた<sup>脚注</sup>。
- ② また地下水の塩分濃度が高くなってきた。
- ③ この地域の土壌は元々粘土分が多く、ピボット灌漑（円形農場）によって増加した土壌水分によって泥土化したり、また反対に乾燥して固くなった土塊が灌漑装置の稼働に支障を来すようになった（写真 25）。
- ④ 湖水の塩分濃度が高くなり、魚類の生息に障害をもたらすようになった。

このようにヌビア砂岩帯水層の地下水環境は灌漑という行為によって予想以上の時空間規模で変わってきつつあることは間違いない。

---

脚注：土壌中に塩分が集積する機構には、①水に溶解した物質が地下に浸透したのち、水だけが蒸発して物質がとり残された場合、②地下水に溶けている物質が地下水位の上昇とともに上方に移動して水分だけが蒸発して物質がとり残された場合がある。



写真 25 エジプトにおけるピボット灌漑

ピボット灌漑の直径は通常は 1,000m 前後であるが、中にはそれを越えるものもある。この灌漑方法は蒸発によるロスがきわめて多いのが特徴。井戸揚水時の水位低下は 100m に及ぶ場合も珍しくなく、地下水の枯渇に拍車をかけている。

#### b) Great Man-Made River Project (リビア)

今から 60 年も前の 1953 年、南部リビアにおける石油探査の際、内陸部のサハラ砂漠の地下 500m のところに大量の淡水地下水が存在することが明らかにされた。この地下水を開発して地中海沿岸地方の農、産、工業の振興を図るとともに、安定した生活用水を確保するという目的で立てられた、“Great Man-Made River Project” は 1960 年後半に構想され、1984 年に実施に移された。

その概要は写真 26、図 13 に示されているように、当国内陸部の東西 2 地区に 1,300 本以上の深井戸を設け、ここから直径 4m、総延長 4,000 km を超える長大なパイプを埋設して地中海沿岸のベンガジ(Benghazi)とトリポリ(Tripoli)まで導水しようとするもので、1 日あたり 650 万  $m^3$  の淡水を供給することとしている<sup>脚注)</sup>。

このプロジェクトは 5 つのフェイズからなっているが、そのうち現在までに実施されたのはフェイズ 1 と 2 で、前者ではエジプトとの国境に近いサリル(Sarir)とタゼルボ(Tazerbo) の 2 つの地域の地下水が開発され、後者ではリビア東部のジャバール ハサウナ(Jabal Hasawna) 地域が対象とされた。これらは現在も進行中である。

1993 年にはベンガジに送水が開始され、1996 年にはトリポリに送水が開始されたが、現在はまだ計画の半分以上が残されている。ともにヌビア砂岩帯水層系(NSAS)の地下水が開発の対象となっている(写真 27, 28)。

このプロジェクトが世界的に注目されているのは、前号のはじめに述べたように国境を越えた帯水層の開発にまつわる紛争の火種を抱えているからである。たとえば Kufra はエジプトの東部ウェイナート農業開発計画(East Uweinat agriculture project)の地からそう遠くないところにあるし、また後者もスーダンの肥沃な土地として知られているサリマ(Salima)オアシスのすぐ北側にある。さらに北部の地中海に近いリビアのジャグブーブ(Jaghboub)オアシスとエジプトのシワ(Siwa)オアシスは国境を挟んで隣り合っているが、ともに同じ帯水層から地下水をくみあげている。

---

脚注：我々の常識では理解し難いが、取水帯水層の水は 50 年で消費するという前提で計画が立てられている。



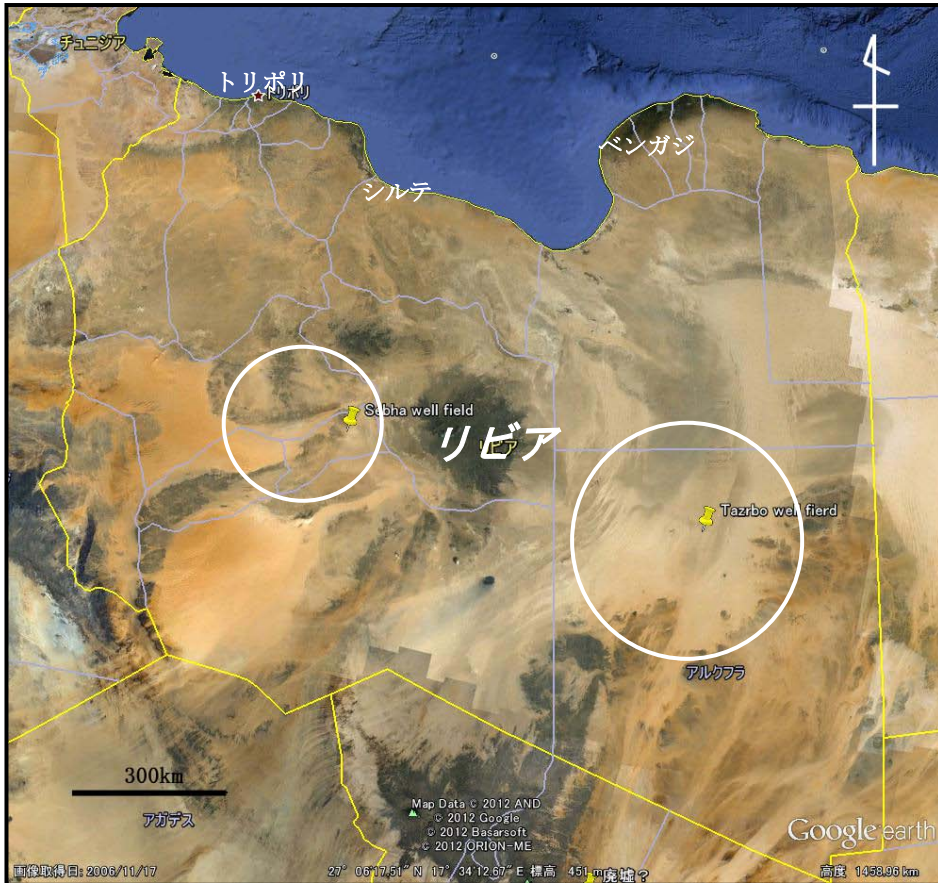


写真 26 リビアにおける Great Manmade River Project (well field)

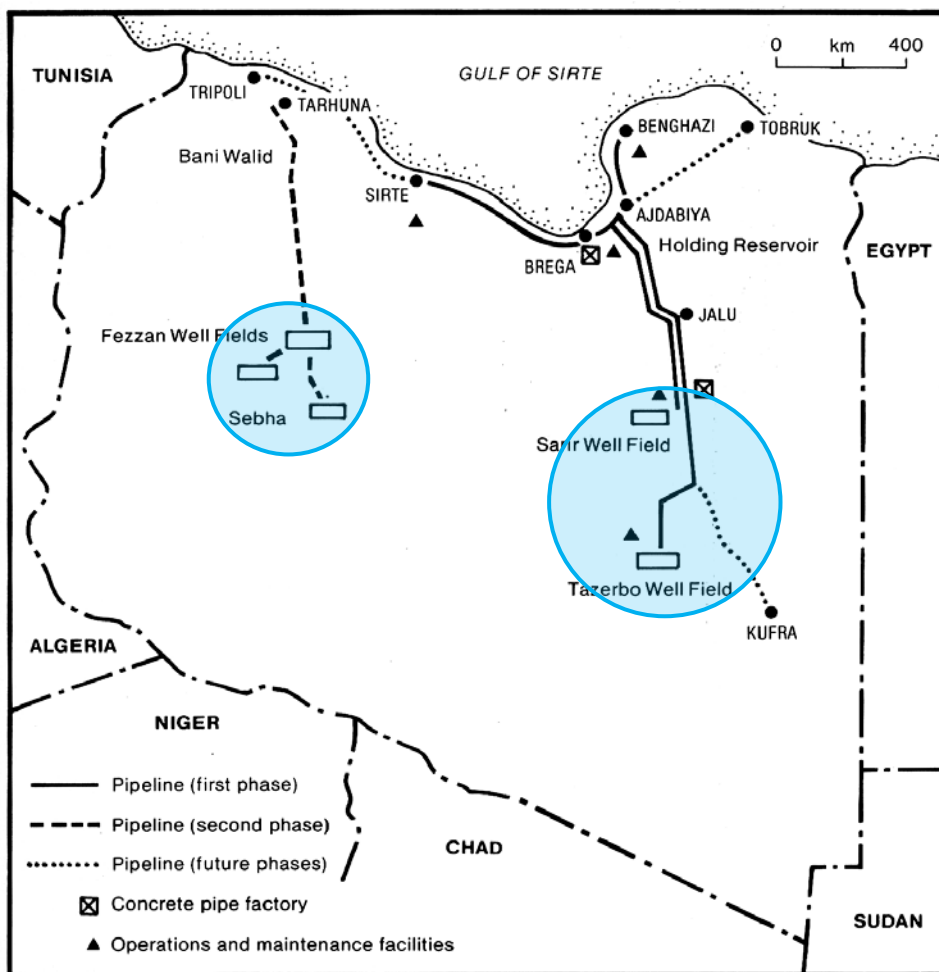


図 13 リビアにおける Great Manmade River Project

(Clive Agnew and Ewan Anderson(1992): Water Resources in the Arid Realm による)

写真 27 Kufra 大規模灌漑地

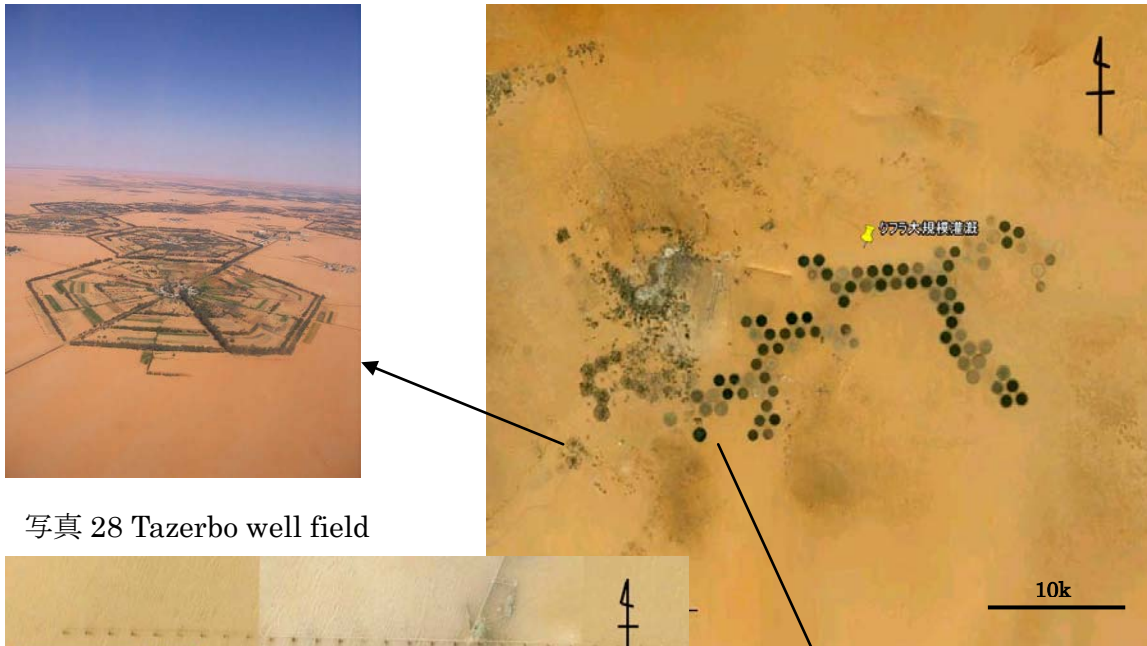
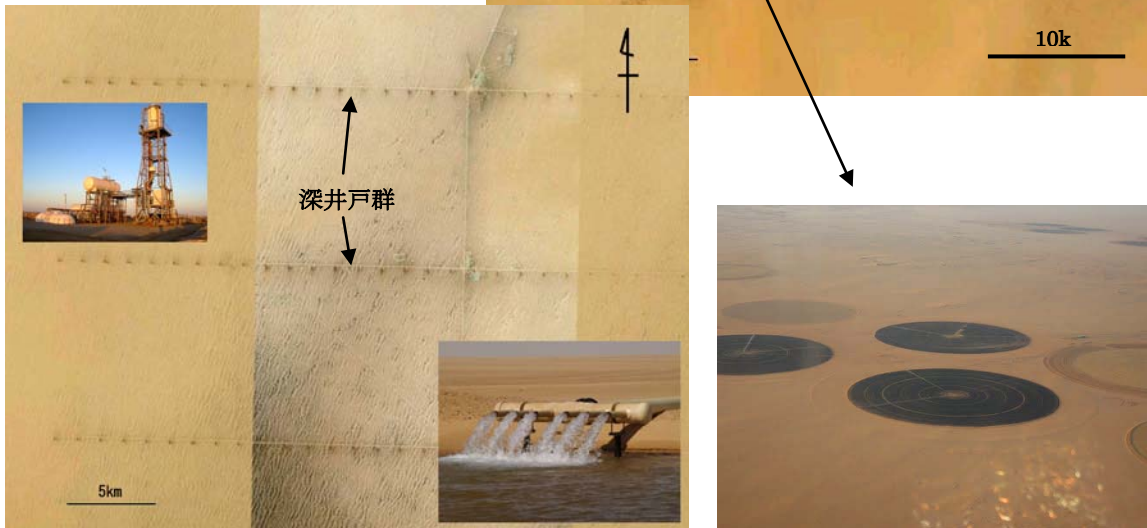


写真 28 Tazerbo well field



(Google Earth より引用して作成)

c) ヌビア砂岩帯水層系の地下水管理に向けて

ヌビア砂岩帯水層系の地下水は非更新性の地下水、つまり石油のように汲み続けられればいずれは涸渇する性格のもので、地層の中に封じ込められた地下水、つまり化石水だとする考え方が多いが、一方現在の地下水揚水量は回復可能な地下水量のわずか 0.01%に過ぎないとし、地下水の更新を前提とした利用の評価をしているレポートもあって (IFAD)、このことについての究明に空白を残していることが窺える。

IFAD (International Fund for Agricultural Development) によれば、ヌビア砂岩帯水層系の地下水資源量は表 2 のように見積もられ、現状での地下水開発のレベルは自然本来のヌビア砂岩帯水層系の姿を大きく変えるまでには至らないとしている。しかし、ここでは被圧帯水層の貯留係数を  $10^{-4}$ 、不圧帯水層の有効空隙率を 7% とし、また不圧帯水層の許容水位低下量を 100m、被圧帯水層のそれを 200m としているが、いずれも過大な値のように思われる。

表 2 ヌビア砂岩帯水層系の地下水資源量

(International Fund for Agricultural Development)

Country	Nubian system (Palaeozoic and Mesozoic sandstone aquifers)		Post-Nubian system (Miocene aquifers)		Total freshwater in storage <sup>(1)</sup>	Total recoverable groundwater <sup>(2)</sup>	Present extraction from systems		
	Area	Freshwater storage	Area	Freshwater storage			Post- Nubian	Nubian	Total
	(km <sup>2</sup> )	(km <sup>3</sup> )	(km <sup>2</sup> )	(km <sup>3</sup> )	(km <sup>3</sup> )	(km <sup>3</sup> )	(km <sup>3</sup> )	(km <sup>3</sup> )	(km <sup>3</sup> )
Egypt	815,670	154,720	426,480	97,490	252,210	5,180	0.306	0.200	0.506
Libya	754,088	136,550	494,040	71,730	208,280	5,920	0.264	0.567	0.831
Chad	232,980	47,810	n.a.	n.a.	47,810	1,630	n.a.	0.000	0.000
Sudan	373,100	33,880	n.a.	n.a.	33,880	2,610	n.a.	0.840 <sup>(3)</sup>	0.833
Total	2,175,838	372,960	920,520	169,220	542,180	15,340	0.570	1.607	2.170

(1): Assuming a storativity of 10<sup>-4</sup> for the confined part of the aquifers and 7% effective porosity for the unconfined part.

(2): Assuming a maximum allowed water level decline of 100m in the unconfined aquifer areas and 200m in the confined aquifer areas.

(3): Most extracted in the Nile Nubian basin (833Mm<sup>3</sup>/year) which is not considered to be part of the Nubian basin.

地下水利用量はかつてのわが国のように、時代とともに急速に伸びており、特にエジプトにおける上昇傾向が著しい。統計資料にのらない個人レベルの小規模の灌漑用の井戸を加えるとその数値はさらに上がるであろう。

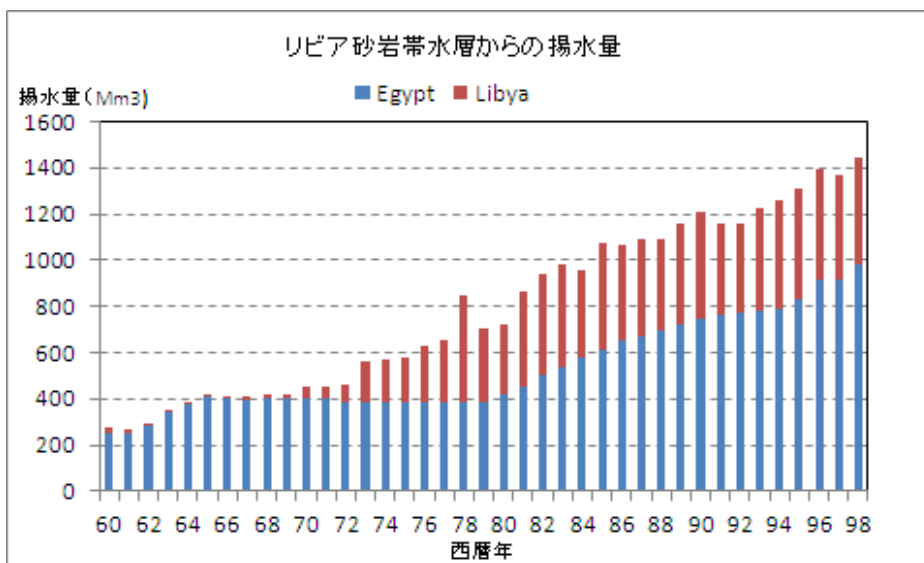


図 14 リビア砂岩帯水層からの揚水量推移

(出典 : Khaled Abu-Zeid and Amr Abdel-Meguid: Pioneering Action in Managing the Transboundary Nubian Sandstone groundwater Aquifer)

我が国でも地下水の開発管理に係る“貯留量（包蔵量）”，“持続性揚水量”，“過剰揚水量”，“涸渇性揚水量”といった概念<sup>脚注</sup>が意識され、このような視点からの論議が盛んになったのは、地盤沈下という現象が明確に公害として認識されるようになった1960年代後半以降であるから、これをこのヌビア砂岩帯水層の地に求めるのは今の段階では難しいかも知れない。しかし図15にあるように、ヌビア砂岩帯水層は空間的には”有限の世界“であり、問題は上記の諸概念をどう定量的に把握するかである。話は大きくなるが、数千年オーダーの涵養期間の存在を前提とした地下水管理という考え方もあり得るかもしれない。図16のように、北アフリカとサハラ砂漠周辺では、およそ12,000年前の乾燥期に続く”Holocene wet period”の存在が認められているからである。このような時空間規模での地下水状態を前提とした国際管理を構築する必要もあるように思われるが如何であろうか。

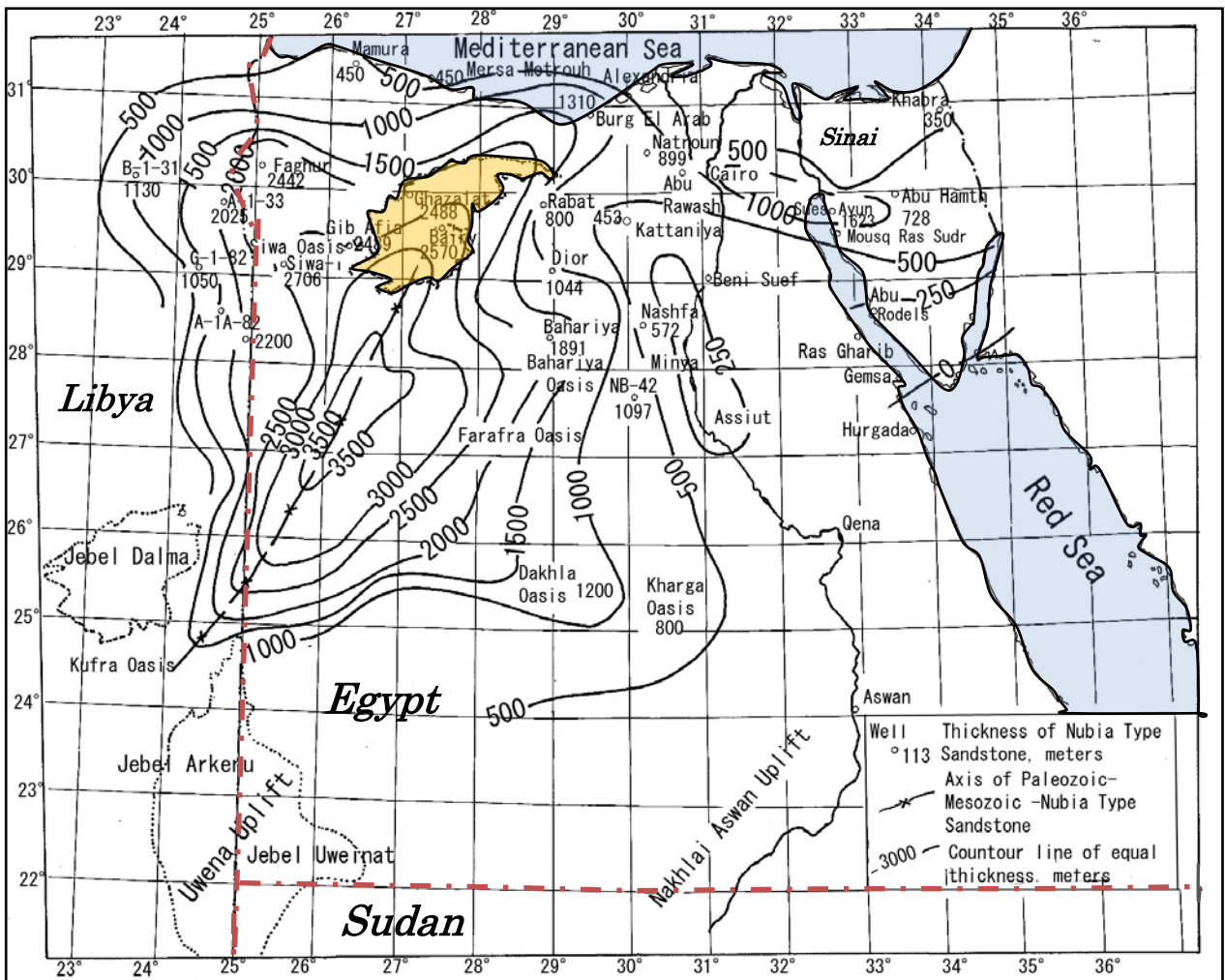
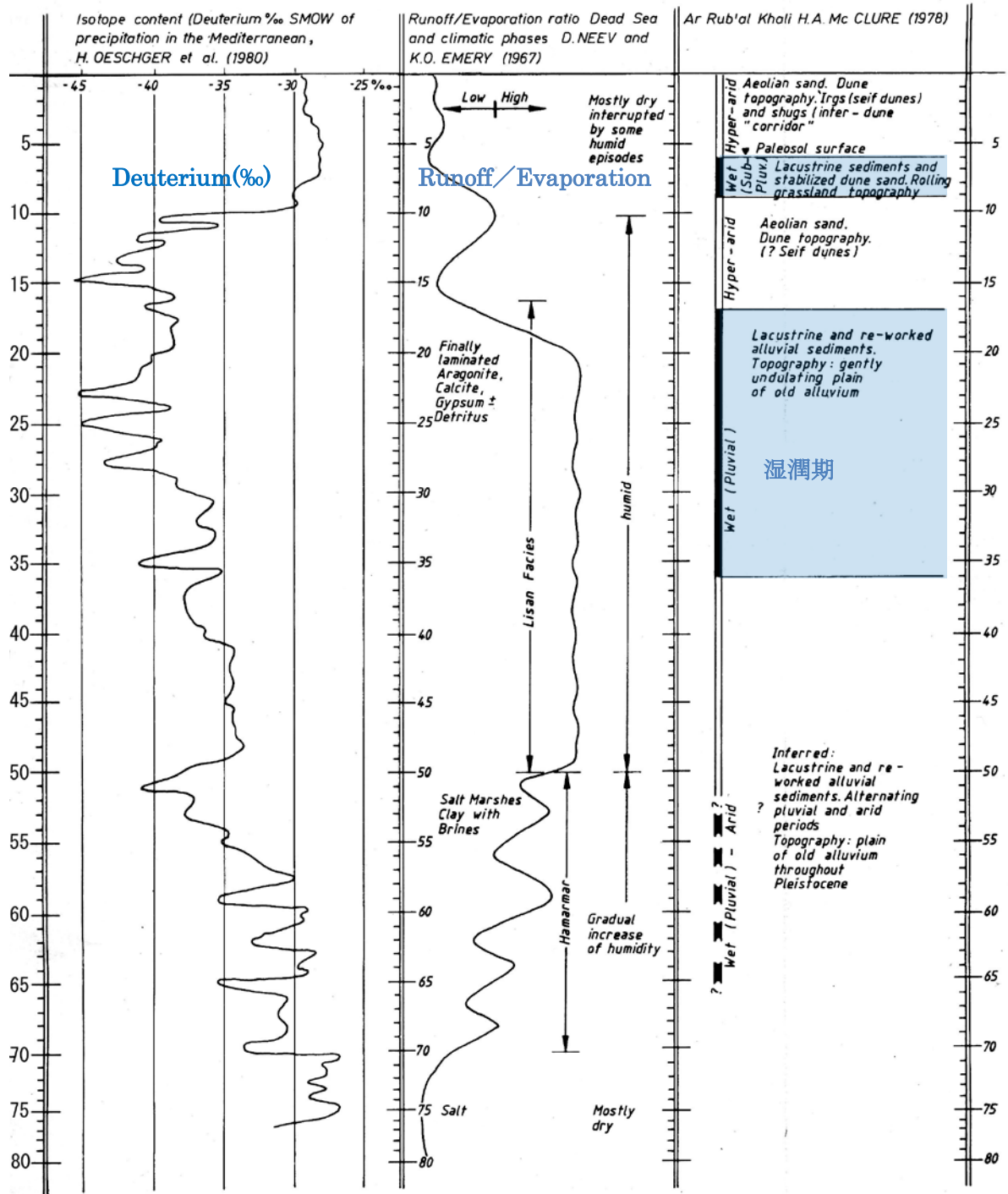


図15 ヌビア砂岩帯水層の等層厚線図

(黄色に着色した部分はカタラデプレッション、エジプト国土開発省資料による)



(千年)

図 16 中近東地域における過去 8 万年の気候変動

(出典 ; Abdul Raof Jado and Josef G. Zotl(1984); Quaternary Period in Saudi Arabia)