

## 土壌物理研究会第38回土壌物理研究会シンポジウム

### —「水」を考える—

座長 宮崎 毅 (東京大学)  
 長谷川周一 (農業環境技術研究所)

#### セッション

#### I. 植物は水をどう利用する (水と植物)

司会 山崎耕宇 (東京農業大学)

講演 龍澤英紀 (日本大学)

講演 石原 邦 (東京農工大学)

#### II. 必要な水を集める (ウォーターハーベスティング)

司会 駒村正治 (東京農業大学)

講演 白石雅美 (清水建設)

講演 三野 徹 (岡山大学)

#### III. 農地の下で窒素が動く (窒素の動態)

司会 石黒宗秀 (農業工学研究所)

講演 金澤健二 (北海道農業試験場)

講演 福村一成 (東京農工大学)

#### IV. 水のさまざまな質 (水質改善と機能水)

司会 原 道宏 (岩手大学)

講演 大谷敏郎 (農業工学研究所)

講演 五十部誠一郎 (食品総合研究所)

長谷川 (農環研, 座長):

それでは講演時に質問時間がかなり制限されていたので、まず皆さんからいただいた質問票にもとづいて質問させていただきます。

最初に発表された龍澤さんに対して、このような質問が出ています。東京農業大学の岩田さんから「土壌中の大きな孔隙が水が流れるときは、かなり土壌の含水量が多くなると満流して流れないと言われています。話をうかがっていると、木の幹の孔隙も土壌の孔隙と類似しているように思います。植物の場合は幹の含水量が少なくても連続した大きな孔隙を伝わって水が上にいくことがあるのでしょうか」ということです。

龍澤 (日本大学):

土壌と違う点というのは、土壌の中の水というのは不飽和の場合、大気圧に開放されているということです。スギの幹の場合は、幹断面でみますと不飽和の領域、つまり色の濃い部分などでも、水分が低くなって完全に不飽和になってしまうような状態にあるのです。実際の樹液というのは外側の比較的新しい年輪が上がっています。その場合はその部分を100%飽和ではないのですが、孔隙レベルでみれば飽和で水が連続して流れています。それは着色水を流す実験によって明らかになっています。

ます。大きな導管の径をもつコナラなどでは、管を使って30mくらい上昇させることができますから、大きなポアが何らかの形で閉鎖し、外との圧力と遮断されてつながっているというようなメカニズムで流れているのでしょう。したがって回答としては、ありうるということではよろしいでしょうか。

長谷川:

わかりました。先ほどコナラとスギの例がありました。スギでは回復するが、コナラでは回復しないのは、コナラの導管が太いからということでした。そのようなときには空気で置き換わってしまうということはないのでしょうか。

龍澤:

はい、そういうことが起こります。どこかでキャピテーションが起こって今まで気密性が保たれていた導管に空気が入ってくる。そうすると導管内で連続していた水が切れてしまって簡単には回復しない。だから透水係数が小さくなってしまいます。それは土のメカニズムとまったく同じです。スギの場合は、同様に均一で、もっと細かい導管の径のものがあるのですが、水が切れてもどこかで連続していて透水係数は小さくならないという現象がわかっています。これについては、まだメカニズムはよくわかっていません。

長谷川:

続きまして農業環境技術研究所の江口さんから、「今回の実験では根と土壌の間の吸水抵抗を考慮していないが、吸水のタイムラグを小さく評価してしまう可能性があるのではないのでしょうか。また、単独の一本の木の場合と実際の森林では、さらに吸水に違いがあるのではないのでしょうか」という質問です。

龍澤:

あとの方の質問から答えますと、それは精度の問題になってきます。上でフラックスを測って、下で樹液フラックスを測り、その両方のフラックスの測定精度というものを考えた場合、グラム単位で、その体積含水率を計算したものは現在ありません。概算で計算が合う、合わないの議論しかできておらず、今回は秤量によって下と上の水収支をしっかりと測ったということです。森林全体でみれば、劣勢木があったり、高い木があったりして、樹液のタイムラグがあると思いますが、その点については、まだ先の話になるだろうと考えています。

前者に対する回答ですが、木の中の含水率と水分ポテンシャルの関係が対数曲線であったり、S字曲線であったり、あるいは、ある程度まで全く体積変化をしていないという状態を考えますと、根がついているということは吸水に抵抗があるということです。そうすると同じ蒸散があった場合に葉の水分ポテンシャルの変動幅が上がり、樹体の水分ポテンシャルの変動幅が上がることになります。水分ポテンシャルがある程度大きくなると、含水率が変化しない、つまり1時間くらいのタイムラグが生じてしまうということは普通の木でも言えますが、半日や1日遅れて含水率の変化が始まるということはないのではないかと考えています。

江口（農環研）：

別の文献で見たのですが、葉の水分ポテンシャルの日周変化には低下のピークがあり、幹の周囲長の変化における最低値は夕方になった。また体積にも日周変化があるということからすると、この場合は根がないことから体積変化があまりなかったのではないかと考え、質問しました。

もうひとつの質問は、この実験では1本だけの木に対して十分な水を与えてやっている条件ですが、実際の森林の中ではたくさん木が競争して水分を吸収している状況があると思いますので、今回のように水分が十分に供給されているという条件とは少し違うのではないのでしょうか。あるいは、それによってタイムラグがもう少し大きくなる可能性があるのではないかとということです。

瀧澤：

林部の中のすべての木の含水率や水分の分布状態を測っているわけではなく、また明らかにされていることでもないので、後者の質問には答えられません。

前者の質問では、ある文献によると木の幹の収縮の最大値が夕方にあるということですが、水分ポテンシャルの変動を見てもないと何ともいえません。どういう木なのかは知りませんが、それくらいバッファのある木なのでしょう。

長谷川：

ふたつ目の質問は、先ほどの実験はポットに水が入っている状態でした。実際に根がある普通の状態、土壌水分が制限になるような条件下ではどうかということでした。

瀧澤：

それぞれの幹に入っている水以外は減りようがなく、切った直後に水分ポテンシャルを減少させ、水に浸したときに1時間くらいの吸水のタイムラグが出てきたという事実から、根を切ってしまったことによる影響につい

ては考えていません。

宮崎（東大、座長）：

それでは石原さんの発表に対して、三重大大学の溝口さんから質問が出ていますので紹介します。「結論としてマングローブは地下水を利用しているとしています、ポット試験などでの確認が必要ではないでしょうか。水分ポテンシャルとか、浸透ポテンシャル、圧力ポテンシャル、そういうものの測定法はどのようなものでしょうか。特に圧力ポテンシャルで膨圧としていたところはどんな測定法でしょうか」というふたつの質問です。

石原（東京農工大学）：

ポットでの実験は難しいのです。さきほどお見せしたデータでは、浸透ポテンシャルや海水の水分ポテンシャルが下がりきれていない。つまりストレスがかなり大きくないと（圧力ポテンシャルが）下がれないということから、海水では難しいと思います。

マングローブが海水ではなくて地下水を吸っていることの証明として、 $^{18}\text{O}$ や $^2\text{H}$ などの同位体を使用する実験が考えられます。海水中、地下水中、それから植物体内において、これらの同位体比を比較すれば植物がどれくらい地下水を吸っているかは計算できます。これはこれからやる予定になっています。

水分ポテンシャル、浸透ポテンシャル、圧力ポテンシャルの測定方法にはサイクロメータ法があります。温度を一定にした閉じた容器内に葉を入れ、その中の湿球と乾球の温度計の差から葉の水分ポテンシャルを測ります。このとき、温度差というのは非常に小さいので、1/1,000度以上の精度の温度計を使用します。次に葉を凍らせて殺してから、もう一度測ると、それが浸透ポテンシャルになります。水分ポテンシャルから浸透ポテンシャルを引いた値が圧力ポテンシャルになります。もっと正確に測定するにはプレッシャープローブ法があります。葉の細胞にじかに毛細管を挿入して圧力を測る方法です。しかし、これは野外の測定にはむいていませんので、野外では通常サイクロメータ法が用いられています。

溝口（三重大）：

そうしますと圧力ポテンシャルというのは、引き算の結果として出てきたということでしょうか。

石原：

はい、そうです。普通はそうして求めています。もっと正確にやる場合は、先ほどいったプレッシャープローブ法がありますが、それは厳密には顕微鏡のものでないとできません。ですから圧力ポテンシャルを求めるには、水分ポテンシャルを最初に測り、それから浸透ポテンシャルを測って、その差から出すという方法が一般的

です。

宮崎：

よろしいでしょうか。ひとつ目の質問にありましたように、マングローブは地下水を利用しているのではないかとという仮説についてですが、海水のそばに真水があったら、比重の違いによって上昇するような海水と真水の入れ替わりがあるのではないのでしょうか。

石原：

海水のそばというよりも、おそらく地中の真水を利用していると考えています。これについては、すでにフロリダの学者の研究があります。水分ポテンシャルとの関係ではないのですが、マングローブの種類が地域によっていろいろ違うことに疑問をもち、同位体を使ってその違いを明らかにした研究において、地下水を利用していると考えようになったということです。おそらく海水中に入る地下水については定量化されていないのだと思います。

溝口：

淡水中や海水中でのマングローブの生態については、かなり調べられているのではないのでしょうか。

石原：

私はまだマングローブの研究を始めて短いのですが、マングローブの研究家はかなりいます。彼らの研究によるとマングローブは真水でも育つことができますが、少し塩分が入っているほうが、より生育はいいようです。マングローブという植物は、塩水がないところだと、ほかの植物がたくさん育っていて競争に勝てない。したがって、ある程度塩水があるところで、ある程度までは適応できるわけです。先ほどいいましたように浸透ポテンシャルが下がっていますから、そういう形で生き延びていきます。それでは、海水濃度の3.5%だったら大丈夫かということ、それはかなり厳しい条件だろうと思います。

宮崎：

質問票に沿って進めていったあとで、まだ時間があれば引き続き議論をお願いしたいと思います。

長谷川：

それでは3番目の話題の白石さんに対する質問です。まず、茨城大学の軽部さんと溝口さんからです。軽部さんからの質問は溝口さんの質問の1点目に似ているのでまとめますと「淡水化のメカニズムをもう少し詳しく説明してください。特に気化面が膜のどこになっているかについて説明してください」ということです。また「透過膜と土粒子の接触が問題ではないのでしょうか。どういふふうにして空間を確保しているのでしょうか」、それに少し関連していますが「土粒子に水が凝縮したの

ち、透過膜と凝縮水近傍との水蒸気圧が低下し、水分供給速度が落ちるのではないのでしょうか。効率の時間変化はどうでしょうか」というご質問です。

白石（清水建設）：

淡水化のメカニズムに関しては、蒸発膜面からの蒸発と考えていただければよいと思います。ただし膜にある程度の厚みがありますので、その中のどこで蒸発しているかという問題はひとつあります。この点については、電子顕微鏡写真を見た方もいると思いますが、膜の穴の径が大きいので、その間に水が表面張力によって保持され、透過しないようになっています。おそらくそこが気化面になっているものと思います。

長谷川：

次の質問は、水が蒸発して膜の外に出ていき、その外で凝縮して水になるわけですが、そうすると水分が多くなって飽和に近づき蒸気圧差が少なくなってくるので、効率が落ちるのではないかということですが。

白石：

はい、まったくその通りです。温度差がなくなってくると、駆動力が減るわけで、出てくる水の量も少なくなります。温度差が0になると水は出てきません。したがって土壌の温度と塩水との温度差がなくなってきたら、通水をやめて温度を下げる必要があります。そういった意味からすると、地下灌漑方式というのはあまり効率は良くないということになります。

長谷川：

それでは次の質問です。「植物の生長に対する温度の影響は大丈夫ですか」ということと、「水蒸気を液化させるためのエネルギー収支をどのように評価、検討していますか」ということです。

白石：

まず第1点目に関しては、我々も非常に心配したところですが、やってみればわかるだろうということやってみたのですが、パイプの下の熱が伝達するところは避けて根は入っていくことがわかりました。植物は「危険地帯」を察して、避けていったのでしょうか。確かに、普通に灌漑したのと比較すると成長の阻害的要因にはなるかと思っています。ただし我々は、コントロールとしてパイプを埋設しないプランタでの植物を観察していましたが、こちらは水の供給がゼロのわけですから、すぐに枯れてしまいました。地下にパイプを入れた場合は温熱水を通っていますが、植物は生長しています。そういった意味では、灌漑した効果はあるのだと考えています。

このシステムでは、加熱する熱を人工的にやったのでは経済的に合いませんので、できれば産業廃熱や、自然の温熱を利用することによって、経済的なものができる

というふうを考えています。

長谷川：

最後のエネルギー収支の質問は、山形大学の粕淵さんからだったのですが、粕淵さんよろしいでしょうか。

粕淵 (山形大学)：

私がお尋ねしたかったのは、蒸気が水になるときに熱が出てきますが、その際の廃熱はどこでしているのかということです。この系が成り立つためには、熱をどこかで取り去ることが大事なのではないかと思えます。その点をご検討されているのかと思い、質問しました。温度が同じになれば、ということとは少し違うような気がします。

白石：

質問の意味はわかります。土壌中の温度が高くなることから、熱は土壌にたまっていると言えそうですが、我々としては、その熱は大気中に出ていくことを期待しています。しかし効率よくやるためには、冷却系の配管を埋設して、冷却水にその熱を吸収させるというようなことも考えています。

長谷川：

軽部さん、どうぞ。

軽部 (茨城大)：

先ほどの質問に関連した質問です。チューブの内側を塩水が流れていて、それがチューブの外側まで浸み出して外側で蒸発するわけですね。そうするとチューブの外側に塩分が濃縮されていくのですか。

白石：

水はチューブを出た段階ですでにもう淡水になっています。

軽部：

つまり、液体から気体に変わるときに、そこに塩分が濃縮するわけですから、液体から気体に変わるのは表面で変わるわけですね。

白石：

違います。気体に変わる時では膜の内側で変わります。膜の気泡があって、この内側に高塩水があり、表面で蒸発している場合、その塩のイオンは膜の内側に残り残されています。ですから、その外側に出るときには、すでに塩分は含んでいないというような状態です。

軽部：

そうすると水が循環していれば外側の塩分濃度が高くなるということはないのですか。

白石：

そうです。外側にはまったく淡水しか出ません。

軽部：

水が濃縮したり、固結したりすることはないのです

ね。

白石：

ないです。内側の方の水だけが濃縮されています。

長谷川：

この技術ではそこのところがミソなのでしょうね。時間が進みますので、次の話題に入ります。

宮崎：

次は、三野さんと金澤さんに岩間さんから質問をいただいています。三野さんは所用でどうしてもこの時間まで、残れないということで退席されていますが、質問は大事ですので紹介します。

三野さんに対しては「関西では水田に必要な集水面積は、その水田面積の12倍ほどの話でしたが、その場合水田の水必要量はどの位、1日に何mm位になりますか」という質問です。岩間さん、答えてはいただけませんが、何か補足などはありますか。

岩間 (農環研)：

以前、石原さんがそのよう研究をされたということで、答えていただくと助かりますが、大体の数字をつかみたいのです。というのも、私どものほうでは、日本の水田というのがどんな特徴をもった農地なのかを外国に向かって説明する必要性があります。三野さんの話は、日頃私が考えていることと共通している面があったので質問いたしました。また日本の水田は、畜産を含んだ農村のシステムとして持続的なのではなくて、水に限らず、養分を含めて、外から投入する、あるいは外の生態系とつながりあって維持されているシステムであるという考えを持っていますので、その関係で少しお聞きしたいのです。石原さん、何か教えていただけることがあればよろしくお願いします。

石原：

かなり前の話ですが、ふつう蒸発散で失われる水の量は、日本だと大体3~4mmくらいだと思います。京都大学の先生がお調べになった水田だと、減水深は1日に2.5~3cmあればいいそうです。漏水田は別ですけれども、ふつうの水田ではなかなかそこまではいかないと思います。このように蒸発散よりは浸透のほうが水の消費という点からすると影響が大きいです。浸透量に関しては、関西では漏水田に近いような気がします。年間での使用量については、代かきや中干しをするなどして水を使用しますので、これについては農業工学の先生方がよくご存知だと思います。

宮崎：

長谷川さん、量についていえますか。

長谷川：

一作期に使われる量はまちまちですが、2,000~3,000

mmと覚えておけばいいのではないのでしょうか。

宮崎：

三野さんはいらっしゃらないので、金澤さんのほうに移ります。

岩間さんから「スラリーのラグーン処理方式というものは、環境的にやり方しだいではこれは使用可能といえるものなのでしょうか」という質問です。金澤さんお願いします。

金澤（北海道農試）：

質問の意図をもう一度お願いします。

岩間：

ラグーン方式は実際にはやむなくやられていると思うのですが、窒素の浄化機能もラグーンの中で働いているから、場所によってはある程度許容できる処理方式になりうるのでしょうかということです。

金澤：

その可能性につきましては、資料を今持っていないのでお答えできないのですが、そういう考え方も可能かと思えます。この研究のねらいは、やむにやまれずに掘ってしまった場合に影響はどうか、50mまで影響があるのであれば、危険率を見込んで100mは少なくとも影響が出るはずの河川から離しなさいという、そういうデータをとりたいたいということだったわけです。ただ、欲をいえば、私たちの意図としては、ゴムのスラリーバッグといましようか、漏れない形にする必要があるということをお願いしたかったデータです。実際の現場では、実は漏れなくては困るのであって、漏れて量が減るということを期待している、という面もなきにしもあらずというようなどころがあります。

長谷川：

続いて福村さんに対する質問です。農業工学研究所の石黒宗秀さんからです。「水フラックスがない場合のプラス極側のイオンについて、硝酸態窒素の濃度が高くなっていますが、バルクの水として電場のないところへ取り出した場合、バルク中では電気的中性条件が満たされると思えますが、カチオンは何が含まれているのでしょうか」という質問です。

福村：

確かに取り出した時には電気的中性条件があるので、マイナスに対して何かプラスの中和させるものが必要なわけです。おそらくとしかいえるようなデータしか今持っていないのですが、流出にもなってpHが下がった状態のグラフを見せましたが、それから判断して水素イオンが対になって出たのではないかと考えています。

石黒（農工研）：

よくわからなかったので理解のための質問だったのですが、まだよくわかりません。そのカラムの中ではOHのほうが濃度が高いのでしょうか。

福村：

はい、そうです。pHが高くなっていますので。

石黒：

それは取り出すと急に水素イオンが多くなるということですか。

福村：

取り出すというよりも、流している場合には、取り出す側は陽極側ですからそこで低いpHで中和されながら出てきます。そういうわけで、出てきたpHはカラムの中のpHほどは高くなかったということです。

あの式の中では実は一種類のカチオンとアニオンとしていたのですが、電気的中性の関係があるので本当は水素イオンと水酸イオンの4つのイオン状態での説明をしないと、外側のところというのは正確には説明できないかもしれません。モデル化の際に単純化するために一種類の $\text{Na}^+$ とそれから $\text{NO}_3^-$ を使って整理しました。

長谷川：

これで質問票による質問を終わったのですが、最後に大谷さんには、時間がなくて皆さんが質問を書く時間がなかったと思います。そこで私からひとつ質問させていただきます。

膜分離技術で処理した水を農業用の用水に使うという話でしたが、最後の後半のほうは排水問題、農業での面源排水における問題に対しての膜の利用というのは延長上にあるのでしょうか。

大谷：

最後は時間がなくていいぞびれたのですが、実は排水の問題と用水の問題とはあわせて考えるべきだというような主張をしたかったわけです。水のリサイクルというところにそういう技術は使えないだろうかということです。ただし、今いわれたように、面源排水の場合、排水を集められないことが問題です。今考えているのは、茶畑で肥料がたくさん使われていますが、場所によっては地下に不透水層があって比較的一か所にまとまっているところがあるというような話も聞いています。そういうところだと、ある程度のリサイクルも可能ではないかということです。農業土木の技術者の方にいわせると5キロくらいの水頭差をトンネルで作るのはとても簡単だということです。先ほどいいましたように、膜を使う技術というのは圧力のほうがものすごく下がってきていますので、たとえば圧力は水頭などで稼いで、あとはちょっとしたポンプでいければというようなことを考えています。

長谷川：

何か適応できるような立地条件と農業条件があるようですね。これで皆さんから出てきた質問は終わりにしたいと思います。

宮崎：

まだ少し時間が残っておりますので、自由に討議をお願いします。

原（岩手大）：

白石さんと大谷さんに関係があると思いますが、どうして $1\mu\text{m}$  くらいの膜の穴から水がしみ出さないのでしょうか。

大谷：

疎水性の膜ですと $1\mu\text{m}$  どころか、もう少し大きい口径でも水は出てきません。たとえば、酵素を固定化するときにシラン化というのをします。セラミクスの中をシラン化すると疎水性になって、 $3\mu\text{m}$  の平均口径のものでも水が全然出てこなくなります。そこを少しエタノールを入れた水で濡らしますと、一気に水が出てくるという現象を私は観察しています。

原：

そうしますと、要旨集に書いてあります PTFE というフッ素樹脂に大きなミソがあるということになるのでしょうか。

白石：

そのとおりです。この膜自体の性質として水をはじく性質が非常に強いということです。逆にいいますと、普通の場合ですと圧力をかけてしぼり出すような感じですが、この膜の場合は圧力はむしろ害があります。中の液を流すだけの圧力しかいらぬ。それ以上の圧力はむしろ有害であるというような状態です。

宮崎：

他にいかがでしょうか。

岩間：

福村さんにお尋ねします。おそらく、この研究はアメリカでおやりになったか、あるいはアメリカでヒントを得られておこったことだと思うのですが、このように電気を使って汚染物質を除去するというアメリカでの研究の実態についてお伺いしたい。それから福村さんは硝酸態イオンを担当されたのですが、どのような物質に最も有望に使えるのかについてお教えてください。

福村：

いわれたように、アメリカにいるときにおこった研究です。汚染物質の電気的な処理に対してどういったものが有望か、どういったものが要請されているか、すなわちお金がつくかということについて話します。まず土壌からの重金属の除去です。これは重金属がプラスイオ

ンですのでイオンそのものがマイナス極に引かれる。そうすると電気浸透の水の動きとイオンの引かれる向きが同じになるので、相当効率よく取れます。それに関する研究は相当いろいろな所でおこなわれています。それから電気を使ったものについては、今 EPA（アメリカ環境保護局）が昨年まとめたレポートを持ってきていますが、それによると、それ以外にも有機溶剤で汚染されたところの土壌浄化などにも使われています。最近とくにお金がついているのは、低レベル核放射性廃棄物の長期保存の安全性確保のために、もちろん電気を使ったものだけで安全性を確保しているわけではないのですが、より安全にということで膜に対して内と外で電気をかけて、できるだけ外側には流れ出さなくする。そのような研究がなされています。

宮崎：

他にいかがでしょうか。

石原：

大谷さんに質問したいのですが、普通は淡水化するときに膜を使うのは逆浸透膜で、それは半透膜ですよね。大谷さんの非常に圧力が少なく済むということは、逆にいうと膜がイオン交換樹脂的な機能を持っているということで、そういう意味では濃い場合には使っていると劣化してくるのではないかと思います。そうするとある程度使うと洗うか何かして再生してやらなければいけないと思うのですが、排水や地下水（の溶液の濃度）が薄いのであまりそういうことが問題にならないのでしょうか。

大谷：

まさしくご指摘の通りです。メカニズムのひとつは膜がチャージを持っていることにあります。この膜の性能は塩濃度に依存します。それから pH にも依存します。また圧力にも依存し、実際使う場合には非常に希薄な溶液で、きちとした条件設定をしないとなかなか難しいところがあります。もうひとつは膜の構造を工夫しており、ふつうの膜よりも実質の表面積はものすごく大きくなっていることで、たくさん水が出ます。これは今、開発中のところもあって、まだきちとした理論的な解析はできていません。しかし実用的にはおもしろいのではないかと思います。

宮崎：

まだ質問もあるでしょうし、パネルディスカッションに切り替わってきたような雰囲気もありますが、時間がありません。以上で今日の総合討論を終わりにしたいと思います。

ご発表の皆さん、どうもありがとうございました。