

令和 4 年 6 月 1 日現在

機関番号：17401

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2020～2021

課題番号：20K21352

研究課題名(和文) ナノバブル水による農地土壌条件の革新的な改善の可能性開発

研究課題名(英文) Development of possibilities for innovative improvement of farmland conditions with nano-bubble water

研究代表者

渡邊 紹裕 (Watanabe, Tsugihiro)

熊本大学・くまもと水循環・減災研究教育センター・特任教授

研究者番号：50175105

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、超微細気泡(ウルトラファインバブル,ufb)の包含量の多いufb水を用いて、農地の土壌環境を改善する可能性を開発した。成果の概要は以下のとおり。

1)先行応用例をレビューし、ufb水の活用と適用の条件を検討した。実際にイチゴ栽培温室で導入試験を行い、灌水中のufbを増加させる器具の導入の可能性と課題を確認した。2)ufbの生成を最新技術で測定する手法の開発を試みた。小角X線散乱測定限界を確認し、より精緻な手法の活用を含め、測定方法の改善の課題を整理した。3)土壌カラムなどを用いて、ufbによる土壌物理化学的な変化と植物生育の関係の精緻な測定を行い、土壌環境改善の可能性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ナノサイズ超微細気泡(ウルトラファインバブル[ufb])の包含量の多い水は、洗浄、微生物活性化・水浄化、農作物栽培、水産養殖などの分野での応用が進められていて、農業生産では、施設栽培などでの使用例や効果が紹介されているが、その有効性の機構を含め不明な部分が多い。その機構や規定関係を明確にすることは、今後の活用の拡大のための基礎的な知見となり、応用研究に向けての学術的意義は大きい。また、多量の水を利用し社会・経済・環境に及ぼす影響が大きい農業・農地における水と土壌の環境の改善に貢献することから、食料生産の効率性と省資源・環境保全という社会貢献につながるものである。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to develop the possibility of improving the soil environment of agricultural lands by means of ufb-water, which is water with a higher content of ultrafine bubbles (ufb). The results are summarized as follows

1) Previous applications in the world are reviewed and the application conditions are examined for the use and application of ufb-water. 2) Development of a method to measure ufb production using state-of-the-art technology is attempted. The limitations of small-angle X-ray scattering measurements are confirmed and issues or constraints for improving the measurement method, including the use of more sophisticated techniques, are identified. 3) Using soil columns, precise measurements of the relationship between ufb-induced changes in soil physicochemical properties and plant growth are conducted and the possibility of improving the soil environment with the application of ufb-water is confirmed.

研究分野：農学(農業工学)

キーワード：ウルトラファインバブル水 小角X線散乱法 農地土壌環境 作物生育 イチゴ栽培 灌漑排水

1. 研究開始当初の背景

ナノサイズ超微細気泡（以下、ウルトラファインバブル [ufb]）の包含量の多い水（通称「ナノバブル水」）は、水中の微細な気泡の性質を活用して、洗浄、微生物活性化・水浄化、農作物栽培、水産養殖などの分野での応用が進められている。農業生産では、施設栽培などでの使用例や効果が紹介されているが、その有効性の機構を含め不明な部分が多い。多量の水を利用し社会・経済・環境に及ぼす影響が大きい農業・農地における水と土壌の環境の改善に、それを用いる可能性が明確に示されれば、その活用の拡大の基礎が築かれることから、その開発の意義は大きいと考えられた。その認識の中、より微小なナノスケールの気泡を多量に含む水を比較的安価で安定的に製造する器具（トルネーダー）が近年開発されたことを受け、その活用を中心に、「ナノバブル水」の農地土壌改善への導入・活用の可能性と効果を評価し、必要技術要件の明確化を図ることが求められた。

2. 研究の目的

本研究は、ナノサイズ超微細気泡(ufb)の包含量の多い「ナノバブル水」による農地土壌条件の「飛躍的で革新的な改善」の可能性を開発することを目的とした。

本研究では、特殊な射出成形法によって成形されたプラスチック製のパーツ部品によって安定的で比較的安価に「ナノバブル水」を製造できる最新器具（トルネーダー）の活用を前提とし、「ナノバブル水」の活用の必要性の確認、ナノサイズ超微細気泡 (ufb) の存在形態の検証と、その土壌・作物栽培に及ぼす効果の実験的評価、という 3 つの課題に取り組み、「ナノバブル水」による農地土壌条件の活用の可能性を考究することを目的とした。

3. 研究の方法

研究は 3 つのサブ課題への取組みを中心に行った。利用するナノバブル水発生器具（トルネーダー）の開発者や関係者、関連分野の研究者、そして技術適応・検証に協力頂ける農家に、知見や情報の提供を含めて、適宜協力を求めた。各課題における研究の方法の概要は以下のとおりである。

- ①サブ課題 1：国内外の既存の「ナノバブル水」を活用した技術と応用事例から、その利点・課題を分析評価し、気泡サイズをナノサイズにすることによる効果向上の可能性と、適用が有効となる場面・条件を絞り込む。実際に、農業生産における灌水に導入して、その方法や効果についての予備的知見を得る。
- ②サブ課題 2：農地での利用に有効と思われる、安価で容易な「ナノバブル水」の発生器具（トルネーダー）が開発されており、バブルのサイズや経時変化など、それによるウルトラファインバブルの存在形態を最新の測定技術で測定・確認する。ナノサイズなど超微細気泡の存在の確認には、小角 X 線散乱法を利用することなど最新技術の活用が必要であり、高エネルギー加速器研究機構の加速器を利用することなどを含め、測定技術の開発・応用も行う。
- ③サブ課題 3：「ナノバブル水」を土壌カラムに灌水し、土壌中の透水・保水、蒸発などの挙動と土壌物理化学性の変化を、精緻な測定によって分析・評価する。さらに、植生・農作物生育のある土壌カラムを用いて、水動態と土壌物理性の変化に加えて、植物生育と肥料成分動態の変化を分析・評価する。

4. 研究成果

本研究の成果を、3つのサブ課題ごとに概要を整理すると以下のようになる。

- ①サブ課題 1：国内外の既存の微細気泡（ファインブル）水を活用した技術と応用事例を分析評価し、ufb 水によって土壌環境を改善する可能性と、適用が有効となる条件の検討を行った。それを踏まえ、熊本県内で、サツマイモ種芋生育やイチゴ栽培における活用可能性を生育農家と共に検討した。そして、実際にイチゴ栽培温室でのトルネーダー試用を行い、灌水中の ufb の増加を確認した上で、成果観察を行った。
- ②サブ課題 2：バブルのサイズや経時変化を含め、トルネーダーによる ufb の生成と存在形態を最新測定技術で定量的に確認する手法の開発を試みた。通常の小角 X 線散乱測定での限界を確認できたため、カメラ長の長い超小角 X 線散乱測定を大型放射光施設 SPring-8 で実施した。しかし、なお ufb 発生の変化を確認することはできなかったため、より精緻な手法の活用を含め、確認方法の改善の課題を整理した。
- ③サブ課題 3：ufb 水の土壌中の存在や動態を確認する基礎実験として、ufb 存在と水中溶存酸素量、土壌透水・保水性及び土壌 Eh の関係を測定し、ufb による土壌環境改善の可能性を確認した。土壌カラムを用いての ufb 水による土壌物理化学性の変化と植物生育の関係の精緻な測定を行い、佐賀県内の花卉栽培温室を例に、今後の可能性検証のための詳細な実証試験の実施と装置開発の基本要件を準備した。

全体をまとめると、ナノサイズ超微細気泡(ufb)の包含量の多い「ナノバブル水」による農地土壌条件の改善の可能性を一定程度示すことができ、今後の「飛躍的で革新的な改善」への基礎的知見が得られ、課題を示した上で、それへの取組みを開始することで、次の開発・展開の基盤を構築できた。

以下、サブ課題の主要な研究成果を示す。

① サブ課題1 主要研究成果

国内外の既存の微細気泡（ファインブル）水を活用した技術と応用事例を確認・評価し、ufb水によって土壌環境を改善する可能性と、適用が有効となる条件の検討は十分になされていないことを確認した。そして、実際の応用も、水耕栽培など特定の分野に限られ、農地や施設で実際に灌水されている「ナノバブル水」の中のufbなど微細気泡の存在状況を、定量的に詳細に説明している例や文献はほとんどないことが分かった。

それを踏まえ、熊本県内のイチゴ温室栽培で、トルネーダーを用いた灌水中のufb増加の可能性と効果検証を、生育農家の協力を得て検討した。図1-1はトルネーダーの配置状況である。

チューブ灌水システムへの導入には大きな問題は無く、活用の可能性は確認できた。また、実際の温室における灌水で、トルネーダーを用いることでのufb数の増加を、灌水を採水し、微細

粒子存在量の測定ができるナノサイトを用いて確認した。継続して、随時測定したが、一例として、栽培盛期の2022年2月19日採水の測定結果を図1-2に示す。

トルネーダーを3個導入したものは、1個や導入無しに比べて、より小さなサイズのバブルが多数存在することが確認できたが、確証を持てるレベルでの確認には至らなかった。収穫したイチゴ粒の重量や糖度に、明確な差は確認されなかったが、農家の観察では、トルネーダー導入の畦のイチゴの葉の生育は比較的好調であるとのことである。これから、今後のトルネーダー導入位置の変更とともに、継続した栽培状況変化の定量的な評価の必要性が明らかとなった。

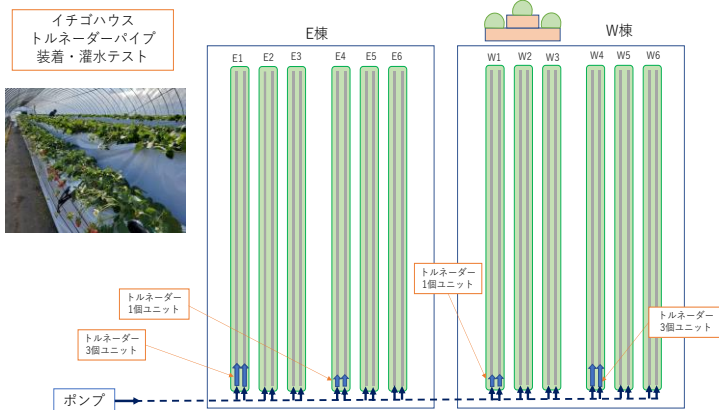


図1-1 イチゴハウス灌水システムにおけるufb発生器具導入試験 器具配置図

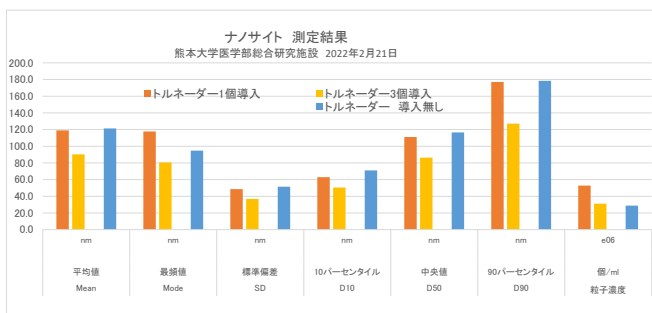


図1-2 イチゴハウス灌水中のufb存在状況（ナノサイト測定結果）

②サブ課題2 主要研究成果

トルネーダーを用いて、水中にufbを簡易的に発生させることができることを実験で確認することは、動的光散乱法によってなされていたが、光の波長領域（最小でも350nm程度）を用いて、10nm程度のufbの存在を捉えたという実験事実は、確定的なこととは言い難く、より小波長のX線を用いた実験的検証が必要である。そこで、シンクロトロン施設（高エネルギー加速器研究機構・放射光実験施設）を用いて波長1Åで小角X線散乱測定を系統的に行い、1~100nmの領域でのufbの実態を検証する試みをおこなったが、確実といえる結果は得られなかった。これを踏まえ、SPring-8のBL-20XU（カメラ長190m）にて超小角X線散乱測定を行い、0.1~3μmサイズのバブルの発生を検証することを行った。

図2-1に示すように、トルネーダーを1個設置した場合のみならず、2個、あるいは3個直列に連結させ（間隔：5, 10, 15cmの3種類）、出口のトルネーダーを水中に埋没させた場合と空中から取水タンクに噴射した場合の、合計14種類で処理した水道水を作製した（表2-1）。この時の水道の圧力は、0.10~0.14MPaであった。

図2-2に全ての処理水の超小角X線散乱プロフィール（散乱強度のq依存性；ここで $q = 4\pi/\lambda \sin(\theta/2)$ 。λはX線の波長、θは散乱角）を示した。図に示されるように、全て、比較試料S0（トルネーダーを通さない状態で水道蛇口より取水した水）との変化がないことが明らかになり（全ての結果が誤差範囲内で一致）、この手法でのufb存在の確認はできなかった。そこで、より有効な測定手法とし

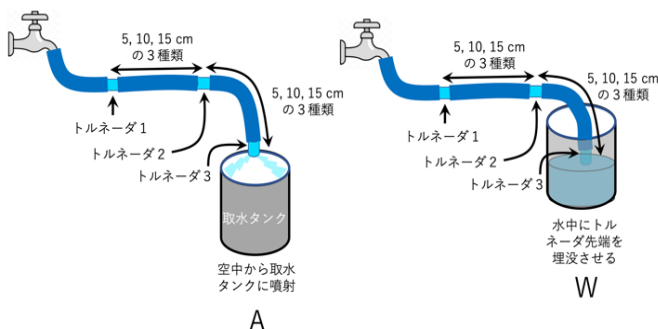


図2-1 トルネーダー処理水作製の模式図

て、マイクロ流路・共振式質量測定法の利用を考察した。先行研究として、安井ら動的平衡説が提唱されている（文献1）。

これは、ufbの表面の一部だけが疎水性物質で覆われるとufbが安定化するというものである。すなわち、油や炭素粉末といった疎水性物質は、水をはじく性質があるため、疎水性物質と水が接している境界に厚さ0.2~5 nm程度の空乏層（水の密度が44~94%程度に低下している薄い領域）が存在する。そこに、水に溶解している気体の一部が溜まることで気体濃度が高くなり、その結果、疎水性物質の周縁部から溶解している気体がバブル内に気化する、というものである。その説の検討を含め、非常に有効であるといわれるマイクロ流路・共振式質量測定法の活用など、トルネーダーによるufb生成の立証の課題が明らかとなった。

文献1. 安井久一, ウルトラファインバブル, 日本音響学会誌小特集「音波と気泡」, 日本音響学会誌, 73巻7号, pp. 424-431 (2017).

③サブ課題3 主要研究成果

トルネーダー処理水の土壌物理化学性及び作物生育への影響に関する4つの実験を実施した。その主要な成果を、以下に示す。いずれの実験においても、トルネーダーの数は1個で、水中吐出をT1、空中吐出をT2、トルネーダー無をT0で表す。水道水を使用し、トルネーダー処理時の1次水圧は0.08~0.1MPaであった。

1) 実験1：溶存酸素濃度への影響

3種類（T0, T1, T2）の水をフラン瓶（各処理5個）に注ぎ、インキュベータ（20℃）に静置し、12, 26, 40日後に溶存酸素濃度（DO）を測定した（図3-1）。開始時（処理直後）のT2のDOは、水道水より温度の高い空中への吐出の影響のため他に比べ低いが、12日目に3つのDOがほぼ等しくなった。その後、26日目のDO（5体平均）はT0で8.92mg/L, T1で8.96mg/L, T2で8.92mg/Lと処理区による違いは無いが、40日目ではT0で8.57mg/L, T1で8.65mg/L, T2で8.64mg/Lとトルネーダー処理した水（T1, T2）がT0より高くなる傾向がみられた。

2) 実験2：土壌酸化還元電位への影響

水田圃場土（重粘土）を風乾して2mm篩にかけたもの（含水比3.6%, 強熱減量10.1%）を300ccガラスビーカー（6個）に充填し、2種類（T0, T2）の水をそれぞれ3個のビーカーに静かに注ぎ入れた。これらをインキュベータ（25℃）で約1日間養生したのち、土壌酸化還元電位（Eh）を連続計測した（図3-2）。測定開始から約1週間は、T0のEh（3体平均）がT2より高くなった（最大で3.6mV）が、これは実験1と同様、注ぎ入れたT2のDOがT0より低い（T0:9.67mg/L, T2:9.57mg/L）ことによるものと考えられる。その後、②処理の差は徐々に小さくなり、25日目から46日目にかけてはT2の方が若干高くなった（30日目から32日目では0.8mV以上）。

3) 実験3：作物生育への影響

風乾した水田圃場土を12個の1/5000aワグネルポットに土層厚18cmで充填し、ミズナ1個体を植え付けた。3種類（T0, T1, T2）の水を入れた容器（水深10cm程）に4ポットずつ浸け、ポット下方の孔より吸水させた。各処理の3つのポットの土壌Ehを連続計測した（センサー深度8cm）（図3-3）。

表2-1 試料の詳細（S0は比較試

試料コード	トルネーダー数	トルネーダー間隔/cm	先端のトルネーダーの状態 (A: 空中から噴射, W: タンクの水中に埋没)	水道水の圧力 /MPa
S0	0	—	—	0.05
S1	1	—	A	0.1
S2	1	—	W	0.12
S3	2	5	A	0.11
S4	2	10	A	0.11
S5	2	15	A	0.12
S6	2	5	W	0.11
S7	2	10	W	0.12
S8	2	15	W	0.12
S9	3	5	A	0.13
S10	3	10	A	0.13
S11	3	15	A	0.14
S12	3	5	W	0.12
S13	3	10	W	0.13
S14	3	15	W	0.14

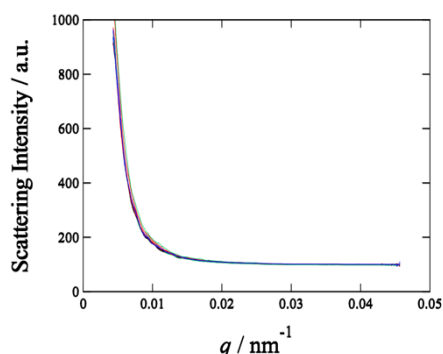


図2-2 すべての処理水の超小角X線散乱プロフィール

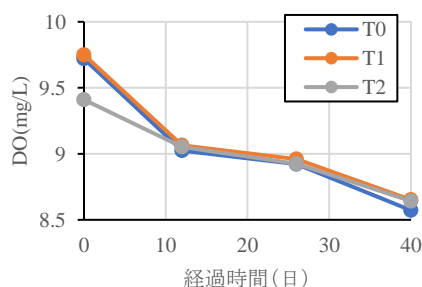


図3-1 溶存酸素濃度の変化(実験1)

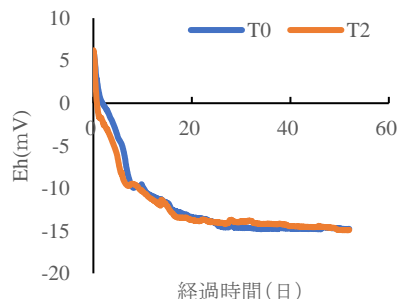


図3-2 土壌Ehの変化(実験)

土壌 Eh の各処理平均は、トルネーダー処理しない T0 は、計測開始から 10 日目くらいまで徐々に低下し、その後、数 mV ほどで推移したのに対し、トルネーダー処理では実験期間を通して 15mV 前後で推移し、T2 のほうが T1 より数 mV 高かった。実験終了時の植物体の地上部乾物重は、トルネーダー処理の T1 と T2 がトルネーダー無の T0 より 1 割ほど大きかった (図 3-4)。

4) 実験 4 : 土壌物理性 (透水性・保水性) への影響

飽和透水係数測定装置 (METER 社, KSAT) および水分特性曲線・不飽和透水係数測定装置 (METER 社, HYPROP) を使い、ガラスビーズ充填体を対象に、T0 と T2 による透水性および保水性の違いを調べたが、明確な差異は確認できなかった。

これらの実験より、トルネーダー処理水について、以下のことが明らかになった。

- a. 溶存酸素濃度および土壌酸化還元電位をわずかながら上昇させ、その効果は、処理から数週間経過して確認できるようになる。
- b. 土壌のような多孔質体に用いた場合、物理性 (透水性, 保水性) に明らかな変化を及ぼすことはない。
- c. 植物の生育を促進する。

植物生育促進効果が、吸水といった直接的な要因によるものか、土壌環境の改善といった間接的な要因によるものかを詳細に分析して、明確にすることが課題であることを明らかにした。

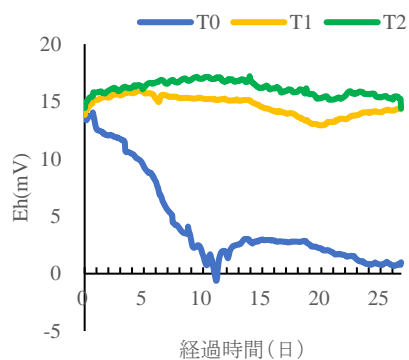


図 3-3 土壌 Eh の変化 (実験 3)

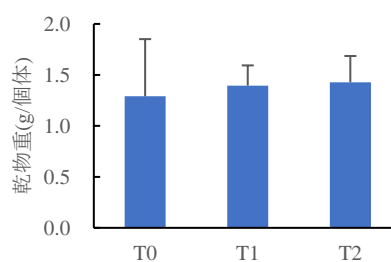


図 3-4 各処理の乾物重 (実験 3)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	櫻井 伸一 (Sakurai Shinichi) (90215682)	京都工芸繊維大学・繊維学系・教授 (14303)	
研究分担者	原口 智和 (Haraguchi Tomokazu) (90346833)	佐賀大学・農学部・准教授 (17201)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	濱 武英 (Hama Takehide)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------