リビアの地下水開発について

——ワジ アハマル および ワジ アル バブ プロジェクト——

志戸本佳孝* 植村 嘉之*

Groundwater Resources Development in Libya

——Wadi Ahmar and Wadi al Bab Project——

Yoshitaka SHIDOMOTO* and Yoshiyuki UEMURA*

Abstract

The project of Wadi al Bab and Wadi Ahmar in Libya aims to develop the available water resources, both surface and groundwater. The study area is approximately 2,000 km², located on the south-western flank of Jebel Akhdar Mountains, 30 to 80 km southeast of Benghazi.

The climate of the study area is semi-arid and its mean annual precipitation is 100 to 200 mm high. With First Escarpment as a border, to the west is spread the Benghazi coastal plain, and to the east, a table land. Tertiary rocks and Quaternary deposits are distributed. Each formation of Tertiary period displays transgressive and regressive facies and are comprised mainly of marine carbonates.

In this paper, some results of hydrogeological investigation, such as groundwater storage conditions, water quality, water balance and etc., will be discussed.

I ま え が き

リビア国国土省は農産物の自給率向上を目的として、表流水および地下水の水資源開発調査を八千代エンジニアリング㈱に委託した。調査地域はベンガジ市の南東約30~80 km に位置するワジ アハマルおよび ワジ アル バブ 流域を中心とする2,000 km²で、現地調査は1979年1月より約2カ年にわた

り実施した。

ここでは、石灰岩地帯での地下水調査の一例として、地下水賦存状況、水質、水収支等についての概要を報告する。

II 調査地域の概要

1 地形・地質

調査地域は図-1に示すように ジャベル アクダール 山脈の南西端に位置する。標高200mの等高線に沿って NNW-SSE 系に走る比高差60~80mの急

* 八千代エンジニアリング株式会社
Yachiyo Engineering Co., Ltd.

図-1 調査地域位置図
Fig. 1 Location of study area.

表-1 地質層序
Table 1 Stratigraphical Classification

時	代	地	層	岩	質	な	ど
第	四	紀		ワジ	堆積物		
				崖錐	堆積物		不整合
第	中	中期	Ar Rajmah 層	石灰岩, 苦灰岩,			不整合
				エバポライト, 粘土			
三	前期	Al Faidiyah 層	石灰岩, 苦灰岩				不整合
漸	新	世	Al Abraaq 層	石灰岩, 苦灰岩, 粘土			不整合
紀	始	新	Derna 層	石灰岩, 苦灰岩			

崖（エスカープメント）が第一の地形的特徴となっている。この急崖より西側では、平坦なベンガジ海岸平野が広がる。急崖より東側では、南西傾斜の緩やかな卓状地であり、ワジ アル バブ の最上流域では、標高 500 m を越える。

調査地域の地質は第三系、第四系からなる。第三系は主に、ほぼ水平に堆積した海成の石灰岩からなり、海進海退による層相の変化が認められる。また、一部に粘土層やエバポライト層を介在している。第四系は、ワジ堆積物および崖錐堆積物からなる。地質層序は表-1 に示すとおりである。地下水は主に急崖より西側の第三系中新統および漸新統の帯水層から取水されている。

地質構造は図-1 に示すように アル ラジマ 背斜軸、アル アビアル 向斜軸および ジャルダス アル アビッド 背斜軸により特徴づけられる。調査地域内での断層は確認されていない。

カルスト現象としては、シンクホールがワジ アル バブ の最上流域と ジャルダス アル アビッド 背斜軸の消滅部で見られる。また、ワジ狭穿部の露頭では、層理面に沿って高さ数 10 cm、奥行き 2 ～ 3 m の空洞が連続して見られる。

2 水 文

調査地域は半乾燥地帯に属し、明瞭な雨期と乾期をもつ。雨期は10月から翌年5月までで、1月、2月に最も多く降る。平均年降水量は100～200mm であり、北側で多く、南側は多少なくなる。

年平均気温は20℃ であり、最高月平均気温は8月の 26℃ であり、最低は1月の 13℃ である。蒸発量についてはA級パンで3,000 mm/年 を越える。

調査地域は、地形的に図-1 に示すようにワジ マハマル 流域(307km²)、ワジ アル バブ 流域(1,085km²)、急崖沿いの小ワジ流域(148km²)、および海岸平野(463km²) の4つに大別される。ワジは雨期の比較的

まとまった雨が降った時のみ出水する。出水時の流量および出水回数は年によりかなりの変動がある。

3 水利用形態

主食である小麦の栽培は雨期の天水を利用して行なわれる。耕地はワジの氾濫原で、表面に溝を切って引水しやすくしている。栽培期間は2月から5月までの4カ月である。

調査地域では、ベンガジ平野の ワジ アル ガターラ と ワジ アハマル に挟まれたマグザハ地区で良質の地下水が豊富に産出し（1井当りの揚水量：3～8 l/sec）、揚水井（深度：150～200m、孔底口径：8''～10''）が集中している。ここでは、野菜、果樹などの集約的な園芸農業が営まれている。この地区では開発が相当進んでいて、過剰揚水の兆候が見られる。

その他の地区では、井戸の分布も点在しており、水質が良い場合には水量が得られなかったり、水量が得られる場合には水質が悪かったりする。ここでの水利用形態は小規模な畑地耕作と羊を主とする家畜の飼育である。

急崖下部のベディメントやワジの傾斜地では、雨水を導水し貯めておくためのシスターンが数多く見られる。シスターンは500m³ 程度の規模で、飲料用、家畜用の地下の水溜である。

III 水文地質調査

1 調査の概要

表 2 水文地質調査一覧表

Table 2 List of hydrogeological investigation.

調 査 項 目	目 的	内 容
井戸台帳基本調査	水利用, 所有者, 位置, 地下水位, 地質柱状図 etc. のデータ収集, 整理	既設井: 78井 シスターン: 338基
地 質 踏 査	地表地質把握 表層土質把握	踏査面積: 約2,000km ²
電 気 探 査	地質構造, 層序の把握	測線: 7本, 合計測点: 120点 間隔 2,000~6,000m: 70点 間隔 200~400m: 50点
ボーリング調査	層序の確認 帯水層の確認 地質年代の判定	調査孔: 13井, 合計掘削深: 3004m 孔底口径: 8 ¹ / ₂ ~12 ¹ / ₂ 検層: 13孔, 化石分析: 2孔
揚 水 試 験	帯水層の性状把握	試験井: 13井 段階揚水試験, 72時間連続揚水試験
地 下 水 位 測 定	地下水位変動特性把握 動水勾配の把握	期間: 約2年 観測井: 既設24井, 新設13井
環境同位元素分析	水質年代の判定 地下水涵養機構の把握	分析項目: デトリウム (D), トリチウム (T) 酸素18 (O ₁₈), 炭素14 (C ₁₄) 試料数: 地下水(27), 降水(10), 土壌水分(10)
水 質 分 析	水質による地下水流動の把握 利水のための評価	分析項目: Na ⁺ , K ⁺ , Mg ⁺⁺ , Ca ⁺⁺ , Cl ⁻ SO ₄ ²⁻ , HCO ₃ ⁻ , SiO ₂ , TDS 試料数: 102

図-2 地下水開発調査フロー

Fig. 2 Flow chart of groundwater resources development investigation.

地下水開発計画を立案するために、表-2 に示す水文地質調査を1979年1月から約2ヶ年にわたり実施した。

また、水文地質調査と並行して、雨量観測、流量、水位測定、散水試験、浸透能試験、A級パンによる蒸発量測定、中性子水分計による土壌水分測定などを行なった。

各調査の相互関係を 図-2 の調査フローに示す。

2 地下水賦存状況

石灰岩地帯では、節理、層理、断層破碎帯などの割れ目に沿って水が流れ、石灰岩を溶出して運び去る。この結果、複雑多岐なカルスト流路 (karst channel) が形成される。

調査地域で実施したボーリング調査でも、石灰岩中に介在する粘土層の直上で循環水の散逸、カッティングマテリアルの散逸、高産水ゾーンとの遭遇などのカルスト現象が認められた。しかし、ワジ河床下の地下水流や断層破碎帯に沿って形成される大規模なカルスト流路は見つからなかった。

石灰岩地帯での地下水位の分布は一般に不規則であり、流れについても異方性が強く現われる。調査地域内で地下水観測井として選定した井戸の口元標高は、5万分の1地図で読み取ったものが多い。こ

のため、水準測量と高感度高度計による計測を実施して、井戸口元の標高を補正し、地下水位の測定精度の向上に努めた。

一方、地質構造より石灰岩の層理面がほぼ粘土層に平行であるので、粘土層を境界層と考えて地下水面の連続性を検討し、比較的良好な結果が得られた。

これらの調査結果から、調査地域の地下水賦存状況は概ね粘土層を境界層として 図-3 に示す4つに大別できる。

(i) 浅層宙水(Shallow perched aquifer) :

この宙水は独立した宙水で地表面より比較的浅い層準にあり、下流端で地下水面の不連続性が認められる。

(ii) 深層宙水 (Deep perched aquifer) :

この宙水は下流側で帯水層に移行するもので、浅層宙水より深い層準にある。

(iii) 準帯水層 (Quasi main aquifer) :

この帯水層は(iv)に述べる主帯水層と連続した水塊ではあるが、上部層からの漏水、カルスト流路、粘土層の介在などによって不規則な水頭分布を示す。

(iv) 主帯水層 (Main aquifer) :

この帯水層は、過剰揚水による水頭低下ゾーンを除外した水頭分布のうち、最低水頭の放絡面と一致する水面形状

図-3 地下水流動概念図

Fig. 3 Delineation of groundwater system.

図-4 揚水試験における水位降下～時間曲線の形状

Fig. 4 Sharpes of drawdown change in time during pumping test

をもつ帯水層である。

この分類法は水収支計算を実施する上で、主帯水層での大局的な地下水流動と主帯水層以外の局所的な地下水流動とを分離することによって、現象の把握が比較的簡単に行なえる。

3 揚水試験

調査地域での揚水試験の水位降下～時間曲線の形状は図-4に示す6つのタイプに分けられる。また、各タイプの透水量係数は表-3のように評価できる。

宙水での透水量係数は $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 程度であり、主帯水層では山側で小さく、海側に近づくにしたがって大きくなる（図-5参照）。

4 水質

地下水の水質は図-6に示すようにT.D.S.濃度 1,250ppm 以下では中間組成が多く、2,500ppm を越えるとほとんど全部がアルカリ非炭酸塩類に属す。

陰イオンに対する重炭酸イオンの占める比率が高ければ、比較的T.D.S.（Total Dissolved Solids 全溶解性残留物）濃度が低く、T.D.S.濃度が高くなるにしたがっ

て、塩素イオン、硫酸イオンの比率が増大する。陽イオンでは、ナトリウムイオンの比率が高くなる程、T.D.S.濃度が高い。

一方、トリチウムや炭素14による地下水年代測定の結果からは、年代が新しくてもT.D.S.濃度が低いことや、T.D.S.濃度が低くても年代の古いことが明らかになった。このことは、石膏などのエバポライト層の影響があるとしても、塩類の濃縮は主として表層土壌における蒸発の作用により起こること

表-3 水位降下～時間曲線の形状からみた透水量係数の値域

Table 3 Value range of transmissivity according to the sharp of drawdown change in time.

透水性	高	中	低
項目			
透水量係数(m^2/s)	$T > 10^{-3}$	$10^{-4} < T < 10^{-3}$	$T < 10^{-4}$
水位降下の形状 (図-4参照)	a	b, c, f	d, e

図-5 既設および新設地下水位観測井位置図および主帯水層の透水量係数
Fig. 5 Location of existing new drilled wells for for piezometric observation and transmissivity of main aquifer.

図-6 キータイアグラム

Fig. 6 Key diagram

図-7 水収支モデル

Fig. 7 Model of hydrological water balance.

を示唆している。したがって、降水量も少なく、蒸発ポテンシャルも高い調査地域南側のワシアルババ流域はT.D.S.濃度が総じて高い。

また、炭素14による地下水年代測定から、主帯水層の地下水は8,000年以前のプルビアル(多雨期)に涵養されたことが判明した。したがって、主帯水層の地下水流動速度は極めて遅いものと考えられる。

5 水収支

水収支計算を行なう上での問題点は蒸発量と地下水流量の評価である。蒸発量は土壌システムを考慮した流出解析より算出した。地下水に関しては、主帯水層とそれ以浅の層(広義に解釈した不飽和層)

図-8 水収支要素が降水量に対して占める比率

Fig. 8 Water balance parameter portion to precipitation.

に分けて検討した。

水収支は図-7に示す水収支モデルを用いて次式で表される。

$$\Delta S = Pr - Ev + Qi - Qo + Gui - Guo + Gmi - Gmo \quad (1)$$

ここで、 ΔS ：地下水賦存量の増加量、 Pr ：降水量、 Ev ：蒸発量、 Qi ：表流水流入量、 Qo ：表流水流出量、 Gui ：不飽和層での流入量、 Guo ：不飽和層での流出量、 Gmi ：主帯水層での流入量、 Gmo ：主帯水層での流出量

(1)式を用いて、試行錯誤法により求められた水収支の一例を図-8に示す。調査地域での降水量はほとんど蒸発で失われてしまい、降水による地下への涵養量は極めて少ないことがわかる。

平均年で涵養される地下水量を開発するとの仮定に立つと、急崖の西側で2.5百万 m^3 /年程度の揚水は可能である。しかし、水質が悪いので表流水との混合利用または淡水化を行なう必要がある。

この場合の水価は、地下水(かん水)の淡水化では1 m^3 当り0.60L/D (1 L/D=750円)であり、表流水との混合利用では0.32L/Dであった。

IV まとめ

調査地域は年降水量100~200mmの半乾燥地帯に属し、年降水量のほとんどは蒸発で失われ、地下への涵養量は極めて少ない。

炭素14による年代測定は、現在賦存している地下水の大部分が8000年以前の多雨期に涵養されたことを示す。

調査地域は海成の石灰岩地帯であるが、大規模なカルスト流路は見あたらなかった。また、水平方向の地下水流動は層界面に沿って生じるものと仮定して解析を行なったが、水質調査および水収支計算との矛盾は生じていない。

地下水の賦存状況を浅層宙水、深層宙水、準帯水層および主帯水層の4つに大別することにより、大局的な流動と局所的なものとは比較的容易に識別できる。

最後に、本プロジェクト遂行あたり、国際原子力学会(IAEA)、国際水文地質学会(IHA)、CGG社(フランス)、コスターアブラム社(キプロス)、梶谷調査工事(株)、株式会社日さく、リビアンファウンデーション、エスタブリッシュメント(LFE)等関係各位のご協力を得ました。ここに厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- 村下敏夫(1962)：『改著 地下水学要論』昭晃堂，211p. 山本荘毅ら，〔建設省水文研究グループ〕(1977)：『最新地下水学』山海堂，363p.
- I.A.E.A. (1974)：『Isotope Techniques in Groundwater Hydrology. Proc. Symp. Vienna Vol. 1, 2, 504p., 499p.
- Todd D. K. (1959)：『Groundwater Hydrology. John Wiley & Sons, Newyork, 336p.
- Tolson J.S. & Doyle F.L. (1975)：『Karst Hydrogeology. UAH Press. 578p.

(受付：1983年8月15日，受理：1983年10月4日)