J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 159, p.83～86 (2025)

第 66 回土壌物理学会シンポジウム総合討論
「最新数理手法・情報技術の土壌物理学研究・現場への適用」

西脇淳子 [1]・小島悠揮 [2]（学会事務局）

本稿では，4 名の講師による講演の後に行われた総合討論（司会：坂井 勝）の模様を，今後の学会活動の資料として掲載する．なお，討論の概略の記録を目的としたため，本稿著者らの判断により，発言の一部を省略または要約させて頂いた．

坂井（司会）：
総合討論司会は三重大学坂井が務めさせていただきます．よろしくお願いします．まず会場の方から頂いた質問票から始めたいと思います．北海道大学の濱本先生から宮本先生に対する質問です．早期検知の仕組みとして亀裂を通した土壌水分の増加が上げられていましたが，今回対象としているサイトで共通に見られるメカニズムと考えてよろしいでしょうか．土壌水分での早期検知が難しいサイトもあるのでしょうか．

宮本（佐賀大学）：
今回示したデータは，宮崎の泥岩互層と呼ばれる特殊な場所のものです．一方，まさ土が堆積した他のサイトでは，類似した現象は今のところ認められていません．そうした土壌では，加速度の数値を重視する形で，我々は早期検知を行うこととしています．

坂井（司会）：
続いて筑波大学の山下先生から，田崎さんへの質問です．これは私も同じことをお聞きしたかったのですが．今回のモデルを検証するにあたってどういう実験データを使いたいと思いますか．お考えをお聞かせください．

田崎（鹿児島大学）：
測定可能なデータになると思うので，例えば酸化還元電位（Eh）であったり，溶存酸素濃度（DO），pH は計測できますし，土壌からの流出液の濃度であったり，また土壌溶液を抽出することができれば土壌中の濃度分析もできるので，データと比較するならば，濃度分布と DO，pH，Eh になると思います．

山下（筑波大学）：
センサや現場測定をあまり知らないのですが，それはやろうと思えばできそうですか．野外実験の経験がないので，実験計画的にセットアップさえ組めればできそうなのかお伺したいです．

田崎（鹿児島大学）：
私も野外実験の経験はないのですが，今回のモデルは微視的な現象を予測するものですので，実測と比較するならまずは小さいスケールからと思っています．例えばカラム実験で，かなり微視的に測れるセンサが入手できるようになっていて，それを使えばすごく細かい範囲，例えば深度 3 cm 程度毎の pH や DO の分布が測れるようになっています．

坂井（司会）：
続いて九州大学の岩田先生から本間さんに対する質問です．不均一な水の流れがため池の堤体の破壊につながるということですが，今回実施したのはコアとその他の 3 つのゾーンを扱うモデルで，各ゾーンについては均一と考えているようでした．同様の方法でパイプ流のような不均一な流れを評価するモデルが確立できるのでしょうか．

本間（農業・食品産業技術総合研究機構）：
今回はフィルダムと呼ばれるタイプのもので各ゾーンは均一と仮定していますが，その理由は，実際のため池は密度をしっかり管理しながら作っていくためです．ですが水みちのような局所的に水が流れるところについては，どのような設定をすると良いのか，部分的に透水性が高いというだけで表現できるのかというところは今考えているところです．パイプ流は，土壌物理的なアプローチとはまた違うアプローチが必要になるののではないかと考えてます．そこは今後の課題ですが，現状では部分的に透水性が高いという仮定のもとで検証しようと思っています．

岩田（九州大学）：
江戸時代のため池は堤体の構造がよくわからないというお話でしたが，フィルダムのような構造がある程度みられるのか，それとも全くの無秩序な構造なのか，その辺りの情報があれば教えてください．

本間（農業・食品産業技術総合研究機構）：
江戸時代よりも前に造られたため池で，大阪に狭山池

[1] 東京農工大学 大学院農学研究院
[2] 岐阜大学 工学部
2025 年 2 月 3 日受稿　2025 年 2 月 3 日受理

というため池があり，そこでは断面を展示しています．この時代に作られた堤体は水を溜められるようにどんどん盛っていく形になっているのですが，内部の土は均一なのか，それとも盛り土の積み重ねによって何層にもなっているのか，というのは実際のところ分からないです．そこが分かる方法があれば数値解析の条件も設定できるので，難しい問題だと思います．

岩田（九州大学）：

物理探査が有効という議論がありましたが，今後考えられたりするのでしょうか？

本間（農業・食品産業技術総合研究機構）：

物理探査を使って透水性が違う境界が分かるだけでも，事前情報として扱うことができると考えています．

坂井（司会）：

私からも質問です．実際にこのモデルを現場で活用しようという時に，どのような測定が必要になると想定されているのでしょうか．

本間（農業・食品産業技術総合研究機構）：

一般的にダムあるいはため池では水位観測孔と言って，堤体内に穴を掘って水位を観測する形になっているので，そのような水位観測データを使おうと思っています．

坂井（司会）：

既存の観測孔が十分あるのか，改めて観測孔数を増やしていく予定なのか，いかがですか．

本間（農業・食品産業技術総合研究機構）：

既存のものを使えるところは使いたいのですが，実際のため池にたくさんあるかと言われるとないのが現状です．そういうところは安価に設置できるようなセンサの開発が今後必要になると思っています．

坂井（司会）：

続いて及川さんへ私から質問です．マクロポアを通る流れがある場合，推定結果は例えば局所的に飽和透水係数の値がすごく大きくなる，というようなことが期待できるのでしょうか．

及川（東京農工大学）：

やってみないと分からないところではありますが，リチャーズ式の仮定で PINN 自体は作っているので，それが成り立つ範囲であればおそらく透水係数が大きい部分として出てくるのだと思います．現時点では一次元でしか行えていないので，ご質問のような解析をするとなると二次元や三次元にしないといけないと思います．

坂井（司会）：

マクロポア流のようなリチャーズ式が成り立たない流れの時というのは，その物理法則をリチャーズ式ではなく，水のマスバランスだけに留めてしまうというのも一つの方法でしょうか．

及川（東京農工大学）：

方向性としてはありえます．物理条件を違う条件として課すというのはあると思います．

坂井（司会）：

質問票による質問は以上です．ここからは会場から質問を受け付けたいと思います．いかがでしょうか．

杉本（筑波大学）：

田崎さんにお伺いします．表面の酸化層にマンガンが蓄積する計算をされてましたが，メタンの発生に関する話で土壌中の有機物量を計算のインプットとして入れていると思います．有機物のプロファイルがどのように変化しているかは計算上追えるものでしょうか．

田崎（鹿児島大学）：

今回の計算結果では示せてはいませんが，初期に与えた有期物が分解する速度や，有機態炭素と窒素の分布，腐植の分布などは表示させることはできます．

杉本（筑波大学）：

それがマンガンの蓄積と関係してるようなことが計算上出てきたりはしますか．

田崎（鹿児島大学）：

そこは分からないです．

杉本（筑波大学）：

もう一点，マンガンの蓄積のところで拡散によって表層に向けて移動するという話について，詳しく教えていただきたいです．

田崎（鹿児島大学）：

今回の計算結果だとおそらく還元層でマンガンや鉄のイオン濃度が大きくて，表層では濃度ゼロだったので，その濃度差で拡散が起きているのではないかと思います．

西村（東京大学）：

及川さんか本間さんにお伺いします．一つ前の話に戻りますが，観測データの中でヘテロな部分を反映するようなデータが含まれていなければ，先ほど坂井さんがおっしゃったようなモデルの物理条件を変えて PINN で回しても，ヘテロなものはアウトプットとして出てこない気がするのですが，いかがでしょうか．

及川（東京農工大学）：

確かに機械学習の中で一部分だけ不均質な結果が出るというのはちょっと難しいような気はします．

本間（農業・食品産業技術総合研究機構）：

私も同じように考えていて，そこを踏まえた学習を行っていくことがヘテロなものを発見するところに将来的に繋がると考えています．

西村（東京大学）：

面的なセンシングで定量的なデータは出てこなくても，定性的にヘテロだという情報，例えばこの部分は相対的に透水性や密度が高い，低いといった情報を入れるだけでも，すごく変わりますか．

本間（農業・食品産業技術総合研究機構）：

その空間解像度がどれぐらいあるかも問題になると思いますが，試してみないと正直分かりません．

斎藤（東京農工大学）：

宮本先生にお伺いします．目指してるところは斜面にセンサを一個入れるということでしたでしょうか．

宮本（佐賀大学）：

一個とは限りません．土砂災害特別警戒区域内に何個か埋設して運用することを考えています．

斎藤（東京農工大学）：

色々な実験を大学の同僚とした時に，斜面の崩壊はまずのり先が飽和してきて，それがトリガーになって滑るというのがよくあるパターンです．そうすると斜面の下方を重点的に測った方がいいのか，斜面全体をモニタリングした方がいいのか，どうお考えでしょうか．

宮本（佐賀大学）：

地下水位の上昇に起因するようなものについては深いところの方がいいと思いますが，地すべりや地盤工学の方々から，最近は不飽和土の崩壊に関心が集まっているとよく聞きます．我々は深い層だけではなく，表層も測るようにして，水分量が上がる効果と地下水位が上がる効果の両者を見極めようとしています．

井上（シニア会員）：

宮本先生にお伺いします．M5Stack の耐久性はどれぐらいかということと，wi-fi が使えない場合，ソーラーパネルでは十分な電力を得られない場合はどうしたらいいのか，解決策を教えて頂ければと思います．

宮本（佐賀大学）：

耐久性についてですが，一番古いもので，3 ～ 4 年程度稼働し続けています．本日示した ATOM Lite を，熱帯果樹の温室に複数設置してセンサネットワークとして運用していますが，まだ 1 台も壊れていません．たまたま選んだ 3 個が長く稼働し続けているという状態です．

wi-fi が使えない場所では，LPWA を利用するのが現実的な解であると考えます．その場合，送信できるデータ量は小さくなりますが，ランニングコストの安い専用モジュールを M5Stack のマイコンに接続して運用できます．

電源の確保は，悩ましい問題です．当初，鉛蓄電池とソーラーパネルを組合わせて利用してきましたが，2 年ほど経つとバッテリーが劣化して電源不足に陥る事例が多々ありました．よって，最近では，鉛畜電池よりも劣化しにくいリン酸鉄リチウムイオン電池を積極活用することにより，交換頻度を 4 ～ 5 年に 1 回に留めるように工夫しています．リン酸鉄リチウムイオン電池の価格は鉛蓄電池のそれの 2 倍ほどですが，その分長持ちしますのでお勧めします．ただし，チャージコントローラーは対応したものを使う必要があり，その選択肢が少ないのが現実です．全て Amazon.com より購入できますが，不良品や部品の相性もあるので，いろいろなものを試して最良の組合せを検討しています．

溝口（東京大学）：

崖崩れを予測するのに土壌センサを使った実験をしたことがありますが，何かが起きたことを示す信号さえ捉えられればそれで目的は達成できると思いました．電極 2 つを指してその抵抗に変化があった時だけ知らせる警報システムで十分ではないでしょうか．そうするとコストはもっと低くなると思います．

宮本（佐賀大学）：

その通りです．加速度センサ 1 個で済む場合もあります．加速度センサであれば 1 個数百円程度です．土中の加速度センサが少しずつ動いてるということが捉えられれば，潜在的にその場所は危ないと認識できます．土砂災害警戒区域は，標高データから機械的に算出したものですが，それはひとくくりにできるものではなく，実際には危険度の大小の差異があるはずです．センサをしばらく設置して運用し，データを得ることによって，危険度の序列化や空間分布の把握等ができるようになると思います．

溝口（東京大学）：

耐久性の質問がありましたが，センサ 1 個がとても安くなったので，壊れたら交換すればいい時代になってきています．IoT キットなど色々な安価なセンサが出てきてるので，そういうものを上手に使うのが 1 つの方法です．工学部の私の共同研究者で紙に印刷した土壌センサを作っていた先生がいましたが，彼は使い捨てを最初から想定していました．センサは要するに何を知りたいのか，何を必要としてるのか，ということに対応することが大事です．それで十分現場ニーズには答えられます．

宮本（佐賀大学）：

土砂災害警戒情報を補完できる手法が必要とされています．我々は土壌物理学を専門とするため，馴染のある土壌水分量を測定し，その数値を利用したいという立場になります．

溝口（東京大学）：

もう 1 つ電源の問題がありましたが，私はソーラーパネルとバッテリーにタイマーをつけてます．電源をオンにしたままにすると消耗が激しいので，センサ側に microSD を入れて定期的に記録だけして，1 日 10 分とか 1 時間とかだけ通信をオンにするようにしておきます．その間にアクセスしてダウンロードする仕組みにすると電力を節約できます．それで十分対応できるケースが多いのではないかと思います．

宮本（佐賀大学）：

我々もマイコン M5Stack の通信に用いる wi-fi ルーターを，1 時間に数分程度だけの起動するようにし，節電を試してみました．しかし，起動する際に大きな電力を必要とするため，起動したままで利用した方が節電できるというのが，これまでの取組みの結論です．

坂井（司会）：

今日のご講演の中でもありましたが，土壌物理は「計測と予測」で成り立っています．凄く緻密なモデルができてきて，センサネットワークが構築されて広域に測れるようになってきて，さらにそこに深層学習や AI が入ってきて，新しいステージに入ったんだなと思います．ここで講演者の皆様に今後の課題として，どういう分野の人たち，どういう技術を持った人達とコラボレーションしてみたいかお考えをお聞かせいただきたいと思います．

田崎（鹿児島大学）：

溶質移動のかなり緻密なモデルを開発していて，溶質の分布を予測できるようになっています．作物による溶質の吸収を考えると収量の予測にもつながると思うので，作物や根の吸収，植物栄養学等に詳しい人とコラボできたら面白いと思います．実際このモデルには根によ

る溶質の吸収も考えるモデルを組み込んでいます．

及川（東京農工大学）：

私は不均一の流れに強い関心があって，その際にどうしても面的なデータが必要になってきます．既に自分でも進めてもいますが地中レーダーを使って土壌の面的なデータを取って，それと水分移動モデルとの繋がりを解明したいと思っています．物理探査技術とかのデータをより生かした研究がしたいと考えております．

本間（農業・食品産業技術総合研究機構）：

先ほどご質問があったようにため池の中の状態がわからないということもありますので，非破壊診断技術で地中レーダーであったり他の手法であったり，内部構造を得るための技術を持った人と関われるといいと思ってます．あとはセンサをたくさん入れれば入れるほどより観測網も充実できるので，安いセンサを作る技術を持った人や安い技術を使って分析できる人との協力も望みます．また深層学習を専門に研究されている方とも，より良いモデルを作るにはどうしたらいいのかを議論できるといいと思います．

宮本（佐賀大学）：

紹介した斜面計測事例は，佐賀県と行っているものです．今はモニタリングによりビッグデータを収集している段階ですが，それらを活用して新しい取組みを行うためには，たくさんの測定点を設ける必要があり，多額の費用がかかります．大学にはそのための研究資金や人員が十分にないため，企業と共同でこうした研究開発を推進することを考えています．ただし，大学と企業では考え方が違うため，10 年以上議論をして，ようやく企業との連携がすすみ始めたところです．企業の持ってるノウハウやリソースはすごく大きいので，大学の研究の中にそれらを組み込むことによって，新たな展開が期待できると感じています．全国各地で開催される展示会に参加し，企業との議論を行うようにしています．

坂井（司会）：

最近では土壌物理学の計測技術が現場で求められることも増えています．それに対してたくさんのデータが出てくればそれを解釈するために深層学習や AI も必要になってくると思います．一方で何が起こってるかを理解するためには，予測モデルの役割が重要だと思います．私も比較的そういう課題を扱っていますので，田崎さんのモデル等も土壌物理には欠かせない一部だと思います．このような現状を鑑みて土壌物理学会としてこれからどうしていくべきでしょうか．

井上（シニア会員）：

1 番大事なのは情報の共有だと思います．今，共同研究をしていて，共同研究者の持っていた技術が，本人はこんなに役に立つとは思わなかったと言っていました．どういうことを研究したいとか，どのようなコラボをしたいとか，予算が欲しいとか，これらにおいて 1 番大事なのは情報です．例えば，この間，専門高等学校のロボットの大会を見ました．そこでは 1 万円以下の凄く安いセンサを使っていました．この情報を知った時，とても面白くて私も使い始めました．大事なのは色々な学会，機会に顔を出して情報を得て，そして自分のものにすることです．皆さん HYDRUS-1D とか HP1 とかそういう技術を持っていてるので，さまざまなところに出ることで，同じような現象に興味があって，でもノウハウを持っていないひとに会えると思います．そういう人と共同で研究をしてください．論文も一緒に書けばいいんです．

斎藤（東京農工大学）：

編集委員長の立場での発言になりますが，今オープンサイエンスとか色々言われていて，この間及川さんが出した論文も，コードを一緒に出さないといけなくて，アップロードして全部公開しています．当然人との繋がりで情報共有していくというのも大事なんですが，土壌の物理性も，例えば HYDRUS を使ったらそのインプットファイルを全部アップする，データもデジタル化してアップロードしていく，そのような形でデータを蓄積して皆で共有してく方向性が今後やるべきことかなと思いました．

坂井（司会）：

ありがとうございます．それではお時間が近づいてまいりましたので，最後に登尾先生の方からこの総合討論を総括していただきたいと思います．

登尾（会長）：

皆さん活発なご議論ありがとうございました．異分野との協力ということで，学会員も増えるのではと思います．これまでの活動で，若い人もたくさん来ていただけるようになりましたし，研究室配属前で指導教員がいないのにもかかわらず，今回学会誌を見てこの学会に参加していただいた学生さんもいらっしゃいました．インターネットで学会誌が自由に読めることがそのような機会を産んだということを考えると，土壌の物理性をどういう風にこれから作っていくのかということにも関わってくると思います．良い論文やデータがたくさん出るようになると，他の業界の目に止まって，学会に出てみようとなるのではないかと思います．

今日講演していただいた 4 人の皆さんの研究は私みたいに退職前の人間からすると最先端を行っていて，眩く輝いていました．今後もそういう研究がこの土壌物理学会の中で進行していくこと，それから皆さんと一緒に輪が広がっていくことを望んでいます．今日は本当に素晴らしいご講演と坂井先生の素晴らしいコーディネート，それから皆様の活発なご議論，誠にありがとうございました．

（敬称略）