J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 144, p.39 ～ 43 (2020)

シンポジウム特集
資　料
Miscellaneous

第 61 回土壌物理学会シンポジウム総合討論「土壌・水環境のサステナビリティとコロイド界面現象」

朝田 景（シンポジウム事務局）

Discussion at the 61th symposium: Soil and water sustainability and colloid and interface phenomena

Kei ASADA

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（座長：小林幹佳，赤羽幾子）の模様を，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，事務局の判断により，発言の内容の一部を省略または要約，講師による必要な説明および引用文献の加筆を行なったことをご了承願いたい．

小林（座長）：
総合討論を始める．会場からの質問に対して発表者から応答をお願いする．

小林（座長）：
複数の講演者への質問として，懸濁物質の発生・抑制について，コロイド化学的な作用によるものと物理的な作用によるもの（代掻き，降雨，暗渠を通したフラッシュなど）とは，どのように分けたり推定したりするのか，あるいはどちらの要因が大きいのか．

足立（筑波大学）：
代掻きなどはもともと物理的な攪乱を起こしているわけで，侵食や土砂崩れなど量としては物理的に発生しているものが圧倒的に多いが，発生の原因には少なからず化学的要素が関与している．代掻きに戻れば，凝集分散特性により，その後の問題が大きく変わる．

鈴木（農研機構　中央農業研究センター）：
北陸の重粘土地帯において，降雨強度と懸濁物質濃度には，相関係数が低いながらも優位な関係がみられることから，物理的な作用による影響が大きい．一方，発表の最後で紹介したが，懸濁物質の粒径が電解質濃度に依存することを考慮すると，イオン雰囲気のような化学的な要因も少なからずある．

南光（森林研究・整備機構）：
私は濁りの研究はしていないが，関連ある情報として．非降雨時に枝葉に沈着した化学物質は降雨時に洗い流され，溶存態だけでなく一部粒状態のまま落ちてくる．樹冠通過雨および幹を伝って落ちてくる雨（＝樹幹流）（後者のほうが高濃度）を対象に，それらの粒径分布の大きさについて “濁り” を調べている研究グループはある（例 Levia et al., 2013）．

牧野（東北大学）：
連続遠心直後の黒ぼく土と黄色土の粒子をレーザー散乱で見ると，黒ぼく土ではほとんど数 ～ 10 μm 以下のフロック状であった．こうした黒ぼく土と黄色土の違いを考慮すると，分散の発生は物理的な作用によるかもしれないが，凝集およびその持続には土壌腐植の状態や相互作用が影響しているだろう．

小林（座長）：
さらに会場から補足は．

足立（筑波大学）：
先ほども述べたが，基本的には物理的な作用である．しかし，究極的な「ものが壊れる」という観点からいうと，かつて関東ロームの崩壊現場で見られた人為攪乱による強度の低下などは，経時的な側面に化学的要素も関与し，土砂の崩壊などに関わる土壌物理の本質的かつ未解決の問題ではないか．さらに，有機物がそのようなヒステリシスにどう関わるかについてもまだ明らかにされていない．

小林（座長）：
土壌の団粒構造が発達していると分散しづらいときく．土壌の団粒形成において，微生物作用によってアルミニウム（Al）と有機物の錯体ができると山路先生のご発表にあった．植物が枯死し土壌に残された後，微生物作用が土粒子同士を結合する働きをすることはあるか．

山路（筑波大学）：
これまで，土壌微生物のつくる物質が団粒を壊すことに注目してきたが，団粒形成のほうは考えてこなかった．有機物が錯体を形成すると有機物同士の疎水的な結合が生じやすいため，団粒形成にも役立つことは十分考えられる．

小林（座長）：
有機物を分解する微生物が Al 阻害を受けるため，土壌中に有機物が残るといわれており，微生物による作用が団粒形成に寄与することとは逆の印象である．

山路（筑波大学）：
私もこれまで，微生物のつくる物質が，粘土鉱物と Al や鉄を溶出することに着目してきた．

赤羽（座長）：
南光先生への質問に移る．南光先生は，もともと林内の土壌侵食プロセス研究の一環として雨滴研究を始めたそうだが，その過程で，土壌侵食プロセスの解明だけではなく，森林降雨が今後どのように変化するか，降雨がどれくらい林床に貯留可能か，などの予測に利用されるように発展してきたということで，たいへん興味深く聴いた．それに関して会場から質問が来ている．親水性の葉を持つ広葉樹や針葉樹のなかで，スギは相対的に大きな水滴径を生むと紹介があったが，林床の上の構造や水食への影響はみられるのか．

南光（森林研究・整備機構）：
本日の発表では土壌侵食にあまり触れなかったが，地上部でいくら大きな雨滴ができようが，地表面が被覆されていれば侵食は起きない．スギの葉の構造は複雑なため，地面に落ちたあとのリター分解が遅く，地表面での堆積時間が長い．それらが地表面を被覆するために土壌侵食は生じにくい．

赤羽（座長）：
会場からほかに．

西村（東京大学）：
広葉樹の葉でも親水性と疎水性があると思うが，その場合はいかがか．

南光（森林研究・整備機構）：
葉が親水性か疎水性かで，落ちてくる雨粒の大きさは違うが，それがリターの分解しやすさをどう変えるのかは調べていないのでわからない．

西村（東京大学）：
侵食にはどのように関わるのか．

南光（森林研究・整備機構）：
林床が被覆されているかどうかのほうが，侵食には効いてくる．ハワイの例でいうと，外来種であるオオバノボタンという広葉樹の葉は大きく分厚いが，リター分解は早く，林床が被覆された状態にならず，侵食は起きやすくなる．したがって葉の分解されやすさも侵食には影響するだろう．

赤羽（座長）：
計測に関する質問を頂いている．雨量計を使って果樹園内の降雨を測定したが，ばらつきが大きすぎて断念した．南光先生のご発表にあった雨量計のデータにはあまりばらつきがなかったが，園内の平均的な雨量などを得るためには何点くらい測定したらよいか．

南光（森林研究・整備機構）：
測定点数がいくつでよいのかについては，我々の分野でもまだ答えは出ていない．しかし，雨量は空間的なばらつきが大きいので，平均的な値を得るためには，なるべく雨量測定面積が大きくなるようにデータを得ることが重要である．果樹園の木々はそこまで密集していないので，風向きなどで雨の降り方が変わる可能性がある．おそらく森林内よりもばらつきが大きいと想像する．したがって，できるだけ多くのデータをとった上で，十分な測定地点数を知る必要がある．もし雨滴に興味があれば，レーザー雨滴計の貸与は可能である．

小林（座長）：
続いて，鈴木先生にご質問を頂いた．炭酸カルシウムの凝集剤としての効果を室内実験で調べていたが，圃場に適用した例はあるのか．関連して牧野先生にも回答頂きたい．

鈴木（農研機構　中央農業研究センター）：
水田の代掻き時の濁水抑制のため，カルシウム剤を施用することについては，赤江先生の有名な論文があるが，畑圃場において，石灰資材を加えて濁水の発生を抑制したという例はない．畑圃場における懸濁態物質の発生は，下方に懸濁物質が移動できる粗孔隙があることおよびそれを処理する暗渠があることなどの限られた条件で生じるため，関心が薄いということが主な理由だろう．したがって，現在は転換畑における懸濁物質発生の実態を把握した段階に留まっている．

牧野（東北大学）：
水田では，同じく赤江先生の論文の例と，さらに富山県でケイ酸カルシウムを施用している例（県の報告）がある．炭カル施用の例は見たことがない．炭カルを施用すると，pH の上昇によって分散しやすくなることと，イオン強度が上がって分散しにくくなることの相互作用が難しいと考える．

小林（座長）：
水田での凝集剤の施用はすでに実用段階にあるのか．

牧野（東北大学）：
懸濁物質の流出抑制のため，凝集剤として塩化カリウムや塩化カルシウムを水田に施用することは，愛知県で継続して実施されている．

赤羽（座長）：
沈降容積について牧野先生へ質問がきている．沈降容積が大きいと単粒子が多いということだが，単粒子の状態で沈降部が形成されるのか，あるいは，凝集したものが沈降部を形成するのか．また，単粒子と凝集体の沈降速度はどの程度異なるのか．

牧野（東北大学）：
「フロック状の粒子が多くなると沈降容積が増える」と当初仮説をたてたが，実際には，単粒子の状態が大きくなる時に沈降容積が大きくなった．レーザー散乱では，その機器上，水分が多い条件で測定しなければならないが，そこでは単粒子の状態であった．その単粒子が沈降した場合には，2 : 1 型粘土鉱物であるスメクタイトの構造末端（エッジ）にある破壊電子荷の正電荷と，層状の表面（フェイス）にある負電荷とが，カードハウスのように重なりあうため，膨潤して沈降容積が大きくなったと解釈した．これについてはむしろ土壌物理の専門家の方々にご意見を頂きたい．後者の質問について，実験では同じ沈降速度の単粒子と凝集体が存在した．この場合，沈降速度が等しいため両者のストークス径は同じであるが，レーザー散乱法や写真観察法で観察した実際の粒子の大きさは凝集体のほうが大きかった．

赤羽（座長）：
土壌物理の分野から，さきほどの牧野先生の解釈にご意見頂戴したい．

足立（筑波大学）：
「カードハウス構造」という用語は，現象を説明するために考え出されたものであり，これだけでは自然全体を説明できないと考えている．実際の重粘土質の農耕地とでは主成分に違いはあるだろうが，少なくとも通常の塩溶液に分散させた純粋なモンモリロナイト



Photo 1 総合討論の様子.

はフラクタルな構造をもつフロックとして存在し，イオン強度を下げると完全に分散する．つまり，エッジフェイスの相互作用はあるとしても，カードハウス構造は，沈降容積を構成する単位にはなってないのではないか．カードハウス構造によらずとも，フロック間接点数とフロックの大きさが決まれば沈降容積は表現され，圧密挙動などはフロックの破壊として表現できる．この考え方に基づいた論文では，幾何学的な観点から，沈降容積の構成要素はフラクタル構造をとるフロックであり，フロックのランダムパッキングとして沈降容積を表現する数理モデルを提案した（Adachi and Ooi, 1990）.

取出（三重大学）：

例えば，マクロな物理性である透水性の pH 依存は報告されているが，これはミクロな構造単位として，カードハウスのエッジフェイスの相互作用が原因と考えられないか.

足立（筑波大学）：

確かに pH が酸性のほうがエッジフェイスの相互作用は大きく，粒子間の結合強度は強くなる．基本的に凝集性が高ければ透水性が上昇すると考えれば，通常のイオン強度領域での pH 依存性は理解できる．しかし，透水性の増加は，カードハウスのエッジフェイスの相互作用によるのではなく，基本の構造単位はフロックとして，フロック強度の増加あるいはフロックの大きさの増加と捉える方が素直だと考える．一方，Kozeny-Carman 式によれば透水係数の重要なパラメータは間隙径である．それをカードハウス構造と捉えても否定はしないが，その場合，カードハウス一辺の長さや形など様々なパラメータを考慮しなければならない．力学的に式に入れて使うならば，基本構造はフロックとし，pH 依存性は強度因子としてフロックの大きさで処理するあるいはフロックの構成一次粒子の物性の違いに帰着させることを考える．この実体を知ることは，2 次圧密の本質に迫る問題であり，本質を捉えれば土質工学の重要課題にできると考える.

イオン強度を 1 N 以上に上げると，純度の高いモンモリロナイトの粒子間相互作用やマクロな最終沈降容積への pH 依存性は無くなる（Wu and Adachi, 2018）．一方，イオン強度を下げると，フェイスにある面荷電とエッジにある正荷電が互いの作用を打ち消すスピルオーバー効果という現象が生じる（Chang and Sposito, 1996）．ある程度イオン強度を上昇させるとこの効果は無くなるが，この領域では粒子間相互作用に pH 依存性はある．つまり，自然界で見られるような塩濃度では，pH 依存性は存在し，当然凝集速度にも影響する（Tombacz and Szekeres, 2004）.

取出（三重大学）：

イオン強度を 1 Ｎ以上にすると何故 pH による構造の差異がなくなるのか.

足立（筑波大学）：

私の解釈では，バルクが塩化ナトリウム（NaCl）の場合，イオン強度が極端に高くなると，pH 依存荷電の作用により表面に吸着している Na イオンの水和構造（水和半径）のイオン強度依存性が支配的になり，粒子間距離がそれに規定されるようになる．そのため，pH 依存荷電は静電的に遮蔽され機能しなくなる．一方，バルクに多く存在する Na イオンは水和構造を持ったままで粘土表面に容易に吸着するが，その水和半径は高イオン強度下において微妙にイオン濃度依存性があるため，バルクのイオン濃度が増加すると少し小さくなる．粘土粒子間のファンデルワールス引力は近接する粒子表面間距離の関数であるが，粒子間には吸着したイオンが水和した状態で挟まれたように存在し，接近を阻んでいる．イオンの水和半径が変われば粒子間距離が変わり，その結果，粒子間結合強度が変わることで粒子同士の結合構造も変わる．この描像については最近のレビューに詳しい（Adachi et al., 2019）．ただ，ここで完全に決着したわけではなく，実際の土壌で生じる問題，例えば他のイオンではどうか，有機物吸着が関与したらどうかについて，我々の実験事実を演繹することはできない．今後一つ一つデータをとっていく必要がある.

石黒（北海道大学）：

「フラクタル次元で構造が決まる」とはどのようにかかわってくるのか.

足立（筑波大学）：

先の農業農村工学会の講演では，沈降していくフロックについて，フロックの楕円体近似とフラクタル次元を使用した沈降速度式を提案した．また，沈降容積はフラクタル次元と沈積しているフロックの大きさから説明できる（上記の論文参照）．沈積した時上部では大きなフロックができるが，下部では圧密され壊れて小さなフロックになる．その大きさは受けるストレスやヒステリシスに依存する．カードハウス構造は，モンモリロナイトでいえば約 1 nm のエッジとフェイスがくっつくような極めて小さなスケールで生じる．肉眼で見える現象は mm スケールなので，10 の 6 乗の差がある．そこには大きな階層性がある．その階層性を説明付けるためにフラクタル構造という概念が有効だと考える.

小林（座長）：

続いて，山路先生への質問に移る．太古の昔に植物が重金属耐性をどのように獲得したと考えられるか．また，福島県の現状は，γ 線による殺菌を受けている状態といってよいか，その場合，植物のストレス耐性は変化するか.

山路（筑波大学）：

早池峰，天塩などの鉱脈，蛇紋岩地帯のように，自然界でニッケルが多い環境がそもそもあることを考えると，そのような地域でまず特殊な植生ができて，そこで生き残ることができたという経緯があったと想像

する．また，我々の研究室ではセシウム関連の研究も行っていて，調査地にもセシウム濃度の高いホットスポットがある．その影響を検討したことがあった．γ 線殺菌によって，微生物の化学的機能，生育パターンなどが影響を受けると一般的には考えられるが，我々のフィールド調査から，植物のストレス耐性にはおそらく影響しないということが分かってきた．

小林（座長）：

別の観点からの質問．内生菌を複数混ぜて接種されていたが，混合する意味はあるのか，また，内生菌同士の相互作用はあるのかを教えてほしい．

山路（筑波大学）：

この実験は，一種類よりも複数混ぜてみようという軽い気持ちで始めた．三種類接種した時と，リゾデルメア単体で接種した時では，根の形状がほぼ同じであった．再分離してみると，三種類接種したにも関わらず，リゾデルメアが旺盛に発現した．調べてみるとリゾデルメアは抗菌物質を作ることが分かった．このことから内生菌同士が相互作用していることが明らかとなり，菌同士の関係も今後検討していくべき点である．

赤羽（座長）：

予定時間を過ぎたところだが，会場から最後に．

取出（三重大学）：

講演者から「団粒」ということばを度々聞いた．共通の研究対象，またはそれに係るものとの印象を持った．しかし，団粒と一口にいっても，ミクロな凝集フロックからマクロな土壌団粒までさまざまな階層性があり，それぞれ測定法も異なる．皆が各々イメージを持つため，定義も不明確である．「団粒とはなにか」については，科学的な共通理解を深めて発展させていくべきではないだろうか．懇親会で皆さんの意見を聞きたい．

未回答の質問への回答

濱本（東京大学）：

内生菌によって地上部のカリウム濃度が高まるメカニズムについて教えてほしい．

山路（筑波大学）：

内生菌によって植物における栄養元素吸収が促進される現象は既往報告があるが，本研究においてカリウムの吸収促進が確認されたメカニズムについては，検討がついていない．

西村（東京大学）：

内生菌がどのようにリョウブやススキの生育を促進するのか教えてほしい．

山路（筑波大学）：

内生菌が植物の成長促進をしたメカニズムには，1）内生菌の産生する植物ホルモンによる生長促進，2）植物における金属耐性を増加させた結果としての生長促進，が考えられる．ススキの内生菌の場合は，植物ホルモンとして IAA（インドール-3-酢酸）様化合物を産生することが確認されている．

石黒（北海道大学）：

枝が濡れるとなぜ撥水性が変化するのか．

南光（森林研究・整備機構）：

枝が濡れてできる薄い水膜により，枝表面の小さな粗度が減少するのが主要因だと考えられる．

小林（筑波大学）：

雨滴研究は継続的なフィールド観測が必要だと思うが，楽しく研究を続ける秘訣はあるか．

南光（森林研究・整備機構）：

流域試験とは異なり 5 年，10 年と同じ場所で測定し続ける必要がなかったため，状況に応じて場所（地域，国，樹種）を変えながら様々な場所で測定できたのが良かった．雨滴研究はニーズ（土壌侵食現象解明）が最初にあり，シーズ的な研究体制に入って，それが新たなニーズを生み出すようになっている側面がある．共同研究者を巻き込み，そして巻き込まれながら，新しい発見ができている状況が，楽しくそしてありがたいことである．

小林（筑波大学）：

黒ぼく土のフロックは安定であるか．

牧野（東北大学）：

レーザー散乱でフロック径を測定中に攪拌強度を変化させてみたが，フロック径に大きな変化は認められなかった．黒ボク土のフロックは比較的安定と考えられる．過酸化水素処理をすると粒径が小さくなる．

岩田（農研機構　農村工学研究部門）：

大豆の生育に適したように pH を調整すると懸濁態リンが減るということだが，発表頂いた圃場試験はほとんど pH を調整しない場合の結果と考えてよいか．

鈴木（農研機構　中央農業研究センター）：

測定圃場では，作付け前に慣行量として消石灰を 1 ha あたり 1 t 施用した．しかし，中和石灰量測定によると，作土の pH を大豆の生育に好適な 6.5 にするにはこの 3 倍程度が必要である．従って，pH 矯正の点では測定圃場における石灰施用量は不十分であったと考えられる．

吉田（東京大学）：

懸濁物質発生のタイミングと暗渠からの流出時期のずれに興味がある．流出開始時の「濃い」流出水は少なからず暗渠管内のフラッシュ効果が影響しているように思われるが，実際はいかがか．また，暗渠からの懸濁態リンの流出が環境に悪いことならば，管内洗浄水を排水路に流すのは望ましくないが，負荷量として無視できる量か．

鈴木（農研機構　中央農業研究センター）：

流出初期に高濃度の懸濁物質が出るのは，流出のない期間が続いた後の降雨であることが多く，ご指摘の通り，暗渠管内のフラッシュ効果が影響していると考えられる．一方，圃場観察では，懸濁物質濃度が高いと思われる流出の継続時間は数十分から 1 時間程度であり，流出のない期間が短い時期には必ずしも流出初期の懸濁物質濃度は高くない．これらから，測定圃場では流出初期に暗渠管のフラッシュが生じることはあるものの，作付け期間全体の流出量には大きく寄与していないと考えている．

加藤（農研機構　農業環境変動研究センター）：

地下水位制御システム（FOEAS）による地下灌漑制御区では，2 作目以降に作土の粗孔隙量の減少が著しかったとのことだが，これは膨潤の影響か．また，北陸のスメクタイト質土壌の転換畑圃場では，水分変化に伴う収縮・膨潤量はどれほどになると推定されるか．

鈴木（農研機構　中央農業研究センター）：

大麦期消雪以降のような乾燥する時期には，深さ 20 cm のマトリックポテンシャルが −60 kPa 程度にまで

低下することがあり，拠点内の土壌の水分保持特性のデータと既往の知見から，この時には下層の土壌マトリクスに最大で約 5 % の体積変化が生じうると推定される．下層の粗孔隙量が数 % であったことを考えると，地下灌漑にともなう膨潤が粗孔隙量に影響を与えた可能性は十分にあると考えられる．

（敬称略）

引用文献

Adachi, Y. and Ooi, S. (1990): Sediment volume of flocculated material studied using polystyrene latex spheres. Journal of Chemical Engineering of Japan, 32: 45–50.

Adachi, Y., Kawashima, Y.T. and Ghazali, M.E.B. (2019): Rheology and Sedimentation of Aqueous Suspension of Na-montmorillonite in the Very Dilute Domain. KONA Powder and Particle Journal, 37: 145–165.

Chang, F. -R. C. and Sposito, G. (1996): The electrical double layer of a disk-shaped clay mineral particle: Effects of electrolyte properties and surface charge density. Journal of Colloid and Interface Science, 178: 555–564.

Levia, D.F., Michalzik, B., Bischoff, S., Näthe, K., Legates, D.R., Gruselle, M.-C. and Richter, S. (2013): Measurement and modeling of diameter distributions of particulate matter in terrestrial solutions. Geophysical Research Letters, 40: 1317–1321.

Tombácz, E. and Szekeres, M. (2004): Colloidal behavior of aqueous montmorillonite suspensions: The specific role of pH in the presence of indifferent electrolytes. Applied Clay Science, 27: 75–94.

Wu, M.-Y. and Adachi, Y. (2018): Duration of initial flocculation stage in the sedimentation of sodium montmorillonite suspension in the semi-dilute regime. Colloid and Polymer Science, 296: 71–76.