

総 合 討 論

座 長：古畑 哲（農技研）・岩田進午（農技研）

座長 午前中のご講演は、どれひとつをとっても、それぞれがそれだけで大きな討論の対象となるものと思います。そこで、ここでは、次のように、いくつか焦点を設定しまして、これをめぐってそれぞれの講演の主旨を生かしながら、ご討論いただきたいと思います。まず、(1)温度を中心にして、次に(2)構造を中心にして、最後に(3)腐植や微生物を中心にして、生物活性、物質移動水分、平衡吸着などをご討論いただければ幸いです。そして、最後に、これから土壌物理が研究しなければならない課題について、報告者からお考えをいただいて、まとめたいと存じます。

温度と植物

粕淵（農技研） 発芽の問題ですが、土の表面は温度が昼間は高くなるが夜間は最も低くなる。そこで、発芽は、最高温度が大切なのか、平均温度が大切なのか、どうなのでしょう。また、根の活性等も温度の影響を大きく受けると思われませんが、この点はどこまでわかっているのでしょうか。

金野（東北農試） 積算温度の平均で論議出来るものと考えています。温度が高くなっても低くなっても、積算したもので論議できると考えています。根では、温度勾配の影響をどう考えるかが重要と思われるが、これはこれからの課題だと思います。しかし、これは、土を層に分けて、窒素の無機化の方からアプローチしてゆけば分かるようになるのではないのでしょうか。しかし、根粒等の活性でも根の上部と下部ではちがうはずだが、現在は、一緒にして扱っている。詳細にはこれからの課題でありましょう。

久保田（熱研） 本日は、主に低温障害の問題を扱われたが東南アジアの畑作では高温での発芽障害が問題になっているので、低温障害の他に発芽の高温障害の研究も大切だと思います。

金野（東北農試） 発芽速度と温度との関係では、少し古いものですがデータがあります。これらのデータをアレニウスプロットしますと、各作物共に、その形状は折れ曲ったものになります。大豆では20℃付近で折れ曲ります。20℃以上と20℃以下では生理的に異なると考えられ、観察では根の形状が異なるようです。私は寒冷地の問題を扱ってましたので、低温側の問題のみ焦点をおきました。熱帯地方では高温側の問題を扱う必要があると思います。

伊藤（岩手大） 発芽するには必要なエネルギーの障壁があるようですが、植物は、日変化する温度の変動があるときに、その積算をどういう形でおこなっているのだろうか。つまり、一日だけ最高温度が与えられればその障壁を越えられるのか、ある期間がなければいけないのか、といったことです。

岩田（農技研） 確かにエネルギー分布は温度でできるのだが、積算温度の場合は、1℃高くてもそれが一定に推移するとき、極端に温度が高いときとは、積算値の内容がちがっている。そうすると、発芽の仕方その双方ではちがってくると思います。それで積算温度でうまく表わされうるかという心配があります。つまり、エネルギーの障壁をとびこえることは強度のようなものような気がいたします。

金野（東北農試） 熱力学の法則からいえば、 $4G = G$ （生成系） $- G$ （原系）が負であれば反応は進行します。しかし反応がなかなか進行しない場合が多く、温度を上げると反応が速くなることはよく経験するところです。これは原系と生成系との間にエネルギーの高い励起状態があって、このエネルギー障壁を越える分子のみが反応すると考え、活性化エネルギー E_a という概念をアレニウスが提案しています（図-A）。

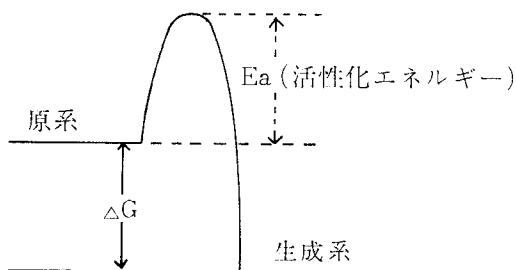


図-A 活性化エネルギーの概念

また、分子集団は同一のエネルギーを持っているのではなく、ある温度における分子のエネルギー分布は図BのIの曲線で示され、活性化エネルギーを持っているのは斜線の部分の分子だけです。いま温度をあげるとIIの曲線で示すように全体として高エネルギー側に移り、活性化エネルギーを持つ分子が増えて反応が速く進むこととなります。これらの関係を定量的に表わしたものが本文(3)式です。

次に温度一定の場合（系1）と温度変動がある場合（系2）とで積算温度が同一ならば生物活性が同一とみなして取扱ってよいかという問題であります（図-C）。

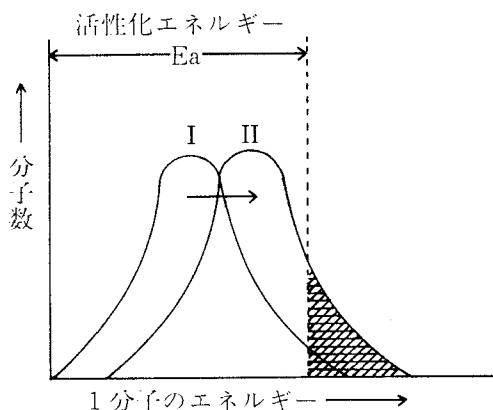


図-B 分子集団のエネルギー分布

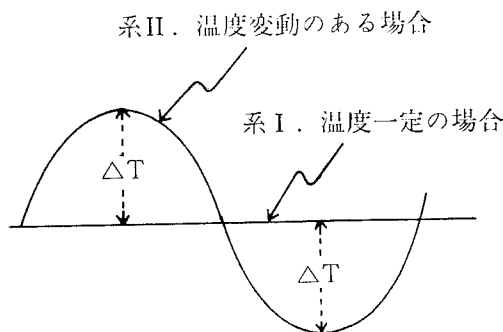


図-C 温度一定の系と温度変動のある系

系1と系2との速度定数比は本文(6), (7)式で表わされ一般には積算温度が同一でも温度変動のある場合の方が生物活性は高いのです。しかし、温度振巾 ($2\Delta T$) が小さい場合は近似式(9)式が適用できるので、積算温度が同一ならば生物活性も同一とみなして取扱っても大きな誤りはありません。

酵素反応の活性化エネルギーは25,000cal以下ですから、 K は0.15以下であり、このことから近似式(9)式の適用範囲は $2\Delta T < 10^\circ\text{C}$ であり、従って、温度振巾 ($2\Delta T$) が 10°C 以下であれば、系1と系2とは生物活性を同一と考えて取扱うことができます。

温度振巾 ($2\Delta T$) が 10°C 以下という条件は多くの事例に適用できるし、平均地温を用いて近似計算ができるので実用的です。

宮崎 (四国農試) 温度は地温や気温がよく調べられるが、植物自体の温度は、これらとどのような関係にあるのでしょうか。例えば、放射冷却で葉温が下がるようなとき、地温とはどんな関係になっていまいしょうか。

金野 (東北農試) 植物では群落が出来ていて、その頂部に光が当り、中では温度が低くなっています。地温とこれとの論議は、植物生態の分野の問題であると思

います。

安富 (茨城大) 土中の水の量が土の熱特性に影響を及ぼすことを考えると、土の水分状態も積算温度とかかわりがあるのではないかと思います。

粕淵 (農技研) 水分が少なくなると熱伝導率が小さくなるが、温度は温度拡散係数によってきまる。表面でいえば、水分が小さくなるとこれが小さくなり、熱が蓄積されたり逃散が早くなったりして、温度の変動が大きくなる。こうして、おっしやるように、水分変化と温度は関係があると思います。

構造の形成と物質移動および土の強度

座長 次に構造を中心にして進みたいと思います。水の流れは従来、平均的な量でおさえてきたが、物質移動の場合は、そう簡単には把握出来なくて、流れはその歴史を背おって流れ、末端で我々がそれをとらえる。つまり、水の質的内容まで考えないとこの問題は解決できないような気がします。今までのような水の扱い方ではどうもうまいかない問題が残っていると思います。

寺沢 (農技研) ご報告のようなアプローチで不飽和流の場合の物質移動を扱うには、どういうところに留意したらよいものでしょうか。

三輪 (農林水産技術会議) 不飽和流の場合には、減水深として流速がわかれば、機械的に液相率を小さくしていくことになります。しかし、この取扱いは、実際の不飽和流を極端に単純化したものであり、ごく長い期間での物質移動をその期間における平均降水量等から推定することには使えますが、液相率が変りつつある局面に適用するには工夫が必要です。

井上 (農技研) 飽和、不飽和にかかわらず、拡散タイプの方程式にマッチする場合と、それでは律し切れない場合とがあると思われま。後者は、孔隙の不均一性等によるものと思われま。例えば、キレツ等があればそれによって流れが律せられ、現実的にはイオン移動現象についての土壌の特性値を断面全体の平均値としては扱えないと考えられます。

伊藤 (岩手大) 拡散の式の D は水中のイオンの拡散係数、 v は平均流速だとすると、右辺第三項はすこし次元の異なるものになっているのではないかと。むしろ、孔ゲキ内流速を用いる必要があるのではないのでしょうか。

三輪 (農林水産技術会議) 右辺第一項は拡散、分散をあらわす項、第二項は水とともに動いてゆく項です。第二項の V_x は減水深ですから、次元は $L \cdot T^{-1}$ 、 $V_x \frac{\partial C}{\partial x}$ の次元は $L \cdot T^{-1} \cdot W \cdot L^{-3} \cdot L^{-1} = W \cdot L^{-3} \cdot T^{-1}$ で左辺と一致します。

岩田 (農技研) 物質の移動は、個々の孔ゲキを流れていくもので、従って、孔ゲキ内部でもその流れはいろ

いろあり、孔ゲキごとに流れがちがう。それなのに、平均流速をとるところに問題が生じてきます。だから、この場合は、第一近似ということで問題を展開しているのではないのでしょうか。

長田(三重大) 通気性をみていくと、透水性から得られた結論とフィットしない内容のものが出てくるときがあります。それは、火山灰では、動かない水のためであると考えられますが、動かない水と動く水とははっきり分かれて存在するものでなく、あるときに動きにくい水があるものと考えます。そこで、いろいろな力を加えて、ふるい分けをして構造を探ってみました。団粒はそれぞれの大きさのものに特有のそのものの強さをもっていることがわかってきました。

竹中(東大) キレット等大間ゲキ中の水の移動はかなり明らかにされているようだが、アロフェンの間ゲキでは水はゲルの拘束であり、乾燥等をするとこれがどう変わるかを調べると、今までの論議がよくわかるようになるのではないかと。収縮のときの水の移動は、現象的には、土が自分から水をしぼり出すようなものになっています。こうした場合の水移動も調べてみる必要があるのではないのでしょうか。

久保田(熱研) 火山灰土壌では、マクロな外界の現象に関与しない孔ゲキがあると聞いています。そうすると、火山灰土壌を扱うには、腐植のあるA層(黒ボク)と、下層土のB層とでは、種々の法則性をみる場合に、分けてみてゆく必然性があるかどうか、いかがでしょうか。

前田(北大) 基本的には、腐植の多いものと少ないものでも、粒子のになら役割は同じでありましょう。腐植があるものはそれに腐植の役割が上積みされるといって考え方をとっています。いまのところ、土粒子と腐植を分離することができないので、腐植の多いものは行動単位の保水力が大きくなるといったかたちで上積みの役割を評価できるものと思います。

安富(茨城大) 火山灰の構造を考えると、粒子間力に水が大きな役割を果しているといわれています。そのとき水素結合が、特に腐植を含む場合には、構造形成に大きな意味をもっていると聞いています。アロフェンではどうでしょうか。

前田(北大) アロフェンの場合、露出OHと水分子が反応するとすると、水素結合の形で水分子第一層が吸着されていることになるが、他の粘土でも第一層はすべて水素結合ではないかと考えられている。二分子、三分子層目は、アロフェンは両性コロイドの機能をもっているため荷電密度が小さく、他の粘土と較べると比較的弱い結合でついていると理解しています。

久保田(熱研) Alイオンを単体でとり出すと水を

6コに配位する座があって、そこに水分子がくっついてくる。その内容は、水素結合であるか、イオン双極子結合であるか、様々なものが混っている。6配位になると安定するので、これを配位結合と呼んでいます。こういう結合が生じていると考えています。

安富(茨城大) 腐植含量が増大してもコンシステンシーがある点から一定になると伺いましたが、強度については、腐植が増大すれば低下すると考えてよいでしょうか。

前田(北大) 一軸圧縮強度をみると、腐植の増大とともに、強度が直線的に低下している。必ずしも強度の低下は水との関係ということではなく、腐植が被膜コロイドの形で粒子表面にあるとすれば、これが増えるので弱くなるものと考えられます。また、液性限界では、40%位の腐植量になると一定になるだろうという想像です。この被膜コロイドとしての腐植の集積は、量的に限られることと質的なちがいが出てくるということで一定になるとみえています。

馬場(岩手大) 液性限界や塑性限界は試料の初期の水分量によって値がちがいます。日本統一分類では、気乾試料を使うことになっています。そうすると、この統一分類の試験法はあまりふさわしくないものとなります。これについてはどう考えたらよいのでしょうか。

前田(北大) 11月の土質工学会の有機質土の試験法のシンポジウムで申し上げましたが、現場の土を扱うときには、気乾土だけでなく生土も試験しなくてはいけないと思います。結果も一本の直線ではなく、3段階の直線で表わす必要があるものと思います。

腐植および微生物

座長 有機質土が議論になっていますので、ここで腐植の問題に入りたいと思います。腐植の荷電密度を計算してみたら、モンモリロナイトなど較べものにならないくらい大きなものになっていました。腐植の質も問題ですが、有機質の土でもこういった性格が反映されている現象があると思います。

井上(農技研) 腐植とアロフェンとの相互作用についてであるが、アロフェンの表面のAl原子には、6配位を満たすように水が吸着しています。最初に腐植がそこに近づくと、その水を強引におしのけて強く吸着されてしまう腐植があります。それにはカルボキシル基が関与すると思います。さらに、大きな腐植分子はアロフェン表面の外側にヒゲを出している状態にあると想像されます。最高どの程度表面を覆うかを概算したことがありますが、だいたい腐植含量30%程度で粒子が全部覆われます。この状態は、前田先生が述べられた物理性とよく対応しているような印象を強くします。また、腐植が膠

質とコロイド被合体を作っているときに個々に存在しているときでは腐植のイオン吸着機能が大きく異なると思われます。腐植だけのCECなり交換特性を導入してよいものかどうかは疑問があり、まだこの種のデータの蓄積も少ないのではないかと思います。

竹中(東大) 以上の議論に賛成です。私も、アロフェンと腐植の結合における腐植そのものの役割は腐植の和水機能とそれによる構造形成による水の拘束とに負うところが大きく、結合の強さでは、破壊しえないような強いものと、比較的弱いものと2通りぐらいできてくるものように考えています。

喜田(大林組) 腐植が多いのはヘドロで、多いときは50%ぐらいあります。腐植が増えるにつれ、このヘドロの性状は、前田先生の報告のように変化する傾向があります。しかし、圧密試験では、腐植が多いとき圧縮量は大きいですが、圧密時間が短いという場合が出てきます。これは一般的な概念とちがっています。そこで、腐植があることによる排水等の効果があるようなことはないでしょうか。また、火山灰の下層土は施工時練り返しが生じて難しいことが起りますが、表層の黒ボクは大変扱いやすかった。つまり、腐植が多いことによるメリットも多くあるような気がいたします。

前田(北大) 黒ボクは団粒が発達し、透水性がよくある程度喜田さんのご意見を射ていることになると思います。また、このような団粒構造の構造単位は強い構造をもってこわれないものですが、これは0.03mm以下の微細なものではないかと思います。構造の単位は単一粒子ではなく、こうしたこまかい団粒のようなものであると考えています。

丸山(京大) 我々が実験した結果によると、熱伝導係数を λ 、土壌の含水量を w とした場合、 $\lambda \sim w$ 関係は柏淵氏が示したように直線に近い形となりますが、熱伝導係数の最大値を λ_{max} 、最小値を λ_{min} とした場合に $(\lambda - \lambda_{min}) / (\lambda_{max} - \lambda_{min}) \sim w$ 関係はS字形の直線となり、二つの折点がみられることがあります。この折点をpF $\sim w$ 曲線と対比すると、ある特定のpF値に対応して折点が出てくるようです。これは、土壌内の土壌水分状態を反映した情報、すなわち、土壌水の連続関係などの情報として面白いと思うので、紹介しておきたい。

前田(北大) 水分が多いときは、水の熱伝導が卓越し、水平に曲線がねてくるものと思います。また、pF4位からは空気の影響により、どんどん温度伝導係数が小さくなると思います。

古畑(農技研) 腐植の多い火山灰は、土壌調査の方からいうと、クラム(Crumb)で微細構造でちがっているバラバラな構造で、粒状構造もあれば、粒子が固まったものもあり、単純につまっているものもある。これと

保水性の関係は構造を区別してははっきりさせなければいけないのではないかと思います。

前田(北大) 腐植は、比表面積が $800 \text{ m}^2/\text{g}$ でとても大きい。そのため多くの水が保持できるのではないかと思います。また、腐植をとばすとき、火山灰ではよくとぶが、徹底してよく洗っても、土によって腐植の残りがちがう、これはやはり、腐植の質のちがいを反映しているのではないかと思います。こういう所が問題となるのではないのでしょうか。

吉田(新潟大) 初期含水比がちがうと粗粒化するようですが、粗粒化すると比表面積が小さくなるが、この比表面積はみかけのものでしょうか。つまり、粗粒化した粒子をBET法で整理したとき、これにひっかからない表面積がまた他にあるものと考えてよいのでしょうか。

前田(北大) アロフェンの自然含水比状態の比表面積は、今、いわれている $300 \sim 400 \text{ m}^2/\text{g}$ よりも大きくなるのではないのでしょうか。おそらくモンモリロナイトより大きなものとなると思われます。また、粗粒子化したとき、集合した粒子間の間隙はデッドポアになって、比表面積値から除外される。また、風乾することによって単位の粒子の表面の微細な孔隙が閉じたりして狭小になって、アロフェンの内側、外側の二重構造が、本当の外側だけになってきて、砂ようになって液性限界など測れなくなるものと思われま。

吉田(新潟大) 粒子と粒子がくっついた間には単分子ほどの水も入っていないと考えるのでしょうか。

前田(北大) デッド・ポアには、非常に大きな力が作用しており、ここには、水や窒素が入りこむことはできないものと考えています。

久保田(熱研) 比表面積は、測定法によって出てくるその概念は、ちがうものだと思います。つまり、吸着物質の大きいものを使えば、それが入らない間隙ができてきて、吸着物質の大きさでどうかという吟味が必要になります。たとえば、火山灰を超音波でこわしたものでは酸性フクシンのような分子量の大きい吸着質で調べれば、吸着表面が増えてきます。

次に土と水の相互作用をみるときには、直接水で測った表面積が当をえたものとなろう。そのとき、陰荷電についての交換性イオンの性質で水量がかわってくる。たとえば、Mgを使えば、イオンポテンシャルが大きく、多くの水を引きつけるようになる。こうして、水双極子相互作用でついたもの、これを共に含めて1分子吸着層といっている。これが水を使ったときの表面積になる。窒素で測ったものは、相互作用がないため、幾何学的に並んだものが、表面積になっている。つまり、物理吸着であります。表面積の測り方の原理は、吸着して行って、あるところから吸着のエネルギーがかわる。そして、二

分子吸着に移る。こういったことを頭に描いていますが実際には、こうなっているかどうか分からない。とくに水の場合は分からない。従って、コンシステンシーを調べるときは、窒素よりも水蒸気のほうがよい。また、測られる物質の荷電密度によってかわってくる。腐植で800 $\mu\text{m}^2/\text{g}$ の比表面があるからといって、水で測ったときは、疎水性のため小さくなるようなときもでてくる。大変ややこしいものだと思います。

関谷(果樹試) ところで、今日の討論では、「土」ということがよく使われていますが、今まで、私どもは、材料としてみると「土」といい、作物生産にかかわる微生物のいるものを「土壌」といってきました。構造を考えると、どちらの用語を用いればよいのでしょうか。「土」の構造と、「土壌」の構造とでは、その意味するものがちがっているのではないのでしょうか。

前田(北大) 何の意味もなく「土」を使いましたが土質工学ではすべて「土」といって、「土壌」はきらっています。工学性をみるときは、土は材料として扱います。農学的にみるときは、当然、土壌物理学であるし土壌の工学性でしょう。どちらの立場も忘れていたものではない。農業土木は、作物生産と密接に結びついているもので「土壌」を使っていくつもりです。「土の物理学」では、土質工学の關係にアピールするために使ったものであるにすぎません。

八幡(明治大) 汚水を土壌に流して処理するとき、連続的に流すよりも、間断して流すほうが結果がよいという経験を持っていますが、これは何か微生物の知識から説明つくものなのでしょうか。

服部(東北大) 土の目づまりのような問題が含まれているのでしょうか。まず微生物が投与有機物を分解することが考えられますが、より粘質な物質を作るか、単にCO₂にかえてしまうか、いろいろな場合があります。このとき、酸素の状況とどんな種類の微生物が働くかがちがってくるためのような気もしますが、あまりにもいろんな要因、可能性がありすぎるような気がします。

伊藤(岩手大) 微生物のサバイバルは孔隙の中のガスの組成できまるとうかがいました。圃場では、下層のようなところで、O₂が極めて少なくなる場合が生じると思いますが、こうした所では、サバイバルとしてその気相のガス組成はどうなっているのでしょうか。窒素とCO₂であると考えてよいのでしょうか。

服部(東北大) 団粒の孔隙の内部を考えていて、ここでの気相の組成は通常の空気のそれとは全然ちがうことを申しました。土壌断面でも組成が変わるとも思います。こうしたガス成分に対して、異なった微生物群が活動することが考えられます。このガス成分として窒素、

炭酸ガスの外にも、各種の無機、有機のガス状物質が土壌中の微生物に重要な影響を与えています。

喜田(大林組) メタンガスについて測定されたことがありますでしょうか。東京の沖積地帯の地下十数mの所でO₂ゼロの空気が噴き出しています。しかし、メタンガスが非常に含まれている。何か有機物が、そこで分解をしていたのではないかと思います。

服部(東北大) そのガスは長い時間かかって蓄積されたものではないでしょうか。そうしますと、微生物の代謝は、有機物が単純にCO₂になって、メタンになって大気へということではなくて、閉じた空間でゆっくりとした循環となり、極めて微量なガスでも、蓄積されることがある。この場合、耕地とは少しちがって、もっと長期の問題として考えるもののような気がします。

八幡(明治大) 土壌構造を考えると、幾何学的内容をまず想像し、そこに空気や水、イオンの通過、吸着等を考えています。しかし、水を通したときの「手答え」をもとにして構成した、これとは別な透水構造といったようなものも考えられると思います。こうした構造像は幾何学的な土壌構造像とはどうすれば関係がつけられるものか。「構造」は常に「幾何学的構造」でなければならないものなのか。いつも気になります。

今後期待される研究

座長 それでは、まとめとして、それぞれの分野からみて、土壌物理研究者は、「これから何を研究していったらよいか」ということについて簡単にお願いいたします。

前田(北大) 境界領域、とくに粘土の物理化学の成果を使って、自分の得た研究結果を説明していきたいと思っているので、わからないことは、どしどし研究して行き、他分野の成果を活用してゆけばよいと考えています。火山灰は、やっと研究成果が蓄積されてきたと思います。あと、重粘土にしても、マサ土などにしても、やはり、粘土の物理化学としての成果を期待したいと思います。

三輪(農林水産技術会議) 土の物理学とは何かということは、よくいろいろな方におたずねしましたが、今日のお話から、構造を明らかにすることがそれにあたるように思います。土の現象は、構造を舞台にして化学反応、移動、微生物の生活があらわれていることがわかりました。この構造は、幾何学的なものにしても、もう少し定量的なものとして把握、さらにマクロからマイクロへつながれるしくみが必要であると同時に、構造を舞台にダイナミックな現象があり、それを解明する物理学が必要と考えます。

井上(農技研) ペトロロジーや土壌化学を生かすとい

う立場で現場の土壌をみると、定量的に観測できるものは限られています。物質移動では、定量的把握が大切なにもかかわらず、土壌断面からはこれがうまく把握できず、土壌生成のその歴史を語る根跡が観察されるに留まる場合が多い。こうした現場の断面観察と物質移動の定量化とをうまく結びつける方法はないものだろうかと考えています。また、イオンの移動の場合、粒子の配列の不均一性が移動の非正常性に結びつき、これをマクロに観測しているのが現状であろう。そこで、物質移動が営まれる場を一つ一つ詳細に詰めていかないと、マクロな測定も生きてこないのではないかと考えています。

金野（東北農試） 土壌肥沃度について、特にリン酸の研究についてみますと、これは吸着平衡で従来考えら

れてきました。これだけで論議できるかという疑問に思います。むしろ、溶解する速度、作物が必要なだけ土から溶解するということが重要ではないかと思えます。特に温度が上がったときに問題になると思えます。これを今後はどうにかして解明する必要があると思えます。

服部（東北大） 土壌微生物の発展のためのパートナーシップを考える場合、土壌物理は大切だと思います。土壌物理の方から微生物をみるという研究を期待したいと思います。欧米では、すでに、この両者の結合がすすめられており、今後の発展に重要な意味をもつと考えています。