



## 第 60 回土壌物理学会シンポジウム総合討論 これからの持続的農業を考える； 土壌中の物質循環・微生物・共生からの視点

柏木淳一・塚本康貴（シンポジウム事務局）

Discussion at the 60th symposium: The sustainable agriculture system evaluated  
from the viewpoint of nutrients cycle, microbiology and symbiosis in soil

Junichi KASHIWAGI and Yasutaka TSUKAMOTO

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：石黒宗秀氏、竹内晴信氏）の様態を、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、発言内容の一部を省略または要約させて頂いたことをご了承願いたい。

### 竹内（座長）：

総合討論を始める。まずは会場からの質問に対する発表者からの応答をお願いする。その後、本日のテーマに沿った総括を行う。

### 横井（和寒町）：

作物の制限要因について説明をいただいたが、その中にもあった蛇紋岩質土壌に関する質問。現在でも作物にニッケル過剰障害が発生しており、その生育障害は酸性矯正で軽減されるが、ニッケルを含む作物を食べることによる人体への影響はあるのか。ピアスやカカオ含有量が高いチョコレートが人体へ及ぼす影響もあると聞くが。

### 水野（元酪農学園大学）：

蛇紋岩地帯における植物のニッケル含有率のレベルでは、経口摂取の場合は無害である。ラットやサルを対象とした実験で確かめられており、食餌中ニッケルの吸収率は非常に低く3～6%程度でほとんどが吸収されずに糞として体外に排出されることがアメリカの実験でも確認されている。一方で、ニッケル精錬所における暴露した労働者には呼吸器系腫瘍やニッケル皮膚炎を発症することが報告されている。ただし、ニッケル精錬所のニッケルレベルは桁違いに高いことを考慮する必要がある。オランダのデータではカカオやココナツの木の葉の分析値もあり、断然高い値となっており、チョコレートのニッケル含有率の高いことも想定される。しかしながら、食品中のニッケル含有率の規制値は現在のところ、国際的にも国内的にも見当たらない。いずれにしてもアレルギーになるケースもあり注意は必要だろう。

### 竹内（座長）：

実際に北海道でも夕張川の下流地帯で、ニッケル過剰障害によってキャベツが枯れることが一時期問題になっており、今でも現場において重要な問題であると認識している。

### 岩田（農研機構 農村工学研究部門）：

水田の土層構造を変えることで生産性に変化が現れるとのことだった。酸素濃度が変わるとのことだったが、酸素濃度、Ehが具体的にどう変わるのか教えて頂きたい。

### 金田（秋田県立大学）：

データは示さなかったが、代かきでは $-200$  mV以下に下がる一方で、無代かきではプラスの値での推移がみられた。

### 長谷川（元北海道大学）：

水稲は土中の酸素を吸収しない、吸収するほど土の中に含まれていないとのことだったが、作土に酸素があることで水稲が高い気孔コンダクタンスを保っているのはなぜか。無代かき水田では酸化層の厚さは慣行田に比べて厚いのか。

### 金田（秋田県立大学）：

水稲葉身の気孔コンダクタンスが高い要因として、水稲根活性が高く維持されることを推定している。水稲根活性が高く維持される圃場は、土壌の酸化還元電位が高く保たれていることが特徴である。土壌酸素は水稲根活性を高く維持し、土壌水分の吸収が多くなることから気孔コンダクタンスを上昇させると考えている。通常、無代かき水田の酸化層は代かきを伴う慣行田に比べて厚くなる。無代かき水田では作土の土壌構造が維持され透水性が向上することから酸素の供給が多くなることが考えられ、特に粘土含量が多い重粘土水田において顕著に認められる。また、慣行田においても代かきの強度や作業深度の工夫により酸化的な作土を保つことが期待できる。

### 吉田（東京大学）：

気温の高温条件が増えてくる中で、高温で気孔コンダクタンスの低下が観測されたと聞いたが、湛水条件だったのか落水条件だったのか。

**金田 (秋田県立大) :**

気孔コンダクタンスは湛水条件で測定した。

**取出 (三重大学) :**

無代かき水田で酸素供給が増えるという話だった。湛水後に封入空気量に違いがあったと考えられるが、量的には僅かであり酸素供給には影響しないのではと考える。中干しの際の地表からの酸素供給の違いが大きいのではないか。

**金田 (秋田県立大) :**

影響はあると思うがそこまでの詳細なデータは持っていない。酸素の多い条件下では、根の活性、つまり根の水分や養分吸収の増大につながるのではないかと考えている。指摘のことは重要であるので今後取り組んでいきたい。

**石黒 (座長) :**

酸化還元電位を測定していたが、何を対象に測ったのか。表面の水について測定したのか。

**光延 (愛媛大学) :**

土壌水、つまり間隙水の Eh を測定した。

**石黒 (座長) :**

酸化還元電位の基本について解説していただきたい。

**光延 (愛媛大学) :**

酸化還元電位は簡単に言うと酸化剤と還元剤の割合で、間隙水中でのそれらの割合を測っている。

**石黒 (座長) :**

微生物反応に関わると思うが、微生物反応が生じている場所や生じていない場所で酸化還元電位に違いはあるのか。

**光延 (愛媛大学) :**

水田には有機物が多く含まれるため、微生物がこれを好氣的に分解できる場所では酸素が多く存在するので酸化的になり、酸素が消費された深部では還元的になる。

**石黒 (座長) :**

光延さんのケースでは、測定値は平均的なものとして見なして良いのか。

**光延 (愛媛大学) :**

高い空間分解能で測定しており、それぞれの部位の平均値を示しているだろうと考える。

**取出 (三重大学) :**

ヒ素が表層で 3 価から 5 価に酸化され、水酸化鉄に吸着されるという反応の微生物との関わりについて詳しく聞きたい。5 価のヒ素はどのような形で吸着するのか。

**光延 (愛媛大学) :**

微生物の機能遺伝子を見ている。硝酸還元でヒ素を酸化する菌も存在するが、酸素を使う酸素還元での好気性ヒ素酸化菌のものを見ている。その働きにより 5 価のヒ素が生成される。

**取出 (三重大学) :**

ヒ素が酸化されるのは微生物の働きか。ヒ素が 3 価から 5 価になるのは微生物の働きか、それとも表層の酸化還元電位の影響か。

**光延 (愛媛大学) :**

微生物の酵素による触媒反応である。

**石黒 (座長) :**

5 価のヒ素というのは、ヒ素のみが裸で存在するのか。

**光延 (愛媛大学) :**

オキシアニオンで存在する。pH にもよるが、水素がいくつか外れたアニオン状態である。

**無記名 :**

FISH 法に関して、微生物だけでなく植物や土壌有機物に対して使用した場合十分な蛍光強度は得られるのか。

**光延 (愛媛大学) :**

通常 FISH 法で細胞を染める際には、土壌、堆積物を取り除いてから操作するが、土壌鉱物が存在する状態で行う場合、土壌鉱物に蛍光プローブが付きやすいためマスキング剤等を使って、蛍光プローブが非特異的な吸着をしないようしてから染める必要がある。土壌鉱物以外の植物や有機物であってもマスキング剤を使えば可能と考える。

**岩田 (農研機構 農村工学研究部門) :**

共生というテーマの中で植物体の中にいる微生物群集がどこにどれだけいるのかという探索と、それがどういう働きをしているのかというのはまだまだ手のついていない部分があるというのは面白かった。窒素肥料を多く与えると悪玉菌が増えるという結果が興味深かったが、例えば具体的にどういった被害が生じるのか。植物の日持ちが悪くなるなどの知見があれば知りたい。

**池田 (農研機構 北海道農業研究センター) :**

他の研究例として挙げると、有機栽培による農産物では腸内細菌科の割合が少なくなり、化学肥料だと多くなることで食中毒のリスクが高くなるのがアメリカの植物病理学会で報告された。農産物の保存中にガンマプロテオバクテリアが増殖し、作物の品質劣化に繋がると言うように微生物叢には強い相関がある。腐敗や食中毒リスクも栽培した畑の微生物レベルに影響を受けると考えられる。

**竹内 (座長) :**

共生に関する知見を用いて何かを評価しようとする場合、例えば品種改良や、生産性を高めるための改善策を作ろうとしたとき、我々の知見を使ってどのようなアクションをすればいいのか。

**池田 (農研機構 北海道農業研究センター) :**

品種改良においてはもっと植物側に興味持ってほしい。現代農業の育種では化学肥料を多く利用することを前提にパフォーマンスを強化しているが、堆肥など有機物を利用する農業で、有機物を施用した際にパフォーマンスのいいもの、有機物の施用に対しレスポンスのいい、生産性の高まるものを作るという視点での育種に取り組んでほしい。

**竹内 (座長) :**

これまでに有機栽培のシンポジウムで実際に有機栽培をしている生産者から指摘された点だが、今の品種で有機栽培してもなかなかうまくいかない。有機栽培に合った品種を作ってほしいという意見も挙がっている。こういった観点から技術的に貢献できるのではないか。

**池田 (農研機構 北海道農業研究センター) :**

付け加えますが、植物は基本的に窒素吸収に対するブレーキがない。いろいろな元素に対しては一定濃度を超えると吸収を抑制するが、窒素に関しては生理的に抑制する反応は見られない。従って人間が窒素をコントロールする必要がある。

**石黒 (座長) :**

普通土づくりには 5 年ほどかかるといわれる。粕淵さんは 10 年ほどの経験をお持ちだが、どれくらいになったら変化を感じられるようになったか。

**粕淵 (山形大学) :**

初年度はものすごく取れて、俵だと 11 俵半ほどであっ

た。雑草が生えないことが一因であり、5年ほど経つとかなり雑草が生えてしまう。つまり、除草剤の効果が1年くらいでなくなってしまうと言われているが5年は維持されると思っている。またカルチ以外の機械を導入したり、栽植本数を変えて試したが、5~6年前に今のやり方に最終的に落ち着いた。なおそれまでの試行錯誤段階でも全く取れなかったわけではない。

**長谷川（元北海道大学）：**

水耕栽培でアンモニア態窒素が10 ppm があると生育が旺盛だが、実際に水田土中のアンモニア態窒素はどれほどか。水耕と土耕の違いは水の移動性によるものではないか。

**粕淵（山形大学）：**

実際に土壌溶液を採取し測定したところ、無肥料、無農薬の水田でアンモニアが2 ppm くらい。循環するスピードを速くすれば2 ppm でもイネは生長する。濃度とフラックスの積が窒素供給を規定するが、特にフラックスが効いており、濃度に関しては2 ppm から10 ppm くらいが適当であると思っている。実際にはもっと大きなスケールで、高頻度でモニターする必要がある。さらにムギとイネでは全く異なり、イネは薄い窒素濃度でも10倍以上の濃度変化があってもよく育つ。今後の研究課題であり若手研究者に期待する。

**竹内（座長）：**

薄い溶液を維持するというやり方は、施肥として考えた場合、緩効性肥料を使って養分を少しずつ供給するのが、実は最も良いというように捉えられる。北海道の稲作では、全量を移植前に基肥で施肥することが指導されているが、本州では何度か追肥の実施が指導されている。地域による施肥パターンの相違についてはどの様を考えるか。

**粕淵（山形大学）：**

松島省三氏のV字理論という施肥理論では窒素を初期に切らして徐々に増やすのがよいとされる。北海道でも徐々に施肥量を増やしてよく穫れたという研究結果はある。ただイネに関してはこれしかないということではなく、実際にいろいろと試してみても、イネは大抵のことは耐えてくれる。乾燥しても通年湛水しても大丈夫であり、イネは環境条件に対して適応性が強い生き物であると理解しておくことが重要と考える。

**吉田（東京大学）：**

窒素の供給が増えるのはかく乱によるシアノバクテリアのための光条件の改善と、酸化層直下の弱還元層の深化による脱窒量の減少などが考えられるが、どう考えるか。

**粕淵（山形大学）：**

おそらくそういうことだと考える。私は12年間この方法でたくさんコメが作れることを実証してきた。他の人にさらに発展させてほしいと考えている。

**柏木（北海道大学）：**

粕淵さんはポット試験で表層の窒素量が高まりそれは光合成細菌によるものと説明した。それに対して池田さんは低窒素栽培の方が窒素固定菌の量が上がると述べていた。これは共生菌によるものだから根圏土壌だけの話か。表面の土壌、根圏土壌、それ以外の土壌で窒素固定量に大きな差はあるのか。

**池田（農研機構 北海道農業研究センター）：**

無農薬栽培では表層土に除草剤は撒いていない。除草剤は草だけでなく、ほぼ例外なく微生物にも影響を与える。環境中の微生物に大きな影響のない除草剤はないと

されている。表層土ではシアノバクテリア、光合成細菌が炭素や窒素固定に影響を与える。さらに根圏で共生している菌類が窒素固定を行っていると考えられる。また最近の土壌肥料学会では鉄還元細菌の窒素固定も報告されている。田面水と根圏だけではなく、非根圏土壌の嫌気性細菌による窒素固定を考えると、化学肥料や農薬の施用量や種類が微生物に与える影響について研究する必要がある。アウトプットがイメージできないという質問があったが、化学肥料に頼る現代の農業は賢いといえるのか再考すべき。例えば、化学肥料や農薬に依存したダイズ栽培では菌根菌の機能が弱まり病虫害に対する耐性も弱まるだろう。過度に依存することで、この様な負のスパイラルからは容易に抜け出せなくなる。もっと生態的な機能を活かすような研究をすべき。肥料を使った研究は喜ばれるが、それは持続的ではない。勇気をもって、持続的農業の方向に向かないといけない。

**粕淵（山形大学）：**

学生の頃は窒素1 kg で50 kg、つまり10 kg で500 kg/10 a 取れることになりその内の6 kg は肥料によるものと教育されてきた。窒素1 kg の玄米生産効率が80 kg に上がっている中で、イネには窒素肥料は必要ないのではないか。なぜなら10 kg 程度の窒素は様々な形態で固定されている。より窒素を固定する方法、さらに有効利用する方法を探すべき。

**水野（元酪農学園大学）：**

光延先生からヒ素についてミクロな世界の話の話を頂いた。自分は長い間環境問題について勉強しており、北海道のヒ素の問題についての話を披露したい。北海道は中山峠を挟んで両側で非常にヒ素の高い地帯がある。札幌も含め、土壌のヒ素が50 ppb を超えた地域がある。全道の平均は5前後なのでその10倍はあり、時々、飲料水基準値10 ppb を超える井戸水などが出るだろう。十勝岳の泥流地帯でも、基準値より高くなる。10年ほど前インドの北のガンジス川の支流の内の井戸水のヒ素を調べたら、時々とんでもなく高い数値が示され、500 ppb ほどになった。そういった水を酸化鉄に通すとヒ素濃度はストンと落ちる。5価のヒ素は鉄と結合して溶解しない。リン酸吸収係数が700 くらいの低地土を用いるとヒ素を加えていっても、50 ppb を越えることはない。また、リン酸吸収係数が1500 を越える黒ボク土を使うとその3倍くらいヒ素が入っても溶液中に出てこないことが実験により確かめられている。土壌によって結果は相当異なる。pH が6前後の条件下で、酸化還元電位が100~200 mV より高いと5価になって溶けにくい、低くなるとヒ素は簡単に溶ける。したがって水田の土壌管理では酸化還元電位の管理が非常に大事となる。

**石黒（座長）：**

北海道大学の波多野さんにコメントをお願いする。

**波多野（北海道大学）：**

今日の5名の演者のお話を伺って、リービヒ・テアアの論争、それに引き続き窒素固定菌の発見とその後の化学肥料の技術の確立などが思い浮かんだ。テアアは腐植栄養説に基づく総合的な農業管理を提唱し、それから必須元素を利用しようとする技術的な進展があり、窒素固定菌の発見、化学肥料へと進展してきた。そこには化学量論的なバランスの話。例えば水野さんのニッケルと鉄の話、金田さんのケイ素と窒素のバランスの話、池田さんも悪玉菌の話と窒素とのバランスの観点で話をされた。珪藻類に関しては窒素の他にケイ素を要求するが、鞭毛藻類は必要としない。そういった遷移元素バラ

ンスが重要ということについて、歴史を思い出しながら聞いていた。粕淵先生の話で、有機物の鋤込みが微生物を作る原動力にならないといけないのだろうと思うが、入れすぎると還元が進む。中耕除草ではわずかしき有機物が入っていないのではないかとと思われるがどうなっているだろうか。基本的に、窒素はいらないというより十分貯めたからいらぬのか。微生物の窒素固定が進む仕組みがあるのだろうか。金田先生のお話では気孔コンダクタンスを上げることがイネの収量を高めることに直結しており、窒素を最小限にする土壌管理が炭素をたくさん固定することにつながることを知った。このような研究は日本人がタンパクの少ないコメを好むことにより進展させてきたのだと思われる。中国では逆にタンパクを貯めるための品種改良をしている。世界的にも日本のような流れにはなっていないか？しかし、教室のゼミでエネルギー・クロップの話を取り上げた学生がいたが、エネルギー・クロップでは窒素に対する炭素の固定量をできるだけ多くしたいということがコンセプトになっている。このことは日本の米作りの技術がそのまま使えることを意味している。本日のお話しは、今後どのような土壌管理技術を作っていくか改めて考えさせられた。

#### 未回答の質問への回答

##### 横井 (和寒町) :

現場で土壌診断すると、可給態ケイ酸は低く、下限の基準値からケイカルの施用量は 240 kg/10 a 程度と多くなる。1 回に施用できる農家への現実的なケイカルなどの施用量はどの程度か。

##### 金田 (秋田県立大学) :

ケイ酸資材・肥料の施用量は、土壌診断に基づいて決めることが基本になり、秋田県の事例では 100 ~ 120 kg/10 a を上限として奨励している。

山形県の事例 (土壌診断の読み方と肥料ケイ酸 (農文協)) :

① 酢酸緩衝液抽出法による有効態ケイ酸が 30 mg/100 g 以上, 80 mg/100 g 未満

ケイカル基準施用量は 60 kg/10 a

② 有効態ケイ酸が 30 mg/100 g 以下

[算出式]

$$\left[ (30^{(1)} - \text{有効態ケイ酸量}) \times 100 / 30^{(2)} \right] + 60^{(3)}$$

(10 a, 10 cm 耕起深)

30<sup>(1)</sup>: ケイカルの基準目標値 mg/100 g

30<sup>(2)</sup>: ケイカルのケイ酸含有率 %

60<sup>(3)</sup>: ケイカルの基準施用量 kg/10 a

③ 有効態ケイ酸が 80 mg/100 g 以上

ケイ酸資材は不要

ここで、重要なことはケイ酸資材・肥料を施用しても圃場管理が不適切だとケイ酸吸収が抑制されやすいことである。農家には、以下のような土壌・水管理を踏まえた資材・肥料の施用を奨励している。

① 前年収穫後、浅い明渠により田面停滞水を排除する。

② 稲わらが多量に分布している地点では、異常還元による根腐れが発生しやすくなることから、田面の稲わらは秋の降雪前に均一にする。

③ 土壌の異常還元を進行させないために、中干しを実施する。

④ ケイ酸吸収が始まる幼穂形成期以降の土壌の過乾燥はケイ酸吸収を抑制するので間断灌漑などを実施する。

⑤ 間断灌漑は、登熟期 (出穂 35 日後) まで継続する。

##### 足立 (筑波大学) :

持続可能にするための圃場整備を考える上で、微生物の機能や物理性の視点などからコメントをいただきたい。

##### 金田 (秋田県立大学) :

近年の大規模圃場整備を見ると、土壌物理性に配慮しているとはいいがたい現状にある。例えば、粘土が多い土壌において土壌水分が多い場合でも重機が走行して圧密負荷が大きくなる事例がある。土壌孔隙は、土壌微生物のすみかとして重要な役割を持つことが知られており、圃場整備田では、良好な土壌物理性を復活させるために土壌タイプに応じた耕起方法の導入や有機物施用などが重要になる。

##### 足立 (筑波大学) :

ダイズは窒素を収奪すると指摘されていたが、窒素固定菌を持っているのになぜそうなるのか。

##### 金田 (秋田県立大学) :

ダイズは窒素固定を行うが、同時に土壌窒素も吸収する (固定窒素の寄与率は 50 % 程度)。また、ダイズでは収穫子実による窒素の持ち出し量が極めて大きく、固定窒素量を上回ることから窒素収支はマイナスになる。具体的には、収量 300 kg/10 a レベルのダイズ子実窒素量は 20 kg/10 a 程度であり、収量 600 kg/10 a レベルの水稲収穫物窒素量の 5 kg/10 a に比べると明らかに多くなる。

##### 松岡 (三重大学) :

$\mu$ XAFS-FISH 法は、不飽和土中にも適用可能か。試料の水分状態に関わらず測定が可能か。不飽和土中にも適用可能であれば、団粒土中の微生物分布等も調べることができて幅が広がりそうだ。

##### 光延 (愛媛大学) :

可能である。むしろ水分が少ないほうが、FISH 実験時の乾燥による土壌収縮の影響を受けずに観察が可能だと思う。 $\mu$ XAFS については、水の存在によって X 線減衰が大きくなる軟 X 線領域 (4 keV 以下、 $\mu$ XAFS の適用外エネルギー領域) に吸収端が存在する元素群 (炭素、硫黄、窒素など) が対象でなければ、土壌の不飽和、飽和状態は分析にはほとんど影響がないと思う。土壌団粒は端から中心に向けて酸素濃度 (≒酸化還元状態) や生元素濃度の勾配があるはずで、その環境変化に対応して微生物群集が変化すると考えられる。例えば、勾配に応じた好気性微生物から嫌気性微生物への移り変わり、それに対応する土壌元素の濃集 / 溶脱など面白い結果が得られるのではないだろうか。

##### 岩田 (農研機構 農村工学研究部門) :

ヒ素が表層 3 mm くらいのところ濃縮される現象を明らかにしたのが面白いと思う。これをヒ素の除去に応用できるかもしれないとのことだったが、量的にはどの程度集積するのか。土壌中のヒ素をかなり減らせるぐらいなのか。知見があれば教えてほしい。

##### 光延 (愛媛大学) :

条件によっても変わるが、私達の実験では約 100 ppm 程度の汚染土壌で全体の 40% 程度のヒ素が表層に濃集することが確かめられている。濃集現象を応用して、土壌修復に応用する研究を現在進めている。