

シンポジウム質疑応答と総合討論

司会 田原 虎次（農工大） 安富 六郎（東大農） 増島 博（農事試）

講演者 山本 晴雄（北海道中央農試） 山崎 慎一（北農試） 野中仙三郎（宮崎農試）
秋山 豊（農技研） 八木 茂（農機研）

I 個別質疑応答

「質問」（山崎：北農試） 土壌水分の測定はどのようにされたのか、土壌をとり出して秤量したのか。

「答」（山本） 試料下端を自由水面とみなす場合は、下端より 2 cm と 2 cm の点の試料を厚さ 1 ～ 2 mm 削り取って測定した。

「質問」（関谷：園試） 1. シリンダー内の土壌の厚さは何 cm か、またそのサンプルは風乾土か、生土か。
2. 100cc 円筒の土層の深さは 5 cm であるがそれと薄層 8 mm との比較はだされたのか。

「答」（山本） 1. 試料の厚さは圧密されておおよそ 8 mm である。試料はバラッキをなくすため 0.25 mm で篩別したので、風乾土といってよい。 2. 質問は従来法による 100cc 管を使っただけの測定値と自由水面を与えた場合の測定値の比較と思われる。その比較は 1970 年の土壌肥料学会に報告したが、大差はみられない。しかし厳密には対象とする試料は薄層でなければならぬ。

「質問」（寺沢：農技研） 自由水面をつけない測定法は試料の下端にシリンダーをつけたものか、試料透過筒を用いて直接脱水したものか伺いたい。pF の計算式を用いる場合の基準水面はどこをとるか。土壌試料の下端ではないのか。

「答」（山本） (2)式 $pF = \log H + \log R + 2 \log n - 4.95$ において、自由水面を与えない場合は試料下端を自由水面とみなして、測定値を出している。試料を薄層にして、シリンダーで圧力勾配をつけ、かつ自由水面を与えない方法が土壌によっては考えられるという事で、その場合はシリンダー下端を自由水面とみなす。この方法は具体的には実験をやっていない。なお、本実験においてシリンダーを用いた場合はすべて自由水面を与えた。

「質問」（佐藤：水資公団） 土壌水分がなくなると 1 価イオンおよび 2 価イオンの脱溶液中の量はどのようになるのか。

か。

「答」（山崎） 土壌溶液中の量という意味であれば、土壌溶液中の陽イオンの量を、濃度と水分含量の積であるとみなせば、土壌の含水量が少なくなってくると 1 価イオンの量は減少して、その分だけ 2 価の陽イオンの量が増加することになります。

脱溶液中を土壌からの浸透水の意味にとれば、土壌水分が少なくなると通常浸透水はなくなるはずである。土壌の水分が少なくなった時点で降雨があって、そのさいの浸透水については横井氏の質問のところでお答えしている。（後記総合討論）

「質問」（川原：道南農試） 施肥（液肥を含めて）した場合の、土壌溶液におよぼす時間（一定になる時間）について

「答」（山崎） 実験データを持っておりません。易溶性の塩（たとえば NH_4Cl , KCl など）を、ほぼ圃場容水量附近の土壌に添加して 1 週間平衡させたものの土壌溶液を分析した結果では、土壌の含水量と添加量から計算した濃度にほぼ一致する Cl の濃度が検出された。おそらく、溶解するのにとりだけの水分があれば非常に短い時間で一定（全量溶解する）になるのではないかと考えます。

「質問」（福士：農技研） pF のスケールの中に負の値が示されてあるが、これを吸引圧が水柱で 1 cm 以下の状態と理解してよいのか、たとえば $pF - 1$ とは吸引圧水柱が 1 mm, $pF - 2$ とは吸引圧水柱 0.1 mm の状態と理解してよいか。

なおこのようなミクロスケールの吸引圧の状態を取扱うことが果して可能でしょうか、数学的には考えられるが、この点についても少し教えていただきたい。それから正圧の場合の表示（pF 概念の拡大）を考えておられるのか。

「答」（吉田） 会場で用いた表一は「土壌物理」

(山崎不二夫監修、養賢堂)から引用させていただいたものです。負の pF はご指摘のように理解されて結構だと思います。測定が可能かどうかよくわかりませんが恐らく可能だと思います。正圧については間隙水圧を考えていくことになると思います。

「質問」(宮内：東大農) 均質なCBR用供試体を作成するために、試料を何層かに分けてジャッキでスタティックに締固めるとのことであるが、その時の一層あたりの厚さ、載荷時間および一定の荷重を与えるまでの歪速度はどの位か。水分状態や土の種類によってそれらの効果は変化したか、その結果、どの程度の均一さが得られたか、 r_d 等で検討したか。

「答」(吉田) 試料作成は5層で行い、各層の厚さは載荷終了後2.5cmになるようにしました。載荷時間は2分間とし、時間一沈下曲線が一定値に近づく値を取りましたが、含水比、載荷重等によりこの関係は異なります。所定の荷重になるまでの試料の沈下速度は約1mm/secで行ないました。 r_d の均一の程度は試料の一層の厚さが2.5cmなので荷重、含水比等によってもちがいますがほぼ一定と考えてよいものと思われま

「質問」(湯村：東近農試) BLは表上で $pF=1.5$ 附近にあったが、これは吸引圧のある状態(正圧のかかっていない状態)のところにゾルとゲルの臨界点があると理解してよいのか。

「答」(吉田) $pF=1.5$ という値は沈降体積の pF 値であり、この点を境に土はビンガム体としてあつかわれるものと考えられております。

「質問」(足立：東大農) 表一1の塑性挙動の項でほぼLL~PL間は延性破壊、PL以下は脆性破壊と分けておりますが、延性、脆性の区別はどうなっているのでしょうか(たとえばひずみ量だけで考えられているのでしょうか)。

「答」(吉田) 脆性、延性の区別は土が降伏後破断にいたる間に流動が長く続くかどうかにより定まります。これは変形速度、温度、 pF 、応力状態によってきまるわけですが、この場合は塑性限界試験と関連させて、そのさい公定法の条件では主に含水比できまると考えても良いという考えにたっています。

「質問」(安富：東大農) pF 測定はどのような方法によってか、遠心法か、土柱法か。

「答」(吉田) pF 測定はすべて遠心法で行ないました。したがって測定値の範囲が問題となりますが、ここでは遠心力を便宜的に pF 表示したものとご理解いただきたいと思

「質問」(佐藤：水資公団) 付着力と小間隙量との関

係を説明するにあたり、径0.3 μ 以下の間隙量との関係で説明されているが、0.3 μ は pF 4.0相当径でもあり何か意図するところがあるか。

「答」(秋山) ここでは付着力の主要因である毛管力が小さな間隙に支配されているという理論解析の結果を実際の測定結果とって検討することをおもなねらいにしたために、ここで計測した最高の pF 4.0の相当径である0.3 μ よりも小さい間隙量について検討した。もちろん付着力と間隙分布との関係を詳細に検討するためには、種々の径の間隙たとえば pF 1.5以下、1.5~3.0、3.0~4.0、4.0~5.0、5.0以上など種々の pF 相当径の間隙について検討することが必要で、これらについては別の機会に検討予定である。

なおこのように、ここではこれだけの測定結果から、毛管力の領域が pF 4.0以下にまでおよぶということを強調する意図はないが、このことは付着力が pF 4.0相当径の0.3 μ 以下の小間隙と密接な関係があること、とくに、付着力の大きい有明表土の場合には0.3 μ 以下の小間隙量が60%以上にも達していることを示す本実験結果によってある程度は肯定されるのではなからうか。ただし毛管水の領域の解明には土壌の付着性など力学性の側面からのアプローチの方法もあるが、熱力学的手法によるアプローチも有効と考えていることを付言したい。

II 総合討論

「質問」(川原：道南農試) 高濃度の場合1成分をどんどん加えて行くと1定限界まで1定イオンの比率で上昇するが、それ以上はそのバランスが変化してその成分が濃度を高める主要なイオンになって行くのではないかと思うが。

「答」(山崎) 土壌に施肥した場合、あるいは一般的にいえば土壌に何らかの電解質を添加した場合、土壌溶液中の陽イオンに関しては、添加されたイオンと土壌の置換性陽イオンとの間にイオンの交換反応が起り、添加した種類の陽イオンのみの濃度が選択的に上昇するようなことはなく、他の陽イオンの濃度も同時に上昇します。しかし、土壌溶液中の各種の陽イオンについてその濃度の上昇の割合を調べてみると、添加された陽イオン種の濃度の上昇割合がいちばん大きく、添加量が多くなるほど他の陽イオンの上昇割合との差は大きくなってきます。土壌にKClを添加した場合についてみると、土壌溶液中における各種陽イオンの濃度の上昇割合は $K > Ca > Mg > Na$ の順でした。添加された量がごく少量であれば、土壌溶液の組成にはさほど大きな変化は認められないが、土壌の置換性陽イオンの量に対してかなりの割

合の量の電解質を添加したような場合には、土壤溶液の濃度を上昇させる成分はいうまでもなく添加された成分（陽イオン）であるということになります。しかし、この変化は添加量の増加につれて連続的に変化する性質のものであり、一定の限界をこえると急にバランスが変化するような性質のものではないようです。一方、土壤溶液中の陰イオンに関しては、このような現象はなく、添加された成分がそのまま土壤溶液の濃度を高めていく主要な成分となります。

「質問」（寺沢：農技研） 土壤の含水比の違いにより cation の valency のちがいでよって土壤溶液中の cation の存在割合が異なるが、これはイオンの吸着力の違いによるものか。

「答」（山崎） 土壤の水分含量が変化すると土壤溶液の濃度も変化するが、この濃度の変化にともなって土壤固相の表面と土壤溶液中の陽イオンとの間の相互作用（その主要なものは静電気的な力に基づくものである）の様相をも変化する。そのさい電荷を異にしている陽イオン間で受ける変化の割合が同一でないことがこのような現象の原因となっています。すなわち、土壤溶液の濃度が希薄になるほど多価の陽イオンがより強く吸着されるようになり、その結果として土壤溶液中には多価の陽イオンの割合が減少することになります。イオンの吸着力の差によるものではなく、イオンの吸着力の差が（土壤）溶液の濃度の変化とともに変化するのがその原因です。

「質問」（中島田：東近農試） 土壤溶液濃度を主として支配するのはアニオンでまずアニオンが存在してそのアニオンと当量のカチオンが次に溶出してきてと理解している。土壤溶液中で NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- が存在しない場合にも、土壤溶液中にはカチオンが溶出しているが、これに対応するアニオンは HCO_3^- と考えてよいか。

「答」（山崎） 土壤溶液中に何らかの原因で溶質が添加された場合、それが電解質のものであれば、当然陰イオンと陽イオンが等量ずつ添加されるわけであり、陰イオンあるいは陽イオンの一方のみを添加することは不可能です。したがってまず陰イオンが存在し、次にその陰イオンを等量の陽イオンが溶出してきてと考えるのは合理的ではないようです。当初から同量ずつの陽イオンと陰イオンが存在しているわけです。

土壤溶液中の陽イオンの含量と陰イオンの含量とを比較すると、しばしばよく一致するといわれているが、詳細にみると多くの場合陽イオンの含量 > 陰イオンの含量（ HCO_3^- を加えていない）であり、その差は大きくてもせいぜい 2 me/l くらいである。また土壤溶液の陽イ

オン濃度の含量が 2 me/l くらいより低くなってくと通常 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} などは検出されなくなり、それぞれ硝酸銀法、Conway 法、塩化バリウム法を用いては定量できなくなる。この差に対応する陰イオンが一体何であるかが問題となる。

土壤溶液中の HCO_3^- イオンは土壤空気中の CO_2 と平衡しており、これらの関係は、

$$\frac{[\text{H}^+][\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]} = 10^{-6.4} \quad [\text{H}_2\text{CO}_3] = 10^{-1.5} P_{\text{CO}_2}$$

にある。畑状態の土壤では土壤空気中の CO_2 はせいぜい数%程度であり、通常の土壤溶液の pH から考えると、上記の式から土壤溶液中の HCO_3^- の濃度はほぼ 2 me/l 以下であろうと考えられます。（山崎慎一：土肥誌投稿中）これらの事実から考えて、土壤溶液中に Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} が検出されない場合は土壤空気中の CO_2 の溶解に基づく HCO_3^- であると推定されます。なお、この場合の陽イオンは $\text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ で生成した H^+ および H^+ によって置換浸出されてきた陽イオンです。

もちろん、反応がかなりアルカリ性にかたよっている場合には、 CO_3^{2-} 、 SiO_3^{2-} 、さらに AlO_2^- などの存在も考えられます。

「質問」（横井：農技研） 乾燥後の降雨で Ca の方が Na より溶脱しやすいか。

「答」（山崎） 降雨のさい、雨水が土壤中に浸入していき、そこにあった土壤溶液を下方へと押し出すというように、いわゆる Piston flow みたいな現象が起きるとすれば（円筒中にきれいに充填した土壤に上部から水を加えるとこのような現象がおきます。）乾燥した土壤からのほうが、最初のうちは溶脱されてくる Ca の量は多くなるものと一応考えることが可能です。しかし実際の圃場条件下では、はたしてこのような piston flow がおきるかどうかはあきらかではありません。かなりの bypassing があるのではないかと考えています。また降雨がかなりの時間連続し、土壤中を雨水が通りぬけたものが流出してくるようになると、土壤溶液の濃度もかなり希薄になると思われませんが、このような場合には、土壤溶液（浸透水）の主要な溶存陽イオンは Na となると考えられます。

「意見」（中島田：東近農試） 1. pF 1.5~4.2 間の土壤溶液を低張力部分（pF 1.5~3.0）と高張力部分（pF 3.0~4.2）とに分割採取し、その間の濃度と組成の変化を調査したところ、ほとんど差はなく、C. E. C の極めて高い土壤で高張力部分の土壤溶液濃度が低い傾向があった。実用的には pF 3.0 くらいまで採取すれば十分で

ある。

2. 土壌水分の変動にともなう土壌溶液濃度の変化について、ハウスの比較的土壌溶液濃度の高い場合であるが、土壌溶液の変動割合は土壌水分の変動割合とほぼ一致した。

「答」(山崎) 電気二重層の説にしたがえば、高張力部分の土壌溶液の濃度は低張力部分のそれに比較して低濃度であると一応考えることが出来ます。しかし、これは土壌溶液を採取するさいに、採取操作の途中で土壌溶液中の各部分での濃度の再分布が起り、必ずしも上記のような結果にはならないともいわれております。また、土壌溶液の濃度がかなり高い場合にはミセルの厚さが収縮するので高張力部分まで採取してもミセル間溶液のみを採取することになり、このような場合には土壌溶液の濃度は高張力部分と低張力部分には差がないということになると考えられます。

土壌溶液の採取をおこなう場合、なるべく能率よくおこなうことが大切であり、その点からはなるべく高張力の部分まで採取するのが得策だと思います。また遠心機を利用することによって上記の目的は容易に達せられます。

「質問」(多田：農士試) 遠心分離後の供試体の厚さ方向への水分分布はどのような様相であるか。時間的に(回転時間によって)どのようにグラフがかわるか。Water lodgingを起した場合の土柱内水分分布はどのようなであるか。

「答」(山本) 回転時間は普通一時間で、その時の水分分布は図のとおりであるが、経時的な様相はみていない。

Water lodging現象の出る場合は2回、土柱上の水が濾紙で吸いとり、3時間回転した時の水分分布を紹介したが、ばらつきが大きく水分分布も逆転した。ここには紹介していないが、6時間で土柱上部で少水分、下部で多水分の一樣の傾向が見られた。それ以上は検討していない。

「意見」(中村：愛媛大) 沓過性のフィルターの性質に左右されることが多い。したがって含水分布関係は山本さんのとおりだが1時間以上ではその関係がランダムになる。しかし3時間以上脱水すると落着くようだ。ウォーターロジングはその水をすてしまわねばならない。

「質問」(中村：愛媛大) シリンダー上に1cm厚さの試料をおくとその薄層上ではシリンダーとの過渡現象が生じてしまわないか。

「答」(山本) 過渡現象については検討していない。

「意見」(中村：愛媛大) 遠心脱水法は土柱5cmをたて自由水面をきめて、3時間脱水し薄層法で含水量を測定し(2)法で計算すれば手数も在来法と変わらない。それも面倒ならば在来法でやられて、その方法を明記すれば含水比数%以内の誤差でそれでもよい。なお、遠心機を改良するのならアームの長いものを開発出来ればよいと考える。

「答」(山本) 同感である。

「意見」(中村：愛媛大) film stageはフィルムが切断されないかぎり丈夫で連続している。遠心脱水法は、重力場下での平衡状態を測定しているのであるから、capillary funicular stageは圧縮されているがfilm stageで連続している。したがって、遠心脱水法もみすてたものではない。

「質問」(安富：東大農) 力学的問題とpFとの関係について毛管水領域からどう解釈するか。

「答」(吉田) 比較的軟かい土では、土壌の状態量は土壌水の状態量であるpFで考えることが出来るので、粘弾性挙動とpFは良い対応を示す、固い土では r_d 、 e など、すなわちPで整理される、という考え方にしましたがあまりよくわかりません。

「質問」(中村：愛媛大) 試料の作成はいかにしたか。その場合のpFと r_d との関係は。

「答」(吉田) 供試体の作成は静荷重で含水比を変えたものとpF- r_d-w の関係より、これと同じ供試体を成形荷重を変えて作りしました。ここで行なった実験のpFと r_d の関係は全て遠心法で行なった遠心pFであるため、その点説明が充分でなかったことをおわびします。

「質問」(藍：農工大、安富：東大農) 付着力と付着板表面の粗さとの関係についてはふれられていないが、この関係についても重要と思われるので説明をいただきたい。

「答」(秋山) ご指摘のとおり付着の機構における付着板表面の粗さ(Roughness)の問題は重要であるが、この問題については充分な検討の機会がなく説明を省略させていただいた。ここに土壌についてではなく、1個の小ガラス球についてではあるが、薄い水膜の毛管力による付着力を付着板表面の粗さのことなる場合について振子方法(一種の引きはなし方式)で測定したMcFarlaneらの測定結果をあげて参考に供したい。

表面処理	平均粗さ(A°)	付着力(比率)
高級けん磨	150	100
500 カーボンラ ンダム紙	1,000	79
320 同上	4,000	51
150 同上	100,000	0

この測定例からは付着力が付着面の粗い場合ほど低下することが認められているが、粒度分布の複雑な実際の土壌では付着面の粗さの影響はこの例とは多少ことなることも予想される。

また、付着面の粗さの影響は付着力の測定をこの例のように引きはなし方式によるか、あるいは摩擦方式によるかでかなりことなるのではなからうか。摩擦方式による場合には付着面(摩擦面)が粗いとむしろ摩擦角(δ')が増し付着力は増加する場合が多いのではなからうか。

「質問」(藍:農工大) 付着力と付着板表面の撥水性との関係について、接触角 90° 以下の親水性の範囲では付着力に差がなく、接触角が 90° を超える疎水性の範囲では接触角(撥水性)の増加にともない急減したという説明があったが、われわれの測定結果(摩擦方式)では親水性の範囲でも差異が認められており、この関係は付着力の計測法によってもことなるのではないか。

「答」(秋山) 付着板の撥水性による付着力の変化の様相は、水分、水分張力、充てん密度などによって影響されるほか、ご指摘のとおり付着力を引きはなし方式で測定するか、摩擦方式で測定するかによってもことなるものと考えられきわめて複雑である。したがって、付着力と撥水性との関係を簡単に説明することはむずかしいが、均一球粒子集合体モデルについての付着力の理論的解析の結果によれば、そ充てん土壌の多水分時の付着力(付着板の法線方向のけん引力)は、親水性の範囲では差異がないが、そ水性の範囲では接触角とともに低下するというここの土壌についての測定結果と同様な関係があることが明らかとなった。

このことから、粒径分布のある実際の土壌の付着力と撥水性との関係は、均一球粒子集合体モデルの場合に比して一層複雑と考えられるが、本実験のように充てん密度がそ充てんに近く圧着平衡時の多水分状態では確率的に均一球モデルの場合に近似するのではないかと推定される。ただし、この関係は密充てんの場合や少水分の場合はもちろん、摩擦方式での計測の場合にもことなるこ

とが考えられることを重ねて述べさせていただく。

「意見」(横井:農技研) 引きはなし方式は表面そ度は一応消去して考えられ、撥水性との関係も静的なメニスカスとして計算できるが、摩擦付着の場合には動的な変化するメニスカスを考える必要があろう。

「質問」(安富:東大農) 走行性についてどう考えているか、ここでのべられたものよりもっと一般的なとらえ方はないか。

とくに土壌水分との関係ではどうか。

「答」(八木) 走行性とは trafficability と mobility の意味をもっていて、土の面から見た車両の通行に対する能力と車両の面からその走行能力を総称したものである。

「質問」(不明) 耕耘の最適土壌水分は。

「答」(八木) プラウ耕の場合にはコンシステンシー指数が 0.5附近がよいと思われます。

「質問」(横井:農技研) 原理的には、水分減少によってせん断は増加するはずであるが、ニコルスの測定した土壌は団粒構造であったと考えてよいのか。

「答」(八木) 団粒構造はあると考えられます。

「意見」(新見:毛管浄化研究会) 毛管水の特性に着目した汚水の浄化法について紹介。

毛管現象に関する研究特に有機物を多量に含む汚水の土壌中の挙動に関しては一般工学ではほとんど研究されて居られない。したがって、土壌浄化法(毛管浄化法を含めて)によって現在の衛生工学の欠けている部面が解決できるとすれば、それは土壌を専門に扱っているこの様な研究団体が積極的に協力しないかぎり不可能に近い。それは特に地球表面に近い土壌が一般工学ではあまりにも複雑すぎて取組みにくいからである。

米穀増産が頭打ちとなり、反面に公害対策が当面の最大課題になりつつある日本で土壌の研究者が若干でも余力をさいて衛生工学、一般工学に毛管現象の応用という面からだけでも協力願えることになれば幸と念ずるのである。