

有機肥料の養液栽培

誌名	農業および園芸 = Agriculture and horticulture
ISSN	03695247
著者名	篠原,信
発行元	養賢堂
巻/号	81巻7号
掲載ページ	p. 753-764
発行年月	2006年7月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



有機肥料の養液栽培

—— 並行複式無機化法による養液内微生物生態系構築法 ——

篠原 信*

[キーワード] : 馴化培養, バイオフィーム, ゼロ・エミッション, 並行複式無機化法, 養液内微生物生態系

1. はじめに

養液栽培で有機肥料を使う。それも、何の前処理もしない有機物を養液に直接添加する形で。それが、この記事で紹介する技術の骨子である。

だが、それを聞いたとしても、養液栽培をよくご存じない方は、まず驚くことはほとんどない。「養液栽培って有機肥料を使えなかったのですか？」と逆に不思議に思われることのほうが多い。有機肥料の利用は土の栽培では当たり前のことなので、養液栽培で利用することも技術的に困難だとは思われないためだろう。

だが、養液栽培を知る人なら、実際には化学肥料しか使うことができないことはよく知られた事実であった。もし養液の中に有機物を入れれば、まず間違いなく作物の生育がおかしくなる (Elbertら 2005)。有機物は腐敗するだけに終わり、生じるアンモニアや低分子の有機成分が作物の根に障害を与えてしまうからである。養液に有機物が混入することはむしろ避けなければならない、というのが常識であったといつてよいだろう。このため、養液栽培で無機成分だけの化学肥料を利用することは当然のこととされてきた。

だが、考えてみれば不思議なことである。土壌の中だと有機物は問題なく無機化され、養分として植物に吸収される。このスムーズな流れが、どうして養液の中では実現できないのだろうか。

理由は簡単なことである。養液の中には、無機化のために働く微生物がないからである。土でも熱殺菌すると、有機物の分解が十分に進まず腐敗するだけに終わる。無機化が進むには、無機化に働く微生物が一揃いそろっていなければならない。ならば、養液の中に無機化に必要な微生物が

すべて生息するようになれば、有機物を養液内で無機化することができるはずである。

ところが、無機化の過程 (図1) で最も重要な役割を果たす硝化菌には、取り扱いの難しい2つの特性がある。アンモニアから硝酸を生成するこの細菌は、固体表面に定着する必要がある。また、有機成分に感受性で、有機成分の曝露を受けると死滅することもあるという性質を持つ。硝化菌の有機成分に対する感受性は高く、微生物実験でよく用いられる寒天では増殖せず、シリカゲルやゲルライトなどの無機性の物質で代用しなければならないほどである (木村 1989)。土の中ならば硝化菌は土壌粒子に定着し、その間隙などに潜んで有機成分の曝露から逃れることもできる。しかし、水の中では定着すべき土壌粒子もなく、有機成分の曝露を直接受けることになる。このため、硝化菌を水の中に添加しただけでは、有機物を加えることで簡単に硝化菌が死滅してしまう。水の中では有機物の分解が往々にしてアンモニアまでしか進まないのは、このためだと考えられる。

しかし、作物の多くは好硝酸性植物であるた

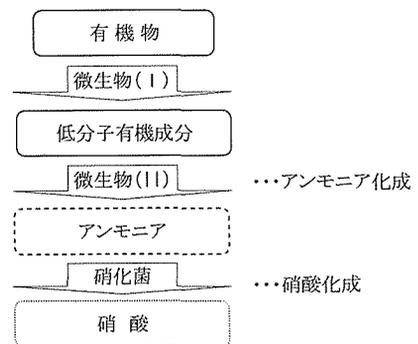


図1 有機物の無機化過程

有機物はまず低分子のものに分解され、そのうち窒素成分はアンモニアに分解されてから硝酸へと分解が進む。硝酸化で働く硝化菌は有機成分に弱く、大量の有機物の曝露を受けると死滅してしまい、分解はアンモニアまでで停止してしまう。

* 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構
野菜茶業研究所 (Makoto Shinohara)

め、アンモニアは好ましい窒素肥料だとはいえない。アンモニアを多く含む養液を与えると、アンモニア過剰障害が出てしまう恐れがある。

このため、養液栽培装置に有機肥料を直接添加することはこれまで事実上断念されてきた。その代わりに、有機肥料をあらかじめ微生物により分解しておき、一種の無機肥料にしてから養液栽培に利用するという研究が行われてきた。まずは、それらの研究事例を紹介しておこう。

2. これまでの有機肥料利用の取り組み

アメリカでは、96~98年にケネディ宇宙センターからいくつかの論文が提出されている (Garlandら 1998)。宇宙ステーションでの長期間の滞在を可能にするためには、宇宙での食料生産を考えなければならない。その際、作物を栽培したときに出る植物残渣や、人体から排出される糞尿を肥料として利用する方法を確立することが重要となるが、宇宙に土を持ち込むことは問題が起きる恐れがあるため、養液栽培の方法が検討されている。ジャガイモ植物残渣を微生物処理して無機化し、これを養液の肥料に利用する方法なのだが、養液内に有機成分が残存するのを避けられず、これが作物の生育に悪い影響を与えてしまっている (Mackowiakら 1996)。これは有機成分が腐敗し、作物に害のある (phytotoxic) 成分が生じるためであると考えられる。

ニュージーランドでは、魚と海草を原料とする有機液肥を用いてレタスの養液栽培が試みられている (Nicholsら 2004)。この有機液肥はあらかじめ微生物により硝酸などに無機化したものであるようだが、詳細は不明である。これもやはり液肥に有機成分が残存し、作物の生育を阻害する結果となっているようである。

国内では、メタン発酵消化液や家畜糞尿を養液として利用した養液栽培が試みられている (遠藤ら 2004, 宮田ら 2005)。マサ土や山土を培地に用いた養液土耕的な方法では良好な結果が得られているが、湛液式水耕やNFT、ロックウールなどの養液栽培では生育が不良になることは避けられないようである。

これらの研究では、あらかじめ有機物を無機化してから養液に利用したり、土壌を培地に利用す

ることで問題を解決しようとしてきた。だが、湛液式水耕などでは生育障害の発生が避けられない。土壌を培地に利用すると栽培は安定するが、養液土耕のとなり養液栽培の本来のメリット (消毒が容易、養液組成を自由に変更できることなど) を十分活かせなくなる恐れがある。

有機肥料を利用しようとする限り、たとえ事前に無機化を進めたとしても有機成分の残存は免れない。ならば、養液内に無機化を行う微生物を生きさせることが、重要な技術的課題として再び浮かび上がってくる。この課題を達成するには、すでに述べたように、有機成分の存在する水溶液内で、硝化菌をいかに活動させうるか、ということにかかってくる。

硝化菌が有機成分の存在下でも死滅しないようにするための手法として、馴化培養の方法が考えられる (Godaら 2001)。馴化培養は微生物の培養に使われる一手法で、微生物が苦手とする成分を増殖に悪影響のない程度の低濃度で添加し、徐々に濃度を高くしていくことで、その成分に微生物を順応させる方法である。

硝化菌が有機物を苦手としていても馴化培養の手法を取り入れれば、硝化菌を死滅させなくて済むはずである。そこで、次の実験を試みた。

3. 有機物の徐添加

プランターに15Lの井水を張り、50gの園芸培土を添加し、エアポンプ (NISSO α 4000) で曝気した。初日にコーンスティブリーカー (CSL, トウモロコシ浸漬液) を5mL添加した後、毎日CSLを1mLずつ添加した。その結果、添加開始10日目にアンモニアの発生がピークを迎え、それと同時に硝酸が生成し始め、15日目には硝酸濃度は2,400mg/L以上に達した (図2)。添加したCSLに含まれる有機態窒素のうち、98%以上が硝酸にまで分解されたことになる。このように、馴化培養の手法を取り入れ、初期の有機物添加量を抑え、徐々に有機物を添加する (徐添加) ことにより、硝化菌の生存を妨げないようにし、効率的に硝酸を生成させることに成功した。

有機態窒素からアンモニアまでの分解、アンモニアから硝酸を生成する反応は、嫌気槽と好気槽の2つの反応槽に分けて行われることが多いが、

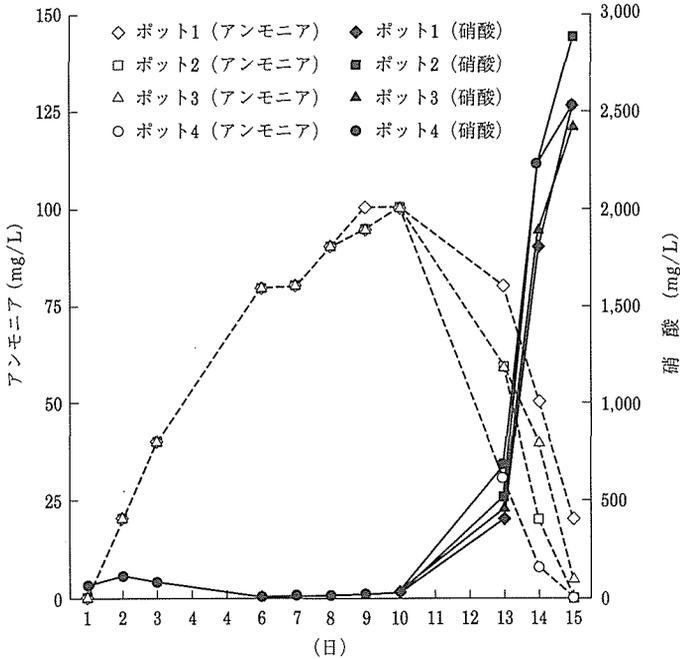


図2 有機物の無機化過程

15Lの水に園芸培土50gを添加し、曝気しながらCSLを初期に5mL、以後毎日1mLを加えた。

あえて1つの分解槽で同時に行えるはずだと考えることができたのは、日本酒の醸造で行われる並行複式発酵法 (multiple parallel fermentation) の知見があったためである (栃倉ら 2001)。

デンプンを原料とするアルコール発酵では、デンプンを糖化する反応と糖からアルコールを発酵する反応と2つの段階がある。世界の多くの国では、この2つの反応を分けて行う (ビールでは麦芽によりデンプンを糖化した後、酵母によるアルコール発酵を進める) が、日本酒醸造では、麴による糖化反応と酵母によるアルコール発酵という2つの反応を同時に行うという、世界的にも珍しい高度な技術を使っている。

今回成功したこの方法も、アンモニア化成と硝酸化成の2つの反応を同時に行うものであり、並行複式無機化法 (multiple parallel mineralization) と呼ぶことができるだろう。

4. 栽培

この養液を利用したポット栽培試験を行ったところ、良好な結果が得られた。

上記の並行複式無機化法により、プランター内の水にCSLを添加し硝酸の生成がピークを迎えてから (硝酸 310mg/L, アンモニア 10mg/L, PO₄ 94mg/L), サラダ菜1週間苗を13株定植し、温室内で栽培を行った (平成17年8月18日~9月14日)。CSLの養液への添加量は8月22日から31日まで1mL, 9月1日から13日まで2mLとした。CSLの添加は養液内に直接注ぐ方法を取った。比較のため、対照区は大塚ハウス肥料を窒素投入量が同じになるように添加した (CSLの窒素含量が3%として計算)。ただし、CSLにはカルシウムやマグネシウムといった無機成分が不足しているため、これを補うために有機区にカキ殻石灰を60g添加した。

た。

この結果、サラダ菜の収穫量 (13株) は有機区 (CSLを添加した区) で350.29g, 化学区 (大塚ハウス肥料) で312.38gであった (図3)。有機区の方が収量が多かったが、これはCSLに含まれる窒素含量が実は3%ではなく3.3%と約1割多いことが理由だと見られ、有機区でも化学区とほぼ同等の収量が得られたといえよう。試食の結果も良好であった。



図3 サラダ菜の栽培試験

収穫後のサラダ菜。左が有機区 (CSL)。



図4 トマトの栽培試験

左列が有機区 (CSL), 右列が化学区 (大塚ハウス肥料)。

トマトのポット試験も同様に行ったところ、良好な生育を見せた (平成17年8月5日～10月27日)。最初に3Lの水を入れたポットに園芸培土10gを入れてエアープンプで曝気し、CSLを毎日1g注ぎ、約2週間で窒素成分のほとんどが硝酸に変わったことを確認してからトマト2週間苗を定植した (1本/ポット)。カキ殻石灰は1ポットに50g添加した。トマトの吸水量が大きくなってきた後、15Lのポットに移し、カキ殻石灰を100g追加してCSLの添加量を5g/日に増やした。

その結果、図4のように化学肥料と同等の生長が見られた (ただ残念なことに、シルバーリーフコナジラミによる黄化葉巻ウイルス病が発生したため栽培の継続を断念せざるを得なかった)。

その後、コマツナ、チンゲンサイなどの栽培を試験しており、良好な結果が得られている。

栽培期間中の養液の組成を表に示しておく。ナトリウムがやや多く、マンガンが少ない傾向がある他は、大塚ハウス肥料を使った化学区の養液と近似した値を示している。

5. 栽培マニュアル

有機肥料を使った養液栽培をどのようにして行

えばよいか、プランターサイズ (15L) で行う場合を例に紹介しておこう。

< 必要な材料 >

プランター (15L), 発泡スチロールの板 (苗定植用の穴あき), 遮光用ビニール, 曝気用エアープンプとチューブとストーン, 水切り袋 (台所の三角コーナーに用いるもの), バーク堆肥 (あるいは園芸培土), 鰹煮汁あるいはフィッシュソリュブル, カキ殻石灰, サラダ菜などのタネ

< 手順 >

○「水づくり」期間

- ①プランターに水を張り、エアープンプで曝気する。
- ②バーク堆肥50gを水切り袋に入れ、水の中に浸す。
- ③水に光が差し込まないように遮光用ビニールをかぶせて、水に鰹煮汁を1.5g、毎日添加する。面倒な場合は、3日ごとに4.5g加えても構わない。養液のアンモニア、硝酸濃度を測定用試験紙 (例・メルコクェント) などで測定し、記録する。鰹煮汁の添加量は、合計で21gを超えないようにする。21gを入れた時点でまだアンモニア濃度が高い (20mg/L以上) ようであれば、曝気をつけてそれ以上の有機物の添加はやめておく。

○栽培期間

- ④有機物添加から2週間後 (※水温が25℃程度の場合) に硝酸の濃度がピークを迎えたら (硝酸200～400mg/Lの範囲, アンモニア10mg/L以下), あらかじめ育てておいたサラダ菜の1週間苗をスチロールの穴に定植し、プランターに浮かべる。
- ⑤カキ殻石灰150gを水切り袋に入れ、水の中に浸す。
- ⑥養液に光が差し込んで藻が生えてこないよう、遮光用ビニールでプランターを覆う。
- ⑦鰹煮汁を1日に0.5g、養液に添加する。葉長が4cmを超えたら、添加量を1日に1gにする。添加は3, 4日ごとにまとめても構わない。
- ⑧約1カ月で収穫。そのまま次の苗を定植・栽培することが可能 (図5)。

表 栽培期間中の養液の成分組成 (単位: mg/L)

	NO ₃	NH ₄	K	Na	P	Ca	Fe	Mg	Mn	B
有機 (CSL)	310	n.d.	50.18	58.76	14.54	54.16	0.267	13.41	0.024	0.089
化学	270	2.5	40.02	7.59	13.86	49.26	0.249	14.96	0.474	0.196

コマツナを栽培している期間中の養液組成を調べた。硝酸、アンモニアはRQflexで、その他はICPで測定した。
n.d.: not detected.



図5 CSL, 鯉煮汁による栽培
左側のサラダ菜がCSL, 右側が鯉煮汁での栽培。

このように作物を定植する前に、有機物を速やかに無機化する微生物生態系ができるまで、水の中に有機物を少しずつ添加する、「土づくり」ならぬ「水づくり」期間を設けることで、以後の栽培が可能になる。「水づくり」期間後は、3~4日ほどで有機物に含まれる有機態窒素が硝酸にまで分解される。

6. どんな有機物が使えるか

CSLや鯉煮汁以外に、ナタネ油粕, コーン油粕, 魚粉, 乾燥ビール酵母, トマト茎葉腐汁, メタン消化液などでも、とくに問題なく栽培できること

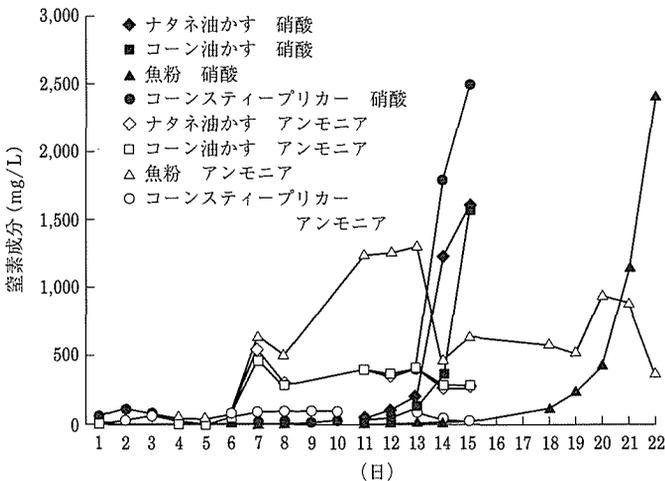


図6 種々有機物の無機化

三角フラスコに100mLの蒸留水, 1gの土, 1gの有機物を入れ, アンモニア, 硝酸の濃度を測定した。魚粉は硝酸の濃度がピークを迎えるのに3週間かかった。その他の有機物は2週間でピークを迎えた。

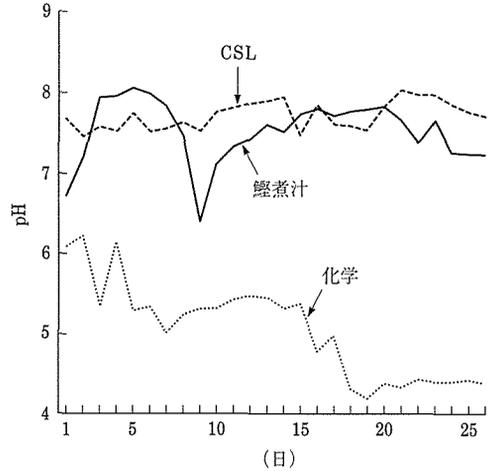


図7 栽培期間中のpHの変動
循環式のDFT(栽培ベッド, 養液タンク合計で140L)でサラダ菜を栽培したときのpHの変動。プランター栽培(14L)時は、鯉煮汁の区はpH5強, CSL区はpH6.8前後で安定した。

が分かっている(図6)。

また、並行複式無機化法で硝酸にまで分解することを確認している有機物としては、他に牛乳, オカラなどもある。

7. 本技術の特徴

有機肥料を使ったこの栽培では、いくつかの興味深い特徴が見られる。

(1) 悪臭が発生しない

有機物の分解時には、腐敗臭などの悪臭が付きまとうのが常だが、この栽培ではほとんど臭わない。悪臭が発生するのは分解が十分に進まずに低分子の有機酸などが大量に生じ、大気中に揮散するためであるが、この栽培では有機物の分解がスムーズで速やかに無機化されるため、異臭の原因物質が貯留することがないようである。

(2) pHが中性付近で安定

化学肥料による養液栽培では、pHの調整が必要になることがあるが、有機肥料によるこの栽培ではpHの調整はとくに必要ない。pHは中性付近(6.8~8.0)で安定する(図7)。これは、カキ殻石灰による緩衝効果と、養液内の微

生物そのものが pH を安定化させる働きを示しているものと考えられる。

(3) 化学肥料による成分調整が不要

これまでの有機肥料を用いた養液栽培の試みでは、肥料成分のアンバランスが問題となり、化学肥料で不足する分を補わなければならないことが多かった。これは、養液に利用する前の無機化過程で、沈殿物や有機成分を取り除いてしまうために重要な成分まで除去してしまうことになるからだと考えられる。だが、本技術では有機物を直接養液に添加するため、有機物に含まれる成分バランスがそのまま反映されるようである。ただし、多くの有機物はカルシウムやマグネシウムなどの無機成分が不足しているため、カキ殻石灰を添加することにより補う必要がある。カキ殻石灰（粒状、粉末状のいずれでも良い）は水切り袋などに入れてつり下げておけば、十分必要な量の成分が溶け出す。

(4) 維持が容易

普段必要な操作は、生育に応じた量の有機物を養液の中に直接添加することだけで、特別な処理は他に必要ない。

(5) 有機成分による生育障害が起きない

はじめの方で述べたように、これまでの養液栽培で有機肥料を利用する試みでは、養液内に有機成分が存在すると生育障害が現れていたが、本技術での栽培ではそれが見られない。それは、根に起きている現象と深く関わっているようである。

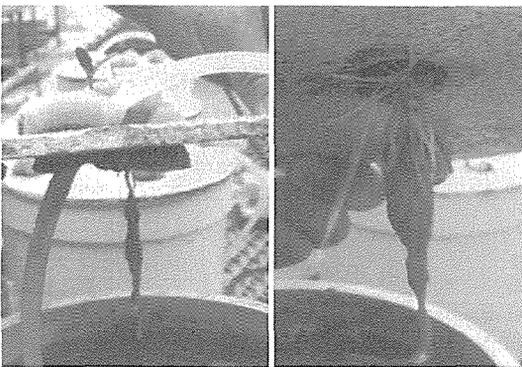


図8 定植後の根

トマトなどの苗を養液に定植すると、その日のうちに大量のバイオフィームが付着した（写真左側）。3日を経過すると新しい根が叢生し、肥料の吸収が活発になった（写真右側）。

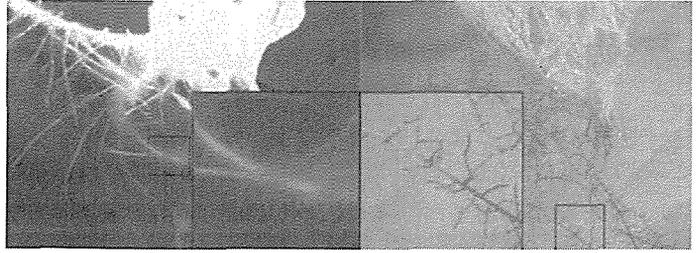


図9 湛液式の栽培における根の構造

化学肥料による湛液式の養液栽培では、典型的な水中根となり、根毛は見られない（写真右側）。有機肥料（CSL）による栽培では、根毛の発達が見られる（写真左側）。

次に、それを説明しよう。

8. 根に起きる現象

これまでの養液栽培に有機肥料を用いる試みでは、有機成分が養液に存在すると生育障害が出ると上で述べたが、本技術による栽培ではそういったことは見られない。それを可能にしているのは、根で起きている現象に関わりがあるものと思われる。

トマトなどの苗を植えると、根がバクテリアの塊（バイオフィーム）で包まれる（図8）。3日後以降は新しく白い根が叢生し（図8）、肥料の吸収が活発になる。これと同時に濁っていた養液が透明になっていく。有機物を添加すると1時間くらいは微生物が増殖し、やや濁った状態になるが翌日には同じレベルにまで養液が透明になる。この養液が透明度を増していく現象は、トマトやサラダ菜などの苗を植えてから急速に進むことから、養液内の微生物と根に何らかの相互作用が起きているものと考えられる。

微生物との相互作用の証拠の1つと思われるのが、根毛の発達である。通常、湛液式水耕では水中根といい、根毛のない根が発達するのが普通であるが、有機物を肥料に添加した本技術での栽培では、根毛が非常によく発達する（図9）。曝気などの条件を同じにした化学肥料での栽培では、このような根毛の発達は見られない。化学肥料を使った栽培でも空中に露出した根（湿気中根）には根毛が発達することが知られているが、本技術での栽培では完全に水に浸かった状態の根で根毛の発達が見られる。根毛の発達が微生物との相互作用

用によって誘導される可能性を示すもので、非常に興味深い。この根毛を、薄くバイオフィームが覆う構造となっている。

このように、有機肥料を使った栽培では、根がバイオフィームで包まれ、養液に添加された有機成分が根に直接曝露することがない構造となっている。また、植物も養液内の微生物に働きかけ、養液内の微生物叢を大きく変化させているようである。このあたりの現象は、今後の興味深い研究テーマとなるだろう。

根が微生物の膜で覆われているということから、さらにもう1つ、興味が湧いてくることがある。病原菌の侵入に対してどのような反応を示すか、ということである。

9. 青枯病の抑止

結果は期待通りとなった。青枯病菌を養液内に接種したところ、化学肥料区は青枯病で次々に枯死していったが、CSLを肥料とした有機区では1株の発病株も出なかった(図10)。実験は3回繰り返したが、結果は同様であった。養液内の青枯病菌の検出を試みたが、有機区では検出することができなかった。養液内の微生物、あるいは根に付着しているバイオフィーム内の微生物が、青枯病菌に対し何らかの作用を及ぼしたものと考えられるが、今後メカニズム解明を進めていきたい。

また、青枯病ではないが、他の有機物を使った

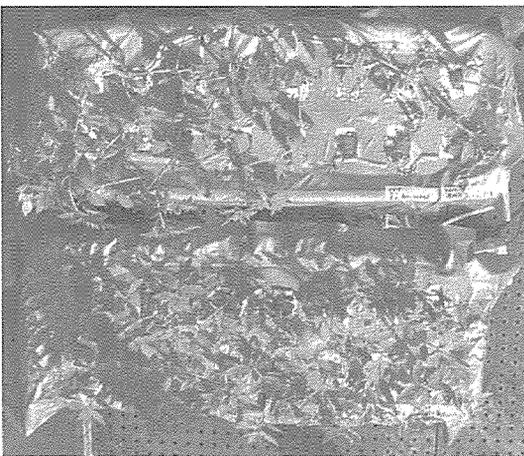


図10 青枯病接種試験

青枯病菌を接種し、人工気象機内で昼夜32℃に設定した。化学肥料(写真上側)区は多数の青枯病発病株が現れたが、有機肥料(CSL)区(写真下側)は発病株が現れなかった。

栽培でも、根腐れに強い傾向が認められる。化学肥料の栽培では、有機区の養液を触った手で化学区の養液を触ると数日後には確実に根が褐変し始め、根腐れを起こしてしまう。また、化学肥料の栽培では塵埃の飛び込みでも根腐れを起こすことがあるが、有機肥料による本技術の栽培では少々の塵埃の飛び込みがあっても、根腐れを起こしたことがない。水温が高く(25℃以上)になるとサラダ菜などの湛液式水耕では根腐れが非常に起きやすくなるが、有機区では水温が32℃に達しても問題が生じていない。有機肥料の栽培では、いずれの条件でも根腐れをこれまで経験していない。今後、ピシウム菌や疫病菌などを試験的に接種し、詳細な検討を進めていきたい。

10. 本技術の応用

本技術は、どのような応用可能性があるだろうか。現時点で考えられることを指摘しておくたい。

(1) 根部病害を抑制する方法

本技術を利用すれば有機肥料による養液栽培が可能であることは、これまで述べてきたとおりである。また、興味深いことに、根部病害の抑止効果があるという結果が部分的ながら出てきている。今後詳細に検討していかなければならないが、養液内の微生物生態系が青枯病菌などの増殖を抑える結果となっているようである。このことは、従来の化学肥料での養液栽培にも応用可能と思われる。すなわち、微生物生態系維持の目的で一定量の有機物を養液に添加し、肥料成分のコントロールは化学肥料で行うことにより、根部病害を抑止し、養液の成分制御をこれまで通り行えるようにするのである。これが可能であれば、養液栽培の長所を最大限生かしながら、病原菌の侵入に弱い欠点を補えるかも知れない。

化学肥料を用いる養液栽培は、実は病原菌の侵入にもろいという弱点がある。これは、微生物学実験でよく行われる手法である「集積培養法」と環境が似通っていることからいえることである。集積培養法とは、本来分解しにくい成分でも、それだけを栄養源として含む培養液で微生物を培養すると、やがて適応能力のある微生物が選択的に増殖し、集積してくることを利用した培養

法である。化学肥料を使った養液栽培では、養液内に存在する有機成分は植物の根だけである。これでは、根を分解する微生物をわざわざ集積培養する環境を整えてしまっているようなものである。病原菌の侵入に弱いのはこのためだと考えられるが、有機物を添加し養液内に微生物生態系を構築する本技術と組み合わせれば、病原菌が集積培養されることもなくなるものと思われる。

(2) 有機物分解と作物生産

本技術の大きな特徴の1つが、無処理の有機物を使って養液栽培が可能なことである（したがって、「有機肥料」ではなく「無処理の有機物を肥料として使う」というのが正しい）。現在、日本の社会では生ゴミなどのさまざまな有機資源が廃棄されているが、これを分解処理するには時間とコストがかかる。しかし、この技術を使えば、有機物の分解を行いながら作物の生産を同時に行うことができる。堆肥化や微生物分解をあらかじめ行う必要もなく、養液栽培装置があれば有機物分解と作物の栽培が同時に可能となる。

(3) ゼロ・エミッションの養液栽培

トマトは脇芽がよく出るので、これを取り除かなければならないが、栽培面積が大きくなると植物残渣の量も大量になり、畑への鋤き込みでは追いつかなくなってくる。だが、トマトの葉や根には窒素成分が多く含まれており、肥料として有望である。トマトの脇芽を水に浸して10~20日ほど腐敗させた液は、本技術の肥料として良好な結果が得られたことから、植物残渣を養液化して利用することが可能であると思われる。トマトの養液栽培はha規模の大規模なものになっており、排出される植物残渣も大量になっている。これらをすべて養液化し栽培に再利用できれば、ゼロ・エミッションの養液栽培を実現する一助になるものと思われる。現在、小規模で栽培試験を計画しているところである。

(4) 有機物を原料とする無機肥料の製造

並行複式無機化法を使えば、有機物を原料に即効性の無機肥料を製造することが可能である。水温が25℃の場合、有機態窒素を硝酸にまで無機化するのに、ほとんどの有機物で2週間あれば終了する。有機物を原料として無機肥料を製造する有効な方法はこれまで提案されていないようであ

り、本技術は無機肥料の新たな製造法としても期待できるものと思われる。

11. 本技術が開発されるまでの手法

本技術を開発するまでには、実際にはかなりの失敗と紆余曲折がある。とくに、有機物を無機化する条件を見つけ出すために、さまざまな検討を行っている。その中で検討した手法をいくつか紹介しておこう。

(1) 土壌カラムによる有機物無機化

土の中では有機物がスムーズに無機化されるのであれば、土を詰めたカラムを使えば有機物を分解無機化し、養液を製造できるはずだと考えたのがこの手法である(図11)。土壌の中では硝化菌などの無機化に必要な微生物が安定して生息できるため、無機化は確かにスムーズに進む。有機物を添加し、翌日蒸留水で洗浄するという操作を繰り返すと、10日目前後で硝酸の発生がピークを迎えた。しかし、硝酸の生成はすぐに低下し、アンモニア濃度が高くなるとともに流出液の微生物が増加した。最終的には硝酸が生成されなくなり、アンモニアと微生物だけの流出液となってしまった。

これは、土壌中の微生物が増殖して、バイオフィームを形成する結果、カラムの通気性・通水性が悪化し、カラム内部が嫌気状態になってしまうためである。1カ月も有機物の添加を行うと、カ

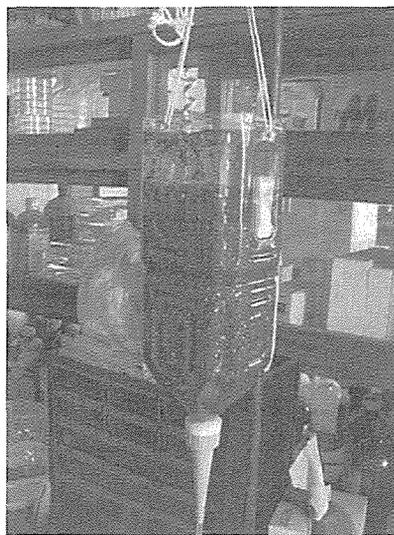


図11 土壌カラム6

ラムはほとんど水を通さなくなる。カラムの構造をトレー型に薄層化したり、強制的にエアープンプで土壌内を曝気するなどの改造を施せば、硝酸生成の寿命を延ばす(50日弱)ことが可能だが、バイオフィルムの発達による土壌の嫌気状態がどうしても生じ、硝酸の生成効率が悪化することは避けられない。有機態窒素の硝酸への変換効率は9.9%、アンモニアを含めた効率でも18.4%となり、効率はかなり悪い。有機態窒素のほとんどが微生物の菌体に取り込まれてしまうものと思われる。

(2) 初期のみの有機物添加

本技術では有機物の添加を少しずつ徐々に行うことを勧めているが、有機物添加量が適切であれば、初期の添加だけでも効率よく無機化する。有機態窒素が硝酸に分解される効率はこの方法でも90%を超え、高い無機化効率を示す。この方法では有機物添加が初期だけで済むので、手間がかからない。

ただし、有機物の添加を徐々に行う方法(徐添加)と比べ、無機化することができる有機物の量は、結果的に少なめとなってしまう。また、無機化終了後に有機物を再添加すると、徐添加の方法で無機化した養液ではスムーズに無機化が進む(3~4日)のに比べ、時間がかかりかかる(7~14日)。これは、徐添加だと有機物が無機化するまでの各段階で働く微生物が常に活性化した状態で維持されるが、初期のみの有機物添加だと有機物を最初に分解する微生物の活動が低下してしまい、活動を再開するのに時間がかかってしまうためと考えられる。

このため、初期のみの有機物添加で作製した養液に作物を定植し、有機物の添加を行うと、無機化がスムーズに進まずにアンモニア過剰障害などが出る恐れがある。

(3) 水流ポンプの利用、振盪培養分解法

本稿ではエアープンプによる曝気の方法を紹介したが、むしろ、水流ポンプで吸い上げて滝のように落とす方法や、振盪することでも曝気が可能である。

三角フラスコ内の水に1%重量程度の土、1%重量程度の有機物を入れ、振盪培養すると、25℃の条件の場合、約2週間で硝酸まで分解することが

できる。

水流ポンプの利用や振盪培養は、物理的な力で水全体を攪拌することができるので、沈殿しやすい固形の有機物を無機化するのに適している。ただし、水流ポンプの種類によってはポンプの熱が水溶液に移ってしまい、温度が高く(40℃)なりすぎて微生物が死んでしまうことがあるので注意が必要である。

12. 本技術の注意点

これまでの実験の中で、気付いた点を書き留めておく。

(1) 温度感受性

13~34℃の範囲の水温であれば、栽培が可能である。ただし、水温が40℃を超えると硝化菌が死滅してしまい、有機物の分解はアンモニアまででストップする。また、水温が15℃程度に低下すると有機物の分解が遅くなり、そのために化学肥料に比べて作物の生育が遅くなる傾向がある。本技術での栽培では、水温を20~25℃程度の高めに維持することが望ましいようである。

(2) カキ殻石灰の効果

カキ殻石灰を添加せずにCSLや乾燥ビール酵母のような有機物だけで栽培すると、葉の黄化が見られる。カキ殻石灰を添加するとこの症状は治まる。これは、カキ殻石灰によりマグネシウムなどの成分を補うためだと考えられる。有機物を硝酸まで分解した水溶液は、大量の硝酸を含むためにpHが5以下と低くなるが、カキ殻石灰の添加で中和され、以後はpHの変動を抑える効果がある。カキ殻石灰は粒状のものでも構わず、紅茶のティーバッグのようにつり下げて、ときおり揺すってやればよい。ナタネ油粕などの固形の有機物を肥料にする場合は、カキ殻石灰が不足しがちな傾向がある。その場合は、カキ殻石灰の通常の添加量が養液1L当たり10gのところを、20gに増量すると良い。

(3) 微生物接種源の種類・量

微生物接種源として添加する土壌は、微生物の豊富な自然の土であれば何でも構わない。バーク堆肥も使用可能である。微生物の貧しいやせた土だと分解する有機物の量によっては硝化菌が死滅してしまい、分解がアンモニア止まりになること

がある。土の添加量は水1Lに対し5g程度が目安となる。1L当たり1g以下になると分解がアンモニア止まりになることが多くなる。ただし、分解を行う水の容積が大きくなる場合、土の添加量は相対的に少なめで構わなくなる。微生物接種源としての土壌は、栽培期間中に養液から取り出しても構わない。栽培装置の壁面などに必要な微生物が定着するためだと考えられる。ただし、すでに微生物生態系が完成した養液に、新たに大量の土を加えてはいけな。微生物生態系が乱れてしまい、落ち着くまで時間がかかる。塵埃程度の少量では問題にならない。井水などの自然水では、土壌の添加を必要としないケースもある。これは、井水などには土壌微生物がわずかながら存在するためと考えられる。「水づくり期間」での有機物の1日の添加量を水1L当たり0.2g以下にすれば、土壌添加無しに井水だけで硝酸にまで分解することができる。ただし、三角フラスコでの振盪培養法だと井水だけではうまく無機化しない。硝化菌が定着できる固体表面がないためであると考えられる。ところが、海水は三角フラスコによる浸透培養法でも硝酸にまで分解することが可能である。海水中の硝化菌は土壌中の硝化菌とは性質が異なるようである。

(4) 初期生育の遅れ

養液に定植して3日間は、植物の根が養液内の微生物と関係を構築する順化期間になっているようである。この間は肥料の吸収がほとんど見られず、かわりに根に大量のバイオフィームが付着し、養液の濁度が低下して透明度が増していくなど、大きな変化が見られる。定植3日後には新しい根が叢生し、生育が急速に活発になるので、心配する必要はない。ただ、定植して3日間は肥料の吸収もないこともあり、有機物の添加を控えた方がよい。

(5) 有機物添加量の目安

養液栽培で施肥量の目安にされることの多いECは、本技術ではあまりよい目安にならない。硝酸が全部吸収されてもECが1.2以上を示すこともあり、施肥量の参考にならない。現在のところ、硝酸濃度とアンモニア濃度をモニターするのがよいように思われる。硝酸濃度は400mg/L前後を維持すると安定した生育が見られる。アンモ

ニア濃度は20mg/L以下であることが望ましい。栽培期間中は、通常10mg/L以下となる。20mg/Lを超えるときは作物が肥料を吸収する以上に有機物を過剰添加しているか、エアーポンプの出力が落ちて曝気量が低下し、有機物の分解が遅れていることを疑ってみた方がよい。

(6) 添加する有機物の変更

添加する有機物の種類を途中で変更する可能性がある場合は、ごく少量でもブレンドして、あらかじめ添加しておくことが望ましい。添加する有機物の種類が途中で変わると、新しい有機物を分解する微生物生態系が構築し直されるまで7~10日かかることがあり、その間、アンモニア濃度の上昇などが起きて作物の生育を悪化させることがある。複数種の有機物を組み合わせて使用したい場合は、「水づくり期間」にごく少量でもよいので、加える予定のすべての種類の有機物をブレンドして添加しておいた方がよい。

(7) 有機物添加の間隔

毎日添加するのが面倒ならば、3~7日おきの添加でも構わない。ただ、あまり添加の間隔を空けすぎて有機物の添加が大量になると、一時的にアンモニア濃度が高まるなどの問題が生じることがあるので、3日程度の間隔で添加するのが望ましい。

(8) 添加する有機物の条件

並行複式無機化法で硝酸にまで無機化できる有機物は、C/N比が11以下である必要がある。牛乳(C/N比10.8)は硝酸にまで無機化することができるが、焼酎粕(同11.78)、米のとぎ汁(同17.16)はアンモニアも硝酸も生成しない。炭素分比べて窒素分が少なく、微生物が窒素分を菌体内に取り込んで放出しないためと考えられる。

(9) 消泡剤

CSLの場合、添加量が0.5g/Lを超えると曝気に伴う発泡が激しく、ポット外に吹き出してしまうことがある。このような場合には消泡剤としてサラダ油を養液に200~400 μ L程度加えると発泡を抑えることができる。サラダ油は翌日には分解されるので、そのつど添加する必要がある。CSL以外の有機物は発泡が問題になることは少ないので、サラダ油を添加する必要はない。

(10) 病害抑止効果

本稿ではトマト青枯病の抑止効果を紹介したが、これは苗を養液に定植して3日後以降であることに注意が必要である。苗が養液に定植される前、あるいは苗の根が養液内の微生物と順応している最中の3日間に青枯病菌を接種すると、青枯病抑止効果は見られない。青枯病抑止効果は根と養液内の微生物生態系との関係が構築し終わった後であり、苗を植える前の「水づくり期間」に青枯病菌などが侵入しないように注意する。

(11) 曝気 の 量

8月のハウス内の栽培環境で、毎日5gのCSLを15Lのポット内に添加しトマトの栽培を行った場合、エアープンプ(NISSO α 4000)による曝気では2L/minでは不足し、4L/minで十分であった。曝気が不足すると、サラダ菜やトマトでは日中の日差しで葉がしおれるようになる。このときの養液を調べるとアンモニア濃度が20mg/L以上と上昇しており、アンモニア過剰障害が現れたものと思われる。曝気量が十分であればアンモニア濃度が低下し、葉のしおれは見られなくなる。栽培装置が大きくなると、必要とする曝気量は低下する傾向が見られる。

(12) 養液の保存

曝気だけ続けていけば、養液内の微生物生態系を半年以上維持できる。7カ月を経過してから有機物を添加しても、スムーズに無機化が進む。養液を取っておきたい場合は、小さなエアープンプで構わないので、曝気しておくとの良い。



図12 サラダ菜の循環式養液栽培
写真は CSL による栽培。

1.3. 現在の状況

現在、実用レベルをイメージしたやや大きな栽培装置で試験を行っている(図12)。循環式のDFTでサラダ菜、コマツナを栽培し、良好な結果が得られている。ただ、比較すべき化学肥料の区でたびたび根腐れが発生していることが現在の悩みの種である。水温が日中に32℃を超えるようになり、溶存酸素も2mg/L強と低くなっているためだが、有機区では根腐れなどの問題は起きていない。これは想定外のこと、微生物が有機物を分解しなければならない分、酸素を必要とするはずだが、ポット栽培と比べ容積が10倍(140L)になったことにより、必要な曝気量が相対的に少なく済むようになったようである。

今後も葉物野菜やトマトなどの栽培試験を行い、収量比較を行う予定である。

1.4. おわりに

本技術は、微生物の力により無機化する(mineralize)ことにより、有機物を肥料とする養液栽培を可能にしていることから、バイオミネラル栽培と呼んでいる。バイオミネラルとは微生物の作用により生成される無機成分のことであり、微生物による無機成分への無機化は、バイオミネライゼーション(biomineralization)という。本当ならば「有機養液栽培」と呼ぶと直感的に分かりやすいのだが、有機栽培の定義が大地に根を下ろすことを条件にしており、養液栽培だというだけで有機栽培の定義から外れることになる。このため、「有機養液栽培」の名称を使わないようにしている。最近、養液内に微生物生態系を構築することこそ、この技術の特徴であると考え、養液内微生物生態系構築法とも呼ぶべきではないかと考えている。

さて、ここまで長々と書き連ねてきたが、本技術は、技術的には高度なものでも何でもない。栽培前に①有機物の添加量を少しずつにする、②微生物生態系が完成するまで2週間待つ、という2つの条件を整えれば、養液栽培でも有機物を肥料に利用することができるということを見つけたに過ぎない。微生物接種源である土は基本的にどのものでもよく、井水や海水のような自然水を用

いる場合は、土を添加しなくても構わない。栽培期間中は有機物を生育に応じた量を養液に直接添加すればよい。至極おおざっぱな技術だといえる。

ただ、上記の2条件を発見することができたのは、筆者のもとの出身が発酵生理学であり、微生物を使った物質変換の知識をいささか持ち合わせ、微生物の特性に配慮して取り扱うことに慣れてきたことが幸いしていたとはいえるかも知れない。

だが、この技術はとても筆者一人では開発できなかった。硝化菌が有機成分に感受性の菌であることを教えてくれたのは、当時室長であった上原氏である。その教示がなければ、なぜ水の中では有機物の分解がアンモニア止まりになってしまうのか、理解が及ばなかったことだろう。上原氏のもとで土壌肥料学の知識を享受することができたのが幸いした。

また、武豊(愛知県)に身を置いていたことがとても役に立った。武豊野菜研究拠点は、日本でもっとも養液栽培の研究が進んだ研究機関の1つであり、さまざまな情報が入ってくる。養液栽培で有機肥料を使うことができないということも、武豊でなければ知ることがなかったかもしれない。

この技術を開発(あるいは発見)するに当たっては、業務科員の方々、非常勤職員の方々の骨惜しみしない協力がなければ遂行することができなかった。本技術の開発はわずか1年程度の、非常に短期間でメドが立ったのだが、それには3年分に相当する実験量があった。

元室長の上原氏、武豊の研究員の皆さん、業務科員の皆さん、そして非常勤職員のお二人には深く感謝の意を表したい。

本技術はさまざまな可能性を秘めていると考えられている。病原菌の侵入にもろい、現在の化学肥料

での養液栽培に本技術を導入すれば、根腐れなどの根部病害に強い、新たな栽培法を低コストで確立できるかも知れない。また、有機物を原料に無機肥料を製造することも可能であり、肥料の選択の幅を広げることもつながる。無処理の有機物をそのまま養液に投入できるため、さまざまな有機資源を活用することも可能である。

本技術を「発見」できたことは幸運である。本技術がさまざまな形で利用されるようになることを、願ってやまない。

参考文献

- Elbert, L.E., J.G. Menzies and T. Helmer 2005. Production and quality of greenhouse roses in recirculating nutrient systems. *Sci. Hort.* 106:103 – 113.
- 速藤昌伸・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.
- 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.
- Goda, M., Y. Hashimoto, S. Shimizu and M. Kobayashi 2001. Discovery of a novel enzyme, isonitrile hydratase, involved in nitrogen-carbon triple bond cleavage. *J. Biol. Chem.* 276:23480 – 23485.
- 木村龍介 1997. 硝化作用の測定と硝化菌の計数, 分離・土壤微生物実験法. 養賢堂, 東京. 207 – 214.
- 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.
- 宮田尚稔・池田英男 2005. 養液土耕と液肥・培地管理. 日本土壌肥料学会編 119 – 155.
- Nichols, M. and K. Atkins 2004. *Organic hydroponics. Maximum Yield* vol.6 number 5, 6.
- 栃倉辰六郎・山田秀明・別府輝彦・左右田健次 2001. 発酵ハンドブック. 共立出版, 東京.