

根・土壌の解体

Anatomies of Roots of Plants and Soil

篠原 信^{1*}, 藤原 和樹²
MAKOTO SHINOHARA^{1*} and KAZUKI FUJIWARA²

¹ 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 野菜茶業研究所 野菜病害虫・品質研究領域
〒514-2392 三重県津市安濃町草生360
* TEL: 050-3533-4624 FAX: 059-268-1339
* E-mail: shsh@affrc.go.jp

² 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 果樹研究所 品種育成・病害虫研究領域
〒305-8605 茨城県つくば市藤本2-1

¹ *Vegetable Pest Management and Postharvest Division, Institute of Vegetable and Tea Science (NIVTS), National Agriculture and Food Research Organization (NARO), 360, Kusawa, Ano, Tsu, Mie 514-2392, Japan*
² *NARO Institute of Fruit Tree Science (NIFTS), National Agriculture and Food Research Organization (NARO), 2-1, Fujimoto, Tsukuba, Ibaraki 305-8605, Japan*

キーワード：有機質肥料活用型養液栽培，並行複式無機化法，土壌化，根部病害，複雑系制御
Key words: organic hydroponics, multiple parallel mineralization, soilization, root disease, control of chaos

(原稿受付 2015年8月13日/原稿受理 2015年8月20日)

1. はじめに

「土壌」のことを、私たちはどれだけ知っているだろうか？土壌は非常に身近な存在で、現在も食料の大半は土壌の上で育てている。農耕が始まって1万年以上、人類が土壌と向き合った時間も1万年以上になる。科学が進んだ時代というなら、土壌のこともかなり分かっているに違いない、と想像したくなる。

しかし現実とは逆である。たとえば本稿で紹介する技術が誕生するまで、人類は土壌を人工的に創ることができなかった。いわゆる「土づくり」は10年かかると言われており、堆肥を入れて耕して、を繰り返す以外の方法はなく、「土」自体が勝手に「土壌」に育つのを待つしかない。土を作るにしても、土任せであった。

実は、「土」と「土壌」は厳密には定義が異なる¹⁾。「土」は土壌鉱物の集まりでしかないものも意味するが、「土壌」は微生物が活発に活動しており、有機物を分解して植物に養分を与えることができるものを指す。

従って、空に浮かぶ月には「土」はあっても「土壌」はない。月の土に食品残渣(生ゴミ)を鋤き込んでも腐敗するだけだろう。腐敗した土に野菜の苗を植えても育たず、根が傷んでしまう。月の土は「土」であって「土壌」ではないからである。

興味深いことに、「有機物を分解し植物に養分を供給する」機能を土壌機能と定義づけるならば、土壌機能を有する媒体は地球以外の天体では見つかっていないばかりか、地球上においても土壌以外に見つからない。

試しに水の中に食品残渣を加えてみよう。コンクリー

トの上に食品残渣を積んでみよう。人工樹脂の中に食品残渣を練り込んでみよう。3日もすると腐敗し始める。これらに苗を植えても健全に育たず、腐敗成分によって根が傷害を受けてしまう。土壌に鋤き込んだならば、腐敗臭もせずに植物を健全に育てることができるのに。

土壌機能を有するものは、地球上でも土壌だけである。そして、非土壌の媒体に土壌機能を付与する技術もこれまで存在しなかった。つまり、「土壌を創る技術は存在しなかった」のである。

このことは、農学に巨大な2つのブラックボックスが存在することを意味する。「土壌」と「根」である。日常用語でも「土台」や「根本」という表現があるように、土壌と根は、食糧生産上の基盤中の基盤であり、農学の基本中の基本である。しかしながら、この二つは極めて解明の困難な研究対象であった。

たとえば土壌を1センチ違う場所から1グラムずつ採取したとしよう。含まれる土壌鉱物の種類も、土壌微生物の構成も全く異なる。多種多様な鉱物が含まれたままであるため、それぞれの鉱物種ごとに土壌微生物に与える影響を調べることは不可能だった。渾沌とした土壌を100g程度採取し、よく混合して「平均化した」データを取得するより方法がなかった。

植物の根も同様に解析が困難な研究対象である。根は土壌の中に埋没し、根圏構造を破壊せずに観察したりサンプリングすることが難しい。根を引き抜くと、もはや根圏構造を回復させることは不可能である。土壌と根は農学にとって最重要の研究対象でありながら、研究の手が及びにくいものでもあった。食糧生産を画期的に向上

させなければ、この二つのブラックボックスを放置するわけにはいかない。これらのブラックボックスを腑分けすることができる新たな技術が必要である。

そのブレークスルーとなり得る可能性があるのが、有機質肥料活用型養液栽培である。この技術がなぜ「土壌」や「根」の秘密に迫り得るのか、解説を試みようと思う。

2. 水を「土壌化」する技術

養液栽培（水耕栽培）が誕生したのは140年以上も前になる。しかし有機質肥料活用型養液栽培が誕生するまで、あることがどうしてもできなかった。有機質肥料を使用することである。

養液栽培は「土壌を使わない」。このため、「有機物を分解し植物に養分を供給する」という土壌機能を再現することができなかった。もし水の中に有機物が混入すれば、水が腐敗してしまう。腐敗した水に根が触れると傷害を受けてしまい、生育が悪化する。このため、養液栽培では化学肥料（無機肥料）を使うしか方法がなかった。このため、「養液栽培では有機質肥料が使えない」ことは常識とされてきた²⁾。

もちろん、この困難を克服しようと数多くの研究者が挑戦した。最も精力的な研究はNASA ケネディ宇宙センターで1990年代に7年間実施された Breadboard Project である³⁾。しかしこのプロジェクトにおいても、有機物が水を腐敗させ、植物が育たないという課題を克服するには至らなかった。

そこで筆者は、まず「腐敗」という現象を調べた。水の中では「腐敗」するが、土壌の中では問題なく分解され、植物が吸収可能な無機養分になる。この違いは何だろうか？

その答えは、非常にシンプルである。腐敗とは、有機物（に含まれる有機態窒素）の分解がアンモニアまでしか分解が進まない（アンモニア化成）ことを意味する。一方、土壌ではアンモニア化成の後に硝酸化成が進む。つまり、アンモニア止まりで分解が止まるか、硝酸まで分解が進むかが、腐敗と土壌中の分解の決定的な違いとなっているのである。

植物栄養学的にはアンモニアも重要な無機養分とされているが、多くの作物が好硝酸性植物（硝酸を吸収できないと健全に生育しない植物）のため、硝酸がないと健全に育たない⁴⁾。比較的アンモニアを好んで吸収する好アンモニア性植物も、硝酸が一定量吸収できないと健全に育たないものが多い。有機物が「腐敗」すると植物が育たないのは、硝酸を生成しないことが原因だったのである。

ならば、アンモニアを硝酸に変える反応がうまく進めば、有機質肥料活用型養液栽培が実現できるはずである。ケネディ宇宙センターもそのように推定し、アンモニアを硝酸に変える硝化菌を使って実験を重ねた。しかし十分な成功を取めることができなかった。硝化菌が有機成分の曝露を受けて不活性化する問題を解決できなかったのである⁵⁾。ついに、有機質肥料活用型養液栽培を実用レベルにまで高めることはできなかった。

筆者は、なるべくシンプルな方法で水中でも硝酸化成が進む方法がないか、検討することとした。土壌の場合

は有機物を鋤き込んでも硝化菌はダメージを受けず、アンモニア化成と硝酸化成が同時に進行する。その状態を水中で再現できるかどうかのカギとなる。そこで筆者は、二つの仮説を立てた。

1. 土壌中で硝化菌が有機物の曝露に耐えられるのは、他の微生物（アンモニア化成を触媒する微生物）と共存するからではないか。ならば、硝化菌を他の微生物と分離培養するのではなく、共培養すれば有機物の曝露に対して強くなるのではないか。
2. 硝化菌にとって有機物が「毒」だとしても、少しずつ有機物を加えて馴れさせる馴化培養の手法を採れば、硝化菌へのダメージを最小化できるのではないか。

種々の結果、水1リットル当たり5~10g程度の土壌を微生物源として浸漬し、窒素含有量の高い有機物（鰹煮汁など）を少量（1g/L以下）ずつ毎日徐添加すると、水中でも硝酸化成が進むことが明らかとなった^{6,7)}。土壌を除去後、この培養液に根を浸し、適宜有機質肥料を水中に加えると、野菜などを育てることができた。これまで不可能とされていた、有機質肥料を与えながら育てる養液栽培の実用化に成功した。

有機質肥料活用型養液栽培は「水を土壌化する」技術であるともいえる。土壌以外では再現が困難だった、アンモニア化成と硝酸化成の同時進行（並行複式無機化法）が水中でも可能である。土壌以外の媒体に土壌機能を付与することができたのは、これが初めてである。

3. 脱窒を抑える「構造的選択圧」

しかし下水処理に詳しい方ならば、「水中でアンモニア化成と硝酸化成が同時に進むなんて珍しくない、下水処理では同時に進むのが常識」だとすぐにお気づきになられたらう。確かに下水処理では、アンモニア化成と硝酸化成が同時に進む。ただし下水処理では、もう一つ余計な反応が同時進行する。脱窒である。

並行複式無機化法と下水処理の違いは、脱窒を抑えることである。並行複式無機化法では、脱窒を抑えることが最重要課題である。植物にとって重要な養分である硝酸が窒素ガスとなって失われてしまえば、窒素欠乏で植物を育てることはできない。これまで、有機質肥料活用型養液栽培の開発が困難だったもう一つの要因は、硝酸化成を進めつつ脱窒を抑える必要があったためである。

しかし「硝酸化成を進めて脱窒を抑える」という課題の解決は、容易ではない。脱窒反応は硝酸を酸素源とし、有機物をエネルギー源とする微生物反応だからである。有機質肥料活用型養液栽培では「硝酸」と「有機物」という、脱窒を活性化する2条件が成立してしまう。

そこで筆者は、有機物と硝酸が同時併存することがない「時間差構造」をつくることで解決を試みた。植物を栽培する前に行う、微生物を培養する工程（耕水工程）では、有機物の添加に三つの工夫を重ねた。①初期にだけ添加（添加開始から3~7日程度）、②添加量を1g/L以下、③窒素含量が高く、炭素含量の少ない（C/N比の低い）有機質肥料（鰹煮汁など、C/N比8以下）を使う、である。この工夫により、脱窒を抑えることができた。

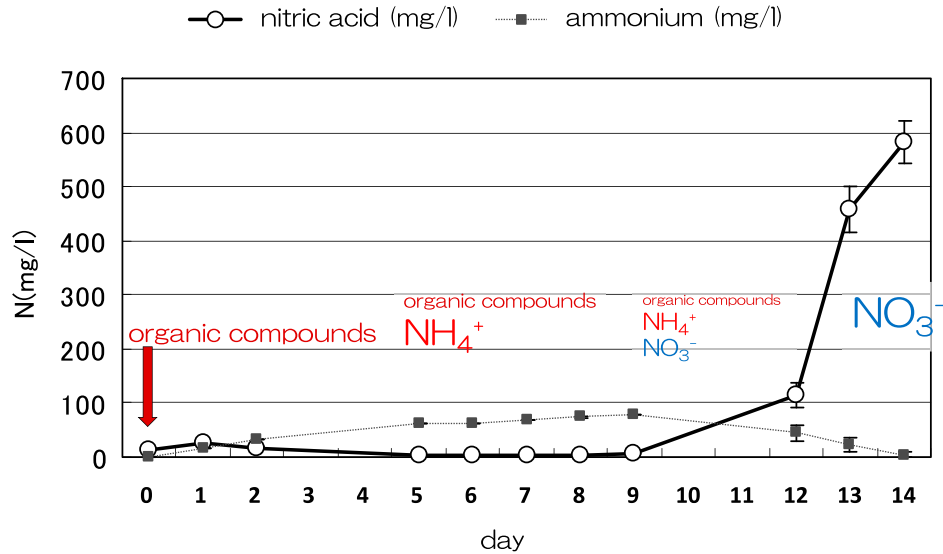


図1. 脱窒抑制条件下の硝酸生成

微生物源として土壌 5 g/L を添加した後、有機物を初日のみ少量 (1 g/L) 加えると、分解が進んでアンモニアが生成する。そのアンモニアを利用して硝化菌 (アンモニア酸化菌, 亜硝酸酸化菌) が硝酸を生成する。日を経るごとに有機物は消費され、有機態窒素の 98% が硝酸に変化した時点では、脱窒に利用可能な有機成分がほとんど残存しない。

このメカニズムを図1で説明する。有機物の添加は少量のため、硝化菌へのダメージは小さくなる。種々の微生物が有機物を分解し、アンモニアを生成すると、アンモニアを硝化菌が硝酸に変換する。硝酸濃度が高まるころには、脱窒菌が利用しやすい有機物は消尽している。このため、硝酸は存在してもエネルギー源となる有機物がないため、脱窒に必要なエネルギーを確保できず、脱窒を抑えることができる。

次の栽培のステップでは、別の工夫で脱窒を抑えることができる。栽培を開始すると、植物の根が硝酸を吸収する。初期の養液に含まれる硝酸濃度は低いため、速やかに硝酸は減少する。この段階で養液に有機質肥料を加えても、養液中には硝酸がほとんど残っていないため、脱窒菌が硝酸を酸素源とすることができない。この結果、栽培工程においても脱窒を抑えることができる。このように、栽培前と栽培開始後のそれぞれで「有機物と硝酸の同時併存」という条件が整わないように工夫することで、脱窒を抑えることが可能となった。

興味深いことに、養液中の微生物には脱窒菌も大量に生息している。アンモニア化成を担う微生物は、*Pseudomonas* 属のように脱窒の仕組みを備えるものも多い⁸⁾。それでも脱窒を抑えることができるのは、脱窒が活性化する「硝酸と有機物の同時併存」という条件が成立しないような「時間差構造」があるためである。

微生物が雑多に含まれる微生物群集をコントロールすることは不可能だ、と考える研究者は今でも少なくない。しかし「そのようにふるまうしか選択肢がない」環境を作り上げれば、微生物群集はそのようにふるまうしかない。筆者はこのような選択圧を「構造的選択圧」と呼ぶことにしている。有機質肥料活用型養液栽培は、土壌由来の雑多な微生物群から培養している以上、単離培養した微生物を扱うような手法をとることができない。雑多な微生物群集を雑多なまま、「微生物がそのようにふるまうしか選択肢がない構造」を作り出すことで群集



図2. 土壌化処理を施したウレタン

有機質肥料活用型養液栽培の微生物群を固定化したウレタン (右)。これに有機質肥料として鰹煮汁を供すると、硝酸やリン酸などの無機イオンに分解され、トマトなどを栽培することができる (左)。

を制御する構造的選択圧の手法は、多様な微生物を相手にするしかない様々な現場で、応用可能なのではないかと考えている。

4. 土壌化 (Soilization)

有機質肥料活用型養液栽培は「水を土壌化する」技術でもあると指摘したが、ウレタンやロックウール、炭といった非土壌の媒体を土壌化することも可能である。筆者はこの技術を土壌化 (soilization) と呼ぶことにしている。

ウレタンなどの非土壌に、有機質肥料活用型養液栽培の微生物群を固定化すると、土壌と同じように「有機物を分解し硝酸を生成する」土壌機能を付与することができる (図2)。基本的に多孔質の媒体であればどんなも

のも土壌化することができる。変わったところでは木綿の雑巾や木質チップも土壌化できるが、これらは有機質肥料を加えると媒体自体が分解し始めるので、栽培用の培地として用いるのには、やや不適當である。

土壌化したもみ殻燻炭やウレタンはきわめて軽量で、20Lの袋を片手で振り回すことができる。高齢化で重い土壌を運ぶ必要なく、ベランダ園芸を楽しむことも可能になる。また、土壌が重いために諦められることの多かった屋上緑化でも、土壌化ウレタンなどは有効な代替案となり得る。

研究面で大きく進展することが期待されるのは、「土壌の解体」である。土壌鉱物は雑多な土壌鉱物の集まりであり、鉱物ごとに形成される微生物生態系には違いがあることが予想されるが、土壌鉱物から土壌微生物を引きはがして、1種類の土壌鉱物上で再度活動させるといった技術がこれまで存在しなかったため、雑多な土壌を雑多なまま解析するしか方法がなかった。しかし土壌化技術であれば、パーミキュライトや長石など、単一種の鉱物を土壌化し、鉱物ごとに微生物生態系が受ける影響を評価することができる。土壌粒子の粒径をそろえ、粒径が土壌微生物に与える影響も調べられるなど、これまで望んでもできなかった解析方法をとることができる。

根の研究もこれまででない進展を見せることが期待される。有機質肥料活用型養液栽培では、栽培装置の蓋を開けるだけで根を直接観察することができる。サンプル採取も容易である。これは、これまでの栽培方法にないアドバンテージである。従来の無機養液栽培では、根は



図3. 根部病害抑止効果

培養液に病原性フザリウムを 10^4 cfu/mlの菌密度で灌注接種したところ、従来の無機養液栽培ではほとんどのトマト苗が発病、枯死した(右)。有機質肥料活用型養液栽培では病徴を示す苗は認められなかった(左)。

同様に露出し、観察も容易であったが、微生物がほとんど存在せず、根と微生物の相互作用を解析することはできなかった。また土耕栽培は根と微生物の相互作用はあるが、土壌粒子に埋もれた根は観察もサンプル採取も困難であった。有機質肥料活用型養液栽培は、根と根圏微生物の相互作用を直接観察でき、サンプル採取も容易という、これまででない特徴を備えている。

「土壌」と「根」というブラックボックスを解明する手がかりとして、有機質肥料活用型養液栽培はこれまででない方法を提供してくれる。

5. 根部病害抑止効果

農業生産上、現在も対策が困難な病害が根部病害である。青枯病やフザリウム病などは病原菌が土壌中にひそみ、強力な殺菌剤で処理しても十分に殺菌しきれず、被害が再発することも少なくない。その場合は、土壌微生物の微生物相が貧弱になるため、病害が激発することが多い。いったん根部病害が発生した土地では、その病害に弱い作物の栽培をあきらめざるを得なくなることもよくある。

根部病害を嫌い、植物工場のようにクリーンな無機養液栽培を採用する生産者もいるが、ここでも根部病害に苦しむケースがある。養液には無機成分しか含まれておらず、微生物相が貧弱なため、塵埃などと一緒に病原菌が侵入すると被害が甚大になり、その栽培槽の作物は全滅することがある。根部病害対策で養液栽培用に認められている農薬はほとんどなく、それも十分な効果を示せないこともあり、根部病害を抑えることは極めて困難であった。

有機質肥料活用型養液栽培は、ただ栽培するだけで青枯病やフザリウム病を抑止することができる^{9,10)}(図3)。非常に興味深いことに、由来の異なる土壌から培養した微生物を使っても、同じように抑止効果が認められる。このような現象は、特定の拮抗微生物が病原菌を抑えるというようなメカニズムでは説明しにくい。

それを示唆するように、もう一つ興味深い現象が観察される。苗を定植して4日後に病原菌を接種する場合は、かなりの菌密度で接種しても根部病害を抑止するが、定植3日以内だと根部病害を抑えることができないのである¹⁰⁾(図4)。

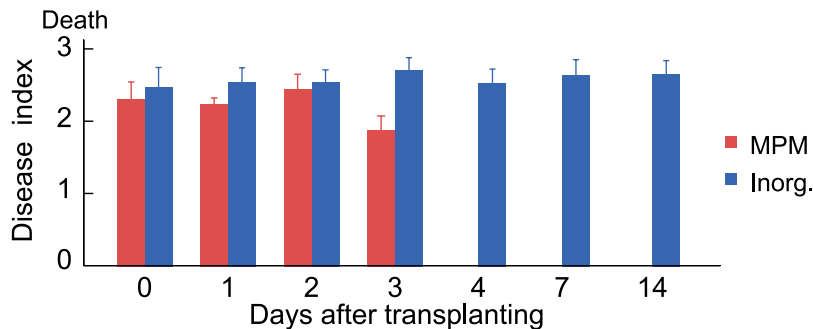


図4. 定植後の病原菌接種と根部病害の発生

有機質肥料活用型養液栽培(MPM)の場合、サラダナ苗を定植して4日後以降に病原性フザリウムを接種する場合は根部病害の発生が認められない。ただし0~3日後に接種する場合は、従来の無機養液栽培と同様、根部病害が発生する。無機養液栽培(Inorg)の場合は、接種時期がいずれであろうと根部病害が発生する。

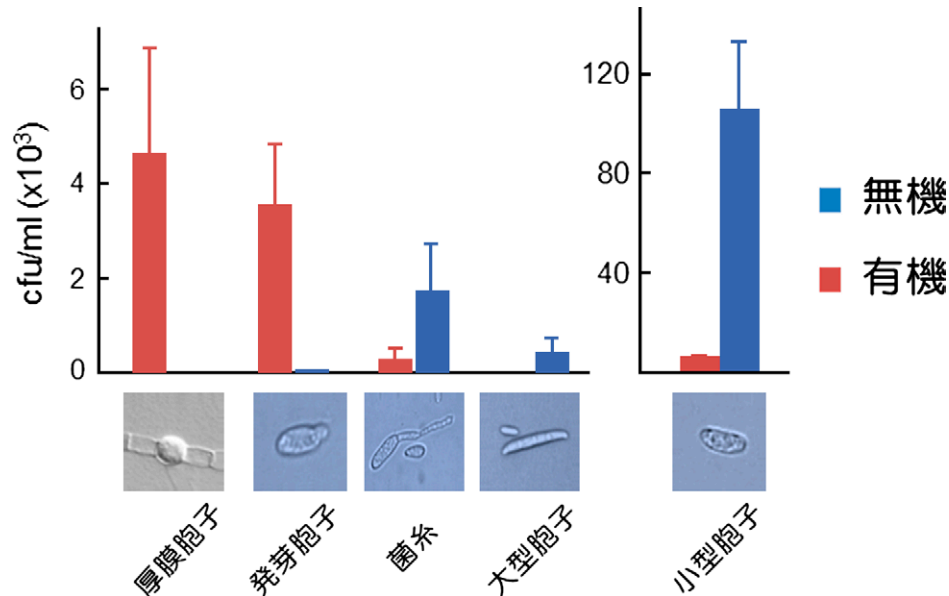


図5. 養液中での病原性フザリウムの動態

従来の無機養液栽培の養液中では、盛んに増殖していることを示す大型孢子の形成が認められた。有機質肥料活用型養液栽培では大型孢子の形成は認められず、無機養液栽培では観察されなかった厚膜孢子の形成が認められた。

慶応技術大学が根圏微生物の変遷をメタゲノムで解析したところ、栽培して3日間は大きく微生物相が変化していき、4日後以降は比較的安定化することが看取される。このことから、微生物生態系が安定化した段階で根部病害抑止効果が発現するが、まだ不安定な状態では病原菌の活動を抑えられないことが示唆される。

青枯病菌は細菌、フザリウムは糸状菌であり、それぞれ病原菌を抑えるメカニズムに違いがあることも興味深い^{9,10}。青枯病菌は接種後10日程度で養液から検出されなくなるが、病原性フザリウムは接種時の菌密度からほとんど増減せずに養液中で生残する。

養液中の病原性フザリウムを顕微鏡で観察すると、形態に興味深い変化が起きることが分かった。従来の無機養液栽培に接種した病原性フザリウムは菌糸を伸ばし、増殖が盛んなことを示す大型孢子の形成が認められる。しかし有機質肥料活用型養液栽培では菌糸伸長が不全となり、大型孢子の形成が全く認められない。その代わりに、無機養液栽培では観察されない、厚膜孢子の形成が認められる¹⁰ (図5)。厚膜孢子とは、悪化した環境を耐え忍ぶための耐久器官である。有機質肥料活用型養液栽培の環境では、病原性フザリウムにとって活動しにくい環境となっていることがうかがえる。

病原性フザリウムにどのような作用が及んでいるのかを解析するために、有機質肥料活用型養液栽培の養液を0.2 μm フィルターで滅菌し、これを病原性フザリウムに供してみたが、その増殖を抑えることはできなかった。これは、病原性フザリウムに対する増殖抑止効果が、抗菌物質によるものではない可能性が高いことを示している¹⁰。

有機質肥料活用型養液栽培の養液から微生物を単離培養し、病原性フザリウムに拮抗性を示す微生物を探索したところ、1菌株について病原性フザリウムの増殖を抑える効果が認められた。しかしこの菌株は、別の分離株

と混合すると病原性フザリウムの増殖抑制効果が失われてしまう。これに対し、単独では病原性フザリウムを抑えることができないのに、別の菌株とペアになると初めて病原性フザリウムの増殖を抑える組み合わせが5組認められた。興味深いことに、単独では抑止効果がないこれらの菌株は、7菌株、13菌株と組み合わせる菌株数を増やしても抑止効果を発揮することができた。

この知見は、拮抗菌研究を考えるうえで重要な示唆である。従来の拮抗菌研究では、単離培養した菌株をシャーレ上で病原菌と対峙培養し、抑止効果の認められるものを選抜してきた。しかし現場で拮抗菌として使用してみると、土着微生物に駆逐され、効果を示さないことが多かった。今回の結果は、単独では期待される効果を示さなくても、他の微生物と協働することで初めて効果を示すケースがあることを、明確に示すものである。

6. おわりに

この最後の章では、かなり「研究者らしくない」とたえが多いが、分かりやすさを重視して記述することをお許しいただきたい。

筆者は最近、「複雑系制御」に興味を持っている。雑多に見える微生物群を雑多なまま扱い、望ましい機能を発揮させる。もしそのような複雑系制御技術が集積すれば、「石油を作る微生物」の開放系培養を、コンタミを恐れずに実施して大幅にコストダウンを図るなどが可能になるだろう。そんな複雑系制御は可能なのだろうか？

最近、筆者が好んで学生に出すクイズがある。生態学の視点を持つ人には比較的容易なクイズだが、皆さんも一緒に考えてみていただきたい。

「邪魔な木の切り株がある。これを微生物の力で除去してほしい。」

従来の微生物学のアプローチであれば、次のように考

えることが多かった。樹木の主成分はリグニンだから、リグニンを分解できる白色腐朽菌のような微生物を分離・培養し、木の切り株に振りかければよい、と。しかしこうしたアプローチは、土着微生物に駆逐され、供試した微生物が短時日に消滅してしまうことがほとんどである。

しかし次のようなユニークな方法がある。切り株の周りに肥料をまくのである。すると切り株は数カ月もしないうちにぼろぼろに腐食し、簡単に除去できるようになる。

なぜ肥料をまくだけで切り株は分解されたのだろうか？切り株の周りにまいた肥料には、炭素は少ないがその他の元素すべてがたっぷり含まれている。もし炭素さえ手に入れることができれば、土着微生物にとってすべての元素がたやすく手に入るという環境となっている。そうすると、土着微生物のうち、切り株から炭素分を取り出すことに長けた微生物が増殖し、その微生物の活動を支援するよう、生態系全体が適応し始める。その結果、土着微生物全体で切り株を分解し始めるのである。

この手法は、石油タンカーが座礁し、岸壁などに石油が付着した場合に、その油分を分解するため、肥料をまくという方法にも応用されている¹¹⁾。特別な微生物を培養する必要はなく、土着微生物の中から望ましい性質が引き出されるように工夫すればよいだけだと言える。

切り株や石油分解の事例は、炭素だけを欠如するものの、他の元素は潤沢にある、という構造を作り出すことで、炭素のカタマリである切り株の分解を促す、という方法である。このように、ある種の欠如状態を生み出すことで微生物群集全体を「欠如の穴埋め」の方向に動かす手法を、筆者は「選択陰圧」と呼ぶことにしている。

微生物群集の動きは、水の動きとよく似ている。水に丸くなれ、四角くなれと殴ったり蹴ったりしてもどうしようもない。水を望ましい形にしたいなら、その形の空虚がある容器に水を注げばよい。それと同様に、雑多で渾沌としているように見える微生物群集も、「そのように動くしか選択肢がない」ような環境に置くと、そのようにしか活動できなくなるものと思われる。

選択陰圧は「孫子」の兵法にある「圉師必闕（いしひっけつ）」に似ている。敵を完全包囲すると敵は覚悟を決め、徹底抗戦するので城はなかなか落ちないが、包囲網に手薄なところを設けると「そこから逃げられるかも」という心理が生まれて弱気になり、抵抗が弱くなるというものである。ダム「アリの一穴」と同様、欠如があるとそちらを埋めるように群集が動き出す。水分子も、人の流れも、微生物も、群集は似たような動きをする。

構造的選択陰圧はサッカーに似ているかもしれない。野球やバレーボールでも、足を使ってはいけないというルールはないにも関わらず、足技が発達することはない。しかし「手を使ってはいけない」というルールを設定することで、サッカーは他のスポーツにはない足技の発達を促している。しかも「手を使えない不便なスポーツ」であるにも関わらず、サッカーを志す少年は絶えない。プロの選手として有名になれるかもしれない、という誘因があるためである。有機質肥料活用型養液栽培で

も、「硝酸を作らざるを得ない」「脱窒が起きにくい」という構造（環境）を強いられながら、微生物群集はその環境に合わせて活動する。有機質肥料の形で常に栄養供給がなされるという誘因があるからである。ある種の誘因が用意されていれば、与えられた構造に微生物は群集として順応しようとする、ということだと考えられる。

複雑系は一見、制せられることがないように思われる。しかし複雑系を取り囲む構造をモディファイしてやれば、複雑系全体がその構造に適応すべく、活動するものである。ならば、複雑系はある程度制御可能な対象となる。

酒の醸造やメタン発酵など、伝統的発酵技術がすでに自家菜籠中のものとして駆使していた複雑系制御技術を、もっと意識して磨けば、伝統技術にとどまらず、そのほかの分野にも応用することが可能だろう。

コッホ以来、単離培養した微生物を微生物学者は研究し続けてきたが、複雑系制御学ともいべき新分野を切り開けば、渾沌（カオス）を渾沌のまま制御する、新たな技術革新が期待できるのではないだろうか。単一の微生物や天敵昆虫を投入するような従来の「プラスアルファ」型手法ではなく、その場にいる土着の微生物や昆虫に、望ましい行動をとってもらうような「マイナスアルファ」的な環境制御技術が広がれば、地球環境への負荷はもう少し小さなものにできるのではないかと期待している。

文 献

- 1) 久馬一剛. 2005. 土とは何だろうか? 京都大学学術出版会.
- 2) 宮田尚稔, 池田英男. 2005. 養液土耕と液肥・培地管理, pp. 119-155. 日本土壌肥科学会編.
- 3) Garland, J.L., M.P. Alazraki, C.F. Atkinson, and B.W. Finger. 1998. Evaluating the feasibility of biological waste processing for long term space missions. *Acta Hort.* 469: 71-78.
- 4) 遠藤昌伸, 切岩祥和, 糠谷 明. 2004. 牛ふん尿処理液を用いたトマトの培地栽培. *園学研.* 3: 267-271.
- 5) Mackowiak, C.L., J.L. Garland, R.F. Strayer, B.W. Finger, and R.M. Wheeler. 1996. Comparison of Aerobically-treated and untreated crop residue as a source of recycled nutrients in a recirculating hydroponic system. *Adv. Space Res.* 18: 281-287.
- 6) 篠原 信. 2006. 農業および園芸. 81: 753-764.
- 7) Shinohara, M., C. Aoyama, K. Fujiwara, A. Watanabe, H. Ohmori, Y. Uehara, and M. Takano. 2011. Microbial mineralization of organic nitrogen into nitrate to allow the use of organic fertilizer in hydroponics. *Soil. Sci. Plant. Nutr.* 57: 190-203.
- 8) Williams, D.R., J.J. Rowe, P. Romeo, and R.G. Eagon. 1978. Denitrifying *Pseudomonas aeruginosa*: some parameters of growth and active transport. *Appl. Environ. Microbiol.* 36: 257-263.
- 9) Fujiwara, K., C. Aoyama, M. Takano, and M. Shinohara. 2012. Suppression of *Ralstonia solanacearum* bacterial wilt disease by an organic hydroponic system. *J. Gen. Plant Pathol.* 78: 217-220.
- 10) Fujiwara, K., Y. Iida, T. Iwai, C. Aoyama, R. Inukai, A. Ando, J. Ogawa, J. Ohnishi, F. Terami, M. Takano, and M. Shinohara. 2013. The rhizosphere microbial community in a multiple parallel mineralization system suppresses the pathogenic fungus *Fusarium oxysporum*. *MicrobiologyOpen.* 2: 997-1009.
- 11) Atlas, R.M. 1995. Bioremediation of petroleum pollutants. *Int. Biodeter. Biodegr.* 35: 317-327.