

日本の土壌物理研究の歴史を振り返る

長谷川周一¹

History of Soil Physical Studies in Japan

Shuichi HASEGAWA¹

1. はじめに

土壌物理学の前身である土壌物理研究会が設立されたのが1958年である。50余年を経過し、「土壌の物理性」の第118号が2011年7月に発行された。そこで、今までの学会誌をもとに、土壌物理学の研究成果と社会への貢献を念頭に置きながら、我が国の土壌物理研究を振り返る。また、現在の課題について若干触れてみたい。土壌物理研究会発足以前の土壌物理研究については第5代会長の美園（1956）により紹介されている。

2. 日本の土壌物理研究の流れ

第二次世界大戦の敗戦により、我が国には食糧を増産し、海外からの帰還者を農業分野で吸収しなければならないという大きな命題があった。そのため、生産性の向上と農地の造成が進められ、農業研究の1分野として土壌物理研究が発展してきたが、とりわけ農林省の2つの事業、「地力保全基本調査事業」と「土地改良事業」によるところが大きい。

1959年から1978年まで実施された地力保全基本調査事業は、公立農業試験場が参画し、全国の田畑508万haを対象に25haにつき1地点の頻度で20万点の土壌調査を行った。事業の目的は、我が国農地の生産力を阻害している理化学的要因および地力の剥奪要因などを明らかにすることであった。この成果は1984年に制定された地力増進法に反映されている。一方、戦後にはいくつもの大規模な土地改良事業が行われた。志村（1977）によると、国家的な巨大プロジェクトを遂行するに当たって課題となる数々の研究テーマは大学、研究機関、民間機関に振り分けられ、まさに巨大なプロジェクトチームが行政機構を中心に学会、研究機関も含めて全国的規模で組織された。このような事業で得られた土壌物理の研究成果は、多くの土地改良事業計画設計基準に反映されている。Table 1には主な農業政策と土壌物理研究会・土壌物理学会の活動を、Table 2には戦後の大規模土地改良事業の例を示した。Table 2から、敗戦から土壌物理研究会が発足する1950年代後半までに食糧増産に向けた大規模な土地改良事業が開始されていること

がわかる。1950年に勃発した朝鮮戦争の特需で我が国の重工業が復活し、都市と農村に格差が生じてきた。また、アメリカの小麦戦略によりキッチンカーが全国を巡回し、小学校の給食では脱脂粉乳とコッペパンが出された。1950年代後半には白米を食べるとバカになるという宣伝が慶応大学医学部教授によりなされ、朝日新聞の天声人語では、日本の食生活は100年も遅れている（1957年9月3日）、池の鯉や金魚に残飯^注ばかりやっていると、ブヨブヨの生き腐れみたいになる。パンくずを与えていれば元気だ（1959年7月28日）といった日本農業つぶしの合唱がすでに始まっている。

3. 研究会設立から10年を区切りとして「土壌の物理性」から研究の動向を読む

初代の会長である山中（1959）は「土壌の物理性第1号発刊に際して」において、最後の文章を「私達は土壌を1つのテスト用のMaterialとして取り扱う基礎的なものと、現地のActiveな状態とを生産的に関聯させて研究することを使命とすべきであり、また新しく発足したこの研究会の発展のための使命でもあると考える。」と締めくくっている。ここで、Materialとは、土壌を現地から切り離し、調整処理されたものであり、山中は作物と無関係に行われるMaterialを対象とした土壌物理の方向は、これが一部の専門家の「仕事」に限られる傾向を助長し、同時に土壌物理の「伸び悩み」を招来して来た事は明らかであるとも述べている。また、第16号の巻頭言で会長の八幡（1967）は、農学の諸分野はとりわけ行政と深く関係し、土壌肥料、農業土木、農業機械、栽培分野が系列化している中で、多分野が集まった研究会の存在意義を強調している。以上のように、研究会の方針は、土壌の物理性を核に、室内の物性研究に片寄らず、また現場の紹介に留まらないことに注意をしているようであり、初期の研究内容は現在よりも多様である。

3.1 1959年から1970年まで（第1号から第22号）

社会的背景としては、農業基本法（1961）が制定され、稲作の保護と畑作からの撤退（選択的拡大）が行われた。農村の労働力が工業に流れ、出稼ぎ農民の増加と兼業化が進んだことが挙げられる。この時期の研究としては、

¹Hokkaido University, Kia 9, Nishi 9, Kita-ku, Sapporo 060-8589, Japan. Corresponding author: 長谷川周一, 北海道大学名誉教授
2011年11月15日受稿, 2012年1月11日受理
土壌の物理性 120号, 5-14 (2012)

注: 広辞苑の初版(1955)によると、残飯は「食い残しためし」という意味であり、第5版(1998)に見られる「食べ残しの食物」という意味はない。

Table 1 主な農業政策と土壌物理研究会・土壌物理学会の活動

1952 農地法, 施肥改善事業の開始 (食糧増産へ)	1975 ミカンの生産調整を開始
1958 土壌物理研究会発足	1979 「土の物理学」, 「土壌の物理性と作物生育」を発行 土壌環境基礎調査 (1998 年まで)
1959 地力保全基本調査事業 (1978 年まで) 食料自給率は約 80%	1984 地力増進法が公布される (1997 年に改正) 第 50 号レビュー号
1961 農業基本法	1988 牛肉・オレンジの自由化
1963 小区画, 不整形の水田から 0.3ha へ整備事業開始	1989 食料自給率が 50% を切る
1964 出稼ぎ農民が 100 万人を超える	1993 GATT ウルグアイ・ラウンド合意 (コメのミニマム アクセス), イネの大凶作 (作況指数 74)
1965 機械化を前提とした区画整理を主とする 大規模圃場整備事業の開始	1999 食料・農業・農村基本法 土壌物理研究会から土壌物理学会へ
1967 コメの完全自給を達成	2005 第 100 号記念号
1971 コメの生産調整を本格的に開始 食料自給率が 60% を切る	2006 食料自給率が 40% を切る
1973 第 1 次石油危機 (アメリカのダイズ輸出規制)	2011 TPP 参加表明で大議論
1974 土壌物理用語事典を発行	
GATT: 貿易と関税に関する一般協定	TPP: 環太平洋戦略的経済連携協定

Table 2 大規模土地改良事業の例

名称	期間	備考
相模原畑地灌漑	1948-1963	完成後著しい都市化により, 施設は廃物化
豊川用水	1949-1963	東三河地区, 農業用水が 72%
根釧原野の機械開墾	1955-1964	1 農家 15 ha, 飼育乳牛は 10 頭, サイロ付き
篠津泥炭地域の 大規模開墾	1956-1971	石狩川右岸の 11,400 ha を大水田地帯へ
愛知用水	1957-1961	農業用水から都市用水主体への切り替え
八郎潟の干拓	1957-1977	1 農家 15 ha, 完成時にはイネの作付制限

例えば, 土が受蝕性か否かを定量化するには, 室内実験において土のどのような特徴を指標にすべきかといった研究が多い. 土の特徴を調べるための測定法についての特集が見られる. 測定法に着目してきたのは本学会の特徴で, 最近にいたるまで繰り返しシンポジウムで取り上げられている. 土壌水と pF との関わりについては, pF で一律に解釈するよりも, ソビエト土壌学の影響を強く受け, 土壌水の存在形態が強調されている. また, 液性限界や塑性限界といった力学的な転移点を pF で解釈していた. 「土壌水運動の諸系列」という総説が 4 回にわたって連載された. この総説は飽和・不飽和土壌水の運動に関する国内外の主要な研究を取り上げており, 我が国の水移動研究に大きな影響を与えた. 畑地の研究では, 作物の生育に必要な酸素濃度や通気性の研究があり, それらの考え方は現在でも通用する. 農業機械と土壌の物理性についての研究も非常に多い. 当時は馬耕からトラクタに移行しはじめた頃であったため, トラクタ走行のために必要な土壌硬度とトラクタが作る耕盤の 2 つの力学性が同時に検討されていた. モンサント社のクリリウムが高分子でありながら水溶性であり, 優れた団粒形成能を有するということが話題になったようであり, 国産の高分子系の土壌改良資材である polyvinyl alcohol (PVA) や無機資材のベントナイトを用いて保水性改善や浸透抑制に応用する研究が行われていた.

欧米において土壌物理学が発展してきたのは畑地であ

り, 土の保水性と浸透性が主要なテーマであった. 我が国においても欧米の知識に湿潤な我が国の気候を反映した畑地灌漑の研究が進められており, 1960 年代には畑地灌漑の考え方はすでに確立している (例えば, 椎名, 1963). 一方水田においては, 食糧増産のために開田された火山灰地の水田に湛水が出来ないという問題が起き, 破碎転圧工法 (石川ら, 1964) が開発されている. 迅速漏水量測定装置 (山崎ら, 1960) が開発されたのもこの頃である. また水田の機械化を推進するためには地耐力の確保が不可欠であり, 重粘土水田の排水の研究が精力的に行われた. そして, 暗渠排水における亀裂の役割 (田淵ら, 1966) が明らかにされ, 土層改良と用排水組織に関する研究 (根岸ら, 1972) が行われ, 暗渠疎水材としてのモミガラの利用も始まっている. このような成果を見ると, 我が国に特徴的な水田の暗渠排水技術は 1960 年代にほぼ確立されていたと見るべきであろう. 水田の研究では, 水を張った水田下層土において気相が連続した不飽和浸透 (開放浸透) が生じるという発見がある. 水田の造成が盛んであった時代で, 用水量の見積もりと確保が不可欠であり, 減水深測定装置の開発 (狩野ら, 1961) に加え, 適正減水深, 適正浸透量という用語も登場する. 以上のように, 1960 年代は畑や水田の土壌物理が大いに発展した飛躍の 10 年であった.

3.2 1971 年から 1980 年まで (第 23 号から第 42 号)

コメの完全自給は Table 1 に見るように 1967 年に達

成され、1970年代はコメの減反政策が実施された。一方で財界を中心に国際分業論など日本農業不要論が声高に叫ばれた。田植機やコンバインの導入が進み、機械化貧乏という言葉も生まれた。1970年代においても、作物別、土地利用別に土壌の物理性や水収支が研究されている。施設栽培において灌水点が高い理由として溶液濃度が高いことが指摘され、ビニールマルチ下の二酸化炭素濃度が測定されている。農地造成に伴う土壌劣化や傾斜地の土壌侵蝕については、論文数は少ないものの継続的に研究が行われている。プラウ耕および牽引性能と土壌物理性など機械分野の研究がある。すでに、環境問題が研究の対象となりはじめ、水田からの窒素流出を差し引き負荷として考える必要性が強調され、カドミウムに汚染された水田の客土による修復も取り上げられている。重粘土水田における排水に関する目標値が出されると共に、コメの生産調整が本格化したことを背景に、田畑輪換が取り上げられ、排水問題、適切な輪換年数、還元田の用水量、輪換に伴う土壌の変化が研究されている。さらに、境界領域の研究として、微生物の住みか、移流分散方程式による移動現象の解析と硝酸汚染危険度マップの作成などが注目されている。基礎的な研究としては、温度勾配下の不飽和水移動、土の熱的性質が取り上げられている。測定法の紹介は大変に多いが、データロガーやパソコンが普及する以前であった。

アメリカの土壌物理研究に目を向けると、1970年代は電子計算機の発達により、種々の条件下における不飽和水移動が解析された10年であった。1950年代にpF4.2までの土壌水分と不飽和透水係数が測定され、1960年代はRichardsのポテンシャル方程式や拡散方程式の数値解法が工夫された時代であった。1970年代を代表する研究の1つとしてSPAC(土壌-植物-大気系の水の流れ)を挙げることが出来る。SPACは我が国では流行とならなかった。このモデルは植物の吸水現象を物理的(機械的)に理解するには役に立ったが、解析に必要とされるパラメータの値が研究者により異なること、植物という生き物に対して余りにも機械的に処理したため、1980年代には余り省みられることが無くなった。

3.3 1981年から1990年まで(第43号から第61号)

農業を巡っては、中核農家の育成を目指していた。同時に、水田転換畑による畑作物の自給率の向上を目指す政策や試験研究が活発に行われた。水田の用排水路の管路化など装置化水田の動きも見られた。一方では農業由来の硝酸汚染などの環境問題にも目が向けられた時代であった。転換畑に関する研究では、畑転換が難しい重粘土を対象とした研究が多く、排水をはじめとして、畑転換に伴うコンシステンシーの変化、理化学性の変化、畑の易耕性の評価に加え、地下水位制御による転換畑での野菜栽培、土性と地下灌漑手法といった研究が多かった。一方では、泥炭地を畑転換することへの問題点も指摘された。作物培地に関する事項としては、施設野菜や普通畑の灌水点に関する研究が見られる一方、湿害に関連してODR(oxygen diffusion rate)やガス拡散、通気性が

取り上げられている。さらに、土中の無機塩の移動、地下水中の物質移動、斜面中の水移動、膨潤性土への浸潤、物質移動における亀裂の役割、凍土中の水移動などに加え、粗孔隙や亀裂が発達した畑の排水など、不均一な場における物質移動が注目された。基盤整備に伴う土の劣化は相変わらず問題であり、土の圧縮特性に対する基礎的な研究も行われた。アメリカで低投入持続的農業(low input sustainable agriculture, LISA)のブームが起きたことから、我が国でも、省耕起、不耕起の研究が報告されている。また、基礎的な分野としては、水分特性曲線から不飽和透水係数を予測するモデルの比較が行われている。測定法に関しては、コンピュータ利用の自動計測、軟X線映像やCTスキャンによる間隙構造や水移動の可視化、近赤外線を利用した水分計などが見られた。研究会発足25周年の第50号は土壌物理研究レビュー号であり、「農業と土壌物理・農業技術の進歩や農業生産の向上に寄与した成果」と「基礎的研究・農業技術の基礎となった成果」とに分けてレビューされた。座談会も行われ、これからの展望について意見が出されている。1つは、土をより深く理解する必要性を主張し、他は、問題が顕在化しつつあった硝酸汚染のような地域環境と温暖化ガスに代表される地球問題に土壌物理は取り組む必要があるという意見であり、先見性が読み取れる。

1980年代の外国の研究トピックを見ると、電算機を使った物質移動解析ブームが一段落し、土の不均一性が着目された時代であった。そして土と作物生産から、土と環境に移行していった時代でもあった。また、学会誌の講座「古典読む」でも紹介されているが、Scaling(古典を読む104号)やGeostatistics(古典を読む113号)といった手法により土の理解を深めた時期でもある。1950年のChilds and Collis Georgeに始まる水分特性曲線から不飽和透水係数を予測するモデルは、Mualem(1976)とvan Genuchten(1980)により完成されている(古典を読む106号)。

3.4 1991年から2000年まで(第62号から第85号)

戦後一貫して増加してきた農業生産が減少に転じ下降を続けた。GATTウルグアイラウンドの合意によりコメの一部自由化(ミニマムアクセス)が行われた。GATTでは農業生産を奨励する補助金が禁止される一方、環境保全目的の補助金は認められた結果、農業が環境保全に果たす役割がEU(欧州連合)や我が国で活発に議論された。また、地球温暖化が注目されはじめた。我が国の農業不要論の声が小さくなってきた。現実の農業との乖離が長いこと指摘されていた1961年の農業基本法が1999年に食料・農業・農村基本法として39年ぶりに制定された。水田農業の研究では、不耕起や直播きと土壌物理性を主体とした新たな展開が模索され、リン酸は根穴を通して下降し、珪酸は枯死根が給源となること、不耕起水田では時々耕起が必要であることに加え減水深の問題が生じることが報告されている。また、開放浸透条件下の鉄やマンガンおよび土中の酸素、炭酸ガス濃度の分布が大型ライシメータを用いて測定された。畑

に関しては点滴灌漑の水分動態、造成後の熟畑化、泥炭土の土層改良、軽石流堆積物の客土と有機物施用効果、土壤侵蝕についてはマサ土の造成畑と土壤侵蝕、クラストの形成、黒ボク土傾斜畑の保全にくわえ、タイ南部や黄土高原の侵蝕も報告され、土壤侵蝕の特集号も組まれた。また、有機物施用とロータリー耕の影響について20年間の長期試験が報告されている。養水分、ガス、排水に対し物質移動の視点から見た土地生産性の評価も行われた。環境に関する研究では、代掻き濁水の防止のために投入するカルシウム塩の種類と投入量についての研究、湛水田の硝酸塩除去モデルの提案と集水域への適用が試みられた。また、「温室効果ガスの動態」、「土壤中における溶解物質の移動」についてのシンポジウムが行われている。さらに、熱帯における持続的農業や半乾燥地の農業問題など、海外の農業問題と土壌の物理性に関する話題も豊富であった。基礎的な研究としては、土壤水の熱力学的な考察が行われた。土壤水のエネルギー概念は岩田が1961年に発表以来、場の概念によるポテンシャル成分の理解や相圧など、我が国の土壌物理学の基礎となりレベルの高さともなっている（古典を読む112号）。また、酸性雨の被害が北ヨーロッパで深刻であった時代でもあり、酸性雨に関連して酸性溶液の浸入と塩類溶脱が主として黒ボク土を対象に研究された。この他、ランダムウォークモデルによる溶質移動の解析、アイスレンズの生成機構、転換畑土壌の沈底容積の減少と鉄の作用メカニズム、浚渫低泥土の乾燥に伴う亀裂発生パターンなどが報告された。測定法に関しては、Topp et al. (1980) による発表以降急速に広まった time domain reflectometry (TDR) が解説された。

20世紀前半にテンシオメータや加圧板などが開発されたことにより、マトリックポテンシャル（毛管ポテンシャル）が容易に測定できるようになり、土壤水の研究は大きな飛躍を遂げた。一方、土に含まれる水分の量を野外で測定するうまい方法は無かった。第2次世界大戦のレーダー技術の落とし子といわれるケーブルテスターを土壌に適用したTDRは土の種類によらずに体積含水率の測定可能とした。このTopp et al. の業績も「古典を読む」（古典を読む108号）に取り上げられている。1990年代をもう少し見ると、施設栽培と土壌の物理性に関する研究、農業機械分野の研究が学会誌からは消えてしまった。なお、本学会の社会的役割は農業技術への貢献であったが、農業と環境の問題が大きくなってきたのを受けて1999年に会則が農業技術及び環境科学の発展に貢献すると変更された。1990年代は、先進国においては土壌物理研究の対象が地域環境および地球環境問題に大きくシフトしていった。OECD（経済開発協力機構）やIPCC（気候変動に関する政府間パネル）の動向に歩調を合わせ、いわゆる国際的なプログラムが大きく成長した時代であった。

3.5 2001年から2011年まで(第86号から第118号)

国際的な貿易自由化の動きがWTO（世界貿易機関）中心に進められる一方で、大国の横暴に対して食料主権

という考え方が出てきてWTO交渉が停滞し、代わって二国間自由貿易のような貿易形態が模索されている。わが国では、北海道農業だけは規模拡大を続け、2005年には1戸当たりの農地面積は19.3 ha となってEUの平均を超えるようになった^{注)}。一方、耕作放棄田は拡大し続け、2005年には約39万 ha に達して埼玉県の面積にほぼ等しくなった。土壌物理の研究では、TDRをはじめとした電磁波を利用した計測法の原理と実際の適用や熱伝導率、対流、Ehなど各種の測定法についての研究が依然として多かった。しかし、これらの計測法を農業生産や環境保全の現場で実際に展開している研究はどちらかというところ少数だった。農業技術に関わる研究としては、堅密土壌の心土改良、客土によるクラスト形成の抑制、基盤整備に伴う生育むらや18年後も解消されないことが報告されている。また、耕起・不耕起と溶脱、堆肥・化学肥料の連用試験等が行われた。有機農業が土壌の物理性や収量に与える影響については否定的な報告は無いが化学性は正負の評価が見られる。作土が浅い場合には減肥の必要性が指摘された。畑における10年間の熱収支と地温、水分の変化から水不足時期を明らかにした研究も見られる。農業技術に関わる研究は、学会誌の動向を見る限り、北海道を除く都府県からの寄与が少なくなった。環境関連では休耕田による窒素浄化が長期間維持されることや、土地利用形態と河川の窒素濃度などが見られた。また、耕作放棄棚田は植林後30年で森林の保水量に近づくという論文は、棚田の耕作放棄が話題となった時代を反映している。栽培試験や室内試験とは異なり、繰り返しのないフィールドサイエンスはもっと重視すべきという意見も出されている。土壌中の窒素と炭素については環境問題との関係でシンポジウムが行われた。農業生産に加え、炭素の大きな貯蔵庫であり貴重な生態系である泥炭湿地について多くの報告が見られた。さらに、環境工学、森林水文学、考古学における土壌物理や人工衛星による地表土壌水分の計測など土壌物理が使われている分野の紹介が行われた。土壌から発生するガス、ガス移動係数などガスに関する研究が増えてきた。移動現象への逆解析の応用や公開プログラムの活用や普及に関する試みも行われた。半乾燥地における塩害の問題も取り上げられた。この他、地温探査によるため池の漏水調査、撥水性がヒノキ林小流域の流出に与える影響が報告され、室内実験では、牛糞コンポスト施用により土の透水性が低下する原因の解明、酸性硫酸塩土壌の水分状態と鉄酸化菌の増殖およびpHの関係、地中にあるNAPLs（非水溶性液体）量の推定に関する研究が見られた。最近の傾向としてはフィールドを対象とした農業技術や環境科学に関する研究が減少傾向にある。「古典を読む」、「泥炭」の講座や「土中の水分・溶質移動モデル」の特集など、講座と特集が久々に組まれた。

注：逆にEUは東欧の参加で1戸当たりの農地面積は従来よりも減少している。

4. 土壌物理の専門書・教科書と 土壌物理研究会による出版

我が国の土壌物理学はアメリカやソビエトの成果を吸収し、それに水田や火山灰土のような我が国に特徴的な対象を加えて発展してきた。なかでも、大きな影響を与えたのは Bayer の Soil Physics (1940) であろう。第2版は1955年に和訳されている。Soil Physics の著者は時代とともに変わってきたが、初版から我が国で広く読まれた最初の教科書である。この本は現在、Jury と Horton による第6版が出版され、取出監訳の日本語版(2006)もある。我が国で土壌物理学の教科書が最初に出版されたのが1969年の山崎監訳の「土壌物理」であり、1975年には八幡の「土壌の物理」が出版されている。前者は研究者向けの本であり、後者は学生向きであった。1988年には岩田・田淵・Warkentin により Soil Water Interactions が出版されているが、英語であること、内容が高度であることから学生の教科書としては余り使われなかったと思われる。しかし、我が国の土壌物理研究を世界に発信したという業績は高く評価される。2005年に宮崎・長谷川・粕淵の「土壌物理学」が出版されるまでは、土壌物理は外国の教科書をもとに勉強されてきた。特に、1980年に出版された Hillel の Fundamentals of Soil Physics と Applications of Soil Physics は多くの人に利用された本である。Table 3 に我が国で読まれた土壌物理関係の出版物の一覧を示す。全体を見渡すと、教育・研究者向けの専門書は多く出されているが、学部生向けの教科書は少なく、作物生育、基盤整備、灌漑排水さらには環境問題と関連づけた土壌物理学の教育は十分とは言えない。会誌20号で米田(1969)は「土壌学

講座で土壌物理の研究を中心にしている研究室は皆無と言っても過言ではなく、土壌物理の基礎的研究も大学の研究室からはほとんど発表されていない」と指摘をしているが、この状況は現在もほとんど変わっていないようである。

土壌物理研究会からは研究者向けに次の本が出版されている。1974年には15周年を記念して「土壌物理用語事典」が出版された。巻末には地力保全基本調査から得られた物理性に関連するデータが収録されている。本書は土壌物理学学会になったのを契機に改訂され2002年に新編として出版されている。新編にもデータ集がある。研究会発足20周年記念として1979年には基礎編の「土の物理学」と応用編の「土壌の物理性と植物生育」が刊行された。「土の物理学」では土壌物理学と土質工学両部門の共通の基礎をより基本的な立場から体系的に記述している。一方の「土壌の物理性と植物生育」は著者のほとんどが国公立の農業試験研究機関の研究者であり、我が国の土壌物理の日本農業に対する技術的な到達点を詳細に記述している。本書の序説で木下(1979)は「本研究会の発足当時のわが国の土壌物理学の水準は Bayer の Soil Physics 咀嚼の段階であり、測定法は風乾細土を充填したものを試料とした、いわば「死んだ物理学」であり、現場に適用されないものであった」と述べ、最後の段落では「本書は基礎固めの終わった本研究会の「研究の総まとめ」であり、わが国の特有な土壌を対象とした土壌物理学の専門学術書であり、また解説書でもある。そして、それは国際的水準においても誇るに足りるものと信じられる」と断言している。また、地力増進法の立法作業に携わった三輪(1985)は「土壌の物理性と作物生育」は座右の書として活用されたと第52号において

Table 3 わが国で使われた土壌物理の専門書・教科書

Soil physics 1st ed. (1940) Bayer, L.D., 370p, John Wiley & Sons, New York
土壌物理学 (1955) ベーバー, L.D. 著, 野口弥吉・福田仁志訳, 原著第2版, 406p, 朝倉書店, 東京
土壌と水 (1963) ローゼ, A.A. 著, 山崎不二夫監訳, 138p, 東京大学出版会, 東京
土壌物理 (1968) Ревут, И. Б. 著, 松田宏訳, 258p, 畑地農業振興会, 東京
土壌物理 (1969) 山崎不二夫監訳, 387p, 養賢堂, 東京
土壌物理用語事典 (1974) : 土壌物理研究会編, 205p, 養賢堂, 東京
土壌の物理 (1975) 八幡敏雄, 181p, 東京大学出版会, 東京
土の物理学 (1979) : 土壌物理研究会編, 365p, 森北出版, 東京
土壌の物理性と植物生育 (1979) : 土壌物理研究会編, 420p, 養賢堂, 東京
Fundamentals of soil physics (1980) Hillel, D., 413p, Academic Press, New York
Applications of soil physics (1980) Hillel, D., 385p, Academic Press, New York
土壌物理学概論 (1984) ヒレル, D. 著, 岩田進午監訳, 高見晋一・内嶋善兵衛訳, 288p, 養賢堂, 東京
土壌物理学概論 (1985) Hartge, K. H. 著, 福士定雄訳, 318p, 博友社, 東京
Soil water interactions (1988) Iwata, S., Tabuchi, T. with Warkentin, B.P., 380p, Marcel Dekker, New York
Soil water interactions 2nd ed. (1995) Iwata, S., Tabuchi, T. and Warkentin, B.P., 440p, Marcel Dekker, New York
Soil physics 5th ed. (1991) Jury, W.A., Gardner, W.R. and Gardner W.H., 328p, John Wiley & Sons, New York
土の物質移動学 (1991) 中野政詩, 189p, 東京大学出版会
Water flow in soils (1993) Miyazaki, T., 296p, Marcel Dekker, New York
Environmental soil physics (1998) Hillel, D., 771p, Academic Press, San Diego
環境土壌物理学 (2001) ヒレル, D. ; 岩田進午・内嶋善兵衛監訳, I:318p, II:300p, III:322p, 農林統計協会, 東京
新編土壌物理用語事典 (2002) : 土壌物理研究会編, 183p, 養賢堂, 東京
Soil physics 6th ed. (2004) Jury, W.A. and Horton, R. J., 370p, Wiley & Sons, New Jersey
土壌物理学 (2005) 宮崎毅・長谷川周一・粕淵辰昭, 189p, 朝倉書店, 東京
土壌物理学 (2006) ジュリー, W.・ホートン, R., 取出伸夫監訳, 原著第6版, 377p, 築地書館, 東京

述べている。

5. 地力増進法, 土地改良事業計画設計基準に取り上げられた物理性評価項目

1984年に制定された地力増進法では、水田、普通畑、樹園地に分けて土壌の性質の基本的な改善目標値を定めている。土の物理性に関わる項目と改善目標値は Table 4 に示すとおりである。これらの項目については鬼鞍編、日本土壌肥料学会監修の「土壌・水質・農業資材の保全」(1985) に解説されている。

一方、土地改良事業を推進する過程で出された土の物理性に関わる項目は、農業土木学会(農業農村工学会)が出版している土地改良事業計画設計基準(計画)圃場整備(水田)、農業用水(水田)、農業用水(畑)、暗渠排水、土層改良等の中で使われている。それらは、水田における適正浸透量、畑地灌漑における有効土層、制限土層、24時間容水量、圃場容水量、毛管切断含水量、汎用農地の地下水位、暗渠排水の公式などがある。これらの項目のいくつかの定義について土壌物理用語事典を参照して Table 5 に示した。

地力増進法は1997年に一部改訂が行われたが、土壌物理性に関する項目に変更はなかった。地力増進法や設計基準に出てくる物理性の項目は、実用上重要な指標であり、広く認められている。しかし、地力増進法の制定からそろそろ30年になろうとしている現在、改善目標

のいくつかに対しては現在の土壌物理の知見に基づいて再検討する必要がある。また、設計基準についても同様のことが指摘できる。

6. 検討を要すると考えられる物理性項目

吉田(1988)は第56号の巻頭言で「土壌物理の研究における近似と定義」という表題で、「現場の問題は極めて複雑だから非常に単純化して法則性を見つけるが、今度はそれを現場に適用する段階で法則の成立条件が忘れられるということが意外に多い」ことを指摘している。また、「法則がいったん数式化されると、その背後にあるモノを見なくなりやすいという問題」も指摘している。地力増進法や設計基準、さらには土壌物理用語事典に出てくる目標値や用語の定義に対して、私達はすでに決まった事項であり議論の余地は無いという立場を取りすぎているのではないと思う。以下にいくつかの目標値に関連した問題点を紹介する。

農地の有効水分(植物が利用できる土中水)は増やせるかという興味深い問題がある。椎名(1967)は、有効水分を増大させるよりも根群域を深くする方が得策ではないかとすでに第17号で指摘している。有機農業では有効水分が多くなると言われているが、加藤・米田(2001)の研究では、有機農業の収量に対する優位性はあるが、有効水分の増加とは断定できないようである。また、瀧(2007)は有機農業により pF 3.2 の体積含水率は増大す

Table 4 地力増進法の物理性改善目標

水田土壌の基本的な改善目標		
作土の厚さ	15 cm 以上	1960年当時の厚さ
鋤床層の緻密度	14-24 mm	根の伸長と地耐力から決定
主要根群域の最大緻密度	24 mm 以下	主要根群域は 30 cm までの土層
湛水透水性	日減水深で 20 以上 30 mm 以下程度	透水過多では秋落ちしやすい 透水不良では強い還元状態になる
畑土壌の基本的な改善目標		
作土の厚さ	25 cm 以上	根菜類では 30cm 以上
主要根群域の最大緻密度	22 mm 以下	主要根群域は 40 cm までの土層
主要根群域の粗孔隙量	10 % 以上	粗孔隙は降水等が自重で透水できる粗大な孔隙
主要根群域の易有効水分保持能	20 mm/40 cm	易有効量水分量 (pF1.8-2.7 の水分) を基にした主要根群域 (40cm) 当たりの水量

Table 5 設計基準に用いられている項目 (土壌物理用語事典を参照)

適正浸透量	水田条件や栽培様式によって定まる相対的なものであるが、安定した肥料供給や用水供給の条件下で高収量を得るという視点からは、10-15 mm/d 程度(設計基準では 15-25 mm/d)である
24時間容水量	24時間を経過すれば、標準条件下での土壌では大部分の重力水は排除され、残る重力水も根毛の活発な吸水により大部分が有効利用されるとの考えに基づく
生長障害水分点	作物の正常な生育に支障の現れる少水分状態を示し、毛管水の連続性が阻害される毛管切断含水量に近い
制限土層	有効土層の中で灌水後最初に生長障害水分点となる層
転換畑の地下水位	降雨後 2~3日 で 40-50cm, 常時地下水位は 50-60cm

Table 6 水田の土壌透水性の改良方法

(1) 透水性を増加させる方法
ア. 栽培法, 水管理による改良法 この方法は, 田面からの蒸発乾燥を利用して, 土壌に亀裂を発達させ透水性を大きくする方法である. 栽培法としては田畑輪換の導入, 水管理としては中干しや間断灌漑を強化.
イ. 施工による改良法 弾丸暗渠, 心土破碎等によって機械的に数十 cm 以下までの土層を破壊し, みずみちをつける方法が必要となる.
(2) 透水性を抑制する方法 心土の床締め, 粘質土の客土, ベントナイト等を改良資材として混入する.

設計基準, 圃場整備 (水田), 2000 より

Table 7 透水係数, 浸透量, 排水性が対象とする面積

対象	面積	具体的方法
室内透水試験	20-100 cm ²	100 cm ³ コアなど
現場透水試験	0.1 m ²	直径 40 cm のシリンダーインテークレート
乾燥亀裂	0.04 m ²	20 cm 間隔に亀裂が発生すると仮定
イネの根張り面積	0.1 m ²	イネの畝間を 30 cm
心土破碎	4 m ²	2 m 間隔に施工
暗渠	100 m ²	10 m 間隔に施工
水田	3,000-10,000 m ²	0.3 ha から 1 ha

るが, pF 1.5-pF 3.2 の水分量は必ずしも増加しないことを示している. 地力増進法では主要根群域の易有効水分保持能を 20 mm としているが, 主要根群域以外からも幾分かの水を吸収すると考えても, 真夏に晴天が 1 週間も続けば易有効水分は枯渇してしまう量である. 易有効水分の範囲および主要根群域の深さの取り方に問題があると考えられる. TDR が普及した現在, 水分の量 (体積含水率) を求めることは, 昔と比べて格段に容易かつ正確になった. 是非とも明らかにしたい指標である.

毛管切断含水量や生長阻害水分点は -100 kPa の値が良く採用されるが, 不飽和透水係数を求めることができなかった当時とは異なり, 現在の不飽和土壌水の運動に関する知識からは, 植物は容易に水を吸収できる水分状態である. 世界的にも採用されていない生長阻害水分点 (易有効水分の下限点) については, 植物生理的な視点からの説明が必要であろう. 筑紫・長 (1984) は第 50 号のレビューですでに, 畑地灌漑の問題をいくつか指摘するとともに, 灌漑技術者と土壌物理研究者が疎遠であることが問題と述べている. また, 施設栽培における灌水点のマトリックポテンシャルが高く, その理由の 1 つとして溶液濃度が指摘されているが明確になっているとは言えない (中島田, 1972, 鴨田, 1982). 圃場容水量や 24 時間容水量については, 実用上の意義とは別に土壌物理に基づくより正しい解釈が必要である.

水田については適正浸透量が必要とされているのかどうかの問題がある. 石原 (1967) は, 1951 年から 1961 年までの“米作日本一”^{注)} 10 戸の農家の日減水深が 20-30 mm であることから, 6 t/ha 以上の収量を目指すには透水性という条件が必要となるだろうと述べている. これより前, 五十崎 (1957) の水田浸透量の研究は, 最近でも適正浸透量の根拠としてしばしば引用されている. また, 佐々木 (1977) も高生産性稲作のためには透水性の付与が必要であることを指摘している. 金子 (1966) は安積盆地の水田では浸透過小 (ほぼゼロ) による収量の伸び悩みを報告している. 1960-1965 年のコメの収量は 3.97 t/ha であり, 2006-2010 の収量は 5.23 t/ha と 1t/ha 以上も多く, なおかつ収量よりも食味が重視される. したがって, 今では高収を目的とした適正浸透量の 15-25 mm/d は意味を持たないだろう. 浸透量と水田土壌の還元状態に関係があるならば, 浸透量は水田からの温室効果ガス発生量にも関係する新たな指標となる可能性もある. さらに, 2000 年に改訂された設計基準圃場整備 (水田) では, 水田土壌の透水性の改良方法として Table 6 のような方法を示している (農水省農村振興局, 2000). 透水係数や浸透量, 排水性はいずれも mm/d (m/s) の単位で表すが, 対象とする大きさは Table 7 のように様々である. Table 6 と Table 7 との対応でみると, イネの根張り面積は通常 0.1 m² よりも小さいので, この面積を超えたスケールで透水性を改善しても, イネの根圏環境の改善には繋がらないはずである.

暗渠は水はけの悪い細粒質, 粘質土の水田に多く施工

注: 米作日本一は 1949 年に始まり 1968 年に終了した朝日新聞主催の表彰事業である. 最高収量は 10 t/ha を超えた. コメの自給達成以降, わが国では多収に関する研究はほとんど行われなくなった.

される。水田を畑に転換したときの暗渠排水による地下水位の目標値はどのような意味を持つのであろうか。粘質土の水分特性曲線を求めた経験のある人ならばすぐに気がつきそうであるが、飽和状態から -10 kPaで水と置換される気相の量は作物根の呼吸を保障出来る値ではない。足立ら(1997)は粘土質転換畑の粗孔隙は全体積の1~3%程度であったと報告している。また、粘質土の下層土では土の基質(matrix)の中に根は充分発達しているだろうか。Hasegawa and Kasubuchi(1993)は粘土質転換畑下層土ではダイズ根の約半数が乾燥亀裂面に発達している測定例を示している。このように考えると、暗渠排水による地下水位の目標値の根拠がはっきりせず、乾燥亀裂の役割を考慮した解釈が必要となる可能性もある。さらに、暗渠の深さと間隔を求める式では、代入する透水係数の値は、現場透水係数値に10倍から1,000倍の係数を掛けるようになっている。係数に対する科学的根拠もなければ透水係数を求める意味もない。1960年代に、水田機械化農業のための排水、中でも粘質土の暗渠排水の研究が開始され、1970年代には転換畑の暗渠排水の研究に発展した。その成果で明らかになったことは、土壌水の運動理論からは実用上の暗渠の間隔と深さは決定できないということであり、暗渠施工は土壌条件や水理条件が同じような類似地を参考に行うという結論になったと読み取れる。そして、本暗渠に弾丸暗渠を組み合わせれば、20-50 mmの地表残水を1日で排除できるという経験則しか持ち合わせていない。別の観点からすると、どのような土壌であっても組み合わせ暗渠を施工すれば、汎用農地として必要とされる排水量(速度)を確保できることであり、世界に誇れる素晴らしい排水技術である。私達は、土の透水性にスケールという概念を取り入れて、圃場に不均一に分布もしくは施工した粗孔隙の流れを正しく認識しなければならない。

7. 依然として解決されない問題

初期から現在に至るまで半世紀にわたって常に問題視されているのは、重機を用いた農地造成や基盤整備における土の練り返し、土壌構造の破壊による有効水分の減少である(斎藤, 1976, 上田, 1985, 斎藤・石渡, 1987, 石渡, 1999)。有効水分を機械的に元に戻すのは不可能であり、短期間の農業活動でも困難である。有限な農地を適正な状態で維持するためには、事業の段階で細心の注意を払うことしか解決法はない。人為で操作できるのは壊れやすい粗孔隙のみである。したがって、心土破碎や弾丸暗渠は練り返し施工する必要がある。土壌物理学を対象としている研究者にはこのような認識を技術者や農業者にしっかりと伝えていかなければならない。土壌侵蝕もいつの時代も取り上げられている。農業が悪いのではなく農法に問題があるといわれ続け、決して解決した問題ではないのは世界を見ても同様である。

8. 環境科学の研究

環境問題は1970年代に先駆的な研究が行われている

が、多くの研究が展開されたのは1980年代に入ってからである。最初は農業活動に伴う硝酸汚染が主流であり、汚染や浄化の予測が必要とされた。各務原台地のニンジン畑と地下水質の研究例がよく紹介されるが、多くの場合、対象とする場では植生や土壌が均一でないこともあり、物質の移動という側面から取り組む必要性が強調されながらも土壌物理はいままでのところ十分に寄与できていないと思われる。さらなる研究の深化が必要とされる。一方、地形連鎖の考え方や水田の窒素除去モデルを集水域に組み込んだモデル(田淵, 1998; 田淵ら, 1998)、広域の土地利用と河川水質の関係等では実証研究を増やすことが必要である。

硝酸塩問題は農業生産と地域の環境問題という点でOECDと認識を共有していた。一方、温室効果ガスはIPCCと歩調を合わせ、なおかつ地球温暖化防止という外交政策の声援を受けて1990年代になって精神的に進められた。我が国では水田から発生する温室効果ガスの定量化や発生抑制技術に対する貢献がある。ガスは大気に拡散し地球規模の問題となるため、先進国は先を争って研究を行っており、世界を見渡してガス研究の空白地帯がほぼカバーされてきた現在では、新たな研究課題を見つけるのが難しくなっているようである。

工業分野では他社、他国よりも一歩先んじることにより技術のスタンダード化を図ることが強調されている。環境研究では知見を世界共通の視点で議論し、共有財産としたいがため環境予測モデルのスタンダード化が進んでいる。モデルを動かすのには土の物理性のデータが不可欠である。地力保全基本調査と土壌環境基礎調査による膨大なデータの蓄積に加え、他で開発されたモデルのユーザーでは研究者にとっては魅力に乏しいかも知れないが、予測モデルに必要とされる土中の移動現象に関するデータを統一した考えに基づいて組織的に集めることも土壌物理分野に求められているだろう。

9. むすびにかえて

今から約30年前、私は同僚や後輩に、好きなことをやるのが一番良いと言っていた。それは、上から指示されて仕事をやっている人が生き生きしていなかったことや、好きなことだと探求心が湧き、研究の深化が期待できるからである。そして約15年前私は、自分の研究と農業との関係を十分に考えておくことを人前でお話しし、過去を知っている同僚から以前の話との違いを厳しく指摘された。そして、さらに15年たった今、私は次のよう思う。10年間大学の教員をやった感じたことは、学生が必ずしもフィールドを対象とした農業技術や環境科学に携わっていないことである。その原因は教員自身の研究と社会との関係、接点にあるように思える。土壌物理学会の出口である農業技術と環境科学への貢献を目指すならば、農業技術や環境が抱えている課題に積極的に取り組み、研究の面白さを若い世代に伝える必要がある。土壌物理の将来の夢を語るよりも現実の土と作物や環境を直視し、正しく理解させることが土壌物理の目指

す方向だと考えている。国の重点研究分野が非常に狭く、そこに集中的に多くの予算が投入される現状では、研究者、教育者とも限られた研究に目を向けざるを得なくなってしまう状況にあることは残念であり、土壌物理の多様な発展に対して大きな問題だと感じる。

シンポジウムでは触れなかったことではあるが、第1号から118号まで通読した感想から、1つのトピックに焦点を当てて過去の研究をレビューしてみることも、研究の到達点を知り、新たな研究を目指すために大いに参考になると感じた。今までの膨大な財産を大いに活用して欲しい。

謝辞

1970年以前の農業情勢と研究課題について、研究会発足時から御活躍されている田淵俊雄博士に助言を戴いた。記して謝意を表します。

引用文献

- 足立一日出・吉田修一郎・増本隆夫・伊藤公一 (1997)：重粘土汎用圃場における暗渠排水に関する粗間隙量の推定法とその適用。農業土木学会論文集, 192：123-131.
- 筑紫二郎・長智男 (1984)：畑地灌漑。土壌の物理性, 50:16-19.
- Childs, E.C. and Collis-George, N. (1950)：The permeability of porous materials. Proceeding of Royal Society Series A, 201:392-405.
- Hasegawa, S. and Kasubuchi, T. (1993)：Water regimes in fields with vegetation. Miyazaki, T., Water flow in soils, p236, Marcel Dekker, New York.
- 石原邦 (1967)：透水と水稻の生育について。土壌の物理性, 16：22-26.
- 石川武男・徳永光一・月館光三 (1964)：岩手山麓における開田工法の研究 III, 農業土木研究, 31:263-269.
- 石渡輝夫 (1999)：農地の造成・整備による土壌の物理性と微細構造の変化。土壌の物理性, 81：61-69.
- 五十崎恒 (1957)：適正浸透量について。農業土木研究, 24：311-312.
- 岩田進午 (1961)：土壌水のエネルギー概念について。日本土壌肥科学雑誌, 32：572-580.
- 鴨田福也 (1982)：園芸作物における水分消費特性。土壌の物理性, 45：19-26.
- 金子良 (1966)：多収穫水田の構造と用排水。土壌の物理性, 13：9-11.
- 狩野徳太郎・椎名乾治・中川昭一郎・小菅孝利 (1961)：新しい水田減水深測定法。農業土木研究, 28：418-424.
- 加藤哲郎・米田和夫 (2001)：堆肥の長期連用が黒ボク土の理化学性並びにキャベツとダイコンの収量に及ぼす影響。土壌の物理性, 87：3-17.
- 木下彰 (1979)：序説。土壌の物理性と植物生育, 土壌物理研究会編, p1, 養賢堂, 東京
- 美園繁 (1956)：我が国土壌物理研究の発達。農業技術, 第11巻1：1-3, 2：1-4.
- 三輪睿太郎 (1985)：地力増進法のねらいと土壌の物理性。土壌の物理性, 52：39-46.
- Mualem, Y. (1976)：A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research, 12：513-522.
- 中島田誠 (1972)：施設栽培における灌水点。土壌の物理性, 26：56.
- 根岸久雄・多田敦・古木敏也・守谷貢・渋谷勤次郎・上村春美・中川昭一郎・菅原和夫・佐藤寛 (1972)：重粘土地帯水田の土層改良と用排水組織に関する研究1～4。農業土木試験場報告, 10：43-205.
- 農水省農村振興局 (2000)：土地改良事業計画設計基準 計画は場整備 (水田), 農業農村工学会
- 鬼鞍豊編 (1985)：土壌・水質・農業資材の保全, 日本土壌肥料学会監修, 316p, 博友社, 東京
- 斎藤万之介 (1976)：農用地造成作業と土壌の不均一化。土壌の物理性, 34：37-42.
- 斎藤万之介・石渡輝夫 (1987)：農地造成と土壌物理性の変化。土壌の物理性, 55：5-12.
- 佐々木信夫 (1977)：透水性付与による高生産稲作のための基盤改善。土壌の物理性, 36：15-21.
- 椎名乾治 (1963)：蒸発散による畑地水分の減少機構に関する研究。農業土木試験場報告, 1：83-156.
- 椎名乾治 (1967)：畑地圃場整備をめぐる土壌物理の諸問題。土壌の物理性, 17：10-14.
- 志村博康 (1977)：土地改良百年史。今村奈良臣他著, 全国土地改良事業団体連合会編, 平凡社 p270.
- 田淵俊雄 (1998)：水田除去機能付き窒素流出モデル。土壌の物理性, 78：11-18.
- 田淵俊雄・中野政詩・鈴木誠治・住田章・丸太勇 (1966)：粘土質水田の排水に関する研究1～6。農業土木学会論文集, 18：7-47.
- 田淵俊雄・黒田久男・志村もと子・黒田清一郎 (1998)：窒素流出モデルの農業集水域への適用と問題点。土壌の物理性, 78：19-24.
- 瀧勝俊 (2007)：有機農業が土壌の理化学性に及ぼす影響。土壌の物理性, 105：31-39.
- Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P. (1980)：Electromagnetic determination of soil-water content：Measurement in coaxial transmission lines. Water Resources Research, 16：574-582.
- 上田弘美 (1985)：基盤整備水田と土壌構造。土壌の物理性, 51：32-39.
- Van Genuchten, R. (1980)：A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, 44：892-898.
- 山中金次郎 (1959)：「土壌の物理性」第1号発刊に際して。土壌の物理性, 1：1-2.
- 山崎不二夫・八幡敏雄・長田昇・岩田進午・田淵俊雄 (1960)：水田の降下浸透の新しい測定法。農業土木研究, 27：381-386.
- 八幡敏雄 (1967)：土壌物理研究会に寄せる二つの期待。土壌の物理性, 16：1-2.

- 米田茂男 (1969) : 土壌物理学研究の現状と将来. 土壌の物理性, 20 : 3-6.
- 吉田昭治 (1988) : 土壌物理性の研究における近似と定義. 土壌の物理性, 56 : 1.

要 旨

第 2 次世界大戦後の土壌物理研究は地力保全基本調査事業と土地改良事業の影響を強く受けた。1959 年の「土壌の物理性」第 1 号から 2011 年の第 118 号を対象に、10 年区切りで土壌物理研究の動向を振り返った。また、わが国で用いられた専門書、教科書ならびに、土壌物理研究会の出版物を紹介した。土壌物理の社会的貢献という視点から、今までに出されてきた農業生産のための物理性指標を取り上げ、実用上の意義とは別に、現在の土壌物理の知識を加味して解釈すべきことを指摘した。さらに、依然として残されている農業生産上の問題点に触れた。土壌物理学会の目的に環境科学の発展への貢献が加わって 12 年経過したが、環境研究で注目しなければならない点をコメントした。最後に現場に出て研究を行う大切さを強調した。

キーワード：土壌物理, 水田, 畑, 農業技術, 環境