

業土木、土木工学の方々は今でも一番密接な関係にある。たとえ改良の目的が異つていても取扱う対象は共通しているし、時には研究の方法も同様なものが多いものである。のみならず今日では化学と物理の境界さえ危くなつているので、化学分野の方々も参加していただきたいものである。こうした広い範囲での討議がなされる日を、1日も早かれと祈つている。

論 説

土 壌 水 分 の 問 題 点

福 田 仁 志 (東大農)⁽¹⁾

土壌水分の物理的な面を扱うとして、その方向を2つに分けて

1. 水分量の測定に関するもの
2. 水のエネルギーに関するもの

としよう。

1. 水分量の測定には規準的な熟乾法(土の重量又は容積比)から、毛管張力(テンシオメーター等)、電気抵抗(石膏ブロック、ナイロン、ファイバークラス等)が常用されて一応、それぞれの測定目的を達している。しかし1ヶ所からの試料の採集も数個の値が平均値からの較差10%以内になつて、信頼度95%位を期待するのはよいとして、上記の方法中、後の2法特に毛管張力を用いるものには、所謂水分ヒステリシスが存在し、毛管張力の一つの値から得られる水分は、乾きつつある時には、湿りつつある時よりも大きく出る。しかもこの2つの状態の土の間には水の移動は認められない。水分ヒステリシスは水の移動条件がエネルギー勾配の存在であつて水分勾配の存在で無い事を示す一例である。水分の利用目的によつて、この水分ヒステリシスを無視するか或いは水分変化の方向を区別している。普通、実験室内及び圃場では乾きつつある状態が考慮され又重視されている訳であるが、単に水分量を求めるだけでなく、水分の運動を扱うにも可成りの厄介物である。水分ヒステリシスの生成機構の解明とまでは行かなくとも、その影響の処理法に合理性を見出すべきであろう。

次に比較的新しい中性子の方法では、土中のある範囲に在る水素原子の全量を、それが存在する状態、固体・液体・気体の如何に拘らず又温度、塩類等に無関係に、測定できる点に魅力がある。しかし、給源(ラジウムDとベリウムの混合体等)から放射される α 粒子が途中の水素原子に衝突して β 線中性子になつて計数器に捕えられる、そ

の水素原子の量と計数器の読みとの関係を利用するものであるから、ある範囲の平均水分量が得られる訳で他の方法の様に狭い地点の水分量というわけには行かない。尤も、地表近くの水分測定、又は棒状に造られて比較的深い処まで平均水分測定の出来る計器等が出てはいるが、なお、測定範囲の縮小が今後の研究課題といえる。

2. 水のエネルギー勾配は主に土中水の運動に関係をもつ。従来、飽水土、不飽水土について極めて多くの種類の実験がなされた。しかしそこに得られた各種の現象を包含し、首尾一貫した概念を組織化することが欠けている。尤もこれらの現象の個々については、例えば土の実験的特性として圃場容水量、萎凋点等というようにそれ自身としての説明を与えてはいる。しかもこれらの概念の有用性は認められるが時に過大評価される危険も見られる。これらは実用上の必要から生れたもので概略の値を与えるものであり、しかも実験的に見出された相関の事実を利用している。例えば水分当量又は1/3気圧の張力を求めて圃場容水量とし、15気圧張力を測つて萎凋点とするが如きである。これらの現象を物理的な概念で裏付けすることが必要であり、近年は飽水、不飽水状態で各種の条件下で起つてくる水の運動について数理的な解析研究が進められている。しかも飽水土の透水性は理論的にも随分沢山研究されているが、これはかんがい問題の一部を意味するにすぎず、水田かんがいに適合しても、畑かんがいには適用されない。また排水問題としてもその一部を意味するに止まり、地下水の流動には役立つも地下水面上の処には適用されない。

さて、問題点を整備して次の様にする。

	備 考
(1) 不飽和透水係数と負圧について	
(2) 飽水状態	<ul style="list-style-type: none"> a 定 常 b 非 定 常 圧水水頭 (正) 飽和透水係数
(3) 不飽水状態	<ul style="list-style-type: none"> a 地表だけ飽水か、 一定水分にある状態 b 地表の土中水分が自由に減少 する状態 <ul style="list-style-type: none"> a' 定 常 a'' 非定常 非定常 圧水水頭 (負) (水分の函数) 不飽和透水係数 (水分の函数)

(1) 不飽和透水係数と負圧について

飽水、不飽水の何れの状態でも一般の水理学で扱われるような

$$\text{全水頭} = \text{圧力水頭} + \text{位置水頭} + \text{速度水頭}$$

が成立つ。土中での速度水頭は無視される程に小さい。圧力水頭は1気圧を基準にとる土中の水で飽和された地下水面以下の部分に限つて正値であり、地下水面以上では負値土中水分の函数である。飽水、不飽水ともに水の流れは全水頭勾配 (hydraulic gradient) に比例するというDarcy法則:

$$dq / dt = -K A \partial \phi / \partial x \text{ -----(1)}$$

が成立つ。 dq / dt はx方向に直角な面積Aを通る流量、 $\partial \phi / \partial x$ は全水頭勾配、 K は土の透水係数である。周知のように、飽和では K は一定であるが不飽和では土中水分の函数となる。 ϕ には負値の圧力水頭 (単位のとり方で負圧、毛管ポテンシャル、毛管力、水分張力、水分吸引力とも呼ぶ) が含まれこれが水分の函数となり、さらにヒステシスを具えている。

ϕ 、 K の実験的測定はこれをアメリカ加州のRichardson¹⁾ が1931年に行つて以来、色々便利な技法が現われた。水分が減れば ϕ は急増し K は急減することも広く知られている。

一方 K を理論的に解析する努力が続けられて来て、飽和状態で得ているKozenyの式

$$K = B f^3 / [S(1-f)]^2 \text{ -----(2)}$$

の流儀に倣つて不飽和状態では

$$K = (B' / F) (1 / S')^2 \text{ -----(3)}$$

の形が生れた。³⁾ B は粒経と水筋の迂曲度による係数、 f は空隙率、 S は粒子の比表面積で B' は粒形による係数、 $F = \rho / \rho_b$ で空隙の形による。 ρ は水で飽和された土電気抵抗、 ρ_b は水自体の電気抵抗である。 S' は水で充された空隙の比表面積である。しかし(2)、(3)式は何れも一様な半径をもつ毛管の集合体を仮定しているので空隙の長さの変化の多い実在の土には不向である上に、変動しやすい実験的係数を含む難がある一応、実験と比較的良く合うということでその値が認められて来た訳である。

次にここ数年來、土粒子の性質を余り使わないで空隙の大きさをうい様とする努力がわれ統計的に処理して K を算出しようとする研究が目立つて来た。尤もこれらも未だ完とはいえないが英のChildsとCollis-George⁴⁾ の方法には実験的数一つ含まれ、しかもこれの選定には便宜的な判断が要するという不便がある。濠州

Marshall⁵⁾ は

$$K = \varepsilon^2 n^{-2} [r_1^2 + 3r_2^2 + 5r_3^2 + \dots + (2n-1)r_n^2] / 8 \text{ ----(4)}$$

を提案した。 ϵ は空隙率 (cm^3/cm^3)、 κ は透水係数 (cm^2) で、水筋に当る空隙の半径は $r_1 > r_2 > \dots > r_n$ の関係にある。彼は(4)式に

$$r = \sqrt{2T/\rho g h} \quad \text{----- (5)}$$

の関係から $r^2 = 2.25 \times 10^{-2} h^{-2}$ (20 °Cとして) を代入して

$$\kappa = 2.8 \times 10^{-3} \epsilon^2 n^{-2} [h_1^{-2} + 3h_2^{-2} + 5h_3^{-2} + \dots + (2n-1) h_n^{-2}] \quad (6)$$

を得た。 T は水の表面張力、 ρg は水の単位体積の重さ、 h は圧力水頭で圧膜装置又は吸引装置によつて実測される。 ϵ の大小が土中水分(容積比)を表わすので、(6)式から各水分に応じて κ が定まる。この κ は実験で得た値と良く一致する。圧力水頭、土中水分、透水空隙の半径の相互関係を利用してこの中、圧力水頭の実測値から κ を算出しようとする手法には大きな特徴が認められる。

以上の様に不飽和透水係数 κ を解析的と統計的の二つ方向から決定しようとする努力が続けられている訳であるが統計法にも一種のモデル風の考え方があり、圧力水頭を導入しての解析法の発展を期待したい。

(2) 飽水状態

(1)式に境界、初期の両条件を入れ、正の圧力水頭を用いて飽和透水係数を一定として解けば、定常、非定常について、時に数値解法によるとしても、一応完全な解が得られる場合が多い。特に定常 ($\partial \eta / \partial t = 0$) 状態においてそうである。熱伝導の式に類似しているが水の場合には重力水頭(位置水頭)の項が余分に加わる点において異なる。

(3) 不飽和水状態

Darcy法則と連続方程式とから一般的な偏微分方程式が得られ、これも一見、熱伝導の式に似ているが、伝導度に相応するものが水分 C の函数であることと、飽水状態の場合と同じく重力水頭を含む項が入つて来ることの2点で異なる。

不飽和水運動の式は

$$\partial C / \partial t = \partial / \partial x (D \cdot \partial C / \partial x) - \partial \kappa / \partial x \quad \text{----- (7)}$$

$$D = \kappa \partial P / \partial C + D \nabla a_p + D a d s \quad \text{----- (8)}$$

となり、ここで x (cm)は垂直上方に正の距離を考え、 P は負圧 (cm)である。水分 (cm^3/cm^3)が微小になると、不飽和透水係数 κ ($\text{cm}^2/\epsilon \theta c$) $\neq 0$ となり水蒸気移動の項 $D \nabla a_p$ 、また時には極めて微弱でその性格も不明確ながら吸着水の移動の項 $D a d s$ が考えられる。(7)式に初期境界の諸条件を考えれば種々の場合の微水文的問題が数学的に解析される。但し、 $P(C)$ 、 $\kappa(C)$ は実験的に決められるもので、一定の函数の形で求めら

れるとしても信頼度も少なく且つ複雑な形となつて数値解法に依らざるを得ない。数値解法に依る必要性がこの研究の一障害であり、現在その克服に努力が続けられている。

a) 土層の表面が常に飽水状態にあるか又は一定水分に保持されている状態で、地下水表面は地表下一定の深さに保たれ、雨水は一定の速さでこの水面に向つて降下し水分の変化がどこにも見られない、また逆に表面から一定の速さで蒸発が起り、それを補給すべく上向の水が存在して、水分の変化がどこにも見られない、この様な定常浸入、定常蒸発の解は得られている³⁾。かかる表面状態での浸入の非定常の解もまた得られている³⁾。

b) 水が地表に吸込まれてから後の土中水分の運動という非定常の解析は甚だ難しい。1954年にStapleとLehane⁷⁾とはヒステリシスと重力とを無視してこの解を得ようとしたがまだ成功しているとはいえない。Philipも数値解⁸⁾法を行い、ここにヒステリシスの影響を強調している訳である。次に裸地からの蒸発が初め飽水状態から起る問題についても数値解が得られた程度である。

以上土中水のエネルギー問題特に不飽和状態においては極めて簡単な条件の下で漸く数理的解法が得られている現状である。勿論これらの解法には負圧と不飽和透水係数との水分函数が基本になつているが、ここに負圧の水分函数に介入するヒステリシスが大きな障害をなしていることが明らかにされた。なおこの外将来の究明すべき問題としては、

1) 土中水分の運動の数理的解析には、等温の下で起るとする仮定が入つている。熱と水分の二つの場の同時解析に成功すること、

2) 土のコロイド膨張、土中水の電解質濃度が粘土の透水性に及ぼす影響などがある土という魔園から抜け出ようともせずに研究者達は涯しのない難路を一步一步と進んで行くことであろう。(34, 1, 25)

文 献

- 1) Richards, L.A.: Phys., 1, 318 (1931)
- 2) Kozeny, J.: Ber. Wien. Akad., 136A, 271 (1927)
- 3) Childs, E.C.: Sixieme Congres de la Science du Sol (1950)
- 4) Childs, E.C. and Collis-George, N.: Proc. Roy. Soc., A201, 392 (1950)
- 5) Marshall, J.J.: J. Soil Sci., 9, No.1 (1958)

- 6) Philip, J.R.: Soil Sci., 33, 5 (1957)
- 7) Staple, W.J. and Lehane, J.F.: Can. J. Agr. Sci., 34, 329 (1954)
- 8) Philip, J.R.: Soil Sci., 84, 2 (1957)

負圧浸透について

田淵俊雄（東大浸透ゼミナール）

負圧浸透についてとやかく論ずることは、今迄の多くの研究者たちの業績からだけでは到底できない。現在はまだ問題提起の段階にあるのが実状である。私自身もこの問題に首を突っこんでからわずか一年たらずで、実験資料もたいして持つておらず、文献もそれほど読んだわけではないので、負圧浸透についてはつきりした認識を持つまでには至っていない。しかし私たちの研究室で浸透ゼミナールを過去一年間続けてきた過程において、身につけた知識や考え方をもつてすれば、今後の浸透の研究に対してなんらかの示唆を与えることはできると思うので、つたない文章ながら浸透ゼミナールを代表して筆をとつた次第である。

このようなわけであるから、負圧浸透を取り扱う際には、特に次のことに注意する必要がある。すなわち、常に現実の浸透の様相について思考し推察することである。また最初の目的としては、問題点をさがし出す建前から、「正圧浸透と負圧浸透と分けて考える必要があるのかどうか、これ以外にもつと本質的に浸透を分類するものはないのかどうか」をはつきりさせることにする。

1. 用語

最初にこれから用いる基本的な術語について説明する。

浸潤：一般に infiltration といわれているもので、水が地表から浸入したとき始まり、浸透前線が終端に到達した時終了する。終端とは土柱の底や自由水面などである。浸透：浸潤後のいちおう定常になつた状態の浸透をさす。飽和浸透試験のように、浸潤を経ない浸透もある。また時には、浸潤をも含めた意味で、一般的な水の流れを総称する場合に用いる。飽和：土壌の空隙が水のみで占められていること。不飽和：空隙中に多少なりとも空気が存在する。その空気の状態は気泡であつても、開放状態であつても良いことにする。開放：空隙中の空気が大気と通じていること。閉鎖：空