

第48回土壌物理学会シンポジウム総合討論

谷山一郎* (シンポジウム企画担当者)

Discussion at the 48th Symposium, JSSP

Ichiro TANIYAMA*

* National Institute for Agro-Environmental Sciences
3-1-3 Kannondai Tsukuba Ibaraki 305-8604 Japan

竹内 (道立十勝農試):

最初に現場での耕起法や有機栽培から始めたい。

古賀氏 (北海道農研) に対する土屋氏 (九州沖縄農研) の質問である。慣行プラウの耕深は 30 cm 程度ということだが、プラウが温暖化によくないという指摘をどう思うか。

古賀:

温暖化という面では、有機物の分解を促進するので行わない方がよいが、十勝の農家では収穫後に実施している。それは残渣の分解を促進するとともに、融雪水を速やかに排水するために必要だと思っている農家があるためである。温暖化の面では行わない方がよいが、実際にはやめるのは難しい。

土屋:

プラウの深さは 25 か 30 cm 程度か。

竹内:

十勝では平均して 25 cm 程度だが、圃場によっては大きな機械を使って 30 cm のこともある。

土屋:

ある雑誌に深いプラウ耕についての弊害の記事が出ている。

古賀:

温暖化にとってはしない方がよいが、実際の現場では必要だ。弊害とはどのような意味か。

土屋:

覚えていない。

竹内:

中辻氏 (道立中央農試) の質問は以下の通りである。堆肥施用によって無施用よりも土壌炭素の減少が抑制されるのは理解できるが、堆肥施用によって供給量が増えると炭酸ガス発生量そのものが増えるのではないか。圃場での炭素収支はどうなっているのか。

古賀:

土壌有機物の分解によって排出される CO₂ が地球温暖化に実質的に影響すると考えられている。環境省のインベントリーなどでは、土壌炭素の減少に由来する量と記載されているので、堆肥から排出されるものは温暖化の算定の対象になっていない。

中辻:

カーボンニュートラルということか。

古賀:

その通り。土壌炭素として増加した分、あるいはストックとして貯留された分は削減分となる。

竹内:

中原氏 (北海道大学)、石黒氏 (岡山大学)、谷山氏 (農環研) からの質問である。土壌炭素含量は 20 年間変化がないが、今回の実験では減少しているのはなぜか。先ほど谷山氏のデータの中では西南日本では土壌炭素が増加し、東北日本では減少しているという傾向との整合性はどうか。

古賀:

定点調査の結果では日本全体として土壌炭素含量は変化はないが、ばらつきがある。黒ボク土のように、もともと土壌炭素含量が多い土壌では減る傾向がある。瀧氏 (愛知農総試) の話にあった黄色土は有機質資材を入れると増加しやすい。減少している土壌も増加している土壌もあるため、20 年間では変化していないと理解している。

瀧:

水田土壌ではここ 20 年はあまり変化がない。昔は堆肥を施用していたが、最近は堆肥の施用が難しくなっているにもかかわらず、コンバインの普及によって前作の稲わらの還元を行うようになったのが理由と考えられる。土壌炭素含量が増えている土壌がある理由は、黄色土やレキ質灰色低地土では堆肥を入れなければ収量が確

保できないという現状がある。ここ数年については昔よりも非常に良質な堆肥がたくさん出回るようになり、それを利用する農家が増えたのが土壌炭素を高めている原因だと思う。

竹内：

瀧氏の講演の中で5年程度までは土壌有機物含量は増えるが、その後定常状態に近づくという話があった。白戸氏（農環研）の発表でも、堆肥の11 t/ha程度の施用では徐々に減るが、19 t/haでは増加して定常状態になり、ここ20年変わっていないという状況が出てくるという。古賀氏の試験結果はそこまでいってない段階で、最初に劇的に変化するときの観測のため、非常に大きな減少と見たと理解できるのではないかと思う。

古賀：

30年や50年という長いスパンで、圃場試験を実施しなければ最終的な結果は分からない。私の試験の場合は減っている過程で、まだ変化が落ち着いていない段階での結果だと思う。

竹内：

20年間変化がないということと古賀氏の結果は別のことではなく、見ているステージが違うのではないかと思う。次に中原氏の質問である。耕起を表面だけにした処理でも深いところでは土壌炭素含量が減るのはなぜなのか。

古賀：

私の試験圃場の土壌有機物量が多く、下層部分も含めて有機物が減っている過程だと考えている。特に不耕起も含めて私の圃場の土壌炭素含量が高く、減っている過程ではないかと思う。したがって、物理的攪乱がなくても土壌炭素は減っている。なにもしなくても土壌呼吸が少しはあるので、収支的に考察すると、耕起の物理的攪乱がない深い層でも呼吸の方が多く、減っているのだと思う。

中原：

したがって、有機物の供給が重要だということになる。

古賀：

そう思う。

中原：

アメリカの例では、森林から畑になると土壌有機物が急激に減少し、畑から森林に戻ると急激に土壌有機物含量が回復した。これも物理的攪乱がなく、地中への炭素供給があったためか。

古賀：

そうだと思う。つまり木の根や地上部の供給があるためだ。

中原：

畑ではなぜそうならないのか。1年未満しか植えないからか。



写真-1 会場全景

古賀：

中原氏が指摘した図（古賀：p. 8, 図3）では10年くらいで有機物含量が劇的に増えていた。それがどうして私の試験畑では増加しないのか分からない。有機質資材の質と関係があるのかも知れない。

竹内：

酒井氏（琉球大学）の質問である。土壌侵食、表面流出や地下水浸透による土壌炭素の圃場からの流出の見積もり例があるのか。

古賀：

土壌侵食は土壌炭素の減少に大きく影響しているとされている。土壌の風食、水食は土壌炭素の流出につながる。表面の土壌が飛散して炭素が失われるとともに、下層も酸化分解しやすくなる。したがって、土壌侵食は土壌炭素損失に直結する。表面流出や地下水流出する水溶性炭素がどの程度なのかはよく分からない。しかし、侵食と土壌炭素との関係についてはアメリカでよく研究されているので、今日紹介した論文にいくつか書いてあると思う。

酒井（琉球大学）：

泥炭地などでは茶色い水が流れ、それは水溶性リグニンで、水溶性炭素が含まれているためと言われている。畑ではそれほど影響は大きくないと思うが、長期では収支に影響するのか。

古賀：

地下に浸透する有機炭素の量がどの程度かは知らない。

白戸：

江口氏（農環研）から、黒ボク土の畑で実測した結果では、地下水に流出する水溶性炭素の量はわずかだと聞いたことがある。

江口：

年間炭素でヘクタール当たり何十キロ程度だと思う。

白戸：

有機炭素濃度が高い場合や浸透水量が多い場合には違うと思うが、炭酸ガスの排出量に比べると、桁違いに小さいということになる。

竹内：

宮崎氏（東京大学）から瀧氏への質問である。有機物の施用や残渣を鋤込むためには機械作業が必要だ。特に有機農業の場合はその回数を増やす必要があり、むしろ走行による耕盤層を作ってしまう可能性が高いのではないか。また、有機農業の方が機械の走行回数が増えて、機械作業による炭酸ガスの排出量が増えるのではないかという懸念がある。

瀧：

私の調査した農家では、大型機械で堆肥や肥料を散布せずに、人力で運搬し、散布・混合していた。有機物を施用することによって、機械作業が増えて耕盤ができるということはない。大規模経営の有機農業生産者は成分の低い堆肥を施用するとともに、堆肥を散布することに熱心なので、圃場を走行する回数は多くなるので、指摘の点はあり得る。

竹内：

北海道でもこれから有機農業が拡大していく気運になってきているが、特に除草は薬剤ではなく機械除草が主体なので、指摘のような問題が生じてくると思う。LCA 手法を使った炭酸ガスの発生量を予測する研究者が必要だと思う。北海道ではそのような問題が大きくなると感じている。

中原：

川本氏（埼玉大学）から平舘氏への質問である。土壌撥水性の研究に関連して、腐植物質の土壌粒子表面での立体構造、さらに土壌乾燥に伴う再配列について情報があれば教えてほしい。

平舘：

腐植物質では、土壌から抽出したものについての研究が多く、土壌そのものの研究は見当たらない。ただ、撥水性については土壌の NMR スペクトルをとるという手法がある。核磁気共鳴で炭素の運動性のよい部分と悪い部分を区別して調べることができる。撥水性の土壌ではメチル基の部分は活性が高く、外側を向いている。したがって、撥水性の土壌ではメチル基やアルキル炭素が表面を向いているのではないかという研究がある。特に日本の火山灰土壌では炭素含量が非常に多いので、うまく材料を調整すると研究ができるかもしれない。今日のポスター発表を見て、NMR を利用すれば少し違うデータが得られると思った。

中原：

古賀氏、澤本氏（酪農学園）、私から似たような質問がいくつかある。まず、腐植物質の構造と土壌中での安定性に関係はあるのか。また、腐植のモデルについて、低分子の会合モデルを支持しているが、直感的に考えて低分子の会合では分解程度が下がるように思う。低分子会合モデルでの維持は可能かどうか知りたい。

平舘：

二つ目の質問から回答する。低分子会合モデルは抽出した腐植物質についての研究結果である。したがって、採取した状態での腐植酸として、ミセル構造を持っているものを分析し、その結果を出している可能性が高い。また、使っている腐植酸は当然、火山灰土壌ではない。火山灰土壌の面積は地球上でも 0.7% しかなく、例外的な土壌だ。ヨーロッパの土壌の 10 倍以上炭素を溜められる黒ボク土が同じようなメカニズムで溜めているとは考えにくい。黒ボク土に多くの炭素を溜めることができるのは、火山灰から供給される鉄やアルミニウムが大きく寄与し、それが安定化につながっている。一番目の質問の意図はどういうことか。

古賀：

なるべく土壌に炭素を溜めるため、どのような構造をもった腐植物質が長く土壌中にとどまれるのかという、構造と安定性の関係を知りたい。

平舘：

腐植物質に関しては、A 型、B 型、P 型、RP 型というタイプに分けられている。その中で一番安定であり、耐性があるといわれているのは A 型の腐植酸である。これは火山灰土壌に見られるように、ベンゼン環とカルボキシル基をもった構造が一番安定である。カルボキシル基は鉄とかアルミニウムに配位して外側をベンゼン環で覆っているような構造なのではないかと思う。そういう構造を考えると炭が近い。炭はベンゼン環に富んだ構造をしている。鉄やアルミニウムがなくても、炭にしてそれを土壌に入ると長い間保存できる。炭にして入れれば炭素を土壌中に蓄積できるとして、実際に行っている。何千年も前から炭として土壌に蓄積したテラプレタ (terra preta) という土壌が最近注目を浴びている。そのような土壌管理についてアメリカやブラジルなどが研究を進めている。

古賀：

ベンゼン環をもった A 型腐植物質が安定だと分かった。どういうタイプの作物残渣をいれると土壌炭素が効率的に増えるのかを教えて欲しい。

平舘：

これは非常に難しい問題だ。しかし、 $\delta^{13}\text{C}$ のデータを見てみると森林植生の黒い土壌というのは C_4 植物の寄

与が大きいの。つまり、森林になる前の草地植生の炭素が非常に多く溜まったことを示している。したがって、草地植生というのは炭素を溜める能力があったのかもしれない。あるいは、降った当初の火山灰に炭素を溜める力があるのかもしれない。いずれにしろ、火山が噴火してそれが地表に積もり、その最初の何十年か何百年かで非常に多くの炭素が溜まると考えている。炭素蓄積量は最初に急激に増加する。特に青森県の太平洋側、千年ごとに大きい火山が爆発しているという地域は、ここ最近の大きい爆発は十和田915年というのがあるが、土壌炭素含量が5%程度ある。最初にたくさん溜まり、あとは変化が見られないというモデルがあると合うと思う。

古賀：

北海道の十勝ではいろいろな残渣がある。わらのようにリグニンやセルロースが多いものもあれば、ビート葉のようにそれらが少ないものもある。農業現場では毎年いろいろな炭素組成の作物残渣がでていますが、その作物残渣の種類とタイプ別の土壌腐植物質との関係は明らかになっているのか。

平舘：

わらのようなイネ科植物残渣がどれくらいA型腐植酸に変わっているか、温度や火山灰との関係の研究はいくつかある。

中原：

石黒氏からの質問は、疎水相互作用のないフルボ酸は抽出前の土壌中では水に溶けやすいのかというものである。

平舘：

水に溶けている状態である。

中原：

谷山氏の質問は、下層土は腐植物質を集積しやすいのかというものである。

谷山：

農耕地が炭素のシンクとなるかどうかという研究の中で、天地返しや深耕などの方法によって表層土を下に埋没させることで、下層土の有機物の分解は少なくなるのではないかというアイデアがある。物理性や保水性は保たれて表面流去水や土壌侵食は少なく、有機物の分解速度が遅くなって硝酸汚染も少ない。今日の話の中で、古賀氏は下層土でも有機物は分解するという話だった。白戸氏のモデルでは下層土での分解は温度を考えると進行は遅いのではないか。平舘氏の話では炭で残っているのも多いという話があった。瀧氏は、有機農法の圃場の下層土は良好に保たれていて、物理性にもいいということであった。統一した見解は条件によって違うので難しいとは思いますが質問したい。宮崎氏からも質問もあったが、堆肥を入れることによって機械走行から排出される

CO₂はどうなるかという話もLCA手法で明らかにしていこうとしている。なお、こうしたことは休耕地や放棄地で実施することが前提になっており、一般の農地で行うことは考えていない。

平舘：

火山灰土壌に腐植物質が表層から下層に供給されれば、それを止めておく糊の役目をする鉄やアルミニウムが下層にはたくさんあるので、分解を遅くすることができると思う。

白戸：

質問は、例えばA層には腐植が多く、B層には少ない状態で、それを天地返しでA層を下層に持ってくるといことか。

谷山：

そのようにして、夏季には下層では表層に比べて温度が低いので土壌有機物の分解速度が遅いのではないかという意味だ。

白戸：

温度は年間平均すると同じくらいだが、表層は夏季高くなり、冬季には低くなる。結局どちらが早いのかといえば、温度が高い期間が短くても、表層の方が分解は早くなる。下層土にも炭素が溜まるかどうかは、結局有機物の供給がそこまであるかどうか依存するので、深いところまで有機物があれば溜まると思う。

平舘：

土壌断面を見てみると埋没腐植層というものがある。埋没腐植層は今まで表層だったところに、火山が爆発して表層に新しい火山灰が積もって埋没したものである。埋没腐植層には腐植が多く残っていることがあるので、表層の有機物が下層になると保存されるメカニズムがあると思う。土壌炭素含量は5~7%程度で、A型腐植酸、A型の中でも特にベンゼン環に富んだ構造のものが残っている。

古賀：



写真-2 講演者と座長

下層土に炭素を溜められるかどうかは、土壌の炭素濃度が関係している。低いと溜めやすいし、芽室のように下層土でも3%くらいあるところでは、低下傾向にあり、増加させるのは難しい。下層土の土壌炭素濃度、特に北海道は開墾してから100年しか経過していないので、有機物含量は他の地域から比べると高い水準にある。したがって、下層土に炭素を溜められるかどうかは土壌の炭素濃度が関係してくると思う。

中原：

話題を変える。澤本氏からの質問である。有機物の連用による腐植物質の性質変化についての例があれば教えて欲しい。

平舘：

外国では、炭素が代謝して変化していく例があり、土壌に投入する有機物の質を反映して少しずつ変わっていくという報告がある。 $\delta^{13}\text{C}$ 値を使って、どれくらい代謝耐性があるかを測定している例がある。確か、15~20年程度で半分ほどの炭素が CO_2 として排出している。ただ、この値が日本の火山灰土壌に適用できるかは検討する必要がある。

中原：

畑に施用した堆肥はある程度は腐植になるのか。

平舘：

それほど多くはないと思う。火山灰の場合、初期に溜まったものがかなり残っていて、あとから入れるものは比較的短い間、すなわち数年から数十年の間にほぼなくなっていくのではないかと。

中原：

例えば堆肥盤で経年的に糞尿を積み上げていくと、ある程度分解する。5年も経過すれば供給量と分解量が一致して、堆肥の厚さも一定かも知れない。瀧氏が紹介したように、有機質資材を土壌に施用しても5年も経てば定常状態に達し、入れたものと出ていったものと同じであれば、仮にその土壌炭素含量が増え、見かけ上分解されない土壌有機物が増えても、根本的には何も変わらないことになる。有機物は土の中に入ることによって分解は遅れるのか。

瀧：

有機物の連用試験の結果で炭素の増加率・減少率という数字がある。減少率というのは、堆肥の連用を中止した場合の数字で、例えば堆肥施用量を増やすと減少率は増加する。堆肥を使用した土壌で溜まっている腐植がそれだけの率で減少していくというデータはある。

中原：

白戸氏のデータにおいて赤黄色土で何十年も堆肥施用によって土壌炭素濃度が増加するのがあったが、毎年濃

度を測っているのか。

白戸：

実測している。先ほど5年程度経過すると平らになるという話があった。変動が大きいのではっきりわからないが、特に最初急激に炭素濃度が上昇して、次第になだらかになるといっても完全には平らにならないといった例がある。ローザムステッド試験場での約150年の試験では、化学肥料だけ施用した場合はすぐに平らになるが、堆肥を施用している区は現在でもまだ少しずつ増えている。5年程度では一見平らに見えるが、実はまだ増えている状況がある。

中原：

難分解性の化合物に変わってきていると考えられるということか。

白戸：

土と混合することによって有機物はいつか分解されるが、それが大変遅くなる。腐植物質になる部分があるので、少しずつは増えると思う。

中原：

吉田氏（近畿中国四国農研）から白戸氏への質問である。白戸氏の水田のモデルにおいて、非湛水期間の水田でも畑より分解速度を遅く設定する必要があるとの話であった。国内でふつうに見られる転換田では転換後の年数に応じてモデルの有機物分解速度の調整を行う必要があるのか。転換後数年で水田に戻すケースが多く、この見積もり次第で蓄積量の推定に大きな違いが出るような気がする。このような観点から転換畑での炭素蓄積実態の把握が全国で行われているのか。

白戸：

私もその問題には興味がある。ある順番で転換をしたときに1年田、1年畑の場合、4年田、4年畑の場合、あるいは連続して畑の場合などで、土壌炭素量に違いがあるのかと聞かれた。田用のモデルと畑用のモデルで確実に表現するためには、実測データが必要だ。東北農研の大曲で、実際に1年サイクル、2年サイクル、4年サイクルで試験していることを知って、是非、実測値を使って検証してみたいと思っている。畑用のモデルを使って、水田を畑に変えた場合を予測する。1年間畑にして、再び田に戻したときには、畑の土から水田の土にすぐに変わるわけではないので、どのような変化が起きるのかは調べないとわからない。研究すべき内容だと思う。

中原：

橋本氏（森林総研）から、データベースの構築が必要という話があったが現在それに向けた動きがあるかという質問だ。私も似たような質問で、データベースなどを使って日本の耕地は炭素を排出しているのか吸収してい

るのか、黒ボク土は炭素量が減っているのに赤黄色土は増えているとか、北日本は減っているが西南日本は増えているとか、そのような予測ができないか。

白戸：

データベースについては、さきほど谷山氏が言ったプロジェクト研究で、モデルを使った将来予測において、面的な計算をするために必要なデータを整備し始めたところだ。排出量を日本として報告する義務があるときに必要なので、整備すべきだと思う。

中原：

センサデータのようなものを使って、定点調査の傾向のような経年変化が予測できるのか。

白戸：

定点調査の結果は事実だ。モデルの考え方と合うと思う根拠は、もともと炭素含量が高い土壌では減り、低い土壌では増えるという傾向があることだ。高い含量で維持するためには、平衡状態に達するまでに、例えば堆肥を30t/ha入れなければならないのに、炭素含量が低い土壌では、10t/ha入れれば平衡状態を維持できるということだと思う。

中原：

粕淵氏（山形大学）からの質問は以下の通りである。水田の湛水層から日中酸素が放出され、畑を水田にすると土壌有機物が増加する。こうしたことから水田における藻類による土壌有機物の付加は考えられるのか。

粕淵：

畑と水田で圧倒的に違うのは、畑表面で測定すると24時間炭酸ガスが排出し続けるのに対し、田の場合は、水を張っている時の日中には光合成が行われ、炭酸ガスを大気中から吸収していることである。すなわち、酸素が排出されるという現象が起こっている。ということは、日中は土壌有機物が分解されていないで、トータルで見ると炭素が蓄積される方向に進んでいる。長いスパンで見れば土壌炭素は減少していくのかも知れないが、湛水期間中は水田では炭素化合物が生産されている。水中で有機物が作られている過程もモデルに必要なものか。具体的な中身を捉えてモデルを作る必要がある。

白戸：

水田におけるイネの光合成以外に、田面水中の藻類がどの程度光合成をしているかわからないが、畑作物や水田のイネの光合成の量と比べるとかなり少ないと思う。光合成をして収穫物は持ち去られるが、根や刈り株は土壌に入る。このモデルの場合では一月おきの計算でかなり粗いので、年間の量として収穫物を持ち去った後の残渣の投入量を把握しておけば比較的正確に表現できる。正確に予測しようとするれば、藻類の炭素固定量がどれく

らい影響しているかを調べる必要がある。

竹内：

これで今回のテーマの土壌の炭素貯留機能を中心とした質問と講演者の方々の論議を終わる。まだ有機農法に関係する質問もあるが、少しテーマからはずれるので割愛させてもらう。

西村：

先ほど白戸氏が、ある地域では10t/haの堆肥を入れればある水準の炭素含量になり、別の地域の土では30t/haぐらいで定常に達すると言った。ある場所で多量の有機物を施用すると土壌が贅沢になるといったように、例えば微生物相が変わることによって、さらに高い定常レベルに進んでしまうということがあるのか。それとも定常値というのは気候などの地域特性によって変わるものなのか。

白戸：

定常値は、気象条件が決まっていれば、入ってくる腐植物質によって変わると思う。例えば、ススキ草原だったときにはススキから供給される炭素に対応した土壌の炭素量に落ち着くが、そこが森林に変わると土壌炭素含量は減るということになる。炭素の供給量が変わると、最初急激に変化が起こり、しばらくするとその新しい炭素供給量とそこの場所の気候条件に応じて新しい定常状態になる。20年前に畑だったところは、畑作が行われた時の定常状態に近いので、その状態で炭素含量が高かった場所はどちらかというと減りやすいと思う。

西村：

高いレベルで定常に達するような場合は、それを維持するためにかなりの有機物量を入れている。定常状態では入れた量だけ出てしまう。土壌中炭素の貯留量を高くすることは、最終的に温暖化にメリットになるのか。土壌炭素含量を増やせば貯留量は多くなるが、定常に達してしまうと結局フローが太くなるだけで、入れた量と出てくる量が同じになるのではないか。

白戸：

入った量と出た量は同じだが、入ったものが光合成で同化された植物体であったとすれば、どこかに運んで燃やしても同じようにCO₂は出るので、それであれば土に入れた方が土壌炭素が減ることを防げるのでよいと思う。

小野（森総研）：

白戸氏はSOCの蓄積や将来的な変動予測にモデルは非常に有力なツールであるということ話を話した。一方で、モデルの中のコンパートメントは概念的なもので、その中で実際に有機物はどのように分解してどのように動いているのかは、想像しにくい。そこで平館氏の講演で土壌の腐植の構造などが分かってきて、その機能も推



写真-3 白熱した議論

定できるという話があった。このモデルの中の概念的なコンパートメントと実際の科学分析値が結びつければ、モデルの精度の向上や将来予測の信頼性の貢献につながると思う。このモデルのコンパートメントと実際の分析値、それを結びつけられるようなアイデアがあれば聞かせてほしい。

白戸：

それはモデルの研究者には大変興味のあることで、測れるものだけで組み合わせた、概念的ではないコンパートメントから構成されたモデルを提案した論文が最近出た。このモデルでは、土の中に入ってくるいろいろな残渣を非分解性と難分解性の比率について3種類くらいのデフォルト値で計算したが、それを実際にリグニンやセルロースなどに分割する方法で、どの比率にしたらよいかということ調べたことがある。そのような研究は進

展している。

平舘：

投入した有機物がどれくらいの割合で腐植になるのかを明確にできれば、モデルにかなり寄与できる。そういう実験をしたいが、今のところそこまで手が出せない。長期で連用試験をしている土壌がある。その連作試験では C_4 植物であるトウモロコシやヒエだけを植えている土壌と C_3 植物のダイズだけを植えている土壌の同位体を比べて、どの程度腐植に入っているのか、そのデータの解析を進めている。もしうまくいけば、白戸氏に是非使ってもらいたい。

中原：

これで終了する。協力を感謝する。

受稿年月日：2007年1月31日

受理年月日：2007年1月31日