J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 150, p.23 ～ 83 (2022)

みんなのミニレビュー

Table 1　執筆者氏名 · タイトル一覧.

掲載順	執筆者氏名	タイトル
1	粟生田忠雄	地下灌漑
2	赤羽幾子	土の機能を理解するために必要なこととは？ ～初等 · 中等教育における土壌教育の実践～
3	朝田　景	食料生産 · 消費がもたらす反応性窒素による環境負荷
4	足立泰久	出会い，国際会議と研究環境
5	飯山一平	野外における含水率 – マトリックヘッド関係
6	石川奈緒	土壌中の物質の動き — 粘土鉱物，土壌有機物とセシウムの関係 —
7	石黒宗秀	土と物質循環について
8	石崎武志	土の凍上現象，文化財の劣化と水分移動
9	伊藤　洋	土壌中の CO_2 濃度から地すべり予測へ
10	猪迫耕二	塩害水田の修復に関する研究
11	井本由香利	改正土壌汚染対策法における移流分散解析の利用
12	岩田幸良	土壌水分計の測定誤差要因について
13	岩間憲治	土壌中の物質移動あれこれ
14	大貫靖浩	森林土壌の厚さと堅さ — 30 年に亘る測定で何がわかったか —
15	長田友里恵	凍土とのこれまで
16	甲斐貴光	圃場の排水性
17	柏木淳一	醸造用ブドウ園土壌における物質循環
18	亀山幸司	バイオ炭による土壌物理性の改良
19	木原康孝	土壌の移動現象あれこれ
20	久保寺秀夫	有機物資材と土壌物理性
21	小島悠揮	土壌の熱特性測定技術を活用する
22	小杉賢一朗	森林水文学 · 砂防学における土壌物理の研究
23	小林政広	森林土壌の保水性 · 透水性について
24	小林幹佳	私的史的フロック
25	近藤文義	軟弱地盤改良土のスレーキングについて
26	齊藤忠臣	一貫性のない私の雑多な研究
27	齋藤龍司	野菜畑から見た水田土壌の奥深さ
28	斎藤広隆	アレイアンテナ地中レーダーによる土中水分移動過程の可視化について
29	坂口　敦	ダイズやムギの深度別根密度調査の方法
30	佐藤泰一郎	風蝕の予測と抑制のために

Table 1　執筆者氏名 · タイトル一覧（つづき）.

掲載順	執筆者氏名	タイトル
31	佐藤直人 · 丸尾裕一 野川健人 · 登尾浩助	多孔質体中の浸潤現象に対する重力の影響
32	澤本卓治	これまでの研究活動を振り返って
33	篠宮佳樹	森林での極端に大きな出水時の栄養塩動態
34	小路　敦	草原の生物多様性保全に向けた土壌物理学的観点からの取り組み
35	末継　淳	不均一流下での土壌微生物の活動と物質循環
36	杉本卓也	ヘテロなコロイド輸送現象に向けて
37	鈴木克拓	北陸地方の粘土質圃場における懸濁物質の暗渠流出
38	鈴木伸治	気候変動に伴う降雨パターンの変化が農地と作物に与える影響の評価と適応農法の確立に向けて
39	関　勝寿	線形和水分保持関数からの不飽和透水係数計算法
40	髙橋智紀	湿害を分割してみる
41	竹内晴信	農耕地の土壌物理性改善を夢見て
42	田村憲司	土壌微細形態学の重要性
43	塚本康貴	私の研究紹介
44	辻本久美子	土壌水分の衛星広域観測と湿潤土壌誘電率
45	徳本家康	不撹乱土中の水分 · 溶質移動
46	取出伸夫	動相不動相モデルによる土中の溶質移動
47	中尾誠司	農用地の土壌侵食と出会って
48	中川　啓	地震 · 津波と地下水汚染
49	中島　亨	炭素貯留と Soil Health
50	中嶋美幸	秋浅耕による水田からのメタンガス放出抑制
51	永田　修	泥炭地における研究を振り返って
52	中辻敏朗	土壌凍結深制御による畑の生産性向上
53	中野恵子	素材と機械と出来上がり
54	中村　乾	水管理による玄米中 As·Cd 低減技術の開発
55	中村公人 · 吉岡有美	水の安定同位体を用いた地域の水循環評価
56	西田和弘	水管理に伴う水田の窒素環境の変化
57	西村　拓	水食を予測する
58	西脇淳子	土壌構造と水移動について
59	丹羽勝久	大規模畑作地帯におけるリモートセンシング技術の利用について
60	濱本昌一郎	土壌中における微細気泡挙動について
61	笛木伸彦	有機農業と土壌物理性
62	藤川智紀	間隙構造と土壌物理性の関係
63	宮本輝仁	転換畑における水移動について
64	武藤由子	畑地土壌中における水分移動と窒素動態
65	森　昭憲	草地の温室効果ガス収支について

Table 1 執筆者氏名 · タイトル一覧（つづき）.

掲載順	執筆者氏名	タイトル
66	森塚直樹	色彩計による土色の測定
67	柳井洋介	土の構造が酸化還元反応を制御する
68	柳川亜季	土壌劣化から生態系機能評価まで
69	山下祐司	イモゴライトのコロイド界面化学特性と有機高分子の吸着
70	弓削こずえ	畑地の消費水量の定量化を目指して
71	吉田修一郎	構造が目まぐるしく変化する水田土壌
72	渡辺晋生	凍結 · 融解に伴う土中の水分 · 熱 · 溶質移動

地下灌漑

粟生田忠雄
新潟大学農学部

キーワード: 暗渠，汎用化水田，排水性

土壌物理を志したのは，紛れもない指導教授陣の人間性にある．彼らの指導は，個性的で飾らないが常に熱を帯びていた．こうして，土壌物理の面白さにのめり込んだ．ただし，その足跡（たとえば吉田, 1960）は大きく，著者のもがきは止らない．地下灌漑は，こうしたもがきから生じた研究の種である．

地下灌漑は，水田の汎用化などの高度利用に不可欠な技術．また，夏の高温やフェーン現象による水稲収量減や等級低下への対策は，喫緊の課題である．今日，地下灌漑は，様々な様式が提案されている．松原ら（1985）は地下灌漑黎明期の技術開発を述べた．調節水路の水位制御で圃場へ地下灌漑させる．福本ら（1992）は，粘質土壌畑における地下灌漑を検討し，亀裂を含めた心土の透水性評価の重要性を指摘している．古檜山ら（2014）は，地下灌漑装置による地下水位制御が水稲のタンパク質吸収を抑制する可能性を示唆した．中野ら（2014）は，地下灌漑装置による地下水位制御が大豆収量の増，および秋まきキャベツの過湿害回避に寄与することを示した．越山ら（2017）は，北海道の大区画水田において異なる栽培方式での用水量を検討した．直播栽培の普及で中干し後の再取水の用水需要のピークが緩和されることを明らかにした．坂田ら（2018）は地下灌漑による水稲栽培が，土壌の温度環境を均一にする傾向を示した．粟生田（2020）は地下灌漑が夏季高温条件下において水田の土壌温度を抑制しうることを示唆した．また金田ら（2018）は，地下灌漑が高温条件下でも水稲の品質を維持することなどを解明した．

地下灌漑システムは消耗品ではなく，20 年 30 年の使用に耐える農業インフラである．このため施工コストや取扱方法など導入には慎重な検討を要する．Aoda et al.（2013）は，技術者への普及のため，エクセルを用いた浸透流解析で地下灌漑する際の圃場内の流線，および等ポテンシャル分布を表す数値モデル開発した．中村 · 越山（2018）は，地下灌漑による用水の動きを 3 次元的に動画で表し農家の情報提供ツールを開発した．

このように地下灌漑の研究は，作物生育管理の観点では解明すべき課題が残されているが，農業者や技術者への普及も進んでいる．

引用文献

Aoda et al. (2013): Procedia Environmental Science, 19: 465–473.
粟生田 (2020): 開発学研究, 13 (2): 69–76.
福本ら (1992): 土壌の物理性, 64: 11–20.
金田ら (2018): 日本土壌肥料学雑誌, 89 (3): 197–203.
古檜山ら (2014): 農業農村工学会論文集, 290: 23–32.
越山ら (2017): 農業農村工学会論文集, 304: I_7–I_14.
松原ら (1985): 土壌の物理性, 52: 18–29.
中村 · 越山 (2018): 土壌の物理性, 140: 15–22.
中野ら (2014): 園芸学研究, 13 (2): 125–133.
坂田ら (2017): 農業農村工学会論文集, 304: I_129–I_135.
吉田 (1960): 農業土木研究 別冊, 1: 19–26.

土の機能を理解するために必要なこととは？ ～ 初等 · 中等教育における土壌教育の実践 ～

赤羽幾子
農研機構企画戦略本部

キーワード: 土壌教育，学習指導要領，表土，落ち葉めくり，持続可能な社会の創り手

私が土壌教育活動に取り組むようになったのは，2014 年に（一社）日本土壌肥料学会の土壌教育委員会（以下，「委員会」と記す）委員になったことがきっかけである．国際土壌年の 2015 年，委員会は全国の小学生 ～ 大学生を対象とした土に関するアンケート調査を立案 · 実行した．このアンケート調査では，児童の「土の必要性への意識」および「土への関心」に影響する要因について，興味深い結果を得ることができた（平井ら, 2017; 藤間ら, 2017）．「土の必要性への意識」や「土への関心」に対し，周囲に土のある場所が多いこと，土の知識や土に触れる機会が増えることはプラスに働き，学年の進行はマイナスに働く要因になることが示された．

アンケート調査の結果を受け，わが国の学校教育において「土 · 土壌」がどのように取り扱われているかを把握するため，学習指導要領理科に記載された「土 · 土壌」の内容を調査した．学習指導要領小学校理科において「土 · 土壌」が登場する回数は，学習指導要領の改訂に伴い減少した（平井ら, 2011）．昭和 52 年の改訂以降，「土 · 土壌」に関する記述は，土は流れる水で運搬され堆積する自然物である．平成 20 年の改訂で 1 回まで減少した登場回数は，平成 29 年 3 月に告示された新学習指導要領では 4 回まで増えたが，「水のしみ込み方は，土の粒の大きさによって違いがあること」を理解させ，自然災害との関連を図ることを目的とする内容であった．学習指導要領中学校理科では，「生物の生活は，光 · 温度 · 水 · 土などの環境要素に支配されること」，「土は，岩石が風化してできたものであること，その成分や粒度などによって性質が違うこと，およびその違いが植物の生育に影響すること」のように，土を環境要因の一つと位置付ける内容で取り上げていた．「土 · 土壌」の記述は平成元年の改訂で消滅し，平成 10 年の改訂では「土壌動物」の記載はあったものの，環境要因に触れる内容が削除された．

学習指導要領理科における「土 · 土壌」の取り扱われ

方を調査した結果，土を系統的に学習する内容になっておらず，断片的に扱われていることが伺えた．児童・生徒は小学校理科で学習する「岩石が砕けてできた，大小様々な大きさの石や砂や粘土の粒の堆積物」として土を認識し，そのイメージのまま学年が進行してしまう可能性が高い．星（2018）による大学生の土に対する意識調査では，学生の多くが土と砕屑物の違いを理解していないことが示唆された．星（2018）は，この結果と初等・中等教育における土の扱いとの関係性を指摘している．理科，生活科，社会科，技術・家庭科の教科書に土の記載があるが，その取り扱いは付随的であり，土そのものの性質や機能などはほとんど説明されていないことが報告されている（福田, 2006）．

私は土の機能を理解する大前提として，生物や有機物を豊富に含む，森林の地面の表層に形成する「表土」の姿をイメージできることが肝要だと考える．学習指導要領に記載された指導内容の範囲でそのイメージを構築するならば，近隣の雑木林を利用して，地面の落ち葉をめくる活動が有効であろう．落ち葉をめくっていくと，落ち葉の形が徐々に無くなり，細かく砕かれていく様子が観察できる．細かく砕かれたもの（落ち葉の分解物）を注意深く観察すると，岩石が砕けてできた小石，砂，粘土などの自然物や生物が混じりあっていることに気づく．そして，それが「土」であると知ったとき，自然物の堆積物以外の「土」が認識されるだろう．さらに地面を掘り進めていくと，表層と次表層の「土」の違い（硬度，土色，手触り，匂い，湿り，植物根の有無，等）を体感する．このような経験と段階的な学びが「表土」の感受に繋がると考える．

福田（2004）は，児童・生徒の土に対する知識・関心が乏しく，土の理解が進んでいない要因として，環境や生活が様変わりしたこと，加えて教育現場での土の取り扱いが消極的であることをあげている．この状況は土に携わる者として改善したいと思う．委員会が各地で開催する土壌断面観察会や土壌教育教材の開発を進めるとともに，土壌物理学会に所属する研究者や技術者が積極的に学校現場に働きかけることが重要である．新学習指導要領の前文には「持続可能な社会の創り手」の育成が明記された．生命の基盤となる「土」の理解はこれに寄与するものである．土壌教育に取り組む際はなぜ「土」を学ばなければならないのか，その理由も丁寧に伝えていきたい．今後も微力ながら土壌教育活動を続けていこうと思う．教育関係者と交流し，落ち葉めくりの実践とその有効性について議論を進めたい．

引用文献

藤間ら（2017): 日本土壌肥料学雑誌, 88: 527–537.
福田（2004): ペドロジスト, 48: 109-116.
福田（2006): 日本土壌肥料学会雑誌, 77: 597–605.
平井ら（2011): 日本土壌肥料学雑誌, 82: 52–57.
平井ら（2017): 日本土壌肥料学雑誌, 88: 205–212.
星（2018): 愛知教育大学研究報告（自然科学）, 67: 53–60.

食料生産・消費がもたらす反応性窒素による環境負荷

朝田　景
農研機構 農業環境研究部門

キーワード: 窒素利用効率，窒素カスケード，環境フットプリント，エシカル消費

食料生産・消費過程で排出される反応性窒素（Nr: Reactive Nitrogen，窒素ガス以外の窒素）による環境負荷を減らすため，私たちは持続可能なフードシステムへの転換を確実に図っていく必要がある．そのためには，農地 ～ 家庭の食卓，国・地域に至るまで，分野を超えた問題意識の共有と相互理解が求められている．

豊富で不活性な大気中の窒素を Nr に変換する人工固定化技術は食料の生産性を飛躍的に向上させた．一方，このわずか 1 世紀の間に増大した Nr の循環量は既に地球の持続可能である限界を超えたとみられている（Campbell et al., 2017）．Nr は形態を変化させながら大気・陸域・水域で複雑にカスケードし，各段階で深刻な環境汚染を引き起こしている（UNEP, 2019）．

窒素負荷の少ない食料生産・消費には，窒素利用効率（NUE: Nitrogen Use Efficiency，投入窒素に対する持出窒素の割合）を向上させ，窒素肥料の使用量を削減する等の Nr 管理の適正化が必要である（Zhang et al., 2015）．しかし，世界の平均 NUE（作物栽培: 約 46 %，作物栽培から食品の流通・加工・消費まで: 約 29 %）は過去数十年低いままである（Sutton et al., 2013 等）．

NUE 向上に向けて，起源の異なる窒素の投入から持出・排出までのフローを定量化し，改善すべき箇所を特定する手法に窒素収支解析がある（Shindo et al., 2009; 松本ら, 2017 等）．Hayashi et al.（2021）は，2000 年から 2015 年における日本でのあらゆる人間活動の窒素収支を明らかにし，社会的・経済的背景を考慮しながら適正な Nr 管理に向けた課題を抽出した（窒素収支の算定に用いた全てのデータは論文の補足情報から入手可能）．その結果，環境への Nr 負荷量はこれまでの施策等により経年的に減少したが，発生源としての食料生産の割合は微増傾向にあった．食料生産による Nr 負荷量は農地の余剰 Nr 量（投入窒素と持出窒素の差）に直結するが，欧州各国と比べて日本の余剰 Nr 量は高く，長年改善されていない．江口ら（2021）はその要因の 1 つに，窒素肥料に頼る耕種農家と輸入飼料に頼る畜産農家との分業化があるとして，余剰 Nr の適正な管理・リサイクルのための両者を繋ぐ仕組みやインセンティブのある環境整備が必要であるとした．

これまでの Nr 負荷の低減対策は主に生産者が対象であったが，消費者による判断や食品の選択行動が食料生産パターンを変えるとして，消費者に働きかける手法が近年開発されている．「食品の窒素フットプリント」は，

食品の消費によって一人当たりが環境に放出する Nr を生産 · 流通 · 加工にまで遡って定量化した指標である（種田ら, 2018）．日本では，私たちが口にするコメに含まれる Nr の 1.7–3.3 倍（NUE 23–37 %，Hayashi et al., 2021 等），牛肉では 26.3 倍（NUE 3.7 %，Mori et al., 2020）の Nr が消費以前に無駄となる．さらに，Clark et al.（2019）は，様々な食品に対する「継続的な摂取（食習慣）によるり患リスク」と「その生産に起因する環境負荷リスク」を多面的に解析し，健康状態の改善に効果のある食品は環境負荷が小さいことを示した．環境 · 健康 · 食習慣を繋ぐこれらの研究は，環境に配慮した食習慣への移行とフードシステムへの転換を消費者自らの問題として意識させると考える．

引用文献

Campbell et al. (2017): Ecol. Soc., 22: 8.

Clark et al. (2019): PNAS, 116: 23357–23362.

江口ら（2021): 土肥誌, 92: 208–288.

Hayashi et al. (2021): Environ. Pollut., 286: 117559.

松本ら（2017): 土肥誌, 88: 1–11.

Mori et al. (2020): Environ. Res. Lett., 15: 125007.

種田ら（2018): 日本 LCA 学会誌, 14: 120–133.

Shindo et al. (2009): Soil Sci. Plant Nutr., 55: 532–545.

Sutton et al. (2013): Our Nutrient World: The challenge to produce more food and energy with less pollution.

UNEP (2019): Frontiers 2018/2019. The Nitrogen Fix: From Nitrogen Cycle Pollution to Nitrogen Circular Economy（日本語訳あり）.

Zhang et al. (2015): Nature, 528: 51–59.

出会い，国際会議と研究環境

足立泰久

筑波大学 生命環境系

キーワード: 世界化学工学会議，IACIS，IAP，ELKIN

私の研究室は現在コロイド界面を中心に展開していますが，編集担当の方からは，「テクニカルな内容についてというよりは，どうしてこのような環境ができたかというあたりを説明できないでしょうか」と伺いましたので，大学院から学位を取得した前後とその後の国際会議での出会いを中心にミニレビューしてみることにしました．

今回の企画には「土壌物理を志したきっかけ」とありますが，土壌物理という限定があれば，大学院の時に研究指導をお世話になった農業土木試験場の大井節男さんの隣の研究室に岩田進午さんの存在だと答えることができます．私は元々農業水利（水）の研究室に進学しており，指導教授の志村先生は，卒業研究のテーマ設定で水理学ではなく水利学をやって欲しいということで「矢作川の流域管理」について卒業論文を書きました．その後修士課程に進学したものの，1 年ぐらいかけてテーマを考えなさいというようなノリで学科共通の大部屋（大学院生室）に入れられ（ある意味ほったらからし）ていました．最初のゼミの順番が回ってきたとき，話すネタがないので，指導教授のマネをして生態学と農業水利のようなおおざっぱな内容で，神安土地改良区の 2 次処理水の農業用水還元の話や明治用水の地域管理用水としての水質浄化の考えかたについて報告しました．その直後，教授室に呼ばれ，水質は重要だけど物の見方はもっと重要だということで農業土木試験場の大井さんを紹介いただきました．数か月間紆余曲折はあったものの，修士論文は大井さんにお世話になりました．

前置きが長くなりましたが，その大井さんの隣の研究室で農環研から異動してきた岩田さんが室長をされていました．当時，岩田さんは粕淵さん，長谷川さん，宮崎さんなど錚々たるメンバーによる熱い雰囲気のゼミを定期的に開催されておりました．1，2 度のぞかせていただいたのですが，そのダイレクトでフランクな雰囲気に大きなカルチャーショックを受けました．おそらく，今会長をされている取出さんも元会長の溝口さん，石黒さんも同じような影響をうけ，ある種の共感世代が形成されていました．岩田さんから学んだことは，基礎研究の重要性には違いないのですが，それ以上に研究環境は自分で作るんだという研究に取り組む姿勢への気づきだったといえます．ただ，その気づきによって，私も大井さんも土壌物理とは一線を隔している何かを作ろうと無意識に意識していたのだと思います．以下に紹介する国際会議における出会いは “作ろうとしていた何か” が少しずつ具現化していくきっかけになっていると思います．

世界化学工学会議

最初に出席した国際会議は 1986 年に東京で開催された第 3 回世界化学工学会議でした．この会議は日本の化学工学会が総力を挙げて日本に誘致したもので，成功すれば化学工学のレベルがグーッと上がるはずだと，大井さんのサジェスチョンが有リ，張り切ってろ過（固液分離）の白戸紋平先生のセッションに発表参加しました．あまり土壌物理では知られていませんが，白戸の式は本質的にテルツアギの圧密理論と同じ問題ととることができます．会議開催は博士課程の 2 年目でしたが，何もかもが新鮮で，その情景は昨日のように思い出されます．わたしの発表はピンポン玉で作ったフロックの模型からフロックのクラスター間接点数がフロックの構造を記述する上で本質的に重要だと指摘した内容でした（Adachi and Ooi, 1990）．ところが，私の隣には凝集工学のホープの東谷公先生が，ペレット凝集のポスターを張り，既に投稿論文を書きあげており A4 判のタイプ原稿を 30 センチぐらい束に積み上げそれを配りながら集客力抜群の発表をされていました（Higashitani and Kubota, 1987）．東谷先生の発表内容は私のそれを大きく包含しており，その勢いには “圧倒される” の一言でした．私の発表にくるお客さんはそれほど多くなかったので，その分隣の東谷先生の発表内容をしっかり勉強することができました．我々のポスターには後に北大総長をされた丹保憲仁

先生も現れ，「あなたが発表しているようなフロックの仕事はもう大体方がついているが，強いて挙げるなら東谷先生のようなペレット凝集はまだやる価値がある.」と発せられました．その言葉に内心は「そうじゃない，こっちもやることが残ってる」と思いながらも，この日から，私の高分子を用いた凝集の研究が始まったといえます．

IACIS

博士課程在籍中に国際コロイド連盟（International Association of Colloid and Interface Scientist 以下 IACIS）の会議が箱根で行われる情報を，筑波大の古澤先生からいただき博士論文の中から，凝集速度とフロックの構造形成のイオン強度依存性について abstract を送って参加しました．この会議は 3 年ごとに行われ第 6 回の会議を日本化学会コロイド界面部会が総力を挙げて日本に誘致したもので，デリアギン博士など歴史上の研究者を目の当たりに見る機会にもなりました．IACIS についてはその 3 年後にフランスのコンペーニュで開催された第 7 回会議も私にとっては重要で，留学先の Wageningen から参加した私は駆け出しの研究者であったにも関わらず，プログラム上はたいへんいい場所で発表させていただいた上にチェアマンに抜擢されるなど，破格の待遇を受けました．この会議では，ノーベル賞を受賞する直前の De Gennes がプレナリーレクチャーをされましたが，講演で高分子吸着のダイナミクスに触れ bare surface への吸着緩和の重要性を指摘したとき，化学工学会議の隣のポスターの東谷先生の発表から考えてやっていた実験のアイディアが整合していることを確認しました．

IAP

オランダから帰国し，理学的なコロイド界面の仕事と農業土木には大きなギャップ（溝）を感じてたのですが，運よく 4 人もの学生さんが卒業研究を私の研究室でスタートすることになり，フロックの破壊（Kobayashi et al., 1999），沈降速度（Adachi and Tanaka, 1997），高分子電解質による凝集（Matsumoto and Adachi, 1998），粘土のレオロジー (Miyahara et al., 1998) と並列的にテーマをたて，その溝を埋めるべく本格的に研究室を立ち上げることができました．しばらくしてから Wageningen の Koopal 先生から，環境汚染と界面科学をテーマにした国際会議（Interface Against Pollution）のサーキュラーが届きました．私にとって渡りに船のように感じられ，運良く定員 1 の茨城県の国際会議参加の若手助成も get したので大手を振って出張参加することができました．また，丁度同じころ農業土木学会誌で岩田さん，大井さん，前述の共感世代を中心に多くの方々に協力いただき連載講座「土のコロイド現象」の企画を編集委員をされていた中石さんが会議で企画をうまく通していただき，大井さんが招聘してくださった Koopal 先生の集中講義の内容も加えずるずる引き延ばして計 20 回の連載企画が実現しました．さらに最終的には科研費の企画調査研究なども組み込んで総勢 28 名の執筆者からなる単行本の形までまとめる機会にも恵まれました（足立 · 岩田, 2003）．このように研究者の駆け出しの頃は，土とコロイドの関係構築が非常にスムーズで上り調子だったと思います．IAP の 2 回目のハンガリーの会議では，懇親会での酔った勢いで Koopal 先生から，「次は日本だ.」と宿題ももらってしまいましたが，この宿題については，以前学会長の挨拶のところで書かせていただきましたが，「可能と思うしやる価値がある」と大井さんが賛同してくださり，その後 Julich（ドイツ），アルハンブラ神殿のグラナダ（スペイン）を経て，アルハンブラに対抗するには京都しかないということで 2008 年の 6 月に大勢の方の協力のもと京都大学の時計台で開くことができました．IAP は国際会議でしたが，国内においても様々な分野に分散していた界面科学の研究者が環境の名のもと一同に会するたいへん貴重な機会になりました．その結果，吸着やコロイドの凝集を中心に界面化学の大筋が実感できた気がします．

ELKIN

IAP2008 の準備は本当に大変でしたが，その後の私の行動原理は京都の IAP を単なるお祭りにしないためにはどうしたらよいのかということになったかもしれません．その行動原理は今も続いていますが，「細々と長く続けること.」と言える気がします．IAP の Chair はこの人しかいないと東京理科大学の大島広行先生のところに大井さん，石黒さんとお願いに行った時，界面動電現象に関する国際シンポジウム（ELKIN）とセットで開催する流れが作られ，筑波は Almost 東京ということで 2012 年に ELKIN を開催する路線が示されました．IAP の反省点はお祭りの世話に一生けん命になりすぎて，自分達の研究活動がおろそかになったこと，国内委員会を継続させる形で組織化しなかったので，IAP のあと何も残らないようになってしまったことなどを痛切に感じたので，ELKIN の方はそうならないように，国内には界面動電現象研究会の発足を呼びかけ，学内的には研究推進の形態として生物資源コロイド工学リサーチユニットを組織し，その準備にあたりました．ところが会議開催の前年の 2011 年 3 月 11 日，プレコンファレンスの初日，我々は東日本大震災を被災しました．東日本大震災の復興の中，本当に開催できるかも不透明なまま ELKIN の開催の準備が進みましたが，困難な状況ではあったものの，直前に仙台で開催された IACIS の会議を組織された栗原和江先生，IACIS 会長の Prieve 先生，Wageningen でお世話になった Lylema 先生，凝集研究のライバルでもあった東谷先生，さらには福島で開催された復興のシンポジウムに訪れたモスクワ大の Zezin 先生，またプレコンファレンスで一緒に被災した内外の研究者など世界中の方々の友情に支えられ本会議自体は比較的スムーズに開催することができました．

ロシアとの交流

ELKIN 後，土壌物理として特筆すべき交流がモスクワ大学と開始されました．モスクワ大学のカバノフ教授は高分子電解質の研究で先駆者の 1 人に数えられる研究者ですが，チェルノブイリの事故の際，自ら陣頭指揮しヘリコプターで高分子電解質複合体（PIC）を散布し，

放射能の拡散を防いだことでロシアの科学アカデミーの名を世界に馳せた方です（現代化学, 1999）．前述したとおり ELKIN の開催と東日本大震災からの復興が重なったことで，我々はモスクワ大学のカバノフ教授が切り開いた高分子電解質の分野研究室と交流を持つようになりました．ELKIN の翌年には高分子ミクロゲルを研究されている小川和義先生と極寒のモスクワを訪問し，環境コロイドと高分子電解質のセミナーを行い，その翌年の 2014 年には TGSW（筑波グローバルサイエンスウィーク）で，セッションを組み，その特集号を Advance in Colloid and Interface Science に組みました．また 2016 年には再びモスクワで開かれた高分子電解質に関する国際会議（Polyelecrolyte 10）へ参加し，その翌年には若干 19 歳で名門モスクワ大学の学士課程を卒業したピカ一の留学生（Ilyasov 君）を半年間受け入れ，ミクロゲルによる凝集を指南し共同研究を開始しました（Ilyasov et al., 2020）．彼はそのミクロゲルをロシアに持ち帰り，砂質土に混入させクラスト形成による耐食性の向上，水分保持特性の改善などを報告するにいたりました（Panova et al., 2021）．土壌物理の視点では水分保持のモデル（van Genuchten, 1980）の座標軸に高分子化学の視点を組み込んだプロットを行ったことは今後の展開の方向性としても重要な指摘ができたと思っています．このやり方はペレットを形成する他の系にも適用できるはずなので今後も続けて検討したい課題になりました．さらに進めれば高分子と水界面の濡れ性の視点で土壌の保水性，不飽和土の透水性などが記述できる可能性が出てきます．ここまで来ると Van't Hoff や van der Waals などのオランダのコロイド界面化学の発祥が土壌物理とつながっていることなどが見えてくる気もします（塚原東吾, 2000）．

IAP のその後

最後に京都の会議では多くの土壌物理学会の方にお世話になったので IAP のその後について報告します．京都の会議は飛躍的な大成功は次の開催の大きなプレッシャーになりました．しかし，程なく北京の中国科学院生態研究センターが名乗りを挙げ，2010 年北京（水環境）で行われました．その後，ヨーロッパに戻り 2112 年 Nancy（フランス），2014 年（オランダ），2016 年（スペイン），モンペリエ 2018（フランス）と旅をし，2020 年は再び武漢（中国）と来るはずでしたが，コロナウィルスがタイミング良く武漢の市場で発生し 1 年延期され本年の 5 月にオンラインで実施されました．ホストを務めた華中農業大学の土壌の研究室の Wengfeng Tan 先生は最近の地球環境問題の中での趨勢を捉え，バイオフィルム，マイクロプラスチック，ヒ素汚染，バイオチャー，抗生物質耐性菌と界面の関係を浮き彫りにするような素晴らしい会議を開催しました．次回は来年の 9 月にベルギーの古都アントワーペン，そして 2024 年がイタリアのアルプスの麓トリノで実施されることが決まりそうな気配です．地球規模の環境問題認識の追い風もありますが，踏み外さないよう立派な会議に成長できればと思っています．

謝辞

職場での定年が近づき自分の研究者人生もそろそろ終盤に差し掛かってきたかなと思いますが，今後の展開は初心に回帰することを意識しながら，一周回ってきたコロイド凝集に関する基礎を追求しつつ，それを踏まえた視点で生態系に関わるような工学的問題を土の世界にも水の世界にも示せたらと思い，数年後を目標にもう一頑張りできたらいいなと考えております．また，このようにかなり自由に研究を展開してこれたことは研究室にて卒業論文，修士論文，博士論文を仕上げた卒業生の努力によります．また，これまで研究室運営を支えていただいています准教授の小林幹佳先生，助教の山下裕司先生，杉本卓也先生，技術職員の櫻井進氏にお礼申し上げます．尚，人名の敬称に統一がありませんが，その場所場所，その時々の慣例を尊重いたしました．私の研究は多くを科研費に依存していますが，最近はデータベースが充実していますので，そちらを参考にしていただければと思います．

引用文献

足立・岩田編著（2003): 土のコロイド現象, p. 451. 学会出版センター, 東京.

Adachi and Ooi (1990): J. Colloid and Interface Sci., 135: 374–384.

Adachi and Tanaka (1997): Water Res., 31: 449–457.

現代化学（1999): チェルノブイリ原子力発電所事故の化学処理 – 放射能汚染拡大を防ぐためにロシアの化学者はどう対処したのか – Alexxander B. Zezin 聞き手: 熊沢紀之.

Higashitani and Kubota (1987): Powder Technology, 51: 61–69.

Kobayashi et al. (1999): Langmuir,15: 4351–4356.

Matsumoto and Adachi (1998): J. Colloid and Interface Sci., 204: 328–335.

Miyahara et al. (1998): Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 131: 69–75.

Panova (2021): Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 610: 125635.

van Berkel（塚原東吾訳）(2000): オランダ科学史, 科学史ライブラリー, 朝倉書店, 東京.

van Genuchten (1980): Soil Sci. Soc. Am. J., 44: 892–898.

野外における含水率–マトリックヘッド関係

飯山一平
宇都宮大学

キーワード: 野外土壌水分特性，土壌水分ヒステリシス，植物利用可能水分，土壌間隙径分布

ある土壌の体積含水率（θ）とその土壌の水分のもつマトリックヘッド（h）との関係を表した曲線は，土壌水分特性曲線（soil moisture characteristic curve, SMCC）や土壌水分保持曲線などと呼ばれ，当該土壌の抱えうる植物利用可能水分量の見積もりや，その土壌の間隙径分布の推察，野外の土壌水分様態の解析，等に活用される．

SMCC は，大抵，室内試験により，飽和状態からの乾燥過程を以て，得られているようである．一方，「乾燥状態からの吸水過程を以て SMCC を描けば，乾燥過程を以て描かれたそれと比べ，より低い θ の領域に描かれる」との履歴挙動（ヒステリシス挙動）もまた，知られている．

これらのことは，「野外における h–θ 関係の変遷は乾湿履歴そのものに違いなく，また，野外の土層が相当の厚さにわたって飽和に至ることは稀なことのはずであるから，野外で h と θ とを併せて観測し続けるならば，得られる h–θ 関係（野外 h–θ 関係）は，乾燥過程を用いた室内試験に由来する SMCC（室内 SMCC）に比べ，より低い θ の領域を辿るはず」との仮説を想起させる．

野外 h–θ 関係を得ようとするとき，観測は長期に亘りがち，と思われる．観察対象とする野外土壌の水分様態として自然に近いものを求めようとするならば，対象地に出入りする水分の量を天候その他に任せたい．すると，観測結果としての h や θ の範囲の広がっていくことを，なかなか，期待できない．例えば，室内 SMCC と野外 h–θ 関係とが互いに異なる可能性について，従来，これを指摘してはいても，扱った土性が限定的である事例（Morgan et al., 2001）や，観測対象とした h や θ の範囲が限られる事例（Inoue et al., 1998; Al-Yahyai, 2006）が見られることからは，何事かを結論付けるに足るだけの観測結果を得ることのないままに観測期間だけが長じていった事例は現れないまま，といった事情が推察される．

野外 h–θ 関係と室内 SMCC とを比較した事例は，近年，見られつつある（Pirone et al., 2014; Iiyama, 2016; Bordoni et al., 2017; Yu et al., 2021）ものの，まだ少ないようであり，両者の間の違いの一般的な特徴を検討するうえで必要な実測知見は，十分量に至っていないようである．

両者の違いの要因のひとつと思われるヒステリシス挙動については，室内 SMCC を得ればヒステリシス挙動が認められる一方，古典的なヒステリシス現象研究事例では，供試体として，砂やガラスビーズなどの，粒径の比較的大きく，かつ，均一に近い材料が多く用いられてきたようであり，ヒステリシス挙動に関して室内試験結果と野外観測結果との直接比較を許すような事例は，少ないように見受けられる．野外 h–θ 関係についても，そのヒステリシス挙動を無視しがたいとした見解（Royer and Vachaud, 1975）もあれば，野外 h–θ 関係にはほとんどヒステリシス挙動を認めることがなかった（Li et al., 2005）との報告も見られるなど，実態をとらえる必要が大きく残るようでもある．

観測を続けた結果，野外 h–θ 関係の日常的な様態は，h–θ 図上の限られた範囲を往来する傾向が強かった（Iiyama, 2016）．また，この研究事例で得られた野外 h–θ 関係の多くが，その観測地点 · 深度に対応した室内 SMCC に比べ，h–θ 図上において 0.1 程度，低い θ 領域を辿る傾向を示したことから，先述の仮説の成立する可能性は，高いように思われる．同時に，何年かに一度の強い乾燥条件を経験した観測地点 · 深度の中には，野外 h–θ 関係の h–θ 図上に描く領域が従前よりも低い θ 領域へと明瞭に遷移するものが見られた．その遷移に併せて，野外 h–θ 関係の勾配 $d\theta/dh$ の大きさが増加する傾向も見られた．

これらのことからは，室内 SMCC を直接に野外土壌水分様態の解釈に適用するならば土壌水分量の見積もりに相応のずれを生じるであろうこと，および，一方では，野外 h–θ 関係をあるひとつの数学関数 $\theta(h)$ として表し，その $\theta(h)$ を用いて解析する際の解析対象期間を直近の 1 年間程度とするならば，解析結果が実態からそれほど遠くならずに済むであろうことが，示唆される．野外 h–θ 関係の遷移に伴う $d\theta/dh$ の大きさの変化については，発生事象数が少なく，その傾向の一般性の程度を見積もる迄には至っていない．$d\theta/dh$ の大きさの変化からは，また，土壌の間隙径分布の変化が疑われるものの，その実態解明は不十分であり，課題として残っている．

現状では，野外 h–θ 関係の遷移の繰り返しとの遭遇をはじめ，遷移の特徴を見出していくことや，遷移の発生機構についての考察と整理，といった課題が残る．h–θ 関係の野外的実態に関し，多様な，そして気の長い，実測知見の積み上げが望まれる一方，観測を継続するばかりでも展開は難しいように思われる．

引用文献

Al-Yahyai et al. (2006): Soil Sci., 171: 85–93.
Bordoni et al. (2017): J. Hydrol., 552: 283–305.
Iiyama (2016): Soil Sci. Plant Nutr., 62: 416–422.
Inoue et al. (1998): Water Resour. Res., 34: 1035–1050.
Li et al. (2005): J. Geotech. Geoenviron. Eng., 131: 1176–1180.
Morgan et al. (2001): Plant and Soil, 234: 153–157.
Pirone et al. (2014): Proc. Earth Planetary Sci., 9: 163–170.
Royer and Vachaud (1975): Soil Sci. Soc. Am. Proc., 39: 221–223.
Yu et al. (2021): J. Hydrol., 603: 126829.

土壌中の物質の動き
— 粘土鉱物，土壌有機物とセシウムの関係 —

石川奈緒
岩手大学理工学部

キーワード: 放射性セシウム, フミン酸, フルボ酸

中学生の頃，当時盛んに報道されていた環境問題に興味を持ち，研究者を志した．土壌中の物質の動きに関する研究は，高レベル放射性廃棄物処分の環境影響評価に係わるプロジェクトの博士研究員となったことがきっかけだった．高レベル放射性廃棄物の地層処分後，放射性核種が処分場から地下水とともに地表へ到達する可能性がある．放射性核種を含む河川水等が農地に使用された際の放射性核種の移行評価のため，土壌中での放射性核種の収着性や収着メカニズム，収着性に影響を及ぼす土壌中の構成要素の特定について研究を行った．研究対象元素の中でも，Cs は特殊な収着メカニズムを持っており，例えば雲母鉱物に存在する Frayed Edge Site に強く固定する．土壌中のイライト含有量と Cs 固定率には有意な相関が見られる（石川ら, 2007）．

2011 年には福島第一原子力発電所の事故により，放射性 Cs に汚染された廃棄物が大量に発生した．比較的放射性 Cs 濃度が低い廃棄物は既存の管理型最終処分場に処分されているが，廃棄物の周囲に土壌層を設置することで放射性 Cs の漏出を防いでいる．そこで，土壌に鉱物を混合することで土壌層の Cs 保持能を向上させることを検討した．イライトやゼオライトを混合することで土壌の Cs 保持能は向上するが，一方で土壌有機物が鉱物に吸着し Cs 固定サイトの入口を覆うことで Cs 固定を阻害すると考えられている（Dumat and Staunton, 1999; 千葉ら, 2019）．土壌有機物であるフミン酸とフルボ酸ではフルボ酸の方がゼオライトとイライトには比較的多く吸着し，Cs 固定阻害に寄与することが示唆されている（Tameta et al., 2021）．

現在は放射性物質だけでなく抗菌剤も研究対象とし，土壌中での挙動やその影響因子の解明を目的に研究を行っており，これらの物質が環境中に存在することでの影響評価など，環境保全に役立つ知見を出していきたい．

引用文献

千葉ら (2019): Radioisotopes, 68: 293–303.
Dumat and Staunton (1999): J. Environ. Radioact., 46:187–200.
石川ら (2007): Radioisotopes, 56: 519–528.
Tameta et al. (2021): J. Environ. Manage., 289: 112477.

土と物質循環について

石黒宗秀
北海道大学大学院農学研究院

キーワード: 溶質移動，電荷，有機物，物質循環

私が高校生のころ，有吉佐和子の「複合汚染」が出版されました．人の健康の基本になる農の問題を指摘したセンセーショナルなベストセラーです．公害問題や環境問題が深刻な時代背景でしたので，農業と環境について何かしたいと漠然と思っていました．学生時代は，造成農地の水質を調べていました．農地から流出する成分によって，流出パターンが随分と異なるので，いったい土のなかでどんなことが起こっているのだろうと思いつつ測定していました．農業土木試験場に就職し，当時土壌物理学分野で活躍していた岩田進午さんの研究室に配属された縁で，土壌物理学の研究をするようになりました．つくばは，他の研究所や大学との交流が盛んで，ゼミ活動を通して物理学の美しさや楽しさを学びました．

土の中の溶質移動研究を始めましたが，そうするうちに土の電荷特性を軸に，物質移動，土壌構造変化，透水性を扱うようになりました．条件を単純化して実験をしていましたが，腐植物質を無視できないので，有機物の吸着移動も扱うようになりました（石黒, 2018）．そうすると，静電気力とは異なる疎水性相互作用が重要になります．有機物に関しては，微生物による分解反応もあるので，さらに複雑になります．自然の物質循環を扱う際に，微生物や酸化還元反応も興味深い対象です．

空中窒素固定技術を開発したハーバーは，「細菌は，我々が真似することができない巧みな方法で窒素固定している．」（干鯛, 2014）と語っています．健康科学が多数の腸内細菌との共生関係で人の健康が維持されることを明らかにしたように，土や作物の健康にとって微生物が重要な働きを担うため，農法の見直しが指摘されています（モントゴメリー・ビクレー, 2016; 陽, 2020）．ダーウィンは土壌形成にミミズが大切な役割を果たすことを研究しています（ダーウィン, 1994）．そのような自然の巧みさを理解し活用する方向に，土をめぐる物質循環と土壌物理学の研究が貢献したいものです．

引用文献

ダーウィン (1994): ミミズと土, 渡辺訳, 平凡社, 東京.
干鯛 (2014): 窒素固定の科学, p. 97. 裳華房, 東京.
石黒 (2018): 日本土壌肥料学雑誌 89(5): 349–352.
陽 (2020): 伊豆の国だより, 26: 20–22, https://iame.or.jp/manage/wp-content/uploads/2020/01/IzuNoKuni-Dayori-26.pdf
モントゴメリー・ビクレー (2016): 土と内臓, 築地書館, 東京.

土の凍上現象，文化財の劣化と水分移動

石﨑武志
東北芸術工科大学文化財保存修復研究センター

キーワード: 凍上現象，文化財の劣化，土壌物理，水分移動，ハイドラス

私は，北海道大学低温科学研究所の凍上部門という所で，土の凍上現象に関する研究をしていました．凍上現象とは，土が凍結する際に，凍結面へ水が吸い寄せられてきて，氷晶として析出し膨張する現象です．なぜ，土が凍結する際に水が凍結面へ吸い寄せられるのか大変興味がありました．また，氷が析出するときの圧力と温度の関係は，実験的にクラペイロン式という熱力学の式と良く合うということからも，これは土壌物理学のテーマであると考えました．私が大学生の時に，日本は海外から液化天然ガス（LNG）を輸入して都市ガスや電力源として利用する様になりました．そこで，LNG 地下タンクが東京湾周辺に建設されました．LNG の温度は $-162°C$ という低温ですから，LNG 地下タンクの周辺地盤が凍結します．その凍結による膨張圧によりタンク周囲が変位するなど色々な問題がありました．そこで大学を卒業した後，東京ガスの技術研究所に就職しました．この時期は，LNG 地下タンクの建設や，地盤凍結工法などが行われた時代でしたので，土の凍上現象のメカニズムに関する研究は，今以上に行われていました．私は，東京ガスの留学制度を使って，凍上現象の理論的な研究を行っていたカナダのゲルフ大学に 1 年間留学しました．そこには，ケイ教授や熱力学が専門のグローネンベルト教授がいました．地盤凍結工法などでは，土が凍結した時に，どれくらい膨張するのか実験による経験式があります．日本では，高志ら（1974）の研究によるもの，海外では，Konrad（1981）の研究によるもので，工事の設計の際の式が日本と海外とで異なります．これは，いまだに凍上現象のメカニズムが明確には分かっていないことによるものです．

その後，東京ガスの技術研究所から北海道大学の低温科学研究所に移りました．そこに，現在の三重大の渡辺先生や岩手大の武藤先生らが，大学院生として来られて，顕微鏡ステージを用いた土やガラスビーズの凍結実験を行いました．これは，凍上現象のメカニズムを理解するには，凍結面での状況を詳細に観察することが必要と考えたからです．また，土は複雑なので，ガラスビーズを用いることで対象をシンプルなものにしようと考えたからです．

ここでは，大学の研修制度を使いまして，米国シアトルにあるワシントン大学物理学教室に 6 ヶ月いました．そこには，結晶成長に関する理論の研究をしていたダッシュ教授（Dash, 1991）やウェットラウファー教授がいました．極低温物理の研究では，多孔質体内の液体ヘリュウムの凝固の際にも，同じ凍上圧が生ずるため（Hiroi, 1989），凍上現象は，理論的には多孔質体内の凝固に関する一般的な物理現象であることが分かります．

低温科学研究所では，岩石の凍結劣化の研究を東京文化財研究所の研究者と共同で行っていました．凍上部門の福田教授が東京文化財研究所の三浦氏と岩石の凍結融解の際の超音波速度と岩石の劣化に関する共同研究を行っておりました．文化財保存に私の研究がつながるのではと思い，東京文化財研究所に移り，この分野に関わるようになりました．

そこでのタイのアユタヤやスコータイの歴史的レンガ建造物の保存に関するプロジェクトへの参加は，その後の研究のテーマを見つけるものになりました．この場所でのレンガの劣化の主な要因は「塩類風化現象」です．これは乾季にレンガの水が蒸発する際，水に溶けている塩類は蒸発出来ず濃度が高くなり塩として析出します．その析出圧によりレンガを劣化させるというものです．一方，寒冷地での石の凍結劣化は，寒さにより石材の表面が凍結し，そこへ水が吸い寄せられてきて氷晶として析出することにより，その圧力で石を破壊します．環境は違っていても，劣化の物理的メカニズムはかなり類似しています．そこで，環境変化による，レンガ建造物中の水分移動解析が重要だと考えました．

東大農学部溝口教授より，米国農務省塩類研究所シムネック博士が，多孔質体中の水の流れに関するシュミレーションプログラムの開発を行っている（Šimůnek, 1996）との情報を得て，タイの歴史的レンガ建造物中の水分移動解析を共同で進めることができました（石﨑ら, 1999; 2000）．この研究を基に，日本壁作製時の土壁内の水分量変化や土遺構内の水分移動に関する研究を行ってきました．

今まで，色々なテーマで研究を進めてきましたが，その基礎となっているのは土壌物理学であったと思います．また本分野の皆様と一緒に研究できたことを感謝しております．

引用文献

Dash (1991): In Phase Transition in Surface Films, 74(1): 339–356.
Hiroi et. al (1989): Phys. Rev., B40: 6581–6590.
石﨑ら (1999): 保存科学, 38: 154–163.
石﨑ら (2000): 保存科学, 39: 43–50.
Konrad et.al (1981): Can. Geotech. J., 18: 482–491.
Šimůnek et. al (1996): IGWMC–TPS–53, 167.
高志ら (1974): 雪氷, 36(2): 1–20.

土壌中の CO_2 濃度から地すべり予測へ

伊藤　洋
北九州市立大学国際環境工学部

キーワード: 二酸化炭素，地下水位，地すべり

私が土壌中の二酸化炭素濃度に興味をもったのは，某電力会社から CCS（Carbon dioxide Capture and Storage）における CO_2 漏洩のモニタリング手法で相談を受けたことに始まる．地下深部に貯留された CO_2 が漏洩した場合，大気中ではなく土壌中で CO_2 濃度をリアルタイムで連続して測定する必要があるが，そうした技術は世界的にも見当たらなかった．

そこで，事前情報として特殊な膜素材（ガスは通過するが水を通さない）と海外にて食物倉庫で使用する超小型の CO_2 センサー（0 ～ 30 % 濃度測定）の存在を得ていたのでこれらを組み合わせて円筒型の土壌埋設型の CO_2 観測装置を試作した．この装置を用いて，大学構内のフィールドで地中 GL −1 mから地表面（大気）GL +40 m まで連続測定を行ったのがスタートラインである（伊藤ら, 2010）．その後改良を重ねて，土壌中での CO_2 濃度をリアルタイムで連続測定することができるようになった（三宮ら, 2013）．併せて，気象観測（温湿度，日射量，風速）と土壌水分，地下水位の観測を行った．これによって，CCS（地下深部）から万一 CO_2 が漏洩した場合の土壌中での CO_2 濃度モニタリングが実現できる目途がたった（山田ら, 2017）．

しかし，2011 年に発生した東日本大震災による原発事故の影響でこの共同研究は中止となってしまった．土壌中の CO_2 濃度の自動連続測定を可能にしたこの技術は，おそらく世界でも画期的な（唯一かもしれない）ものであると思っている．この技術を何とか生かせないかとフィールドデータを再度見ていた時に土壌中の CO_2 濃度と地下水位の変動に強い相関関係があることに気がついた．小生は，元々地下水理を専門としており，大規模な地すべり（円弧すべり）の解析 · 検討をした経験もあった．地すべりの主な原因の一つとして，豪雨期の地下水位の急激な上昇に伴う有効応力の減少がある．こうした地すべりの予知観測方法として，地下水位の観測や地表面のひずみの測定などがあるものの，たとえば，F 県では約 2 万ヶ所近くの地すべり防止区域の内，地下水位の観測を行っているのはわずか 0.1 % 程度である．これは，急峻な山岳地帯では数十 m の地下水位観測孔を施工するのが困難であることやコストの問題がある．

そこで土壌中の表層数十 cm 程度の位置で CO_2 濃度を連続測定することができれば，地下水位の上昇を予測することができると考えた．土壌中の CO_2 濃度は，0.1 ～ 20 % 程度と大気中におけるそれより 2 桁程度大きい濃度であり，かつ深部ほど大きくなっている．地下水面がかりに GL −20 mにあって，それが上昇すると土壌中に蓄積された CO_2 が押し上げられて地表面の CO_2 濃度も上昇することになる．

その後，大学構内のフィールドで土壌中の CO_2 連続観測システムの検証を行い，実際の地すべり防止区域で観測を実施した．その結果，豪雨時における地下水位上昇に連動して地表面の CO_2 濃度が上昇し，地下水位の低下に伴ってそれが減少することを実証することができた（山田ら, 2019）．このシステムには，太陽光パネルとバッテリーを有しており，データは自動送信されリアルタイムで PC やスマートホンで確認することができる．また，このシステムの設置は，人力のみで十分可能である．その後，河川堤防でも試験的に観測を行ったが（山田ら, 2020），地すべり地帯の方が適用性は大きい．

これまで，類似の研究を目にしたことがないこともあり，この技術の理解者は少ないと感じている．今後は，当方も大学の定年が迫っており残された時間は少ないが，その後も折に触れて技術紹介をしていきたいと思っている．

引用文献

伊藤ら (2010): 第 65 回土木学会年次学術講演会, 179–180.
三宮ら (2013): 第 68 回土木学会年次学術講演会, 83–84.
山田ら (2017): 第 52 回地盤工学研究発表会, 1811–1812.
山田ら (2019): 第 54 回地盤工学研究発表会, 1773–1774.
山田ら (2020): 第 55 回地盤工学研究発表会, 21–12–3–01.

塩害水田の修復に関する研究

猪迫耕二
鳥取大学農学部

キーワード: 除塩，暗渠，籾殻，数値実験

30 年以上前の話になるが，大学に入学後すぐに開催された学科説明会で，灌漑利水工学教室の教授によるイランの砂漠緑化研究の紹介があった．青い空の下に広がる砂漠のスライドとそれを緑に変えるという話に魅了された私は，砂漠の緑化に携わるべく農業土木分野に進んだ．

この分野の基礎科目として土壌物理学を学んだのが私と土壌物理学との出会いである．面白いが，難しいと思った．それ以来，四苦八苦しながら土壌物理学の諸課題に取り組んでいる．

大学院博士課程を中退して鳥取大学農学部助手に着任したが，当初は少し異なる分野でのキャリアスタートとなり，数年間，土壌物理学から離れた生活を送った（例えば，吉田ら, 1997; Inosako et al., 2006），その後，曲折を経て再び土壌物理 · 灌漑排水学のグランドに戻ってきた．

その様な矢先に，JICA がアフリカ · タンザニアの内陸部の塩害水田を修復してくれる短期専門家を探しているとの話が流れ流れて私の所に舞い込んできた．

私が招聘されたプロジェクトは，JICA がタンザニアで展開していたキリマンジャロ農業技術訓練センター計

画フェーズⅡという人材養成事業であり，タンザニア全土で 6 つのモデルサイトを選定し，それぞれの地域の実情に即した研修を実施して各地区のキーパーソンの育成と農業技術の普及を図るものであった．私に課された使命は「現地に適合する塩害水田の修復方法を現地のカウンターパートに指導する」というものであった．

塩害水田の問題が発生していたのは，6 つのモデルサイトの一つのモンボ地区である．モンボ地区では，220 ha の水稲栽培が営まれており，そのうちの 10 % に当たる区画で塩の集積によりイネが生育できない部分が発生していた．イネが生育できない部分の土壌塩濃度は全層的に高く，土壌ピットを掘ると深さ 1.2 m あたりで 34 dS m^{-1} もの電気伝導度を示す地下水面が現れた．土壌は粘土質で透水性は低く，降下浸透による除塩は不可能と思われた．

そこで，暗渠排水による除塩を試みることになった．その際に JICA から提示された条件は，①現地の農家が自力で敷設し，維持管理できること，②現地の農家が入手可能な資材のみを使用すること，であった．このことは，吸水渠を用いる通常の暗渠システムは導入できないことを意味していた．結局，籾殻以外に使える資材はないという結論に達し，籾殻のみを用いた簡易暗渠を本暗渠とするシステムでの除塩を試みることとなった．設計に当たっては，日本の暗渠の設計基準を準用した．施工はもちろん人力である．

性能評価のために 1 本だけ籾殻暗渠を敷設した．対照実験としてコルゲートパイプを吸水渠として利用した通常の暗渠排水も 1 本敷設した．施工期間は 1 週間程度であった．私の滞在期間の関係で性能評価試験を 1 日だけ実施した結果，籾殻暗渠では排水速度は小さいが高濃度の塩水が排出され，除塩は可能と結論した．帰国後，JICA 専門家と現地カウンターパートの指導の下，このシステムを用いた除塩を行い，7 年ぶりにコメの収穫が可能になったとの報告を受けた．

貢献できたことに喜びを感じたものの，塩害水田の土壌が本システムでどのように除塩されるのか．設計は適切だったのかといった疑問が私の中に生じた．

そこで，この点について私なりの解答を得るべく，籾殻暗渠による除塩の研究に着手した．タンザニアで行った除塩実験を日本の圃場で行うのは困難であったため，数値実験を主な研究手法に採用した．

まず，高さ 60 cm，幅 50 cm，厚さ 15 cm の 2 次元土槽に現地圃場を模擬した土壌断面を作成して除塩実験を行い，数値モデルでの再現を試みた．次いで，耕耘厚さや籾殻層の高さなどの条件を変えた数値実験を行った．その結果，除塩されるのは耕耘層のみであること，また，除塩のためには耕耘層と籾殻層の接続が必須であることなどを確認した（Inosako et al., 2012）．

次に，3 次元場での籾殻暗渠による除塩に関する数値実験を行った．数値実験では籾殻層の幅や勾配等を変えて除塩に及ぼす影響を評価した．その結果，籾殻層の幅が大きい方が耕耘層から多くの塩水を集めることができるが，排水口から排出されるのと同時に心土層へ浸透する量も多いことがわかり，籾殻層はある程度狭い方が効率的に系外に塩を排出できることが明らかとなった．また，勾配が大きい方が除塩量は大きいが，その差は僅かであり，タンザニアにように，農家が人力で施工することを考慮すると実用上は勾配を考慮する必要はないことが示唆された (Inosako et al., 2020)．

この問題に取り組み始めて随分と時間が経ってしまったが，未だに最適な設計方法に関する結論は出ていない．今後も，地道に研究を継続していきたいと考えている．

引用文献

Inosako et al. (2006): Agric. Water Manage., 82: 411–420.
Inosako et al. (2012): Journal of Arid Land Studies, 22–1: 143–146.
Inosako et al. (2019): Paddy and Water Environment, 17: 211–219.
吉田ら (1997): 農土論集, 192: 885–890.

改正土壌汚染対策法における移流分散解析の利用

井本由香利
産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門

キーワード: 有害物質，溶出量基準，健康リスク管理

卒業研究では手作りの導電率センサーを取り付けたカラムでトレーサー試験を繰り返して破過曲線を観察し，間隙構造との関連を考えた．当時持ち歩いていた文献のコピーには，境界条件が異なる一次元移流分散方程式の解析解が 4 つ紹介されていた（Klute (ed.), 1986）．就職してからはしばらくの間土壌物理そのものとも離れていたが，土壌汚染対策法に係る研究をする中で思いがけず移流分散方程式の解析解を利用する機会に恵まれ，再び勉強することになった．本稿では，近年改正された土壌汚染対策法における移流分散解析の利用事例を紹介したい．

土壌汚染対策法では，土壌に含まれる有害物質による健康リスクを管理するため，土壌汚染の調査や措置に関する方法を定めている．2019 年の改正ではサイト毎のリスクに応じた規制を推進するため，いくつかの措置等の方法が新たに認められた．その一つとして，自然由来の有害物質を含む土壌の道路盛土等構造物での利用がある．土壌からの有害物質の溶出量もしくは含有量が規制基準を超える場合，当該土壌は基準不適合土壌として管理される．自然由来の基準不適合土壌を構造物で利用する際には，土壌に含まれる有害物質の種類とその溶出量に応じて，有害物質の地下浸透による地下水汚染を防止する対策方法が決まる．例えば，鉛に関しては溶出量が 0.3 mg L^{-1} 未満であるとき，カドミウムに関しては溶出

量が 0.044 mg L^{-1} 未満かつ構造物を設置する土地の土壌 pH が 5 以上であるときは，地下水汚染を防止する措置としては，盛土と帯水層の間を 50 cm 以上離すこととされており，地下浸透を防止する遮水工等の設置の必要はない（令和 3 年（2021 年）環境省告示第 21 号）（なお，カドミウムについては 2019 年の改正時は 0.075 mg L^{-1} であったが，2021 年に溶出量の規制基準が強化されたことに伴い 0.044 mg L^{-1} に変更された）．それでは，この 0.044 mg L^{-1} 等の値はどのようにして決められたのか？ この値の算定には一次元移流分散方程式の解析解が使用されている．汚染源（ここでは自然由来基準不適合土壌を利用した盛土の下端）から直下の帯水層までの間の非汚染地盤中の汚染物質の移動に関して，そのサイトの年間降雨量，分配係数，非汚染地盤の厚さ等を入力パラメータとして移流分散解析を行い，非汚染地盤下端（つまり地下水面）における汚染物質の濃度が規制基準（カドミウムでは 0.003 mg L^{-1}）に適合するように盛土の溶出量の許容値を逆算して求めている．なお，ここで採用された解析解の境界条件は，上端境界でフラックス一定，下端境界は無限遠で濃度勾配ゼロである．ふっ素，砒素，セレン，六価クロム，ほう素に関しては，同じ計算方法に基づき，環境省が提供する計算ツールを使用してサイト毎に許容値を求め，遮水工等の要不要を判定することになっている（環境省, 2021）．

基準不適合となった土壌は直ちに汚染の除去等の措置が必要になるわけではなく，周辺に飲用井戸が存在するか等の摂取経路の有無を考慮して措置の必要性が判断される．改正前の法律では，土壌汚染に起因して生じた地下水汚染が飲用井戸に到達するかどうかに関して一般的な地下水の実流速に基づいて到達距離が判断されていたが，改正後はサイト毎の条件に応じて到達距離を求めることになり，到達距離の設定方法の合理化が図られた．到達距離の算定のために環境省から計算ツールが公開されており，移流分散方程式の三次元解析解である Domenico（1987）の式を平面二次元に変形した式が用いられている（環境省, 2019）．

基準不適合土壌となり汚染物質の摂取経路があると判断された場合は，要措置区域として指定され，汚染の除去等の措置が必要となる．措置の完了条件としては，従来は土壌溶出量基準及び地下水基準が設定されていたが，今回の改正では，評価地点の設定，目標土壌溶出量や目標地下水濃度を設定する形に変更された．これら目標値の設定に関しても環境省より計算ツールが公開されており，到達距離の算定方法と同様に，Domenico（1987）の式を変形した平面二次元解析解が使用されている（環境省, 2019）．

本ミニレビューで紹介した土壌汚染に係る法規制における移流分散解析の利用は，安全側に設定した入力パラメータと組み合わせて簡易な解析をすることで，現場のリスクに応じた合理的な管理や措置を選択できるよう図られたものである．現実に即した管理・対策を促進するため，例えば汚染土壌からの有害物質の溶出挙動の予測等においても，物質移動モデル等を活用した評価手法の開発及び社会実装が今後望まれる．

引用文献

Domenico (1987): J. Hydrol., 91: 49–58.
環境省（2021): https://www.env.go.jp/water/dojo/law/tool3_gl3_APP12.pdf
環境省（2019): https://www.env.go.jp/water/dojo/law/kaisei2009/tool_man.pdf
Klute (Ed.) (1986): Methods of soil analysis, Part 1, Physical and mineralogical methods, Madison, WI, USA.

土壌水分計の測定誤差要因について

岩田幸良
農研機構　農村工学研究部門

キーワード: キャパシタンスセンサー，キャリブレーション，乾燥密度，地温，電気伝導度

2013 年 4 月に十勝平野の中部に位置する北海道農業研究センターからつくばの農村工学研究部門に転勤になった．新しい配属先は畑地工学担当という部署で，私も含めて研究室の 3 人全員の専門が土壌物理だった．これまで所属した研究室はいずれも土壌物理が専門の研究者が一人もいなかったので，これまでのキャリアで経験することがなかった，専門家同士の議論が毎日できる恵まれた環境に数年間身を置くことができた．

研究室の中では日常的に，雑談レベルで専門的な議論がおこなわれた．当時，研究室の統括だった宮本輝仁さんがある日，投稿論文の査読者のコメントか学会発表の質疑応答で，土壌水分計の校正式が既往の文献と違うのは何故か，というようなことを指摘された，という話をした．そして，室内でキャリブレーションをするときにはセンサーの周囲に土を詰めるのに対して，野外ではセンサーを土壌断面に挿入するのが一般的だから，補正式が異なるのではないか，と語った．

例えば，TDR で水分量を測定する場合に，一般的な土壌でよく使われている Topp 式（Topp et al., 1980）が黒ボク土や粘土では適合しないことはよく知られているし（Miyamoto et al., 2001; Topp et al., 1980），その時話題になったキャパシタンスセンサー（Meter 社の EC-5）について温度依存性の補正方法も提案されている（Saito et al., 2009）．しかし，センサーの設置方法によって土壌水分計の出力値が異なるという話は聞いたことがないので，本当だったら面白いので実験してみたい，と提案した．そして，当時アルバイトで実験を手伝ってくれていた筑波大の学生の西谷（現，杉本）麻菜美さんと共に実験をしてみると，特に黒ボク土のように団粒構造が発達した土壌では，センサーの周囲に土を詰めた場合と土を

詰めてからセンサーを挿した場合とでは水分計の出力結果が異なることが確認された．

そこで実験結果をまとめて米国のある雑誌に投稿したところ，査読結果は Major revision だった．細部にわたる 200 以上のコメントを修正し，再投稿することを 2 度ほど繰り返したが，結局掲載不可になってしまった．掲載不可の主な原因は，反復間で乾燥密度をそろえていない点にあった．乾燥密度が計測値に与える影響があることは知っていたが（Dirksen and Dasberg, 1993），事実上その影響は無視しても問題ないという先行研究（三石 · 溝口, 2014）があったため，今回の実験の乾燥密度の範囲では問題ないことを主張した．しかし，査読者からは納得してもらえず，Editor からそんなに言うなら根拠となる論文を見せろ，と言われたので，三石 · 溝口（2014）を送ったが，掲載不可になってしまった．

実験の作法として乾燥密度をそろえておいた方が良かったと今は思う．そういえば，西谷さんに実験のやり方を説明したときに，乾燥密度はそろえなくてよいのですか？ と聞かれた．そのときは先行研究があるから大丈夫と自信満々に答えたが，乾燥密度はそろえておくに越したことはなかった．結局，乾燥密度をそろえて再実験して，リジェクトされた雑誌に再投稿するのも悔しいので，ヨーロッパの雑誌に投稿して，最初の論文投稿から 3 年後にようやく日の目を見ることができた（Iwata et al., 2017）．

再試験しても，得られた結果は予想通り何も変わらなかったが，実験の姿勢を問われていたのだとしたら，リジェクトも仕方ないかと今なら思える．しかし，当時は大量のコメントに時間をかけて対応した後だったので，大きな精神的なダメージを受けた．乾燥密度を考慮しなくても良い根拠となる上記の論文は，私は素晴らしい論文だと思うし，Editor への返信で根拠となる図を示したのでわかってもらえると思ったが，米国人の Editor からしたら「日本語なんて読めないから妥当性など判断できるわけないだろ！」と思ったのかもしれない．例えば自分が Editor でスペイン語や中国語の論文を根拠として提示されたと考えると，その気持ちもわからない訳でもない．

なんでも英語で論文を書けば良いというものではもちろんないし，英語の論文の価値が高いという風潮には個人的には反対だ．あたりまえだが，英語でも日本語でも素晴らしい論文は素晴らしい．しかし，こうしたことがあると，内容によっては英語で書いておいた方が良いものもあるのではないか，と考えてしまう．

以上，私の論文執筆の思い出と共に，土壌水分計の誤差要因について紹介させていただいた．最後に，上記の他，土壌の電気伝導度も代表的な誤差要因であることを付け加えておく（Rosenbaum et al., 2011）．

引用文献

Dirksen and Dasberg (1993): Soil Science Society of America Journal, 57: 660–667.

Iwata et al. (2017): European Journal of Soil Science, 68(6): 817–828.

三石 · 溝口 (2014): 土壌の物理性, 126: 63–70.

Miyamoto et al. (2001): Soil and Tillage Research, 60: 90–99.

Rosenbaum et al. (2011): Vadose Zone Journal, 10: 582–593.

Saito et al. (2009): Soil Science Society of America Journal, 73: 1931–1937.

Topp et al. (1980): Water Resources Research, 16: 574–582.

土壌中の物質移動あれこれ

岩間憲治
滋賀県立大学環境科学部

キーワード: 物質移動，乾燥地農業，地中灌漑，消防用ホース，畑地灌漑

物理は好きではあったが何故か農学部に入った私として，指導教官から与えられたテーマに淡々と取り組んでいるうちに現在の研究に行き着いたのが正直な振り返りとなる．とは言え，博士論文で取り組んだ軟 X 線非破壊検査技術を用いた土壌間隙構造の定量化に端を発して，1995 年の滋賀県立大学発足当初から所属する私として少しでも土壌中の物質移動に関わることであれば，請われれば何でも取り組むことを研究方針としてきた．実際に取り組んだ研究テーマは幾つもあるが，ここでは乾燥地農業の一助となるように取り組んだ地中灌漑技術開発について述べてみたい．

滋賀県立大学発足当時に赴任された矢部勝彦名誉教授が長年テーマとしてきた研究である地中灌漑技術は，内径 5 cm 程の素焼き管をつなげる形で作物の根群域の深さに埋設して給水するものである．管内水圧とマトリックポテンシャルの差違を利用し，作物の水需要に応じて自律的に給水でき，根群域に直接給水するため地表面蒸発を抑制できる．また，電源無しで安価にシステムを構築出来るため，資金や水資源に乏しい乾燥地 · 半乾燥地域に有用である．ただし，素焼き管自体可搬性が低く，設置に手間もかかる．そこで，巻き取り式のホースに置き換えて実用化できないかと研究を継続し，私もそのお手伝いすることとなった．

この研究ではホース性能，特に材質が重要である．最初は軟質ポリ塩化ビニールに直径 2 cm の穴を開けて不織布を接着剤で貼り付けたものを作成し，雨よけハウス内で 10 m の長さで栽培試験を行った．その後，ホース自体を透水性のあるテキスタイルで作成することとし，様々な材質のものを取り寄せて接着剤で貼り合わせてホースを作成し，栽培試験を行った（岩間ら, 2006）．ナス，トマト，メロンからコマツナなど様々な作物を試し

たが，管内が負圧時に空気が侵入してホース内で断水するなど様々な課題に直面した．特に頭を悩ませたのは，ホース接着部の水漏れである．テキスタイルの材質を換え，接着剤を変えるなど様々試みたが，繰り返し使用に耐えれないなど，安定した性能が発揮できなかった．その後矢部先生が退職され，この研究は低調な状況が続いた．

時は過ぎて 5 年ほど前，異業種交流会の懇親会に参加した折，ある繊維メーカーに透水性不織布で自作したホースの土壌中での不安定さをポロリと語ったところ，消防用ホースぐらいしか耐久性が保てないのではとヒントを頂いた．これは全く思いもしなかった材料であり，滞っていた研究を発展させる予感を感じた．実際に消防用ホースを入手して，何とか透水性が生じるよう，物理的 · 化学的手法で試みたが，これまでのところミシン針で穿孔するのが手軽で適切な手法である．研究を担当する 4 回生や大学院生の COVID 19 の影響による行動制限にもめげず，作期の短い葉菜類を中心にプランターで栽培試験を現在検証中である（岡ら, 2021）．

栽培試験では，マリオットタンクからホースに給水するが，タンク下部に電子天秤にロガーを付けて設置し，テンシオメータや温湿度計など様々は測定器を用いる．更に 3 km 離れた彦根気象台のデータも入手して，目に見ることの出来ない土壌中の水分挙動を評価することもある．これらのデータは数値の羅列ではあるが，グラフ化し，何らかの計算することで，作物の生長や昼夜別でのホースの給水能の変化があぶり出され，土壌水分ポテンシャルを安定させる仕組みが見えてくる．これらのデータを加工する際に，VBA や Python などを用いて試行錯誤するが，現場での栽培試験管理とともに研究の醍醐味と感じる瞬間である．

思わぬところからヒントを貰い目から鱗が落ちる状態であったが，お陰で自作ホースの水漏れから解消され，栽培試験を滞りなく進められるようになった．一方，消防用ホースの耐用年数は 6 ～ 7 年である．廃棄ホースを活用することで，低コストで実用的な節水灌漑技術を確立可能と考えている．この研究は，本学学生 · 院生の協力が不可欠である．昨今の研究は何れも様々な観測データのロギングとそのプログラム処理を通して，あるいは HYDRUS などのシミュレーションソフトも利用しながら進めることが多い．彼らが情報処理技術に躊躇せずに使いこなし，旧来の目視や手作業での測定では見えてこない新たな挙動を発見する喜びを感じ取って欲しい．

引用文献

岩間ら (2006): 農業土木学会論文集, 245: 707–712.

岡ら (2021): 2021 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 92–93.

森林土壌の厚さと堅さ
— 30 年に亘る測定で何がわかったか —

大貫靖浩
森林総合研究所東北支所

キーワード: 土層厚，貫入抵抗値，微地形，保水機能

私は元々農学出身ではなく，理学部の自然地理学の中の地形学を専攻していた人間である．国家公務員試験（砂防職）を 3 回目の挑戦で何とかパスし，森林総研に入所後森林土壌に関わることになった．これから何を飯のタネにしようかと考え，真っ先に浮かんだのは，山の地形によって大きく変動しそうな土の厚さと堅さであった．

森林土壌の厚さと堅さについては，過去に数多く実施されてきた土壌断面調査の報告書を参照すれば，調査地点の土壌の厚さや，層位毎の土壌硬度は把握できる．しかしながら，土壌断面調査の下限が本当にその地点の土壌の厚さなのか，またその地点で得られたデータが斜面のどのくらいの範囲に当てはまるのかは判断できない．つまり，森林土壌の研究者が，わかっているようで実はほとんど誰もわかっていない研究分野と言えた．

そこで私は，災害調査で良く使用されている「土研式簡易貫入試験機」を使用して（吉永 · 大貫, 1995），茨城県，熊本県，沖縄県内のいくつかの小流域内で土層の厚さと堅さの多点調査を行った（例えば Ohnuki et al., 1997; Ohnuki et al., 1999）．本試験機は，5 kg の錘を 50 cm の高さから落下させ，ロッドが 10 cm 入るまでの回数（Nc 値）を測定するもので，Nc 値が 5 以下（沖縄県内では 8 以下）を表層土層（土壌層とほぼ同義），それより大きい範囲を風化層と判定した．その結果，火山灰の堆積の有無により，小流域内の表層土層の平均厚さが約 2 m 対約 1 m と倍程度異なることや，微地形的には傾斜 20 度付近の斜面に表層土層厚の最大値が認められることが明らかになった（大貫, 2016）．

海外のサイトにおいては，主にカンボジアの平地林において，簡易貫入試験による土層厚測定を実施した．カンボジアは熱帯モンスーン気候下に位置するが，常緑樹林がかなり広く分布している．雨季と乾季がはっきり分かれている気候で，なぜ常緑樹が生育できるのか？ その答えは，シルト質の厚い土層に蓄えられた水であった（Ohnuki et al., 2008; 大貫ら, 2009）．このシルト質土壌には，含水率の違いによって土壌硬度が変化するというユニークな性質があり，体積含水率が 10 % を割ると風化層並みに硬くなる．乾季における樹木の蒸散による水消費の程度が，貫入抵抗値の深度方向への連続測定によって現地で毎年確かめられたのは，まさに幸運であった．

簡易貫入試験機は錘，ロッドともに重いため，50 歳を超えてからは，土木研究所で開発された「土層強度検査棒」（佐々木, 2010）による土層厚測定に切り替えた．本製品は検土杖に似た形態だが，土壌試料を採取できる

溝は付いておらず，ロッドを何本も継ぎ足すことによって，表層土層と風化層の境界までの厚さを測定できるものである．これを使用して，北東北の岩手県安比高原，同胆沢川上流部，秋田県森吉高原で，従来保水力が高いと考えられてきた，ブナ林土壌の保水機能を評価するための多点調査を実施した．土層強度検査棒は簡易貫入試験機の 1/4 程度の重量で，且つ一人で測定できるため，測定効率は 4 ～ 5 倍であった．但し，簡易貫入試験で得られる連続的な貫入抵抗値は測定できないので，大起理化工業製の貫入式土壌硬度計（大貫, 2010）も併用した．400 地点を超える表層土層厚の測定値と，土壌断面調査によって採取した不撹乱土壌円筒試料を用いた土壌物理性（透水性 · 保水性）分析により，安比高原のブナ林土壌は，土壌中に水を保持する能力（保水力）は高いものの，大雨や融雪の際に水を貯えられる容量（貯水能）は大きくないことが明らかになった（大貫ら, 2020）．

森林土壌の厚さと堅さを測り始めて，早 30 年の歳月が流れた．これまでに紹介した内容の他にも，貫入式土壌硬度計を使用した，世界自然遺産選定後の屋久島登山道の路面圧密状況調査（大貫ら, 1999）等が思い起こされるが，30 年間も測り続けてこの程度しかわからなかったのか…，というのが正直なところである．特に，数 ha の小流域レベルでは微地形と土層厚の対応関係は何とか説明できるが，少しスケールアップすると途端に精度が低くなる．高精度 DEM や機械学習を用いた土層厚推定モデル（水資源量や炭素蓄積量推定の精緻化には不可欠）の構築は端緒についたばかりであるが，今後も高密度の土層厚教師データの供給者として，微力ながら貢献していきたい．

引用文献

大貫ら (1999): 地形, 20: 541–550.

大貫ら (2009): 水利科学, 305: 1–16.

大貫 (2010): 土層深度調査法. 森林立地調査法編集委員会編 改訂版森林立地調査法, pp16–19. 博友社, 東京.

大貫 (2016): 微地形分類に基づいた森林土壌の物理特性の推定と類型化．藤本 潔 · 宮城豊彦 · 西城 潔 · 竹内裕希子編著 微地形学, pp. 50–79. 古今書院, 東京.

大貫ら (2020): 森林立地, 62: 91–100.

Ohnuki et al. (1997): Geoderma, 80: 75–93.

Ohnuki et al. (1999): Journal of Forest Research, 4: 207–215.

Ohnuki et al. (2008): Geoderma, 146: 94–101.

佐々木 (2010): 土木研究所資料 4176, 土木研究所, つくば.

吉永 · 大貫 (1995): 新砂防, 48: 22–28.

凍土とのこれまで

長田友里恵
ケミカルグラウト株式会社

キーワード: 凍土，地盤凍結工法，不飽和土

「凍土に興味ある？」

大学生だった私は恩師にそう聞かれ，その場ではあまりピンとこなかったことをよく覚えている．そのころは，企業との共同研究における特殊材料や卒業論文執筆に向けて全国各地の土壌の水分保持曲線（水分特性曲線）を作成するために水分量などを測っていた．当時，土壌中の現象については何でも興味があったこともあり，大学院進学とともに凍土の研究がスタートした．凍土の透水係数や不凍水量を測定していたが，難しいテーマに対し常に悩んでいた記憶がある．こうした学生時代の経験もあり，地盤凍結工法を扱うケミカルグラウトに入社した．

入社後は工事部に配属になり，地盤凍結工法に限らず，地盤改良工事に広く携わった．工事部での経験によって，普段何気なく使っているインフラが多くの人の手によって作り上げられていることを実感した．工事部経験後は地盤凍結工法の技術開発に携わることになった．学生時代とは異なる視点から凍土について向き合うことは難しいことも多かったが，楽しくもあった．学生時代の研究とも工事とも違った経験で新たに学ぶことが山ほどあった．凍土と地中構造物間の凍着強さの試験方法について（辻ら, 2017）の実験を行ったときは，土壌物理を学ぶ上ではほとんど触れてこなかった土質力学の知識が全く足りず，教科書とにらめっこする毎日だった．

その後、技術開発に関わった環境にやさしい地盤凍結工法（ICECRETE）が実用化された．凍結設備や配管がコンパクトであることから，これまでに事例のないテールアルメの補修に適用し，壁面材の背面の盛土を一時的に凍結する実証実験を行った（長田ら, 2019）．この取り組みでは不飽和土における凍土の特性という新たな課題に対し，再び土壌物理学の側面から現象を考えることとなった．飽和土とは違った難しさを実感するとともに地盤凍結工法の可能性が広がるように感じた．

現在は技術営業部門に所属しているため，凍土の研究開発からは少し離れているが，今後も地盤凍結工法の普及と発展に貢献できればと思う．

末筆ではございますが，土壌の物理性 150 号という記念となる機会に執筆させていただき大変光栄に存じます．ありがとうございました．

引用文献

長田ら (2019): 土壌の物理性, 143: 17–23.

辻ら (2017): 第 52 回地盤工学研究発表会発表講演集, 731–732.

圃場の排水性

甲斐貴光
明治大学黒川農場

キーワード: 管状孔隙，亀裂，排水性

日本の土地利用型農業は高い生産性，安定した経営を持続可能とするため，機械化営農や高度利用に即した大区画圃場や用排水路等の生産基盤の整備や拡充を行い，収量向上と圃場の多目的利用による作付け選択の拡大を目指している．そこで問題になるのが圃場の排水性である．迅速な地下排水促進のためには，たとえば暗渠排水の効果が大区画圃場の整備や水田の汎用化を進める上で必要不可欠となる．とくに湿田での排水改良を目的とした暗渠排水は急務といえる．

わが国では，排水改良に関する様々な研究が行われている．たとえば，田渕（1959）は代掻きを行った粘質土水田で，暗渠を埋設しても作土層と心土層に亀裂が発生しない限り，降下浸透は大きくならないと指摘したうえで，小排水溝，亀裂，暗渠部の透水性，圃場の均平および十分な落水期間が重要であると述べている．井上（1987）や佐藤ら（1990）は，重粘土水田での亀裂はとくに重要であると述べている．

また，管状孔隙や亀裂といったマクロポアの土壌構造と機能を解明する手がかりのひとつとして，田渕（1959），成岡（1993）は，飽和した土を脱水したときに開放される限界間隙が透水性に影響があることを明らかにしている．長谷川ら（1977）は，土壌が不均一であることにふれ，不飽和浸透流について追究した．長田（1963）は，孔隙の果たす役割が通気経路や通水経路と異なっていることを示唆した．今後，SDGs，みどりの食料システム戦略といった環境を重視する国内外の動きが加速していくと見込まれ，持続可能な食料供給システムを構築していくことが急務となると考える．化学肥料や化学合成農薬の過剰散布による環境負荷の軽減のために，土壌内の粗孔隙を経路とする水や熱，ガス移動の仕組みなどから，土壌中の排水性がなぜ良好になるのかについて解明したいと考えている．

引用文献

長谷川ら (1997): 農業土木学会論文集, 70: 13–19.
井上 (1987): 農業土木学会論文集, 132: 111–120.
成岡 (1993): 土壌肥料学会誌, 64: 90–97.
長田 (1963): 農業土木研究別冊, 7: 37–42.
佐藤ら (1990): 土壌の物理性, 60: 24–27.
田渕 (1959): 農業土木研究別冊, 7: 32–37.

醸造用ブドウ園土壌における物質循環

柏木淳一
北海道大学大学院農学研究院所属

キーワード: 傾斜地，暗渠排水，根系分布，土壌侵食，物質収支

傾斜畑における土壌の空間変動性の解明が大学において与えられた研究テーマであった．北海道における大規模畑地で土壌断面観察を行える機会に恵まれ，地点格差が甚だしいことに驚かされた．そして傾斜畑における土壌に関する特性値の多くは地形解析によってその分布を推定できること（柏木, 2004），またその原因である土壌侵食に関して ^{137}Cs をトレーサーに用いて侵食速度を評価できることを確認した（柏木, 1995）．

この研究を通じて，現地での調査や測定における代表要素（REV）や空間変動の重要性を実感することができた．それらに配慮しつつ，畑圃場における組合せ暗渠の効果，草地における低コスト地形改修，焼畑での土壌肥沃度低下とその対策など，様々な農地における物質移動に関する測定をおこなってきたが，最近は醸造用ブドウ園での調査に傾注している．ブドウの生理特性や栽培の特徴について紹介し，土壌物理における課題について言及する．

醸造用ブドウ栽培では，作業性の観点から垣根仕立てが主流であり，特に光環境が重視され南向きの斜面が適地とされている．その仕立て方には長梢 · 短梢剪定などがあり，摘芯や摘葉等により地上部を制御することで量よりもブドウの質に重点をおいた栽培が実践されている．また耐乾性のみならず耐水性に優れているが，過湿な条件においては生理障害や病害のため良質なブドウの収穫は期待できない．そこでブドウ園の開設にあたって圃場の排水改良が不可欠となる．ブドウは永年作物であり成木の根系は台木や土性の影響を受けるが，その深さは 1 m にまで及ぶことが報告されている（Nagarajah, 1987）．暗渠は圃場排水の有力な手段の一つであるが，北川（2005）が指摘するような機能低下を回避する方策を取り入れた暗渠を敷設しその効果を検証している．園外からの流入や集水面積を縮小するための暗渠配置と耕作道としての利用（埋め戻しに現状土を用いないため耕盤層による通水阻害は生じない），掃流力を維持するため平滑管（底部のみ）の使用，管内の酸化鉄による通水阻害を抑制するために石灰岩による管の被覆，さらに根の侵入を避けるため敷設深を 1 m 以上とした．ブドウ根の機能は，単に養水分の吸収と地上部への経路だけでなく，同化養分の貯留に加えて各種ホルモンの合成とその供給を担っている（農文協編, 2017）．またブドウにおいても吉川（2017）が解説している様な Hydraulic lift が生じており乾燥時における樹体の維持に貢献していると思われる．したがって根域の拡大はブドウの生理代謝において重要であり，また環境に対する適応性を高めている

と考えられる．しかしながら湿潤な気候条件にある我が国のブドウ主産地（北海道）のブドウ園における根の分布に関する研究が乏しく，併せて根系分布の実態と制限要因について研究に取り組んでいるところである．

さらにブドウ栽培は傾斜地の農地利用として土壌保全の観点からも優れていると推察される．この点に関して，ブドウ園では一般に草生栽培（下草の生育と刈り払い）が取り入れられており，乾燥化と過度の養分吸収（強い樹勢）を抑制し，栄養生長から生殖生長への速やかな移行に貢献している．これは同時に地表面を被覆することから土壌侵食を抑制する効果が期待できる（Novara et al., 2011）．また養分収支においてマイナスに相当する主な項はブドウの収穫（1000 kg / 10 a 以下）であり，窒素分としては 0.8 kg / 10 a（Khalsa et al., 2018）にすぎない．剪定枝は持ち出される場合もあるが除葉や下草は土壌に還元されるため緩やかな物質循環速度となり負荷の発生源とはなりにくい．加えて有機質肥料への指向性が強いため炭素の貯留となることが予見される．レビューと題しているが，ブドウ園での調査を進めるにつれて，多くの課題に行き当たっており，ブドウ園のフィールドスケールにおける物質動態の解明に関して諸兄のご協力をお願いしたい．

引用文献

柏木 (1995): 土壌の物理性, 71: 57–62.
柏木 (2004): 土壌の物理性, 96: 71–81.
Khalsa et al. (2018): https://ciwr.ucanr.edu/files/283983.pdf
北川 (2005): 土壌の物理性, 100: 43–53.
Nagarajah (1987): Am. J. Enol. Vitic., 38: 54–58.
農文協編 (2017): ブドウ大辞典, 農山漁村文化協会, 東京.
Novara et al. (2011): Soil & Tillage Research, 117: 140–147.
吉川 (2017): 海外の森林と林業, 98: 60–64.

バイオ炭による土壌物理性の改良

亀山幸司
農研機構農村工学研究部門

キーワード: バイオ炭，炭素隔離，土壌改良，経済的合理性

就職した所に炭化装置が設置されていた．大学院時代，土中の溶質移動について研究していたので，熱分解によって未利用バイオマスから吸着機能を持つ炭化物を作成し，炭化物を用いた土壌改良により窒素溶脱の抑制や重金属の不溶化などに貢献できるのではないかと考えたのが，私のバイオ炭研究の始まりである．バイオ炭による土壌炭素隔離については，当時から数人の方が主張されていたものの，大きな盛り上がりとなることはなかった．

2007 年にバイオ炭の国際研究集会が初めて開催されるなど世界的に急速な盛り上がりをみせ始め，CO_2 削減技術としてバイオ炭を認めさせようという動きが活発化した．しかし，科学的根拠が不足しているなどの理由により，その時点で認められることはなかった．

その後，世界中で数多くの研究が行われ，バイオ炭（Biochar）をキーワードとして検索される論文は 2021 年 10 月現在 16,000 を超える（Web of Science 調べ）．その甲斐もあり，2019 年に IPCC 国別温室効果ガスインベントリガイドラインに Biochar の農業利用に伴う土壌炭素隔離量の算定方法が採用された（IPCC, 2019）．そして，国内においてもバイオ炭による土壌炭素隔離量（CO_2 削減量）を J-クレジット制度の中で算定できるように整理が行われ（農林水産省, 2020），現在バイオ炭による土壌炭素隔離の実装に向けた動きが急加速している．

バイオ炭の農地施用により乾燥密度，保水性，通気性，団粒安定度，塑性 · 液性限界，剪断強度等の物理性が改良することが報告されている（例えば，Kameyama et al., 2016; Obia et al., 2018; Yang and Lu, 2021）．このため，バイオ炭の農地施用は作物の生育環境や農業機械の作業性等を改善する可能性を有している．

ただし，バイオ炭は原料や生成方法によって物性が異なる上，施用される側の土壌の土性や理化学性によっても施用効果が異なる．このため，組み合わせが異なれば，異なる効果が予想される．また，地域で発生して余剰化するバイオマス資源はその地域によって異なり，作物生育の観点から問題となるような土壌特性も地域によって異なる．また，バイオ炭による物理性（特に，保水性 · 透水性 · 通気性）の改良には，バイオ炭の粒径や施用量と施用される側の土壌の土性も大きく影響する．施用量が多いほど効果が大きくなるため，一定の効果を出すためには多量のバイオ炭施用が必要となる．バイオ炭は比較的高価な資材であるため，土壌の空隙構造が変わるほど多量施用することは経済的側面から難しいことが多い．

以上のことから，バイオ炭を用いた土壌物理性改良技術を地域において実装していくためには，①地域内において土壌物理性が作物生育の制限因子となっている事例を対象に，②地域内で余剰化しているバイオマス資源から生成されるバイオ炭の施用が土壌の物理性改善や作物生育の増進に効果があることを実証した上で，③経済的合理性が確保される必要がある．この条件が満たされる地域はかなり少なくなる可能性が高いが，バイオ炭が合理的かつ持続的に活用されるためには重要な条件と考えている．

最後に，降雨量が多い日本では，土壌の物理性が作物生育の制限因子となる事例としては排水不良が多い．このような圃場では排水性の改良が必要となるが，排水改良のためにバイオ炭が活用された報告は極めて少ない．このため，バイオ炭を用いた排水改良技術に関する研究や少量でも改良効果の高い施用技術に関する研究の進展が非常に重要と考えている．

引用文献

IPCC (2019): https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch02_Ap4_Biochar.pdf

Kameyama et al. (2016): Soil Sci., 181(1): 20-28.

農林水産省（2020): https://www.maff.go.jp/j/press/kanbo/kankyo/attach/pdf/201021-1.pdf

Obia et al. (2018): PLOS ONE, 13: e0196794.

Yang and Lu (2021): Soil and Tillage Research, 205: 104798.

土壌の移動現象あれこれ

木原康孝

島根大学生物資源科学部

キーワード: 水分移動，塩類集積，密度流，バラツキ

土壌物理学には多くのテーマがあるが自分が関わった研究を振り返ってみるとその多くは土壌中での移動現象に関係するものであった．学部の講義で土壌物理学を学んだ際，田舎の農家出身の学生としては土の中での水の移動などということはもう詳しくわかっているはずと思ったが，結局その後の研究でも明らかにならず，よくわからない何かと 40 年間悪戦苦闘してきたような気がする．

学部 3 回生のとき「土壌物理学」の講義を受けて興味を持ち，卒業論文の「不飽和透水係数の測定法とシミュレーション」というタイトルは今にして思えば若気の至りと言わざるを得ない．修士では研究室で行っていた笠岡湾干拓の除塩をテーマにして「土壌中における Na·Ca の吸着特性と除塩の促進に関する研究」を行った．ただ，その後は方向転換して畑地用水計画における下層からの毛管補給についての計算シミュレーションを手伝って，それが最初の論文となった（木原ら, 1991）．島根大学に就職したのちもあれこれとやっていたが山陰つながりということで鳥取大学との共同研究に参加させてもらって長い間お世話になった．

その間も鳥取県の東伯地域のスイカ畑や芝畑での土壌水分観測とファームポンド容量の計算，徳島県吉野川下流域における地下水の塩水化による農地の除塩用水に関する委員会などの仕事に携わり，現場での観測の難しさを痛感してきた．

乾燥地での物質移動に興味を持ったのは鳥取大学乾燥地研究センター（その当時は砂丘研）の共同研究に誘われたのが最初である．実験室で塩類集積の実験を行ったが土壌溶液の初期濃度によって土壌カラムの塩分プロファイルが大きく異なることが謎であった．拡散係数は濃度に無関係なはずなので濃度が違ったとしても塩分プロファイルは同じような形状になるはずなのにこれがならないのである．「重い水が落ちているのではないか」すなわち密度流が発生しているのではないかという考えが思いついた瞬間とそれを検証する実験を行って密度流の発生を確認した瞬間は今でも鮮明に覚えており研究生活で最も閃いた瞬間であったと思う．その後は密度流をなんとか可視化したいと様々な方法を試みてきた．3 次元での可視化にこだわり，カラムに金属棒を数多く差し込んで 3 次元で EC を測ろうと試みたり，数勝負とばかりに同一深さで 300 個土壌サンプルを採取して可視化しようとしたりしたが結局うまくいかず，3 次元を諦めて 2 次元での可視化を試みた．ヘル・ショウ型の装置で可視化できた時のうれしさも格別であった．今は再びなんとか 3 次元で可視化できないかと悪戦苦闘しており，三つ子の魂百までを地で行ってしまっている．

終わりに土壌物理学の研究の中で移動現象と同様にこだわってきたテーマについても言及したい．それはバラツキとスケールである．バラツキについては多くの人が経験していると思うが同じ場所で同じ深さから同じようにサンプリングしても水分量，塩分量などの測定値は必ずバラついている（例えば，中村, 2018）．もちろんバラツキの程度に大きい小さいはあるがバラつきがないということは経験したことがない．最近ではこれが土の本質だと思うようになってきた．

もう一つがスケールの問題である．島根大学の演習林との共同研究として 20 年近く中国山地の 6 ha の流域で観測を行っている．流域の様々な地点でサンプリングした土を実験室に持ち帰って透水性や保水性の実験を行いなんとか流域の水移動を説明できないかとチャレンジしている．6 ha の流域と直径 5 cm のカラムそれぞれでそれらしい話はしているが 6 ha の流域と直径 5cm のカラムというまったく異なるスケールで話が本当につながるのかということである．我々の使命は最終的には実際の自然あるいは現場での現象を明らかにすることであるが現在の理論あるいは考え方では実験室での結果が流域スケールに適用できるとは思えない．

筆者も定年退職を視野に入れる年齢となり少ない時間ではあるがこれらの成果をまとめてささやかながら土壌物理学の発展に貢献したいと考えている．

引用文献

木原ら（1991): 農土論集, 155: 61-67.

中村（2018): 土壌の物理性, 138: 53-54

有機物資材と土壌物理性

久保寺秀夫

農研機構農業環境研究部門

キーワード: 堆肥，物理性改良，ペレット，微細形態

筆者が土壌物理性研究に関わったきっかけは，30 年前に農水省に採用され着任した九州農業試験場（現 農研機構九州沖縄農業研究センター）で，室長に「ニガ土」の

研究課題を与えられたことである．ニガ土は乾燥すると収縮して硬い土塊になる特殊な黒ボク土だが，九州には他にも物理性に問題がある種々の土壌が分布しており，ニガ土を入り口にそれらの特性解明と改良に取り組むこととなった．

南九州は日本の代表的な畜産地帯であり，家畜ふん堆肥の活用が求められている．教科書的には土壌物理性の改良手段として，堆肥など有機物資材の施用は王道である．しかし南西諸島に分布するマージ土壌（赤黄色土の国頭マージ，暗赤色土の島尻マージ）に家畜ふん堆肥を 10 t/10 a 混和すると，半年から一年後に乾燥時の強硬化の問題が助長される現象が見られた（久保寺, 2007）．その原因を解明することはできなかったが，10 t/10 a というのは相当の多投であり，極端な土壌管理をすると予想できないことが起きると感じた．またこれをきっかけに文献を新たな目で眺めると，有機物施用が様々な面で土壌物理性の悪化につながった研究事例も散見された．例えば粗孔隙の増大による表土の乾燥（松本, 1980），下層土の亀裂に有機物が詰まり地下水を毛管上昇させたための湿害や固相率の低下に伴う干害（大橋 · 岡本, 1985），水浸透性の低下（南條 · 山田, 2005）などである．土づくりという言葉の曖昧さと，有機物資材の「なんとなく良さそう」というイメージが結びつくと，有機物資材の施用 = 土壌物理性改善と思われそうだが，上記のような事例もあることは十分に認識されるべきである．

堆肥の活用を促進する技術として，数 mm 径の粒状に圧縮成型するペレット化がある．堆肥ペレットは汎用の管理機で散布できるなど扱いが容易で，保存性や運搬コストの面でも非成型の堆肥に比べて優れている．九州沖縄農業研究センターでも何人もの研究者が堆肥ペレット特有の肥効や環境影響の研究に取り組んでいた．堆肥ペレットの化学的な組成は原料の堆肥と変わらないが肥効などの特性が異なる理由は，成型という物理的な要因と考え，ペレットの構造を顕微鏡で観察したくなった．筆者は，土壌を樹脂で固めて薄片を作り微細構造を観察した経験（久保寺 · 山田, 1997）から，この手法を準用してペレットの薄片を作成した（久保寺ら, 2009）．この方法で牛ふん堆肥ペレットの微細構造を観察すると，施用前のペレットは内部に孔隙が少なく，畑に施用すると数日のうちに固相を構成する繊維間の密着が緩んで面状孔隙が増え，1 月後には固相内に不定形の孔隙（バグ）や団粒の分離による孔隙（パッキング孔隙）が形成されていた．次はペレット自体に加え，ペレットが施用された土壌も合わせて観察しようと考え，数 cm の長さに切った塩ビ管に土壌とペレットを詰めて圃場に埋設し，1 ～ 18 月後に回収して塩ビ管ごと樹脂で固めて薄片を作った．固化した樹脂を切断する回転ブレードが柔らかい塩ビ管には効かなかったり，ペレットの中心軸を含む断面を出すのに難儀したりしたが，なんとか薄片を作成し観察することができた（Kubotera et al., 2016）．ペレット内部の微細構造は施用から 18 月後でも 1 月後と大差はないのに対し，ペレットの外縁と土壌の間にはペレットの分解と体積減少に伴って粗孔隙が形成され，その量は経時的に増大した．これは非成型の堆肥にはない，ペレット特有の機能である．

2050 年までに有機農業の取組面積 25 % を目指す「みどりの食料システム戦略」など，農業への有機物資材の活用促進の動きが国内外で加速している．有機物資材が土壌物理性に及ぼす影響を把握し，適正な施用技術を構築することはこの時代の要請と言える．

引用文献

久保寺 (2007): 土肥誌, 78: 587–590.
Kubotera et al. (2016) : 土壌の物理性, 134: 5–13.
久保寺ら (2009): 土肥誌, 80: 522–525.
久保寺 · 山田 (1997): ペドロジスト, 41: 32–41.
松本 (1980): 土肥誌, 51: 175–178.
南條 · 山田 (2005): 土壌の物理性, 99: 45–54.
大橋 · 岡本 (1985): 土肥誌, 56: 373–377.

土壌の熱特性測定技術を活用する

小島悠揮
岐阜大学工学部

キーワード: 土壌の熱特性，双子プローブ熱パルス，サーモ TDR

「センサは買うものではなく作るものだよ．」

学部 3 年生で研究室配属された際，当時の指導教員登尾浩助先生から聞かされた言葉である．土壌センサなんてハイテクなものを自分で作れるのか，と興奮したのを覚えている．実際に TDR プローブや茎内流量計などを作り，それらを使って卒論を書いた．その後も様々な測定器を自作し，自分が作ったものでデータが得られる楽しさが研究を進めるモチベーションの一つになっていた．特に Ph.D. 課程では土壌の熱特性を測定する双子プローブ熱パルス（DPHP）やそれを TDR と組み合わせたサーモ TDR プローブを作るようになり，以降土壌の熱特性測定に関する研究が私の中心的なテーマとなった．今回はその DPHP とサーモ TDR の発展について執筆することにした．

DPHP の始まりは Campbell et al.（1991）がヒーター線と温度計を内装した一対のステンレスチューブを持つセンサを開発し，短時間のヒーター加熱と一定距離離れた温度計の温度変化を解析して土壌の体積熱容量を決定したことである．Bristow et al.（1994）は同様のセンサ形状で土壌の熱伝導率，熱拡散係数も決定できることを明らかし，その後 Noborio et al.（1996）によってサーモ TDR が開発され，単一のプローブによる土壌の熱特性と電気特性の同時決定が実現した．以降 DPHP とサーモ TDR に関する研究はアイオワ州立大学の Robert Horton 先生のグループを中心に精力的に進められてきたが，そ

れらは大きく分けて 3 種類に分類され，いずれの分類も関連する論文が現在でも出版されている．

分類の一つ目は DPHP による熱特性決定精度の改善に関するもので，温度変化の解析方法に係るものが多い．例えば DPHP の温度変化の解析は当初は Pulsed Infinite Line Source Solution と呼ばれる式が用いられていたが，この式は無限の線状発熱体と一定距離離れた点の温度変化を想定しており，ステンレスチューブの存在を考慮していない．Knight et al.（2012）はステンレスチューブの存在を考慮した準解析解を提案し，近年では彼らの方法が解析に用いられることが多い．

二つ目はプローブ形状に関するものである．DPHP では 2 本のステンレスチューブの間隔が体積熱容量の決定精度に影響するため，その変化は誤差となる．複数本の温度計を内装することで間隔の変化を原位置校正できるものや，径の大きい強固なステンレスチューブを用いて間隔変化を防ぐものが開発されている．最新の Peng et al.（2019）のサーモ TDR プローブは，外径 2 ～ 2.4 mm，長さ 70 mm の比較的大きいステンレスチューブと 3 本の温度計の内装によって測定範囲の拡大や TDR の精度向上を実現している．ただし，こうしたプローブ構造の複雑化には製作の難易度や使用時の脆弱性の増加という課題が併存することを述べておきたい．

三つ目は熱特性や電気特性からそれら以外の土壌特性の推定を試みる研究で，私がこれまで推し進めてきた研究はこの分類に当てはまる．DPHP やサーモ TDR では複数の電気 · 熱特性を測定できるため，それらを組み合わせることで様々な土壌特性が定量可能となる．例えば，サーモ TDR を用いて土壌の比誘電率から体積含水率を予め決定しておくことで，体積熱容量または熱伝導率から土壌の乾燥密度が推定できる（Lu et al., 2016）．乾燥密度以外にも凍土の体積含氷率，油汚染土壌中の油濃度などが同様の方法で推定がされている．また，DPHP では土中の温度分布と熱伝導率が決定されるため，土中の各種熱輸送量の計算が可能となる．それを活用して地中熱流量や定常水フラックス，地中蒸発量の推定がされている．私は Ph.D. 課程から凍土の体積含氷率の推定に取り組んでおり，DPHP の測定値と地中の潜熱熱輸送量解析から推定する手法（Kojima et al., 2016）やヒーター加熱によって凍土を完全に融解し，TDR で測定した水分量から氷量を決定する手法などを開発してきた（Kojima et al., 2020）．凍土以外にも，土壌の熱特性とマトリックポテンシャルを同時に決定できる DPHP センサの開発なども行った（Kojima et al., 2021）．最近ではサーモ TDR を用いた原位置での乾燥密度変化定量化に関する取り組みが多いようである．土壌物理学の長年の課題である乾燥密度変化時の熱 · 物質輸送の解明実現に向けた動きだと思う．

以上，今回はミニレビューということで DPHP とサーモ TDR に関する大まかな研究の流れを紹介したが，より詳しく知りたい方は私の友人でもある中国西北農林科技大学の Hailong He 先生が素晴らしいレビュー論文を執筆しているのでそちらをご参照いただきたい（He et al., 2018）．現在も様々な研究が進められ，発展を続ける DPHP とサーモ TDR だが，特に Horton 先生の元でポスドクを経験し，現在は中国農業大学教授の Tusheng Ren 先生のグループを中心とした中国人研究者の勢いが凄い．私も Horton グループの一員として負けられないところだが，仕事量やスピードでは到底かなわないので独自性の高い研究で勝負したいと思っている．また，サーモ TDR に関する研究は，センサの発展に注力する内容が多く，現象解明に活かされた研究はあまり多くないように感じる．これは現場でのセンサの脆弱性や，測定回路の作成やデータロガーの設定が難解かつ煩雑であることも原因かもしれない（実際に私も苦労して圃場に設置したサーモ TDR が直ぐに故障した経験が何度もある）．大きなポテンシャルを持つ DPHP/ サーモ TDR が実現象の解明に貢献できるよう，私も努力していきたい．

引用文献

Bristow et al. (1994): Soil Sci. Soc. Am. J., 58: 1288–1294.
Campbell et al. (1991): Soil Sci. Soc. Am. J., 55: 291–293.
He et al. (2018): Rev. Geophys., 56:567–620.
Knight et al. (2012): Vadose Zone J., 11(2), doi: 10.2136/vzj2011.0112
Kojima et al. (2016): Vadose Zone J., 15(5), doi: 10.2136/vzj2015.10.0134
Kojima et al. (2020): Cold Reg. Sci. Technol., 174:103060.
Kojima et al. (2021): Compt. Electron. Agr., 188:106331.
Lu et al. (2016): Soil Sci. Soc. Am. J., 80(1): 48–54.
Noborio et al. (1996): Soil Sci., 161:22–28.
Peng et al. (2019): Vadose Zone J., 18(1), doi: 10.2136/vzj2019.03.0026

森林水文学 · 砂防学における土壌物理の研究

小杉賢一朗
京都大学農学研究科

キーワード: 森林土壌，風化基岩，水源涵養，土砂災害

学生の頃，森林の水源涵養機能や洪水緩和機能がどのようにして発揮されるのかに興味を持ち，山地斜面における雨水の貯留に直接関与する森林土壌の保水性と透水性を研究してみたいと考えた．これが土壌物理学に関わり始めたきっかけである．

初めは，どのような森林土壌が大きな雨水貯留能力を持つのかを明らかにしたいと考えて研究を進めた（Kosugi, 1997）が，森林流域での水文観測を進めるうちに，雨水を長期間蓄えて河川の基底流を涵養するのは，土壌の下にある風化基岩の役割ではないかと考えるようになった（Kosugi et al., 2011）．そして森林土壌は，雨水を一時的に蓄えて風化基岩への浸透量を増やすバッファー

の役割を果たしているのだとの考えに至っている（小杉, 2007）．

森林土壌の保水性と透水性は，山地斜面における地下水の発生や水位変動にも深く関与している．豪雨時に地下水位が大きく上昇すると，斜面崩壊が発生して土砂災害を引き起こすことがある．斜面崩壊発生を予測する数値シミュレーションモデルを開発したいと考えて，六甲山の流域で土壌の保水性と透水性を集中的に計測したことがあった．一応モデルは完成したが，土壌の保水性や透水性，それから土質強度（内部摩擦角や粘着力）の与え方次第で予測結果は大きく変わってしまう（小杉ら, 2012）．さらに実際の斜面ではこれらの特性は大きな不均質性を示し，その計測は容易ではない．全国でおよそ67 万箇所に及ぶとされる土砂災害警戒区域を対象として，どうやれば有効な予測が行えるのか，現在の最大の関心事である．降雨データを使って土砂災害警戒情報を出す現行の経験的手法に，土壌物理学や森林水文学の考え方を組み込むことが答えになると考えて研究を進めている（小杉, 2015）．

引用文献

Kosugi (1997): J. Jpn. Soc. Hydrol. & Water Resour., 10: 226–237.
小杉 (2007): 水文・水資源学会誌, 20: 201–213.
小杉 (2015): 砂防学会誌, 67(5): 12–23.
Kosugi et al. (2011): Water Resour. Res., 47, doi: 10.1029/2010WR009884
小杉ら (2012): 砂防学会誌, 65(1): 27–38.

森林土壌の保水性・透水性について

小林政広
森林研究・整備機構　森林総合研究所

キーワード: 森林土壌，水移動，保水性，透水性

森林における水と物質の循環を通じて発現する水源涵養，環境調節などの機能に対する期待は大きい．これら機能の評価のためには，森林に降った雨が流出するまでの過程における樹木と森林土壌の役割を明らかにする必要がある．森林土壌が降水を一時的に蓄え，緩やかに排水する機能を解明すること，これが筆者の研究のスタートからの，そして現在まで続くテーマであり，その基礎に土壌物理学がある．

近年の気候変動がもたらす豪雨や渇水が機能に及ぼす影響，また，森林や農地などを含む流域における土地利用変化の影響の評価予測の必要性が高まっている．想定される変化に対する応答の予測には，数値モデルによる解析が広く用いられる．森林流域における地中の水移動の解析には，生物の影響による特有の孔隙構造を有する森林土壌の保水性，透水性を解析に反映させる必要がある（小杉, 2004）．土壌の孔隙分布を対数正規分布で表すことにより幅広い森林土壌の保水性を表せるモデルが開発され（Kosugi, 1996），代表的な地中水移動モデルである Hydrus にも標準搭載されている（Šimůnek et al., 2013）．

モデリングが進歩し，計算機の能力が飛躍的に向上したことにより，様々な空間，時間スケールの解析が可能になったが，日本の森林土壌については保水性，透水性データの集約，データベース化が追い付いていないのが現状である．農耕地分野では，農研機構のデータベース「日本土壌インベントリー」（農研機構, 2021）に，日本全国の農耕地土壌の飽和透水係数および飽和から永久しおれ点までの含水率の実測データが格納されており，誰でもダウンロードすることが可能になっている．森林分野において最近，気候変動がスギ林の一次生産量に及ぼす影響を日本全国 1 ㎞メッシュの解像度で予測する解析が行われた（Toriyama et al.,2021）．この解析では土壌タイプごとの保水性を，既往実測データを用いた地質統計学的手法により 1 km メッシュで推定し，独立したデータセットとして公開された（Yamashita et al., 2021）．この成果は森林分野における大きな進展と言える．しかしながら，日本の森林分野では旧来から保水性の測定を pF 3.2 までの範囲で行っており，永久しおれ点のデータがほとんど取得されていない．造林樹種の成長の評価に限らず，山地の森林に生育する樹木の水利用と土壌中の水分動態とを一体的に明らかにすることは今後も重要な課題である．乾燥域までの保水性の実測データを新規に蓄積するとともに，過去に測定した試料の保存試料を用いてデータの範囲を拡張する取り組みが求められる．

引用文献

小杉賢一朗 (2004): 砂防学会誌, 57: 71–79.
Kosugi (1996): Water Resources Research, 32(9), 2697-2703.
Šimůnek et al. (2013): The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media, Version 4.17. Department of Environmental Sciences, University of California, Riverside.
農研機構 (2021): https://soil-inventory.dc.affrc.go.jp/
Toriyama et al. (2021): PLoS ONE, 16(2): e0247165, doi: 10.1371/journal.pone.0247165
Yamashita et al. (2021): Zenodo. http://doi.org/10.5281/zenodo.4505671

私的史的フロック

小林幹佳
筑波大学生命環境系

キーワード: 凝集，強度，破壊，腐植

筑波大生として卒業研究のために研究室を選ぶ前，将来は高校で柔道部の顧問をしながら理科の先生でもできないかと漠然と考えていた．それもあって，理科（物理や化学）的な実験をしてそうだった足立さん（当時助手，前学会長）の研究室を希望した．提示された研究テーマの 1 つ「マイクロフロー可視化装置を用いたフロックの破壊強度に関する研究」に妙に魅力を感じた．多分，海に近い島育ちで，流れに興味があったからだろう．これがフロックとの出会いで，1993 年のことになる．

研究室に配属後，足立さんと 1 対 1 でいくつかの論文を読むことになった．まず，水処理の大家である丹保ら（1970）の論文を読み，フロックが粘土や有機物などのコロイド粒子の凝集体であること，フロックは凝集沈殿による固液分離において主役であること，フロックの強さは有限なので撹拌により壊れて径は小さくなることを知った．現象に理論的なメスを入れる凄味と面白さを感じたが，フロック構造を考慮に入れた強度モデルと局所等方性乱流理論を使った破壊モデルには，未知の係数が多用され，エッセンスをすぐには掴めなかった．

次に，フロック強度には，水中での油滴形成（乳化）と同様に，界面張力に似た力が関係する，と盛んに主張する足立さんの見込みで，Shinnar（1961）の撹拌乳化についての論文を読んだ．この論文では，乳化という複雑な現象に対して流体力学的に切り込んでいて，局所等方性乱流理論に加えて次元解析と G.I. Taylor の層流場での乳化理論が骨子だった．フロックの界面張力なる概念をイメージできなかったが，油滴径と撹拌速度との理論的な関係式を出す次元解析の威力は強烈な印象として残った．

以上の論文を一応読んだ後，Sonntag and Russel（1986; 1987a; b）による，モデル球粒子を用いたフロック破壊の研究論文に移った．後々，透水を含む流体力学，弾塑性力学，統計物理，粒子間相互作用を記述する DLVO 理論，凝集速度論，光散乱，フラクタル幾何学を駆使していることは伺い知れたが，当時，2 人で読んでも殆ど内容を理解できなかった．大学教員でもわからないことがあることを知り，自分の学力不足を痛感した．これらに気付かせることが足立さんの狙いだったのかもしれない．とにかく勉強して自分で考えるしかないと思い，有志で集まって数学や物理，化学の勉強会を続ける動機になった．自主的な勉強会では，なぜそうなるのか，を納得するまで議論する雰囲気があった．

既往研究を表面的に真似て実験し，フロックの大きさと撹拌速度の関係を求めて，ジャンクな卒業論文を書いた．面白いデータもまともな理論もない卒論で，電気技術者の父からはこれが理系の論文かとダメ出しを食らい，足立さんからは何でもっとやりきらないの，と言われたように思う．少しはましな結果を出すまではと思い直し，修士課程で実験をやり直し，博士課程でその解釈に日々頭をひねった．

ある日，マイクロピペットを使った独自の装置により，多種の材料で構成されたフロックの破壊に要する力を測定し，その力が大きさによらないことを報告した論文（Yeung and Pelton, 1996）を知った．何度も読み直し，書き込みでボロボロになっていた Sonntag and Russel（1986）の論文コピーをあらためて眺めてみると，1 つのグラフがフロックの大きさは粒子間力で決まることを主張していることにやっと気付いた．結局，フロック強度は大きさによらず粒子間接点力で決まり，フロックが大きくなる，もしくは局所的な剪断速度が増すことで，フロックを壊そうとする流体力がフロック強度を超え，破壊が生じるという考えがまとまった．この考え方はフロック径と撹拌速度とのべき乗関係を説明でき（Kobayashi et al., 1999），凝集性懸濁液の非ニュートン粘性のモデルにも拡張された（Kobayashi et al., 2000）．ただし，フロック強度の絶対値は自分の手で得られなかった．撹拌乱流では局所的な剪断速度の評価が難しかったからである．

2000 年に学位取得後，東大水利研で学振のポスドクとしてお世話になった．寛大な田中先生の計らいで自由に研究させていただいた．その頃，Blaser（1998）の学位論文を元にした一連の論文が目に留まった．マイクロフロー可視化装置を使うことで，よく定義された流れ場でのフロックの振る舞いを調べていた．楕円体で近似したフロックを壊そうとする流体力が計算され，凝集剤で作られたフロックの強度が見積もられていた．この一連の論文の成果を拝借すれば，もっと簡単な仕組みで，自分でもフロック強度を出せそうだった．早速，実験に必要なパーツを廃棄処分待ちのガラクタから寄せ集めて実験系を作り，モデル粒子や畑の土で形成したフロックを壊しては強度を求めた（Kobayashi, 2004; 2005）．かくして得られた強度は数 nN であり，高度な技術の必要な原子間力顕微鏡で得られたモデル粒子の付着力と同程度であった．水質条件がフロック強度に与える影響も確認できた．顕微鏡観察でフロックの識別が可能でさえあれば，モデル粒子に限らず，あらゆるフロックに適用できる点も有望だと思った．

フロックの破壊と並行して，フロックの形成過程もテーマの 1 つで，モデル粒子の凝集速度に及ぼす流れの効果を研究していた．ブラウン運動による凝集速度の相対値である安定度比やその DLVO 理論による解釈など終わった研究だと思い込んでいた．ところがモデル粒子の安定度比と帯電挙動の徹底した実験と解析に基づき，DLVO 理論の矛盾に挑んだ Borkovec らの論文（Behrens et al., 2000）に頭をカチ割られるような衝撃を受け，自分の浅はかさを思い知った．ジュネーヴ大学に移った Borkovec 研究室が，水環境におけるコロイド凝

集の研究を主課題にした研究センターの一部門だったこともあり，2003 年からそこで学振のポスドクとなった．ジュネーヴ滞在中，コロイドの基礎科学と研究の厳しさについて多くのことを学んだ．ジュネーヴでの仕事であるケイ酸微粒子の帯電と凝集速度に関して，国際会議 Interface Against Pollution 2004 での keynote lecture を依頼されたことは大きな自信になった．また，スイス連邦工科大チューリッヒ校の Morbidelli 研究室を訪問した際，論文についてあれこれ聞かれたり，論文で描いた図と似た装置が置いてあったりして，論文は読まれるものなのだな，と当たり前のことを再認識した．その後，幸運にも 2005 年に岩手大で職を得て，2011 年に母校に戻ってからも，コロイド粒子の帯電や凝集速度の測定およびそれらの理論解析が研究の柱になっている．

そんな中，母国で土壌学科の講師をしている留学生を研究指導する機会を得た．より土に近い研究をと思案していた時，腐植凝集体の顕微鏡写真を載せた Kloster ら（2013）の論文を見つけた．普通の顕微鏡では腐植は見えないと思っていたので，驚くと同時にワクワクした．これならまだ誰も報告していない腐植フロックの強度を求められると思った．二価イオンや界面活性剤，タンパク質を使って腐植凝集体を作っては壊してもらい，帯電状態と強度を関連付けて議論した（Hakim et al., 2019; Hakim and Kobayashi, 2019）．フロック強度は等電点付近で最大となること，共存イオン種や pH によって腐植フロックの強度は変わること，疎水性に関連する成分中の炭素量や芳香族の含量が増えると強度は数 nN から数十 nN にも高くなることがわかった．これらの傾向は，表面修飾する分子を制御して行われた，原子間力顕微鏡で得られた付着力とも類似していた．

以上でこれまでの私的なフロック研究史の稿を終える．フロック強度は輸送単位としてのフロックの大きさを決めるので，有機物や炭素の輸送制御を通して，炭素貯留や汚染物質の不動化に繋がるのではと考えている．それで現在もフロックの研究を少しずつ進めている．最後に，研究の継続には，これまで（これからも）お世話になった（なる）先生方や同僚さん，学生さんの支援，科研費（19H03070）をはじめとする研究助成が必要不可欠であった（である）．記してここに感謝申し上げる．なお，記憶に基づく記述もあり，誤りがありうる点をご容赦願う．

引用文献

Behrens et al. (2000): Langmuir, 16: 2566–2575.

Blaser (1998): doi: 10.3929/ethz-a-001989880

Hakim and Kobayashi (2019): Colloids Surf. A, 577: 175–184.

Hakim et al. (2019): ACS Omega, 4: 8559–8567.

Kloster et al. (2013): Colloids Surf. A, 427: 76–82.

Kobayashi et al. (1999): Langmuir, 15: 4351–4356.

Kobayashi et al. (2000): Nihon Reoroji Gakkaishi, 28: 143–144.

Kobayashi (2004): Colloids Surf. A, 235: 73–78.

Kobayashi (2005): Water Research, 39: 3273–3278.

Shinnar (1961): J. Fluid Mech., 10: 259–275.

Sonntag and Russel (1986, 1987ab): J. Colloid Interf. Sci., 113: 399–413 and 115: 389–399, 390–395.

丹保ら（1970): 水道協会雑誌, 427: 4–15.

Yeung and Pelton (1996): J. Colloid Interf. Sci., 184: 579–585.

軟弱地盤改良土のスレーキングについて

近藤文義

佐賀大学全学教育機構

キーワード: 土水路斜面，軟弱粘土，地盤改良，スレーキング

この研究は，九州農政局筑後川下流左岸農地防災事業所が完工（平成 31 年 3 月）する約 1 年前に，これまで同事業所が長年取り組んできた事業評価の検証依頼として資金提供を受け，実施したテーマである．内容的には，石灰やセメントで改良した軟弱粘土の土水路斜面改良土が，未改良土の場合よりもスレーキング（乾湿繰り返し）に対する抵抗性を有することを証明して頂きたいとのことであった．

北部九州の筑後川下流地域に広がる水田農業地帯において，「クリーク」と呼ばれる農業用の水路は貯水機能や用排水兼用機能を有し，用水の安定供給や洪水調節機能など重要な役割を担ってきた．しかし，近年の温暖化や局所的豪雨などの気象特性や当地区の軟弱な粘土質地盤特性が相まって，土水路部分では斜面の劣化が随所で見受けられる（例えば，金山ら, 2010 ; 木原ら, 2007）ため，事前の防止対策や事後の補修対策を講ずるための基礎研究が重要となる．

スレーキングに関する先行研究はもともと岩石（特に軟岩）を対象として行われてきた経緯があり，石灰やセメントなどによって改良した土質材料のスレーキング特性についてはほとんど明らかにされていない状況であった．しかし，単なるスレーキングの現象論だけでは事業評価報告書としては十分であるかも知れないが，原著論文としては不十分である．関連する既往の研究においては，例えばスレーキングに伴う塩類集積土壌のイオン溶出特性（Shamim and Akae, 2011）や土壌の物理化学特性の変化（西村ら, 2016）などが明らかにされており，何らかのオリジナリティーを付加した研究が重要となる．

拙著（近藤ら, 2021）は，スレーキングに伴う改良土の等級改善（建設発生土基準）と一軸圧縮強さの変化とを関連づけて取り纏めたものである．本論文では，石灰とセメントの改良効果の違いやスレーキング抵抗性の違いなどについて，一応の成果が得られている．しかし，研究の実施および論文取り纏めの過程において，改良土の養生条件や型枠の有無，強度とスレーキングの関係，硬化過程での供試体内部の間隙分布の変化など，様々な問題が未解明であることも明らかとなった．引き続き，こ

れらの課題に取り組んでいきたいと考えている．

引用文献

金山ら (2010): 平成 22 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集: 384–385.
木原ら (2007): 第 88 回農業農村工学会九州支部講演会要旨集: 76–79.
近藤ら (2021): 農業農村工学会論文集, 313: Ⅱ_61–Ⅱ_67.
西村ら (2016): 農業農村工学会論文集, 303: Ⅱ_45–Ⅱ_50.
Shamim and Akae (2011): 土壌の物理性, 118: 3–11.

一貫性のない私の雑多な研究

齊藤忠臣
鳥取大学農学部

キーワード: 土壌水分，植物，同位体，UAV

私は学生時代に「物理的なアプローチを用いて環境問題に貢献したい」という漠然とした思いを持っていた．しかし，どの分野もそれぞれに面白そうで，研究室決めにあたり色々な研究室を周ろうと思っていたのだが，手始めに土壌の研究室を訪問したところ「うちは先着順で決めていて，今年は人気でもう後一人しか入れないよ？」と言われ，思わずその場で「じゃあ入ります！」と決めてしまった．もし研究室への訪問のタイミングがもう少し前か後だったら，土壌物理の道へは進んでいなかったかもしれない．研究室が特に乾燥地の研究に特化していた事もあり，乾燥地の土壌問題を中心として研究のキャリアをスタートさせることとなった．

さて，今回はレビューという事で，自分の研究に関する系統だった取りまとめをすべきところであるが，大変お恥ずかしい話，私の研究テーマは全く系統立っておらず，面白そうと思った内容や，人から誘われるがまま，次々とテーマを変えながら研究を進めている状況である．そこで，系統立った研究紹介は諦め，これまで取り組んできた雑多な研究を振り返ってひねり出したキーワード４つ「土壌水分」「植物」「同位体」「UAV」に従って，とりとめもなく研究内容を紹介させて頂こうと思う．

冒頭に記した通り，学生時代に乾燥地の研究に取り組んだことを手始めに，学位取得後は鳥取大学乾燥地研究センター，その後鳥取大学農学部と渡り歩き，現在も乾燥地を対象とした研究を継続している．乾燥地では何といっても「土壌水分」が重要な要素であり，これまで様々な海外の現場で土壌水分の観測を行ってきた．しかし，乾燥地の環境では土壌中の温度と塩濃度の変動が大きいため，これらが誘電率水分計による正確な水分測定を妨げることになる．そこで，誘電率水分計の温度・塩の影響評価，理論的背景の解明，校正手法の開発といった一連の研究に取り組むこととなった（例えば Saito et al., 2009）．また，これらの研究を通じて土壌水分の測定技術自体にも興味がわき，最近では，GNSS 衛星信号の反射波を利用した表層土壌水分の面的推定手法の開発などにも取り組んでいる．

土壌水分の量がわかると，「植物」がその土壌水分をどのように利用するのかも知りたくなってくる．特に乾燥地の環境下などでは，土壌水分と植生との間に直接的な関係が見出だせることがあり，西オーストラリアや中国・黄土高原において土壌・植生・地形の関係性を解明したり，その関係性を用いて植生量から土壌の広域情報を推定する研究などを行ってきた（Saito et al., 2016a）．さらに，より直接的に植物が土壌水分をどう利用するのかを調べるために，アメリカやスーダンの在来種・外来種の樹木に誘電率水分計を刺して，樹体水分・塩分をモニタリングする研究に取り組んだ（Saito et al., 2016b）．植物にセンサを設置して得られるデータは大変興味深いものが多く，さらにもっと多くの樹体の水分状態指標を測定したくなる．近年では日本の自生樹木や果樹（ニホンナシ）を対象に，樹体水分・塩分，樹液流速，水ポテンシャル，幹直径，葉の膨圧など，あらゆる項目をセンサ群で自動計測しては，そのデータの解釈に悪戦苦闘している．

国内の中でも，特に地域に根差した研究としては，鳥取砂丘で発生消滅を繰り返すオアシスの水がどこから来てどこへ行くのか？ というテーマに取り組んでいる．このオアシスの水源調査において効果的だったのが，3 つ目のキーワードに挙げた「同位体」分析である．水文観測に加え，オアシスの水や湧水，地下水，雨水等の水の安定同位体分析を実施した結果，オアシス発生消滅の様々なメカニズムが解明されることとなった．また，先述したアメリカやスーダンのセンサによる樹体水分モニタリングについても，樹木水・土壌水・地下水などの同位体分析結果を組み合わせることにより，樹体の利用する水源に関する新たな知見が得られた（Saito et al., 2014）．その他，モンゴルで美味しい馬乳酒を生産するウマの食べる草や飲む水の水源調査にも同位体分析を利用した．いずれにせよ，同位体分析は計測器ベースでの観測と組み合わせることにより強力なツールと成りうると感じており，今後とも機会を見て利用したいと考えている．

キーワードの最後に挙げた「UAV（ドローン）」も，元々は鳥取砂丘オアシスの調査に導入したものであるが，近年の私の研究には欠かせないツールの一つとなりつつある．当初，砂丘では UAV を用いた空中写真測量の結果と地中レーダー探査の結果を組み合わせて，広域の地下水・地中構造の解明に利用したが，RTK-GNSS ドローンの登場により測量精度が飛躍的に向上したことも相まって，鳥取砂丘全体の砂移動解析，そして今後は圃場の土壌侵食の推定に利用したいと考えている．さらに，測量結果と同時に生成される高精度 3 次元モデルも利用価値が高く，現在はゲーム開発エンジンを使って鳥取砂丘の VR システムの開発を進めている．VR の中では鳥取砂丘が非常にリアルに再現されており，没入感があるので砂丘の雄大さをそのまま感じつつ，各地に散らばる見ど

ころや上空に設置した展望台からの景色を堪能できる．そして，ヴァーチャル掲示板などを通じて，研究成果を展示することにより，利用者と研究者をつなぐツールともなるため，砂丘のみならず，今後の様々なプロジェクト成果の紹介の一手段として VR が利用できるのではと考えている．

以上，これまでの研究を取りまとめてはみたものの，一貫した方向性が無く内容がどんどん発散しており，自分でも本当に酷い有様だと思う．ただ，一貫性無く，むやみにやっているからこそ，見つかる新しいアイディアも何かあるのかもしれない，とも淡く期待している．そんなわけで，芯の通った骨のある研究は才能ある皆様にお任せして，もう少しこんなスタンスで興味関心の向くままとりとめもない研究をしてみようと思っている．

引用文献

Saito et al. (2009): Soil Science Society of America Journal, 73: 1931–1937.
Saito et al. (2014): Journal of Arid Land Studies, 24: 29–32.
Saito et al. (2016a): Water, 8: 96.
Saito et al. (2016b): Vadose Zone Journal, 15, doi: 10.2136/vzj2015.04.0061

野菜畑から見た水田土壌の奥深さ

齋藤龍司
長野県野菜花き試験場

キーワード: 県農業試験場，水田土壌，排水対策

土壌物理学については，昔から関心はあったが，敷居を高く感じて参加に至らなかった．本学会は，大学，独法研究者が多く，県農試の会員が比較的少ないとの印象があり，今回の投稿によせて，本学会で口頭発表もした事の無い「私」でも，入会の動機を知って頂くことは価値があると思い直した．

私は現在，長野県で野菜と花類の土壌肥料関係の仕事をしている．野菜畑での生産安定を図るには，根張りが良く，排水性の良好な圃場であることが求められる．そのため，土壌を試掘して断面調査をしたり，採土管を採取して三相分布，飽和透水係数を調べたり，バケツリレーをしながらインテークレートの測定をして，土壌の排水性などを評価したりしていた．

そんな私が，次のような体験から水田土壌の奥深さに関心を持つようになった．それは，とある灰色低地土の水田転換畑で，タマネギが春先の雪解けで湿害により収穫皆無になったことである．実際に現地へ出向いたのは，夏の圃場が乾燥している時期であり，状況を見るため土壌断面調査をした．下層 50cm には，大きさ 30 cm にもなる礫がごろごろしており，深さ 30 cm 付近には，ち密度の高い 5 cm くらいの層が観察された．土壌断面自体も全体的に乾燥気味で，どこで滞水が起こるのか分からなかったが，これまでの感覚により，ち密度が一番高い層かと当りを付けた．そして，降雨後に滞水がみられたら呼んで欲しいと依頼した．

10 月になり「滞水したので見に来て欲しい」と連絡があって調査をした．滞水層は，スコップで掘るまでもなく，表層から 15 cm 程度の深さで厚さ 1 cm にも満たない薄層であった．移植小手で突ついてみると，少しだけ黒変した柔らかい層であり，これまでの感覚では不透水層は硬い耕盤と先入観があったので驚いた．水稲担当者に聞いたところ，毎年，代掻きをして床作りをする部分ではないかと説明を受けた．この薄層は，排水対策にも影響していると考えられた．これまで野菜畑の排水対策は，サブソイラーなどにより硬い耕盤を破砕して改善を図る認識であったが，この薄層は柔らかいがゆえに，今までとは違った対策の必要がと思われる．

この一件を機に改めて，自分の未熟さと水田土壌の奥深さに思いをはせて，専門家と交流を図る重要性を痛感し，土壌物理学会に参加させて頂くこととした．

アレイアンテナ地中レーダーによる土中水分移動過程の可視化について

斎藤広隆
東京農工大学大学院農学研究院

キーワード: 地中レーダー（GPR），アレイアンテナ，不飽和水分移動，電磁波速度

そもそも土の水分移動特性の空間的ばらつきが水分移動にあたえる影響を知りたく，物理探査技術を利用し，広域を高速でかつ非破壊 · 非侵襲で不飽和水分移動過程を測定する方法に興味を持った．物理探査技術を水文過程に応用する学問分野はハイドロジオフィジックスと呼ばれ，1990 年代から現在にかけて多くの研究が進められている．物理探査方法の利点は，広域の地下情報を比較的短時間に非破壊かつ非侵襲で取得することができることである．多くの物理探査技術のなかで，ここでは土の比誘電率と水分量との関係を利用する地中レーダー（Ground Penetrating Radar または GPR）に着目した．GPR には，坑井間 GPR，地表型 GPR など様々な種類が存在するが，多くは送信アンテナより高周波のパルス電磁波を放射し，反射 · 屈折などして土中を伝播してきた電磁波を受信アンテナによって捉え，地下構造の可視化や土中水分量を推定し（Huisman et al., 2003 など），その結果を用いて土の水分移動パラメータの推定などに利用する（例えば，Léger et al., 2014）．ここでは，使いやすさなどの観点から送受信アンテナを地表に置く，地表型 GPR を対象とする．

一般に，地表型 GPR では，送受信アンテナの間隔（オフセット）を一定に保ちながらアンテナ位置を変え，コモンオフセットギャザー（COG）を収集し，地下構造を可視化する．一方，土中水分量の定量的評価に不可欠な，電磁波伝播速度を決定するためには，オフセットを変えながらマルチオフセットギャザー（MOG）を収集することが有効である．近年，土壌水分マップのような，面的，空間的な情報を取得すること以外に，浸潤などの動的な現象の測定に GPR を用いることへの注目が集まっている．浸潤過程への応用としては，Vellidis et al. (1990) が，地表型 GPR を用いて砂質土中の浸潤前線の移動を可視化した先駆的な研究があげられる．ここでは既知の埋設物からの反射を用いて平均電磁波伝播速度を求め，湿潤前線の深さを推定した．以降多くの研究で，既知の反射点を利用しているが（Saintenoy et al., 2008 など），フィールドで行う調査では，この方法の適用には限界がある．

土中の浸透過程の測定において，既知の反射点を用いない場合，湿潤前線の移動速度に比べて十分に速い時間間隔で MOG を収集する必要がある．しかし，一般的な地表型 GPR では，オフセットごとにアンテナを移動させ，MOG の収集には時間がかかる．MOG の収集手順を短縮するために，複数の送受信アンテナを使用する方法もあるが（Pan et al., 2012 など），アンテナの数が限られるため，標準的な速度解析に用いることには限界がある．Mangel et al. (2012) および Manget et al. (2020) は，数十の異なるオフセットからなる MOG を数秒程度で取得できるシステムを開発し，砂箱内の浸潤前線を追跡した．この方法は実験室では有効だが，大掛かりなシステムが必要で，フィールドでの測定には不向きである．

近年，10 前後の送信アンテナと 10 前後の受信アンテナから構成され，十数ミリ秒間隔と非常に高速で MOG の収集を可能にするアレイアンテナ GPR が開発された（例えば，Eide, et al., 2014）．送受信アンテナの組み合わせを電気的に切替えて，最小限の労力で地下をスキャンし，地下の三次元画像を高速で得ることができ，インフラ検査（Eide and Hjelmstad, 2002 など）などに用いられてきた．このような GPR システムを一定の場所に設置することで，浸潤などの動的な地下過程を測定することができると考えた．Iwasaki et al. (2016) および Saito et al. (2021) は砂丘砂を用いた浸潤実験を実施し，アレイアンテナ GPR を用いて約 1.5 秒ごとに MOG を収集し，連続的に下降する湿潤前線の位置を連続的に推定した．一方，アレイ GPR システムによる MOG は，通常の MOG と比べて空間的解像度が低く，速度解析への応用例が少ない．今後，さらなる研究が必要であり，MOG の補間方法の開発などに取り組んでいきたい．

引用文献

Eide and Hjelmstad (2002): Proceedings of GPR 2002, 192–196.

Eide et al. (2014): Proceedings of 15th International Conference on Ground Penetrating Radar, 785–790.

Huisman et al. (2003): Vadose Zone Journal, 2(4), 476–491.

Iwasaki et al. (2016): Agricultural and Environmental Letters, 1: 160002.

Léger et al. (2014): Water Resources Research, 50(7): 5459–5474.

Mangel et al. (2012): Hydrology and Earth System Sciences, 16: 4009–4022.

Mangel et al. (2020): Hydrology and Earth System Sciences, 24: 159–167.

Pan et al. (2012): Hydrology and Earth System Sciences, 16: 4361–4372.

Saintenoy et al. (2008): Vadose Zone Journal, 7(1): 208–214.

Saito et al. (2021): Geophysics, 86(5): WB109–WB117.

Vellidis et al. (1990): Transactions of the ASAE, 33(6): 1867–1874.

ダイズやムギの深度別根密度調査の方法

坂口　敦
山口大学大学院創成科学研究科農学系学域

キーワード: 根密度分布，ダイズ，ムギ

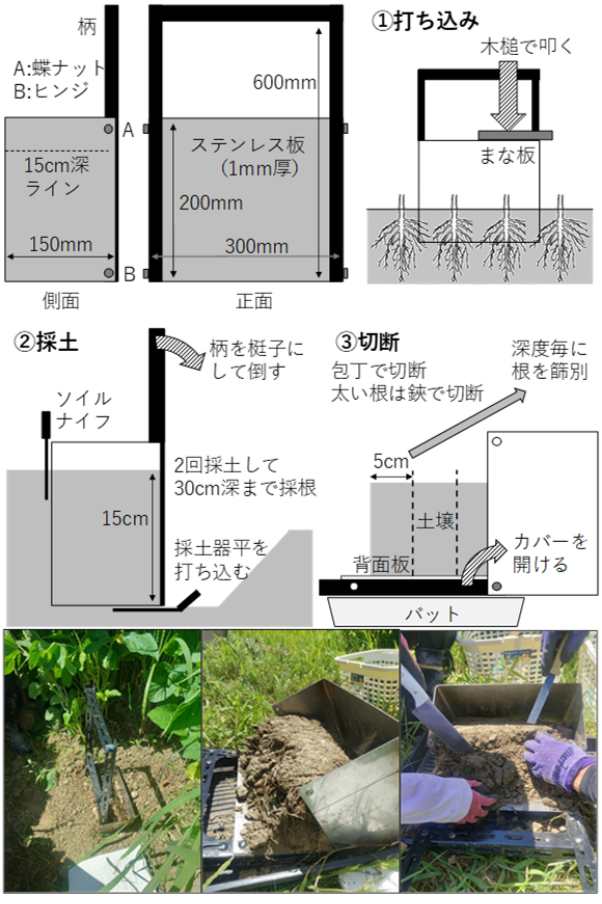
途上国の干ばつによる飢餓に関心を寄せていた私は畑地の灌漑効率，降雨の有効利用，節水灌漑などに興味を持って土壌物理学を志しました．現在は根域土壌の乾燥や過湿と作物の水ストレス状態の関係，水ストレス状態の把握方法，暗渠排水のシミュレーション，露地栽培野菜の点滴灌漑のための気象観測に基づく自動灌漑装置および複数地点土壌水分観測に基づく自動灌漑装置の開発と両者の比較を行っております．

その過程で，根の分布を調べる必要が生じました．皆様も 10 cm 深，20 cm 深，30 cm 深と根があり得る深度の土壌の含水率や吸引圧を深度別に経時観測している事と思いますが，作物の水ストレス状態と土壌水分状態を比較するためには作物の根域を把握する必要があります．また，任意深度での根の分布と根の吸水量が一致するわけではありませんが，多くの根が分布する深度ほど多くの吸水が行われると大雑把に考えた場合，深度別の根の密度分布データが必要となります．最近は HYDRUS などの利用者も増えていますが，作物による土壌水分の吸水と蒸散過程を再現するためには根の分布割合を深度別に入力する必要があります．

根の専門誌として有名な「根の研究」では，特に森田ら（2013）が根系調査方法を体系的に纏めております．当研究及び金井ら（2017）では根系調査方法の標準化を目的として，改良土壌断面法が提案されています．本手法は塹壕を掘り土壌断面に採土用円筒を定間隔で面的に打ち込む手法であり，円筒による採土時に根を得る事が出来る為，その後に根長や根重を実測する事ができます．

しかし，塹壕を掘り土壌断面を設けるには土が乾いている必要があるため，生育初期が梅雨や秋雨にあたるダイズやムギの湿害対策を目的とした根系調査には不向きです．土が乾いている時期であっても，塹壕を掘るのは体力的負担と撹乱面積が広い点から，根の生長に伴う深度別根密度の経時観測には向いていないものと思われます．村上（2003）の根系調査方法ではステンレス板を鉛直方向および水平方向に打ち込み，土壌を深さ 10 cm× 幅 10 cm× 奥行 10 cm の立方体として採土して内部に含まれる根を採取しており，畝や耕起深度以浅においては土壌が柔らかい為に根が採土用円筒で切断されにくく円筒内部に入ってゆき難い点を考えると良い採根方法と考えられますが，採土箇所周囲の掘削作業と撹乱面積の点では改良土壌断面法と同様であります．

そこで，当方がダイズやムギの経時的な深度別根密度調査用に自作し，6 年間使い続けている器具を紹介致します．経時観測の為に体力的に楽であり，撹乱面積も狭い事を重視しました．



引用文献

金井ら (2017): 根の研究, 26: 25–33.
村上 (2003): 根系調査法 v1.3,
http://www7b.biglobe.ne.jp/~kufukufu/manual.pdf
森田ら (2013): 根の研究, 22: 9–17.

風蝕の予測と抑制のために

佐藤泰一郎
高知大学農林海洋科学部

キーワード: 風蝕，保全耕法，風蝕予測

20 年以上前に ISTRO 2000 の会議前に参加したツアーで，米国中西部をバスで約 3000 km を旅行した．このとき，移動中に 1930 年代に発生した “Dust bowel” による災害の説明が USDA-ARS の研究者からあり，この言葉がその後何度も繰り返された．Dust bowel は，中西部大平原地帯で発生した大規模な砂嵐であり，耕耘された農地の表土が強い風によって侵蝕された土埃を表現したものである．この原因を作ったのは，農地を過度に耕耘した農民にあり，表土損失による肥沃度が低下して離農する被害を受けたのも農民であった．そして，風蝕を抑制する農地保全耕法についての知見を得たが，乾燥地特有の問題として考えていた（Bergtold et al., 2020）．

当時，私は中四国の有志によるセミナに参加し Lal et al.（1997）編集の土壌劣化について勉強会を行っていた．しかし，自分自身の興味は，土壌劣化問題の中の固結化にあり，侵蝕は水蝕が主で風蝕にはほとんど興味を示さずに過ぎてしまった．ところが，その後，学校の校庭で発生する土埃が，周辺住宅の生活に影響を与えているために対策方法を考えてほしいとの依頼を受け，現地に行った．そこでは，広い校庭の向こうには，住宅と農地が混在していた．そのときに，校庭の次は，農地からの土埃の問題が訴えられるのではないかと考えた．これが，風蝕について研究を始めるきっかけになった．

一般に風蝕は，水蝕とともに表土損失による農地の肥沃度低下，作物の生育障害，水路を含む農業施設の損傷や管理負担増加の問題が発生する．加えて，住宅地・商業地・工業地と農地の混在が進む地域では，風蝕による地域環境や生活環境の悪化，健康被害が懸念される．そこで，ホリーの “侵食”（岡村・春山訳, 1983）を読み進めることで，風による土粒子の運搬には転動（岡村・春山は “匍行” と訳している），跳躍，浮遊に分類され，粒径によって運搬形態が異なることを学んだ．一方では，風蝕の研究について文献調査を行った．

風蝕に関する研究は，モニタリングにより実態把握が進められながら，1960 年代に年間の土壌損失を評価する経験的な風食方程式（WEQ）が Chepil（1959）によって提案され，Woodruff and Siddoway（1965）により風洞実験と現地での計測により，確固としたものになった．その後，コンピュータの使用により，WEQ が高度化して利用範囲を広げながら（Blanco-Canqui and Lal., 2008a; Fisher and Skidmore, 1970），改良を加えながら，日単位での土壌損失が推定できる改良風蝕方程式（RWEQ）が Fryrear et al.（1998）によって提案された．しかし，WEQ，RWEQ は米国中西部大平原地帯を対象としたものであり，利用範囲が限られていた．そのため，適応範囲が広く，精度の高い風蝕予測システム（WEPS）モデル

が USDA-ARS によって 1985 年に開発された（Hagen, 1991）.

WEPS は，モジュール方式を採用し，物理量保存の関係を組み込むプログラムである．このプログラムは，サイエンスモデル中心として，必要情報をユーザーインターフェースに入力し，データベースを利用して計算を行う．WEPS の特徴は，サイエンスモデルにサブモデルを組み込むことで，発展性を含めた利用価値の高い風食予測のモデルになっている．そして，1 回の強風に対する土壌損失や PM10 に代表される微小粒子径の風蝕を求めることができる SWEEP などにも発展している．

日本における風蝕の研究は，地域の課題として調査 · 実験 · 観測が行われ改善法が提案されてものが主であったが，屋代ら（2019）により現地観測結果と WEPS を使った数値との比較が行われるようになった．しかし，わが国は，気候 · 風土，広大な農地面積，大型機械による農耕，栽培管理など米国とは異なる．そのため，WEPS をわが国の風蝕予測に適用するためには，多くの研究成果をデータベースに蓄積して充実をはかるばかりでなく，サイエンスモデル，サブモデルの内容について精査，検討する必要性がある．そして，わが国に適応可能な風蝕予測と抑制方法が開発されることが望まれる．

引用文献

Bergtold et al. (2020): In conservation tillage systems in the southeast, pp. 9–18. SARE.

Blanco-Canqui and Lal (2008): In Principles of Soil Conservation and Management, pp. 1–19. Springer, Netherlands.

Chepil (1959): Wind erodibility of farm fields. J. Soil. Water Conserv., 14: 214–219.

Fisher and Skidmore (1970): WEROS: a Fortran IV Program to solve the wind–erosion equation. USDA-ARS 41–174.

Fryrear et al. (1998): Revised wind erosion equation (RWEQ). Wind Erosion and Water Conservation Research Unit, USDA-ARS, Southern Plains Area Cropping Systems Research Laboratory. Technical Bulletin 1.

Hagen (1991): A wind erosion prediction system to meet user needs. J. Soil Water Conserv., 46, 106–111.

岡村 · 春山（訳） (1983): ミロス · ホリー『侵食 — 理論と環境対策 —』. 森北出版, 東京.

Woodruff and Siddoway (1965): A wind erosion equation. Soil Sci. Soc. Am. J., 29: 602–608.

屋代ら（2019): 農業農村工学会大会講演会講演要旨集: 337–338.

多孔質体中の浸潤現象に対する重力の影響

佐藤直人, 丸尾裕一, 野川健人, 登尾浩助
明治大学農学部

キーワード: 宇宙農業, 水分移動, 浸潤, 低重力

私がこのテーマに興味を持ったのは，当時，明治大学農学部の 2 年生であった私が，登尾教授の研究室紹介を聞いていた時であった．登尾教授は，教授の研究室に在籍する学生の提案が宇宙航空研究開発機構（JAXA）の主催する「航空機による学生無重力実験コンテスト」に採択され，パラボリックフライトによる微小重力下において多孔質体中の水分挙動を観察する実験を行う予定であることを紹介した．この紹介に興味を持った私は登尾教授の研究室に入室し，研究を引き継ぐこととなった．

研究室へ入室後に文献を調べてみると，1990 年代以降に宇宙ステーションにおける作物栽培実験が行われるようになってから，低重力下における多孔質体中の水分挙動の制御の困難さが指摘されるようになったことがわかった．たとえば 1996 年に宇宙ステーション Mir で行われた小麦の栽培実験ではポンプと電磁弁による給水システムを採用していたが，微小重力下で多孔質体が吸水せず，自動の水分量制御が不可能になった（Bingham et al., 2000）．また，国際宇宙ステーション ISS で行われた植物栽培実験 VEGGIE-01 においても多孔質培地が吸水せずに低水分状態となったためロメインレタスの発芽に失敗した事が報告されている（Massa et al., 2017）.

宇宙空間において多孔質培地が吸水し難くなったことから，低重力下では浸潤速度が低下する可能性がある．Yendler et al.（1996）が粒径 1.5 mm のガラスビーズを用いて浸潤実験を実施したところ，その浸潤速度は理論値と比較して 68 % も低下した（Jones and Or, 1999）．また Mohamed et al.（2002）は粒径 0.2 mm のガラスビーズを用いて浸潤実験を実施し，浸潤の初期では浸潤速度の理論値と実測値が一致するものの，浸潤の進行に伴って実測値が理論値よりも小さくなることを報告した．したがって，地上で観測された保水力や透水係数が微小重力下で適用できない可能性がある（Mohamed et al., 2002）.

一方で，Heinse et al.（2007）は，粒径 0.25–1 mm の多孔質体中の水分分布を低重力下において観察し，水分分布の変化が理論値と一致したと報告しており，現在の不飽和多孔質体中の水分移動理論が低重力下において適用可能であるかどうかについては議論が分かれている．

不飽和多孔質体中の水分移動は，粘性，表面張力，接触角などの浸潤溶液の物性と，固相成分や間隙形状などの固相の物理特性に支配される．我々の研究グループはこれらの要因に対する重力の影響を明らかにすることを目的としてパラボリックフライトや落下塔による低重力実験を実施した．

まず，浸潤溶液の物性に対する重力の影響について，

水の表面張力を最大泡圧法により，接触角を液滴法により測定した．その結果，水の表面張力に重力依存性は無く，接触角についても液滴半径が 1 mm 以下の小さい液滴では重力に依存しないことが明らかになった（長沼ら, 2020）．また，空隙に水分が保持される様子を観察した実験では，微小重力下で水分は粒子間に液架橋を形成するように保持され，粒子の凸部を移動し難くなることが明らかになった（Nagura et al., 2019）．その後，浸潤の進行方向に向かって径が大きくなるような形状の間隙が微小重力下において浸潤を阻害することを明らかにし（丸尾ら, 2019），低重力下において浸潤速度が低下する場合と，低下せず理論値と一致する場合があることが明らかになってきている．

多孔質体中の水分挙動に対する重力の影響を明らかにすることは，月や火星などの低重力環境で実現が期待される宇宙農業における栽培培地の設計に不可欠である．ところが，宇宙ステーションの利用や航空機実験の実施等の低重力実験の機会は非常に限られたものであり，このことが重力依存性の解明を遅らせている原因の一つである．そこで我々は，サンプルを無作為に回転させることにより模擬微小重力を作出する 3D クリノスタットの浸潤実験に対する適用可能性などについても検討を行なっている（佐藤ら, 2019）．今後より多くの低重力実験を行うことでデータを蓄積し，多孔質体中の浸潤現象に対して重力が果たす役割を明らかにしていきたい．

引用文献

Bingham et al. (2000): Acta Astronautica, 47(11): 839–848.

Heinse et al. (2007): Vadose Zone J., 6(4): 713–724.

Jones and Or. (1999): Water Resour. Res., 35(4): 929–942.

丸尾ら (2019): Int. J. Microgravity Sci. Appl., 36(2): 360206.

Massa et al. (2017): Open Agriculture, 2(1): 33–41.

Mohamed et al. (2002): J. Geotech. Geoenviron. Eng., 128(10): 814–823.

長沼ら (2020): 明治大学農学部研究報告, 69(2): 73–79.

Nagura et al. (2019): Adv. Space Res., 63(1): 589–597.

佐藤ら (2019): 明治大学農学部研究報告, 69(1): 33–39.

Yendler et al. (1996): Adv. Space Res., 18(4/5): 233–237.

これまでの研究活動を振り返って

澤本卓治

酪農学園大学

キーワード: 物質収支，物質循環，温室効果ガス

土壌物理にはじめて触れたのは大学院修士課程であった．当時，畑地土壌からの一酸化二窒素（N_2O）の発生をテーマに研究していたが，土壌中のガス濃度勾配とガス拡散係数でフラックスを計算できることや物質収支といった物理的手法で解析を進め，考察を深めることをできた（澤本ら, 2000; Kusa et al., 2010）．この経験は私の研究の基盤をつくってくれたと感じている．

大学院を修了した後は，畑地からの N_2O 発生予測モデルの検討（澤本, 2005），排水中に溶存する N_2O の動態（Sawamoto et al., 2005），家畜排せつ物貯留から発生するメタン（CH_4）の特徴（Sawamoto et al., 2016）といった温室効果ガスに関連する研究を行ってきた．さらに，除雪が土壌凍結深と土壌物理性に与える影響（澤本ら, 2019）や大面積農場で土壌有機物含量を高める要因について探るようなことにも取り組んできた（石田ら, 2021）．これらの研究は土壌物理の中心的テーマではないかもしれないが，土壌物理に多かれ少なかれ関係があると考えている．土壌物理学会に参加し，最先端の研究や学際的な研究に触れることから多くの刺激をいただいている．

上記のようにこれまでの研究テーマを書いてみると，手広く多くの研究成果が出ているように見えてしまうがそうではない．なんとか細々と研究を続けているというのが実状である．勤務している大学は教育を軸としており，この 19 年間で研究室に所属した大学院生はわずか 1 名と寂しいものである．それでも，意欲のある学生と卒論研究を一緒に取り組むことで，彼らの成長と研究成果を目指すこと，すなわち，「教育と研究の両立」を目指して，日々悪戦苦闘している．

引用文献

石田ら (2021): 酪農学園大学紀要, 46: 21–31.

Kusa et al. (2010): Soil Sci. Plant Nutr., 56: 186–199.

澤本 (2005): 畑土壌からの N_2O 排出予測 — DNDC モデルの適用と改良 —. 波多野隆介 · 犬伏和之編 続 · 環境負荷を予測する, pp. 221–242. 博友社, 東京.

澤本ら (2000): 土肥誌, 71: 659–665.

Sawamoto et al. (2005): Geophys. Res. Lett., 32: L03403.

Sawamoto et al. (2016): Anim. Sci. J., 87: 827–834.

澤本ら (2019): 酪農学園大学紀要, 44: 91–102.

森林での極端に大きな出水時の栄養塩動態

篠宮佳樹

森林研究 · 整備機構 森林総合研究所

キーワード: 森林，渓流水，全窒素，溶存態窒素

土壌物理学会への入会がいつだったかは明確には覚えていないのだけれど，おそらく 30 年くらい前だと思う．森林土壌の透水性，保水性が卒論，修論のテーマだった関係で，入会したと思う．卒業して，森林総合研究所に就職できた．しかし，何を研究すればよいか定まらず，本当に路頭に迷っていた．高知県高知市にある四国支所に転勤になった際，渓流水質に関連する仕事が配属先

の業務とも合致し，自分自身も興味をもって取り組めそうであった．御存じの通り，四国太平洋側地域は年雨量 2,000 mm を超す多雨が特徴だ．総雨量 100 mm を超す降雨イベントは毎年 2，3 度は起こっていた．ただし，総雨量 100 mm を超す降雨イベントの渓流水質の観測や解析は Muraoka and Hirata（1988），大類ら（1992）に存在し，渓流水質の形成機構も京都大が先行していた（勝山ら, 2004 など）．海外では台風が渓流水質に及ぼす影響が検討されていたが（Tsai et al., 2009），総雨量 100 mm を少し超える規模で，大雨時の渓流水質に関する海外の研究は思っていたほど存在しなかった．河川や湖沼の水質汚濁を防止するため，窒素やリンなどの原単位が水環境分野（工学部の衛生工学分野）で求められていた．國松 · 須戸（1997）により森林の原単位の問題点として，出水時の流出負荷量を正確に把握することの重要性が指摘されていたものの，取り組みは進んでいなかった．活路を見出せそうな気がした．さらに，地球温暖化で台風が大型化し，大きな降雨イベントの発生頻度が上昇する可能性が指摘されていた（鬼頭, 2005）．大きな降雨イベント時の渓流水の採取で失敗を繰り返しながらも，将来増えるであろう極端に大きな出水は，栄養塩の動態にどのような影響を及ぼすか，研究できないかと思うようになった．

物事は本当に自分の思うようには進まない．このアイデイアで科研に応募し，運よく採択されたものの，転勤となった．当時の高知大学の大年先生のおかげで，（株）四電技術コンサルタントの協力が得られた．その結果，2011 年 7 月に総雨量 742 mm の降雨イベントの出水（以降，“極端出水” と記す）の渓流水の採取に成功した．この降雨イベントで同じ高知県の魚梁瀬では日雨量 851.5 mm を観測した．これは全国のアメダスの日雨量で歴代 2 位の記録である．分析，解析を進めると，総雨量 300 mm 以下の降雨イベントでは 1 回の降雨イベントの流出負荷量について，TN（全窒素）に占める溶存態窒素の割合は 77 % 以上あったのに対し，“極端出水” になると 5 % と，“極端出水” の窒素流出は懸濁態が圧倒的になることがわかった（篠宮 · 横山, 2019）．極端に大きな出水が発生した場合，窒素については溶存態より懸濁態の影響のほうが大きそうである．そうなると，これまでは溶存態のみ着目していれば良かったが，懸濁態にも目を向けておく必要があることが示唆される．ただし，高知県の森林流域で得られた結果が国内のどこの森林流域にもあてはまるかまだ保証はない．このことも今後の課題だと思っている．

引用文献

勝山ら (2004): 日本林学会誌, 86: 27–36.
鬼頭 (2005): 科学, 75: 1155–1158.
國松 · 須戸 (1997): 水環境学会誌, 20: 810–815.
Muraoka and Hirata (1988): Journal of Hydrology, 102: 235–253.
大類ら (1992): 日本林学会誌, 74: 203–212.
篠宮 · 横山 (2019): 水環境学会誌, 42: 219–229.
Tsai et al. (2009): Journal of Hydrology, 378: 290–298.

草原の生物多様性保全に向けた土壌物理学的観点からの取り組み

小路　敦
農研機構農業環境研究部門

キーワード: 保水性，通気性，水文環境，生態的地位，半自然草地

物心ついた頃，自宅トイレの窓から見える隣家の屋根瓦の一部が苔むしていた．本来湿った場所に生えるコケが，このような乾燥した場所で生育していることが不思議でならなかった．今思い起こすと，これが自身の土壌物理学的発想のはじまりだったのかもしれない．

その後，猫の額ほどの自宅の花壇に様々な植物を植栽し，「土壌物理性の改善」に努めていたが，実際に「土壌物理学」を履修するのは，大学で農業土木学専攻課程に進んでからであった．このような学問分野の存在に，たいへん驚いたことを覚えている．卒論研究で高分子吸水材を用いた土壌物理性の改善に取り組んだ経験を活かして，大学院修士課程は植物生態学分野に進学し，森林を含む植生と土壌の物理性について，調査 · 研究を行った．その際，森林と草地との土壌物理性の大きな違いに気付き，草地土壌の特殊な保水性や通気性などの土壌物理環境が，草本植生から森林植生への遷移を抑制しているのではないかと考えるようになった．

修士課程修了後，研究職として採用され，「草地立地研究室」という研究室に本配属となり，森林と草地の土壌物理性の違いについて調査する機会を得た．その結果，ススキ草原やシバ草原など，半自然草地の土壌は森林土壌と比較して緻密であり，透水性が低いことを示した．草地から森林へと植生が遷移してゆくのに伴い，土壌が膨軟化するとともに透水性が増大し，表面流去水酒養型の池沼の湛水面積が減少するひとつの要因であることが示唆された（小路ら, 2004）．

また，北海道東部のウマの放牧地において土壌の物理性と植生とを調査する機会を得た．ここでは，半自然草地の土壌がウマの踏圧による圧縮を受け，通気性や透水性が著しく低下していた．放牧により湿性な土壌環境が創出されることで，湿潤な土壌を好む草本植物が生育可能となり，美しい花々の咲き乱れる半自然草地が維持されているであろうことを示した（Shoji et al., 2011）．

さらに，熊本県阿蘇地方の半自然草地では，放牧ならびに火入れの中止が土壌の物理性と植生に及ぼす影響について，調査を行った．その結果，放牧により，固相率ならびに土壌硬度が増大するとともに，飽和透水係数ならびに気相率が低下するのに対し，火入れにより，有効水分量（厳密には有効水分を保持する土壌の間隙量）が

低下することを示し，放牧ならびに火入れによって様々な草原性植物の生育が可能となり，多様な植物相が維持されているであろうことを示した（Shoji, 2014）．しかし，上述の自身の調査・研究では，草地の特殊な土壌環境が森林への植生遷移を妨げていることまでは言及することができなかった．

これらの調査とちょうど時期を同じくして，英国のSilvertownらにより，半自然草地土壌の水文環境によって規定される生態的地位が多様化することで，草地における植物の種の多様性が維持されるといった内容の論文がNatureに公表された（Silvertown et al., 1999）．土壌物理学的な観点からの生物多様性についての研究が，世界的な一流紙に掲載されたことに驚いたのは言うまでもなく，個体群生態学の教科書の著者などとして有名なSilvertown氏が，群集生態学の研究成果を公表したことにもたいへん驚いた．一方で，自身が進めてきた土壌物理性と植生との関連解明に関する研究の方向性に大きな誤りはなく，世界的な研究と関連性のあることに自信を深めることができた．

その後，日本において急速に減少している半自然草地の保全や植生修復という観点から，土壌物理性や放牧，火入れが植生に及ぼす効果だけではなく，土壌の化学性や刈り払いが植生に及ぼす効果についても検討を始めた．前述の北海道東部における半自然草地では，放牧地内にフェンスで囲った禁牧区を設けるとともに，施肥区（N, P, 双方）ならびに刈り払い区（7月刈り，9月刈り）を設け，放牧，施肥，刈り払いの効果を検討した．その結果，禁牧試験開始後わずか2ケ月で土壌の物理的特性や植物群落内の光環境が変化したことなどから，放牧の中止後，比較的早い時期に草原性の植物にとって好ましくない物理環境となる可能性が示された（小路, 2001）．また，放牧，刈り払いとも，イネ科植物の優占度低下と保全対象種であるヒオウギアヤメの相対優占度向上に効果的である一方，施肥によってイネ科植物の優占度が極端に増大することから，施肥は，草原性植物の多様性維持には逆効果であると考えられた（小路, 2002）．

熊本県阿蘇地方の半自然草地では，草原性希少植物が生育する土壌の化学的特性について調査した．その結果，春先の火入れ終了後，急速に成長する種（ミチノクフクジュソウ，サクラソウ）や，夏季に優占種であるススキを上回る高さまで花茎を伸ばし多くの花を咲かせる種（ツクシマツモト）など，急速な成長のために多くの養分を必要とすると考えられる種群の生育地の土壌は，これらの種群が生育しない土壌と比較して，塩基に富む肥沃な土壌であった（小路, 2010）．このような結果から，半自然草地の保全あるいは植生修復には，土壌の物理性，化学性双方の観点からの調査やデータの解析が必要であると痛感した．

現在，研究推進業務専属のため，これまでのような現地調査に基づく試験研究に携わることはできないが，研究現場に戻った際には，密かに（？）温めている企みを，草原を彩る花々のように，思う存分開花させたいと考えている．

引用文献

小路 (2001): 国際景観生態学会日本支部会報, 6 (1): 63–67.
小路 (2002): 国際景観生態学会日本支部会報, 7(2): 35–40.
小路ら (2004): 農業土木学会誌, 72: 33–36.
小路 (2010): 水土の知, 78: 563–566.
Shoji et al. (2011): Grassland Science, 57: 1–8.
Shoji et al. (2014): Grassland Science, 60: 15–23.
Silvertown et al. (1999): Nature, 400: 61–63.

不均一流下での土壌微生物の活動と物質循環

末継　淳
秋田県立大学 生物資源科学部

キーワード: 不均一流，土壌微生物，物質循環

私は環境系学科で教育を受け，大学院から土壌物理を本格的に学んだため，土壌物理学の裾野を広げる研究を志しました．なかでも，土壌中で複雑に発展する不均一流は土壌物理学の難問ですが，私は先達の知見を踏まえ，不均一流と微生物の関係を探ってみようと考えました．

不均一流を構成する流れには，亀裂中などを高速で移動するバイパス流や，撥水性・乾燥密度のばらつきなどに起因するフィンガー流などがあります．これらの不均一流が土壌中で発達することで，平均含水比からは予想できないような微生物が活動し，物質循環に影響を与える可能性があります．このような現象は，古くから水道水の供給上の問題として注目され，病原性のある微生物の土壌亀裂中の移動などが研究されてきました．近年では，土壌断面調査による不均一流内外での微生物群集構造解析（Bundt et al., 2001）や，バイパス流を抑制することで微生物による油汚染浄化を促進する研究（Mori et al., 2013）などが行われています．また，不均一流への微生物の密集によるクォラムセンシング（菌体密度を微生物集団が検知することによる活動変化）に対する指摘（Morales et al., 2010）もされています．

上記のような研究成果の多くは，メタゲノム解析により実現しています．しかし，この解析手法はまだ草創期にあるため，データの解釈には注意が必要です．例えば，新型コロナウイルス感染症の流行でPCR（ポリメラーゼ連鎖反応）が検査法として注目を集めましたが，PCRの出発点となる遺伝子の人工合成物（プライマー）の純度は良くても95％程度で，大腸菌の生体内での遺伝子の純度（エラー率で約10億塩基につき1塩基）には遠く及びません．そのため，様々な研究者が生体内のエラーチェック機能を借用したり，PCRを用いずに高感度な塩基配列解析を行うなどして，精度を向上させています．

メタゲノム解析の精度上の課題に加え，不均一流の発

生条件をふまえた微生物活動や物質循環の予測モデル構築などは未解決の課題です．このような課題は農学・地球化学・衛生工学などにも関わるため，様々な形で関連研究が展開されていくものと考えられます．

引用文献

Bundt et al. (2001): Soil Biol. Biochem., 33: 729–738.
Morales et al. (2010): J. Hydrol., 393: 29–36.
Mori et al. (2013): Ecol. Eng., 183: 237–243.

ヘテロなコロイド輸送現象に向けて

杉本卓也
筑波大学生命環境系

キーワード: 流れ凝集，ヘテロ凝集，多価イオン，輸送

筑波大学生物資源学類にあって，数物系科目が好きだった私にとって，講義を担当していた足立泰久教授の研究室を志望するのは自然なことだった．しかし，いざ入るときになって，同じグループに着任して間もない小林幹佳准教授がいらっしゃることに気付いた．優秀な同期が皆，足立先生に師事するという中で，素直に疑問に思った私はお世話になっていた研究室の先輩方に相談し，先輩方の鶴の一声で小林先生に師事することを決めた．

研究室に入って足立先生，小林先生，研究室の同期たちと一緒に論文を読み始めた．まず，凝集体の沈降に関する論文を読んだ後に，粒子間の物理化学的相互作用を記述する DLVO 理論の限界について真正面から挑んだ Behrens らの論文（2000）を読んだ．彼らが用いた DLVO 相互作用の理論式，光散乱を用いた凝集速度の測定原理，それらをフルに活用した実験と理論の不整合に関する考察を同期たちと頭を悩ませつつ，小林先生にも説明を加えてもらいながら，徹底的に読み込んだ．そうこうするうちに，私の卒論テーマは，読み込んだ Behrens ら（2000）の追試とそこに流れの効果を加えた実験となった．

実験データを解析するための課題として，既存の流れ凝集の理論計算がコロイド粒子の帯電量が低いことを仮定した DLVO 相互作用力を使っており，帯電量の高い粒子を使った実験データには適用できないことがあった（van de Ven et al., 1977; Zeichner et al., 1977）．これは DLVO 理論の流れ凝集における検証が進んでいなかった要因の 1 つでもある．そこで，Behrens らが用いていたコロイド粒子の帯電量が大きい場合にも使える DLVO 相互作用の理論式を用いた数値計算を実装して，流れ場中の同種粒子同士のホモ凝集の実験データと定量的に比較し，流れが強くなると電気的な斥力の影響が消失する塩濃度条件（臨界凝集濃度）が高くなるという実験結果を説明することができた（Sugimoto et al., 2014）．同様の計算を異なる粒子同士のヘテロ凝集にも適用し（Sugimoto et al., 2015），その結果を博士課程 1 年の時に欧州コロイド学会で発表した．ここに，Behrens et al.（2000）の論文を出した Borkovec 研究室で講師をしていた Gregor Trefalt さんが聞きにきてくれて，私の研究を好きだといってくれたことが記憶に残っている．学振 DC1 の支援もあって，博士 2 年のときには小林先生の紹介で Borkovec 研究室に滞在できることになり，Gregor さんと一緒に仕事をできたことは幸運だった．テーマは，流れのないブラウン運動によって凝集する場合の，多価イオンやリン酸イオンといった吸着性イオンの存在下におけるヘテロ凝集であった．特に，異符号に帯電した粒子の一方がイオンの過剰吸着で電荷の符合が反転する際に正味で同符号に帯電した粒子間の反発的なヘテロ凝集を実験で測定し，DLVO 理論に基づいて解析するというものだった．実験を手伝ってくれた先輩と協力し研究を進め，電気泳動で測定した帯電量を計算に用いると，DLVO 理論に基づいて実験データをよく説明できることを示すことができた（Cao et al., 2017）．

平行してヘテロ凝集で使ったものと同じ粒子を使い，価数が同じで異なるイオン種が凝集に与える影響に関する研究を進めた．測定した帯電量を用いると，異なるイオン種でも臨界凝集濃度におけるイオン強度（臨界凝集イオン強度）と帯電量の関係が DLVO 理論の予測と一致するという結果が得られた（Sugimoto et al., 2018）．この結果を発展させ，ヘテロ凝集について対応する理論式を導出し，ヘテロ凝集では臨界凝集イオン強度と凝集に関わる各粒子の帯電量の積の関係が DLVO 理論の予測と良好に一致することを示した（Sugimoto et al., 2020）．

学位取得後は，東大地水研の西村先生と濱本先生の元で学振 PD としてお世話になった．自由に研究させてもらいつつ，コロイドとナノバブル共存系でのコロイド輸送の研究に取り組んだ（Sugimoto et al,. 2021）．これまで単一のコロイドの輸送研究が多かった中で，共存するコロイドとナノバブルを区別して計数できる共振式質量分析計を活用し，両者を区別して測定したコロイド輸送研究という，ヘテロなコロイド輸送研究への展開の第一歩を踏み出せたのではと考えている．この期間にスイス・ローザンヌ大学にて，マイクロ流路を活用した研究に取り組む機会をいただき，そこで取り組んだ内容を元にして，現在実験系の設置や研究の立ち上げに奮闘している．

幸いにも学振 PD 終了間際に，2021 年 1 月より母校に戻ることができた．今後はヘテロなコロイド輸送の理解に向けて，着実に研究を進めていきたい．これまでお世話になった（議論やご助言をいただいた）先生方や同僚，先輩や後輩に，この場を借りて改めて感謝申し上げます．今後ともご指導ご鞭撻のほどお願いいたします．

引用文献

Behrens et al. (2000): Langmuir, 16: 2566–2575.

Cao et al. (2017): Phys. Chem. Chem. Phys., 19: 15160–15171.
Sugimoto et al. (2014): J. App. Mech., JSCE, 70: I_475–I_482.
Sugimoto et al. (2015): Theo. App. Mech. Japan, 63: 133–145.
Sugimoto et al. (2018): J. Coll. Interf. Sci., 524: 456–464.
Sugimoto et al. (2020): Colloids Surf. A, 603: 125234.
Sugimoto et al. (2021): J. Cont. Hyd., 242: 103854.
van de Ven and Mason (1977): Coll. Poly. Sci., 255: 468–479.
Zeichner and Schowalter (1977): AIChE Journal, 23: 243–254.

北陸地方の粘土質圃場における懸濁物質の暗渠流出

鈴木克拓
農研機構 中日本農業研究センター

キーワード: 粘土質土壌，水田転換畑，粗孔隙，コロイド担体輸送，暗渠流出

私が粘土質圃場における懸濁物質の暗渠流出に関わることになったのは，21 年前に農環研で，当時問題だった環境ホルモンの動態に関わるプロジェクトにおいて難水溶性物質のコロイド担体輸送（Colloid-facilitated transport）を扱ったことに始まる．その後，2003 年から転換畑におけるリンの暗渠流出の実態を農研機構 中央農研 北陸研究センター（当時）で測定することになり，農業土木分野を中心に，同センターの方々には大変お世話になった．2009 年に，ついに自らがこの地に異動することになった．

懸濁態での環境負荷物質の土層内移動については，欧米を中心に関心が向けられ，リン，重金属，難水溶性物質などの移動における重要性が指摘されてきた（de Jonge et al., 2004）．北陸地方に広く分布する粘土質土壌では，土壌マトリクスの透水性が低いため，水田を畑利用する場合は，暗渠の埋め戻し部や乾燥に伴って生成する亀裂等の粗孔隙を通じて，懸濁物質や懸濁態リンが土層で濾別されることなく暗渠流出する（鈴木ら, 2005）．これまでの転換畑の作物は大豆や麦類が多かったが，近年，政府が水田への園芸作物の導入を推進している（農林水産省, 2021）ことから，施肥量の増加などにより，養分の暗渠流出がさらに懸念される時代に入りつつある．

私が当地に赴任してから，世の中の情勢も当拠点の状況も変わったが，この地方の粘土質土壌が抱える本質的問題は変わらない．当地では自ら作物栽培をすることがあり，越冬後の干ばつによる大麦の収量低下（鈴木ら, 2016）や，高橋ら（2008）が指摘する播種後の少雨に因る大豆の発芽不良などのような，粘土質土壌特有の問題の一つである有効水分の少なさにも気付くことになった．

前述の通り，粘土質圃場における養分の暗渠流出の懸念が増しているが，加えて畑作物の生産性向上など，今後も当地方での土壌物理分野の貢献が重要と感じている．

引用文献

de Jonge et al. (2004): Vadose Zone Journal, 3: 321–325.
農林水産省（2021）: https://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/r2/pdf/zentaiban.pdf.
鈴木ら（2005）: 日本土壌肥料学雑誌, 76: 43–47.
鈴木ら（2016）: 日本土壌肥料学雑誌, 84: 422–429.
高橋ら（2008）: 日本土壌肥料学雑誌, 79: 1–7.

気候変動に伴う降雨パターンの変化が農地と作物に与える影響の評価と適応農法の確立に向けて

鈴木伸治
東京農業大学地域環境科学部

キーワード: 短時間強雨，連続無降雨日，浸潤速度，土壌侵食，水ストレス

筆者はこれまでに，気候変動が土壌凍結期の水分環境に及ぼす影響を解明する研究に参加する機会があり（広田, 2013），凍結を伴う寒冷地の農地土壌を対象に，数年間にわたる土壌水分の変化の特徴について検討した（鈴木ら, 2014; 鈴木ら, 2019）．これをきっかけに現在は，作物の栽培時期である春 ～ 夏 ～ 秋に焦点を移し，降雨パターンの変化が農地や作物に及ぼす影響に着目している．

我が国において，大雨や短時間強雨の頻度が増加傾向にある一方で，雨が降らない日も増加しており，降雨パターンの極端化が懸念されている（文部科学省 · 気象庁, 2020）．世界的にも今後，大雨と干ばつの頻度がそれぞれ増加する可能性があると改めて強調されるようになった（IPCC, 2021）．降雨強度が表層土壌の浸潤速度を超えると，傾斜がある農地では土壌中に浸透しきれなかった余剰な雨が流去するため，土壌侵食や水質負荷の流亡を引き起こす．土壌の移動が圃場内で収まる程度であっても，種子の移動などが生じ，生産者の悩みの種となっている．どの程度の降雨強度で表面流（およびそれに続く土壌侵食）が起こるのかについて，従来は，流出量や侵食量との比較で評価されていた．しかし，表面流（土壌侵食）の直接的な引き金となる表面湛水の発生（降雨強度が土壌の浸透能を超える瞬間）を直接観測する方法がなかった．そこで筆者らは，誘電土壌水分センサを組み合わせて表面水発生の観測を試みている（鈴木ら, 2018）．

土壌の浸潤速度 i（mm s^{-1}）は，吸水度 S（mm s$^{(-\frac{1}{2})}$）と飽和透水係数 k_s（mm s^{-1}），および時間 t（s）を用いて以下の式で表される（宮崎ら, 2005）．

$$i = \frac{1}{2} S t^{-\frac{1}{2}} + k_s \cdots \quad (1)$$

これによると，i は t の $-\frac{1}{2}$ 乗に比例する．つまり，時間の経過とともに浸潤速度は低下する．t が小さい浸潤初期では，k_s に比べて S の寄与が相対的に大きい．k_s が支配的なのであれば，粗間隙の割合や空間的な配列が大きく影響するであろう．さらに S は定数ではなく，実際には体積含水率と負の相関があるため，降雨によって土壌表面の水分量が増加すると，S は低下する．S および k_s をもとにした考え方としては，一定の降雨強度であれば，湛水が起こる時間（time to ponding）を表す式が提案されている（Parlange and Smith, 1976; Clothier et al.,1981; Perroux et al., 1981）．どの程度の降雨強度で地表面湛水や表面流出，あるいはそれに伴う土壌侵食が生じるのかを明らかにするためには，実際の雨水の浸潤や湛水の発生に対して，S と k_s について詳細に吟味し，それぞれの寄与の程度について明らかにする必要があると考えられる．

強度の大きい降雨が増えることによって，土壌内の溶質の移動形態の変化する可能性についても検討する必要もあるであろう．

一方で地表面湛水や表面流出に伴う土壌侵食は，雨滴の衝撃によって飛散・分散した土粒子が間隙の目詰まりを起こし（クラストの形成），透水性が低下することによって生じるためと説明されることが多い．クラストの形成による飽和透水係数の低下と関連付けられている．クラストが形成されない場合でも，上記のように降雨後の時間経過に伴って浸潤強度は低下するため，地表面湛水や表面流出に伴う土壌侵食に対して，クラストの形成が必要条件であるのか否かについても吟味が必要であると考えられる．

灌漑期間における無降雨日の増加は，作物の品質と収量の低下，あるいは畑地灌漑の頻度と用水量の増加を招く恐れがある．作物の生育と土壌水の関係は，栽培時期や土壌の条件，作物の種類やその年の天候等，影響する要因が多様であり，説明が複雑になりがちだが，生産者や市民の観点では，どの程度の連続した無降雨日数で作物がストレスを受けるのかという単純な疑問が生じるものと予想される．このような疑問に答えられるような取り組みが必要と考えられる．この問題は，これまでの畑地灌漑の研究の延長線上にある．作物が受ける水ストレスについて観測事例を蓄積するとともに，既往の成果の精査，整理と，気候変動を見据えた畑地灌漑研究の発展が望まれる．

短時間強雨と連続無降雨ともに，これらの長期予測には不確実性を含むものではあるが，営農レベルでは，雨水を土壌の表層で貯留するのではなく，下層での貯留を促し，さらに，作物根の根を下層に発達させることにより干害のリスクが低減できると考えられる．同時に，表面流出や土壌流亡を防ぐためにも，より積極的な雨水の浸透を促すことが望ましい．圃場整備レベルでは承水路の設置や，深耕あるいは心土破砕等の必要性がより一層高まると考えられる．短時間強雨に対する土壌の応答は，降雨強度が穏やかな場合とは大きく異なる．難易度は高くとも，1 時間よりも短い時間解像度での雨に対する観測や予測，評価が課題となろう．

引用文献

Clothier et al. (1981): Soil Science Society of America Journal, 45(2): 245–249.

広田（2013): 生物と気象, 13: F1–15.

IPCC (2021): Climate Change 2021. The Physical Science Basis. Cambridge University Press.

宮崎ら（2005): 土壌物理学, pp. 18–53. 朝倉書店, 東京.

文部科学省・気象庁（2020): 日本の気候変動 2020 ―大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書―（詳細版）.

Parlange et al. (1976): Canadian Journal of Soil Science, 56: 121–123.

Perroux et al. (1981): Soil Science Society of America Journal, 45(2): 237–240.

鈴木ら（2018): 2018 年度土壌物理学会大会講演要旨集, 106–107.

鈴木ら（2014): 土壌の物理性, 126: 51–62.

鈴木ら（2019): 土壌の物理性, 142: 5–11.

線形和水分保持関数からの不飽和透水係数計算法

関　勝寿

東洋大学自然科学研究室

キーワード: 水分保持，透水係数，線形和

本稿では Seki et al. (2021) を紹介する．水分特性モデルについてまとめた解説（関，2017）に対して，三重大学の取出さんから質問のメールをもらったことをきっかけとして議論が深まり，得られた知見をまとめて共著として Vadose Zone Journal に発表した論文である．

VG（van Genuchten）の水分保持関数の線形和によって複雑な水分保持関数をあらわす Durner モデルは広く用いられている．Durner モデルから Mualem 式による不飽和透水係数の閉形式解を求める手法は，Priesack and Durner（2006）が示している．Priesack らの計算手法は小杉モデルや BC（Brooks and Corey）モデルにも応用可能である．そこで Durner モデルを拡張し，3 つのサブモデル（BC，VG，小杉）を自由に組み合わせた線形和関数に対する不飽和透水係数の式（一般化 Mualem 式の閉形式解）をまとめたものがこの論文である．

この論文では，日本の黒ボク土と砂丘砂における計算例が示されている．また基本式からの 3 つの変形が示されている．変形を使うことで，パラメータを減らしたり，式を簡単にしたり，透水性関数の自由度を上げたりすることができる．土壌の特性や解析の目的に応じてサブモデルの数と種類，そして変形の組み合わせを選ぶことが

可能となる．このミニレビューでは詳細を省くので，関心のある方は原著を参照していただきたい．

今後は，このモデルを実際にさまざまな土壌に対して適用して水分移動解析をする，といった展開が考えられる．まずは，この研究成果をふまえたミニではないレビューを『土壌の物理性』に投稿するところから考えたい．

引用文献

Priesack and Durner (2006): Vadose Zone Journal, 5: 121–124.
関 (2017): 東洋大学紀要自然科学篇, 65: 41–61.
Seki et al. (2021): Vadose Zone Journal, doi: 10.1002/vzj2.20168

湿害を分割してみる

髙橋智紀
農研機構東北農業研究センター

キーワード: 湿害，水田輪作，土壌構造，根，酸化還元

生活が豊かになると，ヒトは充実した食生活を求める．ひらたく言えば，もっと肉や油や野菜を消費したい，ということである．日本では食の多様化を契機に少子化以前からコメの消費が減少を続けている．水田は優れた食料生産システムではあるが，コメ以外の作物の栽培には向いていない．多様化する食を満たすために水田をどのように進化させるべきか．日本は他のアジア諸国に先駆けて豊かになり，最初にこの問題にぶつかった．現在選択されている水田輪作という手法は歴史的な社会実験だといえる．転作作物の最大の減収要因は湿害である．しかし残念なことに湿害には乾燥害のように整然と記述された専門書や教科書がほとんどない（例えば Glinski and Stepniewski, 1986）．考えてみれば，これはとても不思議なことだ．

湿害は根の生長阻害，過湿による養分環境の変化，嫌気的条件下での有害物質の発生，土壌病害の蔓延等が複合的に生じる現象である．私は，近年の「湿害対策＝排水対策」とする考え方は，湿害の理解に対する解像度を甘くしているように感じる．もちろん，排水対策は重要な技術開発項目であるが，湿害の理解ではない．排水対策の効果があらかじめ推定できない理由の 1 つがここにある．

例えば，湿害は土壌中の酸素不足を引き起こし根量を顕著に低下させる．根量の低下が植物の吸水量を減少させることは良く知られた事実である（ヒレル, 1998）．全国を対象とした転作大豆の収量解析でも，生育後半において乾燥害による有意な収量減が示唆されており（今野ら, 2020），栄養生長期の湿害と生育後半の乾燥害は裏表の関係にあるようである．乾燥ストレスによる気孔の閉鎖は乾物生産だけでなく，マスフローによって獲得される養分の吸収量にも影響を与えるに違いない．また根量が少ない場合，いわゆる光合成の昼寝現象（midday depression）が早期に発生することもヒレルによって論述されている．しかし，昼寝現象のようなマイルドな乾燥ストレスが，転換畑での作物生産に与える影響は，十分には定量化されていないようである．気孔の開閉は即時的な現象で定量的な把握が難しい．根の性状と気孔の開閉を関連付けることが簡単ではないのは容易に想像がつく．容易ではないが，本質的な問題の一部がここにあるように思う．

根の生長阻害以外の湿害について考える際も，土壌の酸素濃度は鍵となる環境因子である．酸素環境はガス拡散係数（遅沢, 1998；高橋ら, 2021）といった土壌の物理的性質と，土壌呼吸のような土壌の生化学的な性質によって決定される．幸田（1983）や橋爪ら（1975）をもとに春作と夏作のニンジンの湿害程度を比較すると，夏作の方が過湿に敏感だ．これは夏作の方が地温が高いために土壌呼吸が大きく，酸素消費が湿害程度を決定づけることを示しているのだろう．酸素が消費されて土壌の嫌気性が高まると，脱窒，マンガンの還元，鉄の還元，硫化水素の発生，の順で化学反応が生じる．鶴田ら（2020）は気相率が小さな条件では無機化された地力窒素が脱窒してしまい，たとえ地力窒素が高い土壌でも植物に供給される窒素が減じてしまう可能性を示している．藤井ら（1982）は還元溶解したマンガンによる大豆へのマンガン過剰症を報告している．さらに還元が進むと硫化水素が発生し，根を直接損傷させる．いずれも発生すれば強い減収要因になる．しかし，生産現場での実態は捉えられていない．

私の力では，湿害をストーリーとして語ろうとすると，このように物語の断片がところどころに見つかるだけである．いつの日か湿害の全体像を展望したい，とは常々考えているのだが．

引用文献

藤井ら (1982): 山形農試研報, 16: 31–48.
Glinski and Stepniewski, (1986): Soil aeration and its role for plants, CRC Press Inc., Florida.
橋爪ら (1975): 千葉農試特報, 6: 1–78.
ヒレル (1998): 環境土壌物理学　耕地生産力の向上と地球環境の保全 II 耕地の土壌物理, 農林統計協会, 東京.
今野ら (2020）:日作紀，89: 337–345.
幸田 (1983): 茨城農試研報, 22: 25–63.
遅澤 (1998): 農業環境技術研究所報告, 15: 1–64.
髙橋ら (2021): 土肥誌, 92: 11–18.
鶴田ら (2020):土肥学会講演要旨集, 66: 81.

農耕地の土壌物理性改善を夢見て

竹内晴信
北海道立総合研究機構上川農業試験場

キーワード: 生産性向上，圃場排水技術，透排水性，機作解明，研究コラボ

昭和末期のバブルの時代に地元北海道の農試に迎えられ，与えられた課題が小麦の施肥法に加え，畑地灌漑の利用技術と客土による土地生産性の向上であった．端から土壌の物理性分野の担当として期待を受け，試行錯誤で技術開発に楽しく取り組んできた．

ここ 100 余年の北海道における農耕地の生産性向上には，養分環境の改善や酸性改良に加え，地下水位の低下や余剰水の迅速排除（明暗渠，かさ上げ，透水性改善，均平化，穿孔，維持管理手法），耕起法や土層改良による土壌の物理的構造の改変，異種土壌の客土による土壌構成物質自体の改変などの技術開発が重層的に影響してきたものである（塚本, 2013）．この過程で得られた成果の多くは，現在も個別技術として現場で活用されてきた．また土壌診断基準値（北海道農政部, 2020）として改善目標となり，基盤整備工事での対策や指標（北海道農政部, 2010a; 2010b）に取り込まれて活用されている．

一方，公設試では個々の研究者が特定の土壌物理性改善を長期的な研究テーマとして取り組むには限度があり，営農指導や基盤整備の技術者と共に，個別のテーマ毎に現場で実証的な施工や環境調査を行い, 多くの現象面データを基に技術対策の策定を進めている．逆に言うと，実験室でのモデル的な解析試験はどうしても不十分となり，理論的な根拠を与えるのは後回し，といった風潮になっていたのは否めない．

土壌物理性に起因した生産阻害要因には，まだまだ未解決の問題が多いと感じている．僅かな例を挙げる中では，降水量が多い我が国で作物生産を行う上で，やはり余剰水の迅速排除が依然として大きな課題となっている．今や当たり前となった機械営農による不適切な（必然的な？）土壌管理で，土壌の堅密化や土壌構造消失などの問題を生じ，対処療法的に開発された圃場排水技術が機能しない場面（例えば, 地下水位が上昇しないような圃場での暗きょ排水による表層余剰水の排除不良）も散見される（塚本ら,2016）．さらに，温暖化に伴う降水量の変動拡大（無降雨日数の拡大とイベント毎の降水量増加）は，さらなる土壌の透排水性改善の要求へと繋がるであろう．

こうした背景から，複雑系にある土壌の様々な条件のうち何を変えれば，中長期的な透排水性向上にもっとも寄与するのか，といった基礎的な知見に基づいた対策を明らかにすることが必要と感じている．例えば，効率的な灌漑手法の開発分野で利用が広がっている HYDRUS-1D，2D を用いた土壌水分の移動シミュレーションを活用し，出口として「土壌条件毎の農耕地の排水機能の抜本的改善」に照準を合わせ，大学等の研究者と現場技術者のコラボにより研究を進めていくことが効果的なのではないだろうか．

引用文献

北海道農政部（2020): 北海道施肥ガイド 2020.
北海道農政部（2010a): 土層改良計画指針（案）.
北海道農政部（2010b): 暗きょ排水計画指針.
塚本（2013): 水土の知, 81(5): 359–362.
塚本ら（2016): 土肥誌, 87(5): 368–372.

土壌微細形態学の重要性

田村憲司
筑波大学生命環境系

キーワード: 土壌微細形態，土壌生成，土壌品質，生態系管理，炭素循環農法

土壌微細形態学に出会ったのは，私が大学院博士課程からである．大学院時代の指導教官であった，今は亡き永塚鎭男先生から自主ゼミの時に初めて土壌の微細な形態を把握することの重要性について学んだ．また，博士論文執筆中に，同じく永塚先生より，Bullock et al. (1985) の Handbook for Soil Thin Section Description の日本語の訳本を久馬一剛先生と八木久義先生の訳監修（久馬・八木, 1989）で出版する計画があるので，分担訳をするように仰せつかったのが，土壌微細形態学に足を踏み入れるきっかけとなった．土壌微細形態学の用語が非常に特異であったため，その訳は困難を極め，土壌薄片の記載法を理解するまでに長い時間を必要とした．おかげで，博士論文の提出が半年遅れてしまった．ただ，そのことを機に，博士論文研究の中で，植生遷移に伴い土壌の微細形態が変化する（田村ら, 1993）ことと，土壌の微細構造が土壌の物理性と密接な関係にある（田村ら, 1991; Tamura et al., 1990）ことを深く理解することができた．

私の博士課程での主指導の指導教官であった，故大羽裕先生の退官記念出版物として，その当時から継続していた実習である「土壌調査法実習」の行程を記した「十文字峠への道」（十文字峠への道編集委員会編, 1992）の中で，ポドゾル，褐色森林土，黒ボク土等，日本の主要な土壌の微細形態を記載した．そこで得た最大の知見は，土壌生成過程を土壌微細形態レベルでは非常に深く論究できるということであった．例えば，ポドゾルの溶脱層から集積層にかけて三二酸化物粒子のような土壌物質が移動する様子を追うことができ，集積層では一次鉱物粒子の周りを移動集積物質が沈積する状態を詳細に観察することができることである．また，ポドゾルの生成要因の重要な点である非常に厚いO層の微細形態を観察（永塚・田村, 1986）したことにより，O層中の有機物の変質

過程を理解できた．顕微 FT-IR 等の顕微分析によって，土壌有機物の変化が見て取れる．

土壌構造の複雑さの指標の一つとして土壌薄片中のペッド（土壌の複合体）粒子のフラクタル次元が上げられる．ペッド性の程度の発達とともにペッド粒子表面のフラクタル次元が高くなり，それに伴い，孔隙率の増加等の土壌物理性が変化する．不撹乱土壌中での微細形態の変化は土壌の諸性質に複雑に影響を与える．上記の博士論文では，植生遷移に伴い，マクロな土壌構造と土壌微細形態が変化し，その変化の数値化としてフラクタル次元の増加を示すことができた．

海外の研究として，20 年ほどモンゴルの放牧地生態系（Yamanaka et al., 2018）の退行と保全の研究に従事してきたが，その中で，モンゴルフスタイ国立公園において，放牧地の生態系管理が放牧地の植生の生育に影響し，さらに，土壌の微細構造に影響を及ぼし，その結果，土壌の透水性が増加することを明らかにした（Isa et al., 2012）．

最近，無施肥圃場（自然栽培圃場）や高 C/N 有機質資材施用圃場の土壌の微細形態を調査した．日本の黒ボク土の自然栽培圃場では，数十年，継続することにより，土壌の物理性が下層土まで影響を及ぼしうることが明らかとなった（Nakatsuka and Tamura, 2016）．その要因を追究するため，中塚博子氏は微細形態学的手法を用い，下層土壌の微細形態を土壌菌類の菌糸が変化させ，その結果，土壌の物理性に影響を及ぼしていることを示した．土壌の構造がスポンジ状構造となることによって，下層土まで緻密度が低下し，貫入抵抗が著しく低下することが明らかとなったのである．また，ブラジルの高 C/N 資材である廃菌床の施用圃場では，たった数年の連用によって，土壌菌類の菌糸が下層土の土壌構造発達に寄与することが示された（Nakatsuka et al., 2016）．どちらの圃場の土壌も下層土の土壌物理性の向上が土壌品質（Soil Quality）向上に大きく貢献することが明らかとなった．

土壌品質評価は，従来，表層土だけの評価であったり，土壌の化学性に重点を置いた評価であったりしたが，上記の研究等によって，下層土の評価，特に，下層土の物理性や微細形態の評価をも視野に入れたものである必要性を感じる．今後は，さまざまな土壌管理や生態系管理が土壌微細形態に及ぼす影響について論究したいと考えている．

引用文献

Bullock et al. (1985): Handbook for Soil Thin Section Description. Waine Research, England.

Isa et al. (2012): Tahi, 10: 26–50.

十文字峠への道編集委員会編 (1992): 十文字峠への道, 大羽裕教授退官記念事業会, つくば.

久馬・八木 (訳監修) (1989): 土壌薄片記載ハンドブック. 博友社, 東京.

永塚・田村 (1986): 日本生態学会誌, 36: 163–168.

Nakatsuka et al. (2016): Geoderma, 269: 54–60.

Nakatsuka and Tamura (2016): SpringerPlus, 5: 283.

Tamura et al. (1990): Pedologist, 35: 104–116.

田村ら (1991): 森林立地, 33: 86–91.

田村ら (1993): 土壌肥料学雑誌, 64: 183–189.

Yamanaka et al. (2018): Rangeland Ecosystems of Mongolia, Munkhiin Useg, Ulaanbaatar.

私の研究紹介

塚本康貴

道総研中央農業試験場

キーワード: 転換畑，転作作物，水稲，土壌物理性，醸造用ブドウ

私は学部卒業時に結婚し，修士課程の 2 年間は嫁さんに働いてもらう，いわゆる「ヒモ」生活を送っていた．学部，修士課程では土の凍結時の水や溶質移動に関する研究を行っていたが，博士課程に進む考えよりも，早く就職したい気持ちが強く，北海道職員の試験を受けた．面接時に研究職を希望したが根室支庁（現在の根室振興局）に配属となり，4 年間，農業農村整備事業の実施担当者として働いた．その後念願の農業試験場に異動でき，現在に至っている．

農業試験場に配属されてから 3 年間は，現地農家圃場で栽培されているダイズの生育収量調査と土壌調査に明け暮れた．ダイズという作物がどういうものか全く知らない状態だったので，枝豆がダイズと同じ作物であることを初めて知り，皆に笑われた．研究計画は私が担当する前に既に決められていたため，研究計画に沿って室内試験や現地調査を行いながら勉強し，3 年後になんとか農業試験場の研究成果としてとりまとめることができた（塚本ら, 2012; 塚本ら, 2020a）．この 3 年間に，他の大きな研究課題を持つことなく，一つの研究課題に打ち込めたことはとても幸せだった．

その後，稲の育種と栽培を実施している試験場に異動となったのだが，その試験場ではこれまで本格的に転作作物の栽培試験を行ったことがなく，アップカットロータリやダイズ，ムギの播種機，防除機がない状態で，当時の場長からは現地農家の圃場で試験を行えば良いと言われていた．しかし，現象を詳しく観察し，調査解析するにはできるだけ栽培法や土壌，気象条件などをそろえて行う必要性を感じ，また農家圃場では実施不可能な思い切った処理を行いたかったので，他場で使用しない古い播種機や防除機を貰ってきたり，機械メーカーから借用したりするなどして対応した．

研究員としての年数が 5 年ほどになる頃には，複数の研究課題を担当するようになったが，一時期は水稲，ダイズ，秋まきコムギ，緑肥の栽培試験をする状況になり，春から秋まで日中はほぼ外作業となった時はさすがに辛かった．

ダイズへの菌根菌利用に関する研究課題（大友ら, 2015）では，菌根菌の宿主，非宿主作物をダイズの前作として栽培して，ダイズの生育収量とダイズの根に着生する菌根菌の感染率を調査した．文献（例えば大場ら, 2006）を調べてプレパラートで感染状況を調べる作業はかなり目が疲れたが，土壌乾燥時に地下灌漑を実施した圃場において，未実施の圃場に比べて感染率が高い傾向を示すデータが得られた時は少々興奮した．

泥炭土水田の米粒タンパク質低減化を狙った研究（塚本ら, 2009）では，作土下に透水性の良好な砂質土を埋設することで根域を制限する技術を検討した．先輩の斬新なアイデアを引き継いで行った研究で，埋設する砂質土をどの深さに設定すれば，生育に負の影響を与えずにコメのタンパク質含有率が低減できるかを試験場内で実施した．埋設した砂質土層により水稲根の下層への伸長を制限していることを確かめるため，埋設した砂質土を採取して根量を測定し，また水稲生育期間に埋設土層以深にルビジウム溶液を注入し，水稲のルビジウム吸収量を確認する作業は作業自体も面白かったし，予想した通りの結果が得られて嬉しかった．そのほか，行政職時代の先輩や上司からの相談対応で実施した暗渠排水の機能低下要因に関する研究（塚本ら, 2016）や，灌漑排水技術（塚本ら, 2020b），水田の炭素貯留（Kitagawa et al., 2014），や田んぼダムに関するプロジェクト研究など，多くの研究課題に関わらせていただいた．これら研究内容は一見全く関連してないように思われるが，転換畑や転作作物，土壌の物理性といった共通のキーワードが存在する．たまたまそうであったものもあるが，自分の得意とする土壌物理や作物生育の視点で問題を解決するよう研究を進めた．仕事上行わなくてはならない多様な研究テーマに対して，自分の有する知識や技術を武器に取り組むことの重要性は今でもお世話になっている先輩が教えてくれた．

現在私は，醸造用ブドウ栽培圃場での土壌と樹の生育との関係，ならびに生育不良箇所への対策に関する研究課題を実施している．生育不良箇所では概して土壌が浅くから堅密であるため，ブドウの畝間へ心土破砕を行い効果が得られている．大きな馬力のトラクタを所有していない農家が多く施工に苦労したが，皆熱心に話を聞いてくれ，喜んでくれることが素直に嬉しい．これが自分の Life work なのだろうと思う今日この頃である．

引用文献

Kitagawa et al. (2014): Paddy Water Environ., 12: 287–294.
大場ら（2006): 土と微生物, 60(1): 53–56.
大友ら（2015): 土肥誌, 86(6): 549–552.
塚本ら（2009): 農業農村工学会誌, 77(11): 900–901.
塚本ら（2012): 土壌の物理性, 121: 3–8.
塚本ら（2016): 土肥誌, 87(5): 368–372.
塚本ら（2020a): 農業農村工学会論文集, 310: I_1–I_9.
塚本ら（2020b): 農業農村工学会誌, 88(10): 801–804.

土壌水分の衛星広域観測と湿潤土壌誘電率

辻本久美子
岡山大学学術研究院環境生命科学学域

キーワード: 土壌水分，誘電率，マイクロ波，衛星観測

私が学部生だった際，卒業論文にと頂いたテーマが「気候変動と地球規模水循環変動」だった．具体的に何をしようかと模索して論文を読む日々の中で，温暖化に伴って雨の降り方が変化するという気候システムに興味をもち，世界の農業 · 食料に係る諸問題に対して「雨の予測精度向上」という観点から研究者として貢献したい，との思いを抱くようになった．大学院生になって特に熱中して読んだのが Roger A. Pielke の論文（Pielke et al., 2001; 2005 など）で，彼は，土壌水分や植生といった地表面の状態の分布特性が地域の気候や降水に与える影響について気象モデルを用いて数々の先駆的研究を行っていた．「水辺や緑地では涼しい」「都市でヒートアイランドが起こる」といった現象を超えて，土壌水分の分布が雲や降水の時空間分布にまで影響を及ぼす現象とそのメカニズムを示していた点が面白く，むさぼるように彼の論文を読んだ．これらの現象は地表面からの潜熱 · 顕熱フラックスの配分によって決まるため，地域の気象に影響を及ぼす数 10 ～ 100 km の空間スケールで土壌水分をモニタリングして気象モデルに与えることが重要で，ひとたび気象モデル内で降水量の推定値に誤差が生じると，それは土壌への降水浸潤過程を経て，次の時刻の土壌水分量の推定誤差を拡大させる．その結果は，その次の時刻の潜熱 · 顕熱フラックス，そして降水の推定誤差拡大へと伝播されていく．したがって，より確かな降水予測のためには，気象モデル内で土壌水分量の推定誤差が伝播 · 拡大しないよう，随時観測値を反映させる等の工夫が必要となる．私はこの点に研究者が解くべき課題を見出し，たいへん興味をそそられた．

土壌水分の広域観測には，人工衛星によるリモートセンシングが効果的と考えられる一方，雲があると地表面は見えない，という思い込みが当初の私にはあった．大学院でマイクロ波リモートセンシングについて学び，雲を透過して天候にとらわれずに地表面を観測する技術があることに，たいへん興味をもった．土壌水分の場合，リモートセンシング手法は様々にあり（Babaeian et al., 2019），たとえば，可視光センサーによって土壌のアルベドや色を観測することで，湿っている（暗い色）/ 乾いている（明るい色）を判別したり，赤外センサーによって温度を観測することで，その日較差から水分量を判定したりする手法もある．一方マイクロ波センサーによる観測では，水を含んだ土壌から放射 · 吸収 · 散乱される電磁波を解析し，水と固相土壌との誘電率の違いを手掛かりに，土壌中の水分量を推定する．可視 · 赤外センサーによる観測に比べて直感的な理解はし難いが，観測に用いる波長が長いため，大気中の雲粒 · 雨粒を透過することがで

きる．世界各地に対する土壌水分量推定値は，宇宙航空研究開発機構（JAXA）からも公開されている（Kaihotsu et al., 2019）が，さらなる推定精度向上が必要である．米国航空宇宙局（NASA）や欧州宇宙機関（ESA）も世界全体を対象とした土壌水分衛星観測プロジェクトを進めており，観測技術の高度化に向けて国際的にも切磋琢磨が続けられているところである（Mialon et al., 2015）．

私は大学院生時代より長く水工学・水文気象学分野の研究室に在籍して研究を行ってきたが，2017 年 4 月に縁あって現職場に異動し，それを契機に本学会にも入会した．それ以降，土壌の誘電率に関する研究が日本の土壌物理学分野で盛んに行われてきたこと，現場土壌水分観測に用いる TDR には Topp 式（Topp et al., 1980）が広く用いられているが，日本の土壌には Topp 式の適合性が低いものも多くあること，等々を学び知った．リモートセンシング分野では Dobson 式（Dobson et al., 1985）が誘電率モデルとして広く用いられており，私は Topp 式のことは知らなかった．日本の土壌に Topp 式が合わない，という話に興味をもち，Topp 式と同様に米国で開発された Dobson 式はどうなのだろうか，と疑問を抱いて，その頃から，土壌の誘電率，および，それを用いたマイクロ波土壌水分量推定手法に係る研究を行うようになった．

2020 年 1 月に，岡山県内の水田で採取した土壌の誘電率の計測結果と，それを用いたマイクロ波土壌水分量推定モデルについて，ある国際会議で発表したところ，NASA の研究者が興味をもって議論に訪れてくれた．その際の最初の一言は，「この間隙率と誘電率の値は本当に実験結果なのか，誤りではないのか」とのことで，間隙率が高いこと，体積含水率に対して誘電率が低いことへの確認だった．一方で，日本の土壌物理学の分野で欧米とは異なる誘電特性の土壌の存在が指摘されていることは以前より認識しているとのことで，「だから日本語で書かれたこの分野の論文の情報は我々のアルゴリズム改良にとって重要なんだ，最近は Google 翻訳がよくなってきたので助かっているよ」と仰っていたのが印象的で，衝撃でもあった．翻訳機にかけてまで読みたいと思われている日本国内での研究成果の蓄積…！ せっかくであれば，翻訳機にかけて読まれる前に，自分たちで国際発信をしたいし，世界に通ずる技術に活かしたい，とも思った．最近の私の研究は，それが原動力の一つとなっている．その際に，私がこだわりたい点は二つある．

まず，観測アルゴリズムにせよ，数値モデルにせよ，その開発・適用方針には，分野や目的によって，対象地域ごとに推定式やモデルを開発したりパラメータをキャリブレーションしたりする方法もあれば，世界全体に対して統一アルゴリズムで開発する方法もある．私は，日本の土壌には…として日本固有のモデルを作るのではなく，世界全体に適用できるモデルとして，日本の知見を反映する形でモデル改良ができればと思っている．

また，目的（マイクロ波による観測値から土壌水分量を精度よく推定する）を達成するためには，もしかすると，昨今進化が目覚ましい人工知能（AI）やデータ駆動科学の力を用いる方が良いこともあるかもしれないが，私自身は，あくまで，物理現象の素過程に関する理解を深化させてそれを定式化していくというモデル化の方向にこだわりたいと考えている．そうする過程で，「目的」を達成することに加えて，関連する自然科学・基礎科学（この場合は湿潤土壌の誘電特性）の継承や発展につなげたい，という思いを強くもっているからである．たとえば誘電率の場合，土壌水の中でも，自由水と吸着水とでは誘電率が大きく異なるとされているが，その「自由水」「吸着水」の定義が，土壌中の水移動に係る議論とどう関連づけられるのか（どのマトリックポテンシャル値に対応するのか）は，明らかにされておらず，実験結果から同定されたパラメータを用いて経験的に定めるしかない．モデル構築に関連する一つ一つの素過程に着目し，こうした未知の現象を解明していきながら，データサイエンスのみでなく土壌や水，植生等に関する基礎科学の継承と発展を意識して研究を進めたいと考えている．

引用文献

Babaeian et al. (2019): Reviews of Geophysics, 57(2): 530–616.
Dobson et al. (1985): IEEE T. Geosci. Remote, GE–23(1): 35–46.
Kaihotsu et al. (2019): SN Applied Sciences, 1(11): 1477.
Mialon et al. (2015): IEEE T. Geosci. Remote, 53(6): 3084–3094.
Pielke et al. (2001): Reviews of Geophysics, 39(2): 151–177.
Pielke et al. (2005): Science, 310(5754): 1625–1626.
Topp et al. (1980): Water Resources Research, 16(3): 574–582.

不撹乱土中の水分・溶質移動

徳本家康
佐賀大学農学部

キーワード: ライシメータ，下端境界条件，土壌構造

私が土中の水分・溶質移動予測に興味を持ったのは，農地における硝酸態窒素の地下水汚染が懸念されていた 2000 年頃からである．当時，TDR による水分・溶質移動の野外計測が比較的容易になり，土壌物理分野では溶質移動モデル（van Genuchten and Wierenga, 1976; Jury and Roth, 1990）による予測の関心が高まった．しかし，緻密な室内実験によるローカルスケールと圃場スケールの水分・溶質移動にはギャップがあり（取出, 1997），それを埋めるための中間的規模のライシメータを用いた水分・溶質移動の観測・解析は今もなお，重要と考えられる．

水分・溶質移動の研究目的や対象に応じて，利用す

るライシメータの種類や大きさは様々である（Singh et al., 2017）．近年のライシメータを用いた研究について，Vadose Zone Journal の特集号（Pütz et al., 2018）が組まれ，圃場埋設型のウェイングライシメータや今後の展望が述べられている．とくに，圃場の水分・溶質移動を予測する上で，下端の境界条件の設定や仮定が最も悩ましい点である．自然条件により近い状態の水分・溶質移動の把握には，ライシメータ外部と同じになるように，ライシメータ下端の吸引圧を制御することが必要であろう．

他方で，土壌は団粒構造，亀裂や植物根のように様々な間隙構造を有するため，撹乱土から不撹乱土までに至る段階的な溶質移動メカニズムの解明が必要不可欠である．その場合，温度や水分フラックスを調節可能な室内実験において，不撹乱土における溶質移動モデルの適用の可否など検討すべき課題も未だに多い．

今後，我が国の気候に適した圃場埋設型ライシメータの構築やノウハウの蓄積を目指すとともに，圃場計測と併せて室内における不撹乱土中の溶質移動モデルの検証などに貢献できれば幸いである．

引用文献

Jury and Roth (1990): Transfer functions and solute movement through soil: theory and applications. Birkhauser Verlag.
Pütz et al. (2018): Vadose Zone Journal, 17: doi: 10.2136/vzj2018.02.0035
Singh et al. (2018): Vadose Zone Journal, 17: doi: 10.2136/vzj2016.07.0058
取出（1997): 水文・水資源学会誌, 10(5): 485–497.
van Genuchten and Wierenga (1976): Soil Science Society of America Journal, 40: 473–481.

動相不動相モデルによる土中の溶質移動

取出伸夫
三重大学大学院生物資源学研究科

キーワード: 動相不動相モデル，溶質移動，不均一

私は U.S. Salinity laboratory において van Genuchten 博士のポスドクとして溶質移動パラメータの推定プログラム CXTFIT（Toride et al., 1995）に取り組み，動相不動相モデル（MIM, mobile-immobile model）の解析解を様々な初期境界条件に対して整理した（Toride et al., 1993）．その後，CXTFIT を用いた共同研究も含めて不均一な溶質移動に対する MIM による検討を行ってきた．

移流分散式（CDE）に対して不動相の吸い込み項を一次反応式で与える MIM を提案したのは Coats and Smith (1964) である．van Genuchten and Wierenga (1976) は，MIM に溶質の吸着項を加えた解析解を示して感度解析を行った．改めて Coats and Smith (1964) を読み返してみると，上下端の境界条件，溶質の非平衡吸着モデルとの類似性，解析解，無次元式の有用性，パラメータの推定の最適化手法，実験データの解析結果などが盛りだくさんに議論されているのに驚かされた．van Genuchten 博士は，博士論文の研究の中で Coats and Smith (1964) を詳細に検討し，MIM を幅広く利用出来る形に発展させた．その取り組み方は，その後の van Genuchten-Mualem 式の導出にも相通じる van Genuchten 博士らしい丁寧さを感じさせられる．

Coats and Smith (1964) は，結論の最後に MIM は自由度が高く様々な非対称なブレークスルーカーブを表現できるが，それは不動相の存在を証明することではないと述べている．MIM は，動相の割合と動相と不動相の交換係数を独立して測定（推定）することができない欠点を持つが，その二つのパラメータ値の組み合わせで非常に高い自由度を持つ何とも不思議なモデルである．

私の研究を振り返ると，Coats and Smith (1964) に導かれた路線であった気にもさせられたが，最小限のパラメータで自由度の高い MIM は，土壌物理学の永遠のテーマである不均一な流れのモデル化に対するヒントを与えてくれるモデルと再認識している次第である．また，時代を超えて生き残る論文のアイデアは風化しないことも改めて感じ，しばらく休眠状態である「古典を読む」を再開させたいと思っている．

引用文献

Coats and Smith (1964): Society of Petroleum Engineers Journal, 4: 73–84.
Toride et al. (1993): Water Resources Research, 29: 2167-2182.
Toride et al. (1995): U.S. Salinity laboratory Research Report 137: 1-121.
van Genuchten and Wierenga (1976): Soil Science Society of America Journal, 40: 473-481.

農用地の土壌侵食と出会って

中尾誠司
農研機構畜産研究部門

キーワード: 土壌侵食，土壌流亡，予測モデル

農林水産省に入り，最初の試験場勤務は中国農業試験場（広島県福山市）であった．管内（近畿・中国地域）には多くの農地開発地があり，わずかながら国営農地開発事業が行われていた時代である．事業地区の多くはマサ土（花崗岩風化土壌）地帯にあり，農地保全管理の研究が盛んな時期で，筆者が土壌侵食（水食）研究と出会うきっかけとなった．

開発農地の土壌保全というテーマの中で，特に大規模傾斜畑圃場での土壌侵食・流亡量予測の研究に携わるこ

ととなった．当時の土壌流亡量予測には，汎用土壌流亡式（USLE: Universal Soil Loss Equation）が広く利用されていた．一方で，侵食や流亡のメカニズムを反映した，いわゆる物理モデルの構築が盛んに行われた時期でもあった．筆者は，畝立て圃場からの土壌流亡量予測について侵食理論等を組み込んだモデルを構築し，圃場試験等によりその有効性を実証した（中尾ら, 1996; 2003）．

これらの研究をする中で素朴な疑問に直面した．モデルによる侵食量などの予測では，土性や粒径などのいわゆる土壌物理性のファクターが必要となる．普通畑の土層は通常，作土（耕土）と心土に分かれている．土壌の侵食の受けやすさを受食性と呼ぶが，心土は作土より緻密（乾燥密度が大きい）であるため，その受食性は，一般的に作土に比べて低い．現状のモデルでは作土の受食性パラメータを用いて予測するため，実際に侵食が心土に達した状況であっても作土と同じ条件で計算されてしまう．このため，短期の予測には適しているが，長期の予測では過大評価となってしまうことが懸念される．したがって，より精確な予測を実現するためには，侵食や流亡の過程において作土と心土のように受食性が異なる土層の状況等を反映した理論を組み込んだモデルを考える必要がある．筆者はいまだ，このような視点でのモデルにお目にかかったことがない（筆者の勉強不足で知らないだけかもしれないが …）．

土壌侵食や土壌流亡現象において，土層構造や土壌の物理性はきわめて重要なファクターである．今後，研究の進展により，土壌の受食性評価の高度化や，ここで記述した課題が少しずつでも解決されることを願っている．

引用文献

中尾ら (1996): 農業土木学会論文集, 184: 1–12.
中尾ら (2003): 農業土木学会論文集, 226: 89–95.

地震 · 津波と地下水汚染

中川　啓
長崎大学総合生産科学域

キーワード: 地震，津波，硝酸性窒素，地下水汚染

私の大学時の卒業研究は，沖縄の島嶼部における塩水侵入と地下ダムに関する数値計算でした．帯水層中の塩水侵入状態を知るには淡水と塩水の境界面が重要であり，その境界面の位置を決めるガイベン · ヘルツベルグの式によれば，その位置が地下水位に依存するため，降雨による地下水変動や地下水涵養を考えたときに，土壌物理の現象だと考えたので，その頃，何冊かの土壌学や土壌物理学に関するテキストで勉強しました．こうしたことは現在も興味の対象であって，たとえば，後に示すような地下水汚染においても，地下水中の硝酸性窒素濃度は，研究対象としている島原半島では降雨による希釈が大きく効くこと，すなわち降雨浸透が重要であることが分かりました．そのため地下水位とともに土壌水分の連続観測を継続して実施しています．現在も研究対象は主に地下水ですが，今も昔も，土壌物理の現象とは密接に関係していると考えています．とはいえ，土壌物理学会へは，数年前の京都大会以降，参加しておらず，編集委員を終えてからも学会誌をただ受け取るだけのあまりアクティブではない会員となっておりました．今回こうした機会が与えられましたので，最近 10 年の自分の主な活動を振り返ってみたいと思います．

2 度の大地震について: 現職に着任直前（2011 年 3 月）に東日本大震災が起こりました．私は，水文 · 水資源学会と日本地下水学会の合同調査チームの一員として地震による津波の被害を受けた水源井戸の調査を行い，地下水中の塩分濃度が津波の影響で上昇したものが低減していく過程を観測し（Kaihotsu et al., 2017），土壌や津波堆積物中の重金属濃度や放射線濃度の調査などを行いました（中川ら, 2014）．数年後，2016 年には再び大規模な地震が熊本で発生しましたが，この時は熊本大学と地下水学会の研究グループの一員として，地下水位や地下水質が地震によって受けた影響について，主に自己組織化マップ（Self-Organizing Map: SOM）という手法を用いて検討を加えました（Nakagawa et al., 2019a; 2020; 2021a）．

地下水汚染について: 硝酸性窒素による地下水汚染は，古くから知られている汚染ですが，いまだに深刻な地域が国内外に多数存在しています．島原半島においても以前からこの問題は知られていましたが，汚染の現状を明らかにするとともに（Nakagawa et al., 2016; 2021b; Amano et al., 2016），これまで同位体比によって判別されてきた汚染原因の推定手法では，判別が困難な場面に直面したため，新しい方法を提案しました（Nakagawa et al., 2017）．しかしながら，この方法で用いるコプロスタノールの濃度は，河川と地下水で大きく異なっていて（Nakagawa et al., 2019b），河床や河畔域の堆積物，河川底質などに吸着することが予想されました．そこで，そうしたメカニズムを解明するため，現在は，室内実験で吸着等温線を評価することや，堆積物や土壌を充填したカラムを用いた実験に着手し始めたところです．こうして，だいぶ土壌物理学の研究に戻ってきたような気がしています．この先，何か興味深い結果が得られ，ご報告できると良いなと思っています．

引用文献

Amano et al. (2016): Environmental Earth Sciences, 75: 1145.
Kaihotsu et al. (2017): Environmental Earth Sciences, 76: 250.
中川ら (2014): 地下水学会誌, 56(2): 107–119.
Nakagawa et al. (2016): Environmental Earth Sciences, 75: 234.
Nakagawa et al. (2017): Journal of Hydrology, 550: 663–668.
Nakagawa et al. (2019a): Environmental Earth Sciences, 78: 455.

Nakagawa et al. (2019b): Ecological Indicators, 107: 105534.
Nakagawa et al. (2020): Journal of Hydrology, 582: 124519.
Nakagawa et al. (2021a): Minerals, 11: 43.
Nakagawa et al. (2021b): Scientific Reports, 11: 2598.

炭素貯留と Soil Health

中島 亨
東京農業大学

キーワード: 炭素貯留, 気候変動, Soil Health

東京農工大学大学院で博士号取得以来，多くの方々の導きで土壌学の研究に打ち込むことができ，非常に幸運であった．その中で様々な場所や場面で研究課題に取り組んできたが，筆者が今後重要であると考えるテーマをいくつか紹介したいと思う．

1 つ目は炭素貯留（Carbon Sequestration）である．農地の管理方法（例えば，不耕起栽培，輪作，緑肥，堆肥施用，エネルギー作物栽培）によって土壌中の有機物炭素量がどのように変化するかを研究する内容である（Nakajima et al., 2018）．ポスドクとして 3 年間オハイオ州立大学の炭素管理 · 隔離センターで働いていた時の研究テーマである．センター長の Dr. Rattan Lal はこの炭素貯留に関連する研究を長年にわたり詳細に研究して，その内容を昇華して気候変動の緩和 · 適応策や食料安全保障に関連付けて，世界的に非常にインパクトのある研究を展開されている（Lal., 2004）．

2 つ目は Soil Health に関する研究である（Nakajima et al., 2016）．Soil Health とは土壌の物理性，化学性，生物性を統合的に評価し，1 つの指標として示し農地土壌等を評価する研究手法である．これまでややもすれば，土壌評価は個別的にもしくは特定の側面や条件にフォーカスして展開されてきた印象がある．しかし，農地や生態系の中で土壌を評価する際には物理性，化学性，生物性のそれぞれの要素が複合的に作用して様々な現象が起こっていると理解するのが理想である．まさに Soil Health はそのことに真正面から挑戦している研究であると言える．

最後に，執筆の機会を与えてくださった編集委員会には心から感謝する．

引用文献

Lal (2004): Science, 304: 1623–1627.
Nakajima et al. (2016): Soil Sci. Soc. Am. J., 80: 1020–1026.
Nakajima et al. (2018): Carbon Management, 9: 415–423.

秋浅耕による水田からのメタンガス放出抑制

中嶋美幸
農研機構東北研

キーワード: 水田，有機物分解，メタン，耕起深

東北地方の単作水田において，コンバインでの収穫後に地表に残される稲わらなどの粗大有機物は，休耕期間である冬季期間中に好気分解されずに残存すると翌年水田からの主要な温室効果ガス · メタン（CH_4）の生成基質となり，CH_4 放出量を増加させる．稲わらを堆肥化して水田に還元すると CH_4 放出量は著しく抑えられるが，堆肥化にかかる手間とコストが無視できないため，現地導入のハードルが高い．現場では，圃場から粗大有機物を移動させずに分解促進を行う手法が求められている．

冬季期間中，有機物の分解速度には温度と水分が大きく影響する．地表面に残された稲わらは水分の不足および土壌との接触不足で分解が進まない．一方過湿気味の土壌にすき込まれた（15–20 cm 深）稲わらは酸素不足と低温により，やはり分解が遅れる傾向がある．そこで秋に稲わらを地表面近くにすき込む管理法（秋浅耕）が考案された（松本ら, 2002）．秋浅耕は耕起によって毛管上昇を切断し，さらに大気と接触する蒸発面を増加させることで耕起層の気相率を増大させる．また地温の日変動は表層に近いほど振幅が大きく，寒冷な東北地域の冬季であっても晴天日中の土壌表層においてはある程度の地温上昇が期待できる．秋浅耕のねらいは，低温過湿な土壌の表層近くに，耕起管理によって比較的暖かく好気的で有機物分解に好適な環境を作成し，その位置に稲わらを配置することである．即ち有機物分解好適性という指標に対し，土壌内で深さ方向の不均一を人為的に作成し利用することがこの管理法の要点となる．なお，この秋浅耕を圃場で実施したところ，山形県の低地土水田圃場では翌年 CH_4 放出量に対する削減効果が現れた（塩野ら, 2016）が，排水性のよい岩手県の黒ボク土水田圃場では現れなかった（Nakajima et al., 2017）ことから，秋浅耕の CH_4 削減効果は土壌水分過多条件の改善を通じて発揮されたと考えられた．

大気に接し連動する地表境界面から鉛直下方に土壌環境は変化する．平面的な不均一性だけではなく作土中に生じる深さ方向の不均一性に着目し，その効果を検討していく必要があると考えられる．

引用文献

松本ら (2002): 土肥誌, 73(3): 315–318.
Nakajima et al., (2017): J. Agri. Meteorol., 73: 91–98.
塩野ら (2016): 土肥誌, 87(2): 101–109.

泥炭地における研究を振り返って

永田　修
農研機構

キーワード: 泥炭地，湿原，温室効果ガス，地球温暖化，美唄

私が，2002 年，大学を出て，最初に赴任した地は，「美唄」であった．農研機構北海道農業研究センターの本所ではないことは分かっていたが，美唄がどういう場所なのか，全く理解しないまま着任の日を迎えた．研究室は，水田土壌管理研究室，この研究室は，1919 年美唄泥炭地試験地として設置された歴史ある研究室だった．試験地開設当初から，三要素試験，窒素とリン酸の肥効比較試験，砂や壌土，粘土を一寸 ～ 三寸まで客土する客土試験などが実施され，様々な作物について泥炭地への栽培適否試験も行われた．

1950 年に北海道総合開発計画が策定され，石狩川総合開発事業が計画された．1954 年には，排水，客土等の事業が始まり，事業は年々拡大，その結果，広闊な泥炭地は瞬く間に蕩尽され，昭和 30 年代には美唄試験地の敷地が，「高層湿原」としてかろうじて残るだけになった．しかし，この残された高層湿原も水位の低下による乾燥化がササ植生の侵入を招き，本来のミズゴケを中心とした植生が失われていった．これまでの開発から一転，湿原保護に向けた調査が開始された．敷地内の高層湿原を保全するために，1994 年には，1.2 m 幅の遮水シートが約 1500 m にわたって敷設され，シート内側の水位を高く保つ試みが実施された（伊藤ら, 2001）．湿原保全に関する研究は，その後も続き，湿原外部から農業用水を引水し，水位を高く保つ手法（飯山ら, 2006）などが検討され，一定の効果が認められた．

湿原は，高層湿原と表されるように，生態的な特徴を有する一方，有機物が大量に貯蔵され，また，水位が高い環境下でもあることから，温室効果ガスの発生源として，地球環境的見地からも注目される場であった．常田ら（2004）は，湿原の地下水面下からのガス採取法を考案し，湿原におけるメタンバブルの存在，さらにその挙動と役割を明らかにした（常田 2006）．森本ら（2009）は，泥炭林土壌内の温室効果ガスの生成と消失を詳細に調査した．温室効果ガスに関しては，高層湿原からの発生だけでなく，湿原の植生変化や泥炭地の土地利用変化に着目した研究が進められた．湿原の植生変化においては，ササが侵入することで，二酸化炭素の発生量が多くなること，それが，地球温暖化を促進する要因となることが示された（Nagata et al., 2005; Takakai et al., 2005）．また，土地利用変化については，排水や客土が，一酸化二窒素発生量に影響をおよぼすこと（Nagata et al., 2010），農地化が地球温暖化を促進させていること（永田, 2006）が明らかになった．

美唄試験地は，開設から一世紀の歳月を経て，研究の場としての機能に終わりを告げようとしている．しかし，今もなお，泥炭地は，開発された農地の客土の下に，莫大な有機物を貯留している．地球温暖化が人類の大きな課題となってしまった現在，研究者と生産者が一体となって，温室効果ガスの排出量削減および、地球温暖化の影響に適応した農業生産技術の確立を目指さなければならない．

引用文献

飯山ら (2006): 農業土木学会誌, 74: 591–594.
伊藤ら (2001): 北海道農業試験場研究報告, 173: 1–36.
森本ら (2009): 土壌の物理性, 113: 3–12.
Nagata et al. (2005): Phyton (Hom, Austria), 45:299–307.
Nagata et al. (2010): Journal of Agricultural Meteorology. 66: 23–30.
永田 (2006): 新しい研究成果北海道地域 2006 年度, 115–121.
Takakai et al. (2005): Phyton (Hom, Austria), 45: 319–326.
常田ら (2004): 土壌の物理性, 96: 97–100.
常田ら (2006): 農業土木学会誌, 74: 595–598.

素材と機械と出来上がり

中野恵子
農研機構九州沖縄農業研究センター

キーワード: 作業性，含水比，コンシステンシー

最近，“スマート農機” をそばで見る機会が増えた．田植え機，トラクタ，コンバイン等々．これらは，人がハンドルを握らずとも，まっすぐに，時にターンもしながら動いていく．農業機械を運転する技術はなく何の評価軸ももたないので，ただ感心して眺め，オペレータや機械関係者のやりとりを傍らで聞いている．その中で，オペレータの総合的な判断力と選択にも感心するばかりである．現段階では，機械の速度，作業機の設定，ほ場端でのターンの種類など，また，どのほ場で作業するのかも，オペレータが選択している．デフォルトがあるものもあるが，それで良しとして機械運転をスタートさせる．その決定のカギは，土壌との関係であることが多いように（土壌をいじってきた私には）見える．オペレータに理由を尋ねると，“土が重いから”，“土が痛むから” などの回答が多いからである（質問者が他の回答を覚えていられないだけかもしれないが）．

これまで，米麦二毛作を行う水田を対象として仕事に取り組んでおり，どのような土であっても，作物がよりよく生育するためには，種をまいた土壌が適度な透水性，通気性，硬さの場となっていることが重要であり，何を “適度” とするのかが共有すべき情報と考え，不撹乱状態を重視した調査等々おこなってきた．しかし，考えてみれば，その “場” の骨格は，耕うんを筆頭に機械作業に

よって創出されることが多い．素材である各種土壌に対して，適切な判断のもと機械の作業設定がなされた場合に，作業者が期待する作物の生育場が出来上がる．

機械作業と砕土の関係を見た論文に久津那ら（1974），久津那 · 新村（1975）のものがある．結果の整理に使われているのは，土性，含水比，コンシステンシーである．これらは，その後の砕土性に関する論文でも重要項目として出てくる．多湿のときに作業をすると，機体に土がついて難渋するが，土壌付着について検討した世良田ら（1986）でも，含水比で整理している．また，練り返しによる “場” の悪化（透水性低下）を述べている国分ら（1969) も，作業時の含水比（コンシステンシー指数）に注意を払って考察している．含水比は土壌の重さがベースであるし，コンシステンシーは練り返して測定するものである．土性を含めて，素材と素材の性状として撹乱土壌から得られる情報である．不撹乱ではない．

きまった道具で一定の出来上がり（不撹乱）を目指すなら，素材（撹乱）をよく理解しなければならないということを肝に銘じて，今後は，オペレータが現場で “素材をよく理解する” ことの支援につながるような取り組みも考えていきたい．

引用文献

国分ら (1969): 日本土壌肥料学雑誌, 40: 276–280.
久津那ら (1974): 日本土壌肥料学雑誌, 45: 37–41.
久津那 · 新村 (1975): 日本土壌肥料学雑誌, 46: 447–452.
世良田ら (1986): 農業機械学会誌, 47: 493–498.

土壌凍結深制御による畑の生産性向上

中辻敏朗
北海道立総合研究機構

キーワード: 土壌凍結，畑，生産性，社会実装

冬の寒さが厳しくかつ積雪が（道内では）少ない道東の十勝 · オホーツク地域では冬季に土壌が凍結する．しかし，1980 年代後半以降は初冬の積雪量が増え，雪の断熱作用により土壌凍結深は年々減少傾向にある（Hirota et al., 2006; 中辻ら, 2016）．これに伴い、かつては土壌凍結により死滅していた掘り残しの土中のバレイショが翌年萌芽し雑草化（野良イモ）する現象が十勝地域で多発するようになった。その対応として，「雪割り（トラクタに装着した排雪板による除雪）」で土壌凍結深を制御し野良イモを死滅させる技術が開発され（矢崎ら, 2012; 北農研, 2013），野良イモ問題は解決されつつある．

一方，オホーツク地域では，土壌凍結深の年々減少に伴い，春耕時の砕土性の低下や特産であるタマネギ畑での生育後半の窒素切れが目立ち始め，「これは凍結が浅くなってきたせい？」との声が生産者から上がっていた．折しも十勝で土壌凍結深を制御できる上記技術が開発されたため，先進的な生産者はこれを応用して「雪踏み（トラクタに装着したタイヤローラーによる圧雪＝雪密度増加による熱伝導率向上）」で土壌凍結促進に取り組み始めた．ただし，砕土率向上や窒素切れ防止に凍結促進が本当に効果的か，効果があるなら適切な凍結深はどのくらいか等は不明であった．そこで，地元の生産者，農協，農業改良普及センター，農研機構北農研センター，道総研が参集し，共同研究を開始することとなった．

足かけ 5 カ年の研究により，雪踏みや雪割りで最大凍結深を 30cm 程度に制御すると，低地土，台地土，黒ボク土のいずれでも，春期の砕土性改善と無機態窒素残存率の向上（Iwata et al., 2013），時には保水性の改善などにより，タマネギ，ダイズ，バレイショなどの収量が高まることを明らかにした．また既存の土壌凍結深推定システムを改良 · 拡張して農協の情報システムに搭載し，生産者自らが雪踏みや雪割りで凍結深を適切に制御できる体制を構築した．成果の概要は北見農試（2018; 2020），北農研（2020）を参照されたい．

以降は楽しかったこの研究の思い出話を．とにかく，生産者，農協職員，普及指導員のノリの良さが際立っていた．どちらかというと慎重に事を進めがちな我々研究者だが，いい感じの途中結果を彼らに見せると「それ，うちでやってみよう，畑は用意するから」と生産者はノリノリ．「まだはっきりした結果じゃないけれど大丈夫？」と私たち．そうこうしているうちに農協職員と普及指導員が生産者と調整して現地試験の段取りを整えてくれる．雪踏み作業とメチレンブルー凍結管による凍結深モニタリングも進んでやってくれる．まさに「あ · うん」の呼吸で研究はスムースに進んだ．もちろん彼らの熱意に応えるべく，私たちはしっかりデータを取った．

開発する技術のユーザー（生産者）や現場の指導者（農協，普及センター）と最初から一緒に取り組んだことで，得られた成果は急速に普及した．当該農協管内の雪踏み実施面積は，2013 年に 30 ha だったのが 2018 年には 2,200 ha と 70 倍以上に急増したのである．冬の通勤路の周辺で雪踏み畑が年々確実に増えていくのをこの目で見た．職場から約 100 km 離れた知床半島の付け根の町で雪踏み畑を見つけたときは感慨深いものがあった．多くの仲間と一緒に作り込んだ成果が社会実装されていく過程を実感できたことは，私の貴重な財産である．

現職ではこのような研究を楽しむことは叶わない．若手や中堅がこういった楽しい研究を経験できるよう，人と人が巡り会う場や環境作りに尽力していきたい．

引用文献

Hirota et al., (2006): Journal of the Meteorological Society of Japan, 84: 821–833.
北農研 (2013): https://www.naro.go.jp/project/results/laboratory/harc/2012/210a3_01_44.html
北農研 (2020): https://www.naro.go.jp/project/results/4th_laboratory/harc/2019/19_012.html

Iwata et al., (2013): Annals of Glaciology, 54: 157–165.
北見農試 (2018): http://www.hro.or.jp/list/agricultural/result_pdf/result_pdf2018/2018212.pdf
北見農試 (2020): http://www.hro.or.jp/list/agricultural/center/kenkyuseika/gaiyosho/r2/f2/12.pdf
中辻ら (2016): 土肥要旨集, 62: 247.
矢崎ら (2012): 生物と気象, 12: 12–20.

水管理による玄米中 As·Cd 低減技術の開発

中村 乾
農研機構 農業環境研究部門

キーワード: 水田土壌，ヒ素，カドミウム，気相率，稲

私が水田土壌における重金属の動態に興味を持ったのは，“農産物におけるヒ素およびカドミウムのリスク低減技術の開発” というプロジェクトへの参加が発端である．そこではそれまで接点がなかった重金属が身近に存在しうること，食品を介して自分達も摂取しうること，研究者としてそれらの摂取を抑制する方法の開発に寄与できることを知ることができた．そこでの研究対象は，重金属の中でもヒ素（As）とカドミウム（Cd）であった．

As と Cd は摂取による健康被害が報告される有毒元素であり，コメ中濃度の低減はコメを主食とする国の重要課題である．玄米中の As および Cd 濃度はそれぞれ，出穂後 3 週間の土壌中の平均溶存 As および Cd 濃度と相関があり（Honma et al., 2016），玄米中濃度の低減には，土壌中溶存濃度の抑制が重要となる．土壌中の Cd は還元的条件下で不溶化，酸化的条件下で可溶化するのに対し，As は逆の傾向を示す．そのため両者にはトレードオフ関係があるとされる（Arao et al., 2009）．土壌の還元状態を発達させて水稲の Cd 吸収抑制に効果的な長めの湛水は，一方で As 可溶化を促進するため，水稲の As 吸収増加が懸念される．この様に水管理は土壌の酸化還元状態を介して土壌中の As および Cd の不溶化に影響を及ぼすが，研究開始当初，玄米中の両元素を同時に低濃度にする技術はなく，それを実現する水管理が求められていた．

そこで溶存 As および Cd 濃度と気相率の関係解明，玄米中 As および Cd を同時に低減する水管理の開発，その効果の気象 · 土壌条件が異なる水田での検証，さらにそれと同程度の効果を持つ省力化した水管理の開発へと研究を進めてきた．

溶存 As および Cd 濃度と気相率の関係解明では，土壌の溶存 As および Cd 濃度を支配する酸化還元状態が，酸素拡散を通じて気相率の影響を受けると考えられることから，3 圃場に長め湛水区および節水区を設け，各区内多地点から土壌試料を採取し，中干し期，出穂期および収穫前落水期において気相率と溶存 As および Cd 濃度の関係を調べた．その結果は，落水期における土壌中の As 不溶化と Cd 可溶化が直接的には異なるメカニズムで起こることを示すものであった．すなわち，溶存 As 濃度が高いのは気相率が 0.04–0.10 $m^3\ m^{-3}$ 以下の時に限られるのに対し，溶存 Cd 濃度と気相率の間には，ほぼ原点を通る直線で近似される正の相関関係があった．両溶存濃度の関係を気相率の階級別に示すと，Cd 濃度が高い試料は As 濃度が低く，As 濃度が高ければ Cd 濃度が低くなる傾向が見られる一方で，気相率が As 不溶化の閾値（前述の値）より僅かに高い場合には両者が共に低い傾向があった．このことから適切な水管理により土壌の気相率を制御すれば溶存 As および Cd 濃度を共に低く抑えられると考えられた（Nakamura et al., 2018）．

玄米中 As および Cd 濃度を同時に抑制するための水管理の開発では，4 圃場に出穂前後各 3 週間湛水区および間断灌漑区（3 ～ 4 日間の湛水と期間の異なる落水を繰り返す）を設け，体積含水率と Eh を連続測定し，気相率を体積含水率の変化から推定した．また，溶存 As および Cd 濃度の推移を調査し，収穫した玄米中無機 As および Cd 濃度を測定した．3 湛 3 落区（湛水 3 日と落水 3 日を繰り返す間断灌漑区．以下同様の略称），3 湛 4 落区および 3 湛 5 落区では，いずれも落水後に気相率と Eh が明瞭に上昇したが，これらのうち，溶存 As および Cd がともに低濃度に保たれ，玄米中の無機 As および Cd がともに比較的低濃度に抑えられたのは 3 湛 4 落区であった．すなわち，間断灌漑 3 湛 4 落が玄米中無機 As および Cd 濃度の同時低減に有効な水管理であることが示された（中村ら, 2016）．

上述の結果をもとに，間断灌漑 3 湛 4 落が玄米の無機 As および Cd 濃度，収量および品質に及ぼす影響を気象 · 土壌条件が異なる 23 圃場で検証した．各圃場に出穂前後各 3 週間の水管理区として湛水区と 3 湛 4 落区を設けて試験した．玄米中無機 As 濃度は 3 湛 4 落区で湛水区に比べて有意に低下し，低減効果は湛水区の玄米中濃度が高い試験地で大きい傾向があった．玄米中 Cd 濃度は 3 湛 4 落区で高い傾向があったが，試験地の多くでは 0.1 mg kg^{-1} 以下であった．精玄米重は 3 湛 4 落区で僅かに低下する年もあったが，整粒歩合は両区で同程度であった．これらの結果から，気象 · 土壌条件の違いによらず，間断灌漑 3 湛 4 落が，収量 · 品質にさしたる影響を与えることなく，玄米中無機 As および Cd 濃度をともに比較的低濃度に抑えることが可能な水管理であることが明らかになった（中村ら, 2018）．

間断灌漑 3 湛 4 落の問題点として，慣行的な水管理に比べて要する労力が多大になる点がある．現場実行性を高めるには，より省力的な水管理法を開発する必要がある．そのための水管理法として，出穂前後計 6 週間に行う 4 日間の落水回数を 3 回に減らした水管理（落水 3 回）による玄米中無機 As 濃度低減効果を 15 圃場で検証した．その結果，落水 3 回区においても 3 湛 4 落区とほぼ同等の，湛水区と比較して有意な玄米中無機 As 濃度低減効果が認められた（中村ら, 2019）．

今後は玄米中 As·Cd を低減する水管理の省力化を目的に，自動水管理の導入や制御の研究を進める予定である．

引用文献

Arao et al. (2009): Environ. Sci. Technol., 43: 9361–9367.
Honma et al. (2016): Environ. Sci. Technol., 50: 4178–4185.
中村ら (2016): 日本土壌肥料学会講演要旨集, 62 : 5
Nakamura et al. (2018): J. Environ. Qual., 47: 496–503.
中村ら (2018): 日本土壌肥料学会講演要旨集, 64 : 2.
中村ら (2019): 日本土壌肥料学会講演要旨集, 65 : 2.

水の安定同位体を用いた地域の水循環評価

中村公人 *· 吉岡有美 **
* 京都大学農学研究科
** 島根大学自然科学研究科

キーワード: 水の安定同位体，同位体分別，地下水，田面水，灌漑排水

水文学の分野では，水循環の追跡のために水の安定同位体が用いられて久しい．筆者らは地下水涵養機構の解明のために，地下水とその涵養源となる様々な地表水の安定同位体を測定してきたが，今後，土壌中の水 · 物質移動と連結させることによって，その精緻化に加え，灌漑排水管理の評価への応用ができないかと考えている．

水分子を構成する酸素には ^{16}O に対して質量数が異なる ^{17}O と ^{18}O の安定同位体が存在し，水素には ^{1}H に対して ^{2}H の安定同位体と ^{3}H の放射性同位体が存在する．よって，様々な組み合わせの水分子が存在する．トレーサーとしては ^{1}H^{2}H^{16}O と ^{1}H$_2$^{18}O がよく利用され，大部分を占める ^{1}H$_2$^{16}O に対する存在割合を国際標準試料のそれとの相対差で示したもの（千分率）がそれぞれ δ^2H，δ^{18}O と表される．これらの値が高いほど，^{2}H や ^{18}O を含む「重い水分子」をより多く含むとみなすことができる．

水循環評価における水の安定同位体の利用に関しては山中（2020），Sprenger（2016）に詳しい．これをトレーサーとして用いる利点は，他のトレーサーは土壌に吸着したり，水蒸気での移動ができなかったりといった問題があるのに対し，水そのものを目印としていることである．また，分子のわずかな質量差に起因して引き起こされる「同位体分別」を利用すると水循環過程の情報を得ることができる．同位体分別とは，反応（たとえば蒸発）の前後で，重い水分子が軽い水分子よりも飽和水蒸気圧が低いこと，また分子拡散速度が小さいことによって，同位体組成に偏りが生じることをいう．

これまで，石川県手取川扇状地の地下水涵養機構の解明を通して地下水保全に必要な事項を明らかにすることを目的に，地下水流動の定常 · 非定常解析（岩崎ら, 2013; Iwasaki et al., 2014）と並行して，水の安定同位体を調査してきた．本地域の水田用水は手取川から取水されるが，田面水は蒸発の影響を受け，同位体分別により重い水分子が濃縮し，δ^2H，δ^{18}O の値が手取川河川水よりも高くなる．河川水と田面水は主要な地下水涵養源であり，時空間的に河川水と田面水，そして地下水の δ^2H，δ^{18}O を測定することにより，地下水に対する河川水と田面水の寄与を時空間的に推定することができる．主要イオン濃度などの結果とも合わせ，河川から地下に涵養された水はとくに右岸に向かって流動し，その過程で降水と田面水の影響を受けていることを示した（Yoshioka et al., 2016）．また，手取川源流域で生じた地すべり性斜面崩壊によって 2015 年 5 年から濁水流下が発生し，2015，2016 年に扇央部河川両岸周辺で急激な地下水位低下が生じた際の地下水涵養機構の変化を同様に検討し，土砂堆積による河床と水田からの浸透量減少の程度が右岸側と左岸側で異なることを示した（吉岡ら, 2018 ; Yoshioka et al., 2020）．

このように水の安定同位体は，水田地域での地下水涵養機構の定性的評価においては極めて有効であるが，高精度な定量化には課題がある．その一要因が田面水の安定同位体が時間的に変化することである．田面への入力成分である降雨と用水自体の値は変化し得る．また，田面水が蒸発を受ける程度は，取水 · 排水管理に影響される．さらに，田面水が地下水に到達するまでの時間も問題となる．さらなる要因は，土壌内で蒸発の影響を受ける時期があることである．つまり，浸透過程で安定同位体の値が変化する可能性もある．これらを土壌物理学的視点から明らかにしたい．

HYDRUS 開発者の Šimůnek らのグループは，HYDRUS-1D の溶質移動計算を修正して水の安定同位体解析を行った論文を発表している．Stumpp et al.（2012）は，一般の溶質と異なり，水の蒸発によって同位体が同時に失われるように修正し，Zhou et al.（2020）はこれに同位体分別を組み込んでいる．これらを参考にしつつ進めていきたい．

また，こうした取組みにより灌漑排水管理の評価ができないであろうかと考えている．たとえば，掛流し灌漑が行われる場合には排水の値は用水に近いであろうし，反復利用が行われる地域では，下流域ほど用水の値は高くなると予想できる．浸透性の高低も考慮しながら，水の有効利用につながる農業地域の水管理の診断が可能な水の安定同位体を用いた手段を構築したい．

引用文献

岩崎ら (2013）: 水文 · 水資源学会誌, 26(2): 99–113.
Iwasaki et al. (2014) : Hydrogeology Journal, 22(8): 1841–1855.
Sprenger et al. (2016) : Reviews of Geophysics, 54(3): 674–704.
Stumpp et al. (2012) : Vadose Zone Journal, 11(1): 14.

山中 (2020)：環境同位体による水循環トレーシング, 共立出版，東京.
Yoshioka et al. (2016)：Hydrological Processes, 30: 2804–2816.
吉岡ら (2018)：地下水学会誌, 60(2): 205–221.
Yoshioka et al. (2020)：Hydrological Processes, 34: 3539–3554.
Zhou et al. (2021)：Environmental Modeling and Software, 143: 105–118.

水管理に伴う水田の窒素環境の変化

西田和弘
農研機構農村工学研究部門

キーワード: 水管理，水田，窒素，温度

私が，水管理に伴う水田土壌の窒素環境の変化について研究を開始したきっかけは，農業生産の気候変動適応策に関するプロジェクト研究に参加したことである．この中で，水稲の高温登熟障害（登熟期の高気温に伴う米の外観品質低下）（森田, 2011）を抑制するための水管理法の研究を担当することとなった．

研究当初は，水管理による高温障害抑制効果は，水温低下に伴う稲体（穂，葉，根）の温度低下によって生じると考えていたため，低温の用水を用いたかけ流し灌漑試験等に基づく，水管理の条件（水量・水深・時間帯等）と水温低下の関係，および，水温低下と稲体温度・地温低下の関係の定量化・モデル化（西田ら, 2014: Nishida et al., 2021）に取り組んだ．一方で，多量の用水を用いた灌漑により，水田水温や地温を大幅に低下させたにも関わらず，米の外観品質が悪化する結果が得られる（西田ら, 2019）など，当初期待した水温低下に伴う米の外観品質向上効果は認められなかった．

この原因として，水管理変更に伴う稲体の窒素状態の変化（悪化）が米の品質を悪化させた可能性を考えた．これまでの肥培管理の研究により，稲体や玄米の窒素状態が米の外観品質に影響すること（追肥による外観品質向上など）が明らかにされている（森田, 2011）．そこで，玄米の窒素濃度（タンパク質含有率）を調べたところ，水温が低い地点ほど玄米の窒素濃度は低くなることが明らかになった（西田ら, 2019）．

このように水管理は，水田の窒素環境を介して稲体や玄米の窒素状態に影響に与える可能性がある．水稲の窒素状態は外観品質だけでなく収量・食味にも影響するが，我が国の水稲作ではこれらの全てが重視される．そのため，肥培管理だけでなく水管理に関しても，水稲の窒素状態を最適に制御できる緻密な管理が必要だと考える．

水管理が水田の窒素環境に与える影響は，①水収支（灌漑水の流入，田面水の流出）の変化に伴う窒素の流出入量の変化，②土壌環境（地温，水分等）の変化に伴う土壌中の窒素動態（移動・形態変化）の変化を介して生じると考えられる．灌漑による水田への窒素供給量は，灌漑水の窒素濃度と水量に比例する．そのため，灌漑水の窒素濃度が高いほど，灌漑による稲や玄米の窒素吸収量への影響は大きくなる．また，水田の窒素収支，稲の窒素吸収は，微生物活動（硝化・脱窒，無機化・有機化）に伴う土壌中の窒素の形態変化に大きく影響される．そのため，水管理はこれらへの影響を介しても水田の窒素環境に影響する．例えば，窒素の無機化は地温が高いほど促進される（土壌環境分析法編集委員会編, 1997）ため，水管理による地温変化は窒素の無機化量を増減させる．また，水田中の窒素は，水田内を移動する過程で脱窒によって失われる（江口, 2012）が，脱窒による窒素除去効果は地温が高いほど大きくなる（田渕ら 2005）．水田内の微生物活動は，地温，水分量，pH，酸化還元電位，炭素量，酸素濃度などの土壌環境の変化に依存するが，これらはいずれも水管理によって変化する．そのため，水管理が水田の窒素環境および水稲の窒素吸収に与える影響は，複数の要因の変化によって起こりうる．

このような水管理に伴う水田の窒素環境変化の評価・予測には，土壌物理学が得意とする土壌中の水・熱・物質移動・動態の測定やモデル化・シミュレーションの技術が不可欠である．水田環境や水管理の多様性を踏まえて水管理－水田の窒素環境の関係を理解するためには，灌漑水，土壌，気象条件が異なる様々な現場の窒素収支・動態に関する実測データを蓄積することが必要となる．また，水田の窒素環境を最適化する水管理法を明らかにするためには，水管理が影響する様々な要因を考慮した予測モデルによる研究が不可欠になる．窒素の形態変化を考慮した水田の窒素移動モデルによる水田の窒素環境・窒素収支のシミュレーション（中村・取出, 2007；Tan et al., 2015）は，水管理－水田窒素環境のさらなる理解，最適な水管理条件の解明にとって有益な情報を提供すると考える．

これまでの水管理－水田窒素環境の研究は，窒素流出（Peng et al., 2011）や窒素除去機能（田渕ら, 2005）に着目した研究が主流であるが，水稲栽培への影響に関しても重要な役割を持つと考える．今後，このような観点に基づいて，様々な条件下の水田の窒素環境，土壌の物理・化学性の測定，数値シミュレーションを行うことで，水管理が水田の窒素環境に与える影響の解明，窒素環境を最適化する水管理法の開発に貢献したいと考えている．

引用文献

江口 (2012): 土壌の物理性, 120: 29–38.
森田 (2011): イネの高温障害と対策, 農文協, 東京.
中村・取出 (2007): 土壌の物理性, 105: 83–97.
日本土壌肥料学会編 (2005): 水田土壌の窒素無機化と施肥, 博友社, 東京.
西田ら (2014): 農業農村工学会論文集, 294: 25–33.

西田ら (2019): 農業農村工学会論文集, 87(2): I_219–I_226.
Nishida et al. (2021): Agric Water Manage., 245: 106553.
Peng et al. (2011): Paddy Water Environ. 9: 333–342.
田渕ら (2005): 土壌の物理性, 99: 65–72.
Tan et al. (2015): Agric Water Manage., 150: 67–80.

水食を予測する

西村　拓
東京大学大学院農学生命科学研究科

キーワード: 水食，農地保全，気候変動，プロセスモデル，USLE

令和 2 年 3 月閣議決定の食料・農業・農村基本計画や令和 3 年 3 月閣議決定の土地改良長期計画では水田の汎用化・畑地化, 畑地の高機能化や中山間地など条件不利地における生産農地の選択と集中などが挙げられている．その結果，水田主体であった過去に比べて，畑地や草地，場合によっては条件不利地に分布する不耕作地の保全について真剣に取り組む必要が生じる．土壌保全は，土壌，地形，気象条件によって保全対策のコストや効果が大きく異なるため，侵食量の予測や対策の評価を適切にすることが今まで以上に求められるようになると考えられる．

水食を予測する手法として，1930 年代から米国で行われてきた圃場枠試験データを用いて 1970 年代に提案された，農地からの年間水食量を推定する統計モデル Universal Soil Loss Equation（以下 USLE）が事実上，最も普及している．その後，いくつかの改良があり，現在は 2005 年に発表された Rivised USLE2* が主流である．また近年，GIS と組み合わせて広域の生態系サービスや土地の劣化リスクを評価するツール（PESERA*）として使われることもある．東日本大震災時の原子力発電所事故で放出された放射性物質の動態予測モデルでも複数のモデルにおいて，侵食に関するサブルーチンとして，USLE が使われた（たとえば，Kitamura et al., 2014）．

USLE は，観測もしくは経験式で決める降雨パラメータ R と土壌パラメータ K の積に斜面長 (L)，傾斜 (S)，植生・作物種 (C)，実施した土壌保全対策 (P) を反映する無次元のパラメータ L，S，C，P を乗じて水食量を予測するものである．

年間水食量 A ＝ R × K × L × S × C × P

（米国内慣行単位，SI 単位系等複数の単位系があるため，ここでは単位は省略する）

R，K，L，S，C，P は，米国内の圃場実験と気象観測データから統計的に得た経験的パラメータである．パラメータの値を決めるために，モノグラフと呼ばれるマニュアルがある，一方，米国内と比べて日本国内の降雨の性質が異なることが報告されている（三原, 1951）．また，土壌パラメータ K についても，土壌の性質は地域性が強く，米国内の土壌パラメータを国内で適用することには問題が指摘されている（種田, 1976）．谷山（2003）は，火山灰土を対象に，日本国内の土壌データを使って，モノグラフの土壌パラメータ K を推定する手法を提案したが報告書に留まっている．1980 年代後半に国内数か所で枠試験を行い，そのデータを使って設計基準「改良山成工」の改訂を行ったとされるが，そのデータはサイエンス的に使われてはいない．

USLE は一年間の水食量を推定する統計モデルであるが，一方で大雨の時の水食量を把握したいという需要がある．そこで，別個のモデルで降雨時の地表面流出水量を予測し，これと組み合わせることで個々の降雨イベントの水食量を予測する研究（Modified USLE）がある．また，上述の放射性 Cs 動態予測モデルや SWAT* も同様に水文モデルで地表面流去水を算定し，侵食を予測する部分に USLE を適用している．多くの場合，降雨による侵食性を表す係数に地表面流出水の寄与を加算することで降雨イベント毎の水食量を表現する（たとえば，Kinnell and Risse, 1998）が，降雨による侵食能力を表す R パラメータが年間侵食量をターゲットとした統計モデルであることを考慮すると，一年と一降雨中という時間スケールがまったく異なる二つの要因を一つのパラメータにまとめることは，論理的に疑問が残る．

圃場から流域における懸濁物質の流出にスケールを拡大すると，予測された年間水食量と河川，湖沼で観測される水の濁度との間に相関がない例も多い．これは，降雨の性質，無降雨期間など降雨流出と水食量を左右する条件が降雨イベント毎に異なるためである．加えて日本独特の条件として，緩急様々な傾斜地に展開する農地，特に水田や田畑輪換圃場は懸濁物質の流出に大きく影響するが，この要因は欧米では一般的で無く，水田地形を考慮した圃場から流域スケールの水食モデルが必要と考えられる．

近年，ゲリラ豪雨の頻度増加等，温暖化に伴う降雨の物理性の変化が指摘されている．同じ日降雨量，月降雨量であっても，降雨イベント中の降雨強度（短間降雨強度）が大きくなれば降雨の地表面流出やそれに伴う土砂流亡のリスクが大きくなる．また，降雨中の表層クラストの形成は一時的に地表面流出を促進するが，乾燥に伴う亀裂発生や耕起によってクラストが壊れるとその影響は見えなくなる．こういった，USLE では想定していない現象や時間的に不均一な現象に対する USLE 系モデルの予測能力の限界に対して，より多くの素過程を考慮しながら降雨毎の水食を予測するモデルが検討されてきた．特に 1980 年代後半からパソコンの能力が向上することと平行して，いくつものツールが開発されてきた（WEPP*，KINEROS*，EUROSEM* 等）．これらは，上述の SWAT や Modified USLE とは異なり，明示的にリル侵食，インターリル侵食を分けて土砂流亡を考えると共に降雨の浸入・流出，土砂の剥離や運搬，堆積についてもモデル化を試みることが特徴である．

インターリル・リル，土壌の剥離・運搬・堆積や上述のクラストの形成といった素過程を分離，モデル化しても，それぞれのモデルが物理的であるかどうかはまた別の話である．リル内を流れる水による侵食・土砂輸送については，河川における浮遊砂の動態を対象とした物理モデルが使われることが多いが，インターリルの侵食や土壌の剥離（uptake）の部分は，メカニズムの理解が及ばず，物理的な表現が困難であるため，素過程について経験モデルを使用していることがある．その意味で，いくつかの既往の論文で上記のモデルを「物理モデル」と呼んでいるが，実際には物理モデルと経験モデルの組み合わせでできている「プロセス（過程）モデル」と理解すべきである．対象とする素過程によっては，要素実験でパラメータを求める必要がある．この時，要素実験の時空間スケールにも留意が必要である（Polyakov and Nearing, 2003）．

プロセスモデルの課題として，対象とする素過程の数を増やして現象の表現力を高くすると必要なパラメータが増えてしまうことと，ユーザーの教育が不可欠であることがある．USLE を水文モデルと結合した AGNAPS* では 22 パラメータ程度だが，EUROSEM では 60 程度，WEPP では，多くの要因を考慮すると入力を要するパラメータが 100 を超える場合がある．また，結果として出力する数値も多種にわたるため，これらを適切に理解し，矛盾なく考察することは初心者にとっては容易ではない．

20 世紀前半の USLE から 20 世紀後半以降に開発された WEPP，EUROSEM といったプロセスモデルまで，多く労力，コストをかけてモデルが作られてきた．ここでは，侵食に関わる観測データとそれを裏付ける土壌の物理化学性データの蓄積量がモデルの性能を左右する．日本においては，米国のような大規模で系統的な侵食試験データはない．土壌の物理化学性データについて，農水省で実施した過去の土壌環境基礎調査，土壌機能実態モニタリング調査等で一定量のデータの蓄積を行っていることを考慮すると，残念ながら，一からモデルを構築するよりは，既存のモデルのローカライズと適用検証によって現場に実装可能なものにしていくことが現実的な対応となるように思われる．

水食に関する研究や技術開発，普及が土壌物理学であるかどうかは議論の余地があるが，土壌物理学が活躍できる場であることは疑いがない．その観点でこの拙文を書いた．皆様からの批判，アドバイス等いただければ幸いである．

*モデルの参照先（2021 年 11 月時点）

AGNPS https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/null/?cid=stelprdb1042468

EUROSEM https://www.lorenzo-borselli.eu/eurosem/downloads.html

KINEROS https://www.tucson.ars.ag.gov/kineros/

PASERA https://www.isric.org/projects/pan-european-soil-erosion-risk-assessment-pesera

RUSLE2 http://www.rusle2.org/

SWAT https://swat.tamu.edu/

WEPP https://www.ars.usda.gov/midwest-area/west-lafayette-in/national-soil-erosion-research/docs/wepp/research/

引用文献

Kinnell and Risse (1998): Soil Sci. Soc. Am. J. 62(6), 1667–1672.

Kitamura et al. (2015): Anthropocene, 5: 22–31.

三原義秋 (1951): 農業技術研究所報告 A 物理統計 (1): 1–58.

Polyakov and Nearing (2003): CATENA, 51, 33–43.

種田一郎 (1976): 農業土木学会論文集，65: 15–19.

谷山一郎 (2003): 農林水産業及び農林水産物貿易と資源・環境に関する総合研究, 414: 1–307.

土壌構造と水移動について

西脇淳子
茨城大学農学部

キーワード: 土壌構造，間隙連続性，X 線 CT，負圧浸潤計，リビングマルチ

わたしが土壌構造の重要性を再認識したのは，米国でのサバティカル時に圃場で現場透水試験を行ったときである．耕起圃場の土壌は降雨で締め固められ，時間経過とともに透水係数が下がると予測していた．しかし，耕起後の早い段階では減少した透水係数が，時間経過とともにあがることがあった．さらに，初期にはすぐに一定値となった負圧浸潤計での浸潤速度が，日が経つにつれ，なかなか一定にならないという事態に陥った．

何が起きているのかと，試験終了後に地表面を観察すると，ミミズの巣穴が観測され，周辺にミミズの糞塚があることに気づいた．試験前には地表面に穴など確認できなかった場所で，水を流すと穴が露出することがあった．また，降雨イベント後にできたクラスト状表層を少しはがしてみると，そこにはミミズの巣穴が出てくることがあった．土壌表面とその下層では，間隙構造，間隙の連結性が異なることを目の当たりにした．浸潤速度が安定しなかった原因はこれだけではないのかもしれないが，土壌構造と水移動，特に，生物活動に起因した土壌間隙構造とその連結性の変化による水移動の変化を再認識した．地表面からはわからない状態が存在している。土壌構造と水移動は古くから研究され，さまざまな角度から議論されてきたテーマであるが，土壌中での水，熱，溶質などの移動を理解するにはやはり重要なテーマであると考えさせられた．

土壌間隙構造の可視化は，土壌物理学分野で以前よりX 線を用いた画像撮影と水移動に関する研究が行われてきた．徳永ら（1985）によるマクロポアと透水性の関係，成岡ら（1988）によるマクロポアに起因する透水性の定量評価，Mori et al.（1999）による構造化された不攪乱土を用いたマクロポアと排水性に関する研究など，貴重なデータや手法が報告されている．

原位置では，水移動から土壌間隙構造を検討する方法として，負圧浸潤計を用いた通水可能なマクロポアおよびメソポア率の計算が行われている（Watson and Luxmoore, 1986，Wilson and Luxmoore, 1988）．また，小杉 · 大手（1992）は，室内で森林土壌を用いた透水試験を行い，個々の土壌間隙の透水性を意味する間隙のコンダクタンスを円管のコンダクタンスと比較することで，土壌間隙の連結特性を解析する手法を検討した．

このように，さまざまな視点で検討されてきた土壌間隙構造と水移動に関して，現在は，生物的な側面からの検討も多くみられる．生物が作る間隙，バイオポアと水移動に関して，Bastardie et al.（2003）は，コアサンプルのX 線撮影からミミズの巣穴画像を取得して巣穴の全長や数，分岐率，連続性などを測定し，飽和透水係数結果と結びつけて，ミミズ種間の水理特性の違いが，主に巣穴の連続性の違い，土壌表面の開口部の存在，および巣穴の深さに起因することを示している．また，Timms et al.（2018）は，粘土質帯水層の粒径分布，顕微鏡写真，トレーサーテスト，および μCT 画像の調査結果より，選択流が古い根の跡によって形成された連続マクロポアや埋没マクロポア内で生じていることを確認した．

現在，大学では県からの委託研究で，リビングマルチを用いた栽培体系の研究に携わっている．リビングマルチとは，主作物の栽培期間を通して，または一部の期間に栽培することで，雑草防除や主作物への有機物供給などに利用される作物である（三浦, 2009）．生物的，化学的な有用性をもつとして現場で利用されているが，物理的な効果はないのかと考えた．もちろん，地表面被覆による地温の上昇抑制はメリットであるが，さらなるメリットはないかと考えた．根張りの状況や枯死後のマクロポア形成が，土壌水の移動や保水形態に影響して主作物の生育に好条件となれば，リビングマルチの土壌物理性からの利点として挙げられる．この点を，これまでに述べたさまざまな視点で検討していきたいと思っている．

透水性や保水性などの物理性は，測定に時間や労力を要するため，実際の農作業現場では生物性や化学性と比較してなかなか重視されない．しかし，土壌の特性評価，農業の活性化には，物理的な測定や指標を含めた総合的な土壌評価が重要と考えられる．以前からの流れを汲み，新たな視点を取り入れて地道に調査研究を積み上げることで，農業における土壌物理の重要性を広めていきたい．

引用文献

Bastardie et al. (2003): Applied Soil Ecology, 24: 3–16.
小杉 · 大手 (1992): 日本林学会誌，75: 373–382.
三浦 (2009): 東北農研研報, 110: 129–175.
Mori et al. (1999): Soil Science Society of America Journal，63: 733–740.
成岡ら (1988): 土壌の物理性, 56: 2–14.
Timms et al. (2018): Water Resources Research, 54: 3122–3138.
徳永ら (1985): 土壌の物理性, 51: 49–62.
Watson and Luxmoore (1986): Soil Science Society of America Journal, 50: 578–582.
Wilson and Luxmoore (1988): Soil Science Society of America Journal, 52: 329–335.

大規模畑作地帯における リモートセンシング技術の利用について

丹羽勝久
株式会社ズコーシャ

キーワード: リモートセンシング，可変施肥，排水不良

私の所属する株式会社ズコーシャは大規模畑作地帯の帯広市に本社を置く建設コンサルタント会社であり，土地改良事業に関わる調査 · 設計が主な業務である. 私は1996 年の入社以来，一貫して調査業務を担当してきた．そのような中，1999 年に高解像度衛星イコノスが打ち上がることとなり，会社の新たな商材としてリモートセンシング技術の大規模畑作地帯への活用を検討するように命を受けた．それがタイトルにあるリモートセンシングとの出会いである．初めて見る高解像度衛星の画像は一筆圃場内の作物生育のむらや土色のばらつき等を鮮明に捉えており，何とかそれらの情報を圃場管理に活用できないのかと考えた．

しかし中々実利用化は難しく，「ドローン画像を活用した窒素可変施肥システム」が商材として出来上がるまでに 10 年以上の月日を費やした．この技術は，リモートセンシング技術で推定可能な圃場内の土壌腐植含量のばらつきが，相対的に窒素肥沃度の高低を反映することに着目したものである（丹羽ら, 2016）．亀の歩みではあるが，少しずつユーザーも獲得していくことができた．しかし，そのシステムの導入効果には圃場間差が大きく，作物生育のバラツキが窒素肥沃度以外の要因，特に排水不良等の土壌物理性に影響を受けている圃場では効果が発揮しづらいことを確認した（丹羽ら, 2018）．当然と言えば当然であるが，やはり可変施肥等，スマート農業の実現のためには基盤となる土壌の物理条件が良好でなければいけないことを改めて感じた．

以上のことから現在，衛星画像を活用した可変施肥の適地圃場の判定（丹羽ら, 2021a），さらには圃場の作物生育が局所的に排水不良に影響を受けている圃場の抽出（丹羽ら, 2021b）等に取り組んでいる．今後はさらにリモートセンシング技術を活用し，土壌物理に関係する農業情報収集の取り組みを強化していきたいと考えている．

引用文献

丹羽ら (2016): 農業農村工学会誌, 84(9): 749–752.
丹羽ら (2018): 土肥誌, 89: 544–551.
丹羽ら (2021a): 土肥誌, 92: 249–254.
丹羽ら (2021b): 土肥誌, 92: 459–464.

土壌中における微細気泡挙動について

濱本昌一郎
東京大学大学院農学生命科学研究科

キーワード: 微細気泡，コロイド輸送

前職の埼玉大学時代に，地震工学分野の岩下和義 教授から封入空気の存在によって地盤の液状化強度が大きく異なるという実験結果を見せて頂いた．岩下教授と液状化対策として気泡水を地盤に注入する工法について共同研究をはじめたことが，私が土壌内の微細気泡挙動に興味を持ったきっかけである．

2017 年に ISO（国際標準化機構）で微細気泡（水中で極微細化した気泡）に関する用語が統一され，気泡径 100 μm 未満の泡がファインバブル（FB）と名称され，FB のうち気泡径 1 ～ 100 μm がマイクロバブル，気泡径 1 μm 以下をウルトラファインバブルと分類された．

FB は，液体中での分散性に優れ，気液界面での高い物理 · 化学的吸着効果を有する．近年，FB の理化学的特性を活用した応用技術が様々な分野で検討されている．農業生産の場では，種子の発芽率向上，植物の生育促進などにおいて効果があることが報告されている（例えば，Liu et al., 2016; Iijima et al., 2020）．他にも，石炭系炭化水素（油分）等の有害物質による土壌汚染サイトでは，FB を含む気泡水を注入することで，FB への汚染物質の吸着作用や FB による汚染物質成分の剥離効果を利用した浄化効果が報告されている（例えば，Jenkins et al., 1993; Rothmel et al., 1998）．

土壌環境に FB を利用する際には，FB の土壌内移動とその運命予測が重要な鍵を握る．FB は水と気体との界面を有するコロイド態物質の一種であり，多孔質体内におけるコロイド挙動と考えることができる．Wan ら (2001) や Hamamoto ら（2018; 2019）は，FB 水を用いたカラム通水実験を実施し，FB 水の化学的特性（pH やイオン強度など）や充填粒子径が FB の移動特性に与える影響を調べた．これらの研究では，FB の流出挙動に対して，FB の充填粒子への可逆的な付着 · 脱離と非可逆的な付着を考慮した移流分散方程式を適用している．また Hamamoto ら（2019）は，充填粒子表面の粗度が FB の沈着に与える影響について，FB と固体表面間の相互作用エネルギから考察した．

FB の土壌（多孔質媒体）内移動特性に関する実験的研究はいくつか見られるものの，固体コロイド粒子の多孔質体内移動特性に比べて FB 挙動に関する研究例は極めて少なく，より一層の基礎的知見の蓄積が必要である．実験データの蓄積とともに，より精度の高い FB 移動モデルの構築が，FB を土壌環境に応用する上で必要不可欠と思われる．特に，土粒子と FB との相互作用の理解に加え，土壌環境に FB を応用する際には，土壌内に内在する無機 · 有機物由来のコロイド粒子との相互作用ならびにこれらコロイド粒子と FB との同時輸送現象を扱う必要がある．共振式質量分析計など，微粒子と FB を区別しそれぞれを定量的に評価する装置を用いて，より複雑な系での FB 移動現象を解明していく試みが求められる．

引用文献

Hamamoto et al. (2018): J. Contaminant Hydrology, 208: 61–67.
Hamamoto et al. (2019): Langmuir, 35: 6853–6860.
Iijima et al. (2020): Plant Production Science, 23 366–173.
Jenkins et al. (1993): Biotechnol. Prog., 9: 394–400.
Liu et al. (2016): Langmuir, 32:11295–11302.
Rothmel et al. (1998): Environ. Sci. Technol., 32: 1667–1675.
Wan et al. (2001): Water Resour. Res., 37: 1173–1182.

有機農業と土壌物理性

笛木伸彦
北海道立総合研究機構農業研究本部

キーワード: インテークレート，雑草，粗孔隙，ミミズ，有機農業

我が国の農林水産省は 2021 年 5 月 12 日，「みどりの食料システム戦略」を打ち出した．同戦略は，「2050 年までに耕地面積に占める有機農業の取組面積割合を 25 %（100 万 ha）に拡大」を目指すとした．現状が 0.5 %（2.4 万 ha, 2018 年）であるから，よほどの所得保障がない限り途方もなく高いハードルと言えよう．このことを目の当たりにし，久しぶりに体内で熱が疼いた．

今から約 15 年前，有機農業の是非を問う機会に多く遭遇し，土壌学者の端くれとして意見を持てるだけの経験が欲しいと痛感した．当時の勤務地場内に有機農業圃場を造成し，コムギ · バレイショ · 大豆による輪作試験

を行い，慣行農業と比較した（十勝農試, 2011）．無化学肥料による緩慢な養分供給も作物生育を遅延させたが，病虫害による減収はすさまじく，特にマメシンクイガは大豆の製品収量をほぼゼロにした．データで表しきれなかったが，作期中は朝から晩まで毎日ホー除草に没頭した．それでも雑草の発生力は日に日に勢いを増し，土と「もやし」をかき混ぜているような錯覚と徒労感に襲われた．土壌の空気孔隙が増したのは（十勝農試, 2011），この「雑草根もやし」が主因と思っている．

ほぼ同時期, ポーランド留学の経験をいただいた（笛木, 2021）．現地の有機農業－慣行農業長期連用試験（ポーランド農業省の研究所，Eutric Fluvisol，土性 SiL）の有機農業区・慣行農業区土壌の物理性を比較する好機に恵まれた．有機農業土壌は慣行農業土壌よりも現地測定・室内測定ともに明らかにインテークレートが大きく，また深さ 8 cm 以浅での粗孔隙率が有意に大きかった．この理由は，有機農業土壌においてはミミズが多く生息し，また雑草繁茂に伴う植物根量の増加により粗孔隙が増加するためと思われた（Fueki et al., 2012）．

ただし，この結果を単純に「有機農業は土壌の物理性を改善する」というように捉えるべきではないことを申し上げたい．まずミミズについて，実験を手がけた張本人は，確かに有機農業土壌においてより多くのミミズを目撃した．この理由は，主に有機農業区にミミズのエサとなる有機物（肥料として投入された「ぼかし」や繁茂した雑草の遺体）が多かったことによるものであり（Pfiffner and Luka, 2007），ミミズに悪影響を及ぼすのは一部の殺虫剤に限定されている（Siegrist et al., 1998）．さらに言うなら，雑草根が粗孔隙を増やすとしても，雑草繁茂を容認できる農業生産などあり得ない．他にも，有機農業が化学肥料と化学農薬を「禁じ手」とする限り，解決不可能な問題が明らかに残る．冷静な議論と理解が進むことを，心から望む．

引用文献

Fueki et al. (2012): Soil Sci. Plant Nutr., 58: 65–69.
笛木 (2021): 北農，88: 165–177.
Pfiffner and Luka (2007): Appl. Soil Ecol., 37: 184–191.
Siegrist et al. (1998): Agric. Ecosystems Environ., 69: 253–264.
十勝農試 (2011): 畑輪作条件下での有機栽培における地力推移・作物収量・病害虫発生の特徴と雑草抑制対策, https://www.hro.or.jp/list/agricultural/center/kenkyuseika/gaiyosho/23/f2/20.pdf

間隙構造と土壌物理性の関係

藤川智紀
東京農業大学

キーワード: 透水性，保水性，土壌改良材，緑化資材

東京農業大学に勤務するようになってから，学生やOB，OG，その知り合いの方などから農地土壌の理化学性に関する相談を受けることが多い．対象は畑（転換畑含む），樹園地が多いが，相談に訪れるほとんどの農家の方が自分の農地の「排水不良」を問題視している．排水不良の対策としては，土壌改良材などの資材の混合による排水改良がすぐに思いつくが，用いる資材や手法の特徴については教科書的な知識でその場を取り繕えても，相談者が最も知りたい「どれをどれだけ入れればいいか」という質問に対しては答えを持ち合わせていないのが現状である．次の機会には有益な情報を提供しようと思いながらも，毎回それに必要な勉強の時間を取れず同じ思いをするのが情けない限りである．

大学院生時代は土壌中のガス挙動を研究テーマとしており，ガスの拡散移動と土壌の乾燥密度や撹乱について測定した経験がある（Fujikawa and Miyazaki, 2005）．土壌のガス拡散係数は気相率に依存することが知られているが同じ土性，同じ気相率で比べると，乾燥密度が高い方が，また不撹乱土の方が撹乱土を再充填したものよりも拡散係数は大きくなる．間隙中のガス移動の効率を考える中で，間隙径分布同様，間隙の途中の膨らみや枝分かれ，行き止まりといった間隙の形状が移動現象に与える影響に興味を持った．将来，耕耘や資材の混合による間隙構造の変化をモデル化して，様々な移動の係数の変化を予測する研究ができれば面白いなと思ったが，同時に高度な数学的センスの必要性も痛感していた．

日本においても以前より，間隙構造をモデル化し土壌の物理性を表現することを試みる研究（例えば，原口, 2000）や，間隙構造を可視化して物理性と関連づける研究（例えば，岩間ら, 1992）が進められてきた．これらの研究を発展させ，土壌改良材の種類や量をパラメータとして間隙構造の変化，さらに物理性の変化を表すようなモデルができればより効率的な排水改良が可能になると期待される．特にコンピューターによる画像処理や各種計算の速度は急激に上昇しており，うまく応用できれば今後の研究に貢献すると思われる．一方，それぞれの移動係数，さらには現場での物質移動を正確に予測しようとすると，モデルは複雑化せざるを得ない．そのため，現場での適応に耐えられるようなアバウトな，ブラックボックス型のモデルの構築も必要になるかも知れない．もっとも，現場で求められる「十分な排水性」を数値化するということのハードルの高さも感じている．

現在の研究室では水分特性と飽和透水係数の測定装置が主力選手であるが，室内実験での基礎的なデータの蓄積ならできるかと思い，少し実験をしてみた（藤川ら,

2013）．当たり前の結果ではあるが，土壌と混合する資材の形状や硬さなどが間隙構造に影響を与えることは確認できた．なかなか続いて発表する成果は蓄積できていないが，現場からの排水改良の相談も続いており，もう少し土性や資材の幅を拡げて実験して何かが見いだせればと思う．また大学の組織改編で新学科に異動後，同じ学科の所属になった教員から，特殊緑化（屋上緑化，壁面緑化）の資材の保水性，透水性についての問い合わせを受けた．土層圧は数 cm ～ 30 cm であり，pF も 2 を超えることはまずない領域での話であるが，統一した基準で評価されてはいないとのことで，土壌同様の測定法で得られた水分特性や飽和透水係数が評価の基準になるかどうかを検討している．発泡により間隙を作っている資材や繊維を重ねて間隙を作る資材など，間隙形状もまちまちであり，測定で得られた物理性と間隙構造の関係には興味深いと共に手強さを感じる．特殊緑化業界に貢献とまではいかないが，これまでの研究で得た知識が少しでも役に立ったり，逆に土壌の間隙構造の解析にも援用できるアイデアに繋がったりするといいなと思っている．

引用文献

Fujikawa and Miyazaki (2005): Soil Sci., 170(11): 892–901.
藤川ら（2013）: 東京農大農学集報, 57(4): 267–274.
原口（2000): 農業土木学会論文集, 209: 15–25.
岩間ら（1992): 土壌の物理性, 66: 11–18.

転換畑における水移動について

宮本輝仁
農研機構農村工学研究部門

キーワード: 亀裂，粗間隙流，耕盤層，FOEAS

私が転換畑の水移動に興味を持ったのは，“農地フル活用” というプロジェクトに参加した時である．暗渠に立ち上げ管をつけて地下水位を制御することにより窒素負荷を削減する研究を行ったのがきっかけである．以前，サイフォン式暗渠排水が提案されており（井上ら, 1994），試してみたが，素人には難しかった．

これを機に，転換畑の水移動について調べてみると，わが国では粘土質転換畑では主に土層内の亀裂等を通じて地下排水が行われることが知られていること（例えば，長谷川, 1986; 井上, 1992），そして，波多野（1984）や井上（1992）は亀裂を通じた水移動の卓越した土層からの排水量や溶質移動の変化を予測するモデルを構築しているが，作土層の土壌水分変化を予測するまでには至っていないこと等がわかった．近年，地下水位制御システム（FOEAS）を施工した圃場で転換畑利用時の土壌水分量の変動について検討されている（中野ら, 2014; 望月ら, 2016; 坂田ら, 2017）．しかし，野外観測結果の解析のみで，現象をモデル化して一般化を図るような研究は少ないようだ．

海外では，主として節水の観点から地中に灌水チューブを埋設した潅漑方法の研究や暗渠排水口の高さを制御して地下灌漑や暗渠排水の水質改善に関する研究が行われた．しかし，対象とする土層は亀裂の少ない畑の土壌が多いため，これまでの不飽和流モデルで解析が行えるような条件であった．

今後，水田転換畑の作土層内で生じる粗間隙流と耕盤層の存在による複雑な水 · 溶質移動のモデル化を行うことにより，これまで得られている観測結果の解釈や水田転換畑で野菜栽培を行う際の適切な養水分管理技術の確立に貢献したいと考えている．

引用文献

長谷川 (1986): 土壌の物理性, 53: 13–19.
波多野 (1984): 土壌の物理性, 49: 9–22.
井上 (1992): 農業工学研究所報告, 31: 77–119.
井上ら (1994): 農業土木学会誌, 62: 845–852.
望月ら (2016): 農業農村工学会論文集, 303: I_373–I_380.
中野ら (2014): 園芸学研究, 13(2): 125–133.
坂田ら (2017): 農業農村工学会論文集, 304: I_129–I_135.

畑地土壌中における水分移動と窒素動態

武藤由子
岩手大学農学部

キーワード: 土中水分移動，窒素動態，土壌微生物，根系分布

子供のころ，春になると祖母の畑でイチゴが取り放題だった．食べごろはアリがよく知っていたので競争だった．イチゴの他にも季節ごとの野菜を採りに畑にでかけた．その後の様々な成り行きを経て現在に至るが，この幼少期の畑での遊びが無意識に影響していたのだと思う．博士課程修了後，農業高校に勤務して資源循環型の庭造りに関わったこと，また，COE 研究員として水稲栽培での有機性廃棄物の利活用に関わったことをきっかけに，土壌中での窒素動態に着目した研究に取り組むこととなった．現在，対象としている主な現象は，水分移動過程おける硝化を考慮した窒素動態である．

近年，温暖化が原因と考えられる気象災害により世界中で人命が脅かされており，作物生産によって発生する温室効果ガス（亜酸化窒素 · メタン）もその一因として問題となっている．土壌からの温室効果ガスの発生は土壌微生物活動によるもので，土壌の水分量や温度，酸素濃度，pH，基質量などと関係しており，これらの条件は常に変化しながら相互に関わりあっている．例えば，土壌

中での水分移動は単に土壌水分量を変化させるだけでなく，酸素濃度を変化させることでも土壌微生物活性に影響する．土壌の水分量は降雨や地表面蒸発，植物の根による吸水によって刻々と変化しているので，土壌中での窒素炭素動態のメカニズムを解明するためには，水分移動過程での土壌微生物活動について考える必要がある．渡辺ら（2019）は，一次元カラム不飽和浸透過程でアンモニア態窒素の吸着態の硝化反応速度定数を溶存態よりも小さく仮定したときに，アンモニア態窒素と硝酸態窒素の挙動をよく再現できたとした．また，武藤ら（2019）は一次元カラム蒸発実験を行い，硝化反応速度定数を水分量の関数として与えるとアンモニア態窒素と硝酸態窒素の分布の変化の再現性が向上することを明らかにした．また，多くの要因に影響される硝化反応速度定数を ATP 量で簡易的に予測できる可能性を示した．

農地での作物の根による吸水に関しては，蒸発散による土中の水分量分布の変化予測について，近年様々な研究が行われている（中村ら, 2016; 弓削 · 阿南, 2016）．坂井ら（2020）は，群落熱収支モデルと HYDRUS-1D の連結プログラムを用いて，作物の生育に伴う放射透過率の変化と土壌の乾燥による蒸発散速度の低下を考慮した土壌水分量と地温変化の予測プログラムを構築した．その結果，ダイズ栽培圃場での観測結果が概ね再現されたが，根圏土壌の水分移動特性や根の吸水特性の理解が課題とされた．今後は，根の伸長の評価，根系分布と吸水強度分布の関係等が取り組まれるべき課題である．小田ら（2021）はサーモ TDR センサを用いて，植物根による土壌の熱特性の変化から根群密度を推定することに取り組んでいる．

根群域内での吸水強度分布の評価はさらに難しい問題だと思う．この数年，トマトやコマツナの根に興味を持ちながらも，その厄介さから真剣に向き合う覚悟を持てずに来ているが，なぜだか“くっついたり離れたり”で結果的に実験を続けている．それは蒸散速度が生長阻害水分点付近で実際に低下すると嬉しくなってしまうからだろうか．また，地上部よりも根の伸長に生命力を感じるからだろうか．学生と一緒に，腰や首が痛いと文句を言いながらピンセットで根を摘まんでいるうちに，何か面白いことが見つけられれば運がいいくらいの気持ちで付き合っていきたい．

引用文献

武藤ら (2019): 農業農村工学会論文集, 309: I_281–I_288.
中村ら (2016): 土壌の物理性, 134: 25–40.
小田ら (2021): 2021 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集: 260–261.
坂井ら (2020): 土壌の物理性, 146: 3–16.
渡辺ら (2019): 農業農村工学会論文集, 308: I_1–I_8.
弓削 · 阿南 (2016): 土壌の物理性, 134: 17–24.

草地の温室効果ガス収支について

森　昭憲
農研機構畜産研究部門

キーワード: 一酸化二窒素，堆肥，炭素収支，メタン

私が土に興味を持ったのは，大学に入学した春に放送された市民大学“「土」を科学する（岩田, 1989）”の視聴がきっかけである．カルシウムが加わると白濁する溶液をフラスコの中に入れておき，濾紙上の土に硫安の水溶液を注ぎ，したたり落ちる液滴をフラスコに導くと，フラスコの中の溶液が白濁した．この映像に感銘を受け，卒論は「粘土質土壌の土壌構造と濾過機能」に取り組み，土壌の物理性の大切さを学んだ．

現在は，様々な草地管理と温室効果ガス収支の関係を調べている．黒ボク土に含まれる有機物が，草地植生と密接な関係を持つことは広く知られている（小椋, 2014）．また，草地には堆肥などの有機物が散布され，根から多量の有機物が供給される（三枝 · 鈴木, 2005）．一方，生産性を維持するための管理は，一酸化二窒素の発生を促進し，メタンの吸収を抑制する（Dalal et al., 2003; Le Mer and Roger, 2001）．このため，或る管理が温室効果ガス発生量に及ぼす影響を理解するには，炭素収支，一酸化二窒素の発生，メタンの吸収の全てを把握することが不可欠だが，このような研究は少ないようだ．

そこで，草種（イネ · マメ科），有機物管理（堆肥 · スラリー · メタン発酵消化液），放牧（糞 · 尿パッチ），更新法（完全 · 簡易更新）と温室効果ガス発生量の関係を調べた．今後は，バイオ炭施用やメタン発酵消化液等の土中施用による飼料生産にも取り組む予定である．

日本の畜産業は輸入飼料に依存し，種々の環境問題に対峙している．これらを解決するには草地畜産の評価を高めることが大切である．家畜の排せつ物を上手に利用する飼料生産が，温室効果ガスの削減に寄与することを人々に知ってもらい，持続的な飼料生産に少しでも寄与できるよう微力を尽くしたいと思っている．

引用文献

Dalal et al. (2003): Soil Res. 41: 165–195.
岩田 (1989): NHK 市民大学「土」を科学する, 日本放送出版協会, 東京.
Le Mer and Roger (2001): Eur. J. Soil Biol. 37: 25–50.
三枝 · 鈴木 (2005): 草地における炭素循環とルート · マット形成．木村眞人 · 波多野隆介編 土壌圏と地球温暖化, pp. 105–121．名古屋大学出版, 名古屋.
小椋 (2014): 森と草原の歴史 — 日本の植生景観はどのように移り変わってきたのか —, 古今書院, 東京.

色彩計による土色の測定

森塚直樹
高知大学農林海洋科学部

キーワード: 色彩計，水田，土色，非破壊測定

粒径組成の分析の前処理で試料の有機物除去処理と分散処理を行い，振とうビン代わりの 500 mL 容メスシリンダーに土壌懸濁液を入れて静置していた時，同じ水田から採取した表層土壌でも懸濁液の色が明らかに異なることに気づいた．そこで元の風乾細土の色を見比べてみると，やはり微妙に色が違っていた．「これは面白い！」と思って，わずかな土色の違いを評価するために始めたのが色彩計による土色の測定である．

微妙な色の違いはマンセル土色帖では区別できないほど小さかった．そこで土色計（SPAD-503）を購入して，土壌試料の乾色と湿色の測定，微粉砕処理の有無などを試した．そして 2 グラムの風乾細土を 3 分間微粉砕した後に，試料を分光光度計用のプラスチックセルに充填し，試料の色をセルの透過面から測定することに決めた．試料をセルに充填するという方法は，土色計を携帯型比色計として利用した板井ら（2005）の学会発表を参考にした．また “Soil Color” という本の中に “Spectrophotometric determinations of soil color have been mostly carried out on dry samples.” を見つけた時，現場で行われてきた湿色の測定にこだわる必要がないことに気づいた．

得られた知見を土色の高感度測定法という趣旨で投稿した時，土色の圃場内変異を評価する意義はどこにあるのかという指摘を査読者から頂いた．調査圃場は大学の附属農場の水田であり，私には身近で貴重な圃場だったが，一筆の圃場内で土の色が違っていたという事例を公表する意義を査読者にうまく説明できなかった．そこで，京都府立大学の矢内先生にお願いして，日本各地の農耕地表層土壌の色を上記の手法で測定させていただき，全国と圃場という 2 種類の空間スケールでの測色結果と色と関連する土壌特性値の推定結果をまとめることによって論文として公表できた（Moritsuka et al., 2014）．

その後も色彩計を用いた土色の測定を続けてきた．現在は，乾湿に応じて変化する現場の土色をどのように測定するべきなのか，そして室内測定値はどのくらい現場での観察結果や測定結果と対応するのかということに興味を持って実験を進めようとしている．

引用文献

板井ら (2005)：日本地球惑星科学連合 2005 年大会予稿集, H060–P003.
Moritsuka et al. (2014): Soil Sci. Plant Nutr., 60: 475–485.

土の構造が酸化還元反応を制御する

柳井洋介
農研機構野菜花き研究部門

キーワード: 脱窒，温暖化，湛水，潅水，水田転換畑

学生の頃，土の培養実験で脱窒酵素群の活性制御要因を調べていた（Yanai et al., 2008）．その応用として土へ炭化物とその灰をすき込むと亜酸化窒素排出挙動に差異があり，物理性の効果を強く認識した（Yanai et al., 2007）．

季節凍土の融解に伴う亜酸化窒素の短期集中的な排出を観測するべく行った圃場試験は，土壌ガス採取器（柳井 · 常田, 2009）を用いた予備検討を含め 3 年に渡った．本試験 1 年目の結果で土壌凍結が発達するほど解ける時期に亜酸化窒素排出量が大きくなると考えたが（Yanai et al., 2011），土壌ガス中の酸素分圧が低下し亜酸化窒素が蓄積することが鍵でそれは積雪による地表面の保温と融雪水の湛水に依存する，というパスが同 2 年目の試験で示唆された．この他，たとえ土壌凍結が発達して融解時に亜酸化窒素の大量排出が起きたとしても融雪材に炭化物を選ぶことで地球温暖化ポテンシャルベースで相殺するアイデア（Yanai et al., 2014）や，望ましい土壌凍結深のデザイン（Yanai et al., 2017）について議論を深めた．

その後，野菜生産の現場における高土壌水分状態を酸素分圧低下事象と位置づけ研究を再開した．減反政策で全国の水田転換畑に栽培が広がった多年生野菜のアスパラガスに注目した．根腐れや株腐れが問題となる現場では案の定水はけが悪いことが確認された（柳井ら, 2013）．その際，水はけの評価方法に固執せず改善策を提示するよう指摘があり，結果として畝立てに特化した技術開発に取り組み始めた．イノベーション創出強化研究推進事業（NARO-BRAIN, 2020）では，香川県発の技術である枠板式高畝栽培（既存株埋没栽培法の発展版）をわが国の主要な産地で検証し技術として確立することを目指している．水はけが改善されると現場の関心は直ちに潅水管理に移る．高畝内の養水分動態の制御が課題である．

引用文献

NARO–BRAIN (2020)： https://www.naro.go.jp/laboratory/brain/innovation/20_inov_saiyou_R02_kaihatsu02_02019C.pdf
Yanai et al. (2007): Soil Sci Plant Nutr., 53: 181–188.
Yanai et al. (2008): Geoderma, 146: 269–276.
柳井 · 常田 (2009)：土と微生物, 63: 26–31.
Yanai et al. (2011): Soil Biol Biochem., 43: 1779–1786.
柳井ら (2013)：園学研, 12: 75–82.
Yanai et al. (2014): Ecol. Res., 29: 535–545.
Yanai et al. (2017): Sci. Rep., 7: 1–8.

土壌劣化から生態系機能評価まで

柳川亜季
明星大学理工学部

キーワード: 不飽和透水係数，乾燥地，給水モデル，植生指数

土壌物理学会の誌面で持続的な土地利用という言葉を軽々しく使うことははばかられるが，私の研究の目的は持続的な土地利用の実現である．ここでは，持続的土地利用の原点ではないかと勝手に考えている土壌の持続的な利用から，現在研究している生態系機能評価のテーマに至るまでのミニレビューをする．

私の研究は，モンゴルの砂漠化した耕作放棄地からスタートした．当初，砂漠化は土壌の塩類化による土壌劣化と想定していたが，6 年程度研究して分かったことは，想定とは異なった．土壌劣化も原因であるが，それ以上に乾燥地の競争排除によって成立する多年生の草本群落が乾燥にしか適応していないということであった．多年生草本が生育できない理由は耕作放棄地の土壌水分のサクションが低すぎるためであった．これは，現地の土壌の不飽和透水係数を測定したり（Fujimaki et al., 2004），多年生草本のポット試験の結果を Feddes の給水モデルで解析したりすることで明らかになった．

その後，対象地をエジプトに移す機会をいただいた．大学入学時からお世話になっていた佐藤政良先生の SATREPS プロジェクトに雇っていただけたのだ．これまでの先生のご講義の内容が身に染みた．佐藤先生のエジプトに関する文書をご一読いただければ幸いである（佐藤, 2021）．エジプトでは，水資源に関する位置づけが同じ乾燥地のモンゴルとは全く異なり，その危機的状況や様々な利権やそれに関わる人々の暮らしを目の当たりにした．それは，頭の中にいろいろな色の粘土をまぜた球を埋め込まれたような，新鮮な感覚で，一つもレビューがないのであるが，要するに，水資源（がないこと）を中心に複数の自然条件や社会条件を考慮してそれぞれの地域の状況を把握したい，という強い思いが沸いた．

そこで，そのような研究をされている（と当時の私は考えた）鼎信次郎先生にお世話になった．そこでは，全球の乾燥地のみならず，陸面を対象に世の中にあるグリッドベースのデータはなるべく取り込み，地域の生態系機能（脆弱性）評価を行うことをした．特に生物多様性と気象の極端現象との関係については草原地域での研究が中心となっていたため（Isbell et al., 2015），衛星から取得した植生指数をつかって，全球スケールで明らかにしたいと考えた．また，乾燥地で研究してきたこともあり，土壌中の不飽和な水の移動についてグリッドベースで示したデータ（Montzka et al., 2017）を解析に組み込みたいと思ったが現在もできずにいる．

今後は，衛星データと土壌の様々なパラメータを連携させ，生態系機能の評価をしていきたいと考えている．そのために，「土壌の物理性」の特集「水分 · 溶質移動モデル」（取出, 2006）のウェブページ等を参考に応用も検討していきたい．

引用文献

Fujimaki et al., (2004): Geoderma, 120: 177–185.
Isbell et al., (2015): Nature, 526: 574–577.
Montzka et al., (2017): Earth Syst. Sci. Data Discuss. 1–25.
佐藤 (2021): ARDEC, 64.
取出 (2006): 土壌の物理性, 104: 61–62. https://soilphys.bio.mie-u.ac.jp/model/

イモゴライトのコロイド界面化学特性と有機高分子の吸着

山下祐司
筑波大学 生命環境系

キーワード: イモゴライト，腐植物質，吸着，電気二重層，電気泳動移動度

本誌コラム「土粒子」にて，これまでの私の歩みを紹介した（山下, 2016）．詳しくは前書に委ねるが，土壌を用いた汚濁物質の濾過に関する研究を端緒に，現在では土壌有機物と無機鉱物の相互作用，特に，わが国の火山灰土壌を特徴づける主要な粘土鉱物であるイモゴライトと腐植物質の複合体形成，およびその複合体が示すコロイド界面化学的特性に興味をもっている．

イモゴライト（$(OH)_3Al_2O_3SiOH$）は九州の土「いもご」から発見された中空繊維状の粘土鉱物（Yoshinaga and Aomine, 1962）で，九大の吉永や和田らのグループと英国マコーレー土壌研究所のグループとによって化学構造の同定がおこなわれた（Cradwick et al., 1972）．土壌から精製したイモゴライトの電気泳動移動度（EPM）（Horikawa, 1975）とコロイド安定性（Horikawa and Hirose, 1975）が高知大の堀川らによって調べられ，EPM は酸性条件で正の値，中性およびアルカリ性条件でゼロ，これに対応して，酸性条件で分散，中性以上の pH で塩濃度によらず凝集することが示された．これら荷電特性と化学構造との照合から，イモゴライトは外径 2 nm，内径 1 nm，長さ数 μm の中空繊維状（ナノチューブ状）で，外側にアルミノシリケートに由来する pH 依存の正電荷，内側にシラノール基に由来する pH 依存の負電荷を有する特異な構造の粘土鉱物として知られるようになった．

イモゴライトの合成方法の確立（Farmer et al., 1983）とともに物性研究が盛んになる．Clark and McBride (1984）はリンなどの栄養塩や銅などの金属イオンの吸着量，CEC · AEC を測定した．京大の梶原や呑海ら（例えば，Donkai et al., 1985）は希薄懸濁液の粘度や沈

降特性，光散乱特性などを系統的に調べあげ，屈曲棒状高分子としてイモゴライトの拡散係数やサイズを推定した．Harsh らによる一連の系統的な研究（例えば，Su and Harsh, 1993）では，EPM の pH · イオン濃度 · イオン種依存性，多価アニオンの特異吸着が詳細に示され，堀川の研究を更新した．一方，茨城大学の軽部や中石らは EPM と粘度の値のイモゴライト濃度依存性を指摘した上で，チキソトロピーを呈さない十分希薄な懸濁液ではアルカリ条件で負の EPM が測定されうることを示した（Karube et al., 1992）．これにより，アルカリ領域での EPM の報告値が論文によって大きく異なることの一つの回答が与えられた．つくばの大井や足立ら（Tsuchida et al., 2005）は，表面電気伝導度の測定から，外表面の電気二重層の構造やチューブ内の対イオンの不動性を示した．他方，化学構造モデル（Gustafsson, 2001）や DFT 計算（Guimarães et al., 2007）では分子構造による（同型置換由来ではない）永久電荷の存在が予測されているが，実験的に実証されていない．イモゴライトの帯電機構と電気二重層構造の全容解明は今なおチャレンジングな課題である．

近年では，水溶液に容易に分散するナノチューブ素材として，イモゴライトは材料科学分野からも関心を集め，触媒（Bonelli, 2009）や吸着剤，無機有機複合材料としての応用が期待されている．有機高分子のイモゴライトへの吸着とその複合体の特性に関する研究は，DNA の吸着と複合体ゲルの粘弾性（Jiravanichanun, 2012），タンパク質の吸着と複合体の生物毒性（Rotoli et al., 2014），アミノ酸系界面活性剤の吸着と複合体の薬剤保持特性（Bonini et al., 2017），腐植物質の吸着と複合体膜の濡れ性（山下ら, 2018）などが挙げられる．

イモゴライトは時代に応じて，ときに火山灰土壌の構成成分として，ときに新規化学素材として，多くの研究者を魅きつけてきた．半世紀にわたる研究成果は 2016 年に成書として発刊（Yuan, Thill and Bergaya, 2016）され，今後ますます発展と応用が期待されている．

引用文献

Bonelli et al. (2009): J. Catal., 264: 15–30.
Bonini et al. (2017): Langmuir, 33: 2411–2419.
Clark and McBride (1984): Clays Clay Miner., 32: 291–299.
Cradwick et al. (1972): Nat. Phys. Sci., 240: 187–189.
Donkai et al. (1985): Makromol. Chem., 12: 2623–2638.
Farmer et al. (1983): Clay Minerals, 18: 459–472.
Guimarães et al. (2007): ACS Nano, 1: 362–368.
Gustafsson (2001): Clays Clay Miner., 49: 73–80.
Horikawa (1975): Clay Sci., 4: 255–263.
Horikawa and Hirose (1975): Clay Sci., 4: 271–280.
Jiravanichanun et al. (2012): Biomacromolecules, 13: 276–281.
Karube et al. (1992): Clays Clay Miner., 40: 625–628.
Su and Harsh (1993): Clays Clay Miner., 41: 461–471.
Tsuchida et al., (2005): Colloids Surf, A, 265: 131–134.
Rotoli et al. (2014) Chem. Res. Toxicol., 27: 1142–1154.
山下 (2016): 土壌の物理性, 134: 61–62.
山下ら (2018): 農業農村工学会論文集, 86: I_291–I_296.
Yoshinaga and Aomine (1962): Soil Sci. Plant Nutr., 8: 22–29.
Yuan, Thill and Bergaya (2016): Nanosized tubular clay minerals: halloysite and imogolite, Elsevier, Amsterdam.

畑地の消費水量の定量化を目指して

弓削こずえ
佐賀大学農学部

キーワード: 蒸発散，土壌水分，畑地灌漑

私は畑地において灌漑水を節減しつつも作物に水ストレスを与えないような水管理手法の確立を目指して，消費水量を精度よく定量化するための研究に取り組んでいる．もともと植物が好きであり，植物の生育に欠かせない「水」の魅力に惹かれて現在まで研究を行ってきた．研究をスタートした頃は，畑地の水消費に関わる日射や風況など，畑地の土壌面上の気象環境に興味を持っていた．作物体の陰によって形成される日射環境の不均一性や作物体によって生じる風の乱れを明らかにするために，実験圃場や風洞で実験するとともに数値解析を行ってきた．複雑な気象条件を考慮に入れることで，土壌面から失われる水分量を精緻に求めることができることを確認し，興味は次第に土壌中に広がっていった．

現在は，実際の畑作物の栽培現場に研究対象を広げ，土壌水分動態を明らかにして消費水量を定量化するための研究を行っている．栽培条件を制御しやすい実験圃場とは異なり，実際の畑地では気象や土壌水分を精度良く観測することが難しいため，消費水量を算定する際には現地観測結果のみをベースにすることには限界があると感じている．近年では数値解析によって畑地の土壌水分動態を明らかにしたり，畑地灌漑計画の諸元を求める事例が増えている（岩田ら, 2016; 中村ら, 2016; 宮本ら, 2017; 坂井ら, 2020）．これらの研究のように，実際の現場で消費水量を求める際には，現地観測に加えて数値解析も援用することが有効であると思われる．

既往の研究事例を参考にしつつ，消費水量を精度良く見積もって過不足のない灌漑を行うにはどうすればよいのか四苦八苦しているが，実際の作物栽培の現場では耕作者の熟練の水管理の技に驚かされる．高価なセンサーを用いた観測や数値解析に頼ることなく，作物の状態，畑地内の気象，土壌水分などの環境因子の変化を敏感に読み取り，絶妙なタイミングで過不足のない灌漑を行っている．今後は，現場において耕作者が行っている熟練の水管理の手法を解明し，農業の現場に貢献するような知見を得るために一層研究に励みたいと考えている．

引用文献

岩田ら (2016): 農業農村工学会論文集, 302: I_175–I_183.
宮本ら (2017): 土壌の物理性, 136: 3–14.
中村ら (2016): 土壌の物理性, 134: 25–40.
坂井ら (2020): 土壌の物理性, 146: 3–16.

構造が目まぐるしく変化する水田土壌

吉田修一郎
東京大学大学院　農学生命科学研究科

キーワード: 収縮，膨潤，畑地化，圧密，土壌構造

水田土壌では，収縮 · 膨潤といった体積変化が，畑地に比べはっきり観察される．土壌の体積変化は，排水性を支配する亀裂の消長に影響するだけではなく，保水性の変化や，易耕性，地耐力といった力学性にも関わる．研究者になりたての私が，10 年以上を過ごした新潟県上越市は，膨潤性の水田土壌が広がっている地域である．そのため，土壌の収縮や膨潤は，現場の土壌の物理性を考える上で無視しえない日常的な現象であった．時間とともに変化する土壌の物理的状態を，水分だけを独立変数とするのではなく，固相率も加えて定義する考え方は，水田の畑転換や火山灰土の造成などが研究された 1960 年代から 1980 年代頃には本誌でも多く取り上げられている．しかし，水移動や溶質移動の解析において，土壌の変形や構造変化を連成的に考慮することは，多くの場合現実的ではなく，さらに水移動の汎用解析ソフトウエアの普及も相まって，このようなテーマは土壌物理の表舞台からは遠ざかっているようにも見える．ただ，極端現象の増加に伴い，農地の排水の問題は，再び関心を持たれつつあり，その鍵を握る水田土壌の物理性の経時的変化や不均一性とその制御に関する基礎研究の必要性は，再び高まりつつあるとも言えよう．

水分状態の変化に伴う土の体積変化は，「収縮」および「膨潤」と呼ばれる．このうち，収縮挙動を定量的に評価する上で欠かせない収縮曲線は，Tempany（1917）が，水分損失と体積減少との関わりに着目したことに始まる．Haines（1923）は，この関係が，土壌の乾燥に伴い，Normal shrinkage，Residual shrinkage，Zero shrinkage の 3 段階に分けられることを示した．のちに，Stirk（1954）が，Structural shrinkage を加え，収縮過程は，これら 4 つの段階に分類されている．その後，土壌水分と間隙比の関係（収縮曲線）を近似するモデルは，多く提案されてきたが，近年では，van Genuchten 式と同じかたちの関数で表した Peng and Horn（2005）によるモデルが，よく知られている．

一方，力学的には，土壌の収縮（特に normal shrinkage）は，サクションによる弾塑性的な圧密挙動に他ならない．これは，外力による圧密と，サクションによる収縮が，細粒土の場合には 200 kPa 付近までは等価であるという実験結果（e.g. Blight, 1966）によって支持されている．この事実は，水田における亀裂形成過程の圧密理論を用いた解析（Yoshida and Adachi, 2004）に応用された．膨潤 · 収縮挙動を考える際に，圧密理論のうちで重要な点は，過去の最大圧縮履歴（降伏応力）を境にして，過圧密領域と正規圧密領域が存在し，それぞれ弾性的（小さく可逆的），塑性的（大きく不可逆的）な変形を起こすという点である．乾燥収縮後の吸水膨潤は，弾性域でのサクションの開放による変形であるため，塑性域で起こる収縮に比べ変形量は小さくなる．収穫時の地耐力を確保するために，中干しや早めの落水が有効なのは，（塑性的な）収縮により増加した固相率が，その後の湛水や降雨による膨潤ではもとに戻らないという特徴によるものである．

ただ，さらに長い期間で観察すると，水田における収縮 · 膨潤挙動は，サクションの変化と圧密履歴だけで決まるような単純な弾塑性モデルには従わず，時間の経過に伴いゆっくり進行する脱水 · 吸水も同時に起こる（Yoshida et al., 2014）．連続して転換畑作物を栽培したり，逆に水稲を連作したりすると，土壌の構造や物理性は，時間をかけて変化（畑地化 · 水田化）することが古くから知られており（e.g. 中野, 1978），その原因として，好気 · 嫌気環境による土壌中の鉄や有機物の変化が採り上げられてきた（e.g. 斎藤 · 川口, 1971）．このような化学性の変化に伴う挙動は，粘土鉱物の膨潤性に起因するミクロなスケールでの膨潤 · 収縮メカニズムの説明と関連付けて部分的には理解できる．一方で，個々の粘土鉱物の膨潤 · 収縮が，直接マクロスケールの変形につながっているわけではなく，階層的な土壌構造の変形が関与している（e.g. Tuller and Or, 2003）．そのため，化学性の変化による時間依存的な構造変化を，実用的な出口を踏まえて理解するためには，メソスケールの構造変化に対する鉄や有機物の動態の影響を定量 · 比較することが必要と考えており，現在は，その糸口を実験的に探索している．

引用文献

Blight, G.E. (1966): Proc. ASCE, SM6: 19–37.
Haines, W.B. (1923): J. Agric. Sci., 13: 296–310.
中野 (1978): 北陸農試報, 21: 63 − 94.
Peng, X. and Horn, R. (2005): Soil Sci. Soc. Am. J., 69: 584–592.
斎藤, 川口 (1971): 土肥誌，42(1): 1–6.
Stirk, G.B. (1954): Aust. J. Agric. Res., 5: 279–290.
Tempany, H.A. (1917): J. Agric. Sci., 8: 312–330.
Tuller, M. and Or, D. (2003): Journal of Hydrology, 272(1–4): 50–71.
Yoshida, S and Adachi, K., (2004): Geoderma, 120(1–2): 63–74.
Yoshida et al. (2014): Geoderma, 228–229: 104–113.

凍結・融解に伴う土中の水分・熱・溶質移動

渡辺晋生
三重大学大学院生物資源学研究科

キーワード: 凍土，凍上，不凍水，融雪水の浸潤

雪．スキー．氷柱でチャンバラ．そもそも夏より冬が好きだった．卒論のテーマを決める際，「極端なのが面白いよね．暑いのと寒いのとどっちがよい？」そんな指導教員との会話の中から土の凍結現象に惹かれたのは自然の成り行きだったと思う．暑寒の両極端が凍結と蒸発だとすると，凍結過程は蒸発も伴う一方，蒸発過程に凍結の考慮が必要とは限らない．最も面倒な終わりなきテーマの一つを選んだのかもとも思いつつ，コツコツ続けて 30 年近くになる．当初はバブルがはじけたばかりであったこともあり，比較的コストのかかりがちな凍土の研究はマイナーな分野で，ニッチを狙うような雰囲気もあった．しかし，気候変動や異常気象が寒冷圏に及ぼす影響は甚大であり，気がつけば土の凍結現象は有名各誌で特集が組まれるホットでメジャーな分野となっていた．せっかくなので，もう少し頑張りたいところである．

土の凍結に関連するトピックは様々あるが，飽和凍土の強度や凍上現象，不飽和凍土の通水現象，凍土の物性や物質移動を決定づける不凍水について，に大別できる．

0 °C 以下の土中に存在する液状水を不凍水という．不凍水がなぜ存在するのか（Dash et al., 1995; 渡辺, 2009）や不凍水の水ポテンシャルと温度の関係（Schofiled et al., 1938）については既に概ね理解されている．後者の文献は本誌の「古典を読む」でも上げてみたい文献でもある．一方，現実の多くの凍土では不凍水の量や水ポテンシャルが，土中の間隙氷の成長速度や，不凍水中の溶質濃度の時間変化，局所的な温度ムラなどにより，理論的に推定される値より凍結過程では高く，融解過程では低くなりがちである．こうした理論と実際の違いをいかに定量的に評価するかはこのトピックの一つの大きな課題である．また，不凍水量を TDR など誘電率測定に基づき推定するのも今や珍しくなくなった（Watanabe and Wake, 2009）．しかし，不凍水量の推定精度を向上するためには，不凍水とバルクの水の誘電率の違い，土全体の誘電率に対する誘電率が高くてもわずかしか存在しない不凍水と誘電率が低くても大量に存在する氷のそれぞれの影響などをいかに適切に扱うかに解を得る必要がある．さらに，凍土の物性や凍土中の移動現象を考えるためには，不凍水量だけでなく氷量を同時かつ非破壊で測定できると有益である．そのため，様々な測定技術の併用や転用を模索しているのも現状である．

飽和土が凍結する際，未凍土から凍結面に水が引き寄せられ，アイスレンズと呼ばれる氷塊が析出することがある．この際の土の体積膨張を凍上という．地盤の凍上は構造物や農地，道路などに多大な被害を及ぼす．また，凍土の強度や遮水性を利用するためには凍上を制御する必要がある．それゆえ，凍上については古くから研究が進められてきた（Taber, 1929; 渡辺ら, 1997）．現在では，凍上機構については未だ諸説があるものの，比較的単純な一次元の凍上については実用レベルで予測可能である（高志ら, 1974）．しかしながら，地下水流のある現場や構造物が複雑に埋設されている現場などへの凍土の工学的利用の機会が増加するにつれ，解決が求められる現場的課題も湧出している．人工凍土の造成に必要なエネルギーの低減や精度よい造成技術などの開発とあわせ，研究すべき課題は多く残されている．

凍土は水を通さないと考えられがちであるが，飽和凍土と異なり，不飽和土は凍結しても通水する．浸透水が次第に凍結することで凍土中の空隙を埋め遮水性が増すのか，通水が熱を運び凍土の融解が促進するのかを明らかにすることは，地盤が凍結に晒される地域の水循環や凍土下の酸化還元や微生物活性，農地の水分・施肥管理の視点からも重要である．そこで，不飽和凍土の透水係数の変化（Watanabe and Osada, 2016）や，不飽和凍土への水の浸潤に及ぼす凍結前の水分量やマクロポア，溶質の影響などが近年次々に明らかになっている（Watanabe and Kugisaki, 2017）．こうした知見を斜面スケールや流域スケールにいかに広げるか，凍結によって運ばれた溶質の析出現象をいかに評価するかなどが次に取り組むべき課題である．また，不飽和土の凍結過程の水分・熱移動は HYDRUS などでも概ね再現できる（Kurylyk and Watanabe, 2013）．しかし，温度が 0 °C 近傍で停滞する期間や融解過程についての数値解析は未だ難しく，現在も取り組んでいる次第である．

引用文献

Dash et al. (1995): Rep. Prog. Phys., 58: 115–167.
Kurylyk and Watanabe (2013): Adv. Water Resour. 60: 160–177.
Schofield et al., (1938): Agric.Science, 28: 645–653.
Taber (1929): J. Geology, 37: 428–461.
高志ら (1974): 雪氷，36: 49–68.
渡辺 (2009): 土壌水分ワークショップ論文集: 21.1–21.8.
Watanabe and Kugisaki (2017): Hydrol. Process., 31: 270–278
Watanabe and Osada (2016): Vadose Zone J., doi: 10.2136/ vzj2015.11.0154
Watanabe and Wake (2009): Cold Reg. Sci. Tech., 59: 34–41.
渡辺ら (1997): 農土論集, 191: 51–58.