イエメン・アラブ共和国の環境地質 (第一報)

—自然環境と水利用—

新 藤 静 夫* 田 口 雄 作**

Environmental Geology of Yemen Arab Republic (1)

— Natural Environment and Water Use —

Shizuo SHINDOU and Yuhsaku TAGUTSCHI

Abstract

Yemen Arab Republic is located in the south-western corner of the Arabian Peninsula. The area lies between parallels of latitude $12^{\circ}30'$ and $17^{\circ}30'N$. and meridians of longitude $42^{\circ}30'$ and $46^{\circ}30'E$. Yemen was known as "Arabia Felix" and had high civilization in ancient age. But since its hard natural environments, the development of this country fell behind the time. Among of them, water supply problem is the most important matter. In response to the request made by the Government of the Yemen Arab Republic, the preliminary survey of the "Rural Water Supply Projects" were carried out by the Japan International Cooperation Agency (JICA).

In this paper at first, we elucidate the background of water supply problems and the feature of geohydrological condition of this country. Next, we clarify the mode of occurrence and movement of groundwater which is restricted by the condition mentioned above.

The summary of this paper is as follows:

1. Topographical feature.
 - i. Yemen's main watershed runs from north to south and divides the country into two parts, western half and the eastern half.
 - ii. The main watershed or central highland is comparatively flat and in some areas tectonic basins are pointed out.
2. Hydrological feature.
 - i. As shown in Figure 7, the highest annual rainfall falls in the central highlands and the lowest in the eastern lowlands and the western lowlands.
 - ii. Springs are observed in the wadi beds and support some small streams in the mountain area.
3. Hydrogeological feature.
 - i. Geological succession is shown under.
(lower to upper)

* 筑波大学地球科学系 Institute of Geoscience, University of Tsukuba

** 通産省地質調査所環境地質部 Geological Survey of Japan

Basement complex—Pre-Cambrian

Wajid sandstone—Ordovician

Kohlan series—Lower Jurassic

Amran series—Upper Jurassic

Tawilah group and Medj-Zir series—Cretaceous to Paleocene

Yemen volcanics—Upper Cretaceous to Tertiary

Baid formation—Miocene to Pliocene

Quaternary basalts—Alluvium

- ii. Main aquifer in this country is Alluvium, Quaternary basalts and Yemen volcanics. On the other hand the rest can be regarded as aquitard or aquiclude, (especially basement complex as aquifuge).
 - iii. As shown in Figure 12, aquifers are exposed in the central highlands and in the eastern and the western lowlands and aquitards or aquicludes are exposed in the mountain area.
4. Mode of occurrence and movement of groundwater.
 - i. From mentioned above condition, the central highlands can be regarded as recharge area of groundwater.
 - ii. For the most part, perennial streams in the mountain area are fed by the outflow of groundwater from the central highlands.
 - iii. In Tihama plain and the eastern lowlands alluvium underlies a thick cover of eolian deposits and for its high infiltration capacity, surface flow change into groundwater rapidly.

I. 序 論

1. はじめに

筆者等は昭和53年11月より12月にかけて、前後3週間にわたり、国際協力事業団より派遣され、イエーメン・アラブ共和国における地方水道計画の事前調査を行なう機会を得た。この調査は今後に予定されている本格調査とそれに引きつづく水源開発工事を円滑に進めるため、先方政府の意向聴取、水源開発予定地域の概況の把握を目的としたもので、期間は短かったが、その間に同国の約 $\frac{1}{3}$ の地域を踏査し、乾燥地域の水のあり方、ならびに水利用について、いくつかの新知見を得ることが出来た。詳細については、今後の調査に待つところが大きい、今回は今までに紹介されることの少なかった同国の自然環境と水利用の概況について、今後の調査の進め方などについても読者の方々からの御教示をいただければと思い、とりあえずまとめることとした。

小論を公表するに当たり、調査の機会を与えて下さった国際協力事業団(担当地曳隆起氏)、調査団員として同行し、御助力いただいた通産省地質調査所武居由之氏、国土開発技術研究センター山口嘉之氏、建設省東北地方建設局江川良武氏の各位に心から感謝申し上げる。

またこの調査に参加するそもそものきっかけを作っていた、立正大学の山本莊毅教授、現地調査に際して非常にお骨折りをいただいた日本大使館の塩谷臨時代理大使、多くの助言と資料の提供をいただいた株式会社日本テクノの高松幹二氏にも深く感謝申し上げます。

2. イエーメン・アラブ共和国の概要

イエーメン・アラブ共和国はアラビア半島の南西端部に位置し、北と東はサウジアラビア、南はイエーメン民主人民共和国に接し、西側は紅海をへだててアフリカ大陸に対峙している。

面積は195,000 km² で日本の約 1/2 である。

アラビアという語から我々は広漠たる砂漠を思い浮べるが、この国はむしろ山岳国家といった方が良く、首都の Sanaá をはじめ、地方の小都市や集落は、中央部の山岳地帯あるいは高原地帯に立地するものが多い。

約650万人と推定される人口は全国にほぼ一様に分散し、きわだった人口の集中は首都の他、紅海に面した商業都市の Hudaydah, 南部の Taizz, Ibb 等にみられるだけである。

地方の一集落の構成家屋数は数10軒のオーダーのものが多く、しかもこれらが山岳地帯の山頂部に立地する傾向があり、この国の水問題を一層難かしいものとしている。

さて、イエメンはかつて Arabia Felix (幸福のアラビア) と呼ばれ、アラビア半島では唯一の自然に恵まれた国として、B. C 750年の Sabaá 王朝以来数代の王朝が栄えて来たといわれる。

当国北西部にある Marib には世界最古のものとされるダムの遺跡があり、その付近には写真1, 2に

第1図 イエメン・アラブ共和国の位置

写真 1, 2 北イエメン東部のマリブ付近にみる古代農耕の遺構 (右側の写真には現在の洪水かんがいによる耕地がみられる (Central Plann. Org., Y.A.R. (1978) による)

- 1) 集落が山頂部に立地する理由については、推測の域を出ないが
 1. 外敵の侵入からの防禦
 2. 気候条件、当国は低緯度にありながら、山岳部では温和で降雨に恵まれている。
 3. 土地条件、耕地に適する平坦面が多い、また土壌層も厚い。
 4. 精神的あるいは宗教的なものが考えられる。

あるような一種の条理遺構がのこっている。しかしそののち1546年以来2回にわたるオスマントルコの侵略があり、加えて英国の南イエーメン支配の影響もあって、低迷の時代が続いた。1918年イスラム教シーア派のザイド派のイマーム（教主）たるヤフヤーが立って国王となり、外国の支配を排して独立したが外からの影響を恐れて鎖国政策をとったため、近代化への路線から大きく立ち遅れることとなった。

1948年革命が起り、1962年に共和制がしかれたが、しばらくは王制派との間に抗争が続き、ようやく内乱が終息したのは1968年にたってからである。現在も国情が完全に安定したとはいいい切れず、中央政府の内部機構は勿論、地方の行政も充分とは行なわれず、むしろ部族勢力の均衡の上に立っているといった方が良い。加えて国際的には東西勢力の影響もあって、しばらくは混迷の時代を経験しなければならないといった状況である。

近代化のいちぢるしい立ち遅れを示す資料として、つぎのいくつかの例をあげる事が出来る。即ち1970年度の国民所得3億ドル（1人平均50ドル）、10歳以上の文盲率87%、5～14歳以上の就学率12.6%、平均寿命40歳といった数字からその状況がうかがえる。

当国はアラビア半島唯一の農業国で、国民の90%は農業に従事しており、国民生産の70%は農産物によって得ている。それでも国土の大半が山岳地帯、紅海に面した乾燥地帯、東部のルブ・アル・ハリ砂漠地帯といった土地条件にあるため、農地面積は全イエーメンの15%（降雨待ちの休耕地を考えると12%になる）に過ぎない。このため農業国でありながら、食糧の50%は輸入に頼っているといった状態である。

このようなことから、この国の経済は50～200万人といわれる出稼ぎ労働者（主としてサウジアラビアで働いている）の仕送りや海外援助によって支えられている状況で、“世界一貧しい国”という酷評のあるのも頷ける感じがする。

3. イエーメンにおける水問題の現状

政府はしかしこの様な悪条件にかかわらず国民の生活を向上させる努力を意欲的に推し進めている。各国からの援助あるいは借款による道路の建設の外、工場、農場の建設も着々と進められているが水問題もその重要施策の一つとなっている。

現在の水利用状況ののちに詳述されるが、きわめて低度であって、いわゆる公共水道の普及しているのは首都の Sanaá の他、Hudaydah, Taizz ぐらいのもので一部でようやく小規模な簡易水道が施工されるようになったに過ぎない。

山岳地帯のほとんどでは、いまだに唯一の水源は限られた時期のしかも少量の降水に頼っている。恐らく全国民の80～90%はこういった状態にあると思われる。それでも常時水が確保されれば良い方で、貯水が涸渇した場合には水を得るために10km から20km の遠方まで水を汲みに行かなければならない。こういった仕事はすべて、女、子供の肩にかかっているのである。

先に当国の平均寿命が低いことを述べたが、その大きな原因は消化器系統の病気による幼年時の死亡率が高いためであって、しかもその大半は極度に悪い水質に起因するといわれている。

勿論水問題はこうした生活用水に限らず、農業の上でも重要課題となっており、この国の農業生産は灌漑用水の確保によっていちぢるしく高められることは明らかである。

以上のような背景から、水源開発は各国の手で手がけられており、その主な国として、サウジアラビア、アメリカ、イラク、ソ連等があげられるが、最も熱心なのはサウジアラビアである。

始めにもどるが今回の調査と引き続く本格調査は日本政府が当国の要請にもとづいて円借款を前提として実施にとりかかる水源開発事業の一環で、第一回の調査及びそれにもとづく詳細設計につづく第二回目のものである。

第一回目の調査は昭和51年に実施されたが、当時計画サイト中、道路事情その他の事情のため実施計画から外されていたものが今回の計画の中に繰延べられている。即ち主として山岳地帯の水源開発が今回の

主目的となっている²⁾。

II. 自然環境

1. 地形

先に述べたようにイエメン・アラブ共和国の国土の大半は山岳地帯である。即ち標高3,000 m を越える山脈が紅海に平行して、ほぼ南北に連なり、第2図に示したように当国の水系を大きく東西に分けている。いま主要ワジ³⁾に沿う東西方向の断面によって、地形上の特徴をみると、第3図のようであって、中央山脈を境として極端な非対称形をなしているのが指摘される。即ち紅海に面した標高0~500 m の海岸平野の西縁は急激に高度を増す山岳地帯で画せられている。山岳地帯は地殻変動による断断と、侵蝕作用が加わって、極めて急峻な地形となっている。

中央の背稜山脈は標高1500 m 以上で、高原状をなし、比較的平坦な地貌を呈する。この部分には構造的なものと考えられる盆地群が所々に指摘される。これより東部では徐々に高度を下げ、標高1000~1500 m の比較的なだらかな丘陵性の地貌をなす山地をへて、広大なルブ・アル・ハリ砂漠へとつづいている。

後掲の文献¹⁷⁾によれば、当国の地形は東西方向の断面でみて、大きくつぎのように分類され、図4のように示される。

A. 西斜面

- ・ Western lowlands 0~500 m
- ・ Western midlands 500~1,500 m
- ・ Western highlands 1,500 m 以上

B. 東斜面

- ・ Eastern highlands 1,500 m 以上
- ・ Eastern midlands 1,000~1,500 m
- ・ Eastern lowlands 1,000 m 以下

C. 中央高地

- Central highlands 1,800~2,400 m

各々について若干解説しておく。

a. Western lowlands

Tihamah と呼ばれ、紅海に面した幅30~40 kmの海岸平野である。第2図に示したように海岸部はほぼ10~20 km の幅で砂丘が発達し、これより内陸部では土質の砂漠となっている。また山脚部に扇状地が発達している。ワジと称する間歇河川が平地を2~3 m (時に4~5 m) ほど下刻して東一西に流れているが、山脚部に近いところでは一部に流水をみるものの、ほとんどは涸れ川となっている。また海岸寄り

第2図 イエメン・アラブ共和国の水系概要図

- 2) 全部で14サイトであるが、ほぼ全国に散在している。
- 3) Wadi, 不断河川もみられるが大半は出水時にのみ流水がみられる。山間部では流路は固定されているが平地部では乱流するものが多い。

第3図 主なワジ流路に沿う地形断面 (Central Plann. Org., Y.A.R. (1978) による)

第4図 イエメン・アラブ共和国の地形区分 (Central Plann. Org., Y.A.R. (1978) による)

では流路も定まらず、洪水の度に乱流しているようである。この様に極度に乾いた Tihamah 平原の中にも所々に緑がみられ、いわゆるオアシスが存在する。また上空よりみると带状に続く緑地帯も遠望されるが、このようなところは地下水の浅い部分と判断される。

b. Western midlands, Western highlands

大きなワジ沿い、または山間盆地に平坦地をみる外は急峻な地形である。谷底部には Precambrian などの古い時代の地層が露出し、流水もみられるようになる。ほぼ1,500 m 付近より高いところで平坦地が多くなり、耕作も行なわれ、集落がみられるようになる。更に高標高の山稜に近いところでは、地形的に可耕地と思われるところは余すところなく耕作されており、この国の典型的な階段畑の景観が展開する。第5図と写真3は集落の分布状態と土地利用状況である。

c. Central highlands

南北 240 km, 東西 30~50 km にわたって、1,500 m 以上、3,000 m に達する高地がひろがり、首都 Sanaa をはじめ、主な都市が立地する。平坦面が多く分布し、地形がなだらかである。

比較的規模の大きな盆地がこの地帯を南北に連ねて分布している。常時流水のみられる Wadi はなく、流路が明確に追跡出来ないものが多い

い。この地域には次のべるように volcanic rock あるいは第四紀の堆積物が厚く被っており、浸透性が良いため、盆地内に流れ込むものは末端は尻無川の様になっているようである。

d. Eastern highlands, Eastern midlands

西斜面に比べてなだらかで、地形でみる限り土地条件は良いにもかかわらず、耕地ならびに集落は少ない。つぎにのべる水文気象条件や地質条件の相異によるところが大きいように思われる。

このような地形上の大きな傾向の外にこの国の水文地理的条件を理解するために必要ないくつかの特徴を紹介しておく。

ケスタ地形

硬質岩部と軟質岩部が互層をなし、単斜構造をなして

写真 3 Sanaa-Hudaydha 道路, Al Khamis 付近の峠よりの眺望。谷底から山頂まで丹念に階段畑が耕作されている。所々に集落も見える。

第5図 Al Mahweet における集落の分布状態

いるような場合には第5図のように見事なケスタ地形が形成されている。このようなところでは軟質岩部が帯水層となっていることが多く、湧水の利用などがし易いため、集落が立地していることが多い。第6図はそのような土地条件と集落の立地状況の一例である。

ペディメント

Precambrian の片麻岩地域、あるいは花崗岩質岩石から成る山地の山脚部にみられる。特に Tihamah 平原に面した山脚部に比較的規模の大きいものが発達している。また山間盆地、地溝状の大きなワジ沿いなどにも発達している。ペディメント末端部には緑が多く、地下水が浅いところにあることが予想される。Sanaa 市郊外の Haddah 付近にはこの国としてはめずらしく規模の大きい湧水がみられ、緑地が発達しているが、地形的にはペディメントに相当する。

ワジ

当国には上流から下流にかけて常時流水のみられる河川はなく、大部分は雨期に限りて流水がみられる

第6図 土地条件と集落の立地状況の一例

写真4 Bayt Al Ashwal ワジ底は地下水面も浅く、緑が豊富である。写真は地下水によるかんがい状況

第1表 ワジの流域面積

西部斜面	
Wadi Mawr	7,500km ²
Wadi Surdud	2,450
Wadi Siham	3,200
Wadi Rima	2,450
Wadi Zabid	4,500
Wadi Rasyan	1,750
Wadi Mawza	1,300
合 計	23,150
南部斜面	
Wadi Tuban	3,550
Wadi Bana	5,900
合 計	9,450
東部斜面	
Wadi Amlah	1,000
Wadi Khabb	1,400
Wadi Awban	800
Wadi Madhab	2,700
Wadi Hirran	3,000
Wadi Kharid	3,100~ 7,000
Wadi Saba	8,900~11,300
Wadi Harib	1,000
Wadi Bayhan	2,450
合 計	30,650

のみである。また山間部では流水のみられるものでも、低地にいたるとまもなく伏没あるいは蒸発によって失われ、通常の降雨では海岸までは達しない。流水がみられなくても地下浅所に地下水が存在することは、ワジ沿いに緑が多いことから推定出来る。写真4はその様子を示したものである。

東斜面と西斜面のワジを比較すると第1表に示したように、前者の方が流域の大きいワジが多く、また全流域面積も大きい。しかし谷密度は西斜面の方が大きく、流路も複雑である。

2. 水文気象

イエーメン・アラブ共和国は北緯13°~17°のところに位置し、緯度の上からは熱帯~亜熱帯に入るが、上に述べて来たように東西の幅300km 足らずのせまい範囲で地形条件が極端に変わるため、地域による気候の相異もいちぢるしい。まず気象の概況を述べればつぎのようである。即ち5月から9月にいたる夏期の大気の流れは、主として西ないし南西から東ないし北東方向であって、この時期の湿った大気は中央山岳地帯にぶつかってその西斜面に大雨をもたらし、雨期を形成する。また10月から2月までの冬期は中央アジア方面から乾いた大気の流れ込んで無降雨期を形成する。

降雨量のおよその分布は第7図に示したとおりであるがほとんどは夏期に集中して降っている。雨期は第8図に示したように、4~5月の第1の雨期と7~9月に現われる第2の雨期と大きく2回あるが、降雨量は後者の方が多い。

西部、東部の低平地帯では、このような大気の流れとほとんど関係なく、年間を通じて常に乾いており、降雨量0~200mm/年と極端に少ない。

ほとんどの降雨は非常に急激に降り、また局地的であって、午後から夕方にかけてシャワーのように降る。このためふだんカラカラに乾いていたワジは一変して濁流と化す。

中央高地地帯の Dhamar における PRATT と CHILTON (1976) の研究によればワジの表流はつぎの3つに分けられる。

	全流量に対する比率	
① 洪水	60~70%	急激な降雨後、突然に起り、持続時間も短い
② 中間流出	25%	洪水の終りに起る。数日~数週間の間にわたり、ほぼ一定した水量
③ 基底流出	10%	年間を通じてほぼ一定、しかしワジ全コースにわたっては流れない。灌漑、飲用に使われている。乾期にはこれを水源として数100m上の耕地まで汲み揚げられる。

つぎに先にあげた地形区分に対応させて、この国の水文気象の特徴を述べる。

a. Tihamah 平原

紅海に面したこの平地では、年間平均気温は22~35°C、また年平均降水量は0~300mmで熱帯気候である。植生はほとんどなく、サボテン類やアカシアなどの灌木がところどころにみられる程度である。蒸発量が多いことと、砂質地盤のところが多いため、ワジ沿いの低地と、地下水揚水が可能となったところで小規模の耕作がなされているに過ぎない。第9図にこの地域の典型的な気候状態を示すが、興味のあるのは、地温が月平均気温より10°Cも高いということである。深度30~40mの井戸で測定した地下水温が調査時の12月で30°Cときわめて高かったのも、もっともといえる。

b. 西部山岳地帯

年平均気温は16~26°C、年平均降水量は、200~600mmで熱帯ないし亜熱帯の気候を示す。

この地域の中でも1,500m以上の地域では平坦面が多いうえ、土壌層の発達も良く、さらに水文気象条件が良くなるため、農耕地も多くなる。

柑橘類、野菜、アルファルファ、ブドーなどの他コーヒー、カットなどが栽培されている。第10図に

第7図 イエーメン・アラブ共和国における年間の降水量の分布 (Ministry of Agr. & Water Recour. Develop. Dpt. (1978) による)

第8図 イエメン・アラブ共和国の代表的な地点での月降水量

第9図 ティハマ平原の気候 (Zabid)

第10図 Taizz 市における年降水量の経年変化

第2表 Dhamar における水収支の概要

成分	渇水年	平 年	豊水年
降 水	100mm	400mm	700mm
蒸発散	85 "	200 "	295 "
流 出	10 "	185 "	365 "
地下水	5 "	15 "	40 "

この地域の代表的な都市である南部の Taizz における年降水量を示す。

この Taizz の北方 Ibb 付近は当国で雨量のもっとも多いところとして知られているが、このことは他の地域の景観と違って、緑のきわ立って多いことからもうなずける。

C. 中央高地地帯

標高1,800~3,700 m で、平均気温は10~18°C, 年平均降水量は200~1,800 mm で温暖気候である。

冬期には0°C 以下になることも珍らしくなく、時には降雪をみることもあるという。この地帯は北イエーメンでは降雨に恵まれており、降雨依存型の農業が卓越し、耕地もよく耕されている。

PRATT と CHILTON (1976) はこの地帯の南部に位置する Dhamar における豊水年, 平年, 渇水年の降水量, 蒸発散量, 地下水浸透量を表2のように概算している。

d. 東部山岳地帯

中央高地地帯の東側に位置し、標高1,200~1,800 m 平均気温16~24°C, 降水量は100~400 mm で亜熱帯気候を示す。この地域は Meshreq と呼ばれ、東方のルブ・アル・ハリ砂漠へ続いている。

小麦・大麦・トウモロコシなどの穀類やカット、野菜、ブドーなどが階段畑あるいはワジ底での湧水灌漑によって栽培されている。東部に向かうに従って植生はしだいにステップへと移行する。この地域の低標高地域は現在ではほとんど集落はないが、かつては有名な Marib のダムで代表される灌漑事業が盛んで大規模な耕作がなされていたという。

e. 東部砂漠地帯

標高800~1,200 m で、年平均気温は22~28°C, 降水量は0~200 mm で亜熱帯~熱帯気候を示す。植生はワジ底を除いて全くみられない。一部にオアシス耕作や、出水灌漑による耕作(写真1, 2)が行なわれ

第11図 イエーメンにおける農耕区分概念図 (Fisher, W. B, 1971による)

ているが、大部分は未耕作地である。

以上を土地利用の上からみて、標式的に示すと第11図のようになる。また水文気象区分と土地利用および今回の地下水調査の結果を整理して示すと第3表のようになる。

3. 地質・水文地質

(1) 地質概説

アラビア半島は先カンブリア系を基盤とする東部アフリカ楕状地の一部をなしていたが、白亜紀末から第三紀初期以降に東アフリカから分離して北東方向に移動を続けて来たものだと考えられている。同時にアラビア半島西部地域は隆起し、はげしい地殻変動が続けられて、無数の horst や graben が作られた。先にのべたこの地域の地形上の特徴、とりわけ紅海に面した比高 1,000~2,000m を越える不規則かつ急峻な階段状の地形は、このような運動の過程で形成されたものと考えられている。

これらの造構造運動に伴って多量の熔岩、火山灰が噴出し、広大な地域を被った。このような火山活動は極く最近にいたるまで継続していたことが中央高地地帯を中心として無数に存在する円錐状の火山地形から推定される。

当国における地質調査は現在まで充分になされているとはいえず、今後修正される余地が大きいと考えられるが U・S・G・S (1963) によるアラビア半島の地質図によれば、およそ地質層序はつぎのようである。(下位より上位へ)

a. Basement complex

先カンブリア系、東部アフリカ楕状地の続きで、NNW-SSE 方向つまり紅海に平行した構造を有している。種々の侵入岩、変成岩からなり、主として北部と南部に分布している。また horst の脚部、深い谷の谷底部などに小露頭がみられる。

b. Wajid sandstone

オルドビス系、イエーメンで最も古い堆積岩である。下部に基底礫岩を伴い、Basement Complex を不整合に被う。主な露出地は北部と北東部である。主として石英砂岩、礫質砂岩、礫岩から成る。

c. Kohlan series

下部ジュラ系、中央北部と北西部に分布している。黄白色の細~粗粒の石英砂岩で礫岩のレンズ、礫岩、灰色頁岩、石灰質頁岩から成る。時に赤鉄鉱、チャートを伴い、主として陸成堆積物と考えられる。

d. Amran series

ジュラ系、中央部、北部、東部に広く分布している。海成の石灰質の堆積物で石灰岩、泥灰質石灰岩、泥灰岩、頁岩から成る。この層の上部には細粒の未固結砂岩、頁岩の他にジブサムがある。また一部に岩塩層の発達をみる。

e. Tawilah group, Medi-Zir series

第3表 水文地理的地域区分

	標高	気候	平均気温	年平均雨量	植生	灌漑方法*			農作物	水温	pH	電気伝導度	
Tihamah 平原	m 0-500	熱帯	°C 22-35	mm 0-300	サボテン類, などの アカシアなどの 灌木	出水灌漑型	動力灌漑型			なつめやし 野菜	°C 30 以上	7.5 以上	μS/cm 1,000 以上
							湧泉灌漑型	出水灌漑型	オアシス灌漑型				
西部および 南部山岳地帯	500-210	熱帯 亜熱帯	16-26	200-600	イナゴマメ, クル イナジク, クル ミなどの地中海 性植物	降水依存型	動力灌漑型			棉花, パナナなどの果実, タバコ, サゴヤシなど	25~30	7.0~7.5	500 ~1,000
							湧泉灌漑型	出水灌漑型	オアシス灌漑型				
中央高地地帯	1800-3700	温暖	10-18	200-1800	イナゴマメ, クル イナジク, クル ミなどの地中海 性植物	降水依存型	動力灌漑型			小麦, 大麦, トウ モロコシ, かんき つ類, トマトなど の野菜, アルファ ルファ, ブドウな どの果実	20 以下	7.5以上	500以下
							湧泉灌漑型	出水灌漑型	オアシス灌漑型				
東部山岳地帯 (Meshreq)	1200-1800	亜熱帯	16-24	100-400	ステップ	降水依存型	動力灌漑型			なつめやし 野菜	°C 30 以上	7.5 以上	μS/cm 1,000 以上
							湧泉灌漑型	出水灌漑型	オアシス灌漑型				
東部砂漠地帯	800-1200	亜熱帯 熱帯	22-28	0-200	なし	降水依存型	動力灌漑型			棉花, パナナなどの果実, タバコ, サゴヤシなど	25~30	7.0~7.5	500 ~1,000

* このほか全土にわたって伝統的揚水灌漑型があるが、全灌漑面積の1%にも満たない。

白亜系, 中央部, 北部, 南東部, 南部に分布している。中粒~粗粒の斜交葉理を示す砂岩で陸成層である。

f. Yemen volcanics

上部白亜系~第三系, 非常に厚い火山岩から成り, 一部に堆積岩を挟む。主として中央部, 西部また南部に広く分布し, イエーメンで最も代表的な岩石となっている。以前は GEUKENS (1966) により Trap series として一括されていたものである。岩石は玄武岩安山岩, 粗面岩, 流紋岩, 凝灰岩, 集塊岩等変化に富んでいる。堆積岩は火山活動の中断期に形成された湖沼堆積物あるいは氾濫原堆積物から成る。Yemen volcanics の層厚は場所によって異なるが厚いところでは2,000 m 以上に達する。

g. Baid formation

中新統~鮮新統, Tihamah 地域の一部に分布する。主として珪質あるいは凝灰質頁岩, 砂岩, 石灰岩から成る。紅海に面した Salif 地方の岩塩ドームは本層中にある。

h. 第四期玄武岩

当国の各地で円錐状火山, クレーターなどを作るほか古期岩石の大裂隙からの噴出物として玄武岩, 凝灰岩, 集塊岩, 玄武岩質岩脈群が分布している。これらの中には歴史時代になってから噴出したものもある。

i. 沖積層

海岸平野, ワジ沿い, あるいは山間盆地に分布している。Tihamah 平原では厚さは200 m 以上に達する。また Sanaá 盆地では300 m 以上に達するという報告もある (ITALCONSULTANT 1973)。

(2) 水文地質

1) 地質系統と地下水

上述の地質系統のうち, 当国の主な可採水層は沖積層と第四紀玄武岩及びイエーメン火山岩類であり, ついで Tawilah group, Kohlan group, となっている。Amran series, Baid formation, Basement complex は一般に難可採水層あるいは非可採水層ともいえるものである。

a. 沖積層

Tihamah 平原, ワジ沿いの沖積氾濫原, 及び山間盆地あるいは中央高地地域の低所に分布している。

Tihamah 平原では沖積層の厚さは100~200m 以上であって, 深層80~100m の深井戸で日量500~1,000 m³ の地下水を揚水している。Hudaydah 等のように海岸に近いところでは過剰揚水による塩水化の現象がみられる (Cl⁻濃度2,000~3,000ppm)。ワジ沿いの低地では比較的豊富な地下水を産する。ここでは深度5~20m の手掘りの浅井戸が数多く分布しているが中には乾期になって涸渇するものもある。

地殻変動の結果形成されたと考えられる構造盆地が各所に存在するが⁴⁾, ここには沖積層が厚く堆積していることが多く, しばしば良好な帯水層が発達し, 地下水が利用されている。

d. 第四紀玄武岩

割れ目, あるいは未固結火砕岩中から比較的多量の地下水が得られ, 本層を対象とした深井戸が多い。水質は一般に良い。

c. イエーメン火山岩類

前項にのべたように, 広大な地域を被い, しかも層厚は2,000 m 以上に達し, 割れ目, 節理あるいは断層の破碎部などから豊富な裂か性の地下水を産するほか, 未固結岩層中には地層水も賦存し, 山頂部あるいは台地の高所といった地形的な条件で問題がなければ, 採水の対象として比較的良好的な地層といえる。水質も概して良い。

d. Tawilah group

主に砂層からなり, 空隙が大きい。Sanaá 市付近では本層が主要採水層の一つとなっており, 深度200~300 m に及ぶ井戸が数多く掘られている。比較的豊富な地下水を産するほか, 水質も概して良いので地下

4) Sadah, Amran, Sanaá, Dhamar 等の比較的規模の大きい盆地の外に小規模の盆地が山間部に数多く点在している。

水利用量が増大し、最近では水位低下が年間1.5~2.5 m に及んでいるといわれている。

e. Amran series

この地層は水問題が最も深刻な中央部より北部にいたる山岳地帯に分布している。岩石の亀裂部、断層破碎部を除いて一般には地下水に乏しく、当国において取水がもっとも困難な地層の一つとなっている。しかし本層中に挟在する石灰岩の中には割れ目、空洞が発達しているところがあり、この様なところでは地下水を産する。地下水位については場所にもよるが一般に低いことが報ぜられており (Ministry of Agr. & Water Resour. Develop. Dept 1978), 深井戸の中には自然水位が200~250 m に達するものもある。

f. Kohlan series

本層の砂岩、礫岩中に掘られた手掘井戸が比較的豊富な地下水を産する。上位の Amran series が本層を被って分布するようなところでは、少なくとも700~800m は掘る必要があるという (Ministry of Agr. & Water Resour. Dept 1978)

g. Wajid sandstone

北部イエーメンの主要採水層となっている。この地方には20~45 m の掘井戸が数多く分布しており、比較的豊富な地下水を得ている。

2) 帯水層の水理定数及び深井戸の産出能力

沖積地域をのぞいて他は地層水というより裂か水的な賦存形態を示すことから、局所的な地質条件あるいは地形条件によって帯水層の水理定数には大きな相違がみられるが、全体として、沖積層、第四紀玄武岩が大きく、ついでイエーメン火山岩類、Wajid sandstone の順になっている。サウジアラビアの援助で施工された井戸の揚水試験によって算出された透水量係数は第4表のようである。

第4表 透水量係数

地 域	地 層 名	透水量係数 (m ² /day)
Saadah	Wajid sandstone	350
Arhab	Amran limestone	34
"	"	17
Haashed	"	5
Saadah	"	16
Al Jayrif	Yemen volcanics	237
Bani Bahlul	"	15
Baut Qowmani	"	611
Amran-Raydah	Quaternary volcanics	16
"	"	9480

深井戸の揚水量は多いものでは1,000~2,000 m³/d を示すが、我が国とくらべて概して少なく、500~600 m³/d のものが多い。また中には数10 m³/d 程度といったものもある。

地質別にいえば1,000 m³/d を越すものは、沖積層、第四紀玄武岩、イエーメン火山岩類等で Wajid sandstone がこれにつぐ。一方一般に少ない揚水量にもかかわらず、水位低下量の大きい井戸が目立つ。稼動中または稼動が予定されている深井戸42本の揚水時の平均水位降下量は31 m で一般に大きい、とりわけ Amran series ではそれが100m 以上に達するものがあり、一部の井戸は廃井となっている。これにくらべて水位降下量が10 m 以内にとどまるものは沖積層~イエーメン火山岩類である。なお比湧出量は平均160m³/day/m である。

3) 水文地質の地域的特徴

第12図は U・S・A・I・D (1977)によって作成された当国の地質図をベースとし、上述の知見を加えて

編図した帯水条件からみた地質区分図である⁵⁾。この図によると当国の水文地質は、大きくつぎの4地域に分けて考えることができる。

①Aquifer の十分な発達期待され、地下水開発の可能性⁶⁾ がもっとも高い地域——沖積層を主体とする。Tihamah 平原、中央高地、Rub・Al・Khali 平原がこれに該当する。

②Aquifer, Aquitard の発達が支配的で、上記について地下水の開発が可能な地域——第四紀玄武岩、イエーメン火山岩類を主体とする。中央部以南の中央高地及び東西斜面がこれに該当する。

③Aquitard, Aquiclude が支配的であって、地下水開発が困難な地域——Tawilah group 及びそれ以前の古期岩石を主体とする。中央部以北に広く分布するほか、西斜面、東斜面の谷底部に露出する。

④Aquifuge が支配的に分布し、地下水開発は非常に難しいと考えられる地域——Basement complex, 花崗岩類を主体とする。北部および南部の低位部、深いワジ谷底部に分布する。

以上を要約するとつぎのようである。即ち地下水開発のポテンシャルの高い岩層は中央高地部に分布し、Amran series 及び Basement complex のような難～非帯水性の地層は西斜面あるいは東斜面に分布する。特にワジ谷底部での露出が目立つ。これらの岩層の東側あるいは西側の低平地部では、この国でもっとも帯水性の高い沖積層が厚く堆積している。

この様な地盤条件のもとでは、中央の高地に降った雨は急速に地下に浸透し、やがて非帯水層にぶつかって低位部に向かって流動し、東西の山岳地帯の谷底に湧出するであろう。

東部あるいは西部の平原地帯に入ると、表流水は直ちに地下に浸透し、また一部は蒸発によって失われる。

第12図 帯水条件からみた地質区分

III 水 利 用

1. 水利用と水源

(1) 概要

いままでに述べて来たように、地形、地質、水文気象などの条件をとっても水利用にとってはきわめて

- 5) 図の凡例で、Aquifer とは水を十分含み、かつそれを通過させる能力を有する層と定義され、Aquitard とは水を含むがその通過する速度が遅い層、また Aquiclude とは水を含むが、水を通過させ得ない層と定義されている。さらに Aquifuge は水を含まず、かつ通過させない層と定義されている。Aquifer を帯水層、Aquifuge を非帯水層と呼ぶ場合はあるが、その他の訳語は定着していないので、ここでは原語のまま用いた。
- 6) おもに深層地下水を対象とする。以下も同様

厳しいものといわざるを得ない。

この国の水利用のあり方をみる時、それがこのような制約のもとで長年月と多くの労力を費やして得た最適の解答であったことがよく理解出来る。このことは逆にいえば、水利用の現状をみることによって自然条件がかなり細かいオーダーのところまで推定出来ることを物語っている。また同時にこの様なきびしい自然条件下での今後の水源開発の方針を検討する場合、示唆を得ることが多いのではないかと思われる。以下に農業用水、生活用水に分け、それぞれの水源と利水状況を紹介する。

(2) 農業用水

農耕地面積は全国面積の15%程度といわれ、そのほとんどは山岳地帯の平坦地、主なワジ沿いの低地にある。広大な面積を有する Tihamah 平原は農耕地としてのポテンシャルは高いが、水源の開発がおくれでかなりの部分がいまだに荒地となっている。

1976年、1977年の統計により、全農耕地1,515,000 ha を灌漑方式によって区分すると、つぎのようである。

①雨にたよる耕作地	1,277,000 ha	84%
②洪水にたよる耕作地	120,000 "	8%
③泉にたよる耕作地	73,000 "	5%
④地下水にたよる耕作地	45,000 "	3%

1) 降水の利用

写真3はイエーメンにおける典型的な階段畑の例である。丹念に築きあげられた石垣と農地を囲む高さ20~60cmの土と石によって作られた壁は少しでも良く水を貯留し、かつ農地の侵食を防ぐための工夫であり、乾期においても、よく耕やしているのは雨期における降水を良くしみ込ませるためであるという。

さらに未耕地には溝を切っておき、そこに集まった水も耕地に導き入れる工夫もなされている。

2) 洪水灌漑 (Spate irrigation)

毎年出水時期に主なワジでは土堰堤を作り、洪水をダムアップするか、直接耕地に導き入れて利用している。写真1、2には Marib 付近の灌漑地の様子も示されている。

3) 泉、表流による灌漑

山岳地帯の谷底部、山麓斜面では泉や小さな流れもみられ、これを水源として農地が耕されている。ここでは多年生の穀物、コーヒー、カット、野菜、果物など多種の農作物が作られており、また一部では2期作も行なわれている。

4) ポンプ灌漑

Tihamah 平原、中央高地の外、西部山岳地帯の谷底には手掘りの浅井戸の揚水による灌漑が行なわれている。写真5はそのような井戸の典型例で、中には一井よく1,000~2,000 m³/dayの揚水量を示す。

かつてはこれも人力あるいは畜力によって揚水されていたが、最近では動力ポンプが導入され、年々増加の傾向にある。井戸の深さは10~20m程度のものが多い。

(3) 生活用水

生活用水の水源は降雨、泉、井戸であるが、そのうち降雨依存が全体の80%以上を占めている。それぞれについて説明する。

1) 降水の利用

シスターン (Cistern) と称する一種の溜池に降水を溜め、雨期以外の8カ月前後をこれに頼っている。大体集落ごとに一つづつあり、大きさ、あるいは形は様々であるが、容積2,000m³程度の方形のものである。

7) 表層部の表面積を大きくして、いわゆる凝縮量を高める効果もあるのではないと思われる。即ち紅海より吹き込む湿度の高い大気が山岳地帯の西斜面にぶつかり、露となって地面に吸収されることも、狙いとしているように考えられる。

写真 5 Sanaá の西方 Al Baiad 付近の浅井戸 (ポンプと動力は日本製のものが多い)

写真 6 Sanaá-Hudaydah 道路沿いにみられるシスターン (集落の人口とシスターンの容積から1日の使用量は5~7 l/人/日が限度であることがわかる)

多い。一例を写真6に示す。今回観察したものは大部分がコンクリートにより、ライニングされていたが、中にはそれがないものがあり、そのようなところでは干上っていた。シスターンの容積と人口から水利用原単位を概算すると7~14 l/人/日程度である。

シスターンの位置はどちらかといえば、低所にあるため、泥その他の汚物も一緒に流れ込むため、きわめて非衛生的である。この国では年少者の消化器系統の病気が多く、これが平均寿命を低くしている原因とされているが、この種の用水の改善が最大課題とされている。このような水でも、しばしば涸渇して充分の量が得られないことがあり、その折には10~20 km, あるいはそれ以上の距離のところから人力か畜力によって運ばなければならないという。

2) 泉の利用

山岳地帯では地層の境界、あるいは亀裂などに湧水がみられる。場所によっては多量の水が湧出しているところがあるが、大体はごく少量でかつ季節的のものである。

一例として、第13図に標高2,300~2,400 mのところに位置する Mahweet 市にある湧水の利用施設を示す。ここには毎分10 l 程度の少量の湧水があり、シスターンと共に利用されているが、乾期にはしばしば涸渇するとのことである。

水汲み場および洗面、洗身場は男女別々となっている。

この国では今のところ特殊例と考えられる水利用が標高1,850 m の山頂にある Hajjah 市でなされている。ここでは市の北方約5 km, 標高差約550 m 下の谷中に堰堤を設け、これによって堰上げられた伏流水をポンプアップしている。高揚程の上、送水管が直径2吋と細いので、ロスが大きく、動力費が嵩んで

男性はAかBの階段から入る。女性はモスク脇のCの道から水汲み場に入る。図中の太線によって男性の領域(階上)と女性の領域(階下)がはっきりと分けられている。

第13図 Al Mahweet における湧水利用施設(水汲み場兼浴室)

図は Al Basharah 部落の手掘り井戸で、深度38.62m、自然水位は37.36m、水温は34°C、pH 7.4である。

第14図 Tihamah 平原における典型的な浅井戸

写真 7 Sana'a 市郊外 Kabar 部落にある
深井戸による給水施設（サウジアラ
ビアの援助により完成した）

深井戸の深さは100~200m のものが多いが、中には300~400m に達するものがある。

深井戸はこの国ではもっとも高度の水施設であるが、故障した場合のメンテナンスの上で難しい点があり、実際、ポンプが故障したためそのまま放置されているものもみられる。

2. 水利用の地域的特徴

当国における水取得方法をその技術の発達段階の上からみれば、泉、シスターンがもっとも低次の段階

大体4リアル/m³ (約160円) 程度になるという。

3) 井戸の利用

a. 浅井戸

Tihamah 平原、山岳地帯のワジ沿いの低地には手掘りの浅井戸をよくみかける。資料によると、その数は全国で4,000~6,000と見積られ、農耕用と兼用されているものが多い。

Tihamah 平原では、50m 以上に達するような深い手掘り井戸があり、これを滑車に釣ったゴム製あるいは皮製の袋でロバ

に引張らせて汲み揚げている。第14図は Tihamah 平原における典型的な浅井戸のスケッチである。

b. 深井戸

Sana'a, Taizz, Hudaydah など主な都市では深井戸利用による水道が普及して来ており、その他の地方でも簡易水道が少しづつ設けられるようになった。後掲の資料によると、深井戸の数は全国で564井を数え、今後急増が見込まれている。写真7はサウジアラビアの援助によって最近完成した深井戸施設の例で、80m³ 以上の貯水タンク、スぺア・エンジンを設けたポンプ小屋、そして飲用の他家畜用の給水設備もととのえられている。

第5表 水利用の地域的特徴

地 区	水利用方式	地 形	地 質
中央高地地帯	浅井戸…………ワジ, 盆地, ペディメント…………		第四紀層(沖積層)
	シスターン…………高標高地…………		古期基盤岩, 火山岩類
西部山岳地帯	シスターン…………山頂部…………		古期基盤岩, 火山岩類
	泉…………山腹部…………		異種岩石の境, 互層部
東部山岳地帯	シスターン…………山頂部…………		古期基盤岩, 火山岩類
	浅井戸…………ワジ, 盆地…………		第四紀層(沖積層)
Tihamah 平原	浅井戸…………		第四紀層(沖積層)

第15図 イエメン・アラブ共和国の中央部を東西に切る方向の地下水の動態と水利用

として捉えることが出来、ついで浅井戸(人力、畜力による揚水→動力揚水)、深井戸、ダム貯水等が考えられる。ここで水利用と自然条件という点を浮きぼりさせるためには、動力揚水によらない浅井戸利用までの段階の地域性をみるのが良い。そこで今回調査したそれらの水源(実測したもののほか、視察によるものも含む)を地域別に区分するとおよそ表5のようで、全体として中央高地部より周辺へ地下水及び天水利用地帯、天水、泉利用地帯、地下水利用地帯と区分することが出来る。

以上であるが、最近にいたって動力ポンプの導入、深井戸による取水方法が導入されて水利用のあり方に急速な変化が生じて来た。その顕著なものは、

①中央高地部では深井戸による取水が多くなった。

②深井戸はまた Tihamah 地域でも少しずつ掘られるようになってきているが、一方個人レベルでの浅井戸からの動力取水が増大して来た。(深井戸はまだ国または地方の行政レベルでのみによって掘られている段階であるが、動力による浅井戸取水は民間レベルでかなり行なわれるようになって来ている。)

③西部あるいは東部山岳地帯では依然としてシスターンあるいは泉といった原始的水利用にとどまっているが、一部で高揚程取水が実施され、また実施されようとしている。

第16図 地下水・河川水の水質水温の分布
(大きな数値は電気伝導度 $\mu\text{S}/\text{cm}$)

IV 結 論

以上に述べて来た地形区分、水文気象区分、水文地質区分は共に密接に関係し、この国の水利用のあり方に強力な影響をあたえている。

ここでごく大きなスケールで水の動態を中央部地域を横断するかたちに大胆に画くと、第15図のようになる。

まず中央高地地帯はこの地域に多い降水を受け止める受け皿の役割をはたしているといえる。即ち、ここに発達する盆地地形と、広く分布するイエーメン火山岩類及び第四紀玄武岩、そして沖積層は水をよく吸収する。

これより浸透した水は西部あるいは東部山岳地帯に発達するワジの原流域に出現して湧水となり、不断河川を養っている。この地域の谷底部には Basement complex をはじめとする古期基盤岩が露出し、表流の地下浸透を遮断しているわけである。

山地から平野部に流れ出した表流は一部は厚い沖積層下に伏没浸透し、他は蒸発によって失われる。

第16図は地下水、湧水、表水流の pH, 電気伝導度、水温の分布を示したものである。測定数が限られているので、細部の検討は不可能であるが、大きくは上に述べた水の模式的な流れときわめて良く一致しているのがわかる。

即ち中央高地部から供給された水は周辺の低地地域への流下の過程で、水温、水質を変化させているものと考えられ、先にのべた仮説を支持している。

このようなパターンが維持されるための地下水水文学的過程はきわめて興味あるテーマといえ、今後の研究はこれを特に意識して進めたいと考えている。

参考文献

1. 一般
 - BISWAS, A. K. (1972) : History of Hydrology. North-Holland publishing Co., Amsterdam, 336 p.
 - GOUDIE, A. and WILKINSON, J. (1977) : The Warm Desert Environment. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 88 p.
 - GERARD, B. (197?) : Yemen. Éditions Delroisse, Paris, 151 p.
 - FISHER, W. B. (1971) : The Middle East.—A physical, social and regional geography. Methuen & Co. Ltd., London, 571 p.
2. 統計資料
 - C. P. O., Y. A. R. (1975?) : Socio-economic Report 1970-1974. Sanaa, 80 p.
 - C. P. O., Y. A. R. (1976?) : The Housing & Population Census Feb-1975 Preliminary Results. 2nd ed., Sanaa, 32 p.
 - C. P. O., Y. A. R. (1976) : Statistical Year Book 1974-1975. 212 p.
 - C. P. O., Y. A. R. (1977) : Summary of the First Five-year Plan of the Yemen Arab Republic. Beirut, 176 p.
 - C. P. O., Y. A. R. (1977) : Population Distribution, Administrative Division, and Land Use in the Yemen Arab Republic. 1 : 500,000.
 - C. P. O., Y. A. R. (1978) : Statistical Year Book 1976-1977. Sanaa, 280 p.
3. 報告書
 - GEUKENS, F. (1966) : Geology of the Arabian Peninsula, Yemen.
 - WHO & M. P. W., Y. A. R. (1972) : Water Supply for Sanaa and Hodeida Demographic Studies. Interim Report. 1-Sanaa, 2-Hodeida. Rome, 35 p. & 34 p.
 - WHO & M. P. W., Y. A. R. (1973) : Water Supply for Sanaa and Hodeida. Hodeida Area Hydrological Investigations. Interim Report.
 - WHO & M. P. W., Y. A. R. (1973) : Water Supply for Sanaa and Hodeida. Sanaa Basin Groundwater Studies. Final Report.
 - ITALCONSULTANT (1973) : Protection Areas of The Sanaa Well Field.
 - National Water Supply & Sewerage Authority, Y. A. R. (1977) : Hydrologic Investigation for Well Field Development in Al Haima Basin.
 - Central Planning Organization, Y. A. R. (1978) : Final Report on the Airphoto Interpre-

tation Project of the Swiss Technical Co-operation Service, Berne. Zurich, 231 p.
Ministry of Agriculture & Water Resources Development Dept., Kingdom of Saudi Arabia
(1978) : Project 36 Water Well Drilling & Construction in Y. A. R., Sannaa, 120p. with
37 figs.

4. 地図

U. S. G. S (1963) : Geologic Map of the Arabian Peninsula.
Ministry of Defence, UK (1974) : The Yemen Arab Republic and Neighbouring Areas 1 :
250,000.
C. P. O., Y. A. R. (1977) : Photomap of Dimnat Al Khadir.
U. S. A. I. D. (1977) : Yemen Arab Republic Geological Map.
C. P. O., Y. A. R. (1978) : Photomap of Wadi Jawf.
Ministry of Overseas Development, UK (1978) : Yemen Arab Republic 1 : 500,000.
Al Mahwit Integrated Rural Development Project (1978) : Area Map of Mahwit County
1 : 50,000.

5. 邦文報告書

海外技術協力事業団 (1972) : イエーメン・アラブ共和国経済開発計画調査報告書.
海外経済協力基金 (1976) : イエーメン・アラブ共和国地方水道計画調査報告書.
国際協力事業団 (1979) : 北イエーメン地方水道計画パートII事前調査報告書.

(1979年5月18日受理)