

ファインバブルの特性とその応用

Properties and Applications of Fine Bubbles

氷室 昭三**
Shozo HIMURO

概要

ファインバブルによる水の性質の変化および生物に及ぼすファインバブルの効果について述べた。酵母へのファインバブルの効果を実験時間依存性から確認することができ、30分間ファインバブル処理で1.3倍、60分間ファインバブル処理で1.8倍のコロニー数が増加した。イチゴおよびサラダスナップの灌水にファインバブルを適用したところ、それぞれ通常の11%および14%の収穫を上げることができた。ノリは、ファインバブルを用いたことで胞子の出現率が60%から85%まで上昇し、エビはファインバブルによって生存率が70%からほぼ100%まで上昇した。

1. はじめに

1997年12月に水環境技術研究会を立ち上げたが、これが筆者の知る限り、組織として、世界で初めてのマイクロバブル技術に関する研究会である。高専では、技術に視点を合わせた工学の応用で、開発・システム・生産技術の教育を行い、ものづくりのできる開発型の技術者教育を行っていかうということで日本高専学会の中に立ち上げた組織である。マイクロバブル技術に関する開発型の研究を徳山高専、宇部高専、神戸市立高専、有明高専の4つの高専が連携して始めた。

マイクロバブルとは1 μ m以上で1mm未満の気泡であるが、これまで100 μ m以下の気泡をマイクロバブルと定義されている場合もある¹⁾。

よく観賞魚の水槽中に発生しているエアストーンからの気泡は、水中を急速に上昇して空気との界面で破裂して消える。ところが、気泡を小さくし100 μ m以下の大きさにすると水中で発生した多くの気泡は、水中で縮小していき、ついには破裂して消滅してしまう²⁾。このようなことから100 μ m程度以下の気泡をマイクロバブルと定義したようであるが、温度や圧力によってその挙動は変化する³⁾。

このような小さな気泡に関する研究は、当時ほとんど行われていなかった。Cliftらの気泡に関する報告でも最小気泡系は300 μ m程度であった⁴⁾。

その後、ナノサイズのナノバブルが登場するようになるが、マイクロバブルも収縮してナノサイズになって圧

壊して消滅するので、このような気泡のことをファインバブルと命名することにした。

ここでは、このファインバブルの基礎的性質とそれを用いて微生物から植物、動物に対する生物活性作用を明らかにすることを目的として行った実験結果を紹介する。

2. 実験

2.1 ファインバブル発生方法

実験にはH型ファインバブル発生装置を使用した。この装置は、空気と液体吸入部の前方が円錐状に内径が小さくなる構造で、この円錐状のテーパ管の傾斜側周面部分から液体を取り込み、テーパ管の先端部分から気体を取り込む構造になっている。テーパ管内部にテーパ管の内径が大きくなる後方に向けて流速を生じさせているが、テーパ管内部に発生した負圧領域で気液混合してテーパ管の下流側にそれを排出し、テーパ管の下流側の正圧領域の液体の圧力を利用して超微細気泡を生成する⁵⁾。

H型発生装置から発生するファインバブルの直径は、ほぼ40 μ m以下で、かなり小さなファインバブルを発生させることができる。このファインバブルの大きさについては、Dyna Flow社によって開発された音響式気泡分布径分布計測装置を用いて測定した²⁾。

2.2 酵母増殖率の測定

酵母懸濁液の調製は、YPD液体培地300 cm^3 を坂口フラスコに入れ、オートクレーブ(121 $^{\circ}\text{C}$, 20分)で滅菌後、

* 原稿受理 平成29年12月8日

** 米子高専校長

クリーンベンチ内で酵母を YPD 液体培地に 1 白金耳を植菌した。酵母は 30°C で綿栓をして 24 時間、振とう培養した。培養後、遠心分離 (TOMY-LC100, 3000 rpm, 5 分) により酵母を回収した。回収した酵母は滅菌水に入れ、これを細菌懸濁液とした。細菌濃度はファインバブル処理水を添加した際に 660 nm での吸光度が 0.5 程度になるように調整した。

クリーンベンチ内でオートクレーブ滅菌した蒸留水をファインバブルで、0 分、30 分、60 分と時間を変えてバブリングしたファインバブル処理水を作成した。クリーンベンチ内で細菌の懸濁液 10 cm³ にファインバブル処理水を 10 cm³ 添加した。このとき滅菌水を加えたものをコントロールとし、ファインバブル処理水添加後 0 分と 90 分間の細菌懸濁液は 10³ 倍希釈し、寒天培地に 10 μl 植菌し、各菌の最適温度で 1 日培養した。培養後生じたコロニー数を生菌数としてカウントした。

2.3 植物への実証実験

イチゴに対するファインバブル発生装置は H100 型を使用した。自給する空気量を 140 dm³/min (気液比約 0.1%) に調節した。試験規模はファインバブル群も対照群もビニールハウスで 34 m × 6 m とした。試験期間は 10 月 4 日～4 月 1 日で、イチゴの品種はエミリーを用いた。ハウス栽培の定植イチゴ (約 1000 株) に対して、ファインバブル水を灌水 (1 回/4 日) するため、容量 2000 dm³ のローリータンクを 2 個、およびファインバブル発生装置 2 台の据え付け作業を行った。この現場における灌水には、地下水を使用した。

サラダスナップに対するファインバブルの効果もイチゴと同様に灌水 (1 回/8 日) で栽培した。ハウス栽培 (約 38 m × 4.7 m) で試験期間は 11 月 14 日～2 月 14 日とした。なお灌水には、ダムの水を使用した。

2.4 ノリへの実証実験

ノリ培養場水槽で、試験規模は縦 2 m、横 2 m、深さ約 1 m のノリ糸状体培養水槽 44 基のうちの 1 基をファインバブルでバブリングした。試験期間は 6 月 29 日～7 月 31 日とした。実験系の試験水槽にファインバブル発生装置 2 台を対角線上に設置した。ファインバブル発生装置の運転時間は、1 日 8 時間運転とした。なお、基本的な物性値が、対照水槽、ファインバブル水槽において、違いが見られるか確認するため、ファインバブル群の水槽、対照群の水槽に溶存酸素計、電気伝導度計、pH 計、酸化還元電位計、温度計を据え付けて水の性質の変動を確認した

2.5 エビへの実証実験

クルマエビの大きさが約 1 cm から 3 cm 程度まで成

長する中間育成にファインバブルを適用した。クルマエビ中間育成水槽は、11.7 m × 7.5 m の大きさで、循環式ろ過塩水を使用しており、水槽部内に海水を 40 t ほど入れた。クルマエビ中間育成水槽の周囲には、エアストーン 25 個をほぼ等間隔に設置した。このエアストーンには、富士電機システムズ (株) 製のリングフロー (送風量 1950 dm³/min, 消費電力 850 W) から空気が送られてきて、クルマエビ中間育成に必要な溶存酸素濃度を確保した。

ファインバブル発生装置は H30 型を使用し、空気量を 340 cm³/min (気液比約 2 %) に調節した。

エアストーンでバブリングされている中間育成水槽に、さらにファインバブル発生装置を連続で稼動するように中間育成水槽の長い方の両サイドに 3 台ずつ設置した。

エアストーンのエアレーション約 2000 dm³/min に対して、ファインバブルによる空気供給量は、約 2 dm³/min で、全体の空気供給量の約 0.1% とした。

3. 結果と考察

3.1 ファインバブルによる水の性質の変化

25°C の蒸留水をファインバブルで 2 時間処理すると pH が 1 程度低下した。これは、酸性に傾いたわけではない。水分子の解離度が大きくなったことによる。

水の表面張力は、多くの液体に比べて異常に大きく、この現象は分子間引力に基づいている。水の場合、分子量は小さいが、水分子同士の水素結合により、表面分子の内部への力が大きくなり表面張力が大きくなっている。図 1 にバブリングした時間に対する 25°C の蒸留水の表面張力をプロットした。蒸留水をバブリングすることで表面張力は低下した⁹⁾ が、これはファインバブルによって水分子の水素結合が切断されたことを示している。したがって、このことによって水分子の解離が進み pH の低

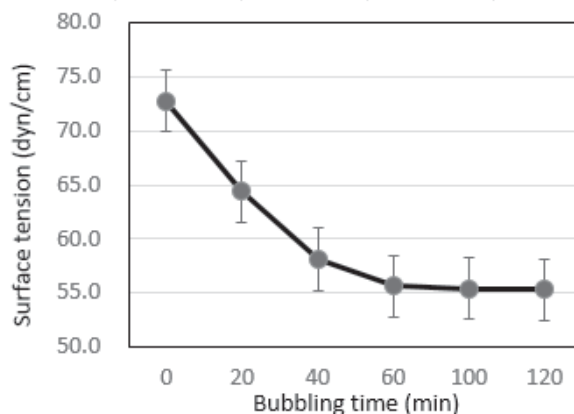


図 1 蒸留水をファインバブルで処理した表面張力の時間変化⁹⁾

下が生じたと考えている。

3.2 ファインバブルによる酵母の増殖

酵母の菌懸濁液に滅菌水またはバブリング時間を変えたファインバブル処理水を添加したときの生菌数の変化を図2に示すが、対照とした滅菌水、30分間または60分間ファインバブル処理した水を添加した直後のものには生菌数に変化が見られなかった。しかし、各ファインバブル処理水を添加して90分後の生菌数は、コントロールより30分間ファインバブル処理した水を添加したもので1.3倍、60分間ファインバブル処理した水を添加したものは1.8倍にコロニー数が増加した⁷⁾。

微生物懸濁液の中には基本的に菌体成分となるような栄養素は含まれていないが、バブリング時間に依存して生菌数が増加した結果より、ファインバブル処理水には酵母の増殖や生存に対する生理活性作用があり、培地上で酵母が活発に増殖したと考えられる。

3.2 ファインバブルが及ぼす植物への効果

ファインバブルで処理した地下水をイチゴに灌水して栽培を行った。地下水の溶存酸素は、約2 mg/dm³程度であったが、ファインバブルで処理することで溶存酸素濃度はほぼ飽和値に達し、pHは5.7から4.1に下がった。地下水をファインバブル発生装置でバブリングするとpHが低下することがわかった。

ファインバブルによるファインバブル群と対照群におけるイチゴの収穫比較を単位面積当たりの積算収穫比較で行った。その結果を図3に示すが、単位面積当たりの積算収穫が、ファインバブル群が28.0 kg/m²で、対照群が25.3 kg/m²となったことから、ファインバブルを灌水している方が、対照群に比べて11%向上している結果が得られた⁶⁾。このことからファインバブルによるイチゴの成長促進効果を確認することができた。

サラダスナップにもファインバブルで処理した水を灌

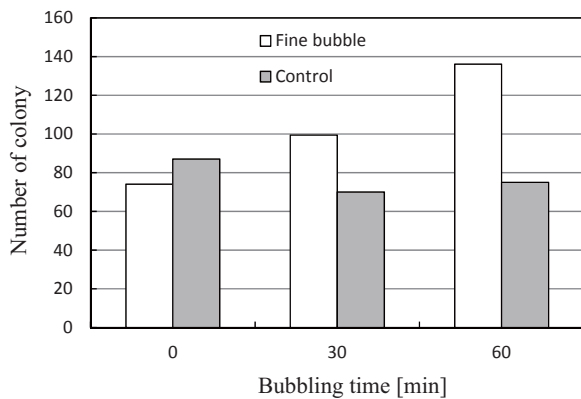


図2 酵母のファインバブル処理時間依存性⁷⁾

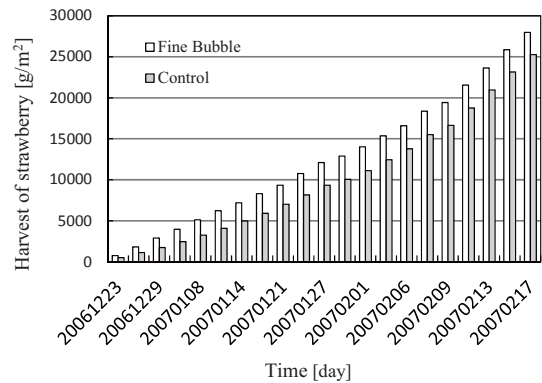


図3 ファインバブル処理したイチゴの収穫量の経時変化⁶⁾

水して栽培した。ただ、水はダムの水であり、ファインバブルでバブリングするとpHは、6.5から6.4とほとんど変化しないことがわかった。

ファインバブル群と対照群におけるサラダスナップの収穫比較を単位面積当たりの積算収穫比較で行った。その結果、単位面積当たりの積算収穫でファインバブル群が1122.1 g/m²に対し対照群が984.2 g/m²となり、収穫量が対照群に比べて約14%向上している結果が得られた⁶⁾。

3.3 ファインバブルのノリへの効果

ファインバブル群も対照群も、夜間は、ノリ糸状体の自呼吸により、昼間、光合成で蓄えた培養水槽内の溶存酸素が消費されていたことがわかった。ファインバブル群のノリ糸状体は、対照群に比べて、酸素を供給しているにも関わらず、溶存酸素の消費速度が大きく、夜間、非常に活発に活動していることも判明した。

ファインバブル適用培養水槽のノリ糸状体と対照水槽のノリ糸状体における孢子定着率を比較した結果を図4に示す。ノリの孢子定着率は、ノリ糸状体が穿孔している牡蠣殻から、糸状体を取り出し孢子の定着具合を顕微鏡観察することにより算出した。

今回のファインバブル試験は、ノリ糸状体に対して、33日間、ファインバブル発生装置によるバブリングを1日8時間として行った。この期間において、7月下旬頃より、珪藻類の付着が激しく、糸状体の成長が遅いと報告を受けたため、7月31日に急遽、装置を撤去した。しかしながら、10月にはノリの孢子定着率において、ファインバブル試験を行っていた培養水槽の糸状体が、44槽中で一番良かった。通常の糸状体の孢子率が60%であるのに対して、ファインバブル適用糸状体は、85%であった⁶⁾。

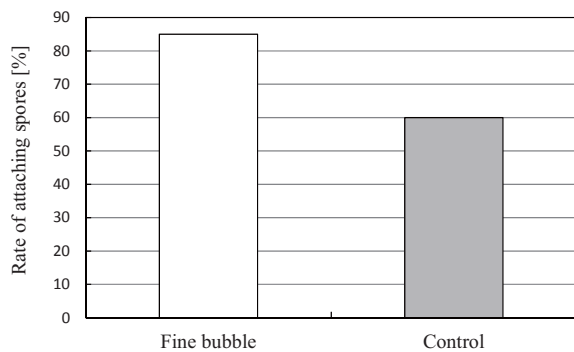


図4 ファインバブル処理したノリ糸状体における胞子定着率⁶⁾

3.4 ファインバブルのエビへの効果

有明海におけるクルマエビの漁獲量激減の対策として福岡、熊本、佐賀、長崎の4県でクルマエビの共同放流事業を行っているが、平成16年度から熊本県荒尾市よりクルマエビの中間育成を荒尾漁業協同組合は受託し、荒尾地先の有明海にクルマエビを放流している。

クルマエビ中間育成の概要は、まず、熊本県水産研究センターが育てた体長が約12 mmの稚エビ約25万匹を荒尾漁業協同組合が受け入れを行う。次に、稚エビ受け入れ後、荒尾漁協のクルマエビ中間育成水槽において、体長が約30 mm以上になるまで、約3週間飼育を行う。荒尾市職員の検査のもと、漁協がクルマエビを有明海に放流するというものである。放流可能な個体に成長するまで20日程度を要している。これまでの実績では中間育成後の稚エビの生存率が70%程度で、30%近くが死滅していた。

そこで、ファインバブル発生装置を使って、クルマエビの生存率アップ及び生育速度を促進する実証実験を行い中間育成実績の向上と漁獲量の増加を図ることを目的とした。ファインバブルに期待する効果は、生存率の向上、および育成期間の短縮である。

試験項目は稚エビの生存率に関して試験を行ったが、今回対照となる水槽がないため、ファインバブル発生装置を設置した後の生存率と過去の同時期データによる比較試験を行った。その結果を図5に示すが、従来70%程度であった生存率がファインバブルによって99.7%まで上昇した⁶⁾。

実際、通常のエアレーション約2000 dm³/minに対して、ファインバブルによる空気供給量は、約2 dm³/minで、全体の空気供給量の約0.1%しかないにも関わらず、ファインバブルの効果を確認することができた。以上の結果より、クルマエビの中間育成においては、ファインバ

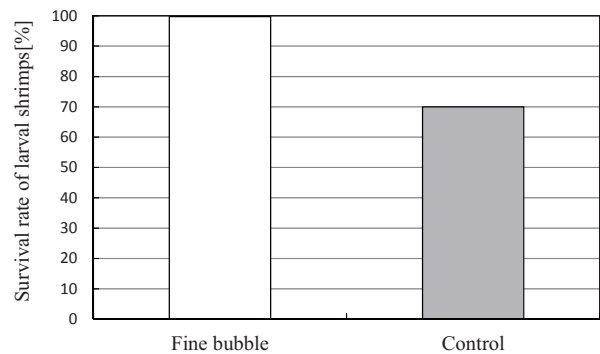


図5 ファインバブル処理したエビの生存率⁶⁾

ブルの生理活性作用による生存率の向上効果があることがわかった。

4. 結言

ファインバブルによって水の性質が変化することがわかったが、特に水の表面張力が低下した。このファインバブルには、微生物から植物や動物まで幅広く生物活性効果があることを示すことができた。酵母に対する効果は興味深いもので、さまざまな応用が期待できる。

また、植物へのファインバブルの影響は大きく、空気だけのファインバブルでイチゴやサラダスナップなどの収穫増を図れることがわかった。特に、ファインバブルによって植物の根が顕著に大きくなることがわかった。

さらに、ファインバブルはノリやエビに対しても著しい生物活性作用を示した。これらの作用メカニズムを明らかにするために、さまざまな実験を行っているが、生物への作用にはファインバブルが消滅するときに発生する分子種の可能性がある。

参考文献

- 1) 寺坂宏一, 氷室昭三, 安藤景太, 秦隆司: ファインバブル入門, 日刊工業新聞社, 17-18(2016)
- 2) 氷室昭三, マイクロバブルを用いた新しい洗浄方法, 混相流研究の進展 2, 39-45(2007)
- 3) 氷室昭三, マイクロバブルの物理化学的特性, 化学工学, Vol.71, No.3, 165-169 (2007)
- 4) R. Clift, J. R. Grace and M. E. Weber, Bubbles, Drops and Particles, Academic Press(1978)
- 5) 氷室昭三, 石橋和生, 特許公開 2005-270935 号
- 6) 氷室昭三: ファインバブルの生物学的応用, 混相流, 30(1), 10-18(2016)
- 7) 氷室昭三, 出口智昭, 高松竜二, 微生物に及ぼすマイクロバブルの効果, 混相流研究の進展 4, 95-102(2009)