

コンクリートの都市を農地に変える技術，創製土壌

篠原 信*

〔キーワード〕：プロバイオポニックス，有機質肥料活用型養液栽培，並行複式無機化法，創製土壌，炭素貯留

1. はじめに

日本は「瑞穂の国」と呼ばれるように，農作物が豊かに育つ風土と考えられている。しかし日本の食料自給率（カロリーベース）は38%（令和元年）でしかない。なぜこんなにも食糧生産が少ないのだろうか？その大きな要因として，農地面積の狭さがある。

日本と同様の島国に，イギリスがある。イギリス（グレートブリテン島）の陸地の面積（243,600km²）は日本（378,000km²）よりも狭く，3分の2しかない。ところが農地面積は日本（43,490km²）の約4倍（172,593km²）ある（図1）。これはイギリスに平地が多いのに対し，日本は山がちな地形で，田畑に適した平地が少ないからだ。イギリスは広い平地を活かすことで高い食糧自給率（69%，2010年）を達成できていると言えるだろう。

厄介なことに，平地は都市にも向いている。日本最大の関東平野（90,000km²）には，日本の人口の4分の1に相当する約4,000万人が暮らしている。しかし，その関東平野のど真ん中の東京は，農地面積

がわずか3.4%。都市が農地を食っている。栃木などの近隣の農業県でも，大型商業施設が農地だったところで開業し，都市化が進んで農地が失われている。日本の耕地面積は最大で601.2万ha（昭和31年）が存在したが，今や434.9万ha（令和3年）と3割近くの農地を失っている。山がちな中山間地の農地は，農家にとっても栽培しづらい環境であり，耕作放棄が進み，全国の耕作放棄地は42.3万ha（平成27年）にも上り，さらに農地が失われていく傾向にある。

もし食料安全保障が脅かされる事態になった時，都市部で食料を生産することは難しい。植物を育てる土壌がないからだ。土壌がなければ，キューバが食糧危機を緩和するのに役立った都市農業も難しい。植物工場なら都市部でも可能だが，照明などに大量のエネルギーが必要となる。食料が手に入らない事態で，石油などのエネルギーが手に入るとも考えにくい。都市部は，食料が生産できない空白地帯になってしまう恐れがある。

しかしもし，土壌を人工的に創製することができたら話が違ってくる。都市部でもコンクリートやアスファルトの上に創製土壌を敷き詰めて，食料を生産することが可能になるだろう。では，どうやったら土壌を創製できるのだろうか。まずその話をする前に，土壌はそもそも人間の力では作ることができなかったというところから，話を始めよう。

2. なぜ土壌を作れなかったのか

生ごみのような有機物を肥料として畑に鋤き込み，作物を育てるのは，農業では当たり前の営みだ。しかしこれが可能なのは，土壌が特殊な能力を持っているおかげだ。

もし生ごみをコンクリートの上に置いておいたらどうなるだろうか。腐る。腐った生ごみに植物の苗を植えてみよう。根が傷み，枯れてしまうのが多いだろう。土壌中だと有機物は肥料になるのに，土壌以外の場所では腐ってしまい，植物の養分にでき



国土面積	243,600 km ²	<	378,000 km ²
農地面積	172,593 km ²	>	43,490 km ²
食料自給率 (2010年)	69%	>	39%

図1 日本とイギリスの国土面積と農地面積

ない。有機物を植物の養分に変えられる能力（無機養分生成能）は、土壌のみが備える特殊な機能だ。

このことは、土壌を一切使わない水耕栽培（養液栽培）にも当てはまった。有機質肥料を水の中に加えると水が腐敗し、腐敗した水では根が傷んで作物が育たない（図2）。このため、養液栽培では化学肥料（無機肥料）を使うしかなく、有機質肥料を使用することはできなかった。

では、土壌だと有機物は肥料になり、非土壌では有機物が腐ってしまうのはなぜだろうか？土壌中では、有機物の分解は2段階（アンモニア化成、硝酸化成）が進むが、非土壌では1段階目のアンモニア化成で分解が止まってしまう（図3）。なぜなら、2段階目の硝酸化成を担う硝化菌という微生物が有機物を苦手とし、有機物の曝露を受けると活動を停止してしまうからだ。

土壌に似たものとして岩石を粉砕したレゴリスがある。見た目には土壌と似ている。けれどレゴリスも有機物をうまく分解できず、腐らせてしまう。もし人為的に硝化菌を加えたとしても、有機物を加えたら不活性化する。この問題をこれまで解決できなかったから、非土壌を土壌に変える技術は存在しなかった。つまり、土壌を人工的に製造することはできなかった。

3. 有機質肥料活用型養液栽培（プロバイオポニックス）の開発

筆者は最初に、「養液栽培では有機質肥料が使えない」という点に興味を持った。養液栽培は約150年前に開発されて以来、有機質肥料が使えない状態

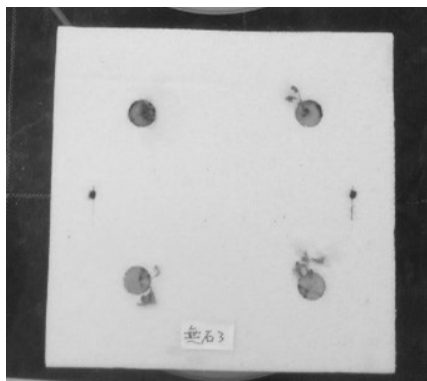


図2 バケツの水に有機物（鰹煮汁）を加えると水が腐敗し、トマトの苗は枯死した

が続いていた。できないことができるようになれば面白いじゃないか、という軽い気持ちで研究をスタートさせた。

過去の研究事例を調べると、上述したように、有機物を加えると硝化菌が不活性化するという問題を解決できていなかった。NASA ケネディ宇宙センターは Breadboard Project と題して90年代に7年間の研究を行ったが、どうしても硝化菌が不活性化し、水が腐ってしまう問題を解決できなかった。

しかし下水処理では、大量の有機物を分解する際、硝酸化成が問題なく進むことも分かった（図3）。ならば、水中で硝酸化成が進まないはずがない。ただし下水処理では余計なもう一つの反応が進む。脱窒だ。下水処理では2段階の分解（アンモニア化成、硝酸化成）だけでなく、第3の反応として脱窒が進み、硝酸を窒素ガスに変えてしまう。しかしこれでは困ってしまう。多くの作物は好硝酸性植物といって、硝酸を好んで吸収する。その硝酸が失われてしまえば、作物は窒素欠乏で育たない。

つまり、過去の研究では、1段階目のアンモニア化成で反応がストップしてしまうか、3段階目の脱窒まで進むかのどちらかになってしまうという問題を抱えていた。養液栽培で有機質肥料を使えるようにするには、2段階目の硝酸化成までは進めるが、3段階目の脱窒は抑えなければならない。しかし、そんな都合のよい制御はそれまで不可能だった。

筆者は、あるアナロジーに気がついた。日本酒の醸造だ（図3）。日本酒の醸造法は世界でも珍しい2段階の分解を行う（デンプンの糖化、糖からのエタノール発酵）。しかしうまく制御してやらないと、

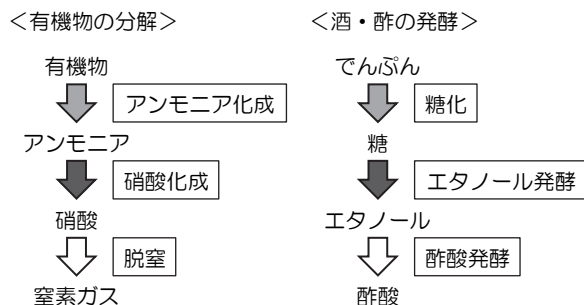


図3 土壌中での有機物分解と酒・酢の発酵
酒を造るには2段階目のエタノール発酵で分解を停止させる必要がある。土壌中での有機物の分解は硝酸化成までの2段階で分解が進むことで、植物に重要な養分である硝酸が生成する。

「酒が酔になる」という言葉にあるように，エタノールが酢酸に変わってしまう。2段階目までの分解を進めて，3段階目の分解を抑える必要がある。この「2段階目までは進めたい，3段階目は回避したい」という点が，似ていると考えた。

そこで，それぞれの微生物の特性を考えたうえで，培養方法を工夫した。その結果，以下の3つの注意点を守るだけで，水中でも2段階の分解（アンモニア化成，硝酸化成）が進み，3段階目の脱窒を抑えることができることを見出した¹⁾。

- ①微生物源として土壌を 5g/L 程度加える。
- ②有機物（有機質肥料）を少量（1g/L 以下），初期に加える。
- ③2週間以上曝気する。

なぜこんな単純な方法で，150年近くも不可能だったことが可能になったのだろうか？過去の研究者は，なるべく濃い肥料液を作りたいと考え，水の中に大量の有機物を加えていた。そのために硝化菌がダメージを受け，不活性化していた。筆者は，「毒も少しずつなら慣れるだろう」と単純に考え，有機物の添加量を 1g/L 以下に抑えた。これにより，硝化菌はダメージを耐えしのぎ，増殖できた。

また，過去の研究者は，硝化菌を他の微生物と分けて培養することが多かった。硝化菌は培養の難しい微生物として知られ，筆者が研究を始めたころ，微生物保存機関には数菌株しか保管されていなかった。他の微生物と一緒に培養すると，硝化菌が駆逐されてしまうことを過去の研究者は恐れたようだ。しかし土壌では，硝化菌は他の微生物と共存していることから，筆者は「むしろ硝化菌は他の微生物と共存すると有機物の曝露に耐えられるのではないか」と仮説を立てた。そこで一緒に培養（共培養）することにした。結果，有機物の曝露を受けても硝化菌は不活性化しにくくなった。

では，3番目の反応である脱窒をどうして抑えることができたのだろうか。過去の研究から，脱窒菌は2つの条件が同時に成立すると活性化することが分かった。一つは酸素源として硝酸が存在すること，2つめにエネルギー源として有機物が存在すること。この脱窒活性化の条件は厄介だ。有機物を分解して硝酸を作りたいのに，有機物と硝酸が同時併存すると脱窒が活性化されてしまうのだから。これでは脱窒は不可避に思えてしまう。

そこで筆者は，上述の②のように，有機物の添加量を少量に抑え，かつ，添加するタイミングは培養初期に絞った。この結果，培養初期には「有機物は存在するが硝酸はない」となり，培養後期には「硝酸が出てきたが有機物は分解しつくされてほとんど存在しない」になる。脱窒の条件である「有機物と硝酸の同時併存」という条件が崩れ，脱窒を回避することができた。

こうして，水中でも2段階の分解（アンモニア化成，硝酸化成）を同時並行的に進行させることができるようになった。この方法を並行複式無機化法（multiple parallel mineralization, MPM）と呼んでいる。これは，日本酒の醸造法である並行複式発酵法にならって命名した。

MPM で培養した微生物群を養液栽培の養液に加えると，有機質肥料を水中に加えながら植物を栽培することができる。この栽培法を，有機質肥料活用型養液栽培，あるいはプロバイオポニックスと呼んでいる。有機質肥料を養液栽培で使用できる，世界で初めての実用的栽培法だ。プロバイオポニックスという名称は，微生物を活性化させることを意味するプロバイオティックスと，養液栽培を意味するハイドロポニックスを組み合わせた造語だ。この栽培法は 2022 年に特色 JAS に認定され，福島県飯舘村の農家はその第一号として認定され，現在も全国的に普及が進みつつある。

4. 土壌を創る

プロバイオポニックスは，見方を変えると，水という非土壌をあたかも土壌と同じように，有機物を無機養分に変換する機能を付与する技術だ。つまり，非土壌を土壌に変える技術だともいえる。そこで筆者は，本来なら土壌だけが備える機能（無機養分生成能）を，たとえば炭や農業用培地（パーミキュライト，パーライト，ロックウール），人工樹脂などの非土壌媒体に MPM 法で培養した微生物を固定化し，無機養分生成能を付与できるか，検討した。

その結果，穴がたくさんあいた多孔質のものであれば，どんなものも無機養分生成能を付与することが可能であると判明した。筆者はこの技術を土壌化 soilization と呼んでいる²⁾。そして，この技術で非土壌媒体を土壌化したものを創製土壌と呼んでいる。

意外なことだが、この技術が誕生するまで、人類は土壌を創製できなかった。すでに説明したように、非土壌媒体で硝化菌をうまく活動させることができなかつたからだ。しかしMPMの微生物群を加えれば、非土壌を土壌に変えることができる。このことは、これまで「土づくり」と呼ばれていた作業を、大きく転換する可能性を秘めている。

いわゆる土づくりでは、10年もの歳月が必要と言われていた。土づくりでは、堆肥や肥料を土壌に鋤き込み、ミミズや土壌微生物たちが耕し、物理性や化学性、生物性の3つを改善した土壌になるまで、なりゆき任せで待つしなかつた。

しかし創製土壌だと、あらかじめ通気性がよく、水の保持力に優れた、物理性や化学性が良好な媒体をあらかじめ整形し、それにMPMの微生物を固定化すればよい。それによって即座に物理性や化学性に優れた土壌を創製することができる。なりゆき任せだった土づくりから、「土壌の物理性・化学性を自在にデザイン」することが可能な、デザイナー・ソイルという技術への移行が可能となる。

また、筆者は京都大学と共同で、土壌微生物を選抜し、限られた種類の微生物だけで土壌の機能（無機養分生成能）の再現を試みた。その結果、わずか3菌株（従属栄養細菌、アンモニア酸化菌、亜硝酸酸化菌）だけで再現することに成功した。この最小限の微生物群をエレメンタル土壌微生物と呼んでいる。このエレメンタル土壌微生物に、植物の生育を促進する微生物や、病原菌の増殖を抑える拮抗菌などの微生物を組み合わせれば、食料生産を最大化する微生物カクテルを創り出すことも可能だと考えている。これまで不可能だった「土壌微生物のデザイン」も可能な技術が生まれたと言える。

5. コンクリートの都市を農地に変える

10年の年月が必要だった土づくりが、短期間（2週間程度）で土壌を創製できることは、都市部での食糧生産も可能にする技術につながるかもしれない。

通常、コンクリートやアスファルトの上では農業は不可能だ。しかしポリウレタンのような人工樹脂や、もみ殻燻炭のような炭を創製土壌の技術で土壌化し、コンクリートの上に積層すれば、即席の農地となる。あとは水と肥料さえ確保できれば、都市農

業が可能となる。

筆者は、そのための研究を二つ、同時並行で進めている。一つは、コメを脱穀した後に出てくるもみ殻を炭にし、これを土壌化する研究だ。炭は半永久的に分解することがない。このため、燃やさない限り二酸化炭素になる心配はない。そこで、炭を大量に作り、農地に鋤き込むことで炭素貯留を行い、大気中の二酸化炭素を減らす温暖化対策の研究プロジェクトが進行中だ。筆者は、この技術を都市農業に展開できると考えている。土壌化したもみ殻燻炭をコンクリートなどの上に積層すれば、即席の畑となる。ここに生ごみなどの有機質肥料を加えながら植物を栽培すれば、都市部でも食糧生産が可能になる。炭素貯留という地球温暖化対策の一環にもなるので、一石二鳥だ。

もう一つの技術は、人糞尿の肥料化だ。これは実は、宇宙農業の技術として開発中だ。いちいち地球からロケットで化学肥料を運ぶのは大変だから、手に入る有機質肥料で食糧を生産できるに越したことはない。宇宙活動でも確保できる肥料が、人糞尿だ。しかし、人糞尿を肥料として利用する研究は久しく行われておらず、何より、無機養分化する技術は存在しなかつた。上述のNASAケネディ宇宙センターのプロジェクトでも、人糞尿は重要な肥料と位置づけられていたが、無機養分化できなかった。もし人糞尿が無機養分化できれば、戦争などで化学肥料が手に入らなくても、食料生産が可能になる。宇宙での食糧生産は、地球から肥料や食料を運ぶことが容易ではない、一種の鎖国状態だ。その意味では、宇宙農業の成功は食料安全保障を高める技術につながると言える。

宇宙農業の話のついでに紹介すると、テラ・フォーミングの研究も進めている。テラ・フォーミングとは、月や火星など、地球とは異なる星を、地球と同じように生命で溢れる環境に変える技術体系だ。このテラ・フォーミングの実現には、月や火星の「土」を「土壌」に変える必要がある。土と土壌はほぼ同じ意味で使われることも多い言葉だが、厳密には定義が異なる。岩石を砕いただけの砂礫（レゴリス）で、微生物を一切含まないものも「土」と呼ぶが、土壌は微生物が生息し、無機養分生成能を備えている。その意味では、月や火星には「土」はあっても「土壌」はない。

そこで筆者は、宇宙農業研究の一環として、月や火星の土（レゴリス）を模した砂礫にMPMの微生物を固定化し、土壌化する研究を進めている。月や火星のレゴリスを土壌化すれば、これを土壌として植物の栽培が可能になる。テラ・フォーミングの重要な要素技術となる。この研究は、企業と共同で開発中だ。この技術が開発されれば、微生物がろくに生息しないやせた土を土壌化し、食料生産を向上させることが可能になるかもしれない。

6. 最後に

ここまで、あたかも素晴らしい技術であるかのようになり、明るい部分ばかりを紹介してきた。しかし筆者は、こんな技術を本当に生み出してよかったのかと不安な気持ちも抱えている。宮崎駿氏のアニメ「天空の城ラピュタ」では、ヒロインに、人は土を離れては生きられない、と叫ばせている。しかし、創製土壌の技術は、大地から切り離れた形で土壌を自在に製造することを可能にしてしまう。しかも、土壌の主成分は鉱物だが、創製土壌では鉱物である必要はなく、炭やポリウレタンのような人工樹脂でも構わない。「土から離れてしまう」。

筆者と京都大学は上述したように、わずか3菌株で土壌微生物の基本的な機能（無機養分生成能）の再現に成功している。この技術は、無数に生息する土壌微生物を排除し、人間の都合だけで選んだ微生物だけを利用する技術につながっていく可能性がある。そのとき、人類は土壌微生物まで絶滅危惧種に追いやってしまわないだろうか。土壌微生物はまだまだ分からないことだらけで、どんな貢献をしてくれているのかわからないことばかりなのに。

筆者はむしろ、この創製土壌の技術を、「土から離れる」ための技術としてではなく、「土から学ぶ」技術として発展、活用していただきたいと願っている。

自然に存在する土壌はあまりにも複雑怪奇すぎ

て、研究が難しく、「理想の土壌」というものがどういうものなのか、それさえも数値的にはっきりさせることは難しかった。水はけのよさ、水もちのよさという、一見矛盾めいた特徴が土壌には必要だが、それはいったいどういう状態なのか、数値的なパラメーターとして表現することも難しかった。その原因の一つとして、土壌を人工的に製造できなかったことが挙げられる。自然界に存在するものを分析するほかなかったから、人工的に性質を少しずつ変えて解析する、ということがそもそもできなかった。

しかし創製土壌の技術なら、あらかじめ使用する媒体の物理的性質を少しずつ変えて実験することも可能になる。土壌の化学性や、土壌微生物も、条件を少しずつ変えながら検討することが可能だろう。そうして土壌の理想形が明らかになれば、自然土壌をどのようにしてその状態に近づけるかという手法も開発することが容易になるのではないか。

筆者はやはり、「土から離れてはいけない」と考えている。本稿で紹介した技術は、すでに土から離れている都市部で利用するなら、本来食糧生産ができなかったところでできるようになるのだから、お役に立つように思う。しかし自然土壌が生かせる場所では、まだまだ人類が知りえていない無数の財産がそこに眠っているかもしれない、という謙虚さをもつことが重要であるように思う。新技術が新たな問題を生み出すという歴史を、人類は何度も繰り返してきたのだから。

参考文献

- 1) Shinohara, M., Aoyama, C., Fujiwara, K., Watanabe, A., Ohmori, H., Uehara, Y., Takano M. (2011) Microbial mineralization of organic nitrogen into nitrate to allow the use of organic fertilizer in hydroponics. *Soil Sci. and Plant Nutr.* 57, 190-203.
- 2) Meeboon, J., Nishida, R., Iwai, T., Fujiwara, K., Takano, M., Shinohara, M. (2022) Development of soil-less substrates capable of degrading organic nitrogen into nitrate as in natural soils. *Sci. Rep.* 12, 785 <https://doi.org/10.1038/s41598-022-04873-0>