

土壌水のヒステリシス特性：その実態とモデル化の現状

吉 田 正 則*

Hysteresis of Soil Water : the Phenomenon and Modeling

Masanori YOSHIDA*

* Shikoku National Agricultural Experiment Station

Abstract

Hysteretic behavior between soil matric potential and water content relationship is reviewed in concern with its models. Mechanistic models, namely (1) inkbottle model, (2) contact angle model, (3) air entrapment and solution/dissolution model, and (4) capillary condensation model, have been proposed to explain the hysteresis. However, none of these models has explained quantitative aspects of the hysteresis so far.

Alternatively, quantitative models involving empirical ones, namely (1) domain model coupled with similarity hypothesis, (2) interpolation model, (3) linear model, and (4) parameter scaling model, were incorporated into numerical simulation of soil water dynamics. In these models, the domain model with similarity hypothesis appears to be the most appropriate for the reasons that which has theoretical background, good estimation in high hydraulic conductivity area, and no "pumping" effect.

To clarify effects of soil water hysteresis under *in situ* conditions and to improve the quantitative models applicable to long-term monitoring of soil water movement are in great necessity.

Key words : hysteresis, soil water, mechanistic models, *in situ* effects, quantitative models

1. はじめに

土壌中の水の移動は、雨水や灌漑水の浸潤、地下水涵養、地下からの毛管上昇、蒸発散、土壌中の水分変化などの諸過程を互いに関連づける重要な現象である。土壌中の水移動はこれらの諸過程を通じて土壌中の水分環境を調節するとともに、栄養塩類の媒体として作物や土壌微生物などの生育環境を維持することに貢献している。今日では、過剰な施肥窒素が溶脱し、地下水や河川水の水質を悪化させることが問題とされているが、その主要成分である硝酸態窒素の移動が主に土壌中の水移動を介して行われていることから土壌中の水分動態に関する研究の重要性が理解される(粟生田・吉田, 1995)。

このような認識から、土壌中の水移動に関する研究は土壌物理学の中核として古くから行われており、すでに多数の研究が蓄積されている。しかしそこで開発された理論的・実験的手法は、室内カラム試験など人為的に整

理された条件のもとではじめて適用可能となるものが多く、圃場ないし流域スケールへ応用するにはなお多くの課題を残しているのが現状である。今日われわれが最も関心を寄せなければならないのは、現位置で生じる水・溶質移動の実態とそのメカニズムを、圃場あるいは流域スケールで明らかにすることであり、その作業を通じてはじめて、われわれは合理的養水分管理に基づく低環境負荷型農業の確立に貢献することができるであろう。

さて、実験室レベルで確立された水移動法則を現地土層中に適用するにあたり、今後解決を凶らなければならない課題として筆者は、(1)流れの空間分布に関する知識の集積、(2)土壌の水理特性に関する知識の集積の2点が重要であると考えている。

(1)に関しては、地表面の窪みや間隙特性の空間変動などにもなう浸透水の水みちのふるまいに加え、土壌の乾燥収縮による亀裂、作物の腐朽根やミミズ、モグラなどによる粗孔隙など、いわゆるマクロポアを通じた流れ

* 四国農業試験場 〒765-0053 香川県善通寺市生野町 2575

キーワード：ヒステリシス、土壌水分、機構モデル、現地での役割、定量モデル

(バイパス流)の重要性が指摘されている。これらの部分的集中流れの実態を明らかにするためには、圧力トランスデューサー式テンシオメータ、TDR 土壌水分計、大容量データロガーなどを組み合わせた同時多点測定が有効と考えられるが、センサーの設置にかかる経費や労力の軽減、システムの保守管理の省力化など今後の改良を待たなければならない点が多い。またバイパス流に関しては、マクロポアの位置や分布を原位置で非破壊的に探査する手法の開発が緊急の課題となっている。

(2)には、マトリックポテンシャル ψ 、体積含水率 θ 、不飽和透水係数 K など水移動評価に必要なパラメータを現地土層中でいかに正確かつ詳細に把握するかという問題が含まれる。このうち ψ と θ に関しては、(1)で述べた方法によりある程度の進展が期待できるが、 K に関しては、現在もおお原位置での直接測定がむずかしい。そこで、あらかじめ現地から不攪乱採取した試料の ψ - K ないし θ - K 関係を求めておき、現地でモニタリングした ψ ないし θ から K を推定する方法が用いられる。とくに ψ から K を推定する方法は、試料採取深をはさむ2地点の ψ をモニタリングすることによって水移動解析に必要な動水勾配を得ることができ、しかも θ を測定する必要がないのでその分モニタリングシステムの簡素化が図れるなどの利点をもつ(吉田, 1999)。しかしこの方法を用いた場合、 ψ と K のあいだに生じるヒステリシスの影響が無視できなくなる(粟田原ら, 1992; Beese and van der Ploeg, 1976; Hillel, 1980; Royer and Vachaud, 1975; Tizmas, 1979; Watson *et al.*, 1975)。とくに、降雨、蒸発散、内部排水、地下水位変動などの要因により、吸水と脱水を交互に、かつ不規則に繰り返す現地土層中では、ヒステリシスが K の推定精度におよぼす影響は大きいとみられる。

上に述べたふたつの課題は、いずれも実験室レベルの研究だけでは解決が困難な要素を含んでおり、現地における現象の把握とその機能の解明が不可欠となる。ここでは、そうした課題に含まれる問題のひとつとして土壌のヒステリシス現象をとらえ、既往の研究成果や水移動解析への応用例などを整理、総括する。それは、土壌のヒステリシスを正しく評価することが、現地土層中の K の推定精度を改善し、ひいては水・溶質移動の予測に寄与するところが大きいとの考えに基づいている。本報を通じて、既往のヒステリシス理論が現地土層中の移動現象を理解するうえで有用であることが認知され、同理論が新たな応用の場へ発展するきっかけとなれば幸いである。

2. ヒステリシスとはどのような現象か

土壌のマトリックポテンシャル ψ と体積含水率 θ 、ないし ψ と不飽和透水係数 K とのあいだには、土壌ごとに固有の関係が存在することが知られているが(これらのうち ψ - θ 関係は、水分保持曲線、または水分特性曲線などと呼ばれる)、それらの関係は水分が増加するとき(吸水過程)と減少するとき(脱水過程)では一致しないことが多い。このように ψ - θ 関係や ψ - K 関係が吸水過程と脱水過程で異なる現象を土壌のヒステリシスと呼ぶ(Dane and Wierenga, 1975; Everett and Whitton, 1952; Haines, 1930; Miller and Miller, 1955 a, b, 1956; Philip, 1964; Staple, 1966; Topp, 1969; Topp and Miller, 1966)。厳密には、 $\psi^a \rightarrow \psi^b$ の変化によって生じた θ_A (または K_A) $\rightarrow \theta_B$ (または K_B)なる変化の道筋が $\psi^b \rightarrow \psi^a$ による変化の道筋 θ_B (または K_B) $\rightarrow \theta_A$ (または K_A)と異なっており、かつ両経路とも定常で再現可能な値をとることを意味する(Everett and Whitton, 1952; Iwata *et al.*, 1995)。 ψ - θ 、 ψ - K の関係に加えて θ - K 関係のヒステリシスも考究されたが、通常はその存在が認められないか(Gillham *et al.*, 1976; Talsma, 1970; Topp, 1969; Vachaud and Thony, 1971)、無視できるほど小さいこと(Mualem, 1976 b; Topp and Miller, 1966)が知られている。そのため θ - K の関係は吸水、脱水にかかわらずひとつの関数で表現できることが多く、土壌のヒステリシス問題は ψ - θ 間のヒステリシスに帰着させることができる。

その他、吸・脱水とともに土壌が膨潤・収縮するときにもヒステリシスが生じることが指摘されているが(Aylmore and Quirk, 1959; Hillel and Mottes, 1966; Homes, 1955; Jury *et al.*, 1991)、この場合は乾燥が進むにつれて空隙体積が不可逆的に減少し、 ψ と含水比で描かれる吸・脱水曲線が必ず閉じる(ヒステリシスループを形成する)とは限らない(加藤, 1984)。このように、膨潤・収縮土壌(例えば低湿地土壌)におけるヒステリシス現象は、粘土粒子の配列変化など複雑な要因に基づいて生じることから、ヒステリシス研究の対象として取り上げられることは少なく(Jury *et al.*, 1991)、湿潤条件のもとで一定の骨格構造を維持する土壌に対しては、考察の必要性も乏しいと考えられる。以上の理由から本報では、土粒子配列や空隙体積の変化を生じない土壌または水分条件での ψ - θ 間のヒステリシス現象を中心に検討を進めることにする。

3. ヒステリシスの実際と現地土層中での役割

乾いた土壌が水を吸って飽和するとき、あるいは飽和状態から脱水して乾いていくときにたどるふたつの水分保持曲線は、それぞれ主吸水曲線(CDA)、主脱水曲線

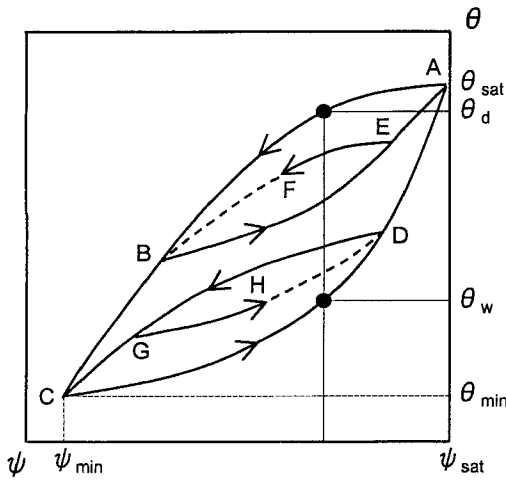


図-1 ϕ - θ 間に生じるヒステリシスの模式図

(ABC) と呼ばれ (図-1)、同じ ϕ に対する θ の大きさは、脱水中の体積含水率 θ_d のほうが吸水中の体積含水率 θ_w より常に大きい。飽和状態 (ψ_{sat}, θ_{sat}) から脱水した土壌が乾燥状態 (ψ_{min}, θ_{min}) に達するまえに吸水し始めたり、乾燥状態から吸水した土壌が飽和に達するまえに脱水し始めると、 ϕ - θ 曲線はふたつの主曲線のあいだを移動する中間的な曲線となり、それぞれ 1 次吸水走査曲線 (BEA)、1 次脱水走査曲線 (DGC) と呼ばれる。さらに 1 次吸・脱水走査曲線から分岐した走査曲線はそれぞれ 2 次脱・吸水走査曲線 (EF・GH) と呼ばれ、より高次の走査曲線も同様に定義される (Poulovassilis, 1962)。なお、図-1 における ψ_{min} と θ_{min} の値は、ある条件のもとでその土壌が経験する最も乾燥したときの値として定義されるもので、その条件が満たされているかぎり、いかなる走査曲線も主曲線がつくるループのなかに含まれるという意味で、主曲線を境界曲線と呼ぶことがある。

ヒステリシスが現地土層中の水分状態や水の流れにおよぼす影響としては、次のような事例が報告されている。

(1) 地下水面上にできる毛管水縁の厚さは、地下水位が上昇するとき (吸水過程) と下降するとき (脱水過程) では異なるため、地下水の横流れや川岸の浸み出し面の発生速度などに影響をおよぼす (Brock and Amar, 1974; Martinec, 1975; Nieber and Walter, 1981; Stauffer and Dracos, 1986; Stauffer *et al.*, 1992)。

(2) 再配分過程でヒステリシスの影響を強く受けた土壌は、そうでない土壌よりも、地表面付近により多くの水分を保持し続ける (Ibrahim and Brutsaert, 1968;

Watson, 1986; Watson and Sardana, 1987)。その理由として Jaynes (1990) は、表層付近の下向き動水勾配がヒステリシスによって小さくなり、再配分が遅くなることを挙げている。

(3) 浸潤直後は、ヒステリシスが再配分を停滞させ、表層付近に多くの水を蓄えるため、蒸発が促進されるが (Bresler *et al.*, 1969; Jaynes, 1990)、蒸発が進んで表層の水分が失われると、ヒステリシスは湿った下層から乾いた表層への水移動を遅らせるため、逆に蒸発を抑制する (Hillel, 1977)。

(4) ヒステリシスの強い土壌は、下方への水移動を妨げることで肥料や農薬の成分を表層に保持し、溶脱を防ぐ作用がある (Jones and Watson, 1987)。

これらの研究に共通しているのは、ひとつの土層内で吸水中の土壌と脱水中の土壌が共存したり、ひとつの土塊内で吸水過程と脱水過程が交互に繰り返される現象を扱っている点である。その結果、隣接する個々の土壌が、ヒステリシスループ内にプロット可能な固有の ϕ - θ 関係を持ち、それらが時間とともに独自の走査曲線上を移動するようになるため、 ϕ 、 θ の土層内分布は複雑になる。さらにこうした ϕ 、 θ 分布が K や動水勾配にも影響を与えるため、土層内の水の挙動もまた複雑なものになる。

もうひとつ注意すべきことは、これらの研究の多くが、土層内の水分分布やその動態を知るうえで、ヒステリシスの考慮が欠かせないことを強調している点である。ヒステリシスの影響を受けて複雑に進行する水や溶質の動きをいかにしてモデル化するか。このことがヒステリシス研究の主要課題のひとつとなってきた理由はそこにある。不飽和土壌中の水フラックスを現位置で測定する方法が存在しない現状では、ヒステリシスモデルを流れの数値シミュレーションに組み込むことによって、必要最小限の実測データから水フラックスを予測する試みは、重要な意味をもつと考えられるのである。そこで以下の章では、これまでに提案されたヒステリシスモデルの内容およびその特徴を概観する。

4. 機構モデル

ヒステリシスのモデル化のひとつの流れとして、ここではまず“機構モデル”について述べる。このモデルは、ヒステリシスの成り立ちをその発生メカニズムから説明しようとするもので、主に以下の 4 つの方式が提案されている。

- 1) インクピンモデル (Hillel, 1980; Iwata *et al.*, 1995; Jury, *et al.*, 1991)

径の大きな空間に径の小さな流路が連結した構造を間

隙の基本単位と考える。すると、基本単位から水が抜けるときの ϕ は径の小さな流路に支配されて低い値を示すのに対し、水が浸入するときの ϕ は大きな空間の径に支配されて高い値を示す。この基本単位が多数連結してひとまとまりの間隙を形成すると、同じ ϕ に対する θ_w は θ_d よりも小さな値となる。このように、間隙の基本単位を大きな空間とそれに連なる小さな流路の組み合わせとする考え方は、“ネック・ボディ間隙”の概念を経て領域理論(後述)へ発展する。

2) 接触角モデル (Hillel, 1980; Iwata *et al.*, 1995; Jury *et al.*, 1991)

土粒子表面がざらざらしていたり有機物などの疎水性物質で覆われていると、土粒子表面における水の接触角は、メニスカスが前進するときのほうがメニスカスが後退するときよりも大きな値を示す。キャピラリーの法則によると、接触角が大きいほど水に生じるポテンシャル ϕ は大きくなる。そのため同じ θ であっても、吸水時(前進メニスカス)の ϕ は脱水時(後退メニスカス)の ϕ よりも大きな値を示すようになる。このことは、ある ϕ に対する θ_d が、 θ_w よりも大きな値を示すことを意味する。

3) 空気の封入、溶解、析出モデル (Hillel, 1980; Jury *et al.*, 1991; Poulouvassilis, 1970)

完全に飽和した土壌をひとたび脱水すると、 $\phi=0$ cm H₂Oのもとで吸水を行っても完全飽和に達しないことが多い。これは脱水中に間隙内に浸入した空気が吸水中に気泡として残存し、間隙内への水の浸入を阻害するた

めと考えられる。しかし長期にわたって吸水を続けると、間隙内に閉じこめられた空気が水中に徐々に溶解して飽和度が高まる。脱水時には水中に溶解していた空気が徐々に析出し、間隙内からの水の放出を促進する。こうした空気の封入、溶解、析出効果によって、 θ_w はより低く、 θ_d はより高く推移するようになる。

4) 毛管凝縮モデル (Iwata *et al.*, 1995; Jury *et al.*, 1991)

板状構造をした粘土がつくる間隙では、水蒸気の凝縮によって凸型メニスカスが互いに向き合うように成長し(図-2, a→b→c)、水ポテンシャル ϕ と含水比 ω はともに上昇するが(吸水過程; 図-2, I→II)、凸型メニスカスの頂点が接触すると、両者は一体化して凹型メニスカスを形成する(図-2, c→d)。このとき、 ϕ は瞬時に低下するが ω の変化はほとんどない(図-2, II→III)。その後間隙内の水が蒸発に転じると、 ϕ 、 ω はともに低下するが(脱水過程; 図-2, d→e→f, III→IV)、凹型メニスカスが後退してその中心部がちぎれた瞬間、再び凸型メニスカスを生じる(図-2, f→a)。このとき、 ϕ は瞬時に上昇するが ω の変化はほとんどない(図-2, IV→I)。このサイクルで同一 ω に対する ϕ を比較すると、吸水時の ϕ_w は脱水時の ϕ_d よりも大きな値を示すことになり(図-2)、ヒステリシスの一要因となる。

これら4つの方式のうちどれがヒステリシスの発生要因として重要になるかは、粒径、間隙特性、粘土の種類や界面特性などによって異なると考えられ、一概に断定することはできない。ガラスビーズや砂質土など粒径の

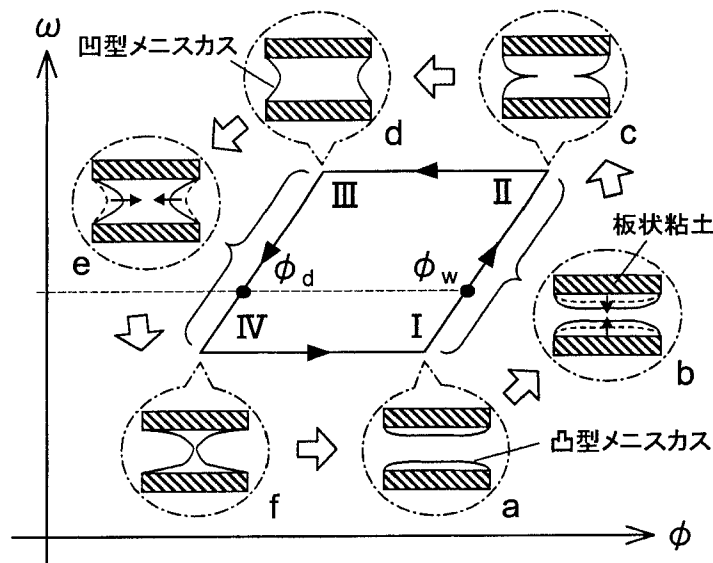


図-2 毛管凝縮モデルの模式図 (Iwata *et al.*, 1995; Jury *et al.*, 1991 より作成)

粗い多孔質体ではインクビン効果が主因とされるが (Hillel, 1980; 加藤, 1984), 板状粘土が卓越する土壌では毛管凝縮の効果が無視できないかもしれない。また接触角効果は、林地や山火跡地における撥水性 (DeBano *et al.*, 1977; 小林ら, 1996) や過去の乾燥履歴 (仲谷, 1981) などに左右され、空気の封入、溶解、析出効果は、空気と水の接触時間に影響される (Hillel, 1980)。しかし実際の土壌では、それぞれのモデルがヒステリシスの発生にどの程度関与しているかを同定することがむずかしい。そのため、機構モデルを出発点にして主曲線と走査曲線群を描き出す試みはほとんど行われていない。

5. 定量モデル

前章では、機構モデルによるヒステリシスの定量化がほとんど行われていないことを述べた。そうしたなか、モデル化のもうひとつの流れとして、ヒステリシスの発生メカニズムにはあまりとらわれず、水分保持特性に関する数少ない情報 (例えば主吸・脱水曲線の実測値など) から走査曲線群を描き出す試みがなされてきた。次に、そのような趣旨で提案されたモデル (定量モデル) の概要を紹介する。

1) 領域モデル

(a) 独立領域理論

独立領域概念に基づくヒステリシスの一般理論は Preisach (1935), Neel (1942, 1943) によってはじめて提唱され、Everett and Whitton (1952), Everett and Smith (1954), Everett (1954, 1955) によって発展した。土壌物理学の分野では、Poulovassilis (1962) が土壌水のヒステリシス現象にはじめて応用した。独立領域理論によれば、ひとつの間隙は、インクビンモデルの“小さな流路”と“大きな空間”に対応するネック半径とボディ半径によって特徴づけられる。間隙が空になるときの ϕ はネック半径に支配されて小さな値 (ϕ_n) を示し、水で満たされるとき ϕ はボディ半径に支配されて大きな値 (ϕ_w) を示す。そしてすべての間隙は、 ϕ_n と ϕ_w の組み合わせによって定義される“領域”に配分される。ひとつの領域は、水で満たされているか空気で満たされているかのどちらかしか許されないため、そこへの水や空気の入りは非線形遷移 (Haines ジャンプ, Haines, 1930) によって瞬間的に起こると仮定される (Mualem, 1973)。独立領域理論の“独立”とは、 ϕ_n と ϕ_w の組み合わせによって分類された“領域”の大きさが、そこに属する間隙の幾何学的特性 (ネック半径とボディ半径) のみによって決まり、他領域とのあいだの水や空気のやりとりには影響されないことを意味する。

独立領域理論は、任意の吸・脱水過程における θ を、

領域分布関数 (領域の大きさを ϕ_n - ϕ_w 平面上に表したときの分布関数) の足し引きによって表現できるところに特色があり、主吸・脱水曲線に加えて、吸水、脱水いずれかの1次走査曲線群さえ測定しておけば、あらゆる次数の走査曲線を計算で求めることができる。Poulovassilis (1962), Talsma (1970), Poulovassilis (1970) は、この方法によって、さまざまな粒径からなる焼結ガラスビーズおよび砂質土の走査曲線を表現した。しかし実用に耐える領域分布関数を求めるためには、走査曲線群に関する詳細なデータの蓄積が必要であり (Ibrahim and Brutsaert, 1968; 加藤, 1984; Mualem, 1973), そのために費やされる時間と労力はかなり大きい (Philip, 1964)。

(b) 相似仮説

そこで実験手続きを簡略化し、領域分布関数を手際よく求めるために提案されたのが、Philip (1964) の相似仮説と Mualem (1973) の相似仮説である。Philip の相似仮説は、 ϕ_w (ボディ半径に対応) の ϕ_n (ネック半径に対応) に対する比率 ϕ_w/ϕ_n が等しい領域であれば、その領域の大きさは間隙の空間スケールによらず一定であること (間隙構造の幾何学的相似性) を仮定している。したがって Philip の相似仮説を適用するにあたっては、ボディ半径とネック半径に関する幾何学的相似性が成り立つことが前提となる。また彼の相似仮説は、領域分布関数を求めるのに難解な数学的手続きを必要とし、しかもその関数形の中に可逆的領域 (後述) を取り込むことが難しいなど、実際の土壌には適用しにくい面があった。

これに対し Mualem の相似仮説は、領域分布関数が、 ϕ_w と ϕ_n を独立変数とするふたつの関数 $h(\phi_w)$, $l(\phi_n)$ の積で表せると仮定する。その結果、ある ϕ_w (ボディ半径) における ϕ_n (ネック半径) 方向の領域分布は、比例定数 $h(\phi_w)$ の寄与を除けば ϕ_w の大きさに関わらず一定となり、ある ϕ_n (ネック半径) における ϕ_w (ボディ半径) 方向の領域分布は、比例定数 $l(\phi_n)$ の寄与を除けば ϕ_n の大きさに関わらず一定となる。このように、Mualem の相似仮説における相似性は、単に数学的な意味をもつに過ぎず、このような考え方がなぜヒステリシスを表現しうるのかについての説明は十分行われていない。しかしながら、Philip が主張するような間隙の物理的相似性を無視することで領域分布関数の数学的取り扱いを簡素化し、領域理論の実用化への道を容易にしたことは賞賛に値する。

(c) 従属領域理論と可逆領域概念

独立領域理論は Poulovassilis らの研究で一定の成果を収めたものの、さまざまな土壌に適用されるにつれ

て、ヒステリシスを表現するうえで限界があることが明らかにされた (Morrow and Harris, 1965; Poulovassilis and Childs, 1971; Poulovassilis and Tzimas 1974; Talsma, 1970; Topp, 1969; Topp, 1971a; Topp and Miller, 1966; Vachaud and Thony, 1971)。また平衡状態や定常流では成り立つが、非定常流では成り立たないという指摘もある (Topp, 1971a)。これらのことは、領域分布関数が間隙の幾何学的特性以外のさまざまな条件 (完全飽和を起点とするか毛管飽和を起点とするか、定常流れか非定常流れか、空気浸入値や水浸入値が明確に定義できるかなど) によって変化しうること、つまり領域が従属的であることを示唆している。そこで領域分布関数をもつ条件依存性を考慮することによって、独立領域理論に汎用性を持たせようとする試み (従属領域理論) が行われるようになった。従属領域理論に関する一連の取り組みをまとめると以下ようになる。

(1) Topp (1971b) は、間隙どうしの相互作用を考慮することによって、飽和近くでの空気浸入阻害と乾燥域での水浸入阻害を表現できる理論を提案した。

(2) Poulovassilis and Childs (1971), Poulovassilis and El-Ghamry (1978) も領域の非独立性に着目して領域理論を一般化しようとしたが、この試みはキャリブレーションのために多くのデータを必要とすること (Jaynes, 1990) や理論の難解さ (Iwata *et al.*, 1995) のために普及しなかった。

(3) Mualem (1974) は、 ϕ_w と ϕ_d が $\phi_w > \phi_d$ なる条件を満たす場合にのみ領域が存在しうるとする前提を無視すること (すなわち $\phi_w = \phi_d$ のもとでも領域の存在を認めること) によって、可逆的領域を考慮した従属領域理論を提唱し、Mualem の相似仮説を組み合わせることによって、より少ないデータから実験結果を説明する方法を提案した (モデル II と呼ばれる)。

(4) Mualem and Dagan (1975), Mualem (1976b) は、Mualem のモデル II を一般化して、より簡易な計算手順を確立した。これらの理論は、空気浸入阻害が著しい土壌に対してはよい結果をもたらした。

(5) Mualem and Dagan (1975), Mualem (1977, 1984), Mualem and Miller (1979) は、領域理論の相似取扱いを修正して、間隙の非独立性を説明しようとした。その結果完成した修正従属領域モデル MODD (Mualem, 1984) は、主吸・脱水曲線のみから飽和付近の脱水走査曲線を正確に予測するという点で、Mualem のモデル II 以来著しい改善をみせた (Jaynes, 1990)。

これらの研究を総合すると、独立領域理論に代わって従属領域理論が必要となった背景として、(1) 領域の非独立性、すなわち多数の間隙が複雑に連結し合うと水や空

気の出入りが隣りの間隙に制限され、領域が瞬間的に水や空気で満たされなくなることに加えて、(2) 可逆的領域の存在、すなわち間隙の内部には $\phi \rightarrow \phi + d\phi$ なる変化で $d\theta$ の水を吸収 (あるいは放出) し、かつ $\phi + d\phi \rightarrow \phi$ なる変化で同量の $d\theta$ を放出 (あるいは吸収) する領域が存在しており (このことは、前述したように、 $\phi_w = \phi_d$ なる条件のもとで領域が存在することと同義である)、間隙内のすべての空間が常に満水か空の状態を二者択一しているわけではないこと (Iwata *et al.*, 1995) が重要であることがわかる。

独立領域理論が現象を十分に説明できない理由として、ジャンプ遷移の条件が満たされていないことを挙げる点では (1) も (2) も同じ立場であるが、その原因を間隙どうしの繋がり具合に求めるか、それとも間隙内の可逆的領域の存在に求めるのが異なっている。後者は従属領域理論の一連の展開のなかで提起された問題ではあるが、本質的には領域の非独立性とは異なる次元の問題とも考えられ、水浸入阻害や空気浸入阻害が生じにくい土壌 (あるいは水分条件) であれば、独立領域理論に可逆的領域を加味するだけでヒステリシスを表現できる可能性がある。

2) 主曲線内挿モデル

このモデルは、吸・脱水のある段階の θ が、直前の脱水 \rightarrow 吸水または吸水 \rightarrow 脱水転換ポテンシャルに対応する θ の主吸・脱水曲線間配分比率、および主曲線への接近速さに関するパラメータによって決まるとするもので、その代表的なものに Dane and Wierenga (1975) のモデルがある。

3) 直線近似モデル

このモデルは Hanks *et al.* (1969) によって提案され、Bresler *et al.* (1969), Bresler and Hanks (1969) によって利用された。このモデルは、任意の走査曲線を、主吸・脱水曲線のあいだに引かれた直線によって近似するもので、直線の傾き (水分容量, $d\theta/d\phi$) は主吸・脱水曲線の形と吸・脱水転換ポテンシャルから計算される (Jaynes, 1985)。また Hasegawa *et al.* (1993) が用いた方法は、直線の求め方は異なるものの、最も簡易な計算手続きによって走査曲線を近似しようとした点で、Bresler *et al.* (1969) のモデルと共通している。

4) パラメータスケーリングモデル

このモデルは、主吸・脱水曲線を、経験パラメータを含む適当な関数で表現しておき、その中のパラメータをスケーリングすることによって、主吸・脱水曲線と類似したふるまいをする任意の走査曲線を求めようとするものである。走査曲線の基礎となる関数形としては、Klute and Heerman (1974), Perrens and Watson

(1977)らが用いた方程式とその改良型 (Gillham *et al.*, 1976, 1979; Pickens and Gillham, 1980), Hoa *et al.* (1977)の方程式などがある。この手法による最も完成したモデルは, Kool and Parker (1987)によって提出された。彼らのモデルは, 主吸・脱水曲線を表わす関数形として Van Genuchten (1980)の式を採用し, その中に出てくる4つのパラメータのうちひとつをスケールリングすることによって, 任意の走査曲線を表している。この方法は粟生田・吉田 (1995)の研究にも応用され, よい成果を収めた。

6. 定量モデルの性能比較

前章で紹介した4つの定量モデル (領域モデル, 主曲線内挿モデル, 直線近似モデル, パラメータスケールリングモデル)を土壌中の水移動解析に適用するにあたっては, それぞれのモデルがどのような特性をもち, どのような目的に適しているのかを検討しておく必要がある。この問題について, Jaynes (1990)は興味ある報告を行っている。彼の研究によると, 定量モデルの能力は, (1)1次走査曲線の予測精度, (2) ϕ の周期変動に対する θ の安定性, (3)有限差分法への適用性の3つの点から整理される。以下にその概要を述べる。なおここでは, 一連の領域モデルの代表として, Mualem (1984)の修正従属領域モデルが使われているが, 以下では簡単に“領域モデル”と呼ぶことにする。

1) 1次走査曲線の予測精度

これは, 主吸・脱水曲線から, それぞれ3ないし4本の1次脱・吸水走査曲線を予測する能力を比較するもので, 具体的には, Gillham *et al.* (1976)が測定した細砂の水分保持特性データをもとに, 1次吸・脱水走査曲線の計算値と実測値の比較が行われた。その結果, どのモデルも実測値をおおむね再現できることが確認されたが, その精度は ϕ によって異なっており, 低 ϕ 領域 ($-30\text{ cm H}_2\text{O}$ 以下)では主曲線内挿モデルと直線近似モデルが, 高 ϕ 領域 ($-30\text{ cm H}_2\text{O}$ 以上)では領域モデルとパラメータスケールリングモデルが優れていることが明らかにされた (図-3, 1次吸水走査曲線は省略)。

2) ϕ の周期変動に対する θ の安定性

これは (ϕ, θ) = ($-36\text{ cm H}_2\text{O}, 17\%$)を起点とする1次吸水走査曲線が, $\phi = -36\text{ cm H}_2\text{O}$ と $\phi = -25\text{ cm H}_2\text{O}$ のあいだを3往復したときに描く軌跡を比較したもので, 乾湿の繰り返しが θ の計算値に与える影響を調べようとしたものである。その結果, 領域モデルと直線近似モデルでは, $-25\text{ cm H}_2\text{O}$ で折り返したあとの脱水曲線の終点が, 主脱水曲線上の起点 ($-36\text{ cm H}_2\text{O}, 17\%$)と

必ず一致するのに対し, 主曲線内挿モデルとパラメータスケールリングモデルでは, 終点の θ が起点の θ より低くなる現象が認められた (くみ出し効果, 図-4)。このようなくみ出し効果は, 実際の土壌では観察されない現象であり, 明らかに事実とは異なるふるまいである (Jaynes, 1990)。もし主曲線内挿モデルやパラメータスケールリングモデルを, 主吸・脱水曲線のあいだで吸・脱水を頻繁に繰り返す土壌に適用した場合, θ の値を過小に評価するおそれがある。

3) 有限差分法への適用性

これは, 4つの定量モデルを1次元リチャーズ方程式の有限差分法に組み込んで, 実際に水移動シミュレーションを行い, Shen and Jaynes (1988)による砂柱カラムの実験結果と比較したものである。その結果, 浸潤 (30分間)→再分配 (15分間)後の θ の計算値は, どのモデルも実測 θ とよく一致した。また浸潤-再分配を5回繰り返したときの ϕ, θ の計算結果を比べても, どのモデルもほぼ同様な結果を与えており, 実測値との一致もおおむね良好であった (Jaynes, 1990)。主曲線内挿モデルとパラメータスケールリングモデルではくみ出し効果の影響が予想されたが, 実際にはその影響は現れなかった。これは, 浸潤-再分配周期における ϕ の変動幅が大きかったため, 走査曲線の折り返し点が主吸・脱水曲線に十分近づいたことによる (Jaynes, 1990)。

7. 現地適用にあたって定量モデルが具備すべき要件

前章をまとめると, 現地土層中のヒステリシスを評価するために必要なモデルの条件とは, (1)走査曲線の軌跡をよく再現し, (2)計算手続きが簡単で, (3)記憶容量が節約でき, (4)小刻みな吸・脱水の繰り返しによるくみ出し効果がなく, (5)流れの数値解析に組み込んで妥当な結果が得られることの5点である (Jaynes, 1990)。表-1は, これらの観点から, それぞれのモデルの長所と短所を整理したものである。この表から明らかなように, すべての要件を十分満足するモデルは存在しない。したがって, 取り扱う現象やその性質に合わせてモデルを選ぶことが肝要になる。現地土層中への適用を考えた場合, われわれが最も重視しなければならないのは, 土壌が降雨, 蒸発散, 内部排水, 地下水位変動などによって乾湿を繰り返すたびに, ϕ が小刻みかつ周期的に変動するという点である。このような条件のもとで高精度かつ安定した θ の予測値を得るためには, くみ出し効果の影響はぜひとも避けなければならない。また, 土壌中の水フラックスが K に強く支配されていることを考えると, K が最も上昇したとき (すなわち高 ϕ 領域)の水フラックスの予

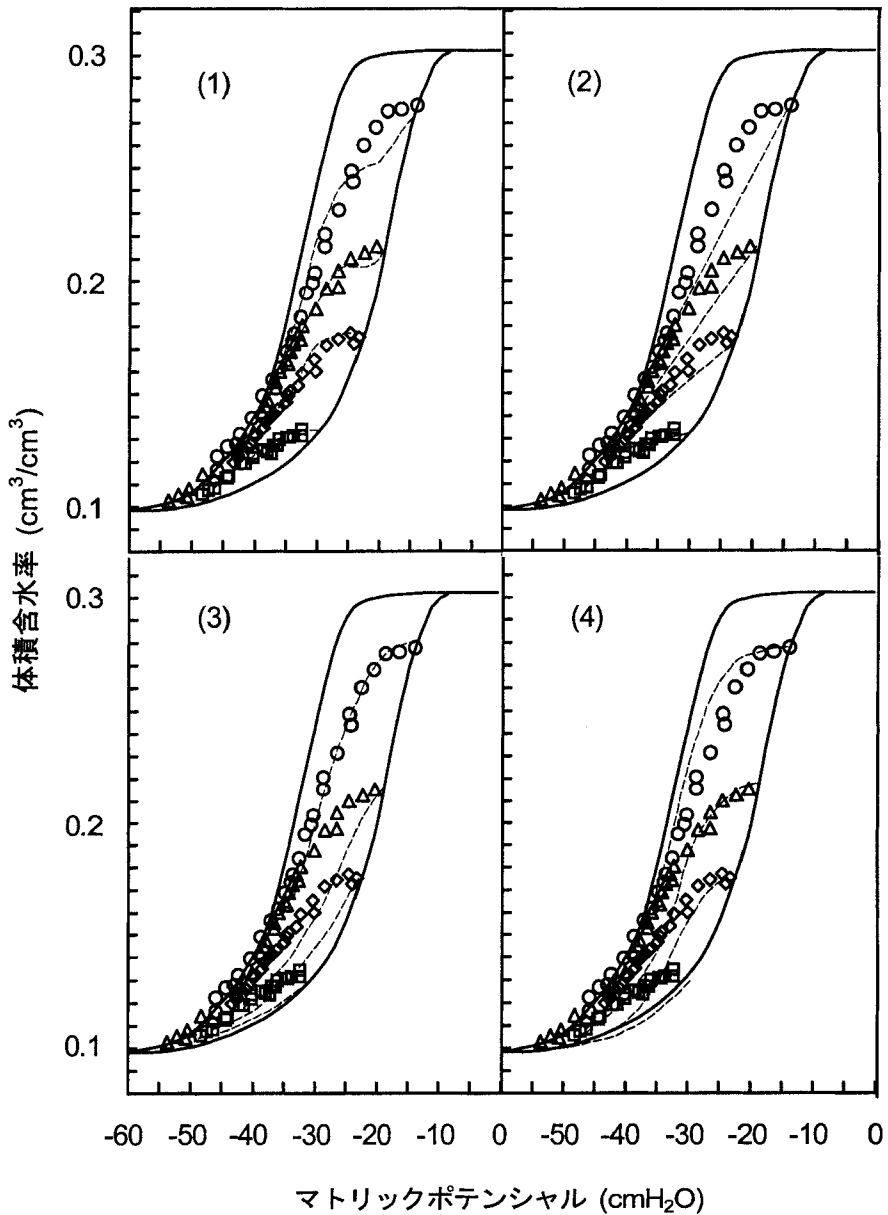


図-3 1次脱水走査曲線の実測値（点）と(1)主曲線内挿モデル, (2)直線近似モデル, (3)領域モデル, (4)パラメータスケールモデルによる計算値（破線）の比較 (Jaynes, 1990 より)

測精度を確保することも重要である。

以上のことから、現地土層に適用する定量モデルとしては、くみ出し効果の抑制および高 ϕ 領域での走査曲線の予測精度に優れた領域モデルが最も妥当であると判断される。またこのモデルは、ヒステリシス現象を、間隙内部への水や空気の出入り特性と関係づけて定量化しようとする点で、他の定量モデルとは異なる背景をもって

おり、ヒステリシスを間隙特性や土粒子の界面特性と関連づけるモデルとしても活用できる。ただし、本モデルを実際に運用するためには、計算手続きの複雑さと記憶容量の消耗という問題を解決しなければならない (Jaynes, 1990)。とくに記憶容量の問題は、高次の走査曲線を計算するたびに、それまで経過してきたすべての吸・脱水折り返し点の ϕ , θ を必要とするため、本モデ

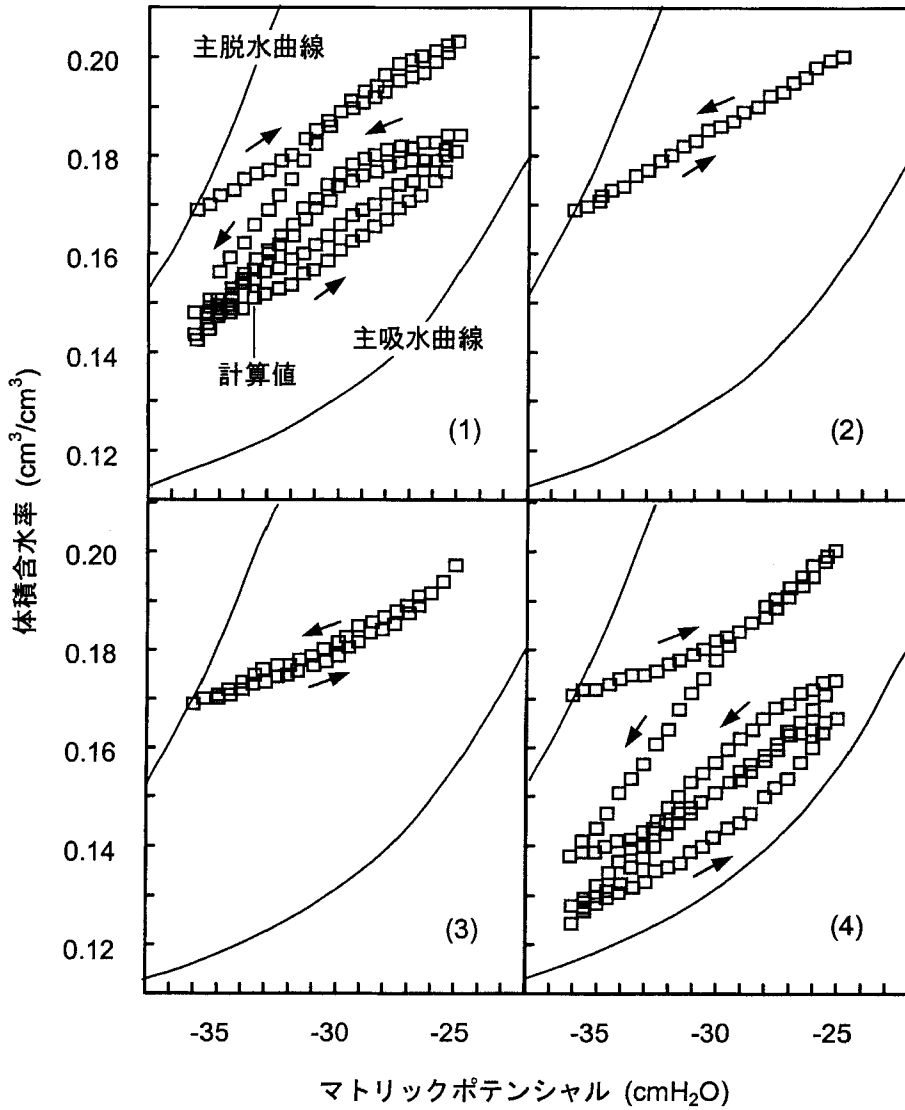


図-4 (1)主曲線内挿モデル, (2)直線近似モデル, (3)領域モデル, (4)パラメータスケールングモデルにおけるくみ出し効果 (Jaynes, 1990 より)

表-1 定量モデルにおける長所と短所の比較

	走査曲線		計算手続き	記憶容量	くみ出し効果	数値解析への適用
	高φ領域	低φ領域				
修正従属領域モデル	○	×	×	×	○	○
主曲線内挿モデル	×	○	△	○	×	○
直線近似モデル	×	△	○	○	○	○
パラメータスケールングモデル	△	△	○	○	×	○

○, 有利; △, 中間; ×, 不利

ルの実用的価値を著しく阻害する要因となっている。領域モデルを長期モニタリングなどに活用するためには、記憶容量を節約するアルゴリズムの開発が不可欠になるだろう。

一方パラメータスケールリングモデルは、計算処理が簡素であることや記憶容量が小さくてすむことなど、領域モデルにはない長所を有しており(表1)、高 ϕ 領域での走査曲線の予測精度もある程度確保されているなど、実用モデルとしての存在価値は高い。ただし、 θ の“くみ出し効果”が生じる場合には、それが水移動の解析に誤差を与えない範囲でモデルを利用するか、あるいはくみ出し効果を抑制するための何らかのアルゴリズムをモデルに付け加える必要がある。このことは、吸水と脱水を交互に繰り返す現地土層ではとくに注意しなければならない点である。

8. おわりに

これまでの水移動研究が、ヒステリシスの影響をとくに考慮しなくても一定の成果を収めてきたのは、吸水過程あるいは脱水過程のどちらか一方しか関わらないような現象(あるいは条件)を設定していたためと考えられる。また、ヒステリシス現象の解明を目的とした研究でも、実験規模や測定精度、計算処理の簡略さなどの理由から、室内カラム試験を中心に行われたものが多く、その成果を現地圃場に適用した例は少なかった。

しかし、ヒステリシス現象が水移動におよぼす影響の度合いは、間隙組成や土粒子の界面特性など、土壌本来の性質に加え、降雨、蒸発散、地下水位など、土壌を取り巻く環境に支配されて多様に変化するとみられることから、ヒステリシスが水移動におよぼす影響を立地環境とのかねあいで検討する必要がある。また近年、圃場スケールあるいは流域スケールで物質移動現象をとらえる視点が重要になってきており、現地土層中の硝酸態窒素などの動態を評価するうえでも、ヒステリシス現象を正しく位置づける必要がある。

今後は、土壌水理特性の面的評価法の開発や土壌構造の不均一性によるバイパス流の解明などとあわせて、現地土層中におけるヒステリシス現象の機能・役割の解明、ならびに長期モニタリングに耐えうる新たな定量モデルの開発が望まれるところである。

謝 辞

本報をまとめるにあたりご指導、ご助言をいただいた農業環境技術研究所の長谷川周一氏、同土壌物理研究室の加藤英孝氏、農業工学研究所土壌物理セミナーの皆様様に深く感謝の意を表す。

引用文献

- 粟生田忠雄・吉田昭治(1995): ヒステリシスを考慮した土壌-植物-大気連続系の土壌水分動態モデル, 水文・水資源学会誌, **8** (3): 322~334.
- 粟生田忠雄・吉田昭治・中野俊郎・山田秋夫(1992): ヒステリシスを考慮した砂質土への降雨浸潤の基礎的研究-下方境界に地下水面がある場合-, 農土論集, **157**: 35~44.
- Aylmore, L.A.G. and Quirk, J.P. (1959): Swelling of clay-water system. *Nature*, **183**: 1752~1753.
- Beese, F. and van der Ploeg, R.R. (1976): Influence of hysteresis on moisture flow in an undisturbed soil monolith. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **40**: 480~484.
- Bresler, E. and Hanks, R.J. (1969): Numerical method for estimating simultaneous flow of water and salt in unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **33**: 827~832.
- Bresler, E., Kemper, W.D. and Hanks, R.J. (1969): Infiltration, redistribution, and subsequent evaporation of water from soil as affected by wetting rate and hysteresis. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **33**: 832~840.
- Brock, R.R. and Amar, A.C. (1974): Ground-water recharge strip basin-experiments. *J. Hydraul. Div., ASCE*, **100**: 569~592.
- Curtis, A.A. and Watson, K.K. (1984): Hysteresis-affected water movement in scale-heterogeneous profiles. *Water Resour. Res.*, **20**: 719~726.
- Dane, J.H. and Wierenga, P.J. (1975): Effect of hysteresis on the prediction of infiltration, redistribution and drainage of water in a layered soil. *J. Hydrol.*, **25**: 229~242.
- DeBano, L.F., Dunn, P.H. and Conrad, C.E. (1977): Fire's effect on physical and chemical properties of chaparral soil. *Proc. Symp. Environ. Consequences Fire Fuel Manage. Medit. Ecosyst., U. S. For. Ser. Gen. Tech. Report WO-3*, p. 65~74.
- Everett, D.H. (1954): A general approach to hysteresis: 3. A formal treatment of the independent domain model of hysteresis. *Trans. Faraday Soc.*, **50**: 1077~1096.
- Everett, D.H. (1955): A general approach to hysteresis: 4. An alternative formation of the domain model. *Trans. Faraday Soc.*, **51**: 1551~1557.
- Everett, D.H. and Smith, F.W. (1954): A general ap-

- proach to hysteresis : 2. *Trans. Faraday Soc.*, **50** : 187~197.
- Everett, D.H. and Whitton, W.I. (1952) : A general approach to hysteresis : 1. *Trans. Faraday Soc.*, **48** : 749~752.
- Gillham, R.W., Klute, A. and Heerman, D.F. (1976) : Hydraulic properties of a porous medium : measurement and empirical representation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **40** : 203~207.
- Gillham, R.W., Klute, A. and Heerman, D.F. (1979) : Measurement and numerical simulation of hysteretic flow in a heterogeneous porous medium. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **43** : 1061~1067.
- Haines, W.B. (1930) : Studies in the physical properties of soils, 5. The hysteresis effect in capillary properties and the models of moisture distribution associated therewith. *J. Agric. Sci.*, **20** : 97~116.
- Hanks, R.J., Klute, A. and Bresler, E. (1969) : A numerical method for estimating infiltration, redistribution, drainage, and evaporation of water from soil. *Water Resour. Res.*, **5** : 1064~1069.
- Hasegawa, S., Osozawa, S. and Ueno, H. (1993) : Measurement of soil water flux in andisols at a depth below a root zone of about 1 meter. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **40** (1) : 137~147.
- Hillel, D. (1977) : Isothermal evaporation of soil water under fluctuating evaporativity, including the role of hysteresis, *Computer Simulations of Soil-Water Dynamics, A Compendium of Recent Work*, International Development Research Center, Ottawa. p. 35~60.
- Hillel, D. (1980) : Hysteresis, Soil water : content and potential, *Fundamentals of soil physics*. p. 152~155, Academic Press, New York.
- Hillel, D. and Mottes, J. (1966) : Effect of plate impedance, wetting method and aging on soil moisture retention. *Soil Sci.*, **102** : 135~140.
- Ho, N.T., Gaudu, R. and Thirriot, C. (1977) : Influence of the hysteresis effect on transient flows in saturated-unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, **13** : 992~996.
- Homes, J.W. (1955) : Water sorption and swelling of clay blocks. *J. Soil Sci.*, **6** : 200~208.
- Ibrahim, H.A. and Brutsaert, W. (1968) : Intermittent infiltration into soils with hysteresis. *J. Hydraul. Div., Proc. Amer. Soc. Civil Eng.*, HY1 : 113~137.
- Iwata, S., Tabuchi, T. and Warkentin, B.P. (1995) : Hysteresis in soil water phenomena, *Soil-water interactions*. p. 39~68.
- Jaynes, D.B. (1985) : Comparison of soil-water hysteresis models. *J. Hydrology*, **75** : 287~299.
- Jaynes, D.B. (1990) : Soil water hysteresis : models and implications. *Process studies in hillslope hydrology*. p. 93~126.
- Jones, M.J. and Watson, K.K. (1987) : Effect of soil water hysteresis on solute movement during intermittent leaching. *Water Resour. Res.*, **23** : 1251~1256.
- Jury, W.A., Gardner, W.R. and Gardner, W.H. (1991) : Hysteresis in water content-energy relationships, *Soil physics*. p. 65~68, John Wiley and Sons, New York.
- 加藤英孝 (1984) : 土壌水分のヒステリシス現象, *土壌の物理性*, **50** : 46~51.
- Klute, A. and Heerman, D.F. (1974) : Soil water profile development under a periodic boundary condition. *Soil Sci.*, **117** : 265~271.
- 小林政広・小野寺真一・加藤正樹 (1996) : 撥水性が森林土壌の水分特性曲線に与える影響, *水文・水資源学会誌*, **9** (1) : 88~91.
- Kool, J.B. and Parker, J.C. (1987) : Development and evaluation of closed-form expressions for hysteretic soil hydraulic properties. *Water Resour. Res.*, **23** : 105~114.
- Martinez, J. (1975) : Subsurface flow from snowmelt traced by tritium. *Water Resour. Res.*, **11** : 496~498.
- Miller, E.E. and Miller, R.D. (1955 a) : Theory of capillary flow : 1. Practical implications. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **19** : 267~271.
- Miller, E.E. and Miller, R.D. (1955 b) : Theory of capillary flow : 2. Experimental information. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **19** : 271~275.
- Miller, E.E. and Miller, R.D. (1956) : Physical theory for capillary flow phenomena. *J. Appl. Phys.*, **27** : 324~332.
- Morrow, N.R. and Harris, C.C. (1965) : Capillary equilibrium in porous materials. *Soc. Pet. Eng. J.*, **5** : 12~14.
- Mualem, Y. (1973) : Modified Approach to Capillary Hysteresis Based on a Similarity Hypothesis.

- Water Resour. Res., **9** : 1324~1331.
- Mualem, Y. (1974) : A conceptual model of hysteresis. Water Resour. Res., **10** : 514~520.
- Mualem, Y. (1976b) : Hysteretical models for prediction of the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res., **12** : 1248~1254.
- Mualem, Y. (1977) : Extension of the similarity hypothesis used for modeling the soil water characteristics. Water Resour. Res., **13** : 773~780.
- Mualem, Y. (1984) : A modified dependent-domain theory of hysteresis. Soil Sci., **137** : 283~291.
- Mualem, Y. and Dagan, G. (1975) : A dependent domain model of capillary hysteresis. Water Resour. Res., **11** : 452~460.
- Mualem, Y. and Miller, E.E. (1979) : A hysteresis model based on an explicit domain-dependence function. Soil Sci. Soc. Am. J., **43** : 1067~1073.
- 仲谷紀男 (1981) : 有機物が関与する土壌の水分特性について, 農技研報告, B32, 1~74.
- Neel, L. (1942) : Theories des lois d'aimantation de Lord Rayleigh : 1. Cah. Phys., **12** : 1~20.
- Neel, L. (1943) : Theories des lois d'aimantation de Lord Rayleigh : 2. Cah. Phys., **13** : 19~30.
- Nieber, J.L. and Walter, M.F. (1981) : Two-dimensional soil moisture flow in a sloping rectangular region : experimental and numerical studies. Water Resour. Res., **17** : 1722~1730.
- Perrens, S.J. and Watson, K.K. (1977) : Numerical analysis of two-dimensional infiltration and redistribution. Water Resour. Res., **13** : 781~790.
- Philip, J.R. (1964) : Similarity hypothesis for capillary hysteresis in porous materials. J. Geophys. Res., **69** : 1553~1562.
- Pickens, J.F. and Gillham, R.W. (1980) : Finite element analysis of solute transport under hysteretic unsaturated flow conditions. Water Resour. Res., **16** : 1071~1078.
- Poulovassilis, A. (1962) : Hysteresis of pore water, an application of the concept of independent domains. Soil Sci., **93** : 405~412.
- Poulovassilis, A. (1970) : The hysteresis of pore water in granular porous bodies. Soil Sci., **109** : 5~12.
- Poulovassilis, A. and Childs, E.C. (1971) : The hysteresis of pore water : the nonindependence of domains. Soil Sci., **112** : 301~312.
- Poulovassilis, A. and El-Ghamry, W.M. (1978) : The dependent domain theory applied to scanning curves of any order in hysteresis soil water relationships. Soil Sci., **126** : 1~8.
- Poulovassilis, A. and Tzimas, E. (1974) : The hysteresis in the relationship between hydraulic conductivity and suction. Soil Sci., **117** : 250~256.
- Preisach, F. (1935) : Uber die magnetische Nachwirkung. Z. Phys., **94** : 277~302.
- Royer, J. M. and Vachaud, G. (1975) : Field determination of hysteresis in soil water characteristics. Soil Sci. Soc. Am. Proc., **39** : 221~223.
- Russo, D., Jury, W.A. and Butters, G.L. (1989) : Numerical analysis of solute transport during transient irrigation. I. Effect of hysteresis and profile heterogeneity. Water Resour. Res., **25** : 2109~2118.
- Shen, R. and Jaynes, D.B. (1988) : Effect of soil water hysteresis on simulation infiltrated and redistribution of water in a soil column. J. Hydraul. Eng., **10** : 11~20.
- Staple, W.J. (1966) : Infiltration and redistribution of water in vertical columns of loam soil. Soil Sci. Soc. Am. Proc., **30** : 553~558.
- Stauffer, F. and Dracos, T. (1986) : Experimental and numerical study of water and solute infiltration in layered porous media. J. Hydrol., **84** : 9~34.
- Stauffer, F., Franke, H.J. and Dracos, T. (1992) : Hysteretic storativity concept for aquifer simulation. Water Resour. Res., **28** : 2307~2314.
- Talsma, T. (1970) : Hysteresis in two sands and the independent domain model. Water Resour. Res., **6** : 964~970.
- Tzimas, E. (1979) : The measurement of soil water hysteretic relationships on a soil monolith. J. Soil Sci., **30** : 529~534.
- Topp, G.C. (1969) : Soil water hysteresis measured in a sandy loam and compared with the hysteresis domain model. Soil Sci. Soc. Am. Proc., **33** : 645~651.
- Topp, G.C. (1971a) : Soil water hysteresis in silt loam and clay loam soils. Water Resour. Res., **7** : 914~920.
- Topp, G.C. (1971b) : Soil water hysteresis : the domain model theory extended to pore interaction conditions, Soil Sci. Soc. Am. Proc., **35** : 219~225.
- Topp, G.C. and Miller, E.E. (1966) : Hysteresis mois-

- ture characteristics and hydraulic conductivities for glass-bead media. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **30** : 156~162.
- Vachaud, G. and Thony, J.L. (1971) : Hysteresis during infiltration and redistribution in a soil column at different initial water contents. *Water Resour. Res.*, **7** : 111~127.
- Van Genuchten, M. Th. (1980) : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **44** : 892~898.
- Watson, K.K. (1986) : Numerical analysis of natural recharge to an unconfined aquifer. *Conjunctive Water Use (Proc. Budapest Symposium, July 1986)*, IAHS, **156** : 323~333.
- Watson, K.K., Reginato, R.J. and Jackson, R.D. (1975) : Soil water hysteresis in a field soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **39** : 242~246.
- Watson, K.K. and Sardana, V. (1987) : Numerical study of the effect of hysteresis on post-infiltration redistribution. *Proc. Intern. Conf. on Infiltration Development and Application*, Water Resour. Center, Honolulu, HI, 241~250.
- 吉田止則 (1999) : 土壌浸透水調査法 (フラックス法), 水環境保全のための農業環境モニタリングマニュアル, 農業環境技術研究所, IV-2, 1~6.

受稿年月日 : 2000年 6月 27日
 受理年月日 : 2000年 8月 29日