

土中塩分管理のためのリーチングに関する研究

矢野友久*・登尾浩助**・小谷佳人***

(昭和63年5月31日受付)

Leaching for Soil Salinity Management

Tomohisa YANO*, Kosuke NOBORIO** and Yoshihito KODANI***

Experimental studies on leaching for soil salinity management were done using a set of drainage-type lysimeters filled with loamy sand. Grain sorghum (*Sorghum bicolor* Moench) was grown in the lysimeters and irrigated with water having an *EC* of 3.5 mS/cm for leaching fractions of 0.6, 0.4, 0.2 and 0.05. Existing equations for determining leaching requirements were evaluated based on the results obtained.

Although the experimental data showed much scatter, it is concluded that the Bouwer equation with a leaching efficiency of 0.8 and the Rhoades equation with a corrected coefficient for calculating average soil salinity offer better results for estimating the leaching requirements in cases of leaching fractions ranging from 0.2-0.3 and 0.1-0.2, respectively.

ま え が き

乾燥地や半乾燥地では、可溶性塩類を含む水による灌漑を行わなければならない場合が多い。塩分を含む水であっても、灌漑に利用できれば、それなりの作物生産が期待できるからである。しかし、塩分を含む水を無計画に継続して灌漑すると、土壌水分の塩類濃度が上昇し、それに伴って作物収量が減少する。

土壌中の過剰な塩分集積を避けるために、蒸発散で利

用される量以上の水量を灌漑することが行われ、リーチングと呼ばれる。リーチングのための供給水量が多すぎると、排水系内の塩分負荷を高め、逆に少なすぎると、作物の根群域内の土壌水の塩類濃度が上昇する。合理的なリーチングを行うには、土壌中の塩分挙動を把握することが重要である。

本研究では、排水収支型ライシメータを用いた実験により、リーチングに必要とされる水量、すなわち leaching requirement を算定するために提案されてきた幾つかの算

* 鳥取大学農学部附属砂丘利用研究施設

* Sand Dune Research Institute, Faculty of Agriculture, Tottori University

** テキサス農工大学

** Texas A & M University

***故人

*** deceased

定式を検討し、それらに対する実験的評価を試みた。

実験方法

実験は、鳥取大学農学部附属砂丘利用研究施設のガラス室内において行った。4 mmフルイを通過したマサ土を均一に充填（乾燥密度約1.3g/cm³）した排水収支型ライシメータ（大きさ2 m×2 m, 土層厚1.2m）にグレインソルガム（*Sorghum bicolor* Moench）を条間50cm, 株間8 cmで1986年7月下旬から10月中旬まで栽培した。

グレインソルガムの播種から3週間後、電導度10mS/cm（約5,400ppm）の塩水を約400mm灌水して、土壌プロファイルが一樣な塩分濃度を示すように初期設定した。用いた塩水は、NaClとCaCl₂とによって、SARが10になるように調整したものである。電導度と塩類濃度との間には、Fig. 1のような関係がみられる。通常の灌漑には、3.5mS/cm（約1,800ppm）, SAR=10の塩水を用い、1週間間断の灌漑を行った。この塩水は、アメリカ合衆国農務省の塩類研究所の水質基準⁹⁾によれば、C-4（塩類濃度が高いので、透水性がよい土壌の場合や過剰の塩分が特別に除塩される場合にきぎって灌漑に利用され、また、作物は耐塩性作物に限定される）、S-3（高いソーダ水で、ほとんどの場合、交換性Na害が生じる）に分類される。

灌漑処理として、ライシメータ底部でのLFが、それぞれ、0.6, 0.4, 0.2, 0.05になるように、各ライシメータの灌水量を調節した。灌水は、面的に一樣な水分供給ができるよう、散水タイプのドリップチューブを50cm間隔に配置し、灌漑強度18mm/hrで行った。灌漑の際には、地表面での湛水や表面流出は観察されなかった。

土壌水分の測定は、テンシオメータを各ライシメータの地表面から、5, 15, 25, 35, 50, 70, 100cmの深さにそれぞれ2本ずつ設置し、1日1回測定を行った。測定した土壌水分吸引圧水頭（*h*）から体積含水率（*θ*）への変換には、現場法で作成した土壌水分特性曲線を使用した。また、土壌水の電導度は、テンシオメータと同一深さに土中塩分センサをそれぞれ2個設置し、1日1回測定を行った。

結果と考察

1. 従来の研究結果

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。LRのほか、leaching fraction (LF) という用語もあり、両者が混同して使用されることがしばしばある。厳密な定義と

しては、前者 (LR) は、土壌水の塩類濃度の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、計算で求められる値である。これに対して、後者 (LF) は、作物の根群域を通過する灌漑水の実際の割合と定義される⁹⁾。

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、LFは、定義から次式で表される。

$$LF = D_d / D_i = C_i / C_d \quad (1)$$

ここで、*D*と*C*はそれぞれ、水量（水深）と塩分濃度を表し、添字の*i*と*d*は、それぞれ、灌漑水と排水とを意味する。LRは、*C_d*がある設定値にしたときのLFと定義されるので、

$$LR = D_d^* / D_i = C_i / C_d^* \quad (2)$$

と表される。ここで、*D_d*^{*}は、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（水深）で、*C_d*^{*}は、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である。

比較的に薄い土壌水の塩類濃度は、電気伝導度（電導度、*EC*）と線形関係にあるとみなせるので⁹⁾ (2)式は

$$LR = D_d^* / D_i = EC_i / EC_d^* \quad (3)$$

となる。ここで、*EC_i*は灌漑水の電導度、*EC_d*^{*}は根群域底部における排水の設定された電導度である。

LRを計算する場合、基本的には(3)式を使用するが、設定値である*EC_d*^{*}をどのように評価するかが問題で、多くの研究者が様々な*EC_d*の設定値を提案しているのが現状である。それらの中から幾つかを取りあげてみると、次のとおりである。

アメリカ農務省の塩類研究所⁹⁾では、*EC_d*^{*}の値は、収量が50%に減少するときの土壌の飽和抽出液の電導度 (*EC_{e50}*) に等しくしてよいとした。

$$EC_d^* = EC_{e50} \quad (4)$$

これは、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、土壌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⁹⁾。

Bouwer³⁾は、灌漑水のすべてがリーチングに有効に使われるのではないとの考えで、0から1の範囲の値をとるリーチング効率係数 (*f*) の概念を導入し、次式を提案した。

$$EC_d^* = 2 \cdot f \cdot EC_{ei} + (1 - f) EC_i \quad (5)$$

ここで、*EC_{ei}*は許容される減収率のときの土壌の飽和抽出液の電導度、*EC_i*は灌漑水の電導度である。通常の土で

は、圃場容水量 (θ_c) は飽和水分量 (θ_s) の約半分であるとしてよく、その場合、土壤水の電導度 (EC_{sw}) は土壤の飽和抽出液の電導度 (EC_e) の2倍とみなせる。したがって、(5)式の右辺第1項の $2 \cdot EC_{et}$ は EC_{sw} を意味する。(5)式は圃場容水量の状態では排水される割合が f 、土壤中の大間隙を通して直接根群域の底部へ排出される灌漑水の割合が $(1-f)$ であることを示す。

BernsteinとFrancois²⁾は、ライシメータを用いて実験的に検討を行い、従来の研究結果とは逆に、作物収量は排水の塩類濃度よりも灌漑水の塩類濃度によってより影響されることを見いだした。さらに、耐塩性が低い作物から中庸の作物に対して、土壤中の塩分の作物への影響がゼロであるためには、 LR 値が(4)式で計算される LR 値の25%でよいとの結果を得た。

$$EC_d^* = 4 \cdot EC_{e50} \quad (6)$$

Van Schilfgaard³⁾は、作物の根がもはや水分を吸収できなくなるときの、すなわち、収量がゼロになるときの EC_e (EC_{e0}) まで許容できるとし、 θ_s は θ_{fc} の2倍になるとし、次式を提案した。

$$EC_d^* = 2 \cdot EC_{e0} \quad (7)$$

これは、点滴灌漑のような高頻度灌漑には適用できるとして、FAOの技術資料¹⁾に採用された。しかし、1985年の同技術資料の改訂版ではこれに関する記載がない。点滴

灌漑のように高頻度で灌漑することによって土壤水分を高く保ったとしても、収量ゼロになる EC_e を採用することは実用的な観点からは望ましくないと判断されたものであろう。

Rhoades⁴⁾は、作物は根群域内の平均塩類濃度に反応し、地表面から下方に向かって、それぞれ40, 30, 20, 10%の割合で根群域から水分が消費されるとし、根群域頂部と底部の電導度から EC_d^* を推定した。

$$EC_d^* = (4/k) EC_{et} - EC_i \quad (8)$$

ここで、 k は定数で、比較的小さい LF のときは0.8が採用される。(8)式は、前記のFAOの技術資料で地表灌漑およびスプリンクラ灌漑の場合の LR 算定式に採用されている。

SmithとHancock⁵⁾は、作物は、根の吸水量に対応する根群域の重味つき平均塩類濃度に反応するとし、根群による任意の吸水パターンを想定して次式を提案した。

$$\ln(LR)/(LR-1) = 2 \cdot EC_{et}/EC_i \quad (9)$$

2. 実験結果と考察

前記のように、当初は LF が0.6, 0.4, 0.2, 0.05となるように、灌漑水量を調整して実験を行ったが、全実験期間を通じた LF は0.58, 0.48, 0.24, 0.17となり、 $LR = 0.05$ 区を除いた三つの区はほぼ所定の LR を達成したものの、 $LR = 0.05$ 区はかなり大きな LF 値を示した。実験期間を通じての土壤水の電導度、 pF 、灌漑水量、排水量、直径20cmの蒸発計による蒸発量の経日変化の一例をFig. 2に示す。

Fig. 3には、それぞれの灌漑終了後に土壤水が平衡状態(全水頭で約120cm)に達したと考えられるときの各ライシメータにおける塩分プロファイルを示した。 LR が大きい区ほど、電導度のピーク、すなわち塩分濃度のピークがより下方において生じている。しかし、灌漑水量の少ない $LR = 0.05$ 区では、地表面付近にピークが現われている。これらのことは、間断日数、灌漑水量などを考慮しても、なおある最小値以上の LF を確保しないと、表層には塩分集積が生じる可能性があることを示唆している。

根群域を対象とした LF を知るには、その根群域からの排水量を求める必要がある。しかし、それを直接測定することは困難であるので、本研究では塩収支式に基づいて、根群域からの排水量の推定を次のように行った。

塩分の沈殿や土壤母材からの溶脱、作物根による吸収がないと仮定すると、根群域内の塩収支式は次式で表される。

$$D_1 \cdot EC_1 + D_0 \cdot EC_0 - D_d \cdot EC_d = D_a \cdot EC_a \quad (10)$$

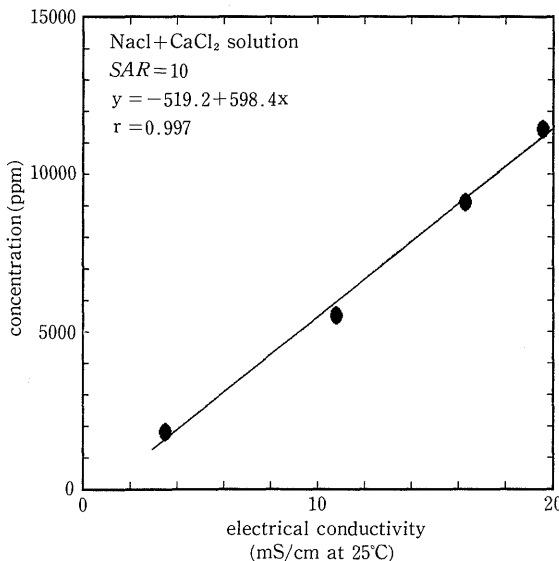


Fig. 1 Concentration of solution as related to electrical conductivity (r is the correlation coefficient)

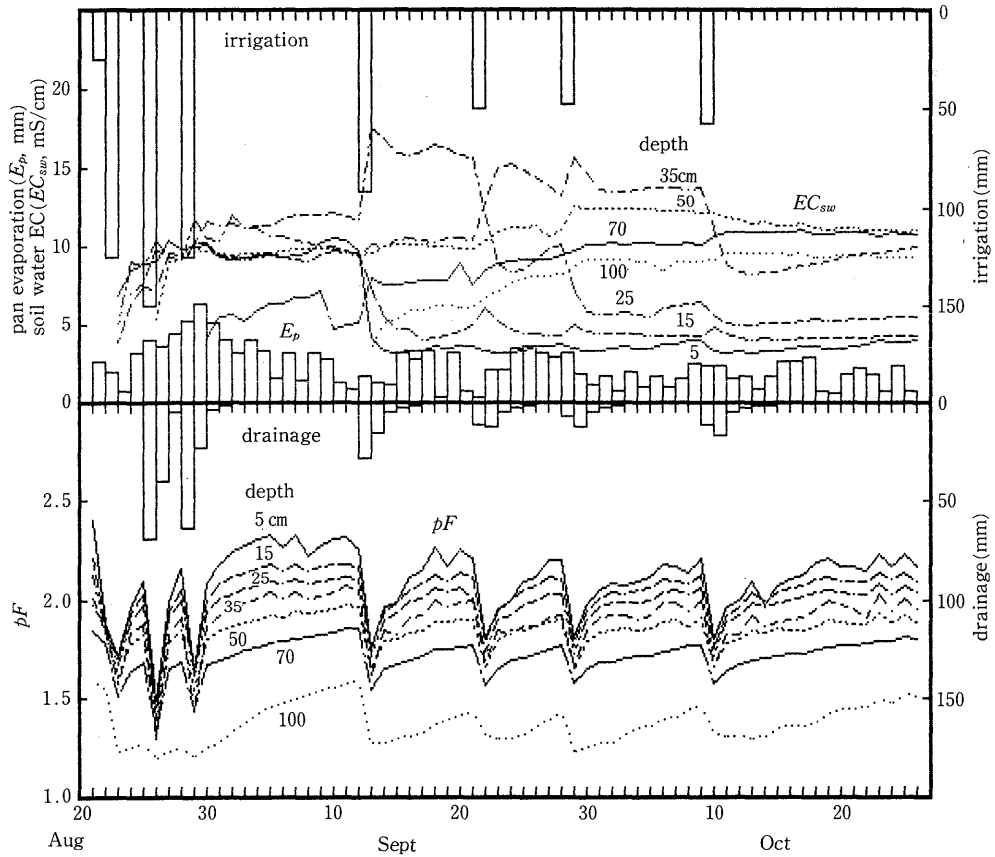


Fig. 2 Variations of irrigation, drainage, pan evaporation, pF and electrical conductivity of soil water in lysimeter with LR of 0.6.

ここで、 D_b , EC_b , D_a , EC_a は、それぞれ、灌漑前、灌漑後に土壤中に存在する水分、電導度である。

ライシメータ内の土層厚120cmを地表面から下方に向けて、10, 10, 10, 10, 20, 20, 40cm厚の土層に分割し、それぞれの土層の中心部、すなわち、地表から5, 15, 25, 35, 50, 70, 100cm深さでの土壤水分量と電導度の測定値をその土層の代表値とした。地表面からある土層境界までを一つの根群域と考えると、(10)式左辺の第2項および右辺の値は、地表面から土層境界までに存在する各土層における水分(D)と電導度(EC)の測定値の積(塩分負荷、 $D \cdot EC$)の累加値($\sum D \cdot EC$)として表される。

ここで未知数として残るのは、 D_a と EC_a である。 EC_a がわかれば、 D_a が求められる。地表面から n 番目までの土層

を対象とする根群域を考えると、根群域内の土壤水の平均電導度(EC_a)は次式で表すことができる。

$$EC_a = \sum (D_a \cdot EC_a) / \sum D_a \quad (11)$$

また、灌漑終了後、土壤水分が平衡状態になったときには、ある土層からの排水の電導度(EC_d)はその土層の土壤水の電導度(EC_{sw} , すなわち EC_a)に等しいと考えることができる。したがって、根群域からの排水量(D_d)は、(10)式を D_d について整理し、 EC_d を EC_a に置換えると、次式で求められる。

$$D_d = (D_1 \cdot EC_1 + D_b \cdot EC_b - D_a \cdot EC_a) / EC_a \quad (12)$$

全灌漑期間を通じての排水量を各灌漑終了後の排水量の合計として根群域ごとに $\sum D_d$ で表すと、根群域ごとの LF は、 $LF = \sum D_d / \sum D_i$ で求めることができる。ここで、

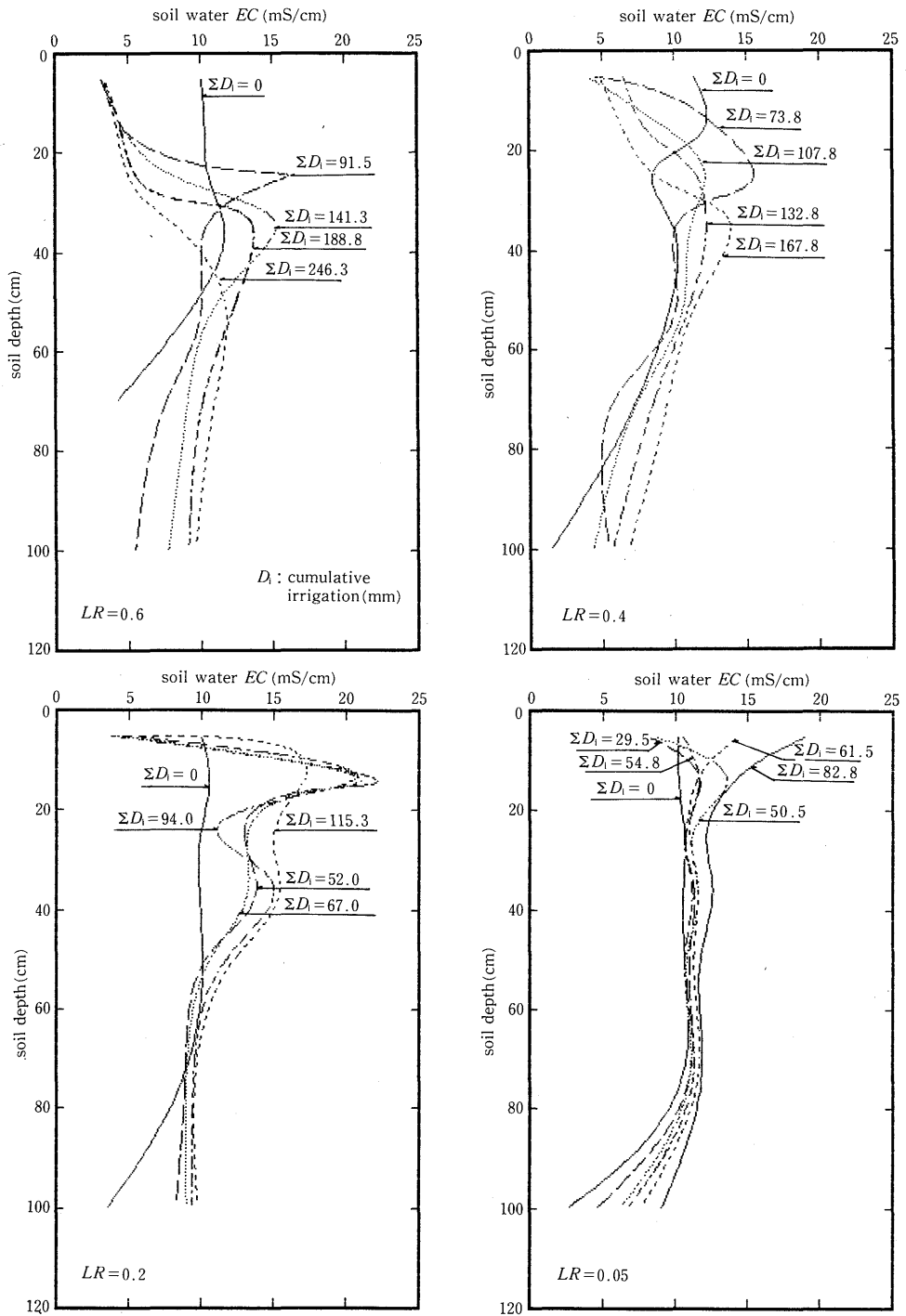


Fig. 3 Variations of soil water EC profiles in lysimeters with different LR.

ΣD_i は灌漑水量の合計である。根群域内の土壌水の平均電導度(EC_a)が根群域の設定された土壌水の電導度であると考えれば、通常の土壌では、 $\theta_s/\theta_{ic}=2$ とみなせるので、 $EC_{et} \cdot \theta_s = EC_a \cdot \theta_{ic}$ の関係より、 $2 \cdot EC_{et} = EC_a$ と表される。

Fig. 4には、全灌漑終了後における根群域ごとの $LF = \Sigma D_a / \Sigma D_i$ と対応する根群域底部層において最後の灌漑終了後に土壌水が平衡に達したときの EC_a に対する EC_i の比(EC_i/EC_a)との関係を丸印で示した。ここに、 EC_i は全灌漑期間を通じての灌漑水の平均電導度を用いた。また、先に示した既存の LR の算定式による計算値と EC_i/EC_a との関係を曲線で示している。

図中に補正(8)式と表示した曲線は、(8)式の根群域の水分消費割合を本実験の実測根群分布(70, 20, 6, 4%)に等しくとり、 k を0.8に固定しないで、 k が収束するまで逐次計算を行って得た結果である。

(4), (6), (7)式では、減収がゼロであるときの根群域の電導度を条件に LR を計算しているの、耐塩性ガイドライン¹⁾により、このときの EC_e は、グレインソルガムに対して4 mS/cmである。したがって、根群域内の土壌水の平均電導度は8 mS/cmとなる。灌漑水の電導度は3.5 mS/cmであるので、(4), (6), (7)式による LR の値と EC_i/EC_a との関係は、四角印で与えられる。

Fig. 4により、次のようなことが言える。

- 1) 塩類研究所による式、(4)式は、係数を補正した

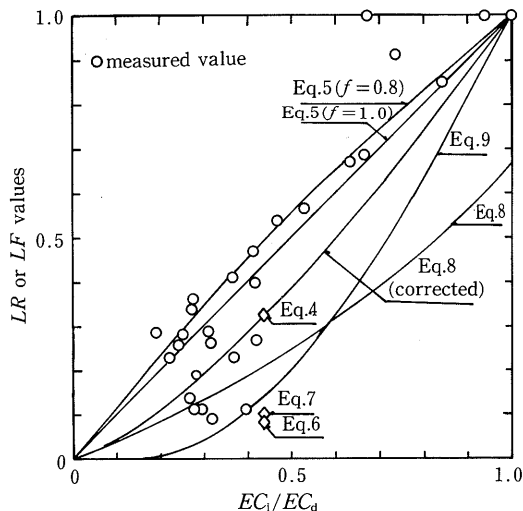


Fig. 4 Comparison between LR or LF Values and EC_i/EC_a .

Rhoades式、補正(8)式とほぼ等しい LR 値を示す。

2) BernsteinとFrancois式、(6)式およびVan Schilfgaardらの式、(7)式は LF を幾分、過小評価するようである。

3) Bower式、(5)式は、 $LF=0.2\sim 0.3$ 以上で実験値とよく適合し、リーチング効率係数(f)は0.8付近であると判断される。

4) Rhoades式、(8)式は、 $LF=0.1\sim 0.2$ で実験値の平均的な分布を表し、係数(k)を補正すると、適合の上限を示す。係数補正をしない場合、とくに $LF>0.3$ では LF を著しく過小評価する。

5) SmithとHancock式、(9)式は、 $LF=0.1$ 付近で適合の下限を示すが、その他では LF を過小評価する。

ま と め

塩水灌漑条件下の土壌に対する水管理の中で、とくに必要不可欠であるリーチングに関する実験を行い、リーチング必要水量を求めるための既存式に対する実験的評価を試みた。

ライシメータ実験の結果、0.2から0.3程度の比較的に大きい LR の場合にはBower式、また、0.1から0.2程度の比較的に小さい LR の場合にはRhoades式が実際のリーチングを適性に評価すると考えられる。なお、 LF が大きい場合のマサ土では、Bower式のリーチング効率係数は0.8となることがわかった。

実験データのばらつきは、根群域からの排水量が正確に算定できないことによるものと思われる、水分フラックスの推定をより正確にすることやより正確な土壌水の電導度を測定するセンサの導入が必要であろう。

文 献

- 1) Ayers, R. S. and D. W. Westcot : *Water Quality for Agriculture*, FAO Irrig. and Drain. Paper, 29, FAO, Rome (1976) pp. 15-52
- 2) Bernstein, L. and L. E. Francois : Leaching requirement studies : Sensitivity of alfalfa to salinity of irrigation and drainage water, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 37 931-943 (1973)
- 3) Bower, H. : Salt balance, irrigation efficiency, and drainage design, *J. Irrig. and Drain. Div., ASCE.* 95 153-170 (1969)
- 4) Bower, H. : Developing drainage design criteria, In *Drainage for Agriculture* Edited by Van Schilfgaard, J. Monogr. 17, Am. Soc. Agron.,

- Madison (1974) pp. 67-79
- 5) Bresler, E. et al. : *Saline and Sodic Soils*, Springer-Verlag, Berlin (1982) p. 187
 - 6) Rhoades, J. D. : Drainage for salinity control, In *Drainage for Agriculture* Edited by van Schilfgaarde, J. Monogr. 17, Am. Soc. Agron., Madison (1974) pp. 433-461
 - 7) Smith, R. J. and N. H. Hancock : Leaching requirement of irrigated soils, *Agr. Water Management*, 11 13-22 (1986)
 - 8) U. S. Salinity Laboratory Staff : *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*, USDA Agricultural Handbook 60, USDA, Washington, D. C. (1954) pp. 55-82
 - 9) Van Schilfgaarde, J. et al. : Irrigation management for salt control, *J. Irrig. and Drain. Div.*, ASCE, 100 321-338 (1974)