

土壌物理から灌漑排水，灌漑排水から土壌物理

中村公人¹

国際土壌年に当たってのこの企画に対して、私のような土壌物理学の世界でなにもなしえていない者が引き受けてよかったのだろうか、お断りすべきではなかったろうかと大いに反省した次第であるが、後戻りもできず、あるがまま、土壌物理に関わってきた経緯を振り返り、これからのことについて考えてみたい。

土壌中の熱・水分移動実験

土壌物理の研究との出会いは4回生になって、かんがい排水学研究室に所属し、卒業論文のテーマを決めたときに遡る。教授に何に取り組みたいかを問われ、畑地灌漑あるいは地下水に関することをしたいと答えたところ、当時、「降積雪対策技術の高度化に関する研究」(科学技術庁)の一環として研究室で取り組んでいた「帯水層熱エネルギー貯留 (Aquifer Thermal Energy Storage : ATES)」についての実験を割り当てられた。ATESは地下帯水層がもつ大きな保温効果を利用した蓄熱技術である。たとえば夏季に太陽熱や工場、発電所、ごみ焼却場などの排熱を利用して温めた水を地下の帯水層に貯留しておき、冬季にこれを揚水し、融雪、ハウス栽培、家屋暖房などに利用する。さらに、このとき熱交換されて生み出される冷水を帯水層に注入しておき、これを夏季の冷房熱源として利用することができるという自然エネルギー利用技術の一つである。東日本大震災に伴う原発事故後、地中熱エネルギー利用の一形態として再び注目されている。実験系はすでに組み立てられており、高さ1 m、内径28.6 cmの円筒カラムに土壌を充填し、地下水面を設定した上で上下端に温度勾配を与えたときの、土壌中の温度と圧力水頭と熱フラックスの深さごとの経時変化を測定するものであった。

豊浦標準砂のみを充填する場合の実験は先輩がすでに行っており、2層(豊浦標準砂と相馬硅砂)に成層化させ、この順序を変えて実験を行うことになっていた。4回生から大学院修士課程にかけて、ひたすら地下の実験室に籠もりながら、成層化条件と温度勾配条件を変え、解体と充填を繰り返して、1つの実験条件で400時間の実験を行う日々を過ごした。しかし、当初は正直なところ、

何のために成層化させ、これがATESの技術にどのようにつながっていくのかを全く理解することができずにいた。ただ、この実験を「おもしろい」と感じ、続けられたのは、温度の経時変化がFig. 1のような傾向を示したからである。前号の同特集において、溝口勝先生が霜柱のできる瞬間の地温変化を示されており(溝口, 2015)、これを少し真似するようで誠に恐縮であるが、興味深い変化を示している。つまり、25°C一定条件から、上端を50°C、下端を0°Cに設定すると、深さ3.5 cmの温度は一旦上昇して、その後低下し、その後、再び上昇に転じるのである。温度勾配が逆の場合は、このような変化は見られず、ある温度に向かってほぼ単調に変化するだけである。このような特徴的な温度変化は、温度勾配に伴う水分移動、水分移動に伴う熱的特性(熱伝導率や体積熱容量)の変化、それに伴う温度場の変化という複雑なメカニズムに影響された結果である。これを何とかモデル化したいということになった。

モデル化に向けて

温度勾配下にある土壌中の水分移動、熱移動についてはすでに多くの研究がなされており、修士課程のときに、Philip and de Vries (1957), de Vries (1958), Sophocleous (1979), Milly (1982; 1984)を中心に勉強した。徐々に改良が加えられていくことに「おもしろさ」を感じたことを記憶している。最終的には、以下のようなMilly (1982)が導出した支配方程式を用いて解析を行った。式(1)が水分移動、式(2)が熱移動を表す。圧力水頭

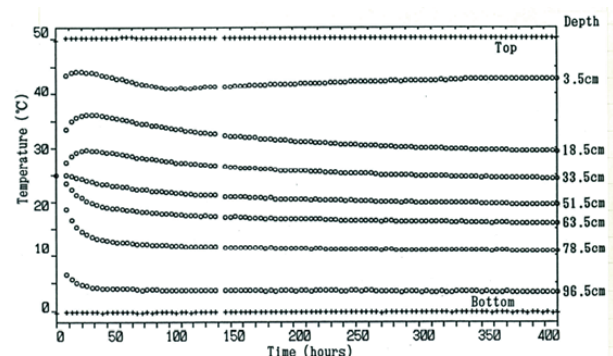


Fig. 1 上端50°C、下端0°Cに設定したときの土壌中の温度の経時変化(下層:豊浦標準砂、上層:相馬硅砂)(筆者の卒業論文より)。

¹ 京都大学農学研究科
2015年9月25日受稿 2015年10月2日受理

ψ と温度 T の 2 つの変数の連立偏微分方程式を解くことになる。ここでは、その他の変数の説明は省略させて頂きたい。

$$\begin{aligned} & \left[\left(1 - \frac{\rho_v}{\rho_l} \right) \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \Big|_T + \frac{n - \theta}{\rho_l} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \Big|_T \right] \frac{\partial \psi}{\partial t} \\ & + \left[\left(1 - \frac{\rho_v}{\rho_l} \right) \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \Big|_\psi + \frac{n - \theta}{\rho_l} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \Big|_\psi \right] \frac{\partial T}{\partial t} \\ & = \frac{\partial}{\partial z} \left[(K + D_{\psi v}) \frac{\partial \psi}{\partial z} + (D_{Tv} + D_{Ta}) \frac{\partial T}{\partial z} + K \right] \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \left[C + H_1 \frac{\partial \rho_v}{\partial T} \Big|_\psi + H_2 \frac{\partial \theta}{\partial T} \Big|_\psi \right] \frac{\partial T}{\partial t} \\ & + \left[H_1 \frac{\partial \rho_v}{\partial \psi} \Big|_T + H_2 \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \Big|_T \right] \frac{\partial \psi}{\partial t} \\ & = \frac{\partial}{\partial z} \left[(\lambda + \rho_l LD_{Tv}) \frac{\partial T}{\partial z} \right. \\ & \quad \left. + \rho_l (LD_{\psi v} + gTD_{Ta}) \frac{\partial \psi}{\partial z} - c_l (T - T_0) q_w \right] \end{aligned} \quad (2)$$

一方、Onsager (1931a; 1931b) の理論に基づいて不可逆過程の熱力学を土壌中の移動現象に当てはめようとした、Cary and Taylor (1962) や Groenevelt and Bolt (1969), Jury and Miller (1974), Prunty (1992) といった研究を難解ながらも勉強した。この理論では系内に不可逆過程を引き起こす原因となるもの、たとえば、温度勾配、濃度勾配、電気勾配などを力 (force) X_i と名付け、その力によって熱の流れ、物質拡散、電流などの流れ (flow) J_i が引き起こされると考え、多くの場合、1 つの力が同時に多くの流れを引き起こすとして、局所平衡が存在する場合、流れは次式のような線形現象方程式によって表される。

$$J_i = \sum_j L_{ij} X_j \quad (3)$$

L_{ij} は現象係数とよばれる。この考え方に基づくと未知の移動機構の存在を予測することもできることになり、非常に興味をそそられる考え方であったが、私の能力では、実験結果への適合への展開を見出すことができず、先に示した物理的なメカニズムに基づいた支配方程式を解くことにした。

さらに、モデルに入力しなければならない様々なパラメータの性質について整理した。とくに、土壌水分特性と土壌の熱伝導率の温度依存性や水蒸気拡散係数に着目した。土壌水分特性 (土壌水分特性曲線と不飽和透水係数) の温度依存性は、水の表面張力、密度、粘性係数の

温度依存性に影響されるが、これらだけでは十分に説明されていないことを知った。温度勾配下の水蒸気移動については、塩沢昌先生の農業土木学会土壌物理研究部会の資料 (塩沢, 1991) にあった間隙内の水蒸気と液状水の循環流の考え方に大きく影響された。

実験に対してのモデル化は上記の式 (1), (2) を用いたが、なかなか測定値を再現することができず、再現性の向上の過程から得られた、水蒸気拡散係数や不飽和透水係数の扱い方に関する知見を整理する形でまとめた。

今こうして振り返ると、現象方程式や土壌水分特性、水蒸気拡散係数の温度依存性などについて、さらに突っ込んだ展開ができたのではないかと感じる。

HYDRUS との関わり

モデルのプログラム作成を行っていた時期であったと思うが、土壌中の水・熱・溶質移動の汎用ソフトウェアである HYDRUS (Šimůnek et al., 1998) が日本でも積極的に紹介されるようになった。当時のバージョンではまだ水蒸気移動が組み込まれていなかったが、様々な境界条件に対応し、水と熱に加えて物質も扱うことができる使いやすいソフトを見て、このような組織的な取り組みに対して、個人では正直かなわないと感じた。このようなソフトとのつきあい方を考えざるを得なかった。

所属する研究室は灌漑排水分野を対象とし、水文学や土壌物理学を扱っている。研究室としての当時の流れが環境負荷削減型の灌漑排水のあり方になっていったこともあり、土壌中の窒素動態に取り組むこととなった。これまで実験畑を歩んできたために、まずは室内実験を行った。畑地土壌を想定して、とくに硝化過程に着目し、肥料の分施が窒素溶脱に及ぼす影響について調べた。この解析を行うために用いたのが、先述した HYDRUS である。アメリカでテロ事件があった年に UC Davis に 1 年間滞在する機会を得たが、このときに、指導教授が HYDRUS の使用を勧めたことが大きな理由である。同じ方程式を解くのであれば、一から自分でプログラミングするよりも効率的であり、多くの研究者によって使用されていることによってバグが除かれていることを考えると、計算の誤謬のリスクも避けられる。HYDRUS での疑問点を作者である Šimůnek 教授に直接メールで問うことができ、すぐに修正した実行ファイルを作成して頂いたことも大きかった。ただし、HYDRUS の使用を選択した時点で、研究のオリジナリティは計算を何に適用し、何を (どのような水管理や施肥管理などを) 提案するのかということになる。ある意味で、本質的な土壌物理から灌漑排水分野へ自身のテーマが移行していったといえるのかもしれない。これ以降、水田圃場や流域レベルでの環境配慮型の水管理の問題にシフトし、もっぱら現地において水文・水質調査を行うようになった。私に

とって HYDRUS との出会いが研究の内容に与えた影響は小さくない。

現在の HYDRUS には，取出伸夫先生を中心とする方々の成果によって，様々な新しい知見が逐次組み込まれ，今では水蒸気移動も考慮されている（ちなみに，支配方程式は式 (1)，(2) とは異なるものであるため，この違いも追求したいと思っているが，すでに検討済みかもしれない）。2次元，3次元での計算も可能になった。土壌物理の大きな柱である水・熱・物質移動現象のメカニズムの知見を HYDRUS に集約させていくことは，この分野にとって非常に有用なことであり，同時に，これを用いている様々な周辺分野（灌漑排水や環境分野など）への適用可能性を示していくことも必要なことであると考えている。

一人の人間が全てのことをできるわけではないため，結局のところ，自身の役割をどこに置くかということになるだろうが，私自身は HYDRUS との出会いによって，未知のメカニズムの解明とそのモデル化に対する探求から徐々に離れ，既知のメカニズムの知見を基にした応用分野への適用問題に移行し，現在の自分の役割はここにあるとしているのであろう。

しかし一方で，研究者たる者，できあいのソフトを用いるのではなく，自身でモデル化を構築できるような研究テーマを設定したい，修士課程の頃に感じていた土壌物理本来の「おもしろさ」の中にもう一度身を置いてみたいという思いもある。

今後の私にとっての土壌物理

問題解決型の研究が重要視されるようになり，既存の優れたモデルの利用の有効性は増しているように思われる。こうした中，国際的に広く利用されるモデルが定まりつつある。これらの構築や改良に対して，日本が積極的にコミットしていくことも重要であろう。とくに，東アジア，東南アジア地域特有の水田にも対応できるようにするためのアプローチは積極的に発信すべきであると考えられる。土壌物理学での HYDRUS だけではなく，同様のことは，地下水学での MODFLOW，水文学での SWAT (Soil and Water Assessment Tool)，気象学での WRF Model (Weather Research and Forecasting Model)，物質循環学での DNDC Model (DeNitrification-DeComposition Model) などについてもいえると考えている。

しかし，私としては，今後も灌漑排水に関わる問題に取り組みながら，その中から「おもしろい」土壌物理研

究を見出していきたいと考えている。このように思えるのは，修士課程においてデータを取りながら，ここで若干紹介した文献を読んで勉強し，純粋に「おもしろそう」と感じる事ができたおかげであると感じている。

若い研究者への励みとなるようなという意図のこの特集であるが，私の場合，反面教師にして頂ければ幸いである。最後に執筆の機会を与えてくださった土壌物理学会事務局の先生方に感謝申し上げる。

引用文献

- Cary, J.W. and Taylor S.A. (1962): The interaction of the simultaneous diffusions of heat and water vapor. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 26: 413–416.
- de Vries, D.A. (1958): Simultaneous transfer of heat and moisture in porous media. *Trans. A.G.U.*, 39(5): 909–916.
- Groenevelt, P.H. and Bolt, G.H. (1969): Non-equilibrium thermodynamics of the soil-water system: Review paper. *J. Hydrol.*, 7: 358–388.
- Jury, W.A. and Miller, E.E. (1974): Measurement of the transport coefficients for coupled flow of heat and moisture in a medium sand. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 38: 551–557.
- Milly, P.C.D. (1982): Moisture and heat transport in hysteretic, inhomogeneous porous media: A matric head-based formulation and a numerical model. *Water Resour. Res.*, 18(3): 489–498.
- Milly, P.C.D. (1984): A simulation analysis of thermal effects on evaporation from soil. *Water Resour. Res.*, 20(8): 1087–1098.
- Onsager, L. (1931a): Reciprocal relations in irreversible processes. I. *Phys. Rev.*, 37: 405–426.
- Onsager, L. (1931b): Reciprocal relations in irreversible processes. II. *Phys. Rev.*, 38: 2265–2279.
- Šimůnek, J., Huang, K. and van Genuchten, M.Th. (1998): The HYDRUS code for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 6.0, Research Report No. 144, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California, 164pp.
- Sophocleous, M. (1979): Analysis of water and heat flow in unsaturated-saturated porous media. *Water Resour. Res.*, 15(5): 1195–1206.
- Philip, J.R. and de Vries, D.A. (1957): Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Trans. A.G.U.*, 38(2): 222–232.
- Prunty, L. (1992): Thermally driven water and octane redistribution in unsaturated, closed soil cells. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56(3): 707–714.
- 塩沢 昌 (1991): 米国での水と熱の移動の研究. 農業土木学会土壌物理研究部会, 第30回研究集会報告集: 1–16.
- 溝口 勝 (2015): 私の土壌物理履歴書. 土壌の物理性, 130: 35–37.