

第 50 回土壌物理学会シンポジウム総合討論

長 裕幸¹ (シンポジウム企画担当者)

Discussion at the 50th symposium on role of soil physics in research projects on water cycle processes, JSSP

Hiroyuki CHO¹

1. はじめに

2008 年 10 月 18 日に三重大学三翠ホールで開催された「第 50 回土壌物理学会シンポジウムー水循環系プロジェクトにおける土壌物理研究の役割ー」における各講演者の講演直後に行われた質疑応答と午後に行われた総合討論(座長:井上光弘, 諸泉利嗣の両氏)の様様をとりまとめたので, 今後の研究活動の資料としてここに報告する。

2. シンポジウム講演直後における質疑応答

今回, 開発一郎氏, 宮田秀介氏, 若月利之氏の講演直後における質疑応答は, 時間の都合により省略された。

古米弘明氏講演に関する質疑応答

質問, 取出 (三重大学):

実験では関東ロームを使っていますが, 土壌の特異性が結構あるのではないのでしょうか。浸透特性も, 土によってかなり違うと思います。特に関東ロームの場合, 日本では一般的な火山灰土ですが, 世界的に見るとかなり特殊な土だと思われまます。このような土を用いると, 結果が地域によってかなり異なってくると思うのですが, どのようにお考えでしょうか。

回答:

特性を認識した上で, この実験結果は, この土壌の結果であったとして考えております。この実験結果が, 例えば「アジアの水問題」で考えています, バンコクであるとか, ハノイなどに適用できるかというところではないでしょうか。土壌によって処理できる物質もあれば, できない物質もあると思います。私達としては, このような土壌の違いに関する議論を発展できる情報を提供できればいいと考えています。このプロジェクトは, 浸透処理をするというのがメインのターゲットではなくて, 浸透処理によって出てきた違いをどう評価するのかとい

た, 管理型のプロジェクトとすることができます。従って, このような情報を提供することによって, 実際に各土壌について実験を行っているグループとタッグを組んで, 浸透のメカニズムを理解し, 土粒子の表面特性や透水特性等を明らかにし, 最終的にアジアの水質問題を解決していきたいと考えております。

質問, 溝口 (東京大学):

現地の土壌は, 地下水位との関係で水分状態が変化していると思うのですが, 例えば, 今, 考えている 1 m の深さですと, 地下水位の変化に伴って, 水分が侵入したり乾燥したりといった過程を繰り返すと思います。現実の問題としては, 20 cm と 50 cm のカラムの中において, 窒素であれば, 乾燥により脱窒を起こしたりして, 生成とか消滅が生じてくると思うのですが, そこまで考慮されているのでしょうか。

回答:

今の質問の内容は, 二つに分けることができると思います。一つは, 浸透が行われるときに地下水位はどのようになっているか, 水の流れは地下水位によりどう変わるかという点, もう一つは, 浸透の間に起こる, 乾燥や湿潤などの環境条件の変化によって, 水質や反応がどう変化するかという点ではないかと思ひます。まず, 後者に関して, 連続的に水を入れる場合と間欠的に水を入れる場合とで実験を行っています。結果としては, 今回の 20-50 cm のカラム実験条件だと脱窒は起こりにくいということが分かっていますが, あくまでも関東ロームの話で, もう少し有機質の多い土では起こり得るかも知れまません。次に前者に関しては, 地下水位の変化によって水分状態が変化することはあり得ると思ひますが, 浸透処理を行う場合, 地下水位が高いと浸透が不安定になりますので, そのような場所への導入はまず考えないということです。

今回の実験に用いた土壌を採取した場所は, 地下水位が地表から 10 m ぐらいの所であり, 浸透状況が大きく変化することはありません。しかし, 地下水位の高い場所で, 降雨により水分状態が大きく変化する場合では, 浸透が悪いとかえって嫌氣的になりやすく脱窒が進むことがあるかも知れまません。厳密には, その現場の条件を再現できるようなカラム実験を行う必要があると思ひます。

¹Saga University, 1 Honjou, Saga, 840-8502. 佐賀大学農学部
キーワード: 水循環系プロジェクト, 土壌水分研究, 土壌撥水性, アフリカ水田開発, 土壌浸透処理
2009 年 2 月 9 日受稿 2009 年 2 月 20 日受理
土壌の物理性 111 号, 25-33 (2009)



Photo. 1 開発一郎氏の講演風景.

3. 総合討論

司会 (井上) :

ただ今から総合討論に入らせて頂きます。司会は鳥取大学乾燥地研究センターの井上と岡山大学の諸泉です。まず、各講演者に、たくさんの質問票が来ていますので、それにお答えしていただく形で進めていきたいと思えます。では、最初に開発さんへの質問です。

長谷川 (北海道大学) : 土壌水分の測定深は、何故 3 cm とか 10 cm のように決定されたのでしょうか、また、衛星から測定される土壌水分の深さとはどの程度なのでしょう。

開発 :

非常に本質的な問題で、衛星に関する話だと思います。まず、3 cm とか 10 cm というのは、衛星からは、その程度の浅い所しか測れないということです。衛星のマイクロ波の場合、乾燥している場合、数 cm 程度の深さまで見ることができます (周波数に依存) が、体積水分量で 20 % を超えますと、表面の水分だけしか計っていないと考えることができます。従って、測定深が土壌水分によって異なるということになります。モンゴルの様な地域だと、ほとんどが上向きのフラックスですので、逆に、土壌表面の水分測定だけでもフラックスを推定することができると思えます。

谷山 (農業環境研究所) :

植物水分量はどのようにして把握するのでしょうか。

開発 :

私たちが使っています小池モデルでは二つのパラメータを使っており、土壌水分量と同時に植物水分量を理論的にもとめることができます。ただし、残念ながら偏波で測るというやり方をしており、植物の水分量は、せいぜい高いか低いといった程度しか分かりません。今後、アルゴリズムを改良して、土壌水分量と植物水分量を同時に測れるようにしたいと考えています。植物水分量の影響をどのように除いているかという点、実際には、NDVI により推定 (土壌水分計算条件を判断) していますが、一般的な関係ではありません。

甲斐 (三重大学大学院) :

気候モデルや水循環モデルにおける土壌水分の実体は何なのでしょう。

開発 :

気候モデルや水循環モデルでは、地表面の境界条件として土壌水分を与えますが、気候モデル屋さんの考え方では、実体をよく理解しているとは思えません。これは、私の専門ではないのですが、いつも気になっているところです。昨年、土壌水分をキーワードにして、そこに関係している他分野の方々に来て頂いて、ワークショップを開いています。今年も 3 月 28 日に東京で開催しましたが、そこでは、気候モデルをやっている方とか、植物で発芽とホルモンをされている方とか、もちろん土壌水分測定や観測をやっている方も含めてディスカッションを行いました。次は、気候モデルと土壌水分と言ったセッションを設けたいと思っていますので、そちらの方に是非参加して頂いて、理解を深めて頂きたいと思えます。気象学会に行ってもいつも実体がよく解らないままで、私もお答えできかねるのですが、物理過程を入れるに当たって、土壌水分を大事にしなければいけないという認識は皆さんお持ちのようです。

甲斐 (三重大学大学院) :

土壌水分移動モデルの気候・水循環モデルへの組み込みによる実用化について教えてください。

開発 :

これは、多分、実用化されているのではないのでしょうか。来年の 6 月から 7 月にかけて欧州宇宙機構から SMOS という衛星が打ち上がります。この衛星では、合成開口レーダーではなく、合成開口放射計で測定する世界で最初の衛星です。例えば、イギリスにある ECMWF (欧州中期気象予報センター) が SMOS の土壌水分データと土壌水分移動モデル SVATS を用いて、土壌水分の変化を公開する予定にしています。日本においては、そこまではやっていませんが、気象庁が行っている数値予報モデルの中には土壌水分移動モデルが組み込まれている (JMA-Sib モデル) と思えますので、実用化に近い形で使用されているのではないのでしょうか。

甲斐 (三重大学大学院) :

国際的なモニタリングの意味と、今後の展開について教えてください。

開発 :

私の話の中で、国際的に地上における土壌水分の測定ネットワークを作る動きがあると言ったのですが、これは、GEOSS の一環でして、土壌水分が重要なので、ネットワーク作りが必要だということです。例えば、私が行っています中央アジアの方では、土壌水分の違いにより牧草の植生が異なり、遊牧方法が州毎に異なってきます。そういう意味で、現地でネットワークを作り、広域で情報を交換し合うというのは意味があると思えます。また、そのデータは、先ほどから言っています気候モデルなどに直接組み込まれて、計算が行われています。また、衛星もたくさん上がっていますので、衛星データのキャリブレーションやグローバル化に非常に



Photo. 2 宮田秀介氏の講演風景。

役に立つと思われま。

司会（井上）：

開發さん，どうもありがとうございました。引き続き，宮田さんへの質問票が来ていますので，それにお答えしていただきたいと思ひます。

濱田（筑波大学）：

撥水性の発現様式は，乾燥した土壤ではさらに乾燥し，湿潤な土壤ではさらに湿潤化するといった，ポジティブフィードバックとして作用することになると思ひます。このような性質は，有機成分を供給した植物や微生物，あるいは両者が共生する生態系に対して，表面的には不利に働くように思われま。不利ではあるが影響が小さいので許容しているのか，あるいは，何か表面的にはわからない利点があるのか，お考えがありましたらお聞かせ下さい。

宮田：

現在，いろいろな人が撥水性の起源になる物質について，その由来や特定について研究を行っていますが，なかなか「この物質」といった特定はできていないのが現状です。ヒノキ林に関しては，ヒノキから物質が出てると考えられていますが，そのような物質によって土壤を乾燥させるということが，ヒノキにとって有利なのかどうかといったことはよくわかりません。

石黒（岡山大学）：

撥水性物質と，その土壤表面における状態について教えてください。

宮田：

おそらくは，両親媒性有機物で疎水基と親水基を持ち合わせている物質だといわれています。乾燥時は土壤粒子（鉱物粒子自身は親水性）の方に親水基が向き，疎水基が外側に向くので，水をはじくような感じになり，その後，水によって次第に配列が乱され，親水基が外側に向くように配列されることで親水性になっていくのではないかとされていますが，確かめられたわけではなく概念的なものです。

小林（森林総合研究所）：

流域スケールの流出量は，湿潤条件下では大きくなり，

プロットスケールの表面流とは逆の傾向になっていたと思いますが，ハイドログラフの立ち上がり位置や，ピークの位置も湿潤条件下のほうが早くなるのでしょうか。

宮田：

流域全体におけるハイドログラフの立ち上がり位置を見ると，それほど顕著に湿潤時に遅くなるとか，乾燥時に早くなるといった傾向はこの流域では見られませんでした。小さい雨ですと，表面流起源であるかどうかはわかりませんが，早い流出が増加するといったものが見られました。

小林（森林総合研究所）：

流出水の水質への影響等は同じプロジェクトで扱ってはいないのでしょうか。

宮田：

水質に関しては，水質の方で研究されている人がいます。そこでは，撥水性に関係があるといわれています。蛍光 UV/DOC という指標を使っています。流域からの流出におけるその指標の経時変化の測定では，流出初期に多く出ているという観測結果が得られており，撥水性に起因する表面流が流出初期に寄与していると考察されています。撥水性に関しては，他の水質については測定されておりません。あとは，水質分析によって，溪流の水がどこから来たかという研究等が行われています。

小林（森林総合研究所）：

考察の中で，撥水性により上方で発生した表面流が，斜面下部で土壤に浸透していくという報告をされていましたが，これにより，地下水面が上昇して斜面下部が飽和し，崩壊が起きやすくなるといったことは考えられないのでしょうか。

宮田：

この流域だけなのかどうかはわからないのですが，ヒノキ林の今回観測した場所では，土層厚が1 m 弱ぐらいで，そんなに厚くなく，下部が飽和して崩壊が起りそうか，といわれるとそうでもなくて，起り得るかもしれないといったところですね。

加治佐（三重大学）：

復帰流に注目した，変動流出寄与域といった概念がありますが，復帰流による河川近くにおける飽和域のエリアの伸縮に関して，何かお考えはありますでしょうか。

宮田：

ご質問の変動流出寄与域というのは，河道の周りが飽和し，そこに降った雨とか，流れきれなくなって表面に滲出してきた地下水が，復帰流といった形で現れ，それが洪水流出のメインとなる成分ではないかという概念だと思ひのですが，ここではテンシオメータで圧力を測定しています。その結果，わりと大きな雨でも，完全に表面まで飽和してしまうというのは，本当に斜面の一番下のほんのわずかな部分で，この流出変動寄与域の概念でいうとほとんどその問題がでてこないといえます。その理由としては，斜面勾配が非常に急なので，問題が見えにくかったのではないかと思ひます。



Photo. 3 若月利之氏の講演風景.

西村 (東京大学):

溪流の流量に関してですが、降雨開始後土壤中の側方流フラックスが上昇し、その後一定だったのが、溪流の流量ピークと同じ頃から土壤中の側方流フラックスの値が漸減していたように思います。この変化についてもう少しご説明いただけないでしょうか。また、 ϕ の測定場所と溪流との位置関係はどのようになっていたのでしょうか

宮田:

少し、発表では説明を端折ってしまったのですが、発表で示した流量との関係における ϕ の値は、直接の結果ではなくて、斜面の一番末端での測定値と、やや上部での測定値における圧力水頭、および位置水頭からもとめた、単位幅あたりの土壤中における側方の水フラックスを計算した結果です。生データの ϕ の値で見ると、確かに溪流の流水域と同時にピークをむかえており、大きな雨の時には、流出ピーク時に溪流の周りには地下水ができていますが、表面まではなかなか飽和にならないということでした。次に ϕ の測定位置については、同じ流域内で計っていますが、流域の末端 (流量観測点) から 20 m ~ 30 m ぐらい内側でした。

井上:

どうもありがとうございました。では、引き続き、若月先生の方に質問票が来ていますので、ご回答よろしくお祈りします。

溝口 (東京大学):

アフリカ水田における土壌物理的な貢献について、もう少し具体的にご説明いただけないでしょうか。

若月:

例えば、私がアクションリサーチとして実施している、ナイジェリア中部のビダ市を中心とするヌベ地域は、300 万 ha ぐらいの砂岩地帯です。このうちの 10% ぐらいの面積が低地で、水田開発適地になります。この地域は、自然の巨大な地下ダムになっておりまして、雨が降り初めて 2 ヶ月後ぐらいから、低地とアップランドの境界の湧水線に沿って、いろいろな所で泉が湧いてきます。10 月には、降雨はストップするのですが、1 月ぐらいまで泉の水が流れ、時には 3 月ぐらいまで流れ続けた

ります。ほとんどは砂地ですが粘土質の部分もあります。アップランドの土地利用や管理法によって、降水がどの程度天然の地下ダムしみこんで、最終的に湧水や河川水としてどれぐらいの水が、どのような季節的な変化で流れ出し、低地全体に水が来るか、それをどのように有効に利用できるかということが中心的な目標になります。砂質であるという部分は不利になるのですが、水文学的にはヌベ地域はアフリカの中では例外的に水田的な土地利用に適した低地が広く分布しています。しかし、その他の地域のアフリカでは、集水域の低地にいかにも水の流れながら利用するかという、基本的な土地利用方法と土壌の性質と水文の関係について、ほとんど研究されていませんのでやってほしいということです。

比較でいきますと、熱帯アジアでは、土地面積が 10 億 ha 程度の広さですが、雨がアフリカの 5 倍ぐらい降ります。アフリカでは 25 億 ha で、雨が 5 分の 1 しか降りません。しかし、低地の面積でいうと、アジアは約 1.5 億 ha ぐらい、全体の面積の 10% 強が低地です。しかしアフリカは 10% でも 2.5 億 ha という巨大な低地面積があります。しかし、アップランドが 25 億 ha、低地が 2.5 億 ha ですから、アジアですと、メリハリの効いた地形変化の中に、山があつて低地があつてという関係で、山の土地利用と、山の土の種類とか植生といったことで、どの程度水が浸透し、どの程度低地に水が流れてくるかといったこととなります。しかし、アフリカの場合ですと、その低地の 2.5 億 ha とアップランドの 25 億 ha は緩やかな起伏で連続する地形面の低地であり、はっきりした地形変化を認識しにくいのです。アジア人の目から見るとほとんどが平坦な低地と見えるのですが、そういうところでも、1 m から 3 m 程度の高低差が続いており、非常に微妙な地形差があります。しかし、水は 0.1 mm の高低差でも流れます。雨の非常に多い沿海部では、年間 2000 mm 以上降り地形もかなりの起伏があるので、そのあたりはアジアと似ていますが、サハラに近くなりますと、ほとんど平らです。降雨は 500mm 以下です。しかし、低地の貯まる場所は貯まって湿地帯をつくるかといったことで、非常に微妙な地形差と土の性質と植生の違いによって水が貯まる所と貯まらない所が生じます。そういったところはかなり広域なスケールの仕事が必要になり、衛星による調査が必要になります。

やはり大事なのは、現場での地形や土および植生等を見ながら、集水域の中で低地の方にいかに水を供給し、保全しながら利用するかといったところが、重要な研究だと思えます。つまり、広いところに降った雨をいかに有効に利用するか、低地の全面積 2.5 億 ha のさらに 10 分の 1、最終的には全陸地面積の 1% の水田開発に適する土地、それでも 2000 万 ha の面積になります。低地の中の適地に水を供給し、いかに持続的に利用するかといったことは、非常にやりがいのある研究だと思えます。また、低地に水が来た時、水の量は少ないが来る所には来る、そこでは集約的な水管理をしなければなりません。水は少ないし、低地の面積は広いので、ワジという現象



Photo. 4 古米弘明氏の講演風景。

が起きます。田んぼを上流の方に作りすぎますと、下流の方に水が流れてこない。従って、上流から下流までの非常に広い面積の中で、ベストの場所に水田を開発し、うまく水を流すことによって、広い面積の低地を集約的に使うことができます。逆にいえば、その他の広大な面積は、森林に戻してやることも可能になり、このアフリカの広い面積というのは、地球温暖化に対して、炭素固定や炭素隔離といったようなことで非常に貢献できる可能性があります。しかし、この低地の中の適地と推定される 2000 万 ha の面積に、うまく水を流して使うための水田システムについてあまり研究が行われていませんので、こういったところで、土壌物理の人に期待するところが大きいわけです。

藤巻（筑波大）：

適切な施肥と補給灌漑を行えば、陸稲でも生産性はそれほど変わらないのではないのでしょうか。造成コストが高く、浸透損失が大きく、脱窒による窒素損失が大きい水稲に、特に優位性があるとは思えません。水田にこだわらなくてもいいのではないのでしょうか。

若月：

これは、元々養分の少ない土であるということと、地形的に高低差はそれほど無いのですが、水は最終的に集水域の低い方に流れ、1%の低地に水が集まります。そうしますと、たとえ少ない 100 mm の雨量でも 10000 mm 相当の水が低地には自然に集まるので、圧倒的に水田の方が有利です。又、低地に集まる水は養分に富む培養水でもあります。さらに、侵食されたアップランドの表土も低地に貯まります。畑地ですと持続的な生産性という面で、肥料や水を継続的に与え、コストをかけて管理しなければなりません。低地ですと自然の水の循環で水も貯まるし、養分や土も貯まることになります。低地におけるこれらの養水分の増加を地質学的施肥と呼んでいます。また、水管理と適切な施肥をすることによって窒素固定も行われます。脱窒が問題になるのは施肥がかなりの量に達した場合です。アフリカのように低施肥下の水田では窒素固定機構が優先します。リン酸の可給性の増加や塩基類やケイ酸、あるいは微量元素の供給性の強化等、天然の養分供給能の強化機構の存在も、アフリ

カのようなところでは水田のメリットになります。発表の中で水田仮説 (2) として述べた集約的な持続可能な生産性は、畑作の概略 10 倍に達するといった事実があります。日本を含めアジアの水田地帯の人口密度が高く持続されてきたのは、この水田仮説 (2) によって説明可能です。これは定性的な話なのですが、集水域における土と水と養分の動態を定量的に測定し、土壌物理学的な精緻な研究で実証してもらいたいと期待しております。

石黒（岡山大学）：

アフリカの水田研究から展望して、今後の日本およびアジアの持続的な水田農業のあり方について、考え方を聞かせてください。

若月：

日本の場合は減反の開始により、40 年前に水田の価値を捨ててしまったということになります。日本ではかつて 300 万 ha の水田があったわけですが、現在では 150 万 ha に減少しています。減った 100 万 ha が宅地や道路などに、残りが放棄水田になっているわけです。アジアでは、これから日本と同様に経済発展に伴って水田面積が減るだろうと予測されます。これは、日本およびアジアでは、水田システムの価値に対する認識への理解が、国際政治の政策レベルにまで及んでいないからです。つまり、水田システムの価値認識がアジアの稲作国内で終わっており、グローバル化していないということです。土壌物理学会がアカデミックな学会であれば、こういったところでももう少しグローバルになっていってもいいのではないかと思われるし、農業土木関係でも同様だと思われれます。水田の価値というのは、多面的な機能ということでいろいろと研究されているわけですが、本質的な機能として、畑地に比べて集約的な持続性が非常に高いということです。これは、歴史的に見て、畑作主体の欧米の国は、人口増を補うために、グローバル化して地球全域を植民地化して、解決したわけですが、アジアではこれだけの人口、60～70 億に対して、あえて欧米のように外に拡大することなく、持続的に生産が可能であったわけです。これは、集水域での水田システムの非常に高い持続的な生産性によるところが大きいわけです。これからのグローバルな環境問題、地球の人口は 90 億程度まで増加するでしょうが、そのとき、食料生産や環境保全を持続的にやっていくためには、集水域での水利用が重要になってきます。

従いまして、日本では、水田を里山地域まで含めると、すでに崩壊してしまった里山の修復が必要になってくるでしょうし、アジアでは水田とか里山システムの保全が重要になってくるでしょう。これらの重要性を気づかせてくれるのがアフリカで水田を造る、あるいはアフリカで里山創造をすることによって、現在、食糧問題とか環境問題が赤裸々な問題になっているところで、水田の価値というものを世界に示すことができれば、翻って日本の里山、水田農業の回復、修復、アジアの里山、水田農業の保全が可能になっていくと思います。



Photo. 5 総合討論の各講演者。

井上：

どうもありがとうございました。引き続き、古米先生の方にも、たくさん質問票が来ていますので、ご回答よろしくをお願いします。

甲斐（三重大学）：

関東ローム層は、古い年代から下末吉ローム、武蔵野ローム、立川ロームと深さ方向によって堆積物が違い、水分特性が異なります。今回採取した土はどの層に該当しているのでしょうか。

古米：

私自身は、どのローム層なのかを即答できませんが、採取してきたのは練馬区で、深さ 1 m 以下のものです。

石黒（岡山大学）：

検出されているノニルフェノールの起源は何でしょうか。

古米：

下水処理水の中に含まれているノニルフェノールの起源は、どういった排水が下水が受けているかによって変わりますけれども、今回は、都市活動水由来もあるでしょうが、生活排水由来の洗剤や界面活性剤が主な起源だと考えています。

渡部（京都大学大学院）：

水田や畑の場合は、栽培管理や水管理の季節変化が大きく、土壌中での物質動態も季節によって大きく変化しますが、都市の土壌、あるいは排水も季節変化を受けるのでしょうか。

古米：

これは、実際の維持管理等にも係わってきますが、浸透処理は地表面ではなく、浸透施設の下と比較的深いところの土壌での反応が想定されますので、そんなに低温になる場所ではないということです。従って、反応速度への影響は少ないと思います。

古米：

以上が、個別に出されている質問へのお答えです。その他、岡山大学の石黒さん、東京大学の西村さん、三重大学の加治佐さん、明治大学の登尾さん、北海道大学の長谷川さん、鳥根大学の森さんから質問をいただいでい

ます。内容的に共通していると思われるので、これらのご質問に対しては、「どんなイメージをもって今回紹介した浸透処理システムを導入するのか」と言ったこととお話することで答えになるかと思えます。

大きく分けて、まず、道路排水として、降った雨が道路を伝って地下浸透する場合、基本的に道路の雨水浸透施設が入口となります。例えば、トレンチを使うとか浸透ますを用いた場合、その施設からの浸透水が出て行ったときに土壌に到達しますので、施設の中で保持される物質もあれば、保持されない物質もあります。その場合、今のような浸透施設ではなくて、こちらが管理できる施設を造ることが重要になってきます。つまり、年に一度は大掃除をしてやるといったことです。そこで、いったん除去できるものは取り、吸着して蓄積したものは管理をしてやるということです。それでもなお、自然の雨でやってくるので、それでも取りきれないで通過した物は、下の土壌の能力を用いて、最後のフェイルセーフ的な扱いで行うということです。フェイルセーフがあったとしても、取れない物があるということが今回の重要な知見ですので、土壌があったとしても、とれないものは事前にちゃんと取ってほしいし、十分に保持できないような場合は、浸透施設のところで吸着剤とか吸着能のあるレイヤーを人為的に設けて、年に 1 回なのか 2 回なのか分かりませんが、地域の住民の方で形成する自治体のグループで管理し、汚染物質をトラップし、下の土壌層に負荷をかけないようにしようと、そうしないとサステイナブルではないというふうには道路排水では考えています。

次に、下水処理水についてですが、下水処理水というのは基本的に下水処理場にありますが、例えば、東京には 10 箇所程度ありますが、大体が海岸付近や河川の下流部に立地しています。こういった状態で、私のアイデアを適用すると、海岸線なので地下水位が高く、浸透しにくい場所にありますので適用することができません。このアイデアを使うとすれば、中・上流部側で 500 人だとか 1000 人ぐらいのコミュニティの下水に関して、高度に処理をして、そこに浸透させる施設を設ける。地下水は、そのコミュニティの人たちが、そのコミュニティで浸透させた量だけ使う。言い換えれば、そのコミュニティでどのぐらい水利用があるのかを考えていただいて、その量だけを処理するといった適用を考えています。どのぐらいの規模になるのかといった具体的な話になると、例えば、1000 人の人が住んでいると、東京の場合ですと人口密度が高くなりますが、人口密度から何 ha ぐらいの土地に住んでいることがわかります。その土地の 1% ぐらいの面積があれば、10 mm の浸透速度であれば、その土地で使う生活水の 20~30% 分、場合によっては 50% 分にもなります。従って、散水に使う水であるとか都市の中で使うような別の水は 10% や 15% もないと思っていますので、そのような水は、生活用水の中でわざわざ水道から使わないで、浸透して入れた分だけの地下水で使おうと考えています。



Photo. 6 総合討論の司会者および各講演者。

道路排水の浸透施設を使って道路の雨水が入ってきますが、処理水となると話が別で、処理施設の近くに浸透施設を造って、数 100 平方メートルの施設になるかもしれませんが、そこに浸透させる。そうなってくると、その施設においては、表層の方は砂地にするとか、あるいは植物を植えるといったように、それ自体にもう少し処理能力を植え付けるようなシステムを考える必要があります。私が実施したのは、そのような処理能力がなくても、下の土壌がフェイルセーフな機能を想定して、下水処理水に含まれるものがどの程度土壌だけで除去できるかどうかを調べたわけです。例えば医薬品はとれないものもあるので、そういうものが入っているのであれば、最初に医薬品をオゾン処理などで分解除去した上で入れてくださいということを、プロジェクトとしては最終的に提案しています。そういう意味では、フェイルセーフとしての最後の土壌で取れないものを明示したことに意義があるわけですし、もっと除去能の高い土壌であれば安心なわけです。いったん地下水とか土壌を汚染してしまうと、それを取り返すのは大変になりますので、管理できるところで、土壌ではとれないものはとるといったポリシーで、あとは、管理自体をコミュニティレベルでやっていくということを非常に重要視しています。下水処理場のように、行政側が造って、管理してやっていくのではなくて、コミュニティの人たちが使う水だけを、自分達が使った水を浄化して出す。そういうことによって、自分達が使った水を地下水にするのであれば、処理自体も負担にならないような水の使い方を考えるであろうし、自分達の水の使い方に対して非常にセンシティブなコミュニティをつくることになるといったことになるでしょう。

あと一つ、講演要旨の文章の中で誤解が無いように説明しておきますと、最後に「都市の自己水源の水質リスクを、理解しやすい形で提示する可能性を示した」とまとめましたが、これは、関東ローム層の土壌を使い、カラム実験をやって、この程度とれますよという結果をもってして、そのような結論を書いたわけではありません。大事な点というのはリスクの表示ということで、こんな水もあるし、元々の水もありますよということで、全国河川の水質で同じように測って相对比较することに

よって、利用する人たちにとって、その水質がどの程度であるのかが分かるように表示したということの結論として、カラム実験の水質のデータから分かり易い形で表示したということではありません。

要点をまとめますと、土壌の有する吸着サイトで汚濁物質を除去することはできますが、長持ちしないので、管理できる部分の浸透施設で管理する。それと、下水処理場に関してはコンパクトに分散型にし、30 年先、50 年先の水の問題を考えるのであれば、大型の下水処理場を造るのではなくて、コミュニティレベルで、今回使ったような活性汚泥の二次処理ではなくて、メンブレンリアクターといった膜リアクターを使ってさらに高度に処理した水を浸透させるとか、あるいはオゾン処理をして入れるようなことを考えて、より安全な水を作って浸透させる。それが、何故可能になるかということ、全部を浸透させる必要がないからです。その人達が使うのは、自分の生活の中で 5% とか 10% と決めていただければ、その分だけ高度に処理をして地下に入れ、それをもう一度使う。自己責任とは言いませんが、それをある程度技術的に誘導させていくシステムが、私が想定している処理水の土壌涵養であり、尚かつ、市街地のある程度汚染物質を含んでいる道路排水を、どこまでうまく地下涵養して、水循環系を健全にし、都市の中で地下水を活用する可能性を上げていくかということです。

井上：

たくさん質問へのご回答、どうも有り難うございました。今までは、質問票に書かれていた内容についてお答えいただいたわけですが、次に、質問票以外で、会場の方から、何か質問がございましたらお願いします。

宮崎（東京大学）：

若月先生に一つ質問させていただきたいのですが、アフリカでの水田開発と言うことで夢の技術をお話いただいたわけですが、一つだけ疑問を感じました。気候帯によっては、蒸発散と降雨との収支によって、一年間の土壌水分が上向きか下向きかというのはどのような技術を適応してもコントロールできないと思います。アフリカのような気候帯では、通常は、上向きのフラックスが卓越するような気候条件のところにあると思われ、そこで水田の開発をするために水を集めたりすると、塩類集積の問題がどうしても避けられないのではないかと思います。水田を開発し生産が行われても、その周辺では地下水が上がって、塩類集積の問題が懸念されないかと思ったのですが、その辺の見解をお聞かせ願えないでしょうか。

若月：

塩類集積が問題になるところはあります。特にサヘル帯に関しては、粘土質土壌であり、大規模な数千 ha の開発を行うと塩類集積が起こるところがあります。しかし、そういうところの水田開発ポテンシャル面積は少なく、全面積の大体 0.1%（全水田適地の 10% 弱）ぐらいであろうと考えています。大部分はサヘルから南のスーダン及びギニアサバンナ帯、あるいは森林移行帯、森林

帯となります。サヘル帯の南のスーダンサバンナ帯でも塩類集積は問題になるところはあると思います（全水田適地の 10% 強）。

私たちが想定しているアフリカの水田の生態環境が一番近いところは、東北タイのイメージになります。水田の有無を除けば地形、土壌、作物種等、殆ど共通です。東北タイでは、塩類集積はありますが、それはもともと岩塩層がたまっているところで、そこを除いた東北タイのイメージが一番近いと思いますので、意外と塩類集積が起こる面積としては、そんなに多くはありません。大体、降雨量でいきますと、1200 mm から 2000 mm 以上の所を想定しています。面積で言うと、2000 万 ha の中の 80% ぐらいです。塩類集積に対して注意しなければいけないのは事実ですが、水田開発のターゲットとしては、塩類集積を生じない所をしています。特に、私たちが当面ターゲットにしている内陸小低地は日本の里山低地に類似の地形面でした。降雨は確かに少ないのですが、低地に集まる水の量は蒸発散量を上回り、また砂質であることもあり、塩類集積の問題は回避しやすいと考えております。

井上（近畿中国四国農業研究センター）：

古米先生にお聞きしたいのですが、あるコミュニティで地下に浸透させてその地下水をまた利用するというシステムだと思うのですが、地下水はオープンシステムで動きますので、下流のコミュニティがそれを嫌がるというか、何か影響が出るといったことはないのでしょうか。

古米：

基本的に、ある程度広がりを考えて、その地域全体で共通的に使う水として、下流で取水をして使うような発想がでてきますので、明確に、排出者自体が浸透させた処理水を使うと言ったことではなくて、その広がりを持ったコミュニティの中で使うということでご理解いただけるかと思えます。もう一つは、可能性があるのは、地下に浸透したものが地下水として使われるケースと、もう少し高度な処理をして、例えば池だとか、貯水池みたいなものを積極的に造っておいて、処理水が浸透してそこに出てくるようなシステムが、もし造れるような場所があればそれが下流側にあつて、その水をベースにして地域で使うといった発想も可能かと思えます。入れた人自身が個別の過程の中で使うというレベルになると、それぞれの建物単位、ブロック単位で、非常に高度な個別の処理をすることになりますが、「浸透することはある程度下流側へのひろがりをもったコミュニティの中で共通的な水利用に使う」というような形で責任を持つというふうにご理解いただけるかと思えます。

井上：

宜しいでしょうか。では、他にございませんか。

吉川（近畿中国四国農業研究センター）：

香川県の多度津町の下水处理施設を見学に行きましたときに、町長さんの話を伺うことができました。そこでは、下水处理した水の一部を上の方に持って行って、そ

れを農業用水に使ったりして、一部は非常にきれいにしたものを飲料水にしようと取り組んでいました。その事業は、国の補助を受けて大々的に行っていました。多度津町は海の近くに位置しますが、下水処理を他の市町村のものまでやっているということで、多分、古米先生のイメージもそういうことだと思うのですが、このように実践されている例があるということをご報告しておきたいと思えます。少しお金はかかるけれども、町の人の意向をまとめ上げて取り組んでおられました。

古米：

有り難うございます。この会場で多度津町の話がでるとは思いもしませんでした。他の例で申し上げると、沖繩の方では、処理水の塩分濃度が問題になっておりますが、処理水自身を農業用水として利用しています。このように、下水処理水を新しい水源として扱う、プロジェクトベースのものはたくさんあり、いろいろ紹介されています。

個人的には、多度津町の場合は、エネルギーを使って上流側に上げているということで、長い目で見たときに、どこまで付加価値を出すために CO₂ を出すのかということに、若干疑問をもっています。そういう意味で、素直に地下に入れる方がいいのですが、しかし、地下に入ればメリットがあるというわけではなくて、地下に入れた分は、また、ポンプアップするためにエネルギーを使うので、どちらがいいのかということを考えなくてはなりません。われわれのプロジェクトの中でも、そのシステムがどのぐらいのエネルギーロスと CO₂ を出すのかとか、あるいはどのぐらいのコストがかかるのかといった社会経済的な面も検討すべきだと認識しておりました。5年目の研究プロジェクト評価会のときにも、提案技術のサステナビリティはどうですかという指摘を受けています。私の答えとしては、もうあと5年間分研究費をいただければ答えを出せると申しました。プロジェクト最後の1年は、確かに、CO₂ を計算して、雨水を地下に入れるデメリットがポンプアップすることによって上がるとか、どれぐらいのコミュニティサイズだと、先ほどのご質問にもありましたが、ポンプアップがいいのか地下に入れる方がいいのか、また、もう少しコストとエネルギーをかけて、地下に入れないでそのまま使うことはできないのかといった議論をしました。

もう一つ紹介しますと、シンガポールは非常に水不足であり、マレーシアから水を買っています。今現在、すでに高度処理した水を貯水池に5%入れて、それが水源になっています。そういった事例がどんどんできていますので、下水処理水をどこまで活用するかと言ったことはホットな話題ですし、どのぐらい高度な処理を、エネルギーやコストをかけないでやっていくかということになります。私は、土壌の能力を最大限に活かした方が、CO₂ やエネルギーが少なくてすむ、また、その中でいいバランスをとることが重要な課題であると考えています。

井上：

どうも有り難うございました。時間も参りましたので、総合討論はこの辺りにしたいと思います。本日は、「水循環系プロジェクトにおける土壌物理研究の役割」ということで、4 課題の発表をしていただきました。この 4 課題の方をそのまま結びつけるというまとめ方は難しいのですが、それぞれが、今回、会場に来ておられる、土

壌物理に関心のある方々とつながりがもてたのではないかと思います。今後、会場の皆さん一人一人が、自分に関心のあるプロジェクトについて、積極的に交流を深めていけたらいいのかなと考えております。今回は、そういう貴重な機会を得ることができたと言うことで終わらせていただきたいと思います。