The Japanese Geotechnical Society

砂漠地域での地下水開発と調査—イエメンの例—

Groundwater Exploration and Development in Desert Area—Yemen—

若井省吾（わかい せいご）
㈱日さく 取締役信越・北陸事業部長

徳田啓司（とくだ けいじ）
㈱日さく 海外事業部海外営業課長

1. はじめに

砂漠といえば，砂丘が幾重にも重なる一面の砂原を砂漠としてイメージするが，西部劇で見かけるサボテンの荒野のような，岩肌を露出する岩石砂漠の方が実際には広く分布している。砂漠の自然は，その気候特性からかなり厳しいものがあり，水が乏しい地では無人の大地が広がる。

しかし，人間の居住可能な地としてオアシスや高原山岳の小降雨地帯があり農業が営まれ，集落が形成されている。また，わずかな降雨でも植生のある地を求めて遊牧が行われている地域もある。

アラビア半島の南西にあるイエメン注1)において，紀元前1000年頃サバ王国がぼっ興した。高い文化をもち農耕中心のサバ族は紀元前8世紀には，国都マリブに大規模なダムを築いた。紀元前5世紀にこのダムは決壊したが，岩場の水門跡の一部は現在にその姿を残している。しかし，平野部にあった古都の遺跡はルブアルハリ砂漠の砂に埋もれ，砂漠化が顕著に現れている。

一方，砂漠化防止への対策として，アラブ首長国連邦の援助により，ダム跡より上流3kmにロックフィルダムが1987年完成し，緑化計画が進行している。

このイエメンには海岸に広がる砂の砂漠から標高3000mを越える山岳地帯，中央高地やルブアルハリ砂漠の西端部などから成る複雑な地形と地質構造が発達している。また，砂漠気候—ステップ気候区に属し，厳しい自然環境にあり，経済的にも輸出産物が少なく，アラビア半島では唯一のODA無償資金協力注2)対象国となっている。

この国において，1975年より筆者らは，地下水の開発および調査に携わってきた。拙文では，地下水調査と開発の現況を報告し，環境と調和した開発と調査について考察する。

2. 海外での地下水調査

海外における現場作業は，その激しい自然に加えて，いろいろな制約や危険を伴うことがある。したがって，作業に取りかかる前には，対象となる国の地域特性を知ることが出発点となる。

地下水開発調査は，目に見えない地下水の姿や動きを，地下水の容器となす地下構造の状態と気象条件などから客観的に行われる。その結果，最も可能性の大きい場所で，地下水の存在および産出能力を確認するものである。

今も昔も地下水調査の基本は既設井や湧水を探し，地下水との出会いが第一歩となり，周辺地形の容姿や地質の肌触りを目や手足で感じることである。時として古老や土地の伝説は貴重な情報を提供してくれる。つまり，調査の前段は推理ゲームのようなものであるが，最近この器の確認に最先端技術を駆使した物理探査が応用されている。この探査による効率と熟度を重ねた精度は驚くべきものがあり，特に断層の推定には有効である。

しかし，途上国での使用となると通関，輸入許可や故障修理の対応など問題が多い。これに加えて物探の実施だけで地下水が得られるという多大な期待を抱かせることがあり，不幸にして失敗に終わった時など身に危険を感じることもある。

このような観点から，地下水開発調査は地表からの客観的な推理で完結するのではなく，絞られた点で試掘をし，定量的な試験を行ったうえでの判定を

注1) イエメンの正式国名はイエメン共和国
注2) 政府開発援助：1992年度 E/N ベース グラント実績 20.66億円

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

することが肝要である。費用がかかる点で試掘を省略する場合があるが，試し掘りは調査で必要なステップであり，その重要ファクターとしては①帯水層の位置，②適正揚水量の判定，③水質の確認である。

3. イエメンの地理的概観

イエメン（主として旧北イエメン）の自然環境を概観すると次のとおりである。

3.1 地形・地質

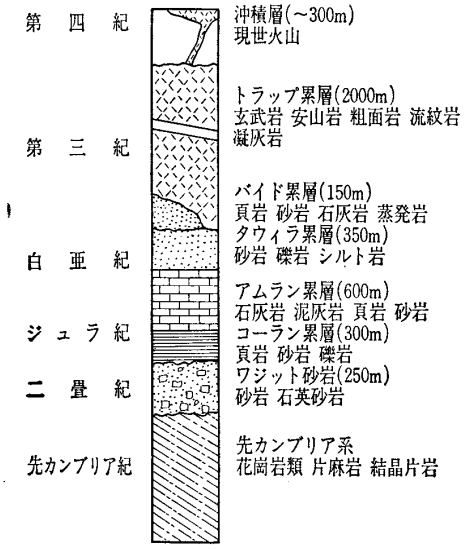
地形的には紅海の生成に影響され，これに平行する南北方向に帯状に4区分される。

①海岸平野（砂丘と扇状地），②中央山岳地帯（標高3000m前後の脊梁山脈），③中央高地地帯（サヌア2250m，タイズ1500m），④東部山地および漸移砂漠地帯（ルブアルハリ砂漠に連なる）。

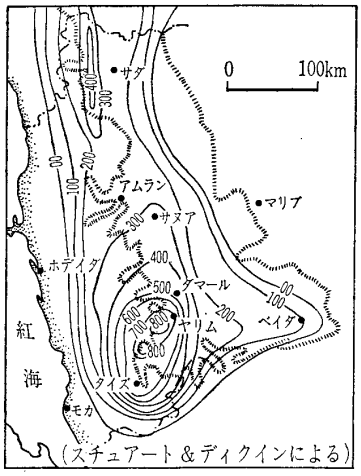
地質的には，新第三紀に生じた大地溝帯（紅海）によりアフリカ大陸から分離したアラブ卓状地と呼ばれる安定地塊である。イエメンの模式柱状図を**図—1**に示す。

3.2 気候・水文

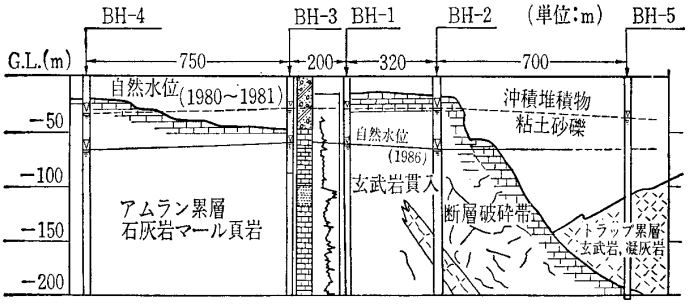
イエメンは北緯13°～17°にあり，Cressy（クレシー）のアジア気候区分では砂漠気候，ステップ気候，温暖冬季寡雨気候（高山性気候）に属する。このため，地勢に影響された多様な気候がみられる。全土の降水量マップを**図—2**に示す。河川は地形に支配され，中央高地から西へ急傾斜で流出し，海岸砂丘でワジとなる。一方，中央高地から東へゆるやかに流路を持つワジも多く発達するが砂砂漠で自然消滅し，常流の河川は存在しない。



図—1 イエメンの模式柱状図



図—2 イエメンの降水量マップ



図—3 アムラン水源井戸群の推定地質断面

4. セメントプラントの地下水調査

4.1 アムランセメント工場（1979～80）

サヌアより西へ約50kmの地点に，計画中のセメント工場の用水（日量700 m³）確保の目的で，地下水調査を実施した。谷底部の平野にある敷地内だけの面的制限があった。井戸の設計のため，既設井の地下水位測定，水質，揚水量の確認を行い，浅層地下水の開発は不可能と結論した。電気探査を実施し，開発地区を敷地内北西部，開発深度を200mとし，さく井工事は試掘兼本掘という形式で行った(**図—3**)。

この結果から，総計5本の井戸で，それぞれ地下水の産出量に大きな差異がみられた（**表—1**）。

その要因は次のような水理地質に起因している。つまり，ジュラ紀のアムラン累層（石灰岩主体で泥岩や頁岩を介在）では，断層の破砕部や溶食による開口に裂か水として地下水は賦存していることが多い。これらの弱線部には火山岩の貫入が多くみられる。このため水理地質的には局所に透水性が不均質でばらつきの多い帯水層とみなされる。

なお，沖積層の砂質土は100～200Ωm，石灰岩は50Ωm以下の層比抵抗値を示した。

ところで，現在までの揚水で，これらの井戸の地

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

表—1　アムランセメント工場水源調達の井戸諸元

諸元／井戸 No.	BH-1	BH-2	BH-3	BH-4	BH-5
自然水位　(m)	29.50	28.30	30.46	33.06	37.43
揚水水位　(m)	108.00	42.24	90.30	73.79	88.15
生産量　(l/分)	321.40	1 004.40	110.00	204.60	265.60
比湧出量 (m³/日/m)	6.57	103.66	2.65	7.23	7.39
透水係数　(cm/s)	1.90×10^{-4}	7.97×10^{-3}	4.81×10^{-5}	1.12×10^{-4}	6.54×10^{-4}
伝導率　(μ℧/cm)	2 100	650	—	1 340	530

下水位は年平均5.55mもの低下が生じるという大きな問題が起きている。

4.2　マフラクセメント工場 (1992)

タイズから西へ約40kmに建設中の同工場用水の地下水調査を行った。

年間降水量は200～300mmと少ない地域の河岸段丘に建設地はあり，周辺には深さ15～30mの農業用手掘り井戸が存在する。その地下水位は季節的変化および経年的変動が大きく，一方，伝導率は2 800 μ℧/cmと高い傾向にあり，水質的問題も懸念された。

1991年には地元のコンサルタント会社が電気探査を実施，短期的には河床の浅井戸利用，長期的には火山岩類の裂か水型深層地下水の開発を提案して，4本（200～300m）のボーリングが実施されたが成功に至らなかった。つまり，上部白亜紀から第三紀のイエメン火山岩類（トラップ累層）および第四紀玄武岩は亀裂や破砕部が発達しており，介在する火山砕屑岩層部は多孔質で帯水層とみなされている。しかしながら地区によっては地下水の賦存層とはならない。これは降水による補給が少ないためである。

このことから，恒常的に安定した給水を行うためには深層地下水の開発は必須であり，調査範囲を拡大して地表踏査を実施した。この結果，建設地の北東約9km離れたWadi ra haba（ワジ ラ ハバ）沿いに良好な帯水層であるタウィラ砂岩層の発達を確認した。このワジはHabashi（ハバシ）山系（2 320m）を後背地とする広い流域を有する。

ただし，この地区には深さ70mで30 m³/hの産出量を有する既設井が1本存在するため，影響圏のシミュレーションを行う水理解析を行って，地下水開発を進めるように提案している。

5.　サヌア市水道計画の水源調査

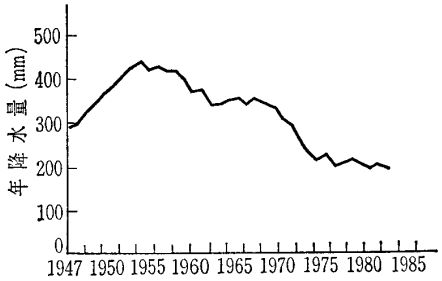
サヌア市は，南北イエメンが統一してからも政治，経済，文化の中心として繁栄している。人口が約92万人（1991）あるこの都市は，中央高原地帯にあって標高2 250m，面積が約3 226 km²にも及ぶ広大な山間盆地に位置する。

5.1　水道計画の開始時

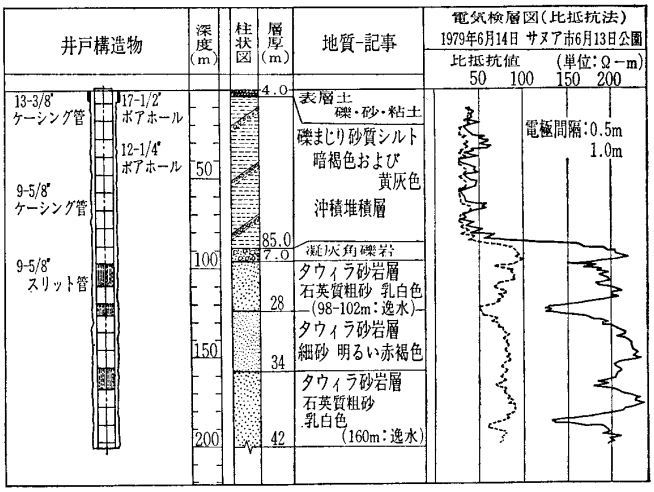
サヌアの降水量は図—4のように1950年代は400mm，60年代に350mm，75年代には300mmに減少し，さらに1990年は204.5mmとなっている。1970年以前は，盆地内の低地に手掘り井戸が掘られ，利用されていたが，水位の低下で，その都度，掘り増しされてきた。その後，水不足が深刻となり，1971～1972年にかけてイタリアのコンサルタント会社が地下水調査を行った。この結果，同市北部に露頭があり，盆地の地下に分布するタウィラ砂岩層が有力な帯水層を成し地下水開発可能量は1.887 m³/sと評価された。1979年，調査の一環としてサヌア市内で試掘を行った。このさく井柱状図と電気検層図を図—5に示す。

5.2　水位低下の問題

1972年のマスタープランの時から，水位低下の問



図—4　サヌア市降水量の経年変化



図—5　タウィラ砂岩層の試掘柱状図

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

題は提起されていた。1976年の調査結果では年間0.52～3.75mの水位低下が報告されている。これに伴い地下水開発可能量も0.564 m³/sに下方修正された。さらに，第2期では適正揚水量を0.450 m³/sとして計画変更され，25本の生産井が完成し，現在に至っている。しかし，水位降下は現在でも年間約6mにも及んでいる。1984年には炭素14(C¹⁴)による水源井の地下水年代測定が実施され，3000年から9000年の経過年代を試算し報告されている。

5.3 新規の地下水調査

現在，オランダ政府の協力により，水資源の調査としてサヌア南部と西部においてタウィラ砂岩の広がりと大深度(1500m，コーラン砂岩)の開発可能性調査を展開中である。深部の地質調査には石油探査で実施された弾性波探査の結果を応用して，試掘を行う予定である。日本もJICAの開発調査で，サヌア盆地の東部におけるタウィラ砂岩中の地下水賦存の把握と地下水低下のシミュレーションを行うプロジェクトを計画していたが，種族間の水利権の問題で中断したままになっている。

6. 地方における地下水開発

6.1 サウジアラビア基金による地方給水工事

1975年より，旧北イエメン全土にて13地域(種族による区分)，28箇所において合計36本の深井戸を掘削した。平均深度は264mで，生産井戸として確認されたものは28本であり，成功率は78%であった。非生産井戸とされた7本のうち6本はアムラン石灰岩層での掘削であり，最大深さ600mに達した。

6.2 円借款による地方水道計画

1981年から2年間にわたり，全土に46本の深井戸さく井工事を実施した。平均深さは166.8m，最大深さは300mであった。揚水量100 000 cm³/分以上を生産井とし，これを上回った井戸は33本，成功率は72%であった。

6.3 日本の無償資金協力による地方水道計画

1982年から更に地方における水道整備計画を進めており，現在も第8期の工事が行われている。すでに7期で合計24箇所に地下水を水源とした給水システムが施工されている。

表—2 イエメンの地層別水理地質概要

地　　質	賦存状況	帯水層の判定	電探／層比抵抗値
沖積堆積層	地層水	良好／水量少	20～ 200Ωm
第四紀火山岩	裂か水	やや不良	200～2 000
トラップ累層	裂か水／地層水	局地的良／不良	30～ 500
タウィラ砂岩	裂か水／地層水	非常に良好	100～ 400
アムラン石灰岩	裂か水／地層水	局地的良／不良	10～ 50
プレカン基盤岩	裂か水	不良	200～

コーラン累層／ワジッド砂岩の資料はないため省略。

7. おわりに

イエメンにおいて実施された地下水調査および開発の現状について概述した。このほかにも米国の援助など多くの調査および開発が行われている。この結果より，地層別の水理地質的考察と電気探査の解析結果を検討すると**表—2**のようになる。

サヌアにおける地下水水位低下は，降雨量の減少と10 000本を越える井戸からの過剰揚水が原因である。イエメン政府では新規井戸と揚水量の法的規制を行っている。さらなる規制を前提とした各地下水域の水収支や水位低下シミュレーションを行うために地下水のモニタリングが必要である。

砂漠化のすすむイエメンにおいて，ここで農業として重要でしかもイエメン人の必需品であるカート[注3)]の灌木はこの20年で栽培面積を数倍にも拡大している。植林政策も，農家にとって実効があるものでないと非常に難しいものである。この緑化を促進させるカートが砂漠化を防いでくれるのであれば，一石二鳥ではないだろうか，と思考している。

注3) 口に頬張ってかんで覚醒作用を楽しむ，ほとんどのイエメン人が日常的(午後2時間ぐらい)に使用している。

参考文献

1) Saudi Arabia: Ministry of Agriculture and Water, REPORT of Project 36 Water Well Drilling & Construction in Yemen, 1978.
2) 国際協力事業団：北イエメン地方水道計画パートII事前調査報告書，1979.
3) 国際協力事業団：イエメンアラブ共和国公共事業省地方水道計画調査(パートIII)水理地質調査報告書，1980.
4) Pacific Consultants International Yemen Arab Republic, Ministry of Public Work Report of Rural Water Supply Project, Part-1, Japanese Loan Program, 1984.
5) Central Planning Organizations, Ministry of Development, Y.A.R. Amran cement plant drilling Report, 1981.

(原稿受理 1993.9.21)

NII-Electronic Library Service