

有機質肥料活用型養液栽培による根部病害抑止効果

—微生物生態系の「極相化」—

(独)農研機構 野菜茶業研究所 ^{しの}篠 ^{はら}原 ^{まこと}信

はじめに

有機質肥料活用型養液栽培（有機質肥料を使って栽培する養液栽培技術）は2005年に開発されたばかりの新しい栽培技術である（SHINOHARA et al., 2011）。養液栽培自体は開発から140年以上の歴史があり、本技術が開発されるまでは有機質肥料の使用は不可能とされてきた。有機質肥料を入れると養液が腐敗し、根が傷害を受けて健全に生育しなくなるためである。このため、養液栽培では無機肥料が常識であった（いわゆる無機養液栽培）。

本栽培技術は微生物を利用することで、有機質肥料の利用を実現している。養液中でも土壌の中と同じようにアンモニア化成、硝酸化成が進み、有機質肥料を次々に分解して養分が供給される。微生物の多くは根の表面でバイオフィーム（微生物群集構造）を形成し、有機質肥料を分解する（図-1）。根の発達は無機養液栽培と比べて顕著となり、水中根では発達しないはずの根毛が密生する（図-2：右が無機、左が有機）。現在、主要な野菜の栽培技術について三重県、新潟県、大阪府、福島県の農業試験場が研究を進めており、実用化のめどが立ちつつある。

紙面の関係上、栽培についての詳しい情報は別稿に譲るが、本栽培技術にはもう一つ、大きなメリットがある。それが根部病害抑止効果である（FUJIWARA et al., 2012 a）。本誌でも過去に一部を紹介した（篠原, 2007）が、本稿では、その後の検討で明らかになったことを紹介したい。さらに、それらの実験結果から垣間見える、新しい防除思想についても開陳を試みようと思う。

I 根部病害抑止効果

青枯病や病原性 *Fusarium* 属菌による根部病害はよく知られているように、防除が難しい病害である。無機養液栽培で根部病害が発生するとその栽培区は全滅する恐れがあり、被害も甚大となる。土耕栽培でも根部病害は被害が大きく、その発生圃場では罹病性の作物（トマト

など）の栽培を断念せざるを得ないケースがある。だが、有機質肥料活用型養液栽培はこれらの根部病害を抑止することが可能である。

まず、病原性 *Fusarium* 属菌を用いた実験事例を紹介しよう。

サラダナの定植4日後にレタス根腐病菌 *Fusarium oxysporum* f.sp. *lactucaae* race3 を培養液（注・水耕液のこと）に灌注接種すると、無機養液栽培の場合にはわずかに 10^2 cfu/ml の接種菌密度で発病するが、本栽培技術では大量接種（ 10^5 cfu/ml）でも罹病せず、健全に生育する（図-3：右が無機、左が有機）。トマト根腐萎凋病菌 *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* の接種試験でも同様で、無機養液栽培ではほぼすべてのトマトの株が枯死するのに対し、本栽培技術では健全に生育する（図-4：右が無機、左が有機）。このように、本栽培技術は病原性 *F. oxysporum* に対して高い発病抑止効果を示す。ところが興味深いことに、試験後に培養液を調べると、接種に用いた病原性 *F. oxysporum* が低い菌密度ながら検出される（注・接種していない対照区では同様の菌は検出されない）。病原性 *F. oxysporum* が生息しているのに病害が発生しないのである。

さらに詳細に調べるため、培養液をフィルター（0.2 μ m）滅菌あるいはオートクレーブ滅菌し、三角フラスコ内でレタス根腐病菌を加えて振盪培養すると、いずれ

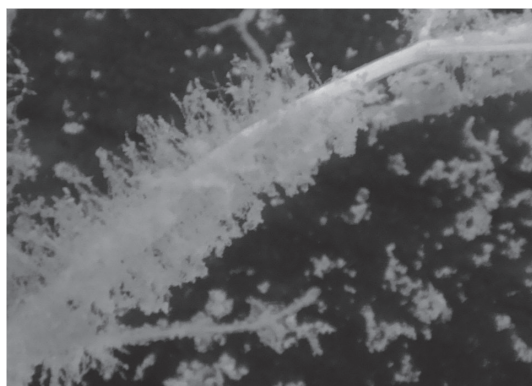


図-1 根面でのバイオフィーム形成

有機質肥料活用型養液栽培では、根の表面にバイオフィームが形成される。有機質肥料の分解は主にバイオフィーム内で行われる。

Climaxization of Microbial Ecosystem - Root Disease Control by Organic Hydroponics. By Makoto SHINOHARA

（キーワード：有機質肥料活用型養液栽培，極相，バイオフィーム，根部病害，青枯病，フザリウム）

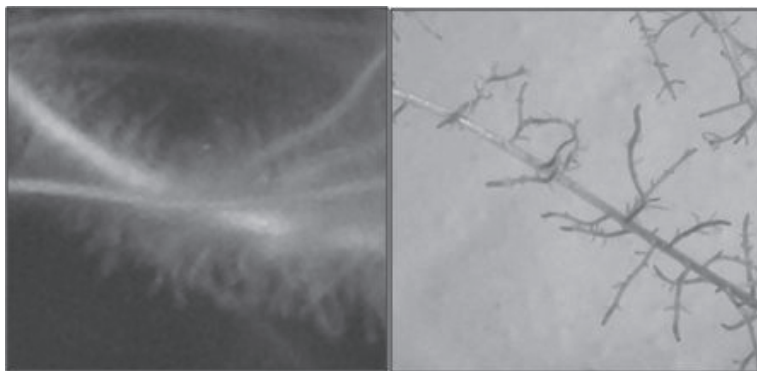


図-2 無機養液栽培と本栽培技術の根

無機養液栽培で育てた水中根には根毛が発達しない（右）。本栽培技術では、水中根に根毛が顕著に発達する（左）。

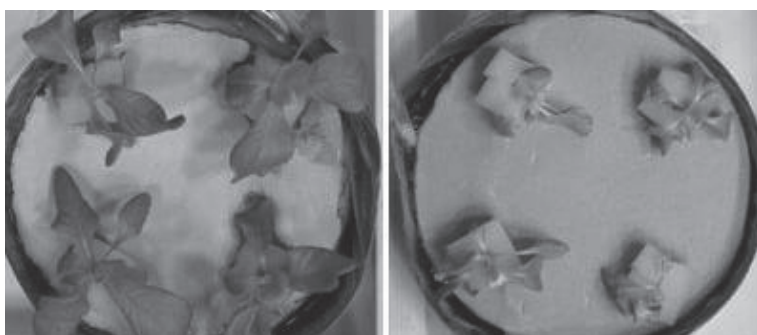


図-3 レタス根腐病接種試験

無機養液栽培では全株が萎凋した（右）が、有機質肥料活用型養液栽培では無接種の区と同等に健全に生育した（左）。



図-4 トマト根腐萎凋病接種試験

無機養液栽培では全株枯死あるいは生育が大幅に悪化した（右）が、有機質肥料活用型養液栽培では健全に生育し、病兆は認められなかった（左）。

もレタス根腐病菌は大幅に増殖した。これに対し滅菌処理をしなかった培養液中ではレタス根腐病菌の増殖が抑えられ、菌密度は一定だった。これらの結果から、培養液にはレタス根腐病菌の増殖を抑えるような抗菌物質は含まれておらず、培養液中の生菌がレタス根腐病菌に直接作用し、増殖を抑えることが示唆された。

細菌病である青枯病菌 *Ralstonia solanacearum* については、少し違ったメカニズムが働くようである。トマト苗を定植して 4 日後に青枯病菌を灌注接種すると、青枯病を発症する株がなかった (FUJIWARA, 2012 b) のは同様の結果だが、接種後 8 日目の培養液からは青枯病菌を検出できなかった点が異なる。また、培養液に青枯病菌を加えて三角フラスコで振盪培養すると、数日で青枯病菌は検出されなくなってしまった。

このように、糸状菌である病原性 *F. oxysporum* と細菌である青枯病菌とでは、発病抑止のメカニズムが異なるようである。病原性 *F. oxysporum* の場合、増殖を抑える「静菌化」が起きているようだが、細菌である青枯病菌の場合は、消滅に向かわせる別のメカニズムが働いているらしい。

これらの現象が、植物体の抵抗性によって引き起こされている可能性はあるのだろうか。葉かび病菌や灰色かび病菌を地上部に接種すると発病することや、青枯病菌を子葉に付傷接種すると発病すること等から、植物体の抵抗性誘導が根部病害抑止効果に関与しているとは考えにくい。本栽培技術の根部病害抑止効果は、根を被覆するバイオフィームによってもたらされているようである。

ただし、抗菌物質を分泌する拮抗菌の可能性も高くないようである。上述のようにフィルター滅菌した培養液に抗菌活性が認められないこと、バイオフィームから単離培養した微生物やバイオフィームそのものを病原性 *F. oxysporum* と対峙培養しても特に抑止効果は認められないこと等の結果から、拮抗菌とは別のメカニズムを考えたいほうがよいようである。

では、どんなメカニズムが考えられるのか。それを考えるために、根部病害抑止効果が失われてしまうケースを見てみよう。

II 根部病害抑止効果が失われるケース

非常に顕著な根部病害抑止効果を示す有機質肥料活用型養液栽培だが、その根部病害抑止効果が失われてしまうことがある。次の四つのケースがそうである。そのいずれも、「微生物生態系が不安定化する」時に起きている。

ケース①「定植後 3 日以内の接種」…苗を定植して 3 日以内に青枯病菌あるいは病原性 *F. oxysporum* を灌注

接種すると、根部病害が発生する。ところが定植 4 日後以降だと大量の病原菌 (10^5 cfu/ml) を灌注接種しても病害は発生しない。

ケース②「耕水工程初期」…耕水工程とは、本栽培技術で用いる水中微生物を培養する工程のことであるが、その工程の初期に青枯病菌を接種し、一緒に培養すると、青枯病菌は一定の菌密度で検出されるようになる。しかし耕水工程が終了してから青枯病菌を添加する場合は、数日で検出されなくなる。

ケース③「過剰施肥」…植物の要求以上に有機質肥料を過剰に加え続けると、バイオフィームが異常発達して嫌気性菌に特徴的な異臭（ドブ臭）を放つようになる。このときに病原菌が侵入すると根部病害が発生しやすい。

ケース④「栽培途中での肥料の変更」…枕崎産の鰹煮汁を肥料として栽培している途中で突然、焼津産の鰹煮汁に肥料を変更すると、根を被覆するバイオフィームがすべて崩壊してはがれ落ち、すべての根が褐変する。バイオフィームが回復し、根が白さを取り戻すのに約 2 週間必要となる。

以上のケースはいずれも微生物生態系が不安定な状態となっている。ケース①の場合、苗を定植してから 3 日間は、バイオフィームの微生物生態系が大きく変化している最中であることが DGGE の解析結果からわかっている (FUJIWARA et al., 2012 b)。ケース②でも、微生物生態系を構築しようという最初期から青枯病菌が侵入すると、もはや排除されることなく、ずっと棲みついてしまうことがわかる。ケース③の場合はバイオフィームが分厚くなりすぎて内部が嫌気的になり、微生物相が大きく変化する。ケース④は興味深い事例だが、同じ鰹煮汁でも産地が違うだけで微生物は対応できず、バイオフィームがいったん崩壊してしまう。

このように、本栽培技術で根部病害抑止効果が失われるのは、いずれも微生物生態系が不安定化する時である。もし拮抗菌や植物体の抵抗性が根部病害抑止効果の主因であるならば、少々微生物生態系が不安定化したからといって病害が発生することはないと考えられるが、実際にはそうっていない。

このため、我々は、有機質肥料活用型養液栽培による根部病害抑止効果は、微生物生態系が「極相化」することによってもたらされているのではないかと仮説を立てている。

III 極相とは何か

極相とは、生態系が環境に十分適応し、平衡状態になっていることを意味する。高校の生物の教科書には、森

林の極相はカシ、ナラ、クヌギ、ブナといった陰樹で構成され、マツやサクラ等の陽樹はまだ生態系が不安定なころには生育できても、極相林の中では生きていけないとされている。

本栽培技術でも、これと同様のことが起きていると考えられる。本栽培技術では特定の有機質肥料（鰹煮汁など）だけを利用することが多い。このため、特定の有機質肥料を分解するのに特化した微生物生態系が構築され、極相に達していると思われる。そのことはケース④の事例からも伺える。特定の肥料しか使わないことで、微生物生態系の極相化に成功しているのではないかと考えられる。

極相化すると病原菌が活動しにくくなる現象は、医学でも知られている。口腔や腸内にはそれぞれ口腔細菌叢や腸内細菌叢があり、恒常的に生息している微生物群によって一種の極相状態となっている。しかし抗生物質などの服用により均衡が崩れると、菌交代症（microbial substitution）と呼ばれる現象が起き、病原菌が優占するなどの問題が発生しやすくなる（MARCOTTE and LAVOIE, 1998）。

なぜ微生物のバランスが保たれると病原菌の活動を抑えたり、あるいは排除したりすることに役立つのか、そのメカニズムは明らかになっていない。これと同様に本栽培技術でも、メカニズムは現在のところ明らかにはなっていないが、極相化が病原菌の活動を抑えることに何らかの寄与を果たしているようである。

Ⅳ 根 と は 何 か

ここで改めて「根とは何か」を考えてみたい。土壌での栽培だと、根は驚異的な能力を発揮する。本来、土はありとあらゆる有機物を分解する、すさまじい分解力を誇る。その力は生きているものさえ分解するほどで、中国古代、周の文王（姫昌）が殷の紂王に囚われたとき、地面を穿っただけの地下牢に幽閉され「これでは足が腐る」と恐怖するシーンがある（宮城谷昌光「王家の風日」p.345）。土は生けるものさえ腐らせてしまう力がある。

だが、根は土の強力な分解力をあっさり凌駕する。あんなに真っ白で柔らかい根は、土の中でも微生物の侵襲を全く受けつけない。すぐそばで有機物が分解されていても平気である。根は、土壌微生物を制御下に置く驚異的な能力を持っている。

ところが奇妙なことに、無機養液栽培では極端に弱くなる。水耕液に有機物や微生物が混入しただけで根はかなりのダメージを受ける。このため無機養液栽培を採用することの多い植物工場では、クリーンな環境を維持す

ることで、水耕液を「無機的」で「無菌的」に保たねばならない羽目に陥っている。

土中に張る根は驚異的な力を見せるのに、無機養液栽培だと完全に失われてしまうのはなぜなのだろうか。何の要因があれば根は驚異的な能力を発揮するのだろうか。

有機質肥料活用型養液栽培では土壌での栽培と同様、微生物の侵襲を受けない根の能力を回復している。本栽培技術では、微生物が根の表面にバイオフィームを形成しても、根は健全に伸展する。培養液中には有機成分が溶解しているが、その曝露を受けても根は傷まない。土でなくても、根は強靱な性質を取り戻せるのである。

根が、微生物の侵襲を受けない強靱さを取り戻すには、二つの微生物分解（アンモニア化成と硝酸化成）が必要なのである。無機養液栽培で有機質肥料を加えると、雑菌によってアンモニア化成までは進むが、硝化菌がいないために硝酸は発生しない。多くの野菜はアンモニアより硝酸を好む好硝酸性植物であるため、アンモニアだけでは正常に生育しない。有機質肥料活用型養液栽培では、アンモニア化成、硝酸化成が同時並行的に進める（並行複式無機化反応）微生物が根の表面でバイオフィームを形成するので、好硝酸性植物でも問題なく栽培することができる（SHINOHARA et al., 2011）。

しかし硝酸を十分に与えたとしても、アンモニア化成、硝酸化成を進める微生物を栽培システムから隔離すると、根の強靱さは失われてしまう。NASA ケネディ宇宙センターでの実験では、アンモニア化成、硝酸化成用の微生物タンクを栽培装置とは独立させて順次反応を進め、フィルターで有機物と微生物を極力除去した後、その培養液を野菜に供する実験を行っているが、培養液中にわずかに残存する有機成分や栽培装置内で増殖した微生物で根が傷害を受け、生育が悪化してしまった（GARLAND et al., 1997）。根が驚異的な能力（微生物の侵襲を受けない能力、有機成分の曝露にも悪影響を受けない能力）を発揮するには、アンモニア化成、硝酸化成の両方を行う微生物群が、じかに根圏に生息することが、必要なのである。

お わ り に

根はなぜ土の中で分解されないのか？この問いと似ているのが、すでに述べた腸内細菌の話である。腸にはたくさん微生物がいるが、微生物の侵襲を受けない不思議な場でもある。栄養吸収する場である点も、腸と根は共通している。

興味深いことに、腸内細菌がいないと免疫寛容が失われ、肉などのタンパク質を異物として認識し、食物アレ

ルギーを起こすことが知られているが、この現象は無機養液栽培だと有機成分の曝露で根が傷害を受けるのに、有機質肥料活用型養液栽培では「有機成分寛容」になる点とよく似ている。さらに、腸内細菌のいない無菌マウスの小腸には絨毛が発達しないが、この点も無機養液栽培の水中根では根毛が発達しないのに、有機質肥料活用型養液栽培では根毛がよく発達する点と似ている。大胆すぎる仮説かもしれないが、絨毛や根毛は「微生物と相互作用を行うための組織」なのかもしれない。

「多細胞生物と微生物が相互作用する場」を研究する意味で、有機質肥料活用型養液栽培は大きなアドバンテージを有する。腸内細菌を研究しようとしても、腸は体内に隠れている。土耕栽培では根が土中に埋もれている。だが本栽培技術は栽培装置のフタを開けるだけで根を観察でき、サンプル採取も容易である。多細胞生物と微生物の相互作用を調べるのに、これほど優れた研究対象はない。医学界では、腸内細菌のことを「もう一つの臓器」と呼んでいる。今後の研究次第では、根圏微生物

のことを「もう一つの植物の器官」と呼ぶ時代がくるかもしれない。

本稿では、「微生物生態系の極相化」、「根の微生物制御能」、「腸と根の類似性」といった見方を紹介した。もっと、有機質肥料活用型養液栽培に限定した議論のほうがわかりやすかったかも知れない。ただ筆者は、本研究を通じ、生態系との向き合い方を考えていきたいと願っている。土とは何か、根とは何か、生態系とは何か、それらが少しでも理解できれば、人類の未来になんらかの活路を見いだせるのではないかと感じている。

引用文献

- 1) FUJIWARA, K. et al. (2012 a): J. Gen. Plant Pathol. **78**: 217 ~ 220.
- 2) ——— et al. (2012 b): IS-MPMI 2012 XV International Congress, p. 121.
- 3) GARLAND, J. L. et al. (1997): Adv. Space Res. **20**: 1821 ~ 1826.
- 4) MARCOTTE, H. and M. C. LAVOIE (1998): Microbiol. Mol. Biol. Rev. **62**: 71 ~ 109.
- 5) 篠原 信 (2007): 植物防疫 **61**: 17 ~ 20.
- 6) SHINOHARA, M. et al. (2011): Soil Sci. Plant Nutr. **57**: 190 ~ 203.

新しく登録された農薬 (24.7.1 ~ 7.31)

掲載は、**種類名**、登録番号：**商品名**（製造者又は輸入者）登録年月日、有効成分：含有量、**対象作物**：対象病害虫：使用時期等。ただし、除草剤・植物成長調整剤については、**適用作物**、適用雑草等を記載。（登録番号：23097 ~ 23098）種類名に下線付きは新規成分。※は新規登録の内容。

「殺虫剤」

●アリマルア・オリフルア・トートリルア・ピーチフルア剤 ※新混合剤

23097: コンフューザー AA (信越化学工業) 12/07/11

(Z)-10-テトラデセニル=アセタート: 28.0%, (E,Z)-4,10-テトラデカジエニル=アセタート: 12.2%, (Z)-8-ドデセニル=アセタート: 5.4%, (Z)-11-テトラデセニル=アセタート: 19.9%, (Z)-9-テトラデセニル=アセタート: 3.9%, 10-メチル-ドデシル=アセタート: 0.50%, (Z)-9-ドデセニル=アセタート: 1.0%, 11-ドデセニル=アセタート: 0.60%, (Z)-11-テトラデセン-1-オール: 0.24%,

(Z)-13-イコセン-10-オン: 18.1%

果樹類 (交尾阻害): キンモンホソガ, ナシヒメシンクイ, リンゴカクモンハマキ, リンゴモンハマキ, モモシンクイガ, ミダレカクモンハマキ: 成虫発生初期から終期

●硫黄・ブプロフェジン水和剤 ※新混合剤

23098: アブロードイオウフロアブル (日本農薬) 12/07/25

硫黄: 35.5%, ブプロフェジン: 4.0%

みかん: ミカンサビダニ, チャノホコリダニ: 収穫 14 日前まで

かんきつ (みかんを除く): ミカンサビダニ, チャノホコリダニ: 収穫 45 日前まで