



第 64 回土壌物理学会シンポジウム総合討論 「不飽和帯 - 地下水間の水分・化学物質移動のモデル化 — 土壌物理学に求められるもの —」

諸泉利嗣¹・取出伸夫² (シンポジウム事務局)

Discussion at the 64th symposium:
Modeling of water flow and solute transport between the vadose zone and the groundwater
— contribution expected from soil physics

Toshitsugu MOROIZUMI¹ and Nobuo TORIDE²

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(進行: 諸泉利嗣)の様態を、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、発言内容の一部を省略または要約させて頂いた。

諸泉 (司会)

シンポジウム第2部総合討論を始めます。まず小杉さんに筑波大学の足立さんからの質問は「フィンガー流が問題となることはないですか?」、また関連して筑波大学の小林さんからは「封入空気の排出が流れに影響することはありませんか?」です。

小杉 (京都大学):

フィンガー流は詳しくないですが、封入空気も不安定になる要因なので、まとめて答えます。正直に言うと、実際には測定したことがないので実態はよくわかりません。今日は時間がなくて詳細は示せなかったですが、浸透計算を見ると、土層の中で地下水帯が発生して、それが徐々に基岩の中に染み込んでいくので、基岩全体の上から飽和帯が降りていきます。もしそこに空気があったら逃げ道がないので、流れが不安定になって、フィンガリングも起こりやすくなるかと思えます。ただ、実際の山の土や岩は均質ではなく、透水性、保水性が空間的に分布をしています。また土層の厚さも一定ではなく、厚いところも薄いところもあります。そのため、実際の飽和帯の拡大は均質に起こるのではなく、部分的に速く浸透するところや遅いところがあって、空気の逃げ道もできるのかなと思います。フィンガリングや封入空気もあるけれども、透水係数の不均一な分布や岩の亀裂があったり、透水性が高い層と不透水層の互層構造により被圧地下水も生じたりして、非常に複雑な現象が起きています。封入空気やフィンガリングも現象としてはおもしろく、観測すれば、研究の方向性としてはおもしろいとは思いますが、実際の山全体の雨水貯留や基底流がどのようなものであるか、斜面崩壊がどこで発生するのかなと

いった実用的な問題を考えるときは、あまり細かい現象にこだわっても進まないかなという気持ちもあります。

足立 (筑波大学):

大まかに均一な計算が適用できる場合とそうでない場合はどのくらいの割合なのでしょう? 均一な流れはもっともらしく見えてしまいますが、現実には山を歩いてみたりすると、とても不均一に見えてしまいます。

小杉 (京都大学):

基岩の中をどのように浸透しているかを知ることはなかなか難しく、厳密に調べようとすると、たくさんボーリングを掘ったり、土に多くのテンシオメータを埋めたりすることが必要となります。しかし、限られた測定からですが、意外とリチャーズ式の解に似たような振る舞いをするなどという感触はあります。表層は雨が強くなると圧力が速やかに上がって、下層になると圧力上昇は少しずつ遅れていき、その変動は降雨強度によって変化します。地下水の変動も、あまり突拍子もない変化はなく、結構、きれいな動きが観察されます。その意味では、リチャーズ式はうまく当てはまっている気はします。

足立 (筑波大学):

平均化処理をすれば傾向が示されることは理解できるのですが、現実には不均一なので、統計的にどのような分布をしているか、平均化処理に適合するか、あるいはしないかは大切な視点だと思います。

小林 (森林総合研究所):

現地では基岩への水移動に伴い空気が排出されます。飽和側方流が境界に発生すると、空気の排出に対して蓋をする形になります。一方、現地は複雑で不均一で、たとえば亀裂が空気の逃げ道になったりします。土では、不均一な構造が空気の逃げ道となると思えます。基岩はイメージがわかりませんが、日本の山なので均一ということではなく、砕けていたりして逃げ道はあるのかなとは思いますが、それが通常の規模の雨の場合は逃げ道と

¹ 岡山大学学術研究院環境生命科学学域

² 三重大学大学院生物資源研究科

2023年2月20日受稿 2023年2月20日受理

して機能するけれど、とんでもない大雨のときに蓋をするようなことも起こるのではないかと、また、そうした場合、空気の移動も生じるのではないかと思いました。

小杉 (京都大学) :

実際に大雨が降って崩れるときに、封入空気の影響が大きいと言われる方もいるので、やはり測定してみる必要はあるかと思います。大雨ではないですが、基岩湧水でおもしろいのが、大気圧の影響を受ける点です。大気圧の変動により地下水位が上下したり、基岩地下水からの湧水量が、雨ではなくて、大気圧の変化に連動して増えたり減ったりすることがあります。被圧地下水の影響と思いますが、そういう意味でも空気圧の変化は影響すると思いますが、そこまで踏み込めていないのが現状です。

諸泉 (司会) :

続きまして斎藤さんへの質問です。

佐々木 (和歌山高専) :

水分保持曲線はヒステリシスがあり、浸潤と排水で特に不攪乱土で大きく異なります。ヒステリシスの測定もいろいろ試みているのですが、なかなか難しいです。

斎藤 (東京農工大学) :

私は砂の測定しか経験がないのですが、この会場に詳しい方がおられるかと思います。

岩田 (農研機構 農村工学研究部門) :

今までの経験からは、 pF 1.3 から 1.5 くらいの領域ではヒステリシスが大きく、 pF 3 以上からはほとんどない感じでした。砂の方がヒステリシスは大きくて、黒ボク土は小さい傾向はあると思います。

斎藤 (東京農工大学) :

計算においてはヒステリシスの感度解析は大切だと思います。測定手法の問題も含めて、今後の課題だと思います。

小島 (岐阜大学) :

地下水位の変動は HYDRUS で扱えますか? 下端境界を深めにとって静水圧を与えることなどで表現できますか?

斎藤 (東京農工大学) :

地下水への浸潤による地下水位の変動を取り扱えるかという質問かと思いますが。現在の HYDRUS では、地下水に関して水の収支を考慮して地下水位を変動させるオプションはありません。本日の発表で示した解析の条件は、地下水位は一定で、地下水に入った水は流れてなくなります。下端を閉じて水を与え続ければ、地下水位が上昇して正圧領域は広がりますが、水分が下降するメカニズムはないので地下水位の変動とはならないのかと思います。

岩田 (農研機構 農村工学研究部門) :

バイパス流を考慮したモデルはパラメータが多く、フィッティングは大変だと思いますが、良い方法がありますか? 水収支のみであれば、DP (Dual Permeability) モデルを使わなくても通常のリチャーズ式の逆解析等で合わせこむこともできるのかと思いますが、溶質移動では難しいと思いました。溶質移動以外にも、DP モデルが有効な場合があれば教えてください。

斎藤 (東京農工大学) :

マトリックス流と亀裂流が基本排水曲線などにおいて明確に分かれるようであれば、同時に推定するのではなくて、マトリックス流と亀裂流のそれぞれのパラメータを同定していくアプローチが良いのかと思っています。

おそらく、両方を含めたような形で推定しようと思っても、現実的には難しいのかなと感じています。私は、そこまでデータがないので実際の経験に基づいてはいいませんが、計算結果を見る限りの感触です。DP モデルが溶質移動以外に有用な点については、少し考えてみます。

岩田 (農研機構 農村工学研究部門) :

同位体を見るときにも、古い水と新しい水が関係してくると思うので、やはり DP モデルが必要なのかなと思いました。

斎藤 (東京農工大学) :

同位体に対して単純に移流分散式 (CDE) を適用して良いかは、吉岡さんのデータなどの観測データに対して議論を行っていただければと思います。

足立 (筑波大学) :

DP モデルの物性値の根拠は何ですか?

斎藤 (東京農工大学) :

亀裂とマトリックスの形態が違うことはあると思いますが、それを明示的に三次元の領域に対して亀裂を与えてそれぞれの流れを解く方法もあるとは思いますが、それは現実的には難しいです。そこで、DP モデルでは次元の問題に落とし込んで亀裂とマトリックスを与え、水分と溶質について二領域間の交換係数とセットで与えるので、それぞれの物性値の根拠を厳密に与えるのは難しいところがあります。

足立 (筑波大学) :

不均一な土を太いところと細いところに集約すると、それが結構よく合うということだと思います。その太いところはどうしても出てくるのか、マクロポアとミクロポアの二つに分ける理由についてコメントをお願いします。

斎藤 (東京農工大学) :

いろいろな複雑な現象はありますが、DP モデルでは二領域を次元の問題に落とし込んで与えます。水分が移動していく過程で、その二領域間で水分と溶質の混合が生じると、下端の水分や溶質の流出を自由度が高く表現することができ、結果として実測値をよく再現することができます。

取出 (会長) :

DP モデルは、本来は連続的な流速分布を速いところと遅いところに二分割します。イメージとしてはマトリックスと亀裂はわかりやすいですが、実はそれではモデルは完成してなくて、どのくらいその二領域で水分や溶質が交換するかについてのパラメータがあり、その両方がセットになってモデルが構成されている点が重要だと思います。そのため、それぞれの領域の物理的な意味を完全には与えられないのだと思います。DP モデルは、二領域と交換速度をセットにして調節すると自由度が高く、多くの現象に対して適合できるので、不均一な現象を考える際に有用であるというのが私の意見です。

足立 (筑波大学) :

工学的に意味があるということですね。

諸泉 (司会) :

次は、吉岡さんへの質問です。

長竹 (寒地土木研究所) :

同位体比に対する岩石風化などの化学反応の影響はありますか? もしあれば、流域の森林、水、畑、都市などの土地利用面積比、河川水中の同位体比との関係、土質や地質によるエリア分けなどを考慮されるのでしょうか? より細かいスケールで考えたとき、どれぐらいのエ

リア分けて同位体比が変わってくるのか、土地利用の影響が生じるのかについて疑問を持ちました。

吉岡（島根大学）：

まず土地利用に関してですが、手取川の場合、場所によって地下水の同位体比が異なるのは、主に異なる水の混合割合が異なっているからです。なぜ混合割合が異なるかは、畑や水田といった土地利用の影響だろうと思います。ただし、土地利用が異なるからといって、たとえば三次元でモデル化するとき、土地利用分布を再現できるようにメッシュを細かくすることが効くかと言われると、どちらかと言うと、どこからどれだけ流れてくるかという帯水層の透水性の方が影響は大きいと思います。岩石の風化に関しては、基本的に岩石と土壌は水交換しないと言われていたので、岩石の風化により同位体の特性が変わるといよりは、やはり、岩石と土壌の透水係数が変わることによって混ざり方が変わり、それによって同位体比が変化するのかと思います。地下水の場合、基本的には混ざり方の違いを適切に表すことが重要だと思います。

長竹（寒地土木研究所）：

ゼロメートル地帯や河口付近で海水混入の影響はありますか？

吉岡（島根大学）：

海の同位体比はゼロなので、海水や地水が混ざっている場合は、地下水で同位体比の変化が見られることから、たとえば、海水侵入の研究などにも使われたりしています。手取川の場合、海水侵入はないですが、海外では海水の影響を見るような研究も多くなされています。

小林（森林総合研究所）：

植物の葉で同位体比の変化した水が、田面水や土壌水の一部になることはないですか？

吉岡（島根大学）：

蒸散により葉の同位体比は重くなります。ただ、その重くなった葉の同位体比が、たとえば葉が土に落ちて多量な田面水に対してどのような変化をもたらすかは、量の違いが非常に大きいのでなかなか影響は出ないと思います。葉の場合、落ちてその水が混ざることよりは、落ちたことにより日射が遮断され蒸発が生じないといった物理的な効果の方が、水田や畑における同位体比の変化には効いてくると思います。

小林（森林総合研究所）：

葉の気孔を経由した水の割合は、水田であっても、また森林や草地であっても、かなり大きい割合だと思えますが、その結果、重くなる水の割合が高くなれば、それは全体として無視できない量になると思いました。最終的に何らかの形で地面に行くとしたら、たとえば葉が幾らか残っている状態で枯れて落ちたら、やはりその影響はあるのではないのでしょうか。

吉岡（島根大学）：

田面水と言うよりは、もう少し深いところに田面水が浸透して、その一部が稲で吸水されて、残りの浸透水が下端にいくと考えると、稲の吸水で同位体の存在量が変わり、土壌水との混合などの結果として、たとえば下端フラックスの同位体比が変わるといえることはあると思います。今まで水量が多い水田の非常に土壌水分量が高い状態を対象としてきたので、枯れた稲が落ちたらどうなるかは考えたことはありませんでした。もしかしたら、畑などで水分量が少なく、稲からの水の戻りが無視できないような状態ならば同位体比は変化するかもしれません。

せん。

溝口（東京大学）：

同位体に関してはいろいろと議論があると思います。今は良い検出器ができたことで、いろいろな分野に応用できるようになったと思います。植物の中を流れて蒸散により同位体比が変化することも、このような分析器ができたからこそ応用が効くようになったわけで、土壌物理学の分野でどう使うのかについてもこれからだと思います。一つの情報として、福島国際教育研究機構が来年の4月に立ち上がります。その中で農林水産分野が一つの柱としてあります。その他に放射線化学分野も立ち上がります。そういうところに我々の学会メンバーも積極的に入っていき、「土壌分野でもこのような安定同位体比を使いながらこれからやるんだ！」と旗揚げすると、盛り上がっていく気がします。新しい分野なので頑張ってください。

諸泉（司会）：

情報ありがとうございます。次は田原さんです。

西村（東京大学）：

地質図の精度がシミュレーションの肝になると思えます。またシミュレーションしたときに上手くいかないことも多いと思いますが、計算を適正化するために何か行われていますか？

田原（地圏環境テクノロジー）：

地質自体は地下水の入れ物になりますので、地下水にとっては地質に与える透水性の分布の感度が最も大きいです。したがって、通常考えたらあり得ないような物性を与えないと絶対に合わないことが起こる場合もあります。そのときに、そこで終わるのではなく、できる限り現場に行き、現場とモデルの対話といいますか、確認作業を繰り返すことに気をつけています。コストなどにもよりますが、様々な調査を検討することによりギャップを埋めていくようにしています。

西村（東京大学）：

今日の例などを見るとかなり複雑に地層が溶岩を挟んでいたり、断層が生じたりしていますが、そうした場合においても、計算はある程度上手くいくのでしょうか？

田原（地圏環境テクノロジー）：

一般的な話になりますが、河川流量と地下水はそれなりに合いますが、そこに年代や水質的な要素まで合わせようすると結構大変なことが多いと最近わかってきました。そうした場合、やはり結果に合わせるために、局的に地質構造や透水性を変える必要が結構あると思っています。

三原（北海道大学）：

流域スケールでの数値シミュレーションにおいて、選択流のような不均一の流れの影響は経験的パラメータに反映されるのでしょうか？

田原（地圏環境テクノロジー）：

選択流があると言われている地域であれば、選択流自体をモデル化することは難しいかもしれませんが、ある程度気をつけながら計算することはあります。通常の均質な地質構造に対して計算すると、どうしてもこの部分だけは解析と計算が合わないところが逆に浮かび上がってきます。それが次の調査につながりますので、モデルで全て合うことが良いわけではなく、その合わないところがモデル化できていないところを浮かび上がらせる信号なので、逆にそのような情報を大事にすることが重要だと思っています。

奥田 (寒地土木研究所) :

地下水の流れで鉛直上向きのところがありました、蒸発散以外のメカニズムで上向きに流れるメカニズムはありますか？

田原 (地圏環境テクノロジー) :

熊本の事例ですが、少し地質が特徴的で沿岸部付近に海進海退時にできた有明粘土層が存在し、それが蓋をしているような状態になっています。上流側で涵養した地下水が流れてきますが、有明粘土層が分布する手前で上向きに流れていきます。駆動力は、地下水はつながっているため、上流の山側のポテンシャルが伝わって地表面よりもポテンシャルが高くなり、上向きの流れが生じると考えられます。

浪江 (北海道大学) :

最近、炭素貯留の重要性が話題になりますが、熊本県のモデルに炭素移動を組み込むことは可能ですか？

田原 (地圏環境テクノロジー) :

溶解した炭素成分が流れていく過程で化学反応などがあると思いますが、そうした諸反応を定式化して取り込むことができれば計算自体はできると思います。しかし、不確実性の大きなパラメータが増えるので、難しい点が多いと思います。GETFLOWSにはPHREEQC、とカップリングしたツールが既にできていて、鉱山分野などで使用されています。しかし、鉱物の溶解速度や鉱物量の不確実性が大きいので、計算はできますが、現実に近いのかというところはまだ大きな課題があります。

取出 (会長) :

田原さんが先ほど述べられた河川流量と地下水は割と合易いけれど年代や水質は難しいという点は、トレーサーの流出予測が難しいということでしょうか？

田原 (地圏環境テクノロジー) :

トレーサーは、過去の履歴を持っているといえますか、たとえば、地下水の厚さが実際の半分モデル化された場合、透水係数を倍にすれば実測と同じ地下水位を保つことができますが、地下水の中の流速は異なり、年代トレーサーなどの濃度が変わってきます。そのため、地質の情報や流速の情報を正確に適用しなければならぬ点が水質の難しい理由の一つだと思います。

取出 (会長) :

齋藤さんの発表にも関係していますが、溶質の情報は水分量の情報の上に乗っかっていて、溶質移動は水分移動がわかった上で、混合や流速にかかわる情報がないと求まらないということですね。溶質移動と水分移動には必要な情報に大きなギャップがあります。しかし、そこに挑戦していかないとブレイクスルーが無いのかと感じています。

諸泉 (司会) :

チャットでの質問も受けたいと思います。

齊藤 (鳥取大学) :

ともすれば不透水層と見なしがちな基岩がむしろ涵養域であるという小杉さんの発表を大変興味深く聞かせていただきました。その場合、基岩の水分移動特性の正確な把握が課題となると思います。今回は逆解析が使われたとのことですが、その正確性や妥当性、その他の推定法などあればご意見をお願いします。

小杉 (京都大学) :

風化した花崗岩でしたので、切り出して飽和透水試験や加圧板法用のサンプルを緻密に成形することができました。そのサンプルを飽和させた後の排水過程に対し

て、HYDRUS 1Dの逆解析と同様の方法によってパラメータを推定しました。ただし、なかなか大変な仕事ですので、発表で示した一つのサンプルでしか行っていません。他の場所ではボーリングによってコアサンプルが採れたので、加圧板で θ - ϕ を測定し、Mualemモデルで K を推定しています。風化花崗岩なので、ある程度の計測ができました。関西で多い地質である堆積岩の山になると、破碎帯のような感じで岩石がすごく崩れている所は、土と同じような θ - ϕ 、 K - ϕ を与えればよいかと思いますが、結構硬いところもあり、そこには亀裂がたくさん入っています。亀裂内の選択的な流れなどは、齋藤さんのDPモデルのような形でしか計算ができないと思います。亀裂の部分だけを取り出して測るとするのは非常に難しいので、たとえば、ボーリング孔で測った地下水位の変動や下流域の湧出量に対して、水文モデル(タンクモデル)でフィッティングを行うように、DPモデルを用いて逆解析を行うことになる気はしています。

岩田 (農研機構 農村工学研究部門) :

基岩の物理性のデータベースのようなものは整理されていますか？

田原 (地圏環境テクノロジー) :

データベースはないと思います。岩質に応じて透水係数を -8 乗や -9 乗にする場合はある程度ありますが、特に浅い場所の風化しているところや緩んでいるところに関しては、少し下流側の河川流量、主に河川流量の時系列変化に合わせるように透水性を与えることを基本的には行います。

小杉 (京都大学) :

間隙率であれば、岩質や風化の程度でおおよその目安は、地質や応用地質学の分野である程度示されていますが、van Genuchtenモデルの α や n などのパラメータはないと思います。

諸泉 (司会) :

ありがとうございました。もう一件、チャットの方から質問があります。

杉本 (大林組技術研究所) :

ある鉱山で斜面の緑化と地山への雨水の浸透抑制の両方を必要とする問題に関わっています。鉱山開発の影響で植物が生えなくなってしまった裸地の斜面に表土をのせて緑化すると、地山への雨水の浸透量が増えます。しかし、表土との間に地山より透水性が高い帯水層を設けた場合には、雨水の浸透量が減ります。緑化が鉱山の人にとっては迷惑になっているのかと思い、単純に緑化するのではなくて、もう一工夫加えれば鉱山の人たちに迷惑かけないのではと考えています。

小杉 (京都大学) :

今日話したところも昔は禿げ山である程度岩盤が露出していたので、マサ土を階段状に盛って緑化しています。したがって、状況はある程度似ている気はします。均質な土層を対象に計算したので、土層中に地下水帯ができると地下水位が上昇し、ある程度の水圧が土層と基岩の境界面にかかるので、その水圧でまた浸透量が増えます。一方、土層と基岩の間に排水パイプなどを埋めると排水が良くなり、地下水面が上昇しなくなる場合もあります。谷先生(京都大学)がよく議論されていますが、実際の自然の山でもソイルパイプとよばれる透水性のよい自然のパイプ状のような排水路があると、地下水位は上昇しなくなり、基岩への浸透量は減ります。これは水資源の観点からはあまり望ましくなく、雨の排水量が増えて洪

水流出は増えるというマイナス面があります。しかし、土層の中に地下水が発生しないということは表層崩壊を抑える意味では効果があります。すべてに良い工法はなかなかなくて、洪水を抑えるために斜面に蓄える方が良いか、崩壊を抑えるために排水を促進させる方が良いかの判断は難しいという気はしています。

杉本（大林組技術研究所）：

ありがとうございました。バランスが必要だということで理解しました。

諸泉（司会）：

全体を通してコメントがあればお願いします。

森（岡山大学）：

岩盤の透水性を測られたという小杉さんの発表を聞いて、私の場合はそれほど深いところまで対象としませんが、農地の表層から深さ 50~60 cm でも、たとえばアメリカの vertisol という石灰の硬い層があったり、沖縄でも 40 cm ぐらいの深さで硬い層が出たり、インドネシアでも硬い層ができていたりしています。そうした層の透水性を適切に評価しないと、計算は実測に合わなくなると思いました。山の斜面はスケールが大きいですが、農地の深さ 40 cm ぐらいのところの硬い層の影響についてコメントをお願いします。

小杉（京都大学）：

風化岩盤の透水性が土層に比べると低いときの計算を示しましたが、計算自体は岩に対する透水性以外の特別な設定はありません。透水性が高い層と低い層が層状に分布すればいろいろな影響が出ます。今日は基岩の透水性は一種類に仮定しましたが、値が変化すると洪水と基底流の分配なども大きく変化します。場所によっては、透水性が低い地層の下に透水性の良い地層があったりすることもあり、計算結果を詳細に検討したり、また解析解的にも議論することは大切だと思います。斜面の成層土は宮崎先生（東京大学）がいろいろ検討されていたと思いますが、土壌物理の分野でさらに検討することはおもしろいと思います。

諸泉（司会）：

最後に講演者の皆さんからコメントをお願いします。

小杉（京都大学）：

リチャーズ式が真実だという前提のもとで計算をして、その計算結果が数値的に安定であるかといった議論をしてきましたが、リチャーズ式が真実だということも、ある意味幻想なのかなと、斎藤さんの話を聞いて少し思いました。DP モデルの計算では亀裂とマトリックスで圧力水頭の値は別々に得られますが、テンシオメータで測る圧力水頭が、一体どちらの圧力水頭を測っているのか、平均的なものを測っているのかを考えることは、複雑ですがおもしろいと思います。たとえば、単純に HYDRUS で一次元浸透を計算して、圧力水頭や流出量が適切に表現できてリチャーズ式で解ける理想的な条件だと思っても、実はそれは DP モデルの解かもしれません。あるいは、さらに 3 領域、4 領域が重ね合わさった解を、単純にリチャーズ式の解だと思っているだけかもしれません。そんな風に考えると、リチャーズ式で得られる解が真実だということも少し違うのかなと思いました。

斎藤（東京農工大学）：

今回、DP モデルを使用して思ったことは、様々なパラメータをいろいろと変化させると、それに応じていろいろな結果が出てきますが、これをどう解釈するのか、それを裏付けるデータはどのようにして得られるかという

ことです。DP モデルの結果は、小杉さんが指摘されたように、たとえば亀裂とマトリックスの交換を大きくすれば、単純なリチャーズ式の結果に近づきます。私自身は今のところ何が正解かとは考えていませんが、モデルを検証できる実験を考えることが重要だと思います。そうでないと、モデルだけが一人歩きしかねない危険性もあると思います。

吉岡（島根大学）：

DP モデルの話聞いて、同位体の土壌内での輸送を考えると、考慮すべき点が多いと思いました。その一方で、モデルの結果を何に使うかを考えると、使い道に合わせてモデルの精度などを選択する必要があります。そのため、様々な土壌の水の世界があることを理解しつつ、ツールとしてのトレーサーが使えるような実用的なモデル化のあり方について、今後、模索していく必要があると思いました。将来的には、もう少し広い不飽和帯の流域モデリングを考えたいのですが、その際、狭い世界から広い世界へつなぐために、何を単純化して良いか、逆に単純化できない点は何かのバランスを見極めていきたいと思いました。

田原（地圏環境テクノロジー）：

今回、初めて土壌物理学学会に参加させて頂きました。我々が通常の実務で行っているシミュレーションは、土壌物理が通常対象とするスケールよりは大きいと思います。正直なことを言いますと、通常の実務では毛細管圧力（水分保持曲線）や相対浸透率（比透水係数）などを変えないのが実情で、透水係数に全て預けて、透水係数を調整して合わせることを行っています。メッシュが大きいときと小さいときの流れの違いについても、そこまで神経質に考えない場合もあります。やはりスケールに合わせたモデリングや、どこを簡略化すべきかなどは、よく考えながら使っていくことは大切です。あくまでもシミュレーションはツールである一方、サイエンス的なミクロな視点などもすごく大切だと思いますので、バランスも大事だと思います。

諸泉（司会）：

最後に取出会長をお願いします。

取出（会長）：

やはり時間が足りなくなりましたが、これを機会にまた議論が続けばと思います。小杉さんも述べられた「リチャーズ式は真実？」は考えさせられる点です。亀裂がある場合の透水係数のスケール依存性を議論しながら、一方で土中水圧力や濃度は小さなスケールで定義しています。すなわち、リチャーズ式や移流分散式には異なるスケールが混在しています。私は 5 cm 程度の土層に対してリチャーズ式を適用しているのに対し、たとえば昨年度のシンポジウムで講演頂いた芳村さん（東京大学）は 100 m 単位で透水係数を定義してリチャーズ式を用いることの妥当性は、永遠の課題なのかもしれません。皆さんにもリチャーズ式の解を得るためのツールとして HYDRUS をもっと使って欲しいと思いますが、ここで議論したようなリチャーズ式の課題があることを頭の隅に留めて置くことは大切です。

もう一点最後に確認したいことは、斎藤さんが DP モデルで指摘されていましたが、水分移動に加えて溶質移動を考えると、溶質モデルの仮定次第で、水分の移動は同じでも溶質分布が全く異なる結果が得られることです。これは、地下水汚染を考えるときには特に重要な点です。単純にリチャーズ式と CDE を用いた場合は、溶

質の断面方向の完全混合を仮定するので、溶質の移動は水分の移動に比べて大きく遅れます。しかし、現実にはもっと早く地下水に汚染物質が流出することが生じます。田原さんが述べられていた水分は合うけれど、溶質は合わないことが、割と小さなスケールにおいても生じ

ると思います。リチャーズ式や CDE の適用範囲と限界は、難しい問題ですが、やはり、そこにチャレンジがあると思います。

諸泉 (司会) :

以上で総合討論は終わります。長時間にわたりどうもありがとうございました。

(敬称略)