

特集

砂漠緑化システム

水資源の利用

Utilization of Water Resources

矢野友久*

Tomohisa Yano

1. はじめに

砂漠と乾燥地はしばしば同じ意味で用いられる。乾燥地は、厳密には降水量と蒸発散位（植物に覆われた地表面に水が十分供給された場合の蒸発散量）との比によって、超乾燥、乾燥、半乾燥の三つの地域に分類されるが、およそ目安として、年降水量で、それぞれ、0～100mm、100～250mm、250～500mmの地域と考えてよい。砂漠は、砂漠気候を有する地域と考えることによって、年降水量で250mm以下の地域、すなわち超乾燥地ならびに乾燥地を指すことが多い。一方、元々、植生があったのに、なんらかの原因で砂漠化した土地は、乾燥地だけでなく、半乾燥地にも広く存在する。

砂漠は、通常、利用できる水資源がないために、植物が生育しないが、例えば降雨が少なくても、水資源に恵まれている場合がある。その場合、緑化にはそれ程難しい問題点はない。しかしながら、砂漠化した土地の場合には、その原因を取り除かなければ、緑化することが難しい。したがって、砂漠と砂漠化した土地の緑化は、別々に考える必要がある。なお、緑化という場合、通常は樹木による植生化を指すが、ここでは、農業利用を含めた砂漠の緑化における水資源の利用について述べる。

2. 水利用の現状

乾燥地においては、河川水と地下水が水資源として利用されている。河川は、一般に、その水源を乾燥地域外に有する場合が多く、地域内に河川水を供給するための導水路を長距離にわたって設けることが必要になる。この代表的な例として、アメリカ合衆国カリフォルニア州の水資源開発がある。カリフォルニア州では、水資源の70%が州の北部の降水として供給され、

一方、水需要の75%が州の南部で生ずる。このため、連邦政府による1930年代の Central Valley Project や州政府による1950年代の State Water Project によって、州の北部から州の中部、南部へ莫大な水を供給している。

導水のための水路がライニングされていない場合、地域が地形的にも平坦で、自然排水がうまく行われないと、水路からの漏水によって地下水位が地表付近まで上昇し、その結果、そこに通常、生育する作物の生産力がその土地の正常な生産力以下となる。このような土地の状態を Waterlogging と呼び、湿地状態あるいは湛水害と訳されている。従って、Waterlogging そのものは塩害に必ずしも関連するとはいえないが、乾燥地域では、毛管現象によって地表付近に到達した土壌水が乾燥地特有の蒸発を促す条件下で、多量に蒸発し、塩分を集積させ、塩害を発生させる原因となる。この Waterlogging による塩類集積は灌漑水による塩類集積よりも一般にその度合いが著しい。

灌漑の導入に伴う塩害の問題は世界各国で発生しているが、全耕地面積の4分の3を灌漑農地で占める有数の灌漑農業国、パキスタンのインダス川流域の現状を例にとると、以下のとおりである。インダス川は総延長2,900km、総流域面積950,000km²で、河川からの灌漑取水量のうち、25%に相当する321億m³が圃場入口に到達するまでに、灌漑取水路からの漏水によって失われる。圃場入口での利用可能水量（河川取水量963億m³と地下水取水量484億m³の合計1,447億m³）のうち、46%に相当する665億m³が圃場内水路からの漏水による損失水量である。一方、圃場内での灌漑損失水量は193億m³といわれている¹⁾。このように、パキスタンでは莫大な水損失が地下水を上昇させ、Waterlogging を生じ、湿害をもたらすと同時に、塩害を生じさせる原因となっている。水路からの漏水による地下水位の上昇について、水路開通直後の1865年に地表下14mであったものが、1940年代に入ると、3

* 鳥取大学乾燥地研究センター教授
〒680 鳥取市浜坂1390

mになったという報告²⁾がある。地下水位が地表下3m付近に達すると、粘質土壌では、土壌水が毛管上昇によって地表面に達し、蒸発量が著しく増大して土壌面に塩分が集積する。パキスタンでは、この時期から耕地の塩類土壌化が急速に進んでいる。

3. 水資源の有効利用

乾燥地域における灌漑の導入については、このような地下水位の上昇に伴う塩害の危険性が常に存在するので、水源から圃場に至る貯水や導水に際しての地下水位上昇の防止対策を講じなければならない。この中で、最も効果的な対策は、パキスタンの例にみられるように、土水路からの漏水を防止することである。ライニングをしていない土水路からの漏水量は、水路の通水断面において水と接している周辺長さ（潤辺）1m、水路の長さ1mに対して、埴土あるいは埴壤土の場合、1日あたり0.1m³程度といわれている。このような水路をライニングすれば、漏水を完全に止めることはできないにしても、土水路からの漏水量の10%～20%に減少させることができる。

明渠や暗渠による水平排水やチューブ・ウェルなどの井戸を用いた垂直排水も地下水位上昇防止対策としてよく用いられる。乾燥地の農業においては、灌漑施設だけを備えればよいと一般に考えられがちであるが、排水施設も欠くことのできないものである。

以上の他に、末端の圃場において、地下水位の上昇を招かないような水管理が必要である。

3.1 灌漑水の水質基準

土壌中の間隙に保持される水に多量の塩分が含まれると、浸透圧が増大することによって、土壌に水を保持する力が強くなり、植物が土壌から水を吸収できにくくなる。これは、現象的には、土壌中の水が少なくなって植物の吸水が困難になると同じであり、植物の正常な生育が阻害される。このような現象を塩類濃度障害、Salinity hazardと呼ぶ。一方、土壌水中の塩分にはナトリウム、カルシウム、マグネシウムなどの陽イオンが含まれており、ナトリウムが他の陽イオンに比べて多い場合には、土壌の粘土粒子の表面にナトリウムが多量に吸着されることによって、通水性、通気性の低下が生じ、植物の生育に悪影響を及ぼす。このような現象をナトリウム障害、Sodium hazardと呼ぶ。ナトリウム障害は、従来、アルカリ障害と呼ばれていたが、pHが高いアルカリ性を有することによる生育障害と混同され易いために、最近では、あま

りアルカリ障害とは呼ばれない。一般に、塩害は、広い意味では、上記の塩類濃度障害とナトリウム障害の両方を指すが、狭い意味では塩類濃度障害を指すことも多い。

灌漑水に含まれる塩類濃度の表現には二つの方法がある。第一は、可溶性塩類総量（Total dissolved solids, TDS）であり、一定量の溶液を蒸発乾固し、蒸発残差の質量を求め、溶液の単位容積当たりの質量（mg l⁻¹）で表わす。第二の方法は、灌漑水の電気伝導度（EC, dS m⁻¹）である。溶液のEC値は塩の量だけでなく、塩の形態によって変わるので、ECとTDSとの関係は厳密には一価には決まらないが、dS m⁻¹で表わしたECに640を乗じると、TDS（mg l⁻¹）の近似値になる。塩類濃度障害の指標としては、測定が容易なECが多く用いられ、ナトリウム障害の場合の指標として、次に示すナトリウム吸着比率（Sodium adsorption ratio, SAR）が用いられる。

$$SAR = \frac{Na^+}{\{(Ca^{++} + Mg^{++})/2\}^{1/2}} \quad [1]$$

ここで、各イオン濃度の単位はme l⁻¹が用いられる。

表1はイランにおいて得られた水質の一例である³⁾。これは、クージスタン州の州都アフワズの北方、約70kmにある農業資源省土壌研究所シャブール試験場付近の各種水源の水質を示すものである。シャブール川はクージスタン平原の北方に源を發し、山岳部に源を有しない小河川であり、周囲の農地からの排水が流入する排水路の役割を果している。そのため、シャブール川は下流になるにしたがって水質が悪化している。シャブール試験場はシャブール川の取り入れ堰地点から幹線水路、支線水路を経て灌漑水を取り入れているが、その間は約10kmの距離であり、水質の変化はあまりない。一方、試験場内の地下水になると、その水質は著しく悪化し、そのECは灌漑水のECの約3倍にも達する。暗渠排水、排水路の水質はさらに悪化する。この例にみられるように、一般に、地下水の水質は地表水の水質に比べて悪い。

各種の水源から得られる水が灌漑水に使えるかどうかを判断するための灌漑用水の水質基準として広く用いられているのは、1954年に発表されたアメリカ農務省の塩類研究所（U.S. Salinity Laboratory）によるものである⁴⁾。これは、灌漑水の水質をECならびにSARによって塩類濃度障害およびナトリウム障害に対して各4段階、合計16段階に分類している。

最近、灌漑水中の塩分が土壌の浸潤速度に及ぼす影

表1 イラン国シャブール地方における河川水、灌漑水、排水、地下水の水質 (1976年3月)

No.	pH	EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	陽イオン・陰イオン (me l^{-1})						SAR
			Ca	Mg	Na	SO ₄	Cl	HCO ₃	
1	8.3	1060	5.0	8.0	3.6	7.8	4.0	4.8	1.4
2	8.4	1357	6.0	4.0	4.8	6.6	4.5	3.7	2.2
3	8.3	1335	8.0	3.0	5.0	5.0	5.5	4.5	2.1
4	8.4	1357	7.0	3.0	5.0	4.0	6.0	4.0	2.2
5	8.4	1350	8.0	2.0	5.0	6.0	4.5	4.0	2.2
6	7.9	3859	30.0	17.0	11.0	40.0	11.0	4.0	2.3
7	8.1	4472	27.0	21.0	18.0	48.5	12.5	4.0	3.7
8	8.0	5201	29.0	23.0	30.8	60.0	16.0	4.0	6.0
9	8.1	6646	14.0	27.0	53.2	44.2	42.0	4.0	11.8

No.1 : シャブール河上流部

4 : 支線水路

7 : 試験場内の暗渠排水

2 : 取り入れ堰地点

5 : シャブール試験場入り口

8 : 試験場内の排水路

3 : 幹線水路

6 : 試験場内の地下水

9 : 試験場外の排水路

出所 矢野 (1982)

表2 灌漑水質の判断の指針

項目	使用制限の度合い		
	なし	若干または中程度あり	大いにあり
◇塩類濃度			
EC _w (dS m^{-1})	< 0.7	0.7-3.0	> 3.0
TDS (mg l^{-1})	< 450	450-2,000	> 2,000
◇浸潤速度			
SAR= 0-3	EC _w => 0.7	0.7-0.2	< 0.2
3-6	> 1.2	1.2-0.3	< 0.3
6-12	> 1.9	1.9-0.5	< 0.5
12-20	> 2.9	2.9-1.3	< 1.3
20-40	> 5.0	5.0-2.9	< 2.9

出所 Ayers and Westcot (1985)

響に関する研究が進んだ結果、高塩類濃度の水は浸潤速度を増大させ、低塩類濃度の水は浸潤速度を減少させ、また、カルシウムまたはマグネシウムに比べてナトリウムが多いと、浸潤速度を減少させるという定説が得られている。これに基づいて、従来の水質基準を見直す必要性が生じ、最近、水質を判断するためのガイドラインが新しく表2のように提案されている⁵⁾。これは、灌漑水として使用制限をする必要性の度合いをEC、SAR 毎に各3段階（必要性なし、若干あるいは中程度にあり、大いにあり）に分類したものである。塩類濃度に関しては、 0.7dS m^{-1} 以下、すなわち、 $\text{TDS}450\text{mg l}^{-1}$ 以下は問題なく、 $0.7\sim 3\text{dS m}^{-1}$ の範囲になると、塩類濃度障害の危険性のために、使用制限の必要性が生ずる。浸潤速度の減少の問題については、従来、SARが高いほど、また塩類濃度が高いほど

影響の度合いが大きいとされてきたが、SARが低くても、塩類濃度が非常に低ければ浸潤速度を減少させるとしている。

表2の水質基準は、灌漑農業にみられる広範囲な条件に適用させるために、次のような前提条件あるいは仮定を設けている。まず、使用制限とは、作物の選択あるいは特別な管理に制限がありうるということの意味する。「使用制限なし」に対して、特別な管理または栽培慣行なしですべての作物に最大の収量が期待できる。土性は排水がよい砂質壤土または粘質壤土で、地下水位は地表下2mより深い。通常の地表灌漑またはスプリンクラ灌漑の下で、十分な灌漑が行われ、少なくとも15%以上のリーチング割合が保証される。作物の水分消費量は大体40, 30, 20, 10%に従い、十分なリーチングによって、土壌塩分は深さ方向に増大

する。対象とする地域が上述の条件から大きく逸脱していれば、この基準は適用できず、その地域に適した修正が必要である。なお、リーチングについては、後で詳しく述べる。

3.2 消費水量の正確な推定

乾燥地においては、植物生育のために灌漑は欠かせないのであり、灌漑水量は植物の消費水量を基にして決定される。消費水量を過小に評価すると十分な生育が得られず、逆に過大に評価すると、貴重な水資源を浪費するだけでなく、Waterloggingの原因となる。消費水量、すなわち蒸発散量は、気象要素を用いて推定する方法、例えば、ペンマン法⁶⁾によって正確に算定できると一般にいられている。しかし、乾燥地においては、周囲の砂漠からの熱や水蒸気の移流が大きいため、非常に大きな蒸発散量を呈する。ペンマン法などによって蒸発散位を推定する場合、移流効果が無視できるような広い圃場でない、正確に蒸発散位を推定できない。

図-1 (左) は、イランにおいて排水収字型ライシメータを用いて牧草のアルファルファの月別日蒸発散量を測定し、ペンマン法を用いて計算した蒸発散位と比較したものである⁷⁾。これによると、蒸発散位の推定値は、蒸発散量が大きくなると、かなりの過小評価を示している。ライシメータは、100m×100mの圃場の中心に設置されており、移流効果が完全に無視できる条件ではないが、測定値と推定値との違いが著しい。圃場の大きさが十分な場合でも、同様な結果がアメリカの乾燥地でも得られており⁸⁾、推定精度が良好といわれているペンマン法でも、乾燥地の条件下では、推定精度が低下することもある。現在までの研究結果によると、ペンマン法などの推定式そのものでは十分でな

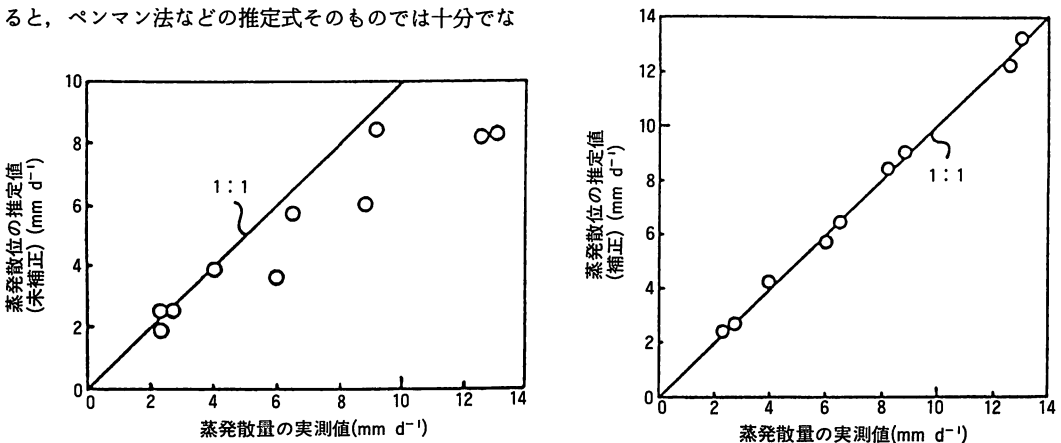
く、現地の気象条件(日射量, 相対湿度, 日中・夜間風速)に応じて補正することが必要であるといわれている。図-1 (右) は、このような考え方に基づいて、気象要素の重回帰式を用いて、補正係数を作成して補正した結果を示すものである⁷⁾。このように、乾燥地域において植物の消費水量を正確に推定するための方法は完全に確立しているとはいえず、今後も研究が必要である。

3.3 リーチング灌漑の適用

地表水以外の水資源として地下水があるが、表1に示したように、一般に、周囲に農地が存在する地域の地下水は地表水に比べて塩類濃度が高く、灌漑によって樹木や作物の根群域に塩分が集積し易い。すなわち、緑化や農業的開発利用によってかえって土壌の荒廃化をもたらす危険性がある。実際に植物を育て、作物を栽培する現場においては、塩類集積を起こさないような水管理が必要である。

土壌水の塩分濃度が作物生育に対する限界値に達したならば、過剰な塩分を作物の根群域から除去するためのリーチング灌漑を行わなければならない。リーチングとはもともと可溶物を浸出することを意味し、Leaching requirement (LR) は溶脱用水量、リーチング必要水量などと訳されて使用されている。これは、土壌水の塩類濃度をある設定値以下に保つために、作物の根群域を通過させなければならない灌漑水の割合である。

灌漑水が均一に適用され、作物による塩分の吸収および土壌への塩分の沈殿がないとし、定常状態の水分および塩分プロファイルを仮定すると、LR は、定義か



出所 Yano and Cho (1985)

図-1 蒸発散位の推定値と実測値 (左 未補正, 右 補正)

ら次式で表される。

$$LR = D_d^* / D_i = C_i / C_d^* \quad [2]$$

ここで、 D_d^* ：設定された収量の目標値を維持するために許容しうる最小の排水量、 D_i ：灌漑水量、 C_i ：灌漑水の塩分濃度、 C_d^* ：作物収量に対する耐塩性データから得られる排水の塩分濃度の設定値。

比較的薄い土壤水の塩類濃度は、電気伝導度(電導度、EC)と線形関係にあるとみなせるので、2式は

$$LR = D_d^* / D_i = EC_i / EC_d^* \quad [3]$$

ここで、 EC_i ：灌漑水の電導度、 EC_d^* ：根群域底部における排水の設定された電導度。

LRを計算する場合、基本的には3式を使用するが、その場合、設定値である EC_d^* を作物収量に対する耐塩性データと関連させてどのように評価するかが問題である。作物の耐塩性は、作物ごとに収量減少割合と土壤の飽和抽出液の電導度との関係によって表わされることが多い。

従来よく用いられている方法は、アメリカ農務省の塩類研究所によるもの⁴⁾であり、収量が50%に減少するときの土壤の飽和抽出液の電導度を EC_d^* の値として用いている。これは、このようにすることによって50%の減収が実際に得られるということの意味するのではなく、土壤が塩分を含むことによる作物の収量への影響が実質的にあまりないと考えられる場合の推奨値である。この方法はここ数十年間、各国で用いられてきたが、過大なリーチング水量をもたらすとして、最近ではこれに代わる方法も提案されている⁵⁾。

貴重な水資源の有効利用の観点から、リーチングに必要な水量をいかに少なくするかは極めて重要な問題であり、植物の耐塩性に応じたリーチング水量の決定に関する研究が古くから行われ、現在も世界各地で継続されている。

土壤中の塩類濃度が高いために植物による吸水が困難になる塩類濃度障害の他に、ナトリウム障害と呼ばれる塩害問題がある。これは、灌漑水中にカルシウム

やマグネシウムに比べてナトリウムが多く含まれている場合、粘土粒子にナトリウムが吸着することによって、通水性・通気性不良の土壤物理性の劣化(ソーダ質土壤)が生じる。この場合には、まず、石膏などの土壤改良資材を用いて吸着ナトリウムを可溶性にした後でリーチングを行う。

3.4 近代的な灌漑方式の導入

乾燥地域において効率的な水利用を行い、塩害を防ぐためには、近代的な灌漑方式の導入をはからなければならない。従来の灌漑方式としては、地表灌漑が圧倒的に多く、開発途上国で多く採用されている、わが国の水田灌漑に似た方式の水盤法(写1)は、非常に浸透損失が大きく、地下水位上昇、土壤の塩類化による農地の不毛化を招いている例が多い。帯状の畑地に水を全面流下させるボーダー法、畑に溝を切って水を流下させる畦間法(ファロー法、写2)などの近代的な地表灌漑方式への転換あるいは各種のスプリンクラ灌漑方式または点滴灌漑方式の採用が考慮されるべきである。点滴灌漑方式(写3)は、圃場全面に灌漑する他の方法と異なって、ゆるやかな灌漑強度で植物の根元だけに灌漑する方式である。根元灌水方式のため水利用効率を高めることができるだけでなく、灌漑の間断期間を短くすることによって、土壤水分を常時、高く保てるため、塩害を軽減できる利点を有するので、乾燥地域に適した灌漑方式として発展しつつある。他の灌漑方式に比べて施設経費が高いことや水の滴下部の日詰まりの問題のため、開発途上国においてはまだ十分に利用されていないが、今後、急速に利用が増すものと思われる。

4. その他の水資源

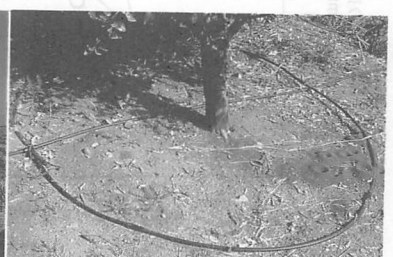
現在、新規水資源の確保は困難な状況になっている。これは、乾燥地域に限らず、全世界に共通な問題であり、特に、大規模な水資源開発は、自然・社会環境破壊の観点から著しく困難さが増している。このような



写1 伝統的な地表灌漑方式(水盤法)



写2 近代的な地表灌漑方式(畦間法)



写3 点滴灌漑方式

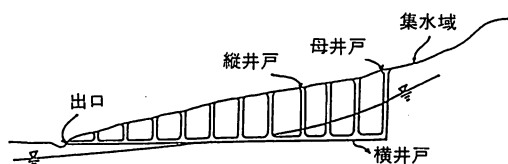


図-2 カナートの模式図

状況の中で、新規水資源としては、カナートなど長い歴史を有する方式の見直しが必要である。カナートは、図-2に示すように、山岳部の浅層地下水を地中に設けた横井戸によって地表まで導くものであり、地域によって言葉は異なるが、中国から北アフリカまで現在でも広い範囲に存在する。わが国でも三重県や奈良県にあり、「まんぼ」という名前では呼ばれている。カナートの起源はさきわめて古く、数千年もの昔から使われている。イランのカナートによる灌漑面積は国内の全灌漑面積の50%を一時期占めたこともあるといわれているが、ポンプによる地下水採取のための地下水位の低下、井戸掘技術者の減少、維持費の高騰などにより、現在、その数も減少しつつある。しかし、カナートによって集水される水は地下水の中では水質も比較的に良好な場合が多く、大規模農業はともかく、小規模な農業にはきわめて適している。

また、イスラエルにおいて数千年も古い時代に行われた Rainwater harvesting と呼ばれる丘陵部の降雨集水方式の原理を応用して、近代的な技術を導入することによって、より効率の高いシステムを建設、使用している例がイスラエル、アメリカ合衆国、オーストラリアなどにみられる。これらは、カナートと同じように、新しい水資源として見直す価値がある。この他に、生活排水のような汚水の灌漑への再利用は、地域の環境保全のためにも有益であり、今後ますます利用されるものと思われる。

淡水化装置は海水から飲料水を得るために古くから用いられており、その技術的問題はすでに解決されている。海水のような高い塩濃度の水を飲料水の濃度まで脱塩処理した水を農業、緑化に利用することは、経済的な観点から、現段階では実用的でない。しかしながら、乾燥地においては、高い塩濃度のため、そのままでは植物生育のために利用できない水が多く存在する。これらの水を灌漑水として使用可能な濃度まで脱塩処理して植物の栽培に利用するという考えであれば、経済的な面からも可能性があると思われる。逆浸

透法や電気透析法における膜材料の改良とコスト・ダウンが期待される。

5. おわりに

陸地面積の5分の1を占める砂漠は、降雨が少なく太陽エネルギーが豊富であるという観点からは植物生育あるいは食糧生産の場として有望であるが、降雨が少ないのは、水資源に恵まれないということである。緑化であれ、農業利用であれ、量的にも質的にも劣っている水を如何に有効に利用するかはその成否がかかっている。紀元前数千年前に始まったといわれる灌漑がもたらした土壤荒廃による古代文明の崩壊の例にみられるように、Waterlogging や塩類集積などの土壤荒廃は決して新しい問題でなく、また現在でも世界の灌漑地帯で深刻化している。土壤の荒廃を防止あるいは荒廃した土壤を改良する方法は研究者や技術者のレベルでは確立されているが、農業や緑化に実際に携わる人たちに対して技術移転がなされているとはいえない。また、発展途上国においては、灌漑事業を実施しても、経済的な理由で土壤荒廃防止対策を講じない場合が多い。国内に砂漠が存在しないわが国であっても決してこれは無関係な問題でなく、地球環境問題の一つとして問題解決に取り組むべき事柄であろう。

参考文献

- 1) Water and Power Development Authority, Pakistan Government; 未公表資料 (1989).
- 2) 応地俊明; インドス平原と水, 小西正捷 (編), もっと知りたいパキスタン (1987), 弘文堂.
- 3) 矢野友久; 灌漑水の水質について, 砂丘研究, 29巻, 1号 (1982), 11~19.
- 4) Richards, L.A. (ed); Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils, USDA Handbook 60 (1954), U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- 5) Ayers, R.S. and Westcot, D.W.; Water Quality for Agriculture, Irrigation and Drainage Paper 29 Rev. 1 (1985), FAO, Rome.
- 6) Penman, H.L.; Natural evaporation from open water, bare soil and grass, Proc. R. Soc. London, A 193 (1948), 120-145.
- 7) Yano, T. and Cho, T.; Field investigations on the agricultural development of arid region in Iran (I), J. Fac. Agr., Tottori Univ., Vol. 20 (1985), 64-74.
- 8) Rosenberg, N.J. and Berma, S.B.; Extreme evapotranspiration by irrigated alfalfa, Appl. Meteorol. Vol. 17 (1978), 934-941.