

乾燥地における土壌の物理性と水収支

寺 沢 四 郎*

Soil Physical Properties and Water Balance in Arid Region

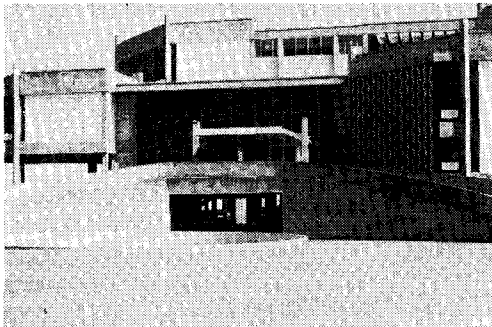
Shiro TERASAWA

National Institute of Agricultural Sciences

1. はじめに

最近、地球は沙漠化しつつあるということを耳にすることが多い。全陸地面積の約1/3を占める沙漠と半沙漠が年間6万平方kmの広さで年々拡大しているといわれる。この沙漠化する面積は四国と九州を合わせた広さに匹敵し、このような広さの農地や放牧地が年々失われていることになり、人間の増加にみ合った食料増産をしなければならぬ時に、陸地の沙漠化は深刻な問題になってきている。

人間の生産活動が自然のサイクルを狂わすと土壌は生物を寄せつけない不毛の沙漠と化してしまうのである。とくに、乾燥地では、水のコントロールを誤ると、土壌は塩分化し植物の生存はおろか、再び生物環境をとり戻すことを不可能にしてしまう。沙漠化は乾燥地に限ったものではなく、日本のような風土でも土地の荒廃による沙漠化が進んでいるという警鐘もでている。このように、かけがえのない地球を沙漠化より守るためにも、われわれは今ほど沙漠の実態を知り、そして沙漠化を防ぐ方策を打出すことが必要ではなかろうか。この小論は、筆者がかつてクウェートで体験した資料をもとにまとめたものである。



写真一 1 クウェート科学研究所

2. 沙漠土壌の物理性

乾燥地には、沙漠や半沙漠が広く分布しているが、その中には岩石沙漠、砂丘沙漠、沖積土沙漠など土性の異なる各種の土壌が分布し、しかもこれらの土壌のほとんどは塩類土壌である。沙漠の土壌は、風化作用や土壌化作用が弱いため、物理性は一般に劣悪であり、構造の発達がおくれている。砂沙漠の特徴の1つは、沙漠舗石などで表層が硬く、土壌がチ密化していることである。また、砂漠土の下層には石灰の集積層が生成され、その位置は雨量が多いほど下部に移行する。この石灰集積層ふきわめてチ密なので、不透水層となるだけでなく植物根の浸入が不可能な硬さとなり有効土層の制限層となる。

自然砂漠を農地にすると、土壌の仮比重が小さくなり保水性が高まり有効水分が増大する傾向がみられる。表1は、クウェートのスレビア地区の実験農場の例を示し



写真一 2 クウェート・スレビア地区の沙漠

*農業技術研究所；この小論は、昭和55年度日本土壌肥科学会鳥取大会のシンポジウム講演のまとめである。

表1 自然沙漠の農地化による物理性の変化(クウェート)

層位 cm	立地条件	仮比重 g/ml	全孔隙 p%	固相率 Sv%	水分率 Mv%	気相率 Av%	1/3気圧水分 Vol%	シオレ点 Vol%	有効水分 Vol%	土性
10~15	沙漠	1.83	31.2	68.8	0.7	27.5	9.0	1.8	7.2	S
	農場*	1.74	35.9	64.1	2.9	33.0	14.3	1.9	12.4	S
50~55	沙漠	1.78	32.6	67.4	1.2	31.5	14.8	1.7	13.1	S
	農場	1.71	35.7	64.4	3.3	32.4	14.5	2.0	12.5	S

*クウェート・スレビア地区の自然沙漠地帯に作られた実験農場

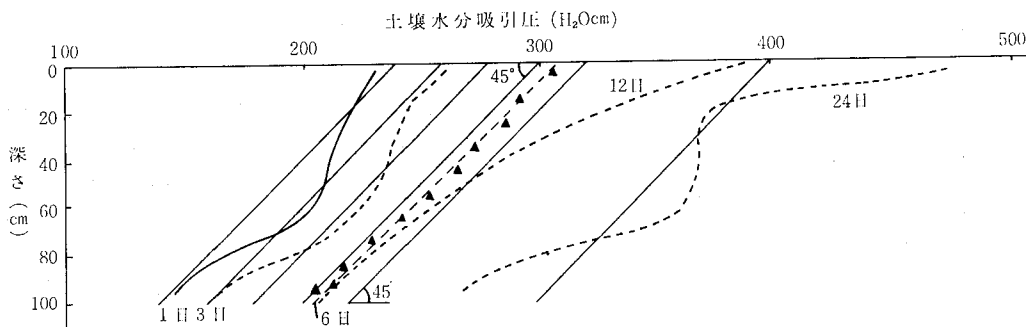


図1 多量かんがい後の土壌水分吸引圧の経時的変化(クウェート)

たものである。この地域全体が砂丘沙漠の景観を呈しており、農地造成にあたっては、外側を金網のフェンスで張りめぐらし、その内側はタマリックスの防風林でかこみ、砂防と、遊牧畜の侵入を防ぎ、自然植生と農地の保全をおこなっているほ場である。この地域の土壌は、とくに固相率が高く全孔隙量が少ない特徴があり、これは砂の粒子の間に多量の石膏が固結しているためで、過酸化水素処理すると、いつまでも泡が発生していることから、これを知ることがきる。

また、沙漠でのほ場容水量は、はたして存在するものかどうかである。沙漠では、下層土が乾燥しているのかんがい水が浸潤して行く過程で乾いた下層土に吸引されて浸潤が一層加速されて、水分が平衡するまでは相当多量のかんがい水を補給しなければならなくなる。ほ場容水量の定義からすれば、地中排水が事実上無視し得るような水分の平衡状態がほ場容水量であるから、図-1に示すように、45°の角度で示される直線上に各土層の Matrix suction が一列に並ぶような状態が、平衡水分と考えることができる。そうすると、図-1の場合は、表層土のほ場容水量は吸引圧でほぼ300cmH₂O(1/3気圧水分)に相当するようになる。この試験は、面積1㎡の周囲に、ビニール壁をもうけ、約150mmの多量かんがいをしたのち、表面にビニールシートを張って蒸発防止をし、経時的に含水量を測定してpF値をカリブレーションした。不透水層にあたる石灰集積層の深さは

150cmの位置にあるので、0~150cmの土層の水分が平衡に達するには約6日間を要することになり、その時の表層部の吸引圧は300cmH₂Oということである。

3. 塩類土壌の水分ポテンシャル

乾燥地の土壌は、一般に保水性が悪い上に、きびしい高温と乾燥のために蒸発散量がきわめて多く、通常の保留水分は低い状態にある。その上、乾燥地の土壌は、例外なく塩類が集積しており、種々の水溶性塩類を多量に含むので、この塩類によって土壌水の浸透ポテンシャルが高められ、土壌水分ポテンシャルは一層低下する。図-2は施肥された水溶性塩類による全水分ポテンシャルの増加の例を示したものである。全水分ポテンシャルは、水分張力と浸透圧を加算したものであるから、土壌水の全水分ポテンシャルが低いほど植物根による吸水が困難となる。

乾燥地の農地の適性判定のためにしばしば電気伝導度ECが測定されるのは、塩分集積と浸透ポテンシャルの程度が予測され、農地適性度の評価ができるからである。EC値から浸透圧OP(気圧)を求めるには、OP=0.36ECの経験式を用いればよい。アメリカの塩類研究所では、作物栽培可能な限界ECは8mmho/cmとしており、これ以上のEC値では、かんがいによる土壌の脱塩処理が必要とされている。

一般に塩類土壌あるいはアルカリ土壌は、交換性ソー

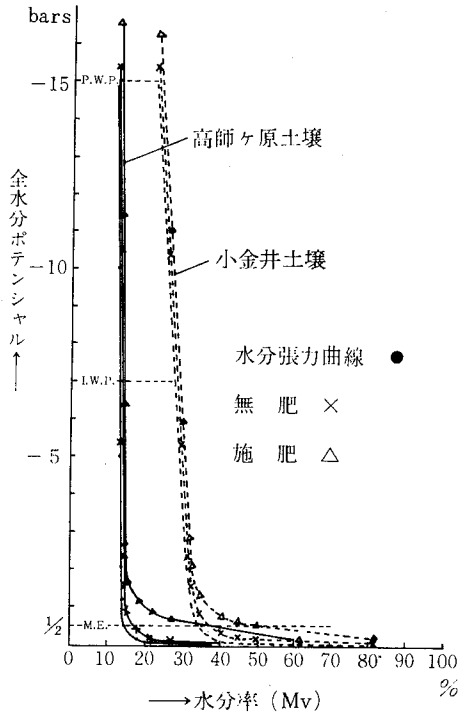


図2 施肥による土壌水分ポテンシャルの変化

ダを多量に含むために、透水性が悪化するといわれる。乾燥地の土壌は高い交換性ソーダ率 (ESP) を示し、膨潤性粘土を含む土壌では粘土の分散を助長し、透水不良の不安定な土壌構造を示す。この種の土壌改良には、交換性ソーダを除去し、有機質資材や石灰などの投与によって土壌構造の改良をはかる必要がある。

4. 乾燥地における土壌水分の変化

乾燥地は雨量が少なく高温なので、土壌水分の変化は気象によって大きく左右される。中近東の沙漠地帯では、冬季(11~3月)に150mm程度の降雨があるだけで、夏季(4~10月)にはほとんど雨らしい雨は降らない。日本でいう春と秋の季節感はなく、雨期(冬)と乾期(夏)に分けられる。自然の野草の生育と農作物の栽培は冬季におこなわれ、夏季は一切の野生植物は生長をやめ植物の種子は砂にもぐって休眠状態に入る。野生植物の生長期は、日本の場合とは全く逆である。このような野生植物の生態は、土壌水分の変化と密接に関係しているのである。

まず、年間における土壌水分の変化をみると、夏季における乾燥過程と冬期における湿潤過程の2つのサイクルを経ることがわかる。図-3は、クウェート・スレピア実験農場で1971年5月から向う1カ年にわたって毎月深さ1mの土壌水分の変化を調査した代表的な結果を示したものである。この農場の土層は深さ1mにわたって比

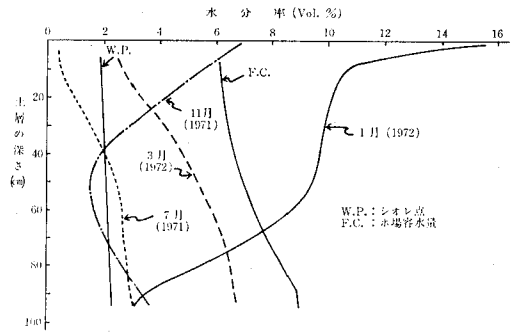


図3 乾燥地における土壌水分の年変化 (クウェート・スレピア実験農場)

較的均一な砂土からなり、層分化はみられない。盛夏の6, 7, 8月は乾燥過程が強く進み、深層までシオレ点(W.P.)よりもさらに水分の少ない水分状態まで乾燥が進む。冬の初めの11月に入ると気温も低下し、降雨がくると表層から湿潤過程が始まる。この頃の野草の生長は表層に種子がうずもれた一年生植物である。さらに雨量が増すと1月(1972)の水分分布のように、ほ場容水量を越える水分が表層から下層へと移動し、多年生植物は水を得て新たな生長を始め、新緑の季節を迎える。この頃沙漠の民は、沙漠にテントを張り、家族ごぞって野宿しながら短かい春の緑を楽しむのである。

3月に入ると、次第に気温の上昇がみられ、表層からの水分の蒸発散の増加につれて土壌水分は減少しはじめ、表層から乾燥過程に入る。4月から5月にかけて、気温は急速に上昇し、土壌水分の欠乏とともに、野生植物は、みるみるうちに枯れあがり、休眠状態に入るのである。

以上のように、沙漠での土壌水分の変化は、気象と密接な関係があり、あたかも、恒温室におかれた土壌のように、蒸発とかん水によって乾燥と湿潤をくり返しているようにみえる。

5. 乾燥地における水収支

沙漠地帯には、ワジという乾いた河はあるが水流のある河川はなく、しかも地下水位がかなり深いので、表層1~2mの土壌中の水収支(W)は、降雨量(R)、水蒸気凝縮量(C_i)、蒸発散量(ET)などで、支配される。したがって、次のような簡単な式で表わされる。

$$W = R + C_i - ET$$

これらの項目の中で、水蒸気凝縮量はわずかではあるが、乾燥地では植生上無視できない。沙漠では、昼夜の温度較差が大きいので、夜半から日の出前にかけての凝縮が盛んである。また、表層に集積した塩分が潮解するとき起こる水蒸気の吸収によっても凝縮が引き起こされているようである。

表2 沙漠における水収支 (クウェート・スレビア農場, 1971~1972)

Month	Jun. '71	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan. '72	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Total
Sampling Date	18	18	17	20	19	20	18	19	18	18	19	20	14	
Soil water content in 1 m layer, mm	35.34	19.88	19.93	18.83	16.89	29.00	19.42	82.49	62.55	48.95	35.71	35.63	18.76	
Changed water (W) mm/M	—	-15.46	+0.05	-1.10	-1.94	+12.11	-9.58	+63.07	-19.94	-13.60	-13.24	-0.08	-16.93	-16.64
Rainfall (R) mm/M	—	—	—	—	—	15.8	6.0	93.3	33.9	13.3	33.6	40.7	—	236.6
Vapour cond. (C ₁) mm/M	—	(4.8)	(4.8)	(4.8)	(4.8)	(4.8)	(4.8)	(4.8)	(4.8)	(4.8)	(4.8)	4.8	(4.8)	57.6
Income	—	4.8	4.8	4.8	4.8	20.6	10.8	98.1	38.7	18.1	38.4	45.5	4.8	294.2
Evapotranspiration (ET) mm/M	—	20.26	4.75	5.90	6.74	8.49	20.38	35.03	58.64	31.70	51.64	45.58	21.73	310.84
Average evapotranspiration mm/day	—	0.65	0.16	0.20	0.22	0.28	0.66	1.13	2.03	1.02	1.72	1.47	0.72	

水蒸気凝縮量の測定法は、広く浅い金属容器に土壌を入れて、野外に置き、経時的に容器の全重量を計り、大気からの水分凝縮量を算出する。土層内部での凝縮量の測定には、金網カゴの中に容器に入れた土壌を入れ、所要の深さの土層に横穴をあけこのカゴを挿入して、土壌を埋めもどし一定期間土層中に放置する。しかるのちカゴを取り出し、土壌の重量を計って凝縮量を求めるのである。

クウェートの初夏である5月上旬の一夜の蒸気凝縮量ふ、0.16mmであった。冬期は夏季に比べて大気の湿度が高いので、夜間の凝縮量は冬の方が多くなるものと思われる。

一方、土壌水分変化量Wは、毎月深さ1mの土壌水分含量を実測して、月ごとの水分変化量を算出する。土層の深さを1mにしたのは、年間における主要な水分変化はこの1mの上層内で起きているからである。

月別の降雨量は気象観測で正確に計られるので、残りの蒸発散量は、W、R、C₁の計数整理によって算出することができる。表一2は、1971~1972年にかけてクウェート・スレビア農場の野草地で実測された水収支の結果を例示したものである。

表一2で、水蒸気凝縮量を毎月4.8mm/Mにしたのは、1972年5月だけが実測され他の月は実測されなかったもので、暫定的に5月の値を一律にあてはめ年間凝縮量の予測を試みたのである。土壌水分の収入部分は、年間294.2mmであり、蒸発散による支出部分は、年間310.8mmとなった。

日平均蒸発散量を見ると、夏季は0.2~0.7mm/dayの範囲であり、ほとんど水蒸気凝縮量の分が土壌面蒸発にひき当てられ、植物の蒸散量は関与していない。冬期の蒸発量は0.7~2.0mm/dayであり、植物蒸散量も若干関与するようになる。いずれにしても、沙漠での蒸発散量は、高温乾燥の条件にもかかわらず、予想外に低いこと

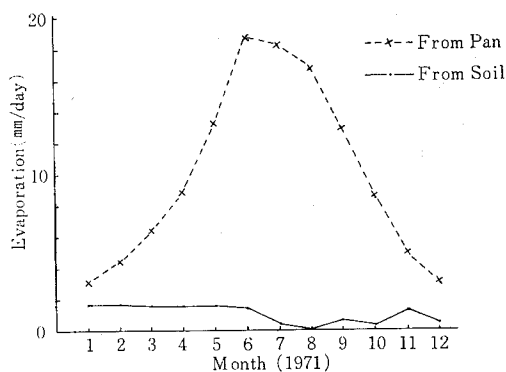


図4 計器蒸発量と土面蒸発量の年間変化 (クウェート)

がわかる。これは、もともと土壌中の保留水分が少なく、蒸発散量をまかない得ない乾燥状態にあるからである。

ちなみに、計器蒸発量の年間変化をみると、図一4に示したように、夏季は10~20mm/dayの高い値を示す。一方、土壌を容器に入れて重量法で計測された土壌面蒸発量は、図一4に示すように、計器蒸発量に比べてきわめて少ない値であることがわかる。通常、もの本で沙漠での蒸発量が非常に多いというのは、蒸発できる水が潤沢にある場合の蒸発量であって、乾いた沙漠土からの蒸発量はむしろ夏季の方が冬季に比べて少ないのである。

6. 沙漠における熱収支

沙漠は灼熱の太陽に照りつけられ、うなぎ昇りに上る水銀柱は50℃にも達することはそう珍らしくない。沙漠の夏は、まるで火事場にほうり出されたような、異様な熱風にさらされる。地表面の温度は80℃にものぼり、ゆで玉子ができるほどの暑さとなり、車の中はムシ風呂のようで、ハンドルは火傷するように暑い。沙漠では、太

表3 沙漠における熱収支 (クウェート・スレビア農場)

(Date: 12th May, 1972)

O' clock	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
S_0 cal/cm ² /hr	-4.2	0	2.4	15.0	24.0	28.8	25.2	15.6	9.6	12.0	7.2	6.0	1.8	-1.8	-6.0
B_0 cal/cm ² /hr	3.6	2.4	0	-3.6	-4.8	-8.4	-7.2	-4.8	-3.6	-1.8	-1.8	-1.2	0.6	1.8	2.5
$-(S_0+B_0)$ cal/cm ² /hr	0.6	-2.4	-2.4	-11.4	-19.2	-20.4	-18.0	-10.8	-6.0	-10.2	-5.4	-4.8	-2.4	0	3.5
ℓE_0		1.74	-0.72	-5.09	-6.71	-8.33	-5.25	-3.18	-2.53	-4.49	-1.89	-2.41	-0.45	0	
E_0 mm/hr			0.01	0.09	0.12	0.14	0.09	0.05	0.04	0.08	0.03	0.04	0.01	0	

S_0 : 純放射量, B_0 : 地中熱流量, ℓE_0 : 潜熱伝達量, E_0 : 蒸発量

陽を遮る雲もなく、容赦なく地面を焦がすのである。太陽の純放射量は、日本の約2倍以上はあるといわれ、この熱のためにあらゆる生物は次第にその影を消し地上の沙漠化は年々広がりつつあるといわれる。太陽から放射される熱を、地上でコントロールするには、物質生産をいとむ植物の助けを借りるのが一番である。その意味で「沙漠の緑化」は陸地の沙漠化を防ぐ大きな仕事の一つといえる。また、太陽エネルギーの利用によって、海水を淡水化する技術開発も、今後沙漠では注目される課題の一つである。

さて、沙漠での熱収支で最も大切なのは、純放射量がいくらあるかである。年間の平均気温の変化からみても、月別の純放射量はかなり変化しているし、また日変化も大きい。表-3は、熱収支法による蒸発散量の評価に使用された、純放射量 S_0 と地中熱流量 B_0 の日変化を示したものである。この表からわかるように、日の出と日没の時間を境にして、地表面における熱の流れの方向が変化していることがわかる。同様に地中熱流の方向も、純放射とは反対の傾向をとり、夜間は地中熱を大気中に放出している。日没後の地表面から大気への熱の流れは外気温の低下に伴う地熱の放出の外に、蒸気凝縮熱による大気中への放熱も考えられる。

沙漠地帯の蒸発散量を評価するのに熱収支法を用いることができるが、この熱収支法もボーエン比 (β) が1より大きい条件下では、いわゆるオアシス効果のため測定精度が悪くなるといわれる。沙漠では、このボーエン比が1以上の場合がしばしば起こるので、熱収支法による蒸発散量の評価にはなお検討を要する問題が残されている。

7. 乾燥地における水の有効利用

(1) 効率的かんがい方法の開発

乾燥地農業では、水が最大の制限因子になるので、古くから節水栽培の研究が続けられている。かんがい方法は、気象、作物の種類、土壌条件、水利条件、地形などに

よって異なる。現在最も注目されるのは、トリクルかんがい(点滴かんがい)で、乾燥地ではソ業栽培から果樹、植林に至るまで多くの場面で広く利用されている。トリクルかんがいは必要最小限の水を常時供給する方法であるが、限られた湿潤域の塩分集積が進行し、塩害を助長する懸念がある。一方、畦間かんがいや水盤かんがいは、水の豊富な地域で果樹や植林に利用されているが、水量がかさむので水源の乏しい地域のかんがいは不向である。この種のかんがいは、浸透水による除塩がおこなわれるので、地下排水した水は必ず明キヨや暗キヨで排水処理を施さないと、毛管上昇による塩類集積をひき起こす心配がある。乾燥地では、「かんがいと排水」は、不可分の関係にある。

地下かんがいは、地下部での蒸発を抑え、一見無駄がないようにみえるが、砂質土壌では地下浸透が多く、水の有効利用はそれほど期待できない。地下浸透をおさえるために、地下パイプの直下にビニールなどで不透層を作り、その上にできる一次停滞水層から作土層に水分を供給し、有効利用を計ることが考えられる。

スプリンクラーかんがいは、地上部における蒸発損失が多く、乾燥地の露地栽培には不向である。ハウス栽培や庭園などのごく限られた集約栽培には、スプリンクラーかんがいが利用されている。

(2) 土壌の貯水能力の増強

土壌水の有効利用を計るためには、第一に土壌の保水性を高めることが先決である。乾燥地では、土壌構造の未発達なものが多く、保水性が一般に低い。保水性を高めるためには、土壌構造をよくし、有効水分を貯留できる細孔隙をふやすことである。乾燥地では、有機質資材が極めて少なく、しかも有機物の分解が早いので、有機物投与による土壌構造の改良は困難である。これに対し、良質の客土材料や無機質の土壌改良資材を作物別に根圏土壌の物理性の改良に用いれば、比較的長期にわたる保水効果を期待することができる。例えば、多孔質の珪酸スラッグやパーライトなどは、それ自身の細孔隙を土

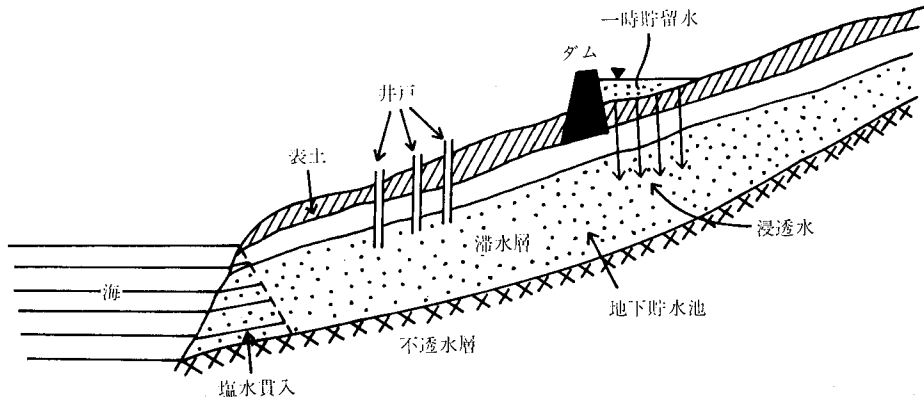


図5 地表ダムによる地下水涵養

壤に附与し、かんがいされた浸透水を土層内に貯留して有効水分をふやし、植物への水分供給を改良する。

第2の増強法は、土壌面蒸発を防ぐマルチによる方法である。適度なアスファルト・マルチは、植物の発芽と生育を阻害せず、土層中の水分を蒸発から防ぐ働きがある。同様に、ビニールマルチや敷草マルチなども土面蒸発を防ぐ有効な貯水方法である。また、地表面の耕うんも古くから蒸発防止に役立つことが知られている。

第3の増強法は、かんがい水の無駄な地下浸透をおさえるために、地中のある深さにアスファルトの遮水板を作る方法である。アラビア半島の砂丘沙漠地帯の農場にこの種の遮水板を作りソ菜の栽培を可能にしている実例がある。この方法では、遮水板上の土層に年々塩類集積が増大して、農地を放棄せざるを得ない事態が起こるので、定期的に脱塩処理ができるような方策を取入れる必要がある。

(3) 乾燥地における水資源開発

乾燥地農業は水不足との闘いであるから、水資源開発は国家的課題である。水問題は農業だけでなく、生活用水、工業用水など多分野にわたって直接かかわり合いがあるので、水・電力省が中心となって、国家的な水利用計画と水資源開発計画を最重点施策として押し進めている。農業用水の多くは、地下水に依存しているので、水が枯渇しないように、つねに地下水涵養等を講ずる必要がある。

乾燥地では、冬季に集中的に雨が降るので、貯水能力のない山間部に発生した洪水はワジを通り海域に無駄に流出してしまうのである。このワジを流れる洪水を途中でせき止め、農業用水に利用する計画がアラビア半島の

山麓地帯で試みられている。

一つは、ワジの上流の山間部に地下ダムを作り、上流の水をあますことなく地下に貯留し、下流域の需要に応じてパイプ配水をおこなうものである。沙漠では、古くからカナートとかフェラージとかいわれる地下導水路で地下湧水口からでる水を農地に配水してきた。地下水ダムはこれら地下湧水口を確実に貯水池に広げ、任意にパイプ配水をしようとするものである。しかし、下流域の水源地を遮断するので、水利権をめぐる社会問題が起こる心配がある。

第2の方法は、図-5に示したように、ワジの中流に地表ダムを作り、洪水を一時せき止め貯留水を地下に浸透させて、下流域の地下水涵養を促進する有望な方法である。アラビア半島で昔から農業を営んできた地域は、山岳地帯の低平地に面した海岸地帯に多く、そこでは、ヤシとかマンゴなどの永年作物が群生している。しかし、最近ではミクシングファーム（果樹とソ菜の混合栽培）などの導入によって、地下水の過剰利用がめだち、年々地下水水位が低下し、海岸沿いでは塩水貫入によって地下水質の悪化が懸念されている。この塩水貫入による水質悪化を防止するためにも、地下水涵養ダムの役割は今後一層注目されるものと思われる。

引用文献

- 1) 農士学会：乾燥地農業開発に関する基礎調査報告(1), (2), (1976, 1977).
- 2) 寺沢四郎：畑土壌の水分の運動に関する研究, 農研報B13, 59~70 (1963).

昭和56年4月16日受理