



微細気泡水の電気化学的特性の定量的評価及び応用実験との相関について*

Electric and Electrochemical Properties of Fine Bubble Water and Analysis of the Correlation with Applied Research

上 田 義 勝**
UEDA Yoshikatsu

徳 田 陽 明***
TOKUDA Yomei

二 瓶 直 登****
NIHEI Naoto

杉 山 暁 史**
SUGIYAMA Akifumi

小 川 雄 一†
OGAWA Yuichi

白 神 慧 一郎†
SHIRAGA Keiichiro

Abstract For introducing the use of fine bubbles (FB) in industrial applications, it is important to understand their properties and the mechanisms of the effect in order to utilize them effectively. However, it is difficult to observe FB directly because of their small size. We measured the electrochemical properties of water containing FB in order to examine the effect of FB on ions macroscopically. The conductivity of the FB water generated from purified water was lower than that of the purified water. In particular, the decrease in the conductivity of the FB water supports the hypothesis that ions are closely involved in the generation mechanism of FB. We also analyzed the effect of FB water on the nutrient uptake of soybean seedlings. For the uptake experiment, we used radio isotope elements (^{137}Cs , ^{22}Na , ^{32}P) at different pH conditions. As a result, we have found the increased uptake of ^{137}Cs and ^{22}Na and the decreased uptake of ^{32}P compared with distilled water. There was no correlation between pH value and the effect of FB water. Transpiration rate was not significantly different between FB water and distilled water. Although questions still remain in the elements efficiency in ions (anion or cation), these results suggest a possible influence of fine bubbles on the plant activity to uptake nutrient ions.

Keywords: Fine bubble, Nano bubble, Purified water, Electrical conductivity

1. 緒 言

マイクロバブルやナノバブルなどの粒径の小さな微細気泡については、最近注目を集めつつある研究テーマである。近年、新しい言葉の定義として、「ウルトラファインバブル（100nm から200nm サイズ）」を含めた「ファインバブル（マイクロメートル以下）」技術としての、国際標準化なども産業界においてすすめられてきており、活発な技術開発が進んできている。微細気泡研究

においては、生成原理[1]や計測手法[2,3]を基として、原理解明の基礎研究[4]から応用研究までを含めて数多くの新規研究課題が存在する。特に基礎研究においては計測手法の観点から、レーザー散乱による気泡濃度の同定[5,6]や、気泡の存在・可視化[7,8]のための議論も活発に行われてきている。

先行研究においては、既に気泡生成時における電気伝導度の変化[9]を確認してきており、微細気

* 2014.11.17 受付

** 京大大学生存圏研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

TEL: (0774)38-3869 FAX: (0774)31-8463 E-mail: yueda@rish.kyoto-u.ac.jp

*** 京都大学化学研究所

**** 東京大学大学院農学生命科学研究科放射性同位元素施設

† 京都大学大学院農学研究科 地域環境科学専攻

泡発生装置の稼働時間に応じた気泡濃度と電気伝導度の評価が示されつつある。また、装置稼働時における電気伝導度の変化と、酸素や窒素の気体種別に応じた溶存酸素量の急激な変化などについての議論もすすみつつある[10]。その結果として、水分子や水中のイオン（プロトンや水酸化物イオン）と比較して非常に薄い（個数の少ない）気泡が測定結果に影響を与えることが判明している。しかしながら、水分子そのものと微細気泡との関係を直接表す指標としてはまだ測定データがそろっておらず、他の基礎データとの比較検討が必要である。

また、微細気泡の応用利用については既に数多くの研究報告があり、農業利用に関する報告については水耕栽培における試験例[11]や花き植物の延命試験[12]などで成果が挙げられている。また、洗浄分野においても不純物除去[13,14]や、除染におけるセシウム洗浄試験[15,16]などについての利用事例もみられるものの、基礎研究結果に絡めて相関性のある研究成果は少ない。我々の研究においては、酸化亜鉛の合成に微細気泡を利用し、その集量や結晶生成に違いのあることが判明しており[17]、この結果は微細気泡の存在を示す傍証になる他、気体種別による化学合成の違いなどについても言及している。

本研究においては、微細気泡の基礎特性として、気体の違いによる特性の変化を確認しつつ、水分子そのものとの相関性を電気伝導度と誘電率の観点から評価する。特に、これまでの研究で詳しく確認できなかった誘電率に着目し、テラヘルツ波計測を用いることで、水の分子集団としての性質の変化が、微細気泡によって発生するかどうかについて確認する。過去の研究[9]においても、微細気泡を含んだ水の誘電率変化について議論しているが、温度条件の統一が不十分であり、また誘電率測定に用いている周波数が 0.5GHz から 2.5GHz と水の分子運動などと直接関連しない周波数帯であった。一方で、テラヘルツ帯の電磁波を利用すれば、単独の水分子や水素結合ネットワークを形成した水分子の緩和について誘電率測定により調査することが可能となる。従来、このような緩和現象はマイクロ波帯で研究が進められていたが、自由水の水素結合ネットワークの生成や消失は数ピコ秒の時間スケールで生じているため、直接観測することが困難であった。しか

し近年の光技術の進展によりテラヘルツ帯の分光情報を取得できるようになった[18]。

また、応用実験と基礎特性との相関について、新しい研究事例として、放射性同位元素（ラジオアイソトープ）を用いての研究を行った。農業利用において既に挙げられている成果の中でも、特に微細気泡の帯電との関連性に着目し、その結果について議論を行う。

2. 実験

2.1 電気化学的特性の定量的評価

2.1.1 目的

水中にて生成・存在する微細気泡について、気泡濃度や電気伝導度、および溶存酸素について測定して気泡の存在を確認しつつ、水の誘電率測定を行う。誘電率測定の際、テラヘルツ波分光技術の評価手法として適用し、微細気泡を含んだ水の水素結合のネットワークを直接評価して、従来法よりも高精度かつ詳細な水分子のダイナミクスについて議論する。具体的には、水分子の誘電緩和スペクトルは、Debye 緩和と Lorentz 振動の足し合わせで構成されているため、これらにフィッティング解析を施し、各要素に分離する手法[18]を利用する。

2.1.2 手法

微細気泡水の生成においては、気液混合せん断方式[1]による生成を 60 分行った。原水には精製水（TRUSCO 社製 W-20）を用い、気体として酸素及び窒素を用いた。気体流量は 1000 mL/min に固定し、一回の生成で用いた水の量は 4L とした。

(1) 微細気泡の特性評価

微細気泡水の評価には、粒度分布測定（ナノ粒子解析装置 LM-10（日本カンタムデザイン社製））の他、純水に近いサンプルの測定を行う必要があるため、精密な電気伝導度測定と溶存酸素測定（Orion star A329（Thermo scientific 社製））を行い、水素イオン濃度(pH)についても純水用プローブ（F-73、PUREIL 電極 9600-10D（堀場製作所製））を用いた。粒度測定と pH については稼働直後（0 分）と 30 分後、60 分後における計測を行い、溶存酸素と電気伝導度については、装置稼働中の計測を 10 秒毎に行った。

(2) 誘電率からみた水分子状態について

生成した微細気泡水サンプルを 25mL 用意し、精製水、O₂ 微細気泡水、N₂ 微細気泡水を 5 本用

意して、誘電率測定を行った。誘電率測定にはテラヘルツ波分光装置（アドバンテスト社製、TAS7500+温調付き全反射減衰分光ユニット）を用いて、4THz までの帯域における実部と虚部の誘電率 $\tilde{\epsilon}(\omega)$ について比較した。また、測定した誘電率から、フィッティング解析を行う事により、緩和強度 $\Delta\epsilon$ 、緩和時間 τ を下記式から求めることが出来る。

$$\tilde{\epsilon}(\omega) = \frac{\Delta\epsilon_{\text{slow}}}{1+i\omega\tau_{\text{slow}}} + \frac{\Delta\epsilon_{\text{fast}}}{1+i\omega\tau_{\text{fast}}} + \frac{\Delta V_S \omega_S}{\omega_S^2 - \omega^2 + i\omega\gamma_S} + \epsilon_{\infty} \quad (1)$$

尚、 ΔV_S は振動強度、 ω_S は共鳴周波数、 γ_S は減衰定数、そして ϵ_{∞} は誘電率の高周波極限としている。

2.2 ダイズ幼植物の各種イオン吸収へ及ぼす影響

2.2.1 目的

ダイズ幼植物の養分吸収におよぼす微細気泡水の基礎的な検討として、元素種類別の吸収や、溶液 pH の影響について、ラジオアイソトープを用いて試験を行った。ラジオアイソトープを用いることで、微量のイオンの移動傾向を精度良く確認することができ、帯電する微細気泡と、微量のアイソトープとのより良い相関を得ることが可能となる

2.2.2 手法

供試作物はダイズ(品種:エンレイ)を用いた。バーミキュライトで出芽後、微細気泡水または蒸留水を用いて作製した 1/2 Hoagland 溶液で 3 日間水耕栽培した。微細気泡水は OM4-MDG-04 (オーラテック社製)を用いて、蒸留水に一般大気を導入して生成した。対照とした蒸留水は、バブリングを行って溶存酸素濃度を微細気泡水と同程度としたものを用いた。試験回数は 3 回とした。

(1) 各種イオンの吸収

吸収試験として、微細気泡水と蒸留水を用いて作製した 40 mL (pH = 6) の 1/2 Hoagland 溶液 (以下、FB 溶液、DW 溶液) に ^{137}Cs (as CsCl)、 ^{22}Na (as NaCl)、 ^{32}P (as H_3PO_4) を添加し、ダイズ幼植物を浸漬した。4 時間吸収後、地下部を蒸留水で 30 秒ずつ 3 回洗浄し、子葉を除去し、地上部 (茎、葉) と地下部 (根) に分離した。 γ 線を放出する ^{137}Cs と ^{22}Na を吸収させた区は γ 線スペクトロメ

トリ (日立アロカ社製) で測定し、 β 線を放出する ^{32}P を吸収させた区は地上部、地下部をイメージングプレート (富士フイルム株式会社製) に貼付し 3 日間冷凍庫内でコンタクト後、スキャナー (FLA-5000、富士フイルム株式会社製) で画像を取得した。画像処理ソフト ImageGauge (富士フイルム株式会社製) で植物体の ^{32}P の蓄積を PSL (Photo-Stimulated Luminescence) 値として算出した。

(2) pH の影響

吸収時の pH の影響を検討するため、FB 溶液と DW 溶液に HCl と NaOH を加えて、pH = 4、6、8 に調製した。これらの溶液に ^{32}P (as H_3PO_4) を添加し、ダイズ幼植物に 4 時間吸収させ、(1) と同様の処理を行って PSL 値を算出した

(3) 蒸散への影響

微細気泡水の蒸散に及ぼす影響を検討するため、FB 溶液と DW 溶液にダイズ幼植物を浸漬し、数時間おきに溶液の減少量を測定し、蒸散量とした。なお、水面からの蒸発を抑制するため、容器をアルミ箔で蓋をした。

3. 結果と考察

3.1 電気化学的特性の定量的評価

(1) 微細気泡の特性評価

誘電率測定に用いた微細気泡の特性測定結果について考察する。まず、粒度分布については、

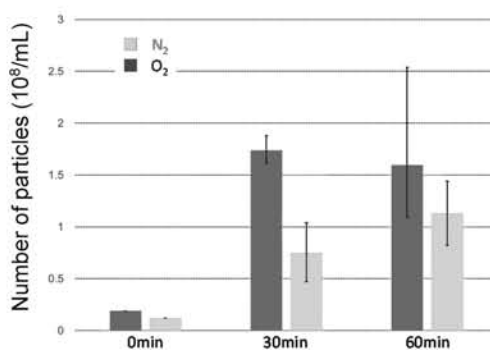


Fig. 1 Particle concentration of fine bubbles ($10^8/\text{mL}$).

レーザー散乱による測定 (3 回測定の平均) 結果を Fig.1 に示す。30 分毎の測定であり時間的な粗さはあるものの、生成時間に応じた気泡濃度の上

昇が見られている。また、同様に 30 分ごとに測定した pH については、およそ 6 から 7 の間で推移しており、気泡生成の状況にかかわらず大きな変化が見られなかった。これは、外来からの異物の混入等がないことを示しており、気泡生成が安定した条件で行われていることがわかる。

また、それぞれの気体を用いて微細気泡を生成した際の溶存酸素 (mg/L) の装置稼働中の変化を

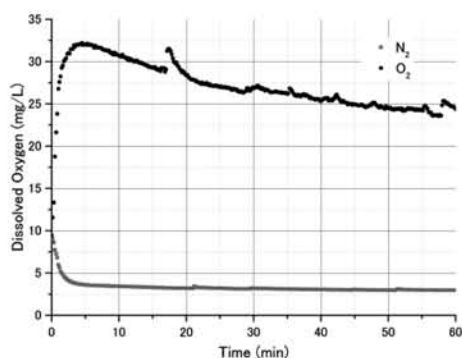


Fig. 2 Time dependence of dissolved oxygen.

Fig.2 に示す。酸素についてはおよそ 5 分程度で溶存酸素が過飽和状態に達している。また、窒素については曝気が急激に進み、2 分程度でほぼ溶存酸素量が不飽和状態に進んでいることがわかる。尚、酸素における 17 分辺りと 58 分辺りのグラフの急激な変化については、測定プローブの配置変更による測定値の変動であり、実際の測定値の変化を示すものではない。微細気泡生成時には粒径の小さな気泡が多く存在し、水に対する気体の表面積が非常に大きくなることから、溶存酸素の急峻な変化は説明できる。酸素の微細気泡については、過飽和状態から飽和量に遷移する過程と、また装置稼働中の温度上昇もあるため、溶存酸素量は徐々に減少する様子も見られる[10]。

同様に電気伝導度の変化についての結果を Fig. 3 に示すが、電気伝導度については装置稼働に合わせた緩やかな減少が酸素、窒素共に見られる。過去の研究[9,10]でも同様の傾向が見られており、帯電する微細気泡が生成されることで水の電気伝導度に与える効果の一端を示していると考えられる。微細気泡が作る電場により、正負イオン（ここでは H^+ 、 OH^- イオン）が電気二重層を構成し、気泡を電氣的に中和することが予想され、その結果として電気伝導度が低くなる。この効果

について考察する[10]。微細気泡の濃度は Fig.1 から 1 mL あたり 10^8 個のオーダーであり、水分子の個数 3.3×10^{22} 個と比較すると少なく、非常に小さい濃度である（直径 100 nm の気泡が 10^8 個/mL あった場合、気泡の体積分率は 10^{-7} のオーダー）。一般的に気泡表面は水分子との気液界面を構成するため、表面張力の影響によって気体を圧縮する応力 ΔP が働く。その大きさは、ヤング-ラプラスの式で表すことができる。

$$\Delta P = 2\gamma/r \quad (2)$$

$$\gamma = 0.07198 \text{ Nm}^{-1} \quad (25^\circ\text{C において})$$

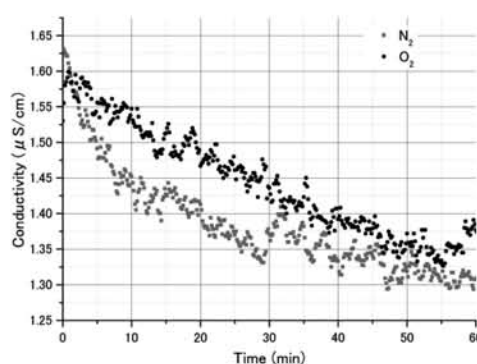


Fig. 3 Time dependence of electric conductivity.

ここで、気泡の半径を r 、表面張力を γ とした。ヘンリーの法則により、気体の溶解度は圧力に比例する。つまり、気泡が小さくなればなるほど、気体の水への溶解度が高くなるといえる。微細気泡は、水への自己溶解によって縮小し、縮小した結果、圧縮する圧力が高くなるために自己縮小して最終的に溶解により消滅する、という過程を辿る。

一方で微細気泡の安定性は、水の表面張力による圧縮応力 ΔP と帯電による引張応力 $\Delta P'$ の釣り合いによると考えられている[19]。その力 $\Delta P'$ は気泡の比誘電率を D 、真空の誘電率を ϵ_0 、帯電電荷密度を ϕ と仮定することで表せる。

$$\Delta P' = \phi^2 / (2D\epsilon_0) \quad (3)$$

これらの圧力の均衡 ($\Delta P = \Delta P'$) により、微小サイズのバブルが安定することが知られている。気泡のおよその平均半径(100 nm)から求められる気泡

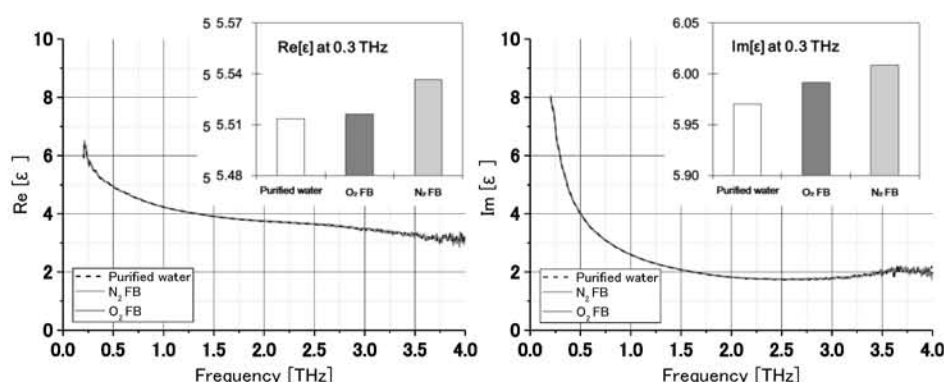


Fig. 4 Dielectric constant of water.

の電荷密度は $0.048 \times 10^{-19} \text{Cnm}^{-2}$ となり、気泡 1 個辺りの帯電量は $6.0 \times 10^{-16} \text{C}$ となる。もし、微細気泡が帯電した粒子と同様な振る舞いをすると仮定すれば、DLVO 理論(Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek theory)[20]により安定性を議論することができるが、気泡同士の相互作用を確認するためには気泡濃度があまり大きくなく、凝集や分散についての議論は微細気泡の可視化や、その他の測定とも比較検討して慎重に行う必要がある。微細気泡の測定パラメータのうち、気泡濃度と電気伝導度の相関について考察する。電気伝導度の傾き ($\mu\text{S}/\text{min}$) は、グラフよりそれぞれ -3.1×10^{-3} (N_2)、 -1.8×10^{-3} (O_2)と求められる。また、気泡濃度の変化量の傾き (単位は 10^8 個/ $\text{min} \cdot \text{ml}$) についても同様に 2.8×10^{-3} (N_2)、 3.9×10^{-3} (O_2)となる。この結果は、気泡の個数に寄与する影響と、気体の種類による影響の違いの総合が混在している結果と見ることもできるが、今後データ数を増やして今後より精度良く検討していく必要がある。

(2) 誘電率からみた水分子状態について

電気伝導度の変化は、水そのものの電気伝導度の変化を表し、予想として水中イオンの電気二重層形成を予想させる。この結果から、同様に水中で発生する電場の影響が、極性を持つ水分子集団に影響を与え、拡散抵抗が増大することが考えられる。また、THz 帯の誘電応答における水素結合性の水分子の配向緩和のうち、遅い緩和による影響は、10GHz-100GHz の比較的低い周波数帯域において発生するのに対し、非水素結合性水分子の応

答は100GHzから1THz付近に現れる(速い緩和)。本実験結果 (Fig. 4) において、スペクトル全体から視認するのは困難であるが、Fig.4 挿入図に示すように、0.3THz では N_2 微細気泡水 (グラフ上では N_2 FB) が精製水に比べて複素誘電率の実部 (0.5%)、虚部 (0.7%) とともに増加する傾向が認められた。このことは、 N_2 微細気泡水の方で非水素結合性の水分子に由来する応答が増加していることを示唆している。この影響を定量的に評価するため、式(1)より Fig.4 の複素誘電率を 2 個の Debye 緩和(式(1)右辺の第 1,2 項)と 1 個の Lorentz 振動成分(式(1)右辺の第 3 項)に分解し、その結果、遅い緩和強度 $\Delta\epsilon_{\text{slow}}$ として水素結合性の水分子(H-H bond)、また早い緩和強度 $\Delta\epsilon_{\text{fast}}$ として非水素結合性の水分子(Non bonding)の緩和強度を得た。ここで、緩和強度は分子数に比例するので、全緩和強度に対する非水素結合性水分子の緩和強度は水素結合から孤立した水分子の割合と等しい[18](Table 1)。孤立水分子の割合から比較すると、酸素の微細気泡水よりも窒素の微細気泡水の方が、水素結合が不安定化して孤立する傾向にあり、このことは帯電する微細気泡との関係を良く示していると考えられる。電気伝導度の変化割合についても Fig.3 から窒素の方がより低下傾向が大きいことが示されており、帯電する気泡が水分子に与える影響はより大きいことがわかる。気体の種類による違いがあるのかどうかについては、溶存酸素量の違いの他にも気体毎の特性、気体毎の分子量と帯電量の比較など、検討項目がまだ残っているため現状では仮説の域を出ないが、

安定性や水分子との相互作用に関して、何らかの影響があると思われる。

Table 1 Relaxation strength and fraction of isolated H₂O.

	Purified Water	O ₂ Fine bubble	N ₂ Fine bubble
H-H bond	72.77	72.73	72.64
Non bonding	2.14	2.15	2.21
Isolated H ₂ O	2.85%	2.87%	2.96%

3.2 ダイズ幼植物の各種イオン吸収へ及ぼす影響

(1) 各種イオンの吸収

FB 溶液と DW 溶液からの元素の吸収は、元素の種類により異なった (Fig. 5)。FB 溶液を用いた場合、地上部、地下部における ¹³⁷Cs、²²Na の蓄積は、DW 溶液を用いた場合より多かった。一方、FB 溶液を用いた場合の ³²P の蓄積は、DW 溶液を用いた場合と比べ少なかった。負に帯電する微細気泡[4]を考慮すると、根表面に付着した微細気泡が、陽イオンであるナトリウムやセシウムの吸収を促進し、陰イオンであるリン酸の吸収を抑制したことなどが推察され、ラジオ

アイソトープを用いた本実験結果と良く一致している。

(2) pH の影響

溶液の pH が上昇するに従い、FB 溶液と DW 溶液ともにリン酸イオンの取込が低下した (Fig. 6)。同一 pH の試験体同士のリン酸イオンの蓄積を比較すると、FB 溶液を用いた方が DW 溶液より少なかった。pH の変化は水素イオン濃度の変化に繋がるが、この変化が微細気泡に与える影響については確認することができなかった。本実験は純水を基に微細気泡を作成しているが、発芽実験の際に既に 1/2 Hoagland 溶液として様々なイオ

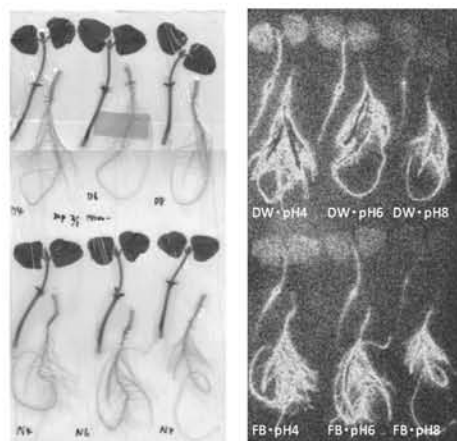


Fig. 6 ³²P Auto-geography of soybean seedlings with various pH.

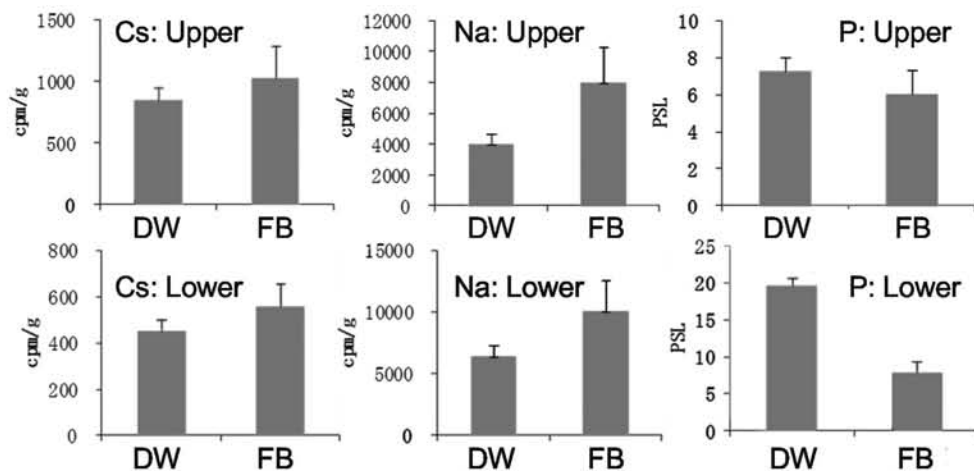


Fig. 5 Ion concentrations of ground/underground part.

ン成分が混在しており、pH の影響が打ち消された形になっていると予想される。しかしながら同じ pH に於いては結果に違いが見られることから、水中に存在する水素イオンや水酸化イオンが、溶液吸収に影響を与えていると思われる。

(3) 蒸散への影響

FB 溶液、DW 溶液とも同様に水分が減少し、蒸散量はほぼ同じであった (Fig. 7)。定常状態では蒸散速度と吸水速度は等しいので、吸水速度は吸水を直接測定しなくても、蒸散速度から推定できる[21]。両溶液でダイズ幼植物の蒸散量に違いはないことから、両溶液の吸水速度も同等であり、吸水速度はイオンの吸収に影響しないといえる。

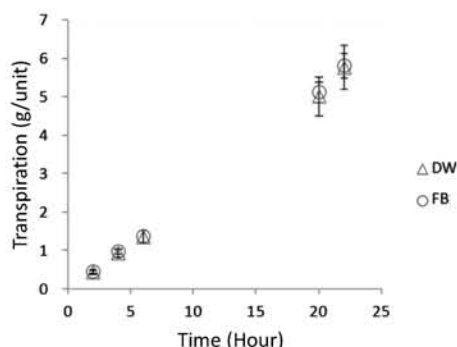


Fig. 7 Transportation amount of water in soybean seedlings.

4. 結 言

本研究においては、微細気泡が持つ特性について電気伝導度と誘電率の観点から評価し、その原理について考察を行った。また、応用利用としてダイズ発芽におけるラジオアイソトープの吸収について微細気泡の効果を検証した。電気化学的な特性としての効果としては、負に帯電する微細気泡の影響を電気伝導度の形で計測できていることを確認し、また水分子との相互作用をテラヘルツ帯の誘電率として計測することで、微細気泡が水分子の水素結合に影響を与えていることを示した。同様にダイズ発芽における応用試験では、帯電する微細気泡がアニオン・カチオンとして正負に存在する溶液中のイオンにも影響を与えることを示し、その応用利用の可能性について示し

ている。今後の課題としては、誘電率については測定結果がまだ微小であるため、より高感度の測定システムを考案して精度を上げることを考えている。また、応用実験については、他イオンの取込や、吸収条件等を検討し、微細気泡のイオン吸収のメカニズム解明は、微細気泡水を農業分野で利用する際の課題である。

謝 辞

本課題を遂行するにあたり東京大学大学院農学生命科学研究科の大下誠一教授に多大なご指導をいただいた。また同研究室柳妹博士にはダイズ発芽試験の際、微細気泡の生成をしていただいた。尚、本研究の研究費の一部は、京都大学生存圏研究所、京都大学、戦略的イノベーション創造プログラム、Ligatic (株)、及びサンスター (株) の助成により行った。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- [1] Tabei, K., Haruyama, S., Yamaguchi, S., Shirai, H. and Takakugi, F., Study of Micro Bubble Generation by a Swirl Jet, J. Env. Eng., Vol.2, 172-182 (2007).
- [2] Gallego-Urrea, J.A., Tuoriniemi, J., Hassellöv, P. M., Measurements of nanoparticle number concentrations and size distributions in contrasting aquatic environments using nanoparticle tracking analysis, Environ. Chem. 7, 67 (2010).
- [3] Van der Pol, E., Hoekstra, A.G., Sturk, A., Otto, C., Van Leeuwen, T.G., Nieuwland, R., J., Optical and non-optical methods for detection and characterization of microparticles and exosomes., Thromb Haemost, 12, 2596-607 (2010).
- [4] Serizawa, A., Basics of Micro/Nano Bubbles (in Japanese), Journal of the J IME, Vol. 46(6) 861-866 (2011).
- [5] Du, S., Kendall, K., Morris, S. and Sweet, Measuring number-concentrations of nanoparticles and viruses in liquids on-line., C., J. Chem. Technol. Biotechnol., 85, 1223-1228 (2010).
- [6] Gallego-Urrea, J.A., Tuoriniemi J., Hassellöv, M., Applications of particle-tracking analysis to the determination of size distributions and concentrations of nanoparticles in environmental, biological and food samples, TrAC Trends in Analytical Chemistry, Vol. 30(3), 473-483 (2011).
- [7] Ushikubo, F. Y., Furukawa, T., Nagasawa, R., Enari, M., Makino, Y., Kawagoe, Y., Shiina, T. and

- Ohshita, T., Evidence of the Existence and the Stability of Nano-Bubbles in Water, S., Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Aspects., Vol. 361, 31–37 (2010).
- [8] Tanaka, Y., Kikuchi, K., Saihara, Y. and Ogumi, Z., Bubble Visualization and Electrolyte Dependency of Dissolving Hydrogen in Electrolyzed Water Using Solid-Polymer-Electrode, Electrochim.Acta., Vol.50, 25–26 (2005).
- [9] Ueda, Y., Tokuda, Y., Zushi, T., Electrochemical Performance of Ultrafine Bubble Water, ECS transactions, ECS transactions, Vol.58(19), 11–19 (2014).
- [10] Ueda, Y., Tokuda, Y., Nihei, N., Electrochemical Properties of Fine Bubble Water in Various Gases (in Japanese), New technology of fine bubbles Vol. 2(3), 63–71 (2014).
- [11] Ago, K., Nagasawa, K., Takita, J., Itano, R., Morii, N., Matsuda, K. and Takahashi, K., Development of an Aerobic Cultivation System by Using a Microbubble Aeration Technology, J Chem. Eng. Jpn., Vol.38(9), 757–762 (2005).
- [12] Ueda, Y., Tokuda, Y., Nihei, N., Yajima, Y., Yabuki, T., Fleshness Enhancement of Cut Flowers by Using Water Containing Fine Bubbles Int. Japanese Journal of Multiphase Flow, Vol. 28(3), 340–344 (2014).
- [13] Ikeura, H., Kobayashi, F. and Tamaki, M., Removal of Residual Pesticide, Fenitrothion, in Vegetables by using Ozone Microbubbles generated by Different Methods, J.Food Eng., Vol.103, 345–349 (2011).
- [14] Uchida, T., Ohshita, S., Ohmori, M., Tsuno, T., Soejima, K., Shinozaki, S., Take, Y. and Mitsuda, K., Transmission Electron Microscope Observations of Nanobubbles and Their Capture of Impurities in Wastewater, Nanoscale Research Letters., Vol.6(1), 295 (2011).
- [15] Ueda, Y., Tokuda, Y., Fujimura, S., Nihei, N. and Oka, T., Removal of Radioactive Cs from Gravel Conglomerate Using Water Containing Air Bubbles, Water Science and Technology, Vol.67(5), 996–999 (2013).
- [16] Ueda, Y., Tokuda, Y., Fujimura, S., Nihei, N. and Oka, T., Cesium Transfer from Granule Conglomerate, Asphalt, and Concrete Using Water-Containing Nanosized Air Bubbles, ECS Trans., Vol.50, 1–6 (2013).
- [17] Tokuda, Y., Matsuki, H., Ueda, Y., Masai, H., and Yoko, T., Crystal Growth of ZnO Microneedles in Water Containing Microbubbles. New Journal of Glass and Ceramics, vol. 4, 49–54 (2014).
- [18] Yada, H., Nagai, M., and Tanaka, K., Origin of the Fast Relaxation Component of Water and Heavy Water Revealed by Terahertz Time-Domain Attenuated Total Reflection Spectroscopy, Chemical Physics Letter, 464, 166–170 (2008).
- [19] Duval, E., Adichtchev, S., Sirotkin, S., and Mermet, A., Long-lived Submicrometric Bubbles in very Diluted Alkali Halide Water Solutions, Phys. Chem. Chem. Phys. 14, 4125–4132 (2012).
- [20] Kirabara, F. and Watanabe, M., Interfacial Electrical Phenomena - Basis, Measure and Applications - (in Japanese), Kyoritsu publishing, pp.50–55 (1972).
- [21] Encyclopedia Editorial Board of roots (in Japanese), Dictionary of the root, Asakura bookstore, 350–352 (1998).
-