



# 「古典を読む」への誘い

長谷川周一<sup>1</sup>

## Invitation to review classical studies

Shuichi HASEGAWA<sup>1</sup>

### 1. はじめに

「土壌の物理性」140号(2018)の会務報告を見て驚いたのは、学生会員が正会員の30%を占めていることである。「古典を読む」を始めた頃に380名ほどだった正会員数が240名と大きく減少していることは大変残念ではあるが、一方で学生会員は増えて最近では50名を超えていることも多い。学生会員の割合がこれほど多い学会というのも珍しい。そこで、学生会員向けのサービスが出来ないものかと考えて、思いついたのが「古典を読む」への誘(いざな)いである。すべての「古典を読む」に簡単な紹介文を付けて、若者の知的好奇心をくすぐることである。

講座「古典を読む」を開始するに当たり、担当の取出伸夫編集委員が書いた紹介文の中には次のような記述がある。『土壌物理の研究は、飽和流れのダルシーの法則に始まり、バッキンガム、リチャーズらによって不飽和流れの定式化へと発展し、その後いくつかの歴史に残る研究と共に発展してきた。しかし理論構築の多くは、1960年代までの土壌物理の発展段階に行われており、その後は、そうした理論の応用と検証が中心であったと思われる。—略—土壌物理の新たな展開を考えると、改めて土壌物理の歴史に残る古典を振り返ることの意義を痛感したことが、この講座を始めきっかけである。とりわけ、これからの土壌物理の発展に対して中心的な役割を担う若手研究者、大学院生には、歴史に残る研究の洞察力の鋭さを再認識していただき、この講座が今後の研究の手がかりを提供できればと願っている。』

このような意図で101号(2005)から始まった講座は、最初の3年はほぼ毎号に掲載され、その後は忘れていた頃にぼつぼつと掲載され140号(2018)までに21報となった。若者が研究テーマを選ぶきっかけは様々だろうが、研究を深化させる過程ではかならず、自分が対象としている課題は“いつからどのような背景のもの

とで発展してきたのか”に興味を持つはずである。以下に紹介する「古典を読む」に取り上げられた論文は、当該分野における一里塚(landmark)として読み続けられている。そしてその多くは、明快で複雑では無いという特徴を持っている。複雑化するのは後の研究者があれこれと追加すべき要因を加えるからであり、張りぼてのような、難しい論文になってしまうこともままある。これから研究を深化させるべく努力をしている若者を惹きつける論文がきっと見つかるはずである。

学会のホームページの「論文ダウンロード」を早速訪ねてみてください。以下の紹介では内容を分かりやすくするために、学会誌に掲載された論文題名ではないことに注意してください。

### 2. 論文の紹介

**2.1 Taylor (1953) 著「毛管内をゆっくり流れる溶媒中における溶質の分散について」**

石黒宗秀・取出伸夫, 101: 59–67 (2005)

移流(ダルシー流)と拡散に比べると、分散は溶質移動の中で初めて習うので、直感的に理解しにくい現象であろう。例えば、水で満たされた毛管内に黒インクを流すと、初期には黒インクの先端は放物線を描くが、しばらく流れると黒インクの先端の放物線は崩れ、水とインクが混じり合った状態になる。これが分散現象であり、分子拡散と管内の流束分布に規定される。Taylorは溶質移動を偏微分方程式で表し、これを解いて、分子拡散の影響が重要なことを示した。つまり、溶質分子が毛管半径方向に十分拡散できる長時間後の観測では水とインクが十分混じり合った状態となる。Taylorは優れた物理的洞察力を持ち、数学を自由に操りながら、単純明快な手作りの実験装置を用いて分散現象の本質を明らかにした。

**2.2 Philip & de Vries (1957) 著「温度勾配下の多孔質体中の水分移動について」**

坂井 勝・取出伸夫, 103: 105–112 (2006)

土中に温度勾配があると、水蒸気圧の大きな高温から低温に向かって水蒸気は移動する。そこで、Fickの

<sup>1</sup>Professor Emeritus Hokkaido University, Kita 9 Nishi 9, Sapporo, 060-8589 Japan. Corresponding author: 長谷川周一, 北海道大学名誉教授. 2019年2月19日受稿 2019年5月7日受理

法則で水蒸気の拡散量を求めると、実際に観測される水蒸気量の 1/10 程度にしかならないという。そこで、Philip & de Vries は土粒子間に生じる液層では水蒸気の凝縮と蒸発に伴う水移動が生じ、気相中の水蒸気拡散に加わると考えた。また、土の平均温度勾配に比べて気相の温度勾配が大きいことを考慮することで初めて実験と理論の差異の物理的な説明が可能となった。ミクロな現象を見逃さない洞察力、物理的直感力のすばらしさを示した論文である。

### 2.3 田淵俊雄 (1961) 著「部分流 (フィンガー流) の発見とその背景」

田淵俊雄, 103: 113–118 (2006)

自らの発見を紹介した貴重な論文である。部分流を発見したのは 1959 年で 24 歳の大学院生の時で、室内実験によく使われる安価な透明アクリル円筒が始めただけの頃である。円筒の下層に 1.0 mm のガラス球を、上層に 0.2–0.3 mm のガラス球を充填した成層に浸潤実験を行ったところ、下層に太い“つらら”がぶら下がったような流れが外から観察された。部分流の発見である。論文は日本語で書いたため、この発見は海外ではほとんど知られなかったと述懐している。本講座の執筆をお願いした当時の田淵先生は 70 歳を超えており、若い研究者に対する期待も述べている。

### 2.4 Yoshinaga & Aomine (1962) 著「黒ボク土中のイモゴライトの発見」

和田信一郎, 104: 119–126 (2006)

我が国の畑面積の約半分を占め、主要な土壌である黒ボク土中にアロフェンとは異なる新たな粘土鉱物を発見した論文である。この未知の鉱物を同定したのは吉永長則と青峰重範で、基本的な性質を明らかにしたうえで、イモゴライトと命名した。その特徴は繊維状の形態を持つアルミニウムケイ酸塩鉱物で、酸性のみで分散することである。イモゴは土壌を採取した地域で呼ばれていた風化火山灰層の名前である。新発見には最先端の研究手法と注意深い観察の両方が不可欠であることを示している。また、この論文にはイモゴライト研究のその後も紹介されている。

### 2.5 Miller & Miller (1956) 著「毛管流現象のための物理理論」

宮崎 毅, 104: 127–139 (2006)

兄で物理学者の E.E. Miller と土壌物理学者の弟 R.D. Miller は粒径の異なる土壌間の相似性をもとに、1 つの土から別の土の物理性を導くことが出来るという理論を発表した。簡単な例では毛管の直径 (特性長) が  $n$  倍になれば毛管上昇高は  $1/n$  に、毛管の流速は  $n^2$  倍となる。宮崎は 1950 年代のこの相似性理論が厳密性を外して 1970 年代になるとスケーリングという手法が開発されてフィールドの不均一性を表す指標として用いられるようになったこと、宮崎らが非相似モデルまで展開したことも紹介している。

### 2.6 Green & Ampt (1911) 著「浸潤の式」

長谷川周一, 105: 111–115 (2007)

現在の教科書で見る Green & Ampt 式は、浸潤部水分量は一定、浸潤前線に働く前進毛管力は時間と浸潤距離によらず一定と仮定すると、ダルシー式を適用することにより容易に求まる。しかし、Green & Ampt は土壌を毛管の束と考え Poiseuille 流を適用して 1911 年に浸潤の式を導いている。我が国では Green & Ampt よりも 1950 年代にロシアのブダゴフスキーの作用力で導かれた浸潤の式の方がよく知られている。浸潤現象は 1960 年代に Philip により理論的に解析されている。

### 2.7 Mualem (1976) & van Genuchten (1980) 著「水分特性曲線 – 不飽和透水係数連結モデルが出来る過程」

小杉賢一郎, 106: 47–60 (2007)

HYDRUS のような数値解析モデルに使われている、水分特性曲線と不飽和透水係数を連結させた Mualem & van Genuchten モデルは便利な道具だと利用している読者も多いだろう。透水係数を水分特性曲線から予測する試みは、1950 年の Childs & Collis George から始まり、第 18 回で取り上げた Millington & Quirk モデルなど、いくつか提案されているが、小杉は Mualem モデルが平易で経験的に適合性が高いことをあげている。一方、van Genuchten の水分特性曲線関数は実測値に対する高い適合性と閉形式の比透水係数関数が導かれるという利便性を理由に導入された。そして、この 2 者が合わさったのが Mualem & van Genuchten モデルで、被引用回数ずば抜けて多いという。モデルに興味を持つ諸君にはこの論文を是非読んで欲しい。

### 2.8 Takagi (1960) 著「2 成層土壌を降下する水の流れの解析」

筑紫二郎, 107: 97–106 (2007)

我が国の不飽和の水移動は上層が細粒で下層が粗粒という成層土を対象とした研究が多い。筑紫によるとそれは水田では耕盤があり成層土壌を考慮する必要があったという。最近の教科書では不飽和流は土壤空気が大気圧に等しい不飽和 (開放系) しか対象となっていないが、土壤空気が大気と連続していない不飽和 (閉鎖系) もある。高木が解析の対象としたのは成層土で開放系の水移動である。ダルシー流が不飽和土に対して成り立つかがはっきりしていない時代に、高木の論文が英語で Soil Science 誌に発表されている。我が国よりも海外で評価されたという。筑紫は閉鎖系の浸透も含め高木以降の研究も紹介している。

### 2.9 Topp ら (1980) 著「TDR : 電磁波を利用した土壌水分計測」

宮本輝仁, 108: 99–105 (2008)

体積含水率は定体積の土中に含まれる水を 105 °C、24 時間乾燥して得られる基本的な物理量であるが、この論文が出るまでは、正確に予測する方法は存在しなかったといっても過言ではない。Topp らの優れた点は土の誘電率と体積含水率関係が、多くの土で 1 つの同一の曲線 (universal equation) で表現出来ることを示した点である。宮本は、その後の研究において黒ボク

土など、この曲線で表現できない土についても触れている。この論文は、土の誘電率に関する理論を展開するのでは無く、研究者 Topp がどのような生き方をしたかを紹介している。

## 2.10 Richards (1930) 著「不飽和流浸透流の基礎方程式」

登尾浩助, 109: 75–79 (2008)

Richards は Darcy や Buckingham とならんで土壌水移動の研究に必ず出てくる名前である。Richards は飽和 Darcy 流を不飽和にも適用した。そのとき、空気の部分を土粒子と置き換えれば Darcy 則が使えろと考えたそうだ。登尾は、不飽和ダルシー則と連続の式を組み合わせて Richards 式が導入された過程から拡散方程式に至るまで広く紹介している。また、不飽和透水係数を測定するための装置を Richards が考案したことから、新しい知見を得るためには、新しい実験装置の開発が必要であることも指摘している。

## 2.11 岩田進午 (1972–1974) 著「土壌水に関する熱力学的考察」

石黒宗秀・溝口勝, 112: 27–35 (2009)

この講座を企画した時点では本人による執筆を予定していたが、2006年に亡くなられたため、岩田さんと身近で熱力学を学んでいた2人が土壌水の熱力学の研究を紹介している。岩田さんの発想は、「土粒子近傍の水のエネルギーを低下させている主要な要因は何か」という点である。岩田の論文を読むためには熱力学が必修である。そこで、石黒・溝口は分かりやすく解説を加えながら研究を紹介している。マトリックポテンシャルや浸透圧は馴染みのあるポテンシャル成分であるが、土壌水分が多いときと少ないときとでは土壌水のポテンシャルに影響を及ぼす要因は変化する。読者には熱力学の授業を受け、土壌水のポテンシャルに対する正しい知識を学んで欲しい。

## 2.12 Webster ら (1971, 1975, 1980) 著「土壌の理化学性の空間的ばらつき」

原口暢朗, 113: 43–51 (2009)

一枚の畑作土の平均含水比を求めようと試料を多数採取したとき、山側の含水比が谷側の含水比よりも高いという空間的なばらつきが認められることがある。今では計算ソフトもあり、空間的位置関係を考慮した内挿法であるクリギング (kriging) を使っている人もいるだろう。Webster は土壌調査分類に横たわる難問である土壌のばらつきを野外土壌の実態と関係づけて解釈をしようと試みていた。そして空間的相関については Geostatistic (地球統計学, 地質統計学) 手法を土壌学いち早く取り込んで先駆的な仕事をした。

## 2.13 Parlange & Hill (1976) 著「土壌における浸潤前線不安定性の理論的解析」

安中武幸, 114: 81–86 (2010)

「古典を読む」の第3回では田淵による「部分流 (フィンガー流) の発見とその背景」を取り上げた。第13回の本論文では、浸潤前線がどうして不安定化し、フィ

ンガー流が発生するかについて、水分拡散係数を用いた理論的な検討を紹介している。本論文はそれ以降の研究に大きな影響を与えたが、現在に至るまで給水条件、土壌特性とフィンガーの大きさや本数の関連性を明快に示す理論は未だにないという。

## 2.14 Sakaguchi ら (2009) 著「液島モデルからマイクロ・ヒートパイプモデルへ」

粕淵辰昭・百瀬年彦・坂口巖, 119: 53–64 (2011)

温度勾配下の土中の水移動は、「水蒸気の拡散移動－上流側メニスカスで凝縮－下流側メニスカスで蒸発－水蒸気の拡散移動」という本講座の第2回に登場した Philip & de Vries によるモデルが受け入れられてきた。本論文は、Philip & de Vries が引用した論文の解釈は間違っており、したがってモデルは受け入れられないと結論し、ヒートパイプ現象によってのみ合理的な説明が出来ると指摘している。ヒートパイプとはパイプの内壁に毛細管構造を有したパイプであり、土そのものでもある。パイプの一端に熱を加えると、高温側で気化した水が低温側で凝縮し、液態の水分が多くなった低温側から高温側に液状水が流れる現象であり、高温側から低温側へと熱が輸送される。普遍的と考えられた既往のモデルを否定したという意味では他の「古典を読む」と大変異なる。この論文には指導教員と2人の大学院生がどのようにして課題を克服してきたかも紹介されており、読み物としても楽しい。

## 2.15 Gardner ら (1922) 著「テンシオメータの開発」

宮本輝仁, 120: 61–65 (2012)

次の本講座第16回に出てくる Buckingham (1907) は不飽和土壌水の移動に関する論文を発表したが、大気圧よりも低い土壌水圧を測定する方法は無かった。本論文は、この大気圧よりも低い土壌水圧 (今ではマトリックポテンシャルと言う) を測定するテンシオメータとその開発に携わった人について紹介している。理論と測定法が研究の発展には不可欠であることが分かる論文でもある。ちなみにテンシオメータは Richards & Gardner (1936) が付けた名前だそうだ。Richards は本講座第10回に登場している。また、Gardner はアメリカ土壌物理の大御所であり息子に W.R Gardner, 甥に W.H. Gardner がいる。

## 2.16 Buckingham (1907) 著「不飽和土壌水分移動の研究」

宮崎毅, 122: 59–69 (2012)

不飽和土壌水の移動の考え方を明確にした Buckingham の業績を他の資料も加えながら解説している。今ではよく知られている不飽和流の核心であり、不飽和透水係数は土壌水分の関数であること、マトリックポテンシャルは含水比の違いに依存すること (すなわち水分特性曲線) を明確にした研究者である。さらに、不飽和透水係数と水分容量の積で水分拡散係数が表せることも示している。宮崎は現代用語を併用し、Buckingham に関する追加の資料も含めて解説してい

るので読みやすい。1907年の論文では欠落していた結論においては、有効な土壌水分計の必要性を指摘している。Buckinghamが飽和流のDarcy則を知っていたかどうかは不明なようである。

**2.17 Rhoadesら(1976)著「土壌の電気伝導率から土壌水の電気伝導率を推定する」**  
柳井洋介・宮本輝仁・取出伸夫, 125: 35–41 (2013)

本講座第9回で取り上げられたTDRは、誘電現象で土の誘電率(水分量)を伝導現象で土の電気伝導度を測定できることが知られ、1990年代後半には我が国でも非常に普及した。土の電気伝導度は固相、液相そして気相(電気を通さない)の量と連続性に関するだろうことは直ぐに頭に浮かぶ。さらに、液相(土壌水)の電気伝導度は水に解けている溶質の濃度を反映する。このような時代背景のもと、土の電気伝導度の計測法とその内訳を長年追究してきたRhoadesらの研究を再度見直した論文である。Rhoadesらの土の電気抵抗は固相と液相の電気抵抗の直列回路で表示されること、そして抵抗は土壌水分量に比例するというモデルは今でも使われている。

**2.18 Millington & Quirk (1960) 著「多孔質媒体中の物資移動モデル」**  
濱本昌一郎・西村拓, 128: 39–46 (2014)

移流は圧力勾配と透水係数の積で、拡散は濃度勾配と拡散係数の積で表される全く異なる物理現象である。ところが、多孔体においては固有透過度(粘性と密度の影響を考慮することで流体に依存せずに多孔質体の構造に由来する透過係数)と拡散係数が同一の間隙構造モデル(流体の移動する間隙割合と、異なる間隙径間の連結性の確率を考慮したモデル)から導き出せることを示した論文を紹介している。その理由は拡散の平均自由行程が非常に小さいことから拡散現象は間隙径に依存しないと仮定して間隙構造モデルを使ったことである。透水現象に適用された間隙構造モデルはMillington & Quirk後も改良されて現在ではMualem & van Genuchtenモデルが主流であることは本講座第7回で紹介した。一方の拡散係数は現在でもMillington & Quirkモデルが良く用いられている。それはMillington & Quirkモデルが実験結果をうまく説明することでもあるが、濱本・西村はさらなる検討が必要であるとして最近の研究を紹介している。

**2.19 Allison (1947) 著「微生物が土壌の長期浸透に及ぼす影響」**  
関勝寿, 131: 45–50 (2015)

透水係数が測定開始後の時間の経過に伴って異なることに気がついている人もいるだろう。Allisonは長期浸透試験により、透水係数は初期に低下し、その後増加するものの再び長期にわたって低下するという事実を発見した。Allisonは特に長期にわたる低下の原因が微生物自体かその代謝物質による間隙の詰まり(biological-clogging)であることを実験的に確認した。しかし、その後の研究では微生物以外にガスの発生や

鉄の沈殿が原因で透水係数が低下することを関は紹介している。浸透時間が長期となる定常法の不飽和透水試験、水田から発生する温室効果ガスと降下浸透速度の期別変動など、身近で検討を要する課題が多いと考えさせられる論文である。

**2.20 Eavis (1972) 著「根の伸長に及ぼす土の硬さ、通気性、水分量の相互作用」**  
佐藤泰一郎, 134: 41–49 (2016)

植物根の伸長は、土の硬さ、土中水不足、土中酸素不足という3つの要因の影響を受けることは一般的な事実として容易に理解出来る。しかし、水分が減れば土は硬くなり酸素不足は解消され、水分が多くなれば軟らかくなると同時に酸素は減少するので、3要因は独立に評価できない。Eavisは、マトリックポテンシャルを6段階、乾燥密度を3段階に変えて充填した砂壤土を用い、エンドウの幼植物根が24時間に伸長する速度を求める実験を行った。その結果を基に、通気効果、水分ストレス、力学的抵抗の相互作用下の根の伸長速度を単一の図にまとめた。佐藤は、Letty (1985)の根の伸長が阻害されない水分領域など、その後の研究も紹介している。

**2.21 田淵(1966)、根岸ら(1972)著「粘土質水田の排水と暗渠に関する先駆的な論文」**  
長谷川周一, 140: 29–34 (2018)

表題に論文名が明記されていない「古典を読む」である。農業基本法(1961)では農業の生産性向上のために機械化を図ることが明記された。水を張り代掻きをして軟らかくした水田において稲刈りの機械化を図るには、排水を強化して農業機械が走行できる地耐力を確保する必要がある。この背景のもとで行われた排水と暗渠に関する研究を紹介した。1つは本講座第3回の部分流を執筆した田淵俊雄(1966)の「粘土質水田の排水に関する研究(I)」で他は根岸久雄ら(1972)による「重粘土地帯水田の土層改良と用排水組織に関する研究(I)」である。田淵は、田面の乾燥は地下浸透に期待できない点を強調している。一方根岸らは、人為的に粗孔隙を作成して排水を強化するための組み合わせ暗渠技術をあみだした。両者とも粘土質土壌の保水の特徴から、排水と地下水位は無関係であり、排水は気相率の増加に結びつかないことを指摘している。

### 3. おわりに

2005年から2018年までに「古典を読む」に掲載された21編の論文を紹介した。全ての論文を十分に理解し、噛み砕いて紹介することは筆者の能力を超えていた。しかし、土壌物理分野には多様なトピックがあることを理解し、私の紹介文が研究を深化させるきっかけとなれば大変嬉しい。掲載号、ページ、発行年を確認して、是非読んで欲しい。もし、原著論文が手に入らない場合には、土壌物理学会の事務局(spsyomu@ml.affrc.go.jp)にお尋ねください。