

総 説

点滴灌漑における土壌水分特性

山本 太平*1・田中 明*2・成岡 道男*1

Soil Moisture Characteristics on Drip Irrigation Method

Tahei YAMAMOTO*1 Akira TANAKA*2 and Michio NARUOKA*1

*1Arid Land Research Center, Tottori University

*2Faculty of Agriculture, Saga University

Key words : Drip irrigation, Soil moisture character

(Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jpn., 66, 65-69, 1992)

I. ま え が き

点滴灌漑では、一般に滴下管を植条に沿って地表定置して給水するため、土壌中には滴下点を中心にした湿潤域が形成される。滴下点の配置間隔が十分大きい場合には、湿潤域相互の重複がないので一個の点源とみなされ、土壌水は三次元的に移動する。滴下孔間隔が小さく滴下管方向の水分移動がきわめて小さいとすれば、滴下管は連続した線源を示し土壌水は二次元的に移動する。湿潤域の形、大きさは、エミッタ間隔、滴下管間隔を決定する特性値であり、また湿潤域内の水分量分布は作物の消費水量、灌漑効果、塩類集積等に関連する特性値である^{1,2)}。点滴灌漑下の土壌水分環境は、湿潤域のこれらの特性値で表され、次のような因子によって左右されよう。

- ① 気象因子 (降雨, 気温, 日射, 蒸発量等)。
- ② 土壌因子 (土性, 成層状態, 初期水分量等)。
- ③ 灌水因子 (灌水強度, 灌水時間, 滴下管の配置間隔等)。

④ 作物因子 (根群分布, 蒸散量, 植栽間隔, 品種等)。
土壌水分環境は、圃場が裸地条件下の場合主として①, ②, ③の因子によって、植生条件下の場合は裸地条件下の各因子に、④の因子が複合的に作用し複雑な特徴を示す。さらに、種々の因子は時間的に変動しているため、土壌水分環境はさらに複雑になる。

ここでは、点滴灌漑の土壌水分環境に関し、主として海外における従来の研究動向を概説すると同時に、降雨の多いわが国の露地条件下において、点滴法の水分特性

の研究に必要な解析手法等を紹介する。

II. 裸地土壌中の水分量分布

1. 実験的研究

土壌水分環境の初期の研究は実験によるものが多い。エミッタ直下の土壌中に形成される湿潤域について観察され、その特性と水分、溶質、根群等との関係について定性的な検討が行われた³⁾。1970年代になると、Roth³⁾, Ben-Asher⁴⁾, Merrillら⁵⁾を中心に、湿潤域に関して定量的な考察が進められた (図-1 参照)。

ASAE では、Roth, Ben-Asher, Merrill らの研究活動を次のように要約している⁶⁾。Roth³⁾ は主として砂質土壌中の湿潤域を取り上げ、湿潤域の形を球体と仮定して湿潤半径を推定し、実験値と比較検討した。Ben-Asherら⁴⁾ は、砂質土壌中の湿潤域の実験結果と、Brandらの数値計算結果⁷⁾ および Warrick の解析結果⁸⁾ とを比較検討した。この結果、実験値に最も近似しているのは数値解であり、解析解でも不飽和透水係数Kとマトリックポテンシャルhの曲線勾配 α のとり方によって実験値に合うようになると述べている。また、Merrillら⁵⁾ は砂質ロームを用いた三次元分布について検討し、解析結果を①~④のように示した。①水分量は土壌面近くが最も大きく深さに伴って小さくなる。②日滴下量20mmで6時間周期の滴下時間の場合14cmと28cmの深さのマトリックポテンシャルの時間変化は正弦曲線に近似した分布を示す。③正弦曲線の平均値は Warrick の定常解⁹⁾ と同じになる。④点源から離れるに伴って正弦曲線の周期に時間遅れが生じ振幅も小さくなる。

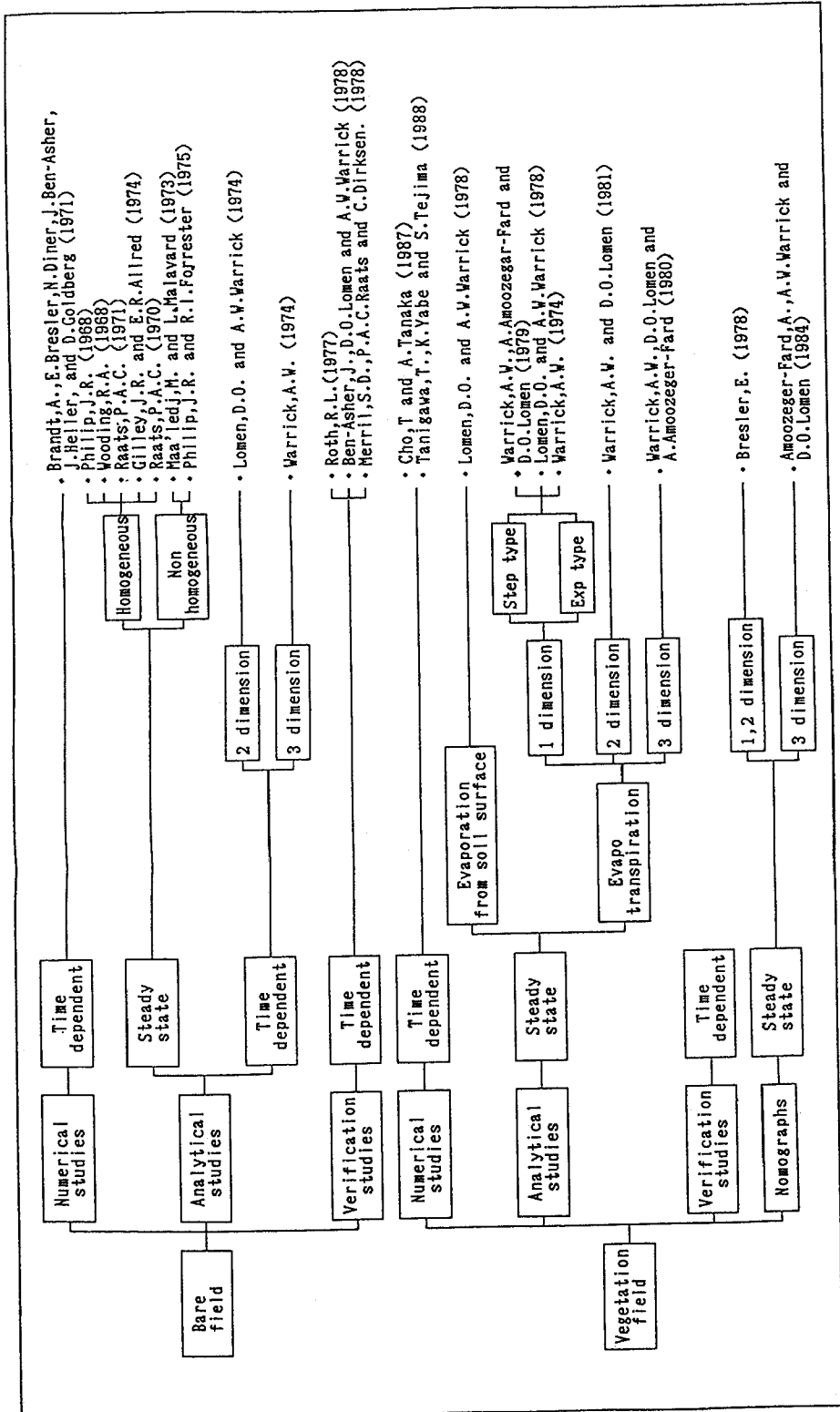
2. 解析的研究

土壌中のある位置の水分量の時間的変化は、一般に

*1鳥取大学乾燥地研究センター

*2佐賀大学農学部

キーワード：点滴灌漑, 土壌水分特性



図一 点滴灌漑法における土壌水分移動の研究
Fig. 2 Studies on soil moisture flow of drip irrigation methods

Richard 型の水分量拡散型の基礎方程式によって表される⁹⁾。この基本式が成立するには、主として次の仮定条件が必要である。①土壌は非圧縮体であり等方性の均一多孔質媒体である。②Darcy 則は飽和および不飽和流に適用できる。③ヒステリシスが無視できて不飽和透水係数は土壌水分量の一価連続関数である。④土壌は等温条件下にある。

Richard 型の基本式を用いて、湿潤域の特性を解析的に明らかにする研究は、従来多くの研究者によって行われている。点源または線源を中心にした水分量解析において、一個の点源が無限に広い土壌中にある場合には Philip⁹⁾ により、一個の点源が土壌面にある場合には Wooding¹¹⁾、Raats¹²⁾ により、さらに一個の線源土壌中または土壌面にある場合は Gilley¹³⁾、Raats¹⁴⁾ により、定常条件下において明らかにされ、それぞれの場合に解析解がある。

点滴法における定常条件とは灌漑時間が十分大きくなり、水分動態の時間変化が極めて少ない状態を想定している。

ここで、Raats は土壌の $K-h$ の関係を、 $K = K_0 \exp(\alpha h)$ (K_0 : 飽和透水係数, α : 土壌の特性値, $h < 0$)、のように表すと同時に、座標軸の無次元化を行って Richard 型基本式の線形化を試み、二次元¹²⁾、三次元¹³⁾ の定常解析解を誘導した。この結果、対象土壌の α 、 K_0 とエミッタからの滴下流量を用いて、マトリックポテンシャル分布が算定できる。不均一土壌条件に関する解析的研究では、主として Maa'ledj ら¹⁵⁾、Philip ら¹⁶⁾ があげられる。

先の ASAE では二人の研究活動を次のように要約している⁶⁾。まず Maa'ledj ら¹⁵⁾ は成層土壌における検討を行い、検討結果を①、②のように示した。①細粒性土壌の上に粗粒性土壌が成層状態の場合、浸潤前線は境界層に達するまで均一土壌の場合と同様な形で発達するが、細粒性土壌中では側方に大きく広がり垂直方向への移動が少ない。②線源直下に不透水層がある場合には地表面の湿潤面積が50%拡大した。次に Philip ら¹⁶⁾ は、 K と深さ z の関係が、 $K = K_0 \exp\{\alpha(h + Bz)\}$ (B : 定数)、のように表わされる土壌モデルについて解析を行った。解析結果は①、②のように示される。①等マトリックポテンシャル線は B の増加に伴って深さ方向に密になる。②均一土壌の Raats の解析解¹²⁾ と比較した場合、本解析解は均一土壌の解に $(1 + B)$ の係数を乗じたものに等しい。

3. 数値的研究

Brandt らは数値計算法による解析手法を確立した⁷⁾。この手法は、Richard 型の基本式を差分方程式に変換し、

alternating directions implicit (ADI) method および Newton-Raphson method を利用したものである。この結果、湿潤域の形成とその中の水分量分布が数値的手法によって明らかにされた。この数値モデルでは、地表面境界条件として、点源及び線源を中心に滴下水による飽和域 (saturated water entry zone) の形成を仮定している。

Brandt らの数値モデルを利用し、本学の乾燥地研究センター圃場における砂丘砂を対象にして湿潤域の動態解析を行った。これらの結果は次のように要約される¹⁾。①滴下点付近では $0.17 \sim 0.15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ の水分量 θ を示し、 $\theta = 0.15 \sim 0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ の範囲が湿潤域内の殆どの領域を占める。②湿潤域内の等水分線は土壌面 (水平) 方向より深さ方向に大きく広がる。水平方向では滴下点付近の高水分量域からしだいに定常状態に近づく。③水平方向の等水分線の広がり方は小さく、滴下時間 3 hr 以内では深さ方向の $1/2$ 以下を示す。④初期水分量の多少は深さ方向の等水分線の広がり方に影響を与えるが、水平方向の広がり方は $15 \sim 20 \text{ cm}$ が限界のようである。⑤滴下流量を増加させると深さ方向への広がり方が急増する。

III. 水消費を考慮した水分量分布

1. 解析的研究

Warrick らの研究グループは、従来の解析的手法をさらに発展させ、土壌面蒸発や作物の水消費を考慮した解析解を次々と発表した。即ち、Raats らの用いた $K = K_0 \exp(\alpha h)$ の関係を利用し、二次元¹⁶⁾、三次元¹⁷⁾ の非定常・定常解析解を誘導した。まず 1978 年 Lomen ら¹⁷⁾ は、土壌面蒸発量 m と地表面水分量の関係をもとにして、 m を含んだ解析解を誘導した。作物根による水消費に関しては、Warrick らによって、1979 年一次元の水消費条件を考慮した解析解^{18,20)}、1980 年三次元の水消費条件を考慮した解析解²¹⁾、1981 年二次元の水消費条件を考慮した解析解²²⁾ が誘導された。

一次元の水消費条件とは、作物根による水消費パターンが深さ方向 (z 軸) で変化し土壌面方向 (x 軸, y 軸) では一様な場合である。この対象になる作物には牧草や芝草があげられる。また二次元、三次元の水消費条件とは、作物根群が平面的、立体的に変化する場合であり、それぞれ、対象として列状栽培の野菜、植栽間隔の広い果樹等があげられる。

2. ノモグラフ (計算図表) を利用する方法

1 点源または 1 線源からのマトリックポテンシャル分布パターンを複合させることによって、2 点源または 2 線源間のマトリックポテンシャル分布が求められる²³⁾。こ

ここで、2 点源間の地表面中間点におけるマトリックポテンシャル h_M は適正なエミッタ間隔 d_s を、また 2 線源間の地表面中間点のマトリックポテンシャル h_M は適正な滴下管間隔 L_s を決定する要因とされ、 h_M を灌水開始を示す灌水点マトリックポテンシャルとして考える。

Amoozegar-Fard²⁴⁾ は、一次元の水消費項を含んだ定常解析解を用いて、 h_M と d_s または L_s との関係を図解的に求めた。即ち、滴下流量 q 、土壌特性値 (α , K_0)、有効根群深 z_0 、灌水点マトリックポテンシャル h_M 、蒸散速度 u 、滴下管間隔 L_s 、エミッタ間隔 d_s 、エミッタの深さ z_n 等の変数を用いて、一次元の水消費条件における計算図表を作成した。この結果、複雑な計算をする必要がなく q 、 α 、 K_0 、 z_0 、 h_M 、 u 、 z_n が与えられれば L_s が求まり、逆に L_s 、 α 、 K_0 、 z_0 、 u 、 z_n が与えられれば q の値が決定できる。

さらに、三次元 (円筒状の作物根群) の水消費条件の場合には、 α 、 K_0 、 z_0 、 h_M 、 u 、 z_n を与えて、作物根群の中心軸から一定距離のマトリックポテンシャル h_M をに設定するに必要な滴下流量 q を求める計算図表が作成された²⁴⁾。

ここで、Amoozegar-Fard らは滴下源として点源、線源、と同時に平円盤状 (ディスク) 源を用いた。また計算図表ではいずれも Warrick の定常解析解がベースになっている。対象土壌が均一な場合、線源、点源、ディスク源において、エミッタの間隔と深さ、滴下管間隔、蒸発散量、有効根群域と滴下流量との関係が容易に得られる。即ち、灌水と水消費のパターンが周期性のある無降雨条件では、土壌水分が定常状態を示しやすいので計算図表の適用が考えられる。

わが国の場合には、施設栽培のように降雨の遮断された作物条件が計算図表の対象になる。一方露地条件下では、降雨によって定常状態を示すことが少ないので、計算図表の適用性について今後の検討が必要であろう。

3. 数値的研究

水消費項まで含めた差分方程式は、次のような場合、数値解の収束性にいくつかの問題点があげられた¹⁾。①砂丘砂のように高透水性土壌において水分量が時間的に急変する場合。②反復計算の回数と時間の増分の設定が適正でない場合。③ $pF-\theta$ 曲線や $K-\theta$ 曲線等の適用において曲線上の変曲点が反復計算の収束性に影響されやすい場合。

上記の差分法より優れた方法として、1975年頃から不飽和状態の水分移動の分野に有限要素法の適用が試み始められた。1980年代になると、わが国の点滴灌漑や負圧差灌漑にもこの種の研究がみられる^{25,26)}。有限要素法は、水消費項を考慮した水分移動の領域だけでなく、水分・

溶質の同時移動の研究にも広く適用され、今後の発展が期待されるところである。

IV. あとがき

点滴灌漑は、水の効率的利用と作物の塩害軽減に特色を有するので、乾燥地域の代表的灌漑方式としてみなされている。わが国においては、1975年頃から、砂質圃場、施設園芸地域、または水資源の少ない地域を中心にして普及している。1987年には点滴灌漑の土地改良事業計画指針が刊行されている。

現在、実施中の国営鳥取県東伯地区灌漑事業では、計画地区に300~400 ha に及ぶスイカ団地があり、マルチ下の灌水に点滴法の特徴が活かされている²⁷⁾。また点滴法は、造園、緑化分野のきめ細かな給水・施肥管理にも急速に浸透し始めている。これらは、今後におけるわが国の点滴灌漑の発展・普及方式を深るうえで興味深い事例である。

ここでは、点滴灌漑に関する消費水量、灌漑効果、灌漑システム、塩類集積等の研究分野のうち、主として海外における土壌水分の分野に関し従来の研究動向を概説し、これらの研究成果のわが国への適用に関し、二、三検討してみた。

参 考 文 献

- 1) 山本太平: 砂丘地におけるトリクルかんがいの実用化に関する基礎研究, 鳥大農学部水文かんがい部門, pp 27-40 (1977).
- 2) Hudson, J. P.: Characteristics of the trickle irrigation system, *Advanc. Hort. Sci. and Apply* vol III, pp 264-272 (1962).
- 3) Roth, R. L.: Soil moisture distribution and wetting pattern from a point source. *Proc. Second Inter'l. Drip Irrig. Cong., San Diego, CA*, pp 246-251 (1974).
- 4) Ben-Asher, J., Lomen, D. O. and A. W. Warrick: Linear and nonlinear models of infiltration from a point source, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **42**, pp 3-10 (1978).
- 5) Merrill, S. D., Raats, P. A. C. and C. Dirksen.: Flow from a point source at the surface of a heterogeneous soil column. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **42**, pp 851-852 (1978).
- 6) Howell, T. A., Stevenson, D. S., Giltin, H. M., Warrick, A. W. and Raats P. A. C.: Design and operation of trickle (drip) systems in design and

- operation of farm irrigation systems. Jansen, M. E. eds., ASAE Press, pp 663-717 (1980).
- 7) Brandt, A., Bresler, E., Diner, N., Ben-Asher, I., Heller, J., and D. Goldberg : Infiltration from a trickle source : I. Mathematical models, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., **35**, pp 675-682 (1971).
 - 8) Warrick, A. W. : Time-dependent linearized infiltration. I. Point sources, Sci. Soc. Amer. Proc., **38**, pp 383-386 (1974).
 - 9) Hillel, D. : Soil and water physical principles and processes, Academic Press. pp 103-127 (1972).
 - 10) Philip, J. R. : Steady infiltration from buried point sources and spherical cavities, Water Resour. Res., **4** (5), pp 1039-1047 (1968).
 - 11) Wooding, R. A. : Steady infiltration from a shallow circular pond, Water Resour. Res., **4** (6), pp 1259-1273 (1968).
 - 12) Raats, P. A. C. : Steady infiltration from point sources, cavities, and basins, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., **35**, pp 689-694 (1971).
 - 13) Gilley, J. R. and E. R. Allred : Infiltration and root extraction from subsurface irrigation laterals, Transactions of the ASEA **17**, pp 927-933 (1974).
 - 14) Raats, P. A. C. : Steady infiltration from line sources and furrows, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., **34**, pp 709-714 (1970).
 - 15) Maa'ledj, M. and L. Malavard : Resolutions analogiques et numeriques de problemes d'irrigation des sols par canaux equidistants, C. R. Acad. Sc. Paris, **276**, pp 1433-1436 (1973).
 - 16) Philip, J. R. and R. I. Forrester : Steady infiltration from buried, surface, and perched point and line sources in heterogeneous soils : II. Flow details and discussion, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., **39**, pp 408-414 (1975).
 - 17) Lomen, D. O. and A. W. Warrick : Time-dependent linearized infiltration : II. Line sources, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., **38**, pp 568-571 (1974).
 - 18) Lomen, D. O. and A. W. Warrick : Linearized moisture flow with loss at the soil surface, Soil Sci. Soc. Am. J., **42**, pp 396-400 (1978).
 - 19) Warrick, A. W., Amoozegar-Fard A. and D. O. Lomen : Linearized moisture flow from line sources with water extraction, Transactions of the ASAE, pp 549-559 (1979).
 - 20) Lomen, D. O. and A. W. Warrick : Time-dependent solutions to the one-dimensional linearized moisture flow equation with water extraction, Journal of Hydrology, **39**, pp 59-67 (1978).
 - 21) Warrick, A. W., Lomen, D. O. and A. Amoozegar-Fard : Linearized moisture flow with root extraction for three dimensional, steady conditions, Soil Sci. Soc. Am. J., **44**, pp 911-914 (1980).
 - 22) Warrick, A. W. and D. O. Lomen : Two dimensional linearized moisture flow with water extraction, Journal of Hydrology, **49**, pp 235-245 (1981).
 - 23) Bresler, E. : Analysis of trickle irrigation with application to design problems, Irrigation Science, **1** (1), pp 3-17 (1978).
 - 24) Amoozegar-Fard, A. Warrick, A. W. and D. O. Lomen : Design nomographs for trickle irrigation systems, Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, **110**(2), pp 107-120 (1984).
 - 25) 長 智男, 田中 明 : 点滴灌漑及びスプリンクラー灌漑における灌水量と土壌水分分布, 九州学芸雑誌, No. **41**, pp 201-210 (1987).
 - 26) 谷川寅彦, 矢部勝彦, 手島三二 : 動的水分環境の予測と実測との比較 - 地下灌漑に関する実験的研究(V) -, 農土論集, **137**, pp 9-16 (1988).
 - 27) 中島賢二郎, 松島智起, 原川忠典 : 国営東伯地区における水源水質の問題点と調査体制の確立, 農土誌, **58**(8), pp 5-11 (1990).

(受理年月日1992年4月20日)