

マイクロバブルの基礎特性と応用分野

宍戸道明, 佐藤 司, 成田洸杜^{*1}

1. はじめに

マイクロバブル (Micro-Bubble : MB) とは発生時の気泡径が $10\mu\text{m}$ ~ 数十 μm の微細な気泡を指す。この気泡は、普段の日常生活において一般的にみられる泡と比較して非常に小さい上に、様々な異なる性質を持つことが知られている。例えば、私たちが日常生活において普段目にする気泡は、小さくても数 mm のサイズであり、すぐに水面に浮上して消えてしまう。しかし MB は、気泡径が微細なため浮力が小さく、水中に長時間滞留し続ける。そして、水中に溶け込んでしまう気泡もある。また、MB は動物や植物の成長促進や血流量の増加などの効果が確認され、カキやホタテといった貝類の養殖分野で実績を持つ¹⁻³⁾。

このように、MB は気泡径が微細であることに起因した様々な特性を持ち、工学・医療・環境・食品・健康などの様々な分野への応用が期待されている。しかし、MB の研究領域の歴史は浅く、そのために解明されていない部分が多いことから一般的な認知度が低い。

本稿では、MB の物理化学的あるいは電気的特性などに代表される基礎特性と、期待される応用分野例を紹介する。

2. マイクロバブルの特性

2-1. 基本特性

MB の気泡径は $10\mu\text{m}$ ~ 数十 μm と髪の毛の直径よりも小さく、直接視認することが困難な大きさである。MB はこの微細な気泡径に起因して、気泡が液体に接している表面積 (気液界面積) が大きく、気泡の上昇速度が遅いという特性を持つ。気液界面積は、それが大きいほど気泡内の気体を液中へ溶解させることが容易となるため、気泡内の気体を液体へ溶解させる際の重要な要素となる。気液界面積の大きさは気泡が球形である場合、気泡の直径に反比例する。そのため、MB の気液界面積は通常の気泡と比べ大きな値となり、気泡内の気体

を効率よく液中に溶解させることができる。また、MB の上昇速度は、小さな粒子が液体中で動く場合の挙動を表す法則である Stokes の法則に従うとされ次式で示される^{2,3)}。

$$u = gD^2 / 18\nu \quad (1)$$

ここで、 u は MB の上昇速度、 g は重力加速度、 D は気泡直径、 ν は動的粘性係数である。このように、MB の上昇速度は気泡直径の二乗に比例し、気泡径が微細な場合は非常に小さくなる。例えば、直径 $10\mu\text{m}$ の MB を水温 20°C の水中に発生させた場合は、MB は 1 時間に 19.6cm しか上昇せず水中に長時間滞留する²⁾。

2-2. 物理化学的特性

MB は、物理化学的特性として、気泡内圧力の上昇と気泡の溶解という特性を持つ。一般的に、気泡はその表面で液体と気体が接しており、表面張力が働いている。表面張力は球形の気泡において、気泡を縮小させるように働くため、気泡内部の気体を圧縮し圧力を上昇させる²⁾。表面張力による気泡内圧力の上昇は Young-Laplace の式により次式で表される。

$$\Delta P = 4\sigma / D \quad (2)$$

ここで、 ΔP は圧力上昇、 σ は表面張力、 D は気泡直径である。このように、気泡内の圧力は気泡径に反比例して上昇する。この圧力上昇は、直径が 0.1mm 以上ある気泡では非常に小さな効果である。しかし、気泡径が微細な MB では気泡内部の圧力が大きく上昇し、気泡内圧力が水圧より大きくなる²⁾。また、気体はヘンリーの法則に従って液中へ溶解する^{3,4)}。

図 1 に MB の溶解過程を示す。ヘンリーの法則では、気体に加わる圧力が大きいほど溶解度が増大する。そのため、内部圧力の大きい MB は効率よく気体を水中へ溶解させることができる。また、気体が溶解することで気泡が縮小し気泡径が小さくなるため、気泡内圧力は上昇し続ける。気泡内圧力の上昇はさらに溶解度を大

*1 鶴岡工業高等専門学校制御情報工学科5年

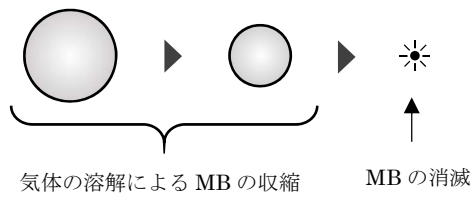


図1 MBの溶解過程

きくするため、気泡が小さくなるほど、気泡の縮小速度も増加し、最終的にMBは水中で完全に溶解し消滅してしまう¹⁻⁵⁾。気泡が消滅する直前には、気泡径が非常に小さくなるため、気泡内部の圧力は計算上無限大になる²⁾。また、MBが消滅する際には、発光現象を起こすことが確認されている。この現象は、MBの収縮で気泡内部が非常に高温高压になることが原因とされているが、詳細については解明されていない^{3,5)}。

2-3. 電気的特性

図2にMBの表面電位を示す。MBは、気泡表面が負に帯電していることが知られている。これは、MBが発生する過程に起きる静電摩擦力の効果や、水分子から分離したOH⁻イオンが気泡表面に集積するためとされている^{2,3)}。そのため、MBは気泡同士がマイナス電位によって反発しあい、気泡同士の合体が発生しないので、気泡径が小さい状態で維持される。また、気泡表面のOH⁻イオンは、MBの収縮によって濃度が増加するため、過剰なイオン場を形成しフリーラジカルを発生させる²⁾とされている。フリーラジカルは、不対電子を持つ原子や分子のことであり、MBの場合は水酸基ラジカルなどが発生する。また、一般的に反応性が高いイオンであるため化学分野への応用が期待される。

2-4. 生理的特性

医療・健康分野へ応用が期待されるMBの特性としては、植物や動物といった生体に及ぼす生理的な効果(生理活性効果)が挙げられる。その特徴的な効果としては、貝類や植物の成長促進、人体の血流量増加が報告されている^{1-3,6)}。これらの効果は、MBが消滅するときの高い圧力や発光が、生体に知覚神経刺激を与えることでインスリン様成長因子-I (Insulin-like growth factors - I : IGF-1)の産生を促すことが原因とされる。IGF-1はインスリン様成長因子と呼ばれるポリペプチドのひとつであり、様々な細胞の増殖や分化に作用する。そのため、IGF-1が作用する部位によっては、成長の促進だけではなく、育毛や抗鬱といった効果が期待できる^{2,6)}。また、血流量増加は、IGF-1の産生過程で産生が促進される一酸化窒素の血管拡張作用によるものとされている²⁾。そのため、血圧へ大きな影響を与えずに血

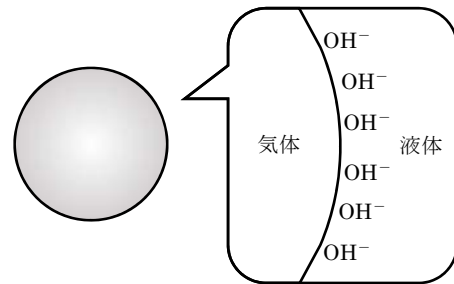


図2 MBの表面電位

流量を増加させる可能性が考えられ、身体的負担を増加させずに体表温度を上昇させることが期待できる。

3. 応用分野

MB技術誕生の契機は、微細な気泡を発生させることで排水の処理を効率的に行うということにあった¹⁾。しかし、現在のMB技術は、水処理のみにとどまらず、様々な分野への応用が期待されている。現在、MBの応用が期待されている分野としては工学分野や医療分野などがあり、実用化に向けた研究が進められている。その中でも、MBの代表的な応用分野として、環境・食品・健康分野での利用例を示す。

3-1. 環境分野

環境分野では、MBの水に対する作用が応用されている。MBはその特性から、内部の気体を水中へ効率よく溶解させることができる。そのため、内部気体を変化させることで水に対して異なる作用が与えられる。例えば、空気を内部の気体として用いた場合は、水中の溶存酸素濃度を増加させることができる。このMBによる酸素の溶解は、通常の気泡を用いたエアレーションと比較しても効率が高いため、水質の改善へつながる¹⁻³⁾。また、MBは水中で消滅する際に反応性の高いイオンであるフリーラジカルを発生する。フリーラジカルは反応性が極めて高いため、有機物を化学的に分解することができる。とくにMB内の気体としてオゾンを使用したオゾンMBではフリーラジカルの発生量は劇的に増加する。そのため、オゾンMBは化学工場の排水処理などに有効であり、応用が進められている^{2,7)}。

3-2. 食品分野

MBが注目を集め始めたきっかけは、カキ養殖の問題点である有害プランクトンによるカキの斃死を防いだことであった²⁾。そのため、MBは魚類や貝類といった水産物養殖への応用が活発に行われている。例えば、マダイの養殖では、海水中の溶存酸素濃度の低下を解消し、成長効率を向上させることが確認されている²⁾。また、MBは食品の加工工程でも、殺菌や洗浄を目的とし

て利用されている。現在行われている利用事例では、かまぼこの製造工程における殺菌がある。この加熱殺菌工程では、一部の耐熱菌の存在が品質管理上の問題となっている。しかし、この事例ではオゾンMBを用いることで発生したフリーラジカルによる殺菌が確認され、かまぼこの保存期間延長を可能としていることが認められている²⁾。

3-3. 健康分野

健康分野では、MBは入浴を中心として応用されている。MBを用いることで得られる入浴効果は、下記の通りである。

- ・ 血流量の増加
- ・ 皮膚温の上昇
- ・ 温熱効果の増大
- ・ リラックス効果

これらの効果は、MBが持つ生理活性効果に起因するとされている²⁾。MBによる生理活性効果では、IGF-1の働きにより成長促進や血流量の増加が起きる。そして血流量の増加は、血液の熱交換を促進させ体表温度を上昇させるため、温熱効果の上昇につながる。また、MBを用いた入浴では、副交感神経が交感神経よりも優位となり、リラクゼーション効果が高まることが報告されている^{8,9)}。さらに、MBの洗浄効果に注目し、加齢臭の除去や皮脂洗浄力などの美容効果を高めることも期待されている¹⁰⁾。そのため、MBは入浴装置への応用が研究されており、既に商品化されている例も存在する。

4. おわりに

MBは気泡径が微細であることに起因する様々な特性を持つ。その特性は、基礎特性、物理化学的特性、電気的特性、生理的特性と多岐にわたっている。そのため、MBは環境分野や食品分野など、様々な応用分野を持ち、発展性が非常に高い技術と言える。また、MBの応用先は化学工場の排水処理や水産物の養殖だけではなく、入浴や殺菌といった日常生活の中にもある。とくに、日本は入浴を日常的に行う文化の国であるために入浴時に発生する問題も多く、入浴様式の改善は大きな意味を持つ。しかし、MB技術では詳細な原理について解明されていない部分が多い。とくに、フリーラジカルの発生や生理活性効果といった工業分野や医

療分野の応用に重要となる特性については、詳細な原理の解明が急務とされている。また、MBは期待される応用分野が広く、分野ごとに注目される特性も異なるため、複合的な知識が必要な技術である。そのため、MB技術の発展には、多くの分野の研究者が協力してその特性を解明し、技術活用のノウハウを得ることが重要となる。

参考文献

- 1) 大成博文「マイクロ・ナノバブルが切り拓く新しい扉」日本高専学会, 日本混相流学会, 第1回マイクロ・ナノバブル技術シンポジウム 講演論文集, pp.39-48, 2006
- 2) 柘植秀樹「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, pp.1-108, 2007
- 3) 大成博文「マイクロバブルのすべて」, 日本実業出版社, pp.166-279, 2006
- 4) 都並結依, 大成博文「マイクロバブルの収縮過程と収縮パターン」日本高専学会, 日本混相流学会, 第1回マイクロ・ナノバブル技術シンポジウム 講演論文集, pp.1-6, 2007
- 5) 大成博文「マイクロ・ナノバブルの発生機構と光マイクロバブル」日本高専学会, 日本混相流学会, 第2回マイクロ・ナノバブル技術シンポジウム 講演論文集, pp.46-53, 2007
- 6) 岡嶋研二「マイクロの医療への応用」日本高専学会, 日本混相流学会, 第2回マイクロ・ナノバブル技術シンポジウム 講演論文集, pp.42-45, 2007
- 7) 道奥康治「マイクロバブル技術による埋立処分場浸出水の水質浄化」日本高専学会, 日本混相流学会, 第2回マイクロ・ナノバブル技術シンポジウム 講演論文集, pp.13-20, 2007
- 8) 桑野靖子, 河原ゆう子 「マイクロバブル入浴が生理・心理に及ぼす影響」社団法人空気調和・衛生工学会, 学術講演論文集平成23年(3) pp.1873-1876, 2011
- 9) 河原ゆう子, 美和千尋「入浴中の湯のマイクロバブル性状が温熱効果と入浴後のイメージに及ぼす影響」人間-生活環境系学会, 人間と生活環境 19(2), pp.137-144, 2012
- 10) 小林孝彰 「異なる入浴様式による加齢臭の除去・抑制効果」日本生気象学会, 日本生気象学会雑誌, 50(2), pp.107-115, 2013