

古典を読む

S. Takagi 著

「2 成層土壌を降下する水の流れの解析」

筑 紫 二 郎*

Reviewing classical studies in soil physics

“Analysis of the vertical downward flow of water through a two layered soil”

By S. Takagi

Soil Sci., 90 (2) : 98-103 (1960)

Jiro CHIKUSHI*

* Biotron Institute, Kyushu University, Hakozaki 6-10-1, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581, Japan

Key words : layered soil, unsaturated water flow, pressure profile, open system, closed system

1. ま え が き

表題の論文に出会ったのは、筆者が大学院時代に成層土壌における不飽和浸透に関する研究を手がけた頃であった。当時、成層浸透に関する研究文献は少なく、貴重であったことを記憶している。著者である Takagi の経歴は定かでない。日本人研究者でありながら、日本での活躍はほとんどなく、土壌中の浸透については本論文以外目立った論文は見当たらない。表題の論文は、日本ではさほど評価されているとは思えないが、欧米ではその論文を基に、成層土壌における水分移動への関心が高まった形跡がある。本稿では、Takagi (1960) 論文に焦点を当て、この論文が書かれた背景および論文発表後の研究の進展を概説することによって、論文の真価を浮き彫りにすることを試みる。

2. 背 景

1940 年から 1950 年代にかけて、日本では成層浸透の研究が一種のブームになった。水田には耕盤と呼ばれる密度の高い層が形成されており、水の浸透は成層土壌を考慮する必要があったからである。上層が細かく、下層が粗い土壌の系を扱った室内実験では、2 層の境界面を中心に不飽和浸透の領域が発生することが明らかにされていた (図-1)。図-1 において、とくに 2 層の境界から下方に伸びる部分は圧力がほぼ一定であるため一定負

圧域と呼ばれてきた。しかし、後述するようにこの部分を一定負圧域 (図-1a) と見なすか、厳密には一定負圧域でなく遷移域の一部 (図-1b) と見なすかで解析法が異なることになる。

山崎 (1958) は、上層が下層に比べて透水性が小さい 2 成層の湛水条件下の浸透で生じる不飽和浸透 (以下、このような条件下の流れを単に成層浸透と呼ぶことにする) の状況が層によって異なり、不飽和域内の空気が大気とは遮断された状態にある上層 (閉鎖系) と、大気と連結した状態にある下層 (開放系) とでは流れのメカニズムが異なることを見出した。富士岡 (1954) は、不飽和浸透流に対して Navier-Stokes の式で説明を試み、成層浸透で発生する圧力分布の説明に適用したが、その適用範囲は限られており、不飽和透水係数が負圧 (又は水分) の関数である概念は取り入れてないため、その説明は十分に説得を与えるものでなかった。

ここで、成層浸透における開放系と閉鎖系の違いについて述べておこう。成層浸透のカラム実験を行う場合、開放系ではカラムの壁に細かい孔を穿ち、その孔を通して外気が自由に出入りできるようにするので、カラム内の水圧は大気圧と平衡する。一方、閉鎖系では、これらの孔が無く、カラム内の水は外気と接することはできない。

日本の研究者は、系によって不飽和の発生原因が異なるため、それらの系の現象の違いを明確に区別してい

*九州大学生物環境調節センター 〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1

キーワード : 成層土壌, 不飽和浸透流, 圧力分布, 開放系, 閉鎖系

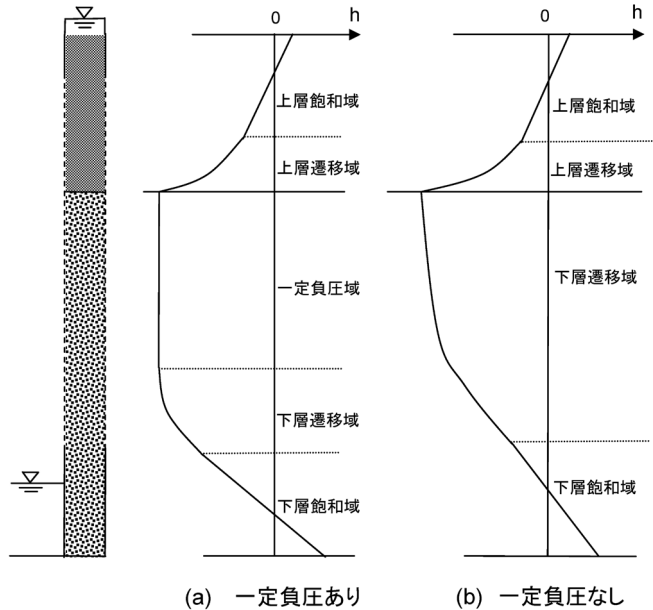


図-1 開放系における2成層の定常不飽和浸透の圧力分布

Fig. 1 Water pressure profiles in two-layered soil under steady flow of water in unsaturated condition in open system, (a) with and (b) without the constant pressure zone.

た。不飽和の発生は、開放系では土壤水の毛管圧の平衡によってもたらされたものであり、閉鎖系では主に浸透水中の溶存空気の析出によってできたものである。一方、欧米の研究者は閉鎖系の概念を当時でも現在でも持っていないため、彼らの研究は当初から開放系を前提としている。もちろん、Takagi 論文もこの前提に基づいて解析を進めている。

欧米でも、成層浸透に関する研究が日本とほとんど同時期に行われた。地下水涵養や下水処理などの状況において、土壤表面が長時間にわたり湛水に覆われることがあるという理由で、研究が進められている。そのきっかけとなる研究は Day and Luthin (1953) によるものである。彼らはカラムを使って2成層の浸透実験を行い、定常浸透のとき境界面を最大負圧とする圧力分布が生じ、それがダルシー式で説明できることを示した。しかし、この段階では負圧の発生は示しているものの、不飽和あるいは不飽和浸透についてまでは言及されていない。成層浸透の特質を明らかにし、解析的説明を与えた最初の研究者は Kisch (1959) である。その発表は、Takagi 論文発表のほんの1年前のことである。Kischの研究では、不飽和浸透の存在を認め、拡張されたダルシー式(不飽和透水係数と毛管水頭との関係)を用い、理論的解析を

進め、浸透の諸特性を明らかにするとともに、浸透に与える地下水位の影響や土の膨潤の影響についても論及している。

不飽和浸透について歴史をたどると、Buckingham の時代にまで遡らなければならない。その辺の事情については、Narasimhan (2005) に詳しいので、それに従って説明する。1822年フーリエが熱拡散モデル(熱流束が温度勾配に比例)を確立して以来、いろいろな分野でそのモデルのアナロジーとして物質移動式が開発された。代表的なものとして、電流の流れを表すオーム式や溶質の拡散を表すフィック式があるが、水分移動のダルシー式もそのひとつである。Buckingham の時代、ダルシー浸透式がすでに存在していたが、その妥当性は飽和浸透に限られていた。Buckingham は土壤物理学者として農地で生じる物理現象とりわけ土壤水分移動に興味を持っていた。彼が扱った、マルチの蒸発抑制効果や乾燥地における土壤の蒸発抑制効果に関する問題も重要であるが、最も重要な研究は以下に述べる毛管水分移動に関するものである。

Buckingham は、熱拡散流の類似性に基づいて、不飽和浸透流の概念を確立した。すなわち、毛管電導度と毛管ポテンシャルを定義し、不飽和土壤中の水分フラックス

が毛管電導度と毛管ポテンシャル勾配との積であるとした。これは、結果的にはダルシーの法則の不飽和流への拡張であるが、Buckingham は、不飽和流のダルシー式は飽和流の場合と違って非線形となり、複雑なものであることに気づいていた。また、式を実験によって立証することは、当時不可能と思われていた。それは、毛管電導度は水分の関数であって、実験では一定の低水分を維持した境界条件を設定する必要があるし、しかも平衡するには多大の時間を必要とするといった理由からである。その後、Buckingham の概念は Richards によって引き継がれ、非線形の不飽和水分移動式が生まれた (Richards, 1931)。Richards 自身はこの式を解こうとはしなかった。しかも Buckingham の概念の立証不可能ということがその後の研究の進展を拒み続けた。

不飽和浸透流の解析研究が動き出したのは、1950 年代に Philip (1957) や Klute (1952) によって解が導かれ、彼らの研究が評価され始めた 1960 年代以降である (Narasimhan, 2005; Raats and van Genuchten, 2006)。したがって、Takagi の論文が出た時代は、すでに Buckingham の式や Richards の式、さらには Philip や Klute の業績は知られていたが、ダルシーの法則は飽和流に対してのみ妥当性が認められていたものの、不飽和流に対する妥当性は一般的に認められない状況にあったと推察される。

3. Takagi の解析的研究

成層浸透で生じる不飽和浸透に関して、畑地を対象とする欧米と水田を対象とする日本とでは認識は異にしていた。前述のように、水田の成層土壌における浸透流では、上層が密で閉鎖系、下層が粗で開放系をなし、これら 2 つの系では浸透解析は扱いを異にすべきであると考えられていた (山崎, 1958)。Takagi は一般理論に基づいた成層浸透解析の必要性を主張し、その解析法の確立を試みたのである。

浸透解析を進めるに当たって 2 つの障害があり、Takagi がそれに神経を募らせている様子が前書きの部分で察せられる。ひとつは、浸透形態には開放系と閉鎖系があり、透水係数 k が圧力 p の関数というのが成立するのは開放系のみであり、閉鎖系では成立しないことを欧米の研究者に認識させることである。Takagi の解析においては、開放系を扱っていることを明確に仮定している。もうひとつの障害は、不飽和浸透におけるダルシー式の適用である。Takagi はその適用に当たってその式の妥当性を仮定している。この仮定は、当時の状況から判断して大変勇気が要ることであったと推察する。Takagi の論文に先立って、1 年前に Kisch (1959) の論文が発表さ

れている。この発表は Takagi にとって不運と幸運の両方をもたらしたと想像する。不運な面は、2 成層浸透の解析のプライオリティを取られたことであり、幸運な面は不飽和浸透における Darcy 式の適用 (Kisch はその妥当性を仮定している) に自信をもたらしたことである。

Takagi の論文における問題の設定は、図-2 に示す成層土壌の定常浸透を解析することである。具体的には、上層の厚さ H_1 と下層の厚さ H_2 の土層において、上端に湛水 H_0 、下端で湛水 H_3 の条件で、水が定常浸透するとき土層内の圧力分布を求めることである。開放系において図-1a のような圧力分布が形成されることは、田淵 (1960) による部分流の研究から明らかにされていた。

まず、Takagi は水分または圧力の違いによって成層土層を 5 つの領域に分けている。つまり、上層の飽和域、上層の (圧力の) 遷移域、一定負圧域、下層の遷移域、下層の飽和域である。各領域に対して、ダルシー式を適用し積分を求めている。

ダルシー式は

$$v = -k \frac{\partial \varphi}{\partial y} \quad (1)$$

で表される。ここで、 v は単位面積、単位時間あたりの通過水量、 k は透水係数、 y は下方に正の鉛直座標、 φ は水理水頭 [原著では、速度ポテンシャルとなっている] である。 φ は

$$\varphi = \frac{p}{\rho g} - y \quad (2)$$

である。ここで、 p 、 ρ 、 g はそれぞれ圧力、水の密度、重力加速度である。

上層の飽和域では、 $y=0$ で $\varphi=H_0$ の条件で (1) 式を積分すると、

$$\varphi = -\frac{v}{k_1} y + H_0 \quad (3)$$

または、

$$\frac{p}{\rho g} = -\left(\frac{v}{k_1} - 1\right) y + H_0 \quad (4)$$

ここで、 k_1 は上層の飽和透水係数である。下層の飽和域では、

$$\varphi = \frac{v}{k_2} (H + H_3 - y) - H \quad (5)$$

または、

$$\frac{p}{\rho g} = -\left(1 - \frac{v}{k_2}\right) (H + H_3 - y) + H_3 \quad (6)$$

である。ここで、 k_2 は下層の飽和透水係数、 $H=H_1+H_2$ である。 $y=y_B$ および $y=y_E$ では、 $p=0$ であるから、

$$\left(\frac{v}{k_1} - 1\right) y_B = H_0 \quad (7)$$

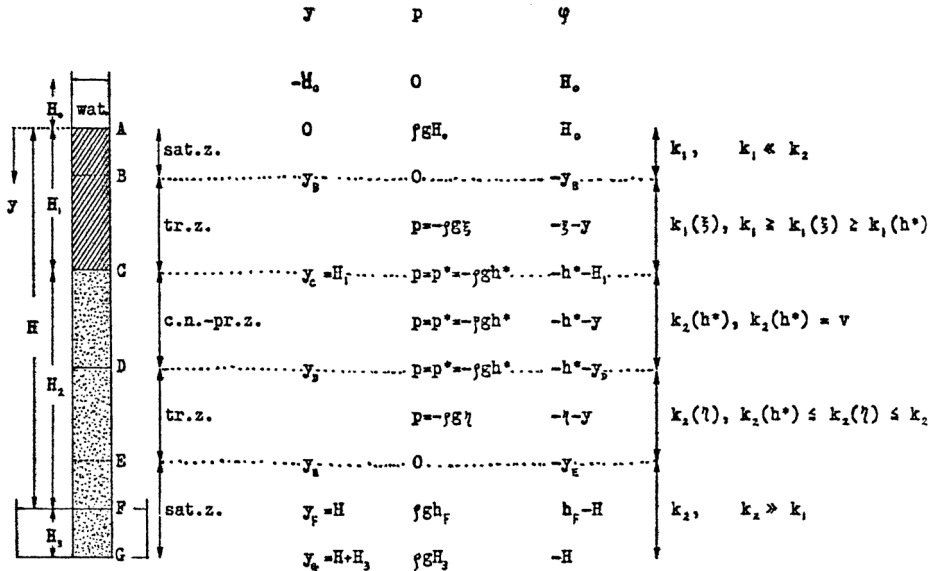


図-2 Takagi が解析した成層土壌における水の流れ (Takagi, 1960)

Fig. 2 Water flow system that Takagi analyzed in a two-layered soil (after Takagi, 1960).

および

$$\left(1 - \frac{v}{k_2}\right)(H + H_3 - y_E) = H_3 \quad (8)$$

一定負圧域では、 $p = p^* = -\rho g h^*$ および $\varphi = -h^* - y$ であるから、

$$v = k_2(h^*) \quad (9)$$

ここで、() 付きの k_1, k_2 , すなわち $k_1(\xi), k_2(\eta)$, は不飽和透水係数を表す。上層遷移域では、

$$\frac{d\xi}{dy} = \frac{v}{k_1(\xi)} - 1 \quad (10)$$

ここで、 $p = -\rho g \xi$ である。上式を積分すると、

$$\int_0^{\xi} \frac{d\xi}{v/k_1(\xi) - 1} = y - y_B \quad (11)$$

C点では $\xi = h^*$ となり、(7)式を用いると、

$$\int_0^{h^*} \frac{d\xi}{v/k_1(\xi) - 1} = H_1 - \frac{H_0 k_1}{v - k_1} \quad (12)$$

(9)式を用いて、 v を置き換えると、

$$\int_0^{h^*} \frac{k_1(\xi) d\xi}{k_2(h^*) - k_1(\xi)} + \frac{H_0 k_1}{k_2(h^*) - k_1} = H_1 \quad (13)$$

下層の遷移域では、

$$\frac{d\eta}{dy} = \frac{v}{k_2(\eta)} - 1 \quad (14)$$

境界条件 $y = y_E$ で $\eta = 0$ であるから

$$\int_0^{\eta} \frac{d\eta}{1 - v/k_2(\eta)} = y_E - y \quad (15)$$

ここで、 $p = -\rho g \eta$ である。D点では $\eta = h^*$ であるから

$$\int_0^{h^*} \frac{d\eta}{1 - v/k_2(\eta)} = y_E - y_D \quad (16)$$

である。この式から、一定負圧域と下層遷移域との境 y_D が求まる。Gardner (1958) の式を用いた(16)式の計算は、Zaslavsky (1967) によって示されている。ただし、(16)式

の計算において、Takagi は収束条件として、 $1 - \frac{v}{k_2(\eta)}$ が $(h^* - \eta)^\alpha$ (ここで、 $\alpha < 1$) に比例することとしている。

以上の結果を整理すると、上層の飽和域は(4)式、上層の遷移域は(11)式 (y_B は(7)式から代入)、一定負圧域は(12)式、下層遷移域は(15)式 (y_E は(8)式から代入)、下層飽和域は(6)式からそれぞれ圧力分布が得られる。

Takagi は解析結果から成層浸透の2つの特徴を導き出している。そのひとつは、浸透速度の大きさについてである。(7)、(8)式の左辺の括弧内はともに正であること、また(12)式の左辺は正であることから、

$$k_2 > v > k_1 \left(1 + \frac{H_0}{H_1}\right) \quad (17)$$

の関係を示している。

他のひとつは、一定負圧域についてである。図-1においては、一定負圧域の位置を勝手に仮定しているが、一定負圧域が存在するとすればこの仮定の状況しかないことを示している。つまり、一定負圧域は上層まで伸びることもないし、2層境界面より下の位置からこの領域が

始まることもないということである。

4. ポスト Takagi 論文

Takagi 論文が発表された後、成層浸透流に関連する研究が続けて発表されている。まず、Behnke and Bianchi (1965) はストレーンゲージをテンシオメータと接続した計測器を用い、成層土壌のカラム実験から圧力分布を求めている。その結果、一定負圧域を含む圧力分布 (図-1) が再確認されたことになる。

Zaslavsky (1963) は、Takagi の示した圧力分布は湛水深によって影響されるとし、飽和浸透から不飽和浸透への移行条件および不飽和浸透から飽和浸透への移行条件を調べた。前者 (H_0 下降過程) の場合、土壌の限界毛管水頭または空気侵入値 h_c を考慮し、飽和浸透から始まり、図-1 のような型の不飽和浸透が生じる条件を導いた。〔原著 (8) 式〕

$$H_0 < H_1 \left(\frac{k_2}{k_1} - 1 \right) - h_c \left(\frac{k_2}{k_1} \frac{H_1}{H_2} + 1 \right) \quad (18)$$

一方、後者 (H_0 上昇過程) の場合、〔原著 (15) 式〕

$$H_0 > H_1 \left(\frac{k_2}{k_1} - 1 \right) - h_c \quad (19)$$

これらの間にはヒステリシスがあり、 $h_c = 0$ のときこれらの式は一致するとしている。

このような不飽和浸透の発生条件は、地表湛水時の浸透速度および下層における横方向への浸透の発生と関連していることが考えられた。しかし、解析を進めて、不飽和条件では浸透速度は湛水深 H_0 に比例しないが、 H_0 が大きくなるにつれて比例するようになること、地下水位が 2 層の境界付近まで上昇しない限り浸透速度は地下水位に影響されないこと、透水性の低い上層が存在しても下層においては水平への流れは生じないことを明らかにしている (Zaslavsky, 1967)。

Srinilta *et al.* (1969) は、Takagi (1960), Kisch (1959), Zaslavsky (1963, 1967) で得られた成果の検証を行うため、つまり成層浸透に対する上下層の厚さ、湛水深、流出端の圧力、ヒステリシスの影響を調べるため定量的な実験を行っている。Srinilta *et al.* の実験結果は、定常流では流速が上層の飽和透水係数より大に下層の飽和透水係数より小になるという Takagi の理論の一つの結果と一致している。また、定常流速は下層の浸透特性には依存せず、湛水深の増大とともに増大し、上層の厚さの増大とともに減少するという Kisch の結論とも一致している。

また、Srinilta *et al.* は下層の遷移域が 2 層の境界面まで伸びた状態を取り扱っている (図-1b)。このような状態は下層の厚さが短い場合や流出端の圧力が高い場合

に相当する。この場合、(11) 式と (15) 式から連立方程式として h^* と v を決定し圧力分布を求めることができる。具体的には、まず上層の空気侵入値を h_{01} とし、負圧域での飽和部分を考慮して [(11) 式で H_0 の代わりに $H_0 - h_{01}$ を用いる]、(7) と (11) 式上層遷移域の深さ y と圧力水頭 h との関係は、〔原著 (4) 式〕

$$\int_{h_{01}}^h \frac{k_1(h)dh}{k_1(h)-v} = y - \frac{k_1(H_0-h_{01})}{v-k_1} \quad (20)$$

同様に、下層遷移域では、空気侵入値を h_{02} とし、下層負圧域での飽和部分を考慮して [(15) 式で H_3 の代わりに $H_3 - h_{02}$ を用いる]、〔原著 (5) 式〕

$$\int_h^{h_{02}} \frac{k_2(h)dh}{k_2(h)-v} = H_1 + H_2 - \frac{k_2(H_3-h_{02})}{k_2-v} - y \quad (21)$$

である。これらの式では、圧力水頭 h は Takagi 論文の ξ や η に相当することに注意。 (20) と (21) 式を用いて圧力分布を計算するには未知変数を決定する必要がある。 $y = H_1$ で $h = h^*$ と置き、(20)、(21) 式を連立方程式として解いて未知変数 h^* と v が求まり、結局 y に対する h が計算できる。このように、Srinilta *et al.* は地下水位が高い場合、上下層の遷移域が接触し、一定負圧域が消滅する現象について解析法を示している。さらに、Takagi が提示した $k_2(h)$ に対する Gardner 型の関数 ($k_2(h) = ab/[b + (h - h_c)^a]$) 〔原著 (9) 式〕; ここで、 a , b , α は定数) とその制限 $0 < \alpha < 1$ を用いると、(16) 式の積分が収束しないことを見つけ、一定負圧域そのものが存在しないと結論付けている。定常流速に関しては、上層の飽和透水係数より大きく、下層の飽和透水係数より小さくなるという結果 ((17) 式) は Takagi の理論との一致を示している。

Srinilta *et al.* の研究から 20 年ほど遅れて、Warrick and Yeh (1990) は、Takagi, Zaslavsky, Srinilta *et al.* の解析法を利用し、成層土壌からの蒸発に対する解析を含めた一般解に拡張している。

5. 閉鎖成層浸透の展開

上述の不飽和の成層浸透は、開放形を対象にしていた。日本では、これら開放系の研究と並行して閉鎖系の研究も行われてきた。

黒田 (1966) は閉鎖系の実験を行い、不飽和域が下層の上端 (2 層の境界面) から発生し、それが下方に進行し、下層に一定負圧域が形成されることを観察している。さらに、一定負圧域が伸長するにつれて、圧力値が上昇し、やがて平衡して最終的に開放系に似た圧力分布 (図-1a) を呈することを認めている。これらの結果は、別に行われた中村 (1969) や筑紫 (1981) の結果とも一致している。

このように閉鎖系の圧力分布は開放系の分布に似ているが、それらの違いは、例えばカラム下端の圧力水頭を上昇させることによって明確になる。図-3に示すように、開放系では一定負圧域が十分に発達しているとき、一定負圧域の圧力水頭および浸透流速は下端の水頭が多少上昇しても変化しない (Kisch, 1959; 田辺ら, 1974) が、閉鎖系では下端の水頭上昇に伴い圧力分布全体が上昇することになる (筑紫, 1981)。

閉鎖浸透の場合、土中の空気は浸透水からの気泡の発生と深い関わりがある。閉鎖系における気泡の発生に関しては、巽 (1953) や八幡 (1960) による先駆的な研究がある。巽は浄水工学の立場から浸透槽における溶存空気の析出に関する研究を進めた。浄水で行われる砂濾過浸透においては、浸透水に含まれるガスの一部が遊離して気泡となり流路を防ぐことによって流れを阻止する現象 (air binding) が把握されていた。巽は気泡の発生が Henry の法則に基づくものとして、温度および圧力の変化に伴う遊離空気量の計算法を示すと共に、遊離した空気の気泡が小さい間、気泡の膨大によって蒸気圧が急増するが、気泡が大きくなるにつれて蒸気圧の増加が極めて小さくなることを提示している。そのことから、気泡の増加は主に新たな遊離空気量の増加によるものであり、水の負圧の進行に伴い気泡内の圧力も低下すること

から気泡の大きさが大きくなると結論づけている。

八幡は図-4のようなガラス製の模型孔隙を作製し、水を流して気泡の発生位置、気泡量、気泡の発生・成長過程を観察した。その結果、気泡は孔隙の拡大部に生じやすいこと、発生部において気泡の体積が増すにつれて流

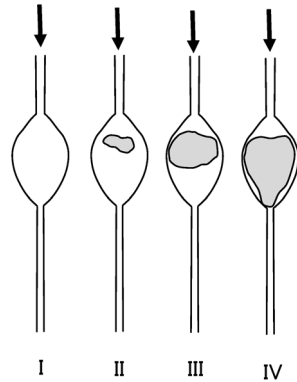


図-4 拡幅ガラス管に水を流した場合の気泡の発生状況 (八幡, 1960)

Fig. 4 Emergence of air bubbles in the expanded zone during water flow through the glass pipe. Time elapses from I to IV. (after Yahata, 1960)

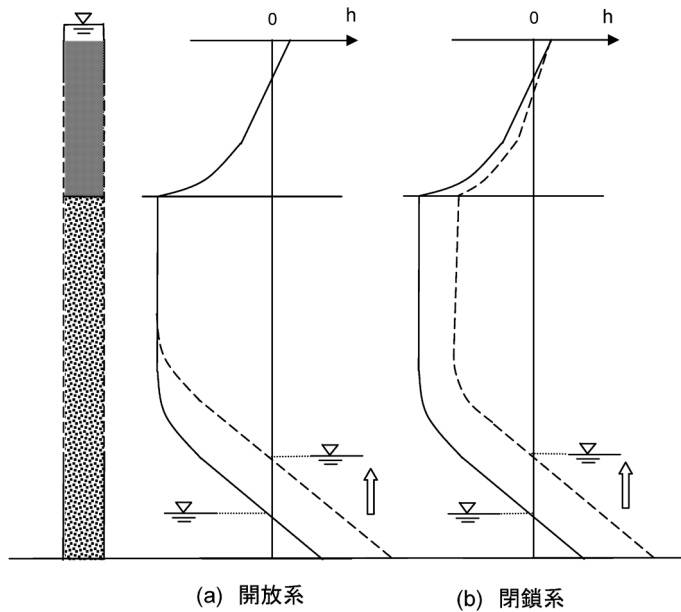


図-3 カラム下端の水位上昇による開放系と閉鎖系の圧力分布の相異

Fig. 3 Changes in water pressure profiles due to the elevation of outflow pressure in (a) open system and (b) closed system.

量が減少すること、気泡は孔隙中を浮上したり、気泡同士で合併したりして気泡の成長が終わり、流量が一定値に安定することを示した。さらに、八幡が示した気泡発生 の主要な 3 つの条件は、低圧、攪乱 (agitation)、核の存在である。これらはビールや炭酸水を容器からコップに空けるときに観察される気泡の変化を見れば明らかである。八幡は示していないが、温度も重要な要素であることは論をまたない。

黒田 (1966) は、浸透負圧層において生じる、遊離した空気による透水係数の変化に対してヘンリーの法則およびボイル-ゲイ・リュサックの法則を適用し、遊離空気量、飽和度、透水係数の関係をモデル表示した。さらに、自ら考案した、一定負圧の浸透装置を用いて実験を行い、モデルの妥当性を示した。その後、筑紫 (1981) は黒田の成果 (Henry の法則を用いた気泡量の推定法) を踏まえて閉鎖系の成層浸透流の圧力分布に対する、一つの解析モデルを提示している。

6. 不飽和透水係数

Takagi の論文発表時期は不飽和透水係数の関数表示が次第に発表されてきた時代でもあった。Gardner (1958) は理論解析から関数 $k(\Psi)$ (ここで、 $\Psi(=-p/(\rho g))$ はマトリックポテンシャル) を提示した。一方で 1950 年代から、土壌の間隙分布密度関数とポアズイユの毛管流速の式に基づいて統計的に $k(\theta)$ (ここで、 θ は体積含水率) を関数表示する研究開発が行われ、Childs and Collis-George (1950) から Mualem (1976) に至る一連の研究を経て van Genuchten (1980) の関数式が導かれた。著者らは断っていないが、これらの研究は開放系における水分移動に限定していることに注意を要する。

そもそも、テンシオメータは不飽和条件下におけるマ

トリックポテンシャルを測定するものであるが、閉鎖系においても開放系と同様に使用されてきた。それが妥当であるかどうかはまだ立証されておらず、従来からあまいにされてきた。

図-5 のようにテンシオメータの先端の多孔材質と土壌との接触を考える。開放系の場合、土壌水の水圧が変化すると、大気と接する水分のメニスカスの曲率半径が変化し、水分量の変化が生じる。この水分量の変化はテンシオメータの示す圧へと影響する (図-5a)。一方、閉鎖系の場合、土壌水圧の変化はテンシオメータ圧へと伝わるが、気泡の大きさへの影響はどれほどになるか推測がつかない。つまり、 Ψ と θ の関係が定まらない (図-5c)。このことについて、田淵 (1950) は解説し、「開放系では不飽和≡毛管膜≡負圧の関係が成り立っているが、閉鎖系では不飽和であっても空気が気泡の状態であるため毛管膜はできない」と述べている。より一般に観察される状況は、図-5b に示す、開放系と閉鎖系を含む場合である。このような不飽和の状況の違いは透水係数の評価にも影響する可能性がある。

閉鎖系の場合、上述した Gardner, Brooks and Corey (1964), van Genuchten 等の関係式は通用しない。閉鎖系の浸透流について研究された当時、閉鎖系の Ψ と θ の関係は立証されておらず、それらと k との関係も明確でなかった。そのため、閉鎖系における $k(\theta)$ あるいは $k(\Psi)$ をどのように表示すべきかが課題となっていた。そんな中、黒田 (1966) は次の Irmay (1954) の式を見だし、閉鎖系の解析に利用している。〔原著 (14) 式〕

$$k(\theta) = k_s \frac{(S - S_0)^3}{(1 - S_0)^3} \tag{22}$$

ここで、 k_s は飽和透水係数、 $S (= \theta/n; \text{ここで、} n \text{ は間隙率})$ は水分飽和度、 S_0 は限界水分飽和度 ($= \theta_0/n; \theta_0$

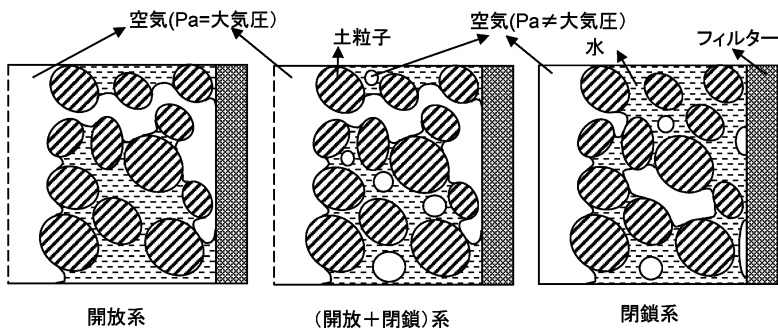


図-5 開放系および閉鎖系における不飽和状況とテンシオメータとの関係

Fig. 5 Unsaturated conditions contacting with tensiometer filter depending on the type of air : (a) atmospheric air, (b) atmospheric and entrapped air, and (c) entrapped air.

は流れに関与しない死水部分を指す) である。Irmay は Wyckoff and Botset (1936) の実験結果 (図-6) に基づいてこの式の妥当性を実証している。Wyckoff and Botset の実験 (図-7) では、電解質溶液 (NaCl) の浸透液量測定、CO₂ の浸透ガス量測定、電気抵抗計測による飽和度

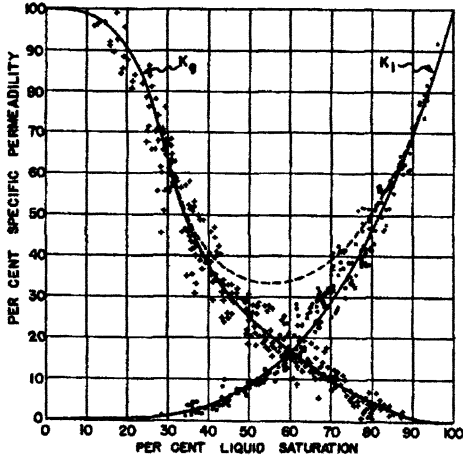


図-6 砂おける相対透過度と飽和度との関係

Fig. 6 Relative specific permeabilities of air and water depending on water saturation in sand (after Wyckoff and Botman, 1936)

の測定、カラム壁面のスクリーン部分と接合した水銀マノメータによる圧力測定が行われている。また、浸透液は CO₂ で飽和されており、浸透層内のガス量の調節はカラムの一方の端にあるポンベからの CO₂ ガス供給量を調節して行われる。この実験の場合、浸透槽内の空気は封入空気 (閉鎖系) と見なされ、閉鎖系浸透流に対する 2 式の適用の妥当性が認められる。

ところで、水銀マノメータは何の圧力を計測しているのでしょうか。おそらく空気圧と水圧の平均化された値であると思われる。気泡が存在する状況 (図-5c) でこの平均化された圧力と飽和度とは一価の関係が成り立つとは思えない。飽和度の変化は気泡の体積の変化によってもたらせるが、圧力が異なってもそれほど空气体積が変わらないことがあるからである。メニスカスの平衡関係は気液の圧力差に依存しているため、仮に水圧が Δp 上昇しても空気圧も Δp 上昇すれば、体積 (メニスカス) に変化はないはずである。このように、図-5 に示す不飽和の形態によって不飽和透水係数と水分量との関係がどう変化するのは現在でも関心深い問題である。

7. あとがき

浸透流の研究の発展過程を考えると、まず均一な土壌を取り扱い、次第に複雑な系を扱うようになってきた。最近では不均一土壌を対象とする研究が数多く見られるよ

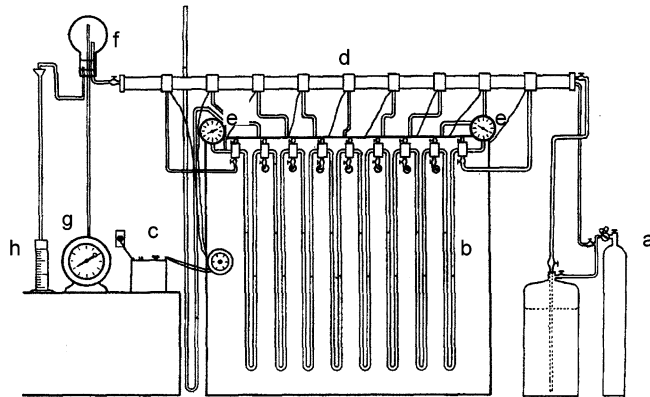


図-7 Wyckoff and Botset (1936) が用いた実験装置. a. CO₂ ボンベ; b. 水銀マノメータ (圧力計測); c. 電気抵抗メータ (水分計測); d. 土壌カラム+リング (圧力タップ (b) に接続) とスクリーン (c) に接続) を含む); e. ガス・液供給調整器; f. ガス・液分離器; g. ガスメータ; h. メスシリンダ. (原図に符号加筆)

Fig. 7 Apparatus used by Wyckoff and Botset (1936)'s experiment. a. CO₂ gas cylinder; b. mercury manometer; c. electric resistance meter; d. soil column plus ring, including pressure tap, connected with b, and wire screen, connected with c; e. gas and liquid supply regulator; f. gas and liquid separator; g. gas meter; h. graduated cylinder. (with alphabetical marks to the original figure)

うになったが、最も単純な不均一系は成層土壌である。扱った土壌を均一から不均一土壌にすることによって、いろいろな付随する現象が発生する。それらには、選択流、不飽和、負圧域の発生などが含まれる。Takagi 論文はこの複雑な成層土壌系の解析に向けて第 1 歩を記したものである。本稿で述べたように、開放系の研究とともに閉鎖系の研究があり、それらは当然対比され、現象的に明確に区別されるべきである。したがって、Takagi が扱った解析内容の周辺には様々な面で研究の余地があったし、未決の問題も多い。

Takagi 論文は世界の土壌物理学研究に金字塔を樹立するような業績ではない。しかし、成層浸透に対する興味を世界的に高め、滞っていた Buckingham の概念の理解を推し進めるきっかけを作った研究者の一人として、Takagi は評価されよう。さらに、今日、日本の土壌物理学の若き研究者達が盛んに国際誌に投稿するようになったが、その先駆者が Takagi であったことも評価できよう。

引用文献

- Behnke, J.J. and W.C. Bianchi (1965) : Pressure distribution in layered sand columns during transient and steady-state flow. *Water Resour. Res.*, **1** (4) : 557-562.
- Brooks, R.H. and A.T. Corey (1964) : Hydraulic properties of porous media. In : *Hydrology paper 3*. Fort Collins, CO : Colorado State Univ., pp. 27.
- 筑紫二郎 (1981) : 成層土壌における不飽和浸透流に関する研究。鳥取大学農学部研究報告, **33** 別冊 : 1-38.
- Childs, E.C. and N. Collis-George (1950) : The permeability of porous materials. *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A* **201** : 392-405.
- Day, P.R. and J.N. Luthin (1953) : Pressure distribution in layered soils during continuous water flow. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **17** (2) : 82-91.
- 富士岡義一 (1954) : 土壌の鉛直降下浸透における負圧発生機構に関する研究 (I), *農業土木研究*, **21** (6) : 8-13.
- Gardner, W.R. (1958) : Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Sci.*, **85** : 229-232.
- Irmay, S. (1954) : On the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Trans. Amer. Geophys. Union.*, **35** (3) : 463-467.
- Kisch, K. (1959) : The theory of seepage from clay-blanketed reservoir. *Geotechnique*. **9** : 9-21.
- Klute, A. (1952) : A numerical method for solving the flow equation for water in unsaturated materials. *Soil Sci.*, **73** : 105-116.
- 黒田正治 (1966) : 溶解気体による不飽和浸透の発生とその浸透性に関する研究。 *九大農芸誌*, **22** (3) : 225-300.
- Mualem, Y. (1976) : A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, **12** (3) : 513-522.
- 中村忠春 (1969) : 土の毛管浸透についての基礎的研究。 *愛媛大農紀要*, **14** (1) : 106.
- Narasimhan, T.N. (2005) : Buckingham, 1907 : An appreciation. *Vadoze Zone J.*, **4** : 434-441.
- Philip, J.R. (1957) : The theory of infiltration : 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Sci.*, **83** : 345-357.
- Raats, P.A.C. and M.Th. van Genuchten (2006) : Milestones in soil physics. *Soil Sci.*, **171** (1) : S21-S28.
- Richards, L.A. (1931) : Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, **1** : 318-333.
- Srinilta, S., D.R. Nielsen. and D. Kirkham (1969) : Steady flow of water through a two-layer soil. *Water Resour. Res.*, **5** (5) : 1053-1063.
- 田淵俊雄 (1950) : 負圧浸透について。 *土壌の物理性*, **1** : 9-16.
- 田淵俊雄 (1960) : 浸潤とそれに続く浸透 II。一乾燥ガラス粒の成層におけるタン水降下実験一。 *農土研別冊 (1)* : 13-19.
- Takagi, S. (1960) : Analysis of the vertical downward flow of water through a two layered soil. *Soil Sci.*, **90** (2) : 98-103.
- 田辺邦美・田中 明・大沢敏彦・辻 勝年・大東光一 (1974) : 水稲田の浸透水管理に関する実験的研究。 *九大農芸誌*, **28** (2) : 105-113.
- 巽 巖 (1953) : 砂ろ過床における空気の遊離について。 *水道協会誌*. **225** : 2-11.
- Van Genuchten, M.Th. (1980) : A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **44** : 892-898.
- Warrick, A.W. and T.C.J. Yeh (1991) : One-dimensional, steady vertical flow in a layered soil profile. *Adv. Water Resour.*, **13** : 207-210.
- Wyckoff, R.R. and H.G. Botset (1936) : The flow of gas-liquid mixtures through unconsolidated sands.

- Physics, **7** : 325-345.
- 山崎不二夫 (1958) : 成層土壌の降下浸透に関する研究.
東大農地工, 研究の資料と記録, **6** : 1-30.
- 八幡敏雄 (1960) : エアー・バインディングによる土の
透水性の低下について. 東大農地工, 研究の資料と
記録, **10** : 1-32.
- Zaslavsky. D. (1963) : Theory of unsaturated flow into
a non-uniform soil profile. Soil Sci., **97** (6) : 400-
410.
- Zaslavsky. D. (1967) : Saturation-unsaturation transi-
tion in infiltration to a non-uniform soil profile.
Soil Sci., **107** (3) : 160-165.

要 旨

水田圃場のように湛水が生じた条件下の成層土壌では、負圧浸透あるいは不飽和浸透になることが知られていた。その解析的扱いは、浸透系が開放系か閉鎖系かによって異なるが、1960年、Takagiは開放系の成層浸透について解析解を示した。この研究の発表後、欧米では成層浸透の研究に関心が高まりいろいろな議論が行われた。一方、日本では開放系の研究と並行して閉鎖系の成層浸透流の研究が進んだ。閉鎖系の研究では、気泡の発生、不飽和透水係数の評価等、現在でも検討すべき問題がある。

受稿年月日 : 2007年 6月 11日

受理年月日 : 2007年 10月 2日