

古典を読む (我が国の研究)

部分流 (フィンガー流) の発見とその背景

田 淵 俊 雄*

Reviewing classical studies in soil physics

Discovery of Partial Flow (Finger Flow) and its Research Background

Toshio TABUCHI*

本誌で新しく企画された「古典を読む」の中に、部分流の発見について書くようにとの依頼を受けた。私の研究が古典のひとつは大変な名誉であるが、正直驚いている。若い研究者の方たちに参考になるようにとのことなので、50年近くも前の記憶を辿りながら書いてみることにする。

1. 発見までの背景

私は1957年(昭和32)に東京大学農学部農業工学科を卒業し、大学院に進学した。指導教官は山崎不二夫先生で、研究室には八幡敏雄先生や岩田進午さんなど大勢の優秀な先輩がいた。ゼミでは浸透が主題になり、日本の古典ともいえる田町正誉、秋葉満寿次、山崎不二夫の各先生の論文から Childs, Richards らの欧米の論文を読みまくった。当時最先端を走っていたロシアの文献も辞書と首びきで読んだ。

この1957年から1958年の浸透ゼミの成果は、1959年3月に土壌物理研究会(現在の土壌物理学会)が発刊した本誌「土壌の物理性」の創刊号に紹介した(田淵, 1959)。若輩の私が何故かゼミを代表して執筆しているが、これが私にとっては研究者としての執筆原稿第1号である。

標題は「負圧浸透について」であった。従来日本の水田での浸透研究では飽和の Darcy 則が適用され、欧米の乾燥した畑地では不飽和の水分ポテンシャル(現在はマトリックポテンシャルと言う)に基づく水分移動則が適用されていた。この欧米で発展した水分ポテンシャル解析の手法を、不飽和とは限らない小さな負圧の浸透にも機械的に適用した研究が当時日本で発表され、あたかも負圧=不飽和であるかのような誤解が生じていた。

水分ポテンシャル ϕ が水分量 θ と一価関係 $\phi(\theta)$ であることを仮定すれば、スマートな理論展開が可能であっ

た。しかしこの一価関係が飽和に近い領域でも成り立つかが問題であった。極端に言えば負圧でも飽和の流れがありうるし、不飽和でも正圧である場合がある。なおここでいう一価関係の妥当性とはヒステリシスとは別のことである。山崎先生(1943, 1948)が発表した開放・閉鎖論はその先駆的研究であった。開放とは間隙の中の空気が連続していて大気とつながっている状態を言い、閉鎖とは間隙の中の空気が封入空気のように孤立している状態を表す。閉鎖状態では水圧が変化しても水分量は開放状態のように変化しないことになる。それで先生は不飽和でも開放状態でなければ $\phi(\theta)$ が成り立たないことを主張していた。これらのことを整理して提示したのが上記のゼミ報告である。

外国に在住し国際的に活躍していた高木俊介教授を囲んで東大の研究室で行った討議は今でも記憶に残るものだった。成層浸透で負圧が発生する下層に $\phi(\theta)$ を適用して解析することについて、水分ポテンシャルと水分量の間の一価関係が成立するかしないかの検証もせずに、機械的に適用するのはおかしいのではないか、という議論をした。同様な議論が農業土木学会の講演会でも展開されて話題をよんだ。

このゼミが私を大きく成長させたのは間違いない。多くの優れた論文を歴史的な展開の中で読み、それぞれの特徴をつかむことができた。しかもこの負圧浸透論議は論文を批判的に読み、既存の学説を鵜呑みにしないことの重要性を私に教えてくれた。そして本来技術者志望であった私を研究者の道に引きずりこんでしまった。

ゼミと並行して、私は「浸潤と浸透」に関する実験を1958年秋から始めていた。水が土中に湛水浸潤した際の浸潤(infiltration)を表す式として、Green and Ampt(1911)の Darcy 型の浸潤式があった。その式を検証することと、浸潤後の水分量がどうなるかという課題で

*元東京大学農学部 〒300-0331 茨城県稲敷郡阿見町阿見 4630-104

キーワード: フィンガー流, 成層浸潤, 浸潤前線, 毛管力

あった。浸潤後の水分量は飽和になるとは限らない。浸潤の際の条件、例えば浸潤前の水分量や土中にあった空気の抜け出す条件などで変わる。浸潤後の水分量はその後の透水係数を左右するので浸透にとっては重要な課題である。浸潤にも関心はあったが、最初はむしろ浸潤後の浸透段階に興味があった。どの程度不飽和になるのか、またそこでは開放状態なのか閉鎖状態なのか、といったことが知りたかった。

ロシアの文献の中にブダゴフスキー (1955) の浸潤に関する本があった。後に翻訳出版したロージェ (1955) の「土壌と水」に比べると文章が難解で、翻訳が非常に難しかったが、何とか翻訳して研究室で刊行した。この本の中の成層浸潤の項に浸潤前線が下層に到達すると、浸潤強度が一定になると書かれていた。ただそこに書かれていた理由には納得がいかなかった。それで成層浸潤のことも視野に入れて実験計画を作成した。

2. 部分流の発見

私の「浸潤とそれに続く浸透」と題された論文は、I 報 (1960) が均一層、II 報 (1961) が成層である。いずれも砂とガラス粒をアクリル製の透明円筒に詰めて実験した。1958 年秋から翌年春までに均一層の実験を 10 数回行った。その後成層実験に入ったが、その第 1 回は 1959 年の 5 月 5 日である。

この初めての成層実験で部分流を発見した。上層に粒径 $0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$ の細かいガラス粒を詰め、下層に粒径 1.0 mm の粗粒のガラス粒を詰めた浸潤実験を行った。この際に下層では浸潤前線が消えてしまい、下層は白く乾燥したままであった。厳密に言えば部分流は外壁に接触しなかったので、外からは見えなかったのである。

実際に部分流を観察できたのは、2 回目の実験である。この時は下層に詰めたガラス粒の粒径を $0.4 \sim 0.7 \text{ mm}$ とやや細かくした場合である。この時下層では太いつららがぶらさがったような流れが外から観察された。部分流の側面には乾いた部分があるのに水はそちらへは流れずに、ただひたすら流下していた (写真参照)。

この時は正直それほどの大発見とは思わなかった。むしろ困ったことになったとがっかりした。それはこの妙な形の流れの解析が容易ではないと思ったからである。当時の実験ノートを見ると次のように記録されている。「本成層浸潤の実験目的は下層でどんな流れが生じるかをみることに、不飽和の場合にはそれが開放状態なのか閉鎖状態なのかを明らかにする」と。かなり飽和・不飽和や開放・閉鎖にこだわっていた。実験後には「下層では流路以外の部分には水が存在せず、空気だけが存在し、それは連結している。したがって空気は開放状態といえ



写真 部分流発生

Photo Occurrence of partial flow (Finger flow)

るが、水分量が水圧と一価関係にあるという意味での開放ではない。水は流路の部分だけに閉鎖的に存在する局部的閉鎖である。」と記述している。こうして成層浸潤の際に部分流が生じ、それが浸透段階でも残ることが見いだされた。

3. 部分流の解析、その成因は？

何故このような媒体の一部しか流れない現象が生じたのか？ かなり悩んだし、四六時中考えていたように思う。ただ実験が 1959 年 5 月から 9 月にかけてで、翌年早々にはゼミで発表しているから、それほど長く苦しんでいたわけではない。10 月から 12 月の間とみられる。

部分流の中の水圧を検討するために、そこに鉛直の流管を考えて浸潤式を適用した。浸潤前線が下層に侵入した直後、前線が均一でなく凹凸である場合を想定し、前線が先に進んだ部分 (B) と前線が遅れた部分 (A) の鉛直な流管中の水圧分布 P_B と P_A を求めた (図 1)。その際に湛水面の水圧を水深 h_0 、浸潤前線の水圧を h_k として、上層の透水係数 K_1 が下層の透水係数 K_2 よりも小さいという条件で Darcy 則を適用すると、 P_A と P_B は図のようになる。 P_B のほうが P_A よりも低い水圧になる。したがって A から B への流れが生じる。さらに先に進んだ流管ほど流速が早くなることもわかった。

これらのことは前線の進んだ部分へ水が集まり、前線の凹凸は成長して部分流になるということを示す。この過程で下層の動水勾配 J_2 は次第に 1 に近づく。 J_2 が 1

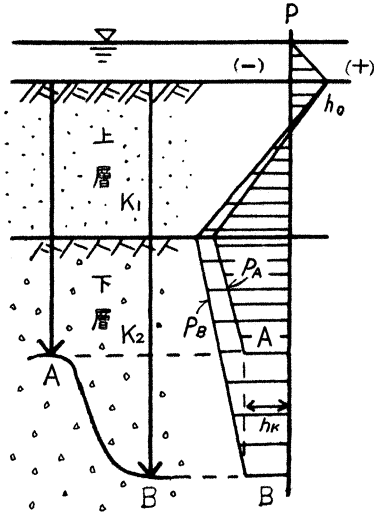


図-1 A, B 流管内の水圧分布 ($q_2 < K_2$ の場合)
 Fig. 1 Pressure distribution in A and B ($q_2 < K_2$)

になって水圧が深さ方向に一定になると、部分流は安定状態になりその断面積 a は一定になる (図2)。そして浸潤強度 q も一定になる。そこで $q = q_2$ とおくと、それは次式で示される。

$$q = q_2 = K_1(1 + (h_0 + h_k)/L_1) \quad (1)$$

ここで K_1 は上層の透水係数、 h_0 は湛水深、 h_k は前進毛管力、 L_1 は上層の長さ。

この時、一定になった部分流の断面積 a は円筒の断面積を A とすれば、 $q_2 \cdot A = K_2 \cdot J_2 \cdot a$ で $J_2 = 1$ だから

$$a/A = q_2/K_2 \quad (2)$$

こうして前線の凹凸が成長して部分流になることの証明と、安定状態になった際の部分流の断面積と浸潤強度を表す式が導かれた。また浸潤強度が一定になることも説明された。

浸潤前線が下端に到達した後の浸透段階では、下方への浸潤前線は消滅するので前進毛管力は作用しなくなる。また部分流の側面の乾燥部分との境界にはメニスカスが生じているが、その毛管力は平衡状態の静止毛管力 h_c である。したがって上層と下層の境界の水圧は h_k から h_c が変わる。その時の q を q_3 とすれば

$$q_3 = K_1(1 + (h_0 + h_c)/L_1) \quad (3)$$

$$a/A = q_3/K_2 \quad (4)$$

なお下層下部には下端の流出面の水圧が大気圧に等しくなるので、湿潤層が生じる。以上が当時筆者が考えた

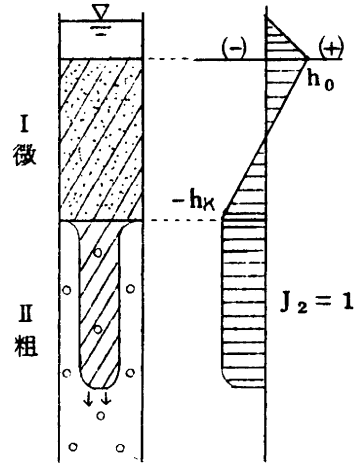


図-2 成層浸潤での部分流発生
 Fig. 2 Occurrence of partial flow during infiltration

解析である。

4. 部分流の判別式

ところがこの考察の過程で凹凸が成長せずに消滅する場合もあることが判明した。(4)式によれば下層の透水係数 K_2 が大きくて $q_3 < K_2$ の場合には a は A よりも小さく「部分流」になるが、逆に $q_3 > K_2$ の場合には a は A よりも大きくなるので部分流にならず、円筒の全面を流下する「全面流」になることが導かれる。このことがわかった時の方が部分流を発見した時よりも興奮した。本当に部分流が生じないことが起きるのだろうか。

一般には粗い粒子を詰めた下層の透水係数 K_2 は上層の K_1 よりもかなり大きいので、 $q_3 < K_2$ が成り立ち、 $q_3 > K_2$ の条件はよほど h_0 を大きくしないと成り立たない。それで思い切って湛水深を 66.5 cm と大きくして $q_3 > K_2$ の条件を満たすようにして検証実験をおこなった。そして下層でも全面流になることを確認した。こうして部分流発生のための判別式 $q_3 < K_2$ が誕生した。

実験から新現象が観察されて理論が生まれ、次いでその理論から逆に新事実が予測されて検証される。研究者としては最高の喜びである。それに比べて部分流の発見は運の問題ともいえる。私の前に、誰か見た人がいたかもしれない。成層浸潤の実験をすれば発生した現象だから見た人がいた可能性が大きい。しかし透明のアクリル円筒は丁度出来たばかりの時代だった。ガラスの円筒は当時かなり高価だったので、普通鉄製の円筒が使われていたので見えなかったのかもしれない。

とにかくこれで成層浸潤における不思議な流れが発見

された。そして成層浸潤の研究は実態の見えない中で
の研究から実態を踏まえた研究へと、新たな段階に進むこ
とになった。

5. 発表後の経過

論文は均一層と成層の2報に分けて農業土木学会に投
稿したが、新しく発刊された農業土木研究別冊（現在の
農業土木学会論文集の前身）1号（1960）と2号（1961）
に掲載された。今ならば欧米の雑誌に投稿するところ
であろうが、なにしろ私にとっては処女論文だった。それ
で農業土木学会に投稿した。ただ欧米の学者にも知って
もらいたかったので、英文版を個人的にタイプを打って
作り数人の学者に送った。しかし全体的には私の研究は
欧米では知られないままに過ぎることになった。

その後の1970年代に、Hill and Parlange (1972),
Raats (1973), Philip (1975) などによって、部分流は
finger flow の名前で国際学界の中に登場した。Raats
の引用文献の中に私の文献が入っていたので喜んで記憶
があるが、内容を詳しく紹介したものはなかった。
1980年にはHillelによってフィンガー流の研究がレビ
ューされた。

1977年には岩田進午さんと共著で「Soil-Water Inter-
actions」を書き始めた。これは私としては日本の水田工
学の優れた研究成果が世界に知られていないことが残念
だったので企画したのであるが、その中に部分流の研究
も詳しく紹介した。10年もかかって1988年にやっと出版
された。したがって私の部分流の研究も日本で発表され
た1961年の27年後に英語圏に名乗り出たことになる。

なお論文が掲載された数年後にCollinsの執筆した物
理化学分野の本「Flow of Fluid through Porous Mate-
rials」を見ていたら、2種の液体の置換を扱った項が
あった。そこではフィンガー流が生じることが記述され
ていた。水と空気の場合には成層状態でないと部分流は
生じないが、粘性の異なる2液体の置換では均一層でも
部分流が生じる場合があることを知った。その時には驚
いて、思わずその出版年を見た。それは1961年で私の論
文と同じだった。対象が違うといっても、先を越される
のは面白くないのでほとんどの記憶がある。

研究成果は一日も早く発表したほうがよい。最近の若
い研究者の中には立派な成果をもちながら、大切にパソ
コンの中に保管して書かない人がいる。もったいない。
世界のどこかに同じことを研究している人がいることを
忘れてはいけない。自分でも永く持ったままでは書く情
熱も薄れるし、古くなれば賞味期限も過ぎていく。なに
よりも研究者としての社会的責任が果たせない。

論文の閲読にも問題がある。繊細な若い研究者の気持

ちを萎えさせるようなマイナスの閲読はいけない。あく
までも本人の発表の自由と権利の問題である。掲載の方
向に進むようなアドバイスであってほしい。

6. その後の研究～毛管力の解析、そして離脱

私の部分流の研究はその後、「3成層の降下浸潤」と「 n
成層の場合の解析」、「層の境界が傾斜している場合の降
下浸潤」、「均一層水平浸潤」、「2成層水平浸潤」、「均一層
上昇浸潤」と進んだが、それぞれに興味ある事実が明ら
かになった。これらの研究は後に述べる毛管力の研究と
一体になって、私の博士論文を構成し、その全容は東京
大学農地工学研究室で刊行している「研究の資料と記録」
の19集（1971年）に特集号として印刷された。また前述
の「Soil-Water Interactions」にもかなり記載した。

浸潤においては前進毛管力と平衡状態の静止毛管力が
重要な役割を担う。それで次ぎに粒子層中の毛管力の研
究に取り組んだ。最初は間隙セルの中の間隙径と毛管力
の関係を調べ、次ぎに粒子層の毛管力の研究に移った。
その際粒子層の間隙を確率的伝達のシステムとしてとら
えたが、これは当時最新のシステムだったと思う。

水と空気の界面が構成するメニスカスが、ある間隙セ
ルを通過するかしないかはそのセルの大きさに依存する
が、それを確率 f で表す。粒子層全体ではセルが無数に
つながっているから、粒子層を通過する確率 F はセルの
連結数を n とすれば f の n 乗になる。 n が大きければ0
に収斂してしまう。しかし粒子層では横方向にもセルは
無数のルートでつながっているから、横を通って進むこ
とが可能である。その確率も計算して F を求めた。膨大
な計算なので手計算ではとても無理だとあきらめていた
のだが、丁度コンピュータが使える時代になったので、
計算が可能になった。ある水圧の際にある高さ（または
水圧）にあるセルが水で満たされるのか、空になるのか
の確率 F が求められた。この確率 F から水分量が求ま
り、いわゆる毛管水分分布曲線 $\theta(p)$ が理論的にえられ
たのである（田淵, 1972）。

この研究は「Soil Science」に3編の論文（1966 a,
1966 b, 1971）として発表した。部分流の研究で懲りたの
で、今回は国際誌に投稿した。先に述べた「Soil-Water
Interactions」にも紹介した。しかし今度は日本の研究
者にあまり知られない結果になったようで残念に思っ
ている。毛管水分分布曲線の理論的誘導というだけでな
く、飽和に近い領域で水分と水圧が一価関係になりえる
ことを証明した画期的成果だと自負しているからであ
る。それで「Soil-Water Interactions」の初版の表紙に
はその模式図を使った。

浸潤の研究については圃場レベルで部分流を確認した

いと思ひ、北海道の火山灰地帯で調査した（田淵ほか、1970）。毛管力についてはより細かな解析を間隙セルで行う計画を立てていた。しかし茨城大学へ1972年に移り、そこで霞ヶ浦の水質汚濁と遭遇して水質環境の研究に没頭するようになった。それで私は浸潤や毛管力の研究から離れていったのである。

その後、フィンガー流については多くの研究者たちによって、色々の角度から解析が進められている。日本では長 裕幸、安中武幸、川本 健氏などの研究がある（長、1995、2005；安中ら、1996、2005；川本ら、1996、2004）。また本年、取出伸夫氏らによって翻訳出版されたJury and Horton 著「土壌物理学」には外国の研究が多く紹介されている。フィンガー流は単なる湛水成層浸潤下の流れとしてだけでなく、不安定流のひとつとして広範囲に扱われている。

以上が部分流発見に関連する想い出話である。振り返ってみると、浸透ゼミや土壌物理研究会の発足、アクリル円筒の登場など多くの幸運に恵まれた。特に山崎不二夫先生をはじめとする大勢の素晴らしい方々と出会って、研究を進めることができたことが大きい。すでに亡くなられた方も多いが、各位に心からの敬意を表す。また本稿の執筆に当たってお世話になった長谷川周一、取出伸夫両氏に感謝の意を表したい。

引用文献

- 安中武幸・出澤重祥（1996）：ガラスビーズ成層の浸潤過程で生起する fingering 現象の特徴，農業土木学会論文集，**183**：79-88.
- Annaka, T. and Hanayama, S. (2005) : Dynamic water entry pressure for initially dry glass beads and sea sand, *Vadose Zone Journal* **4** : 127-133.
- Budagovskii, A.I. (1955) : Infiltration into the Soil, *Izv. Acad. Nauk. SSSR*. (村本圭一・長田 昇・田淵俊雄共訳；土壌中への水の浸潤，研究の資料と記録 9号 1959).
- 長 裕幸（1995）：フィンガリング流の3次元的な形態について，農業土木学会論文集，**179**：11-20.
- Cho, H. de Rooij, G.H. and Inoue M. (2005) : The pressure head regime in the induction zone during unstable nonponding infiltration : theory and experiments, *Vadose Zone J.*, **4** : 908-914.
- Collins, E.C. (1961) : *Flow of Fluids through Porous Materials*, Reinhold, New York.
- Green, W.H. and Ampt, G.A. (1911) : *Studies on soil physics, Part I. The flow of air and water through soils.* *J. Agr. Sci.*, **4** : 1-24.
- Hill, D.E. and Parlange, J.Y. (1972) : Wetting front instability in layered soils, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **36** : 697-702.
- Hillel, D. (1980) : *Applications of Soil Physics*, Academic Press, New York.
- Iwata, S and Tabuchi, T. with Warkentin, B.P. (1988) : *Soil-Water Interactions*, Marcel Dekker, New York.
- Jury, W.A. and Horton, R. (2004) : *Soil Physics*, John Wiley & Sons, Inc. (取出伸夫監訳，井上光弘・長裕幸・西村 拓・諸泉利嗣・渡辺晋生訳；土壌物理学，築地書館，2006).
- 川本 健・宮崎 毅・中野政詩（1996）：フィンガー流の形態による塩分溶脱効果の相異，農業土木学会論文集，**186**：89-96.
- Kawamoto, K. Mashino, S. Oda, M. and Miyazaki, T. (2004) : Moisture structures of laterally expanding fingering flows in sandy soils, *GEODERMA*, **119** : 197-217.
- Philip, J.R. (1975) : The growth of disturbances in unstable infiltration flows, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **39** : 1049-1053.
- Raats, P.A.C. (1973) : Unstable wetting fronts in uniform and nonuniform soils, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **37** : 681-685.
- Roge, A.A. (1955) : *Soil water*, *Izd. Akad. Nauk. SSSR*. (山崎不二夫監訳，長田 昇・田淵俊雄訳；土壌と水，東京大学出版会，1963).
- 田淵俊雄（1959）：負圧浸透について，土壌の物理性，**1**：9-15.
- 田淵俊雄（1960）：浸潤とそれに続く浸透（1），農業土木研究別冊，**1**：13-19.
- 田淵俊雄（1961）：浸潤とそれに続く浸透（2），農業土木研究別冊，**2**：27-36.
- Tabuchi, T. (1966 a) : Theory of suction drain from the saturated ideal soil, *Soil Science*, **102** (2) : 161-166.
- Tabuchi, T. (1966 b) : Experiment on suction drain from an ideal soil, *Soil Science*, **102** : 329-332.
- 田淵俊雄・中野政詩・八幡敏雄・佐々木清一・前田隆・矢沢正士・丸谷典弘（1970）：新期火山成層土における水分移動に関する研究，農業土木学会論文集，**31**：1-9.
- Tabuchi, T. (1971) : Theory of suction drain from the saturated ideal soil 2, *Soil Science*, **112** (6) : 448-453.

田淵俊雄 (1971): 粒子層における「浸潤と毛管力」, 研究の資料と記録, **19**: 1-121.
田淵俊雄 (1972): 確率システムと毛管水分分布曲線, 土壌の物理性, **27**: 8-9.
山崎不二夫 (1943): 土壌の急降下毛管浸透の負圧につ

いて, 農業土木研究, **15** (1): 26-40.
山崎不二夫 (1948): 成層土壌降下浸透に関する研究, 東京農専学術報告, 1号及び研究の資料と記録, 6集, 再版 (1958).

要 旨

成層浸潤下で部分流 (フィンガー流) を発見し, その成因を解析した田淵俊雄の研究とその当時の背景について紹介した。上層が細粒で下層が粗粒の成層状態で湛水浸潤を行い, 浸潤前線が下層に到達した後に層の一部しか流れない「部分流」が生じることを発見した。このような流れは当時知られていなかったことである。その成因を水圧分布から解析して, 下層で部分流が生じるための条件式 ($q_3 < K_2$) を得た。その際浸潤強度は一定になることも示した。逆に $q_3 > K_2$ の場合には部分流が生じないことを実験で確かめた。この特殊な流れはフィンガー流として多くの研究者たちによって取り上げられるようになり, 成層浸潤の研究は新たな展開の時期を迎えた。

受稿年月日: 2006年4月13日

受理年月日: 2006年5月15日