

<論文(原著)>

微細気泡含有液体の散布による植物培地中への窒素性物質の効率的送達

古沢浩*, 清水若那, 井上昌一, 西本寛, 村上雅博

Efficient Nitrogen-Containing Fertilizer Delivery into Soils Mediated by Aqueous Solutions Containing Micro-bubbles

Hiroshi FRUSAWA, Wakana SHIMIZU, Masaichi INOUE, Hiroshi NISHIMOTO and Masahiro MURAKAMI

Department of Frontier Engineering, Kochi University of Technology, Tosa-Yamada, Kami City, Kochi 782-8502, Japan

Abstract

In recent years, there have occurred considerable changes in the global nitrogen cycle, causing a variety of environmental and human health problems. Our understanding of the N cycle now leads to a realization that agricultural intensification due to nitrogen-containing fertilizers damages environmental systems. Here we show that microbubbles with diameters less than 50 μ m carry nitrogen-containing fertilizer into porous media for planting, such as soils. Two kinds of experiments have revealed the efficiency of microbubbles in comparison with tap water without microbubbles. First, we measured the amount of nitrogen in runoff water after passing through soils. As a result, it was found that the use of microbubble containing water increases the nitrogen transmittance. We also investigated the microbubble effect on the daily variation of nitrogen content in the presence of aerobic growth-promoting bacteria which fix atmospheric nitrogen. The results suggest that microbubbles stimulate the bacteria to fix more amount of nitrogen than without microbubbles. We thus demonstrated that microbubbles play a role as nitrogen delivery media.

Key words : micro-bubbles, fertilizer delivery, growth-promoting bacteria, nitrogen cycle

要旨

近年、窒素のグローバルサイクルに大きな変化が起きており、その結果、様々な環境問題や健康問題が引き起こされている。このサイクル変化の1因となっているのが、窒素化学肥料の過剰散布である。そこで本研究では、直径が50 μ m以下の微細気泡を含有する液体を利用した、窒素性物質の土壤中送達の効率化について検討した。水道水と微細気泡水との性能比較のために、2つの実験を行った。最初に行ったのは、土壌通過後の流出水に含まれる窒素量を比較する浸透性実験である。この結果、微細気泡水の利用により、窒素性物質の土壌浸透効率の上昇が明らかにされた。次に、窒素固定菌を散布した後に、水道水あるいは微細気泡水の添加を継続したとき計測される土壌中の窒素量変化について比較を行った。その結果、微細気泡水の散布により、水道水使用時よりも菌が活性化され窒素含有量が増加することがわかった。以上より、微細気泡は、超音波照射下での遺伝子導入媒体としてだけでなく、生育を促進する窒素性物質を土壌中に効率的に送達する媒体としても有効に機能することが実証された。

* 高知工科大学 環境理工学群 〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口 185

1. はじめに

肥料の三要素の一つである窒素は、植物の体の主成分であるタンパク質を構成する要素であり、植物の生長に欠かせない。その窒素は、自然サイクルにおいては大气より供給される。しかし、アンモニアとして植物に固定化される反応が緩慢なために、大气からの窒素供給のみでは十分な農作物を生産できない。そこで導入されるのが、窒素化学肥料である。窒素化学肥料として土壌に供給される窒素は、土壌内に存在する微生物の作用によりアンモニア態窒素に変換され、亜硝酸態窒素を経てさらに硝酸態窒素に変換される。従って、土壌内において窒素は、アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素として存在する。植物はアンモニア態窒素や硝酸態窒素を根から吸収するが、吸収しきれないアンモニア態窒素や硝酸態窒素は、微生物の作用により窒素に還元される。しかしながら、継続的な施肥によってアンモニア態窒素や硝酸態窒素が過剰になると上記の窒素サイクルが崩れてしまう¹⁾。その結果、様々な環境問題が引き起こされる。例えば、窒素性物質は一般に土壌への吸着力が弱く流れやすいため、雨や灌水時などに流される。さらに、河川や海域に流出した窒素性物質は、水圏における富栄養化の原因となっている¹⁾。

以上のような肥料流出を防ぐために、従来行われてきた対策としては、有機肥料や肥効調節型肥料による肥効の遅化がある。しかし、緩やかな肥効を散布量の不足と感じる心理が働き、逆に過剰散布を助長してしまう側面がある。また、労力と価格の両観点からコスト高であることも、普及を阻む要因となっている。従って、過剰散布の抑制を実現するためには、肥効速度の調節ではなく施肥量そのものの削減を検討する必要がある。

そこで本研究では、施肥量の削減を目指して、窒素性物質の効率的送達法の開発を行う。具体的には、直径が $50\mu\text{m}$ 以下の微細気泡²⁾を含有する液体を利用した効率化策を提案する。マイクロスケールの微細気泡の特徴の一つとしては、通常のミリスケール以上の気泡と異なり、急速に浮上して水表面にて破裂することなく、水中で縮小し内部の気体を完全溶解させて消滅する点が挙げられる。しかも、水中での存在時間は、界面活性剤などの添加により界面張力を低下させることで、数ヶ月間にまで延ばすことが可能である³⁾。

従来、これらの特徴を有する微細気泡の植物生育促進作用の検討に際しては、多くの場合、水耕栽培のような水主体の培地が利用されてきた²⁾。このとき期待される効果としては、空気や酸素を微細気泡として含有した栽培用水、即ち溶存酸素を多く含む栽培用水を植物に供することにより、酸素を効率よく植物の根に供給することができるため、植物の根を活性化できる点がある。また、水中で微細気泡が集団として根付近に局在することが視認されており、微細気泡に付着した養分の根局在による吸収促進効果も期待されている。

一方、本研究では、土壌を含む多孔性固体を主成分とする培地に着目して、微細気泡含有水の有用性を検討する。尚、本研究のコンセプトと従来アプローチとの相違点については、次節でより詳しく説明する。また第3節では、土壌培地の基礎実験から得られた、微細気泡による窒素性物質の土壌内部への送達効率の向上、ならびに、窒素固定菌の活性化効果について報告する。さらに第4節において、よりスケールダウンした微細気泡で得られた基礎的知見について記した後に、最終節で今後の展望を述べる。

2. 微細気泡含有水の有用性

2.1 着目すべき特質¹⁾

微細気泡の特質としてよく知られたものとしては、(1) 吸着洗浄能、(2) 気体溶解能、(3) 衝撃波生成能が挙げられる。まず(1) 吸着洗浄能とは、微細気泡の疎水性、あるいは後述する気泡表面の負帯電に起因した、水中の疎水性物質および正帯電物質を選択的に微細気泡表面に吸着する特質を指している。本性質については、ペットの皮膚洗浄から土木・環境分野への活用に至るまで、幅広い分野での利用が試みられている。例えば、重金属などで汚染された土壌の浄化技術としての応用も検討されている。また、浮上せずに液中収縮・消滅することに起因した(2) 気体溶解能は、気体として酸素やオゾンを採用することにより、より大きな効果を発揮する。例えば、オゾンを経年の微細気泡として含有させることにより、通常、常温・常圧下の開放した条件では数時間で散逸してしまう水中のオゾンを経年の以上に渡って保持することができるため、殺菌力のあるオゾン含有水を手軽に使用することが可能となる。この性質を、水産業(貝類の食中毒ウィルスの除去など)や環境保全型農業(農薬代替など)として利用することが注目されている^{2,4)}。最後の(3) 衝撃波は、気泡圧壊時に生じる性質である。例えば、強い超音波を当てて気泡圧壊を促すことにより、所望の位置で衝撃波を発生させることができる。この技術は、腎臓結石の粉碎など医療分野への応用

が期待されている。

本研究では、上記三つの性質のうち(1)洗浄能と(2)気体溶解能の二つの性質に、微細気泡が本来有する以下の様な特質を組み合わせることにより、微細気泡に従来アプローチとは異なる新たな機能(土壤中溶質の送達効率の向上能)を付与することを提案する。具体的には、上記二つの性質に加えて、(4)船舶への応用が検討されている摩擦抵抗の低減効果、および、(5)微細気泡径が団粒構造間の間隙径よりも小さいことに着目する。以下で述べる通り、これらの特質は共に、土壤中の溶質移動に新たな駆動原理を提供するものと期待される。

2.2 土壌で期待される効果、本論文の目的

まず初めに、従来考えられてきた土壌中での溶質輸送機構について簡単に触れておこう⁵⁾。輸送機構は、移流、拡散、分散の三つに分類される。ここで、移流は平均流速による溶質移動を意味しており、拡散は溶質の平均濃度勾配に起因した輸送現象であり、最後の分散は流速のばらつきに起因した濃度勾配による拡散を表わしている。前節で指摘した摩擦抵抗の低減効果(4番目の特質)は、土壌中の平均流速を増大させるため、移流による溶質移動の効率向上をもたらす、浸透しにくい場所への溶質運搬を容易化するものと期待される。また、(1)吸着洗浄能、(2)気体溶解能、および(5)微細が故に土壌中で気泡破裂しない特徴とを組み合わせることにより、濃度勾配による溶質分子単体の輸送(拡散・分散)とは異なる溶質移動が実現できるものと期待される。というのも、微細気泡表面に肥料性溶質を多数吸着させたまま土壌中を移動できるため、ドラッグデリバリーシステムやナノ化粧品においてマイクロ・ナノカプセルが果たしている「有用物質送達媒体」という役割を、微細気泡が土壌中において果たすものと考えられるからである。また、含有気体の窒素成分を高めることにより、微細気泡を効率的に土壌内部にまで窒素を送達する媒体として活用することもできる。

さらに、好気性菌含有液体に微細気泡を含有させることにより、以下の様に、土壌中の微生物を活性化して土壌中に含まれる窒素量を所望値まで増加させることができるものと期待される。尚、好気性菌としては、アゾバクター、根粒菌、光合成細菌、放線菌、硝化菌、亜硝化菌、タンパク質分解菌等が挙げられる。多数種類の好気性菌が入っている市販の土壌改良液を水に溶かして好気性菌含有液体としてもよい。特に、好気性菌が窒素固定能を有する窒素固定菌である場合、酸素や窒素からなる微細気泡含有液体を供給することによって活性化され、より効率的に土壌内の窒素固定量を増加させることができ、植物に養分を供給することができるものと期待される。微生物を利用した本方法の利点としては、土壌内に一定の窒素化合物が存在すると、好気性菌は窒素の生産を行わないので、過剰な窒素化合物は産生されないという点がある。また、もし目論見通りの効果が得られるのならば、微生物を利用した種々の民間農法が有する非効率性の問題に対する改善策を提示することにも繋がる。

本研究では、以上のような種々の微細気泡効果の相乗作用により、土壌を代表例とする多孔性固体培地において、培地内部への窒素性物質の送達効率を向上できるかどうかについて実証することを目指す。

3. 土壌への適用

3.1 実験概要

浸透性実験(実験1)、および窒素固定菌の活性化度実験(実験2)により水道水と微細気泡水との性能比較を行った。実験1の目的は、微細気泡水による残存肥料の有効化の可否である。具体的には、上述した微細気泡水の良浸透性と吸着洗浄性を利用して、表層土に残留した肥料に微細気泡水を散布することにより、残留肥料を根付近まで再運搬できるかどうか実証することにある。この実証試験の第1段階として、以下では、水道水と微細気泡含有水の肥料の輸送性能の違いを見るために、土壌通過後の流出水に含まれる窒素量について、水道水と微細気泡含有水とで比較を行った。また実験2では、水道水あるいは微細気泡水の散布を継続したとき見られる、土壌中の窒素量変化の比較を行った。特に、微細気泡水の土壌微生物活性能力を見るため、土壌改良液を用いて窒素固定菌を土壌に人工的に増加させた後、測定を行った。

3.2 装置・試料

本研究で用いる発生装置は(有)バブルタンク社製のEOXMICRO BT-50である。この装置は気液混合流体せん断法を利用して微細気泡水を生成している。気液混合流体せん断法は、気液二層の流体を超高速旋回(毎秒約400~600回転)させることで起こる遠向心分離作用を応用する。まず装置内を超高速で旋回さ

せ、巡回気体空洞部を形成させる。装置内部の巡回速度が装置出口付近の巡回速度よりも速くなっているため、その巡回速度差で空洞部を切断することにより微細気泡を発生させる。このときの摩擦により、気泡表面が帯電するといわれている。尚、本装置で発生する気泡サイズは10~30 μ mである。

一方、窒素測定装置としては、Dr. Lange社製の吸光分光光度計LASA-20を用いた。測定試料としては、LASA-20用の測定キットを使用して以下の手順で作成したサンプルを15分間放置したものを用いた。(i) 試料0.5mlと水酸化ナトリウム2ml、ペルオキシ二硫酸カリウム(酸化剤)1粒を混合する。(ii) 100 $^{\circ}$ Cで1時間加熱。(iii) アジ化ナトリウムを1粒入れた後、振とうする。(iv) (iii)で作製した試料の5mlを試料セルに加える。(v) イソプロピルアルコールを0.2ml加え振とうする。

最後に、使用した土壌と肥料について記す。実験1(浸透性比較実験)では、性質が異なる赤玉土(pH 6.2)と砂質土(pH 5.5)の2種類を用いた。また用いた肥料(ハイポネックス・ジャパン社製)は、成分比がアンモニア態窒素:硝酸態窒素:リン:カリ=1:5.5:6:19の化学的酸性肥料である。一方、実験2(窒素固定菌の活性化度比較実験)では、赤玉土と窒素固定菌など250種類の好気性土壌微生物群を含む土壌改良液(製品名「菌力アップ」、エイビーエス社製)を用いた。この土壌改良液の原液中には、1ml当たり約10万個の微生物が存在すると見積もられている。尚、実験2については、砂質土での有意な差が見られなかったため、その実験結果の報告を割愛している。

3.3 実験手順

3.3.1 浸透性比較実験

手順は以下の通りである。(i) 肥料600gと赤玉土600gを混合する。尚、かさ密度の低い砂質土の場合には、1200gずつ混合した。(ii) プラスチック容器に混合した土を充填する。充填後の土壌の高さは20cm程度であった。(iii) 容器上部より水道水または微細気泡水を各々1リットル投入する。(iv) 下部より流出した水に含まれる窒素量を測定する。

3.3.2 窒素固定菌の活性化比較実験

手順は以下の通りである。(i) 浸透性比較実験で用いた容器を二つ用意し、両者同量となるように土を充填する。(ii) 実験開始日に、原液を10倍から1000倍希釈した土壌改良液(10倍希釈でpH 8)を土全体が十分に湿るまで加える。(iii) 1日1回、水道水および微細気泡水を容器へ同時刻に200mlそれぞれ滴下する。(iv) 土壌採取20gを容器下部の側面孔より採取し、蒸留水を20ml加え、よく振とうする。(v) 懸濁液をろ過し、窒素量の測定を行う。

3.4 結果・考察

3.4.1 浸透性比較実験(実験1)

第2節で述べた通り、微細気泡含有水では、浸透速度の上昇が期待される。また文献⁶⁾においても、「微細気泡含有水は未処理水に比べて土壌への浸透速度が速い」という観察結果に関する記述が既出である。しかし今回の実験では、両者の速度差について再現性のある結果を得ることはできなかった。今後、浸透速度差に関する検証実験を遂行するためには、制御された多孔性人工物を培地として利用することが必要と思われる。

一方、24時間後の流出水中の窒素濃度については、赤玉土と砂質土の両者において、微細気泡水の方が水道水よりも窒素透過性が増大する結果が得られた。Fig. 1は、その代表的な結果を示しており、また Table

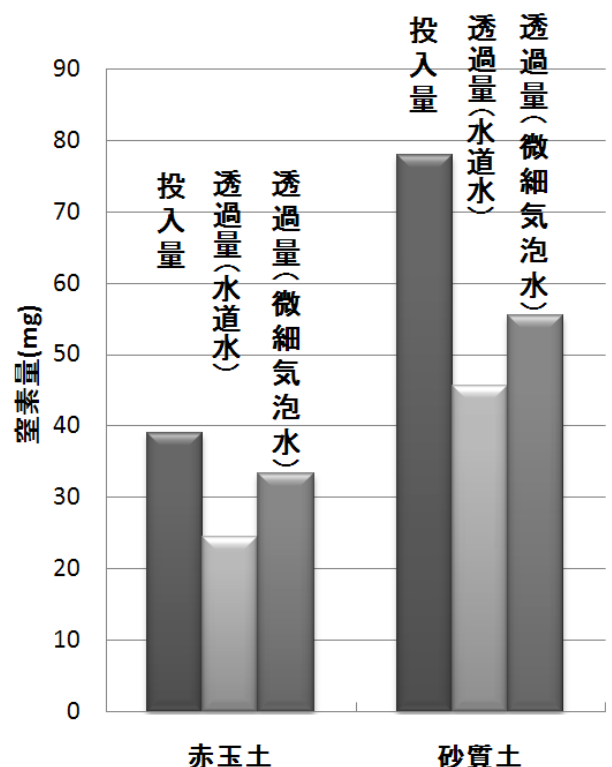


Fig. 1 Nitrogen amount in prepared water and runoff one after passing through soils of loam and sand. Comparison is made between waters with and without micro-bubbles.

1はFig. 1を透過率（窒素流出量 / 投入量）として換算した結果である。Table 1より、微細気泡水と水道水の場合で透過率の比を計算すると、赤玉土の場合には約 1.36 倍(=85.6/62.8), 砂質土の場合には約 1.22 倍(=71.2/58.4)となる。数回の実験で生じた 5%程度の測定誤差を勘案しても、本結果は微細気泡水の透過率増大を示す。

Table 1 Transmittance of nitrogen amount in soils of loam and sand. Comparison is made between waters with and without micro-bubbles.

	赤玉土	砂質土
微細気泡含有液体	85.6%	71.2%
水道水(比較例)	62.8%	58.4%

以上のような微細気泡水の導入による肥料の透過性増大の原因の一つとしては、本実験で用いた微細気泡の負帯電が寄与していると考えられる。詳細は以下の通りである。使用肥料の1成分であるカチオン性のアンモニア態窒素は、通常の水道水で散水すると今回用いたような酸性土壌では表層部に静電吸着されがちである。一方、微細気泡水中では散水前の時点で既に、負帯電した微細気泡表面にアンモニア性窒素が吸着しており、そのため土壌深部にまでアンモニア態窒素を送達できるものと考えられる。ただし、この効果による透過率比の最大値を3.2節に記した肥料の成分比より見積もると約 1.18 (= (1+5.5)/5.5)となり、本効果だけでは上述の増大の定量的説明は難しい。投入肥料中のアンモニア態窒素だけでなく、土壌中に既に吸着されていたアンモニア態窒素までもが微細気泡水の導入により脱着され深部に送達される機構を検討する必要性が示唆される。

次に、微細気泡効果の土壌種による違いを見てみよう。Table 1からわかる通り、砂質土（約 1.22 倍の透過率比）では赤玉土（約 1.36 倍の透過率比）ほど顕著ではなかった。この結果については、以下の原因が考察される。一般に土壌内の間隙としては、ミリスケールの団粒間隙とマイクロスケールの団粒内間隙がある。団粒構造を取り難い砂質土では土壌中で気泡形態が維持されにくいいため、微細気泡効果が低くなったと考えられる。しかも、塩基置換容量が赤玉土に比べて低い砂質土では、アンモニア態窒素の土壌への吸着量が少ない。一方、団粒構造を形成しやすい赤玉土においては、団粒間の間隙に微細気泡が形態を維持したまま侵入できるため、砂質土よりも多く土壌に吸着されたアンモニア態窒素に対する洗浄効果を発揮できる。実際、砂質土の透過率比 1.22が投入肥料の成分比から見積もられる最大値 1.18と近い値であるのに対して、微細気泡水の場合には、上述の通り洗浄効果まで考慮しないと前記最大値を大幅に超えた透過率比 1.36 の説明が難しい。以上のことから、間隙径と塩基置換容量とが共に大きい土壌種では微細気泡効果がより顕著に発現する、という本結果の妥当性が支持される。

結果のまとめとして、生育促進に有用な点を二つ再掲する：

- 微細気泡水の利用により、窒素性物質の土壌浸透効率が上がる。
- 微細気泡効果は、砂質土よりも赤玉土により顕著である。

これらの浸透性比較実験の結果から、微細気泡含有液体を赤玉土に供給すると、土壌表層に留まり植物へと有効に働かない残留肥料の再拡散を促すことが示唆される。肥料流出が促進されるため、微細気泡の散布量制御が必要であるが、その課題さえクリアできれば、良好な拡散性を利用した残肥の再拡散は肥料の有効利用にとって有意義な方策となるであろう。

3.4.2 窒素固定菌の活性化比較実験（実験2）

Fig. 2は、好気性の窒素固定菌を含有した土壌改良液（1000倍希釈）を散布した後に、土壌が乾燥しないように、1日1回、微細気泡含有水および通常水を散布し続けたとき、窒素含有量が2週間でどのように変化したかを示した図である。開始から2日目にかけて両者ともに窒素量は急激に増加した。しかも、微細気泡含有液体及び水道水両方において、供給2日目に窒素量が最大となるのがわかる。このとき、水道水に比して微細気泡水が約16%多く窒素が検出された。より詳しく最初の48時間を追跡すると、24時間後から、窒素含有量が微細気泡含有水の結果が通常水の結果を上回ることが明らかとなった。一方、2~4日目にかけては、両方とも窒素量の減少が見られ、微細気泡含有液体を供給した方が窒素量の減少率が高かった。4日目

以降は、両者において窒素量が増加したが、微細気泡含有液体を供給した方が窒素量の増加率が高かった。測定最終日の14日目においては、微細気泡水の窒素含有量が水道水に比べて20%高となった。尚、土壌改良液を加えなかった場合には、ピーク値を示す2日目においても窒素量は2mgを超えないことから、Fig. 2が示す相違が窒素固定菌の添加に起因した結果であることが示唆される。

以上のような微細気泡効果は、微細気泡により土壌内好気性菌の活性化が促されていることを意味している。特に、微細気泡含有液体の供給直後は様々な菌の生存競争が起こり、土壌中窒素量の変化が激しくなるものと考えられる。2~4日目にかけての窒素量の減少は窒素利用菌や脱窒菌の繁殖によるものと考えられ、4日目以降の窒素量の増加は窒素固定菌によるアンモニア態窒素の増加と、タンパク質（菌の死骸）の増加によるものと考えられる。

次に、3.3.2節で述べた散水条件と同条件の下で土壌改良液の希釈度を10、100、1000倍と変えたときの希釈度依存性をFig. 3に示す。Fig. 3からわかる通り、いずれの希釈度においても、開始から2日目で急激に上昇し、2日目から4日目にかけて減少し、その後再び緩やかに上昇という傾向を示した。また窒素量の絶対値についても突出した差は見られなかった。このように、菌量による差が見られなかったのは、菌の増殖能力と限界生育量によるものと考えられる。即ち、多く投入した場合には、すぐに限界生育量に達してそれ以上の増加がなかった。一方、少なく投入した場合でもすぐに増殖し、多く投入した時と同様の量になったものと考えられる。

以上の結果をまとめると、

- 微細気泡水の散布により、水道水使用時よりも好気性土壌微生物が活性化され窒素含有量が増加する。
- 土壌改良液を、本商品の推奨希釈度（200倍）よりも薄めて散布しても応分の効果が得られる。となる。本結果は、微生物農法の効率化にとって微細気泡水の散布が有用であることを示唆している。

4. スケールダウンした微細気泡の特性解析

4.1 実験概要

市販されている多くの微細気泡発生装置は、前節の装置と同様に気泡径が数十ミクロン程度である。とこ

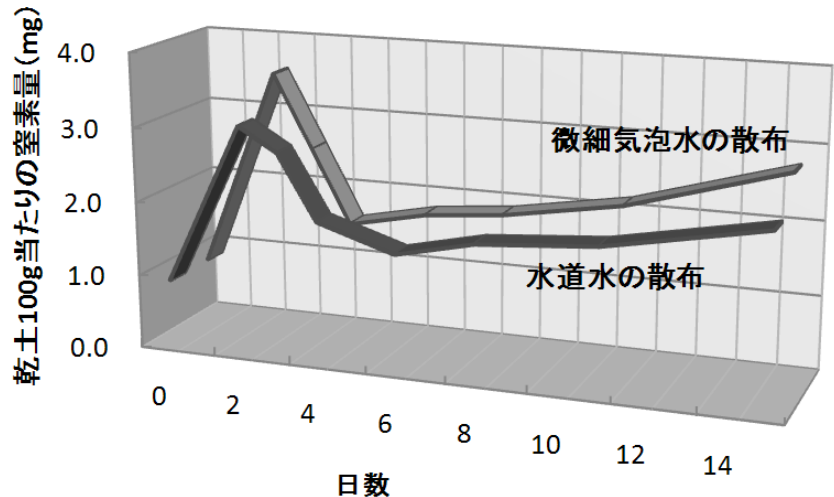


Fig. 2 Daily variation of nitrogen content in runoff water passing through loamy soil. Comparison is made between waters with and without micro-bubbles.

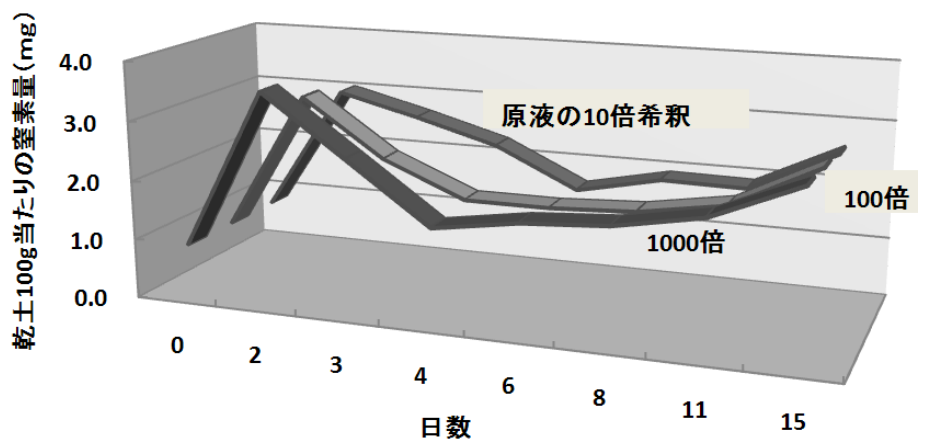


Fig. 3 Daily variation of nitrogen content in micro-bubble containing water passing through loamy soil. Comparison is made between three kinds of solutions with different concentrations of aerobic bacteria.

ろが最近、ナノバブル発生装置と銘打った 1 ミクロン前後スケールの気泡発生装置が登場している。ただ、気泡が小さくなればなるほど消滅が早く、ゼータ電位などの特性解析⁷⁾が難しいため、基礎物性の同定例は希少である。そこで本節では、良質で単分散の平均径 1 μm の気泡を発生させる装置を取り上げ、本装置から発生される気泡の特性解析を行った。具体的には、暗視野顕微鏡観察により、気泡の数密度やゼータ電位の計測を行った。

4.2 装置・試料

本研究で用いる発生装置は、オーラテック社製 (OM4-GP-040) である。本装置は、加圧下で空気を水中に溶解させ、減圧により再気泡化する加圧減圧法で気泡生成する装置である。本装置で生成される気泡の特徴は、気泡径が 1 μm で前節の気泡径の十分の 1 以下と小さい点にある。また、気泡観察、ならびに電気泳動の計測には、暗視野観察 (レーザー照射による散乱光体として 20nm の金コロイドまで観察可能) と粒子の自動追尾を行う画像解析システムの組み合わせたゼータ電位測定装置 (ZEECOM、マイクロテック・ニチオン社製) を用いた。

微細気泡水への界面活性剤効果も調べた。今回用いた界面活性剤は、陰イオン界面活性剤のドデシルベンゼンスルホン酸ナトリウム (SDS) である。添加濃度 100 μM の結果を以下に示す。

4.3 結果・考察

気泡発生時から 10 分後の暗視野顕微鏡像を界面活性剤の有無で比較した。その結果、界面活性剤添加後の気泡数密度が増加していることが視認できた。数密度を画像解析により見積もると、界面活性剤添加後の気泡密度は、約 98 万個/ml と見積もられ、非添加時の密度の 3 倍程度の高密度であった。注入気体量から見積もられる気泡数を流入水量で割った理想密度が 100 万個/ml であるので、ほぼ上限値である。このことから、1 ミクロンスケールの気泡においても、従来の報告³⁾と同様に、界面活性剤の添加により消滅速度の大幅な遅化が起きていることが示唆される。その原因としては、乳化食品の安定化機構と同様な、界面活性剤が気泡表面に吸着することによる気泡の表面張力の減少および静電的反発力による気泡融合の減少が考えられる。

次に電場を印加し、電気泳動度を測定した。このように小さな気泡に関する電気泳動計測に成功したのは、本研究が初めてである。気泡径が小さい利点としては、上昇運動が無視できない状況下での従来の計測と異なり、電場印加方向と平行な水平方向への安定した泳動軌道を観測できる点が挙げられる。また泳動方向より、本発生装置の気泡もまた、従来の微細気泡と同様に負帯電していることがわかる。Fig. 4 は、界面活性剤を印加していない気泡に関する、電場 10 V/cm 印加時のセル中央における速度分布をヒストグラム表示したものである。これより、ゼータ電位の気泡個体差が驚くほど少ないことがわかる。さらに、電場依存性から泳動度を見積もり、界面活性剤の添加の有無で比較した。その結果、界面活性剤の添加により電気泳動度が 1.5 倍程度にまで上昇する結果が得られた。このことは、上述の考察のとおり、気泡表面への界面活性剤吸着が静電的安定化をもたらしていることを示唆している。

以上をまとめると、スケールダウンした微細気泡においても、数十倍程度大きい従来の微細気泡と同様に、

- 陰イオン界面活性剤の添加による微細気泡の存在時間の上昇、
- 気泡個体差の少ない負帯電

が確認された。気泡径がスケールダウンすると、気泡表面積の増加、および、より狭い土壌間隙中への水浸透性の向上が期待される。土壌実験による、スケールダウン効果の定量的検証が今後の課題である。

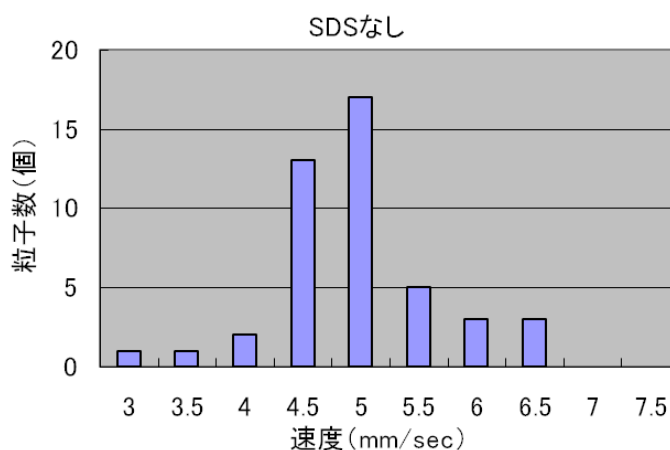


Fig. 4 Histogram of electrophoretic velocity of surfactant free micro-bubbles under the electric field of 10 V/cm.

5. おわりに

微細気泡技術は、水と空気というクリーン媒体のみで高機能を付与できるというユニークな特質を有しており、今後も有望なグリーンテクノロジーの一つとして幅広い応用展開が見込まれている。超音波照射下での遺伝子導入媒体としての利用⁸⁾は、その広汎な検討例の一端を示している。しかし今までのところ、他の系に対しては、有用物質送達のためのマイクロ・ナノカプセルとして微細気泡を活用するという試みはなされていない。その理由としては、微細気泡とは言え、ナノ医療⁹⁾の要である薬物送達カプセルのスケール（ミクロン以下）から見ると大きな径を有しており、送達ターゲットが限定されてしまう点がある。すなわち、今回対象としたサブミリからミリスケールの多孔性間隙が有用な役割を果たす植物培地は、医療分野以外で初めて見出された適切な送達ターゲットと言える。

本論文では、多孔性固体培地の代表例として土壌を取り上げ、微細気泡が生育を促進する窒素性物質を効率的に送達する媒体として有効に機能することを示した。本成果は、化学肥料の過剰散布という環境問題の解決に貢献するものと期待される。また、肥料散布が難しいコンクリートや樹木などの固体培地でも、第4節で基礎物性の検証を行った1ミクロンスケールのマイクロ（あるいはナノ）気泡の利用が有効であろう。適切なターゲットを見出し、ミクロンスケール以下の気泡が有する有用物質送達カプセル機能を示すことは、本論文で提案する「多孔性材料への高効率送達媒体としての微細気泡」というコンセプトの適用範囲を、植物培地にとどまらず多彩なナノ技術分野へと広げる上で重要である。

(原稿受付 2009年5月12日) (原稿受理 2009年12月22日)

引用文献

- 1) J. N. Galloway, A. R. Townsend, J. W. Erisman, M. Bekunda, Z. Cai, J. R. Freney, L. A. Martinelli, S. P. Seitzinger, M. A. Sutton (2008): Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions, *Science* **320**, pp. 889-892.
- 2) 基礎から応用まで網羅した解説書としては、例えば下記を参照。柘植 秀樹編著 (2007) : マイクロバブル・ナノバブルの最新技術, シーエムシー出版.
- 3) 微細気泡の安定化技術に関する下記の最新論文、およびその引用文献を参照。 E. Dressaire, R. Bee, D. C. Bell, A. Lips, and H. A. Stone (2008): Interfacial Polygonal Nanopatterning of Stable Micro-bubbles, *Science* **320**, pp. 1198-1201.
- 4) 福元康文, 西村安代, 橋詰和人 (2006) : マイクロバブルオゾン水の農業への利用, 水～基礎・ヘルスケア・環境浄化・先端応用技術～ (技術教育出版社) , pp. 425-435.
- 5) W. A. Jury, W. R. Gardner, and W. H. Gardner (1991): *Soil Physics*, John Wiley & Sons.
- 6) 梨子木久恒 (2006) : ナノバブル農業の可能性—生産力向上と環境保全—, 微細気泡の最新技術 (エヌ・ティー・エス) , pp. 58-70.
- 7) 通常の微細気泡に関する報告は、下記を参照。 M. Takahashi (2005): ζPotential of Micro-bubbles in Aqueous Solutions: Electrical Properties of the Gas-Water Interface, *J. Phys. Chem. B* **109**, pp. 21858-21864.
- 8) C. M. H. Newman₁ and T. Bettinger (2007): Gene Therapy Progress and Prospects: Ultrasound for Gene Transfer, *Gene Therapy* **14**, pp. 465-475.
- 9) V. Wagner, A. Dullaart, A.-K. Bock, and A. Zweck (2006): The Emerging Nanomedicine Landscape, *Nature Biotechnology* **24**, pp. 1211-1217.