

## 熱物質移動現象論 (2016)

担当：塩沢 (7A-711)、溝口 (2号館別館 462)

ターム・学期 A 1 (2016/09/26-2016/11/31)

時限：月(Mon)2 [10:25-12:10],木(Thu)1 [08:30-10:15]

教室：農学部 7号館 A棟 7A-114/115

概要 (シラバスより)

生物体や食品、土壌等の多孔体における熱・物質移動、および媒体と外部の大気や流体との間の熱・物質の交換の理論と現象を、典型的な例を挙げながら解説する。これは生物・環境工学における様々の移動現象を理解するための基礎である。熱伝導の物理法則は、水に溶けた溶質や気体中の拡散、地下水や土壌水のポテンシャル流れと数学的表現において同一であり、等価な境界条件において類似の現象となる。また境界層における乱流や対流は、同一のメカニズムで熱・物質・運動量を輸送する。本講では移動現象の基礎理論を理解し、初歩的な解析が行えることをめざす。

担当予定：

- 1) 熱・物質移動現象の概説：溝口 (9/29)
- 2) 熱・物質移動現象のための数学：溝口 (10/3)
- 3) 伝熱の3形態と移動物性値：溝口 (10/6)
- 4) 保存則と熱伝導の基礎方程式：溝口 (10/13)
- 5) 物質の移動速度と流量変化の伝播速度：塩沢 (10/17)
- 6) 熱伝導の境界条件、定常熱伝導：塩沢(10/20)
- 7) 非定常熱伝導問題の解析法 (解析解)：塩沢(10/24)
- 8) 非定常熱伝導問題の解析法 (数値解法)：塩沢(10/27)
- 9) 境界層の熱・物質輸送：塩沢(10/31)
- 10) 蒸発：塩沢(11/7)
- 11) 相変化を伴う熱・物質同時移動：凍結融解過程：溝口 (11/10)
- 12) 数値計算法：溝口(11/14)
- 13) 期末試験

(各教員の担当日の中での講義内容の順序の変更がある場合があります)

成績：出席・レポート・期末試験で評価する。

熱物質移動現象と関連する講義：

農地環境工学、水利環境工学、環境地水学、生物環境工学、生物プロセス工学、水文学、土壌物理学、水理学、流れ学 など

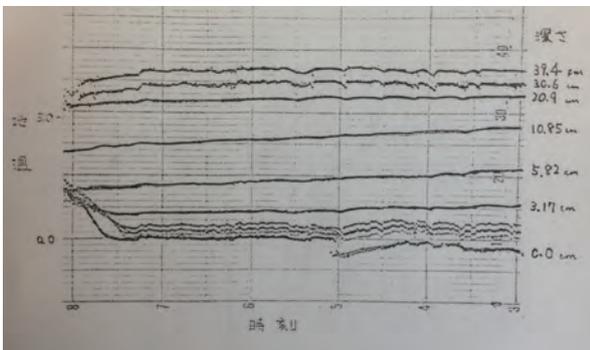
## 私の土壌物理履歴書

溝口 勝<sup>1</sup>

### なぜ土壌物理の道に足を踏み入れたのか？

私は栃木の田舎の水田農家の二男として生まれ育った。昔から数学や物理が好きだったが、農家の倅が農学部に行かなくて良いのかという使命感もあって大学1年生の時に農業工学の先生が担当する教養の講義を受講した。しかし、その講義が余りに現実の農業とはかけ離れた理想論に思え、大学の専門ってこんなものなのという疑問をもったまま、脳ミソが筋肉になるくらい陸上部の活動に精を出していた。農学部に進学し、卒論テーマを選ぶ時に、どうせ理想論をやるのだったら一番現実離れたものにしてみよう、と思い数学を得意とする教授についた。熱電対で地温を測り、フーリエ解析で土の熱拡散係数を算定するテーマだった。真夏に地温を測定すれば解析しやすいデータが得られるが、私は秋まで部活動にうつつを抜かしていたのでデータを取りはじめたのが真冬になってしまった。

ちょうどクリスマスイブの朝、ある事件が起こった。忘年会からの朝帰りの明け方近くに観測小屋に立ち寄り、打点式記録計の値をぼんやりと眺めていた。そのときマイナス1°Cあたりまで下がっていた地表面温度が、突然0°Cになった。「えっ、温度計が壊れた?」。恐る恐る懐中電灯を手に現場に行き地面を照らすと、なにか



**Fig. 1** 霜柱ができる瞬間の地温変化。東京大学農学部弥生キャンパス内圃場 (1981年12月24日)。地表面の温度が5:00頃に不連続に変化している (著者の卒業論文より)。

が光っていた。霜柱だった。土が凍りはじめる瞬間だった。この出会いですんなりと大学院での研究テーマが土の凍結に決まった。

### 修士課程時代に身につけた科学哲学と土壌物理の基礎

大学院では講義らしい講義がほとんどなかった。そんな中、研究室の先輩が私に修士1年の時代に科学哲学の本を読むように薦めてくれた。ちょうどこの年、農学部食堂が改修中だったので生協で買った弁当を食べながら先輩や若手助手と科学や研究の哲学について議論した。また、毎週木曜日の朝一の電車で筑波の研究所に通い土壌物理や熱力学のゼミでプロの研究者とも議論した。こうした基礎勉強と議論を通して、筋肉になっていた私の脳ミソが次第に柔らかくなっていった。修士1年の冬に「実際の凍土も見ずに凍土研究はできない」と助教に直訴し、助手と技官と一緒に上野発の夜行列車で北海道に行かせてもらった。この時はじめて現場の自然凍土と自分の凍結実験が結びついた。凍土研究の最前線に触れるために日本雪氷学会の凍土研究分科会に入った。研究がますます面白くなり迷わず博士課程に進学した。しかし、博士課程わずか8か月で助手として三重大学に赴任することになった。

### アメリカと日本の研究基盤の違い

実学を重視する三重大学では「温暖な地でなぜ土の凍結を研究するのか」と多くの人に質問された。しかし修士時代に訓練した議論のおかげで、逆にそうした質問が自分の研究を位置づけるのに役立った。雪氷学会で知り合った企業の凍土研究者にお願いして毎年卒論生と一緒に大阪の地下鉄工事で使われる地盤凍結工法を見せてもらった。こうして凍土研究を継続するモチベーションを維持し、丹念な室内実験とシミュレーションモデルで学位論文をまとめた。その後、凍土中に存在する不凍水を理論的に計算したいと思い、アメリカのパデュー大学のPhilip F. Low博士のところに押しかけた。ここで粘土科学の基礎を学んだ。FT-IRという赤外分光光度計を使って粘土中の氷の量を測定した。

渡米前にはPC9801のBASICでデータをプロットし、任意関数の近似曲線をグラフ表示するプログラムを書いて得意になっていたが、アメリカの大学院生がSigmaPlot

<sup>1</sup> 東京大学大学院農学生命科学研究科  
2015年7月1日受稿 2015年7月2日受理

というソフトで同じことを簡単に実行しているのを見てプログラマーを辞めた。また、80年後半にパソコン通信で学生と電子メールのやり取りをして遊んでいたが、MS-DOSも知らないアメリカの学生が普通に電子メールを使っているのを見て驚いた。アメリカでは自分の仕事だけに集中できるようになっているのか！日本の研究インフラ整備の必要性を実感した。帰国後すぐに、大学の大型計算機センターに通って電子メールを使えるようにした。それがきっかけでインターネットの世界にのめり込んだ。95年頃にはLinuxを使ってインタラクティブなWebページを作りまくった<sup>1)</sup>。そのついでに96年に博士論文で作成した土の凍結過程における土壌水分と熱移動シミュレーション用のインターフェイスを開発しインターネット上に公開した。これは土壌物理分野におけるWebシステム第1号<sup>2)</sup>だったと思う。

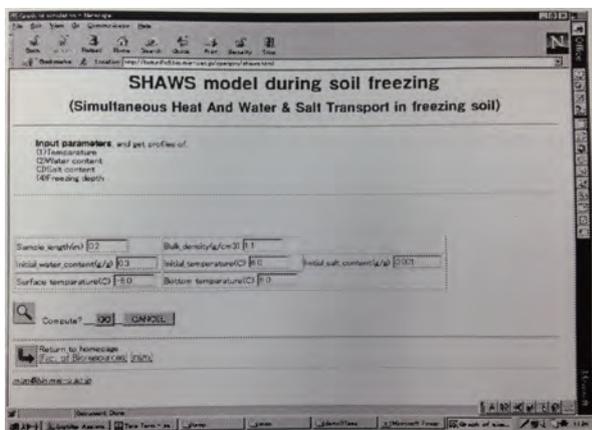


Fig. 2 Webシステムを利用した土の凍結過程の熱・水分・溶質移動計算のパラメータ入力画面<sup>2)</sup>。

### 地球環境と土壌物理

自分の凍土研究に関して、現実のフィールドを持っていない弱点や異分野の研究者との議論の必要性を感じていたので、97年にシベリアでの気象・水文の観測に加わった<sup>3)</sup>。地球温暖化のセンサーとして広大なシベリアの永久凍土は新鮮で、面白い現象の宝庫だった。しかし実際に現地に行ってみると感じたのは、フィールドの不均一性の問題だった。実験室では理想的な実験条件を予め設定し、そこで生じる現象を記述し、その現象を説明するモデルを作ることができる。しかし現実のフィールドでは、異なる植生の凸凹な地表面をどのように表現すべきか、場所によって組成の異なる土をどう近似すべきか、このとき自分がやってきた土壌物理がコップの世界であったことに気がついた。事象を細分化し、その系での現象を解明し、それを再統合することで全体の現象を解明できたとする還元主義的な土壌物理が見落としていた問題だった。

### フィールドの土壌情報科学

シベリアでは広大なツンドラに観測機器を設置した。

しかし、一年後にそのデータを回収に行くとデータロガーは3日間のデータだけを記録して362日間停止していた。私は愕然とした。この時に初めてフィールドからデータを取ることに難しさを実感した。せめて1週間に一回で良いから日本からデータをチェックできれば....それを可能にする技術があれば世界中のフィールド科学研究の役に立つに違いない。これがフィールドモニタリングシステム<sup>4)</sup>(FMS)のアイディアの原点である。そして、これまで私が経験したセンシング技術とフィールドの科学、そしてインターネットを束ねた土壌情報科学を始めるようになった。



Fig. 3 シベリアのツンドラに設置された観測機器 (1997年8月: 著者撮影)。

### 役人として見た農学と土壌物理

私は型にはまった“役人的な”ことが大嫌いだった。小学校の通知表には「創造性を発揮し過ぎて学習目標から外れることがあります」と書かれるような子供だった。それなのに2003年から2年間、内閣府で役人を経験することになった。しかし、いざ役人の真似事をやってみると自分が食わず嫌いだったことを発見し、役人に対する見方が180度変化した。日本の科学技術政策の中で農学とか土壌学というのは認知度が低いこと、その理由が農学研究者のアウトリーチ活動不足に起因していることに気づいた。内閣府で気候変動や水循環、生物多様性の分野に関わったこともあり、大学に戻ってからは、土壌を寒冷地域のみならず熱帯地域も含む地球規模でとらえる必要性を感じ、長年住み慣れた土壌物理の研究室から国際農業の研究室に移籍した。シベリアとは異なるタイやインドネシアの熱帯土壌を見る機会が増えたことで、土壌の多様性を認識した。また、その地域ごとに土壌の特性や生活の知恵を活かした農業形態や文化があることを知った。しかし、その一方で土壌中に起こっている現象をシンプルに理解する上での土壌物理の重要性も再認識できた。

### 東日本大震災で研究人生が変わった — 復興農学

2011年3月11日に東北地方太平洋沖で大地震が発生した。津波により多くの方が命を失い、多くの農地が海水に浸かった。また、原発事故により農地や山林が放射性物質で汚染された。土壌物理学的には、土壌と一俵の

陽イオン（海水に浸かった土壌ではナトリウム，放射性物質が降下した土壌ではセシウム）の吸着と移動現象の問題であった。しかし，世間的には不思議なくらいに土壌物理の存在感が薄かった。マスコミを含めた一般人に「土壌物理学」は全く知られていなかったのである<sup>5)</sup>。これは私の世代の責任でもありその上の世代の責任でもあろう。

私のやってきた土壌物理は農業には全く役に立たなかった。農家育ちのくせに，凍土だ，粘土だ，情報だと農業のための土壌物理から逃げまくっていた。しかし福島の放射性セシウムの問題で全てが繋がった。なぜセシウムは地表面に留まるのか。放射性物質で汚染された地表面をなぜ除染をしないといけないのか，どうやって除染するのか，いまこそ土壌物理の専門家が必要されていると思った。

震災直後の冬に飯舘村の水田で凍土剥ぎ取り法を思いついたのは自分が凍土をやっていたからだ。このとき「神様はこの問題を解決させるために今まで僕に関係ないことをさせていたんじゃないか」と思えて体が震えた。放射性セシウムの問題は一人の研究者で解決できる話ではない。私の任務は，多くの土壌物理研究者を巻き込みながらこの問題解決にあたることだ，と思った。



Fig. 4 放射性セシウムを含む凍土の剥ぎ取り実験 (2012年1月8日)。

いま現場では農地の排水不良の問題に直面している。汚染表土の削り取りのために重機で踏み固められた上に山砂を客土されているために雨水が浸透できずに，山砂が侵食される。コンペネで地耐力を測定したり，ディスクパーミアメータで土層ごとの透水性を測定したり，地中レーダで客土層厚の平面分布を調べたり，除染後の農地では土壌物理の測定機器が不可欠である。

#### 今後の土壌物理学の展望 — 土壌教育

私の土壌物理は現実離れから始まった。いまは現実の福島問題に対峙しているが，若い学生までと一緒に深刻になる必要はない。学生には若者の感覚を大切にしながら興味あることをストレートに追及してほしい。それが将来の想定外の問題に対して柔軟に対応するための秘訣だと思う。

私がいま 20 歳だったらやってみたいことに「土で遊ぶゲーム」作りがある。スマホを使って生きた土を扱うゲームを作りたい。地域の気象情報や水文情報をリアルタイムで取り込み，土壌情報と融合させて究極の野菜を育て，世界のマーケットを相手にそれを売りさばくゲーム。おそらく究極の野菜の違いは「土」に依存することになる。その土をいかに作るか。その情報を世界中の子供たちと共有する。世界の子供たちを集めてロボコンならぬ土コン（土コンテスト）や土オリンピックを開催し，オタクな Soil Scientist の卵を育てたい。

いまの科学者は先端研究に引きずられ過ぎているように思う。それが科学の宿命なのかも知れないが，原発事故時に即座に行動できなかったような科学技術であってはならない。大切なのは人づくりだと思う。土壌物理を志す理由は人それぞれだろうが，最初から「土壌物理」の存在を知っていた研究者はいない。みな子供の頃の泥んこ遊びや砂遊びの経験を踏み台にして，ちょっとした何かのきっかけで土壌物理の世界に入ってきたのではなからうか。いま何をやろうかと悩んでいる大学生もいずれは親になって自分の子供に接することになるだろう。その時に土壌を学んだ人間が「土はバッチい」といわずに，土の面白さや大切さを自分の子供に伝えられるようになってほしいものである。

この記事は国連の国際土壌年の企画インタビュー<sup>6)</sup>に基づいて書いた，そのため昔を懐かしむ老害的な文章になってしまったかも知れない。しかし私自身は次世代の応援団として土壌物理研究の環境改善のために日々努力しているつもりである。若者の視点でインタビューしてくれた名倉理紗さん（元明治大学大学院生）に感謝する。

#### 参考資料

- 1) 溝口 勝: インターネット応用作品集, <http://soil.en.a.u-tokyo.ac.jp/mizo/inetworks.html>
- 2) M. Mizoguchi: Development of internet tools for calculation and prediction of soil hydraulic properties, Proceedings of the International Workshop on Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media, Edited by M. Th. van Genuchten and F. J. Leij, 341–347 (1997)
- 3) 溝口 勝: 土は地球の皮膚，農業・21世紀への挑戦～地球を救う50の提案～, 182–183, 世界文化社 (2000)
- 4) 溝口 勝・伊藤 哲: 農業・農村を変えるフィールドモニタリング技術, 水土の知, 83 (2), 3–6 (2015)
- 5) 溝口 勝: 震災復興の土壌物理学, 土壌の物理性, 124, 53–54 (2013)
- 6) 国際土壌年の企画インタビュー: [http://www.iai.ga.a.u-tokyo.ac.jp/pocket/IYS/interview\\_Masaru%20Mizoguchi.mp4](http://www.iai.ga.a.u-tokyo.ac.jp/pocket/IYS/interview_Masaru%20Mizoguchi.mp4)