



第 63 回土壌物理学会シンポジウム総合討論 「地表面－大気間の物質・エネルギー動態のモデル化 — 土壌物理学に求められるもの」

斎藤広隆¹・諸泉利嗣²・取出伸夫³ (シンポジウム事務局)

Discussion at the 63rd symposium:

Modeling of mass and energy dynamics between the earth's surface and the atmosphere
— contribution expected from soil physics

Hiroataka SAITO¹, Toshitsugu MOROIZUMI² and Nobuo TORIDE³

本稿では、5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, 斎藤広隆)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。この第2部の総合討論も、午前中に引き続き、諸泉と斎藤の2人で進めていきます。また、適宜、取出会長にも加わってもらいます。まず、講演者の方々に個別に来ている質問に講演順に答えて頂くという形で進めます。足立さんから芳村さんへの質問は「土砂輸送、とくに微細成分の輸送について、海洋への移動なども含めて重要な視点を補足ください」です。

芳村 (東京大学):

微細成分はSSに相当するかと思いますが、SSの場合は水の混濁状態と流量の関係が衛星からも見られるので、よくモデル化されています。ダムなどへの堆砂の視点では、堆砂により流量が変わっていく流路網へのgeomorphologicalな影響をモデルの方で自発的にできたらとても面白いと思っていますが、それは夢物語かもしれません。

海洋における土砂輸送のインプットとして、SSが海洋に出て行くので、海洋モデルの方からは河川からの土砂予測がないのかと聞かれることが多いです。私がおもしろいと考えているのは、海洋コアを掘っている方が洪水履歴を調べると、河川から流れてきた土砂がある流量を越えるとそこに到達する。それ以外だと全く到達しない、いわゆるハイパーピナクル流の形成が確認されることです。そういった観点から流量と土砂の関係が欲しいと言われることは多いので、今後、海洋モデルと連結していく予定です。ここ数年、様々な視点から全球的な土砂輸送モデルの開発が出てきているので、流量と土砂輸

送の同時達成も面白いと思います。

諸泉 (司会):

次に長崎大学の中川さんの質問は「大規模なモデルの構成について理解していないのですが、各プロセスのモデルの結合のとき、データは相互にやり取りされ、同時に全てのモデルが並行で走るイメージでしょうか? それともプロセスには上下流があり、上流のモデルの結果を受けて下流のモデルの出力が出て来るというイメージなのでしょうか?」です。

芳村 (東京大学):

両方あります。特に同時に起こる相互作用を陽に扱いたい場合は、データが相互に処理されて同時並行に走らせるということを行います。上流下流というように、下流から上流に伝わらなくても良い場合は、必ずしも連結しなくて良いのですが、それは場合によります。影響評価モデルの場合によくあるのは、下流から上流には影響しないけれども、下流側で非常に高頻度かつ空間的に非常に密なデータを要求している場合です。その場合、気候モデルの場合は出力を1時間間隔で保存しているだけで結構手間なので、同時に動かした方が速いこともよくあります。

諸泉 (司会):

もう1つ、溝口さんから質問を頂いていますが、スケールに関する問題なので、後半の全体討論として取り上げます。次に坂井さんに対する佐賀大学の徳本さんの質問は、「蒸発散量を合わせるのに、透水性に関わる間隙結合係数のパラメータ l (エル)を変更して透水係数を大きくする点について、圃場表面に亀裂が生じて透水係数が増加する理由があれば教えてください」です。

坂井 (三重大学):

蒸発に対する透水性を大きくすることなので、飽和付近の透水係数に影響を与える亀裂ではなく、不飽和部分の透水性パラメータ l (エル)が0.5より大きかったとい

¹ 東京農工大学大学院農学府

² 岡山大学大学院環境生命科学研究科

³ 三重大学大学院生物資源研究科

2021年12月4日受稿 2021年12月14日受理

うことです。乾燥領域の不飽和透水係数の測定はなかなか難しいので、現場観測データに対して逆推定することが有効だと考えています。

諸泉 (司会):

徳本さんからもう一点「作物による根分布が土壌水分特性に与える影響もあると思いますが、蒸発法による透水係数の確認もあった方が良いと思いました。」というコメントがあります。

坂井 (三重大学):

蒸発法で根を多く含む不攪乱土の不飽和透水係数を推定し、今回得られた結果と比較することは今後の研究材料になるのかと思います。ただし、飽和付近と不飽和の領域は、亀裂の場合と同じく、思い切って分けて取り扱う方が良いと考えています。

諸泉 (司会):

次に、山口大学の坂口さんからです。

坂口 (山口大学):

山口大学内の大豆圃場で私が測定した根分布は、10 cm 深付近に根が多くて、深くなるほど減っていき、30 cm 深付近は根全体の5%程度でした。しかし、30 cm 深は上層土壌より湿潤なので、その5%の根が大量に吸水しているかもしれないと思い、蒸散量分の吸水を土壌の各深度にどのように配分すべきか悩んでいます。

坂井 (三重大学):

私も根の吸水分布は本当にどうやって決めたら良いか悩んでいるところでです。実際、三重大の圃場でも根の分布を測定すると、表層の方が多くて下層はほとんど無いですが、それをそのまま吸水モデルに用いると、やはり下層の吸水を表現できない問題があります。おそらく根の量と吸水量は一致しないだろうと思います。吸水に寄与する根の量が正確に測れる方が良いとは思いますが、吸水分布が不確かな場合、均一な根の分布を与えて補填吸水モデルを考えることが1つの解決策と考えています。その場合、根の深さが大切になりますが、どのように経時的に測定すべきか知りたいところです。辰己さんが取り組まれている植物の根圏モデルでは、どのくらい細かく考える必要があるかを後半の時間でぜひお聞きしたいです。

諸泉 (司会):

次は農研機構の岩田さんからの質問です。「バルク輸送係数 C_H も LAI で変化するならば、透過率だけでなく C_H や他のパラメータも蒸発散量 (土壌水分量) の計算結果に影響を与えていると思います。先行研究で、透過率が支配的な要因だということがわかっていれば今回のアプローチで十分だと思いますが、もしそうでないなら、透過率の実測値があると、手法の妥当性の検証データにもなるので良いのではないかと思います。もし透過率を実測されているようでしたら、計算結果と一致するか教えて頂けますでしょうか?」

坂井 (三重大学):

結論から言うと透過率は測れていません。バルク輸送係数の部分は LAI や他の成分の関数で与えられます。草高、 LAI 、風速などの値から求めるモデルがあり、複雑なモデルではありますが、そのモデルを使いました。ただ、透過率については講演でも述べたように LAI の係数が現場に合うものでないと使えないので、今回は透過率 τ がわからないものとし感度解析で求めました。

岩田 (農研機構 農村工学研究部門):

バルク輸送係数のモデルは、たとえば稲とか大豆とか

でも適応できると考えて良いですか?

坂井 (三重大学):

蒸散に影響するバルク輸送係数は、 LAI と草高に加えて気孔コンダクタンスが入った関数になります。気孔コンダクタンスとして与えるパラメータが植物によって違う可能性はあります。稲に対しても、たとえば農研機構の丸山篤志さんの研究等、今回のモデルの適用例があります。

諸泉 (司会):

続きまして、坂部さんに対する質問です。まず、斎藤さんお願いします。

斎藤 (司会):

今日お話し頂いた幹からのガスや水蒸気の放出を含めた樹木ひとつを対象とした物質循環モデルはあるのかどうか、もしあるのであれば、それを森林全体の物質循環をモデル化しようとしたときに、どのようにスケールアップするのか、またどのような課題があるのか教えて頂けたらと思います。

坂部 (京都大学):

幹からの二酸化炭素放出については、呼吸で発生した二酸化炭素の放射方向の拡散と樹液に溶けた二酸化炭素の蒸散による輸送が組み込まれた物理モデルが存在します。幹からのメタン放出のモデル化は、メタンの発生源や輸送メカニズムの詳細がまだ不明であることが制限となっています。スケールアップについて、発表では幹からのメタン放出が全球メタン放出の10%を占めるという研究例を挙げましたが、3樹種の幹メタン放出量に湿地林の面積を掛け算して全球にスケールアップした結果です。より正確なスケールアップには、樹種別のメタン放出特性の把握など、課題が多くあります。草本からのメタン放出についてはモデルがあるので、それを樹木に発展させ、まずは樹種ごとにモデルを適用して進めて頂けたらと考えています。

斎藤 (司会):

草本のモデルでは土壌はどのように扱われていますか?

坂部 (京都大学):

たとえば $CLM4Me$ というモデルでは、まず土壌中のメタン生成量を温度と基質の可給性から計算し、草本中をフィックの法則で拡散するとして計算しています。また、植物の成長、根量などの植物側の情報が係数として加わります。

諸泉 (司会):

次に取出会長お願いします。

取出 (会長):

非常に丁寧な測定に驚かされながら聞かせて頂きました。最後の泥炭の話ですが、炭酸ガスの発生とメタンの発生の効果をトータルにみれば、地下水を高く維持してメタンは発生するけれど、炭酸ガスの発生を抑えた方が良いという話ですね。どちらのガスも有機物分解に伴い発生し、有機物分解速度は還元が進行すると低下することは知られています。私は簡単なモデルで試算を行っているのですが、有機物分解速度の酸化還元電位の依存性に関するパラメータを少し変えると、結果はかなり変化します。そのため、還元状態の有機物分解速度を何らかの測定から推定できないかと日頃考えている次第です。今後の課題になると思いますが、何かコメント頂ければと思います。

坂部（京都大学）：

有機物分解速度は、メタン生成の基質となる有機物の質にも影響してメタン生成速度に直結すると思います。メタンフラックスを測定しているサイトで、そうした土壌の特性を把握できているサイトは非常に限られると思います。メタンフラックスの国際的なデータベースにおいても、そうした情報は登録されていないのが現状です。そのため、温度、地下水位、総一次生産量などによって、メタン生成の基質に関する情報を補うことが行われますが、モデルの改善には、土壌の特性についての情報がより必要だと思っています。

取出（会長）：

私が行っている試算では、分解定数の酸化還元状態の依存性として pe の関数として与えてみると、還元に伴う分解速度の低下は表現できます。ただ、メタン生成等の関連する結果はその低下割合に大きく影響を受けるので、やはり定量化を目的としたモデルにおいては、実測に基づく検証が今後は必要だと思っています。

坂部（京都大学）：

培養実験のようなものでしょうか。

取出（会長）：

野外の観測と培養実験をあわせた評価が大切なのかと思います。その意味でも、坂部さんの測定はとても貴重だと思いました。

齋藤（司会）：

続きまして、辰己さんには坂井さんから質問があります。

坂井（三重大学）：

根の量や長さを測るのは難しいと思いますが、辰己さんの考えられているモデルでは、根の吸水や養分吸収に関してどのくらいの情報が必要なのでしょう。

辰己（東京農工大学）：

なかなか難しいですが、時空間スケールによって求めるものが異なると思います。現状では、たとえば土中水の NO_3^- や NH_4^+ 濃度については、乾燥密度、土層の厚さなどから求めた土の質量 (soil mass) に係数をかけて求める簡易的なモデルしか使えていません。しかし、そこに微生物やそれ以外のプロセスによる NO_3^- と NH_4^+ の濃度変化を高い精度で求めるモデルを利用しないと、根からの養分吸収と水分吸収について十分に納得できるようなモデル化ができないと思います。それに耐えうる土壌中の酸度濃度、土壌水分、pH、温度、有機炭素などの条件と硝化菌や脱窒菌および微生物集団による硝化速度係数や脱窒速度係数などの関係を包括するデータベースがあればモデルに導入できるのかと思います。現時点では非常に単純化されているので、個人的にはもっと精緻なものにしたいと考え、齋藤さんらと一緒に取り組もうという話もあります。根近くの情報はできる限り測っていく必要があるという認識です。

坂井（三重大学）：

植物の成長を予測するモデルでは根の量なども出てくるとは思いますが、根の量に比例して吸水や養分吸収するという考え方はですか？ それともそのような考えは用いずに全体から一様に吸水・吸収するという考え方はですか？

辰己（東京農工大学）：

基本的には根の分布密度に基づき求める考え方ですが、個人的には果たして簡単な成長関数をベースとして根が伸長するモデルで根の水分吸収や養分吸収をきちんと表現できるのかという疑問がずっとあります。特に微

生物活動による影響を含め鉛直方向の有効根群域や根群密度を各種条件下において、ある程度正確に再現・予測する精緻なモデルにしたいと現時点では思っています。

齋藤（司会）：

精緻で高精度な作物モデルに取り組みられていますが、一方で、濱本さんの発表にあったように、1つの圃場内の生育にもかなりばらつきがあり、土壌成分や物理性にもばらつきがあります。辰己さんの作物モデルでは、そうしたばらつきはどのように考慮するのでしょうか？ それぞれ各地点においてばらつきを表すパラメータを用いるのですか？ また、群落モデルでは、群落内でも生育にはばらつきがあると思いますが、モデルではどのように再現されるのでしょうか？ 群落を分割して、小群落のようにモデル化していくのでしょうか？

辰己（東京農工大学）：

群落スケールをさらに個体レベルまでスケールダウンすることは問題ない作業です。ばらつきについては、圃場内で 1 m 離れたら、窒素量や生育状況が大きく異なることは経験的にわかっています。そこで、たとえばモデルのパラメータに関しては、感度分析で感度の高いパラメータをリストアップして、多目的最適化による手法でパラメータ群を作り、パラメータ群それぞれに対して結果を出力することで生育状況のばらつきを評価できます。あるいは、最近では広域の衛星データでは実測に近い生育データが取れますので、そうしたデータに同化させてパラメータの不確実性を逐次的に低減させる高精度なモデルを実現することもできます。また、圃場内のばらつきを定量的な情報として得られていない場合、ばらつきが何らかの分布に従うと仮定して、決定論的ではなく、確率論的に結果を出力する方法もあります。確率分布の情報によりばらつきを表現できないかと考え、モデルの構築を進めています。

齋藤（司会）：

1つの群落成長モデルで計算するとき、群落内でそうした手法をとれば成長のばらつきは、計算上は出るということですね。

辰己（東京農工大学）：

計算上はできます。そのばらつきの前情報があるかないかで、それぞれ扱いがまた変わるので、最終的にどういう目的でモデルを使うかにも依存すると思います。いずれにせよ、ばらつきのような情報も考慮したパラメタリゼーションとモデルの出力を考えています。私のモデルでは、群落を任意の層に分割しますので、分割数を増やすとか、あるいは群落をもう少し小さくすることもできます。モデル自体とパラメタリゼーションの2つをうまく合わせてばらつきを評価したいと思います。

諸泉（司会）：

次に取出会長お願いします。

取出（会長）：

窒素モデルがどこまでシンプルにできるかは大きな課題です。土中有機物が微生物により分解される過程で、窒素と炭素の収支から窒素の有機化と無機化が生じますが、窒素モデルを考えるとき、土中で窒素循環と炭素循環がリンクすることは外せないと思っています。すなわち、モデルは複雑にはなりますが、有機物の CN 比と分解に伴う窒素と炭素の収支を考慮した有機化、無機化のモデルは必要と考えています。

辰己（東京農工大学）：

私もご指摘の方向が最終的な理想だと思っています。ただ、現時点では私は土壌物理に明るくないのですが、

シンプルでかつ実用に耐えるモデルを目指すためには、実測値を一元化したストレージのようなデータベースがないとなかなか難しいと思います。

取出 (会長):

土壌物理でも窒素モデルはまだこれからの状態ですが、土壌微生物の分野には莫大なデータがあります。しかし、必ずしもモデル化の視点で整理されていない点が難しいところです。今後、何か一緒にできたらと思いますのでよろしくをお願いします。

諸泉 (司会):

最後に濱本さんに移りたいと思います。まず、長崎大学の中川さんからです。

中川 (長崎大学):

時系列のクラスター解析は、それぞれの観測値が同じ時間間隔で測定されていて、ユークリッド距離を計算するのだと思いますが、測定期間が長くなると入力が増大になりませんか？ また、観測の時間間隔がずれている場合は何か手段があるのでしょうか？

濱本 (東京大学):

今回解析に用いたのは 30 分インターバルの観測データで約 4 ヶ月間観測したものです。それが 73 区分あり膨大なデータではあります。今回の解析は R でコーディングしましたが、解析時間的にはそれほどの負荷がかかるものではなかったです。計算負荷よりも、ご指摘にあった欠損データが厄介でした。たまたま今回は比較的欠損が少なくデータを取得できたので、正確に時系列間の類似性を評価できましたが、一部欠損データについては、他のセンサーデータも解析から除外しました。ただ、欠損データが多い場合は、何かしら他の数値解析で欠損期間を埋めて評価する事を考えなくてはいけないのかなと思います。

諸泉 (司会):

続いて佐賀大学の徳本さんからの質問は、「土中の CO₂ と O₂ 濃度に負の相関は見られましたか？ また、数値計算において O₂ のみを用いる理由があれば教えてください。たとえば、CO₂ は水に溶解するなど考察する要因が増えるためですか？」です。

濱本 (東京大学):

O₂ 濃度の減少と CO₂ 濃度の増加を図にしたところ、きれいな負の相関が出ました。とは言え、完全に一对一のラインに乗るわけではなく、全体的な傾向としての負の相関です。個別のたとえば降雨レスポンスに対する応答を見ると、1 個 1 個で少しずれていました。今回、O₂ を解析対象に選んだ理由はご指摘の通りです。CO₂ は水への溶解と、水移動と根の吸水による CO₂ の減少を考慮する必要があり、より複雑なプロセスになるので、今回の解析から CO₂ は外しています。また土壌呼吸という観点で考えると、やはり O₂ 濃度がリスクになるので、まずは O₂ 濃度を正確に表現できることを目指しました。CO₂ は次のステップで考慮したいと思います。

諸泉 (司会):

続いて農研機構の岩田さんからの質問は、「溶液の EC に変換されたデータを使用されているとのことですが、変換に用いたモデルとパラメータの設定方法について教えてください。」です。

濱本 (東京大学):

土中水の EC への変換には Hilhorst モデルを使っています。5TE センサーの出力値と水および乾燥土壌の比誘電率を使って土中水の EC に換算しています。武藤ら

(2017) (土壌の物理性, 137: 3-9) を参考にしています。

諸泉 (司会):

これにて個々の講演者に対する質問は終了します。最初にお伝えしたように東大の溝口さんから以下の講演者皆さんへの問題提起のご意見がありました。「土壌物理学の古典的な課題として空間変動性があります。たとえば 30 m × 100 m の 1 枚の田んぼですら数 m 離れるだけで排水性が異なります。気候モデルを走らせる上で必要な最小単位面積はどれくらいでしょうか？ 講演では 25 km グリッドくらいだったと思いますが、そこまでスケールアップするためには、流域レベルの面積 (体積) での平均的な物理量 (保水性や透水性) を推定する必要があります。さて、どうしましょう？」今日の講演では、坂井さんの畑の点観測スケール、坂部さんの森林スケール、濱本さんの圃場スケール、辰己さん、芳村さんの地球スケールよりおそらく小さいリージョナルなスケールまで、様々なスケールがありました。溝口さんは水田のスケールを例にあげられていましたが、スケールの問題について講演者の皆さんのご意見を伺いたいと思います。

溝口 (東京大学):

少し背景説明をさせてください。かなり昔の話ですが、Don Nielsen (131 号, 巻頭言参照) は、土壌物理の良い研究に対して褒めた後、What is next? と必ず聞いていました。そして、Spatial variability との関連を尋ねました。30 年、40 年経っても相変わらずそのことに全然答えを出せていない現状があります。それからもうひとつは、私はいろいろな地点で土壌水分を測定してリアルタイムにモニターしていたのですが、衛星データに取り組む方々から、空から見た地球レベルのデータのキャリブレーションやモデルの検証のために土壌水分のデータを使いたいとリクエストを受けていました。しかし、私が測定している 5 ~ 10 cm 程度の大きさのデータを、25 ~ 100 km グリッドのモデルに対して当てはめて良いのかという疑問がずっとありました。一例として三反区画 (30a) の水田ですら排水性のばらつきがあることを述べましたが、地球スケールのモデルと小さなスケールのばらつきをどのようにつなげていけば良いかという問題提起です。私は、土壌物理スケールから 25 km グリッドスケールまでには何段階かのモデルを組み込んでいくしかないと思っています。その意味では、水文学で用いられているモデルを地球レベルにどのように拡張するかという課題かと思っています。皆さんに考えて頂きたいと思います。

諸泉 (司会):

補足ありがとうございます。それでは、皆さんの取り組まれているそれぞれのスケールの視点からコメントください。まず、芳村さんからお願いします。

芳村 (東京大学):

土壌物理の場合、パラメータでレスポンスが大きく変わるので、たとえばグローバルなデータセットもいろいろあるという話を今日はしました。我々の立場は、そういうのが出てくる度に、使ってよくなることを確認することかと思っています。実際には、もっと細かいスケールのバリエーションがあることは認識しています。ただ、それが程度ランダムな正規分布になっているのであれば、それを平均した代表値として、その観測自体が平均なのかは実際にはわからないですが、その平均値をグローバルに多数見ることで、大きな領域で平均的には合わせられるという視点で答えを見つけようとしている気はします。もう 1 つは、溝口さんが指摘されたように、水

文学的な情報である河川流量により全球モデルを検証することも有効だと思います。流域単位の平均値が河川流量に表現されていると仮定して、25 km といったスケールの代表的なものとして扱うことが今現状として行っていることだと思います。ただ、データとしてはどんどん細くなっていて、昔はそれが $1^\circ \times 1^\circ$ ぐらい (100 km スケール) だったものが、現在ではそれが Soil grids だと 250 m になっており、かなり進化している気はしています。

諸泉 (司会) :

次は坂井さんお願いします。

坂井 (三重大学) :

私は点スケールで取り組んでいて、アップスケールを考えたとき、何とか畑の空間変動性ぐらいまではいつか考えています。濱本さんが測定した空間変動性に対して将来的には回答できたらと思います。今日、芳村さんが 1 次元のカラムを並べて、地下水位をそれぞれ変えて計算を行う手法を紹介されていましたが、その手法が私の考えと一番近いと思います。空間変動を考えたとき、どうしても HYDRUS 2D, 3D を用いることを考える方もいると思いますが、それはそれでおそらく多くの問題が出てきます。私は、今行っている 1 次元のモデルを空間に並べて、下層条件が畑の排水性や水分量にかなり影響するので、下層条件を耕盤層の深さ、透水性などの分布から評価して空間的に拡張するアイデアがあります。そうした空間変動性を空中からドローンなどで捉えることで評価することに取り組もうとしています。

諸泉 (司会) :

ありがとうございました。それでは坂部さんお願いします。

坂部 (京都大学) :

私も空間スケールは、ずっと悩みの種で考えるポイントにいつもなっています。私の場合、土壌の培養実験からチャンバー法、そしてタワーフラックス観測までを行ったり来たりしながら、それら組み合わせることで現象を理解しようと取り組んできました。タワーフラックスの測定に対しても site specific に過ぎないと批判されることもあります。しかし、最近ではタワーフラックスに関する国際的なデータベースが発展して、各研究グループで取得された特定の場所のデータであっても、データベースを活用することで誰もが利用でき、同様の解析によりサイト間のレンジの比較などが可能になっています。そのため、タワーフラックスデータからより広域スケールのモデル化への貢献ができるようになってきていると感じています。

諸泉 (司会) :

続いて辰己さん、濱本さんの順にお願いします。

辰己 (東京農工大学) :

空間スケールの話は非常に難しいですが、10 km グリッドと点のデータを使った話は異なると思います。10 km, 25 km の情報は、農業で言えば農家さんに必要な情報であり、点の情報は、ある程度その圃場に特化した情報なので、その圃場を持っている農家さんには価値がある情報です。モデルの対象スケールによって、それを必要とする人、すなわちステークホルダーが違うという前提があり、25 km メッシュを代表する値が空間代表性を持っているかという点、圃場スケールではその値は絶対に信用してはいけない情報になります。25 km なら 25 km で計算したモデルの有用性があるし、点の情報であれば圃場の管理などの場面において農家に使うメ

リットがあると考えます。点の情報をアップスケールするというよりは、原理的なモデルの概念としては、小さな細かなスケールでも、広域スケールでも同じだと思うので、それぞれのパラメータを推定するための実測として扱う情報の性質がスケールによって全く異なるのだと思います。そのため、異なるスケールを一緒にモデルに組み込むことはなかなか出来ないのかなと思います。

濱本 (東京大学) :

私は今まであまりフィールドで実験をしていなかったのですが、今回、73 地点の測定をしてみて、測定データのばらつきを改めて実感しました。今回示したような多量のデータを解析することにより、圃場内のばらつきを規定している要因についてもう少し突き詰めていきたいと思っています。たとえば、それが土壌硬度なのか、あるいは透水係数なのかかわからないですが、ばらつきを生む要因について検討を進めれば、次のスケールアップに繋がる糸口が見つかるのかなと思います。ただ、今回得られた測定データについては、空間変動はありつつも、全体的なトレンドとしては降雨イベントに対する類似したレスポンスが各処理区で出ています。そういう意味では、目的に応じて圃場全体を 1 つの平均値ととらえる考え方があると思います。代表的な物理量のモニタリング手法は今後の検討課題です。

諸泉 (司会) :

5 人の皆さん、どうもありがとうございました。問題提起して頂いた溝口さん、コメントがあればお願いします。

溝口 (東京大学) :

手短に今回のテーマであるアップスケーリングに対する土壌物理学の貢献に関して言うと、気候モデルを走らせる上で境界条件として必要な地表面パラメータを、土壌物理学や水文学のモデルを組み合わせるような要素モデル開発に関する情報が必要だと思いました。

諸泉 (司会) :

取出会長からもコメントをお願いします。

取出 (会長) :

溝口さんのご指摘の通り、今回とりあげたアップスケーリングと不均一の問題は、土壌物理学の永遠の課題です。シンポジウムの冒頭に、その主な原因として、マイクロなスケールのダルシーフラックスの圧力、水分量、保水性、透水性を空間的に単純に平均してもマクロなスケールの水分フラックスを表現できないこと、とりわけ透水性の空間的な評価が難しいことを述べました。ただ、この指摘自体は古くからのもので、新たな方向を示すものはありません。そこで、今回のテーマを設定した私個人が思っていることを少し述べて下さい。

芳村さんの講演の最後に一次元のリチャーズ式を用いて地下水からの河川流出を評価する話がありました。関連して、最近、京都大学の谷先生が主催された森林水文のシンポジウムでも、豪雨後の河川への流出に対して不飽和水分帯の役割が大きいことが議論されていました。強い雨が降ると、比較的速やかに地下水まで浸透して、圧力伝搬により地下水を押し出すかたちで河川流出が生じるため、不飽和帯の評価の重要性を谷先生が述べられていました。不均一な透水性の空間的な評価に関して、私は、水分飽和に近い領域とある程度乾燥した領域を区別する必要があると思っています。洪水が生じるような強い雨が濡れた土に降ると、土中のマクロポアの流路が支配的になって地下水まで到達し、河川流出につながります。このような状況では、マクロスケールの飽和近傍

の透水性が大切になります。シンポジウムの冒頭に述べたように、マクロポアを含む土の飽和近傍の透水性の Representative elementary volume (REV) は大きく、また評価が難しい点が課題だと思います。

一方、芳村さんが示されていた乾燥地での乾燥など地表面蒸発に関わる問題になると、乾いた領域の透水係数の評価が必要ですが、乾燥した状態ではマクロポアは水分の流れには寄与せず、これは幸いです。乾燥領域では土は比較的均一になる性質があります。そのため、溝口さんの述べられていた 5~10 cm 程度の大きさの土壌物理性のデータと 25~100 km グリッドのモデルの距離が飽和に比べて近い気がします。今回の講演では、坂井さんの畑での蒸発散と芳村さんの全球モデルの蒸発散は案外近いのではと感じています。

このように考えていくと、大きなスケールにおいても、飽和近傍とそれ以外について分けて考えるのが良いのかもしれませんが。今回のシンポジウムでは、当初、上端の地表面境界における蒸発散について異なるスケールの観点から取り上げる予定でしたが、芳村さんに洪水流出を取り上げて頂き、土壌物理の上端と下端の境界条件に関わる問題として考える機会を与えて頂いたと思いました。土壌物理は土の物理的な性質については長年の蓄積はありますが、移動現象を考える上で重要なはずの境界条件について弱いと私は思っています。そのため、今後、スケールアップの問題も含めて土壌物理の上端と下端境界に関わる気象学や地下水学などとの交流が重要になると思いました。芳村さんが全球モデルに van Genuchten モデルを用いてより精密に土中水分移動の移動が表せるようになったことを述べられていましたが、洪水流出に関連して土壌物理的な視点からの貢献の可能性は感じました。今後、講演頂いた皆さんと一緒に考えていければと思います。

諸泉 (司会):

最後にフロアの方から何かコメントがありましたお願いします。

西村 (東京大学):

今の取出さんの話から、雨が多い国に住んでいる私たちはある意味すごく不利ですが、別の観点ですごくチャレンジングなテーマを私たちは持っていて、そこに組み込まないといけないと思いました。もう 1 つスケールアップについてですが、私は流域を対象に Getflows を 1~2 年使わせてもらったことがあります。圃場スケールの測定から何をやっても流域スケールの移動現象に近づけなかったという印象でした。最終的には、地質の違いで与える透水係数の検証を河川の流量で行いました。スケールアップのときには、検証できないパラメータを使うことも生じます。その意味で、当面は目的に応じて、検証できる場と検証できるスケールのパラメータを用いた場合と検証が難しい場合について分けて議論する必要がありますと感じています。

波多野 (北海道大学):

土壌図の精緻化をもう一つ考えて頂けると良いと思います。本日の芳村さんの瓶モデルは鉛直一次元の均一系で傾斜のある流域を構成して流域の水移動をモデル化していました。SWAT の場合は、Hydrological response unit (HRU) とよばれる土壌タイプ、土地利用、地形の組み合わせによって瓶が規定されます。それぞれの瓶の

面積は違って、横向きに並んでいますが、地下水の高さで水が出ていくのは芳村さんのモデルと同じです。その土壌のパラメータは土壌図によって規定されていて、土壌図がないと SWAT の流域モデルは作れません。その土壌図に、土壌物理のパラメータのデータがきちんと入っているか入っていないかで満足度が違ってしまいます。要するに、土壌図のデータベースはあるのだけでも、そこに自分たちで測定したものが入っていることはとても大事だと思います。その上で、取出さんが述べられていた飽和、不飽和といった仕分けをモデルとして入れていく、また、今うまく入っていない窒素モデルはもう少し精緻化してもらいたいと思います。今日の話は、土壌図の利用を、もう 1 つ考えて頂けるとぐっと進むのではないかと思います。

足立 (筑波大学):

土壌図の利用は非常に重要な視点だと思います。しかし、土壌図は土壌の実態として静的なものが表現されているけれども、今後、温暖化などで予測される変化、すなわち動的な情報が明確でなく、これまで議論されているように土壌図に表現されるインデックス (指標) として何かいいものを提案できるとよいと思っています。土壌図は静的な情報ですが、物質循環のモデルは流れにもとづくダイナミクスを扱っています。流れとしてとらえるときは、メッシュに区切った構造の話をして無理が生じると思っています。土壌図の方にも四角く区切った空間ではなく、血管や川の形のような流れの構造に対応させる視点が必要ですね。

溝口 (東京大学):

Pedotransfer function はどうなっていますか? Pedotransfer function は一つの要素として静的な土壌図の情報を動的な水分流れとして地球モデルと結びつけるのに有効かと思いました。

西村 (東京大学):

芳村さんのモデルでは、Pedotransfer function の Rosetta3 を使われていましたね。

芳村 (東京大学):

はい、使っています。

波多野 (北海道大学):

Pedotransfer function は、簡単なパラメータから難しいものを推定しようという読み替えモデルです。そこをさらに精緻化された動的なものに変えていくのは、取出さんの述べられた窒素動態がまさにその通りですが、やはり分布が違うということを思わないとそのパラメータを決めることができません。動いていることは分かっているけれども、そのパラメータの違いを翻訳しようとするといけないです。そこで Pedotransfer function を使えばつなぐことができるので、さらにモデルを精緻化できればより高度なものになって行きます。やはりそうして読み替え、読み替えを考えながら続けていくことが大切と考えます。

諸泉 (司会):

どうもありがとうございました。さらに皆さんのコメントを頂きたいところですが、時間になりましたのでこれにて総合討論を終了したいと思います。講演者の皆さん、google フォームで質問頂いた方々、また議論して頂いた皆さん、どうもありがとうございました。

未回答の質問への回答

坂口（山口大学）：

先程、大豆株とセンサーとの水平距離を質問させて頂きましたが、私が地熱板の埋設位置で困っているからでして、株中心から 5 cm, 10 cm, 15 cm と距離を変えて埋めると、株中心から離れるほど地上の葉が減りますから地中熱フラックスも異なり、どの位置で測るのが良いのかと考えているからです。水分センサーについては HYDRUS 2D に根の二次元密度分布を入力して、根の密度と吸水量が比例していると仮定して、根域全体の吸引圧経時変化推定値と土壌断面の各格子点位置の吸引圧経時変化推定値との RMSE が最低になった水平距離に埋設しております。

坂井（三重大学）：

水平方向のセンサー設置位置については、設定が難しいですね。現在の私たちの観測では、株の並びの下に設置しています。一方で、モデルとしては条間を含む空間を 1 次元で考えているため、ご提示の様な平均値を示す水平距離に設置するのも一案だと思います。

坂口（山口大学）：

$g_{S_{max}}$ については実測の最大値も良いと思いますが、実測の最大値が本当にとりうる最大値なのか疑問なので、Jarvis モデルにフィッティングして求めました。しかし、フィッティングして求めた $g_{S_{max}}$ の方が実測の $g_{S_{max}}$ よりもかなり大きくなるので、どちらが本当の $g_{S_{max}}$ なのかと考えている次第です。

坂井（三重大学）：

$g_{S_{max}}$ についての感度解析を行ったところ、蒸散速度の計算結果への影響はもちろん多少あるのですが、土壌水分量の結果への影響はかなり小さいものでした。モデルで計算する目的にもよりますが、畑地の土壌水分量を推定する目的であれば、 $g_{S_{max}}$ の影響は小さいものと考えています。一方で気孔コンダクタンス g_s は植物生理に係る重要な部分で、蒸散速度を正確に推定したい場合にはより詳細な検討が必要だと思います。

高田（麻布大学）：

芳村さんが総合討論でコメントされていた土壌水分が

どういう度数分布をしているかは、スケールアップを考える上で重要なポイントになると思います。20 年くらい前に、モンゴル（開発先生、当時広島大学）と北極圏（Hinzman、当時アラスカ大学）で様々な大きさのメッシュで系統的調査がされていましたが、その後の取り組みがあれば、お聞きしたいと思いました。

溝口（東京大学）：

Hinzman といえば、当時大学院生だった渡辺さん（三重大学）を連れて現地に行き、100 m × 100 m 四方のツンドラに 1 m ごとに 121 点の測定点をつくり、その凍結深を 1 m ごとに測定しました。Hinzman はそのデータを使って衛星からツンドラの融解深を推定するアルゴリズムを作ったように記憶しています。同行した植物班は、1 m 四方のツンドラにある苔の種類を 1 cm ごとに記録していたのが印象に残っています。23 年前の話ですが、いまから思うとおもしろい研究でした。

芳村（東京大学）：

北極圏のほうは存じ上げないのですが、開発先生と浅沼先生などが今もモンゴルで土壌水分観測を行っていて、GCOM-W (AMSR2) などの衛星観測と比較しています。さらに最近、私のようなものが、1 グリッド数十 km スケールのグローバルシミュレーション (Today's Earth) で参入して比較するなどしています。このような現地観測は、今後打ち上がる予定の AMSR3 でも重要な要素となると聞いています。そのような、点の現地観測と広域の衛星観測及びシミュレーションを組み合わせることで、アップスケーリングされた理解を深めていければと考えています。

坂井（三重大学）：

空間変動性やスケールアップについては勉強不足で、土壌水分の度数分布については情報を持っていません。質問の趣旨とは異なるかもしれませんが、たとえば Tyson Ochsner (オクラホマ州立大学) のグループは、宇宙線を使った土壌水分観測や、光ファイバーケーブルを使った地温の空間分布観測に地表面熱収支式を適用することで、1 m ~ 数 km スケールの土壌水分の空間分布を推定する取り組みを行っている様です (Dong et al. (2016): Water Resources Research, 52: 4280-4300).

(敬称略)