マイクロバブルの高機能性と水質浄化*

大 成 博 文**・佐 賀 孝 徳**・渡 辺 勝 利**
前 田 邦 男***・松 尾 克 美***

High Functional Characteristics of Micro-bubbles and Water Purification

Hirofumi ONARI, Takanori SAGA, Katsutoshi WATANABE
Kunio MAEDA and Katsumi MATSUO

High functional characteristics of micro-bubbles and water purification effect using the techniques of the bubble are investigated. Two types of micro-bubble generator are useful to control the generation of plant plankton and cut off the plankton flowing for downstream in the surface layer of dam lake. Further, the bleeding conditions of oyster raised by injection of the micro-bubble are investigated in Hiroshima Bay. It was clear that micro-bubbles supply at regular intervals help a remarkable growth of raising oyster. These effects associate with the high functional chemichophysical characteristics of micro-bubbles having diameter about 10~30 μm .

1. は じ め に

わが国の閉鎖水域では、環境基準を達成できない水域が半数を占め深刻な状況が続いている。また、相当数のダム湖においても、アオコや底部酸欠水における汚濁問題が発生している。さらには、海域においても、汚濁や赤潮の発生に伴って、漁獲量が激減している。たとえば、広島のカキでは、この2年間で100億円を越える被害が発生、九州地区における海老漁の壊滅的打撃、さらには、愛媛県における真珠の水揚げは、現在、最盛期の約380億円の1割まで激減している。

このように、わが国の水および水生生物環境は、決して楽観できる状況ではなく、その有効な抜本的改善が期待されている。

この10年、著者らは、上記のマイクロバブル発生技術を用いて、ゴルフ場池の水質浄化、小河川における河川浄化と魚の育成、ダム湖の表層におけるアオコ発生制御、小池における蜆の育成、また、水産分野では、鰻、イカ、ブリなどの養殖実験において重要な成果を得てきた^{1~3)}。

これらを踏まえ、本論では、マイクロバブルの物理化

学的特徴に基づく高機能性とその水質浄化およびカキの養殖などの事例について考察する。

2. マイクロバブル発生装置

マイクロバブル発生装置には、M型とW型の2種類がある³⁾。前者は、装置内に圧力水を送入し、負圧で吸入した空気塊を回転せん断によって、マイクロバブル化を実現する方法である。このM型の特徴は、10~30ミクロンの気泡径を有する超微細気泡のみを大量に発生させることにある。また、発生したマイクロバブルは、互いに反発して気泡同士の合体を妨げ、その単一気体の寿命も比較的長い。さらに、10ミクロンの気泡の水中上昇速度は毎秒0.1mm程度であり、きわめて小さい。M型にはM1~M3までの3種類の装置があり、さらに、その大きさにおいてもそれぞれ異なる3種類がある。図1にM1-LおよびS型装置の一例を示す。M1~3型装置の特徴を簡単に示す。

①M1型：マイクロバブルの発生出口が4つあり、マイクロバブルが四方に広がるため、装置内の均一分散に優れている。最適空気吸い込み量は毎分1リットル前後である。

②M2型：マイクロバブルの発生出口が1つであり、装置内や水域における拡散能力に優れている。吸い込み空気量は、毎分3リットルほどで、M1型よりも多い。

* 平成11年11月11日本会第103回例会において発表

** 徳山工業高等専門学校土木建築工学科

*** 中電技術コンサルタント株式会社

平成11年9月27日受理

図1 マイクロバブル発生装置 (M1 型)

さらに、M1 型と比較して目詰まりがないことから、自然閉鎖水域などの現場用として適している。

③M3 型：上記 2 種の装置とは異なる送水方式を採用している。この装置によって、大型化および小型化がより可能となった。

次に、W 型は曝気筒タイプの構造を有し、平均径数十ミクロン前後のマイクロバブルとマクロな気泡による循環流を形成させる装置であり、比較的深い (1 m 以上) 水深の水域における適用が可能である。

3. マイクロバブルの発生機構

従来、数十ミクロン程度の微細気泡を発生させる方式には、①羽を高速回転させる、②細孔から空気を散気する、③突起物に衝突させる、④圧力急変部に空気を吸入し引きちぎる方法などがある。しかし、これらの方法には、以下の装置上の問題点が存在している。

- ①マイクロバブルを大量に発生できない。
- ②装置が大規模で複雑、そして高価。
- ③維持運転費が高い。

そこで、これらの問題点を解決するために、上述の特徴を有するマイクロバブル発生装置が開発された。ここでは、M 型装置を中心に、マイクロバブルの発生メカニズムを考察する。

マイクロバブルは、以下の 2 段階の流体力学的なプロセスを経て発生する。

[第 1 段階]

装置中心部に液体および気体の 2 層旋回流を発生させ、その回転軸部分に空洞を形成させる。また、この回転空洞部分を竜巻状に細くして、強力な回転せん断が発生させる。そして、装置上部から吸入した気体を、この空洞部に注入、通過させる。

[第 2 段階]

この気体空洞部を回転制御作用で、切断・粉碎することによって、マイクロバブルが大量に発生する。

図2 マイクロバブルの発生機構の概念

この 2 段階を有する方式が、従来とは異なる特徴といえる。また、マイクロバブルは空洞部で、液体中の気体成分が溶出して発生した成分と、自吸した空気の間から構成されており、これも重要な特徴として指摘される。以上を概念的にまとめて、図 2 に示す。

4. マイクロバブルの物理化学的特徴

図 3 に、水道水においてマイクロバブルが発生した様子を示す。マイクロバブルは、ほぼ均一な大きさを保持することから、気泡同士の合体や吸収が起こらず、単一気体のままで水中に留まる。したがって、その寿命も長く、分散性にも優れている。また、蒸留水よりも水道水、さらには、水道水よりも海水において、マイクロバブルの発生が多い。

図 4 に、マイクロバブルの発生気泡分布を示す。この気泡分布は、光切断法（レーザー光膜を用いてマイクロバブルを撮影）を用いて、約 200 倍の倍率で撮影されたマイクロバブルの直径を直接読み取って求められた。その気泡径の最頻値は、10～20 ミクロンであり、その平均気泡径は 15 ミクロン程度である。また、空気の自吸量の増加に伴って、20 ミクロン以上の気泡が若干増加するが、15 ミクロンを最頻値とする傾向はほとんど変わっていない。なお、この場合 50 ミクロン以上の気泡径は読み取られていないが、目視では、空気自吸量の増加に伴って、

図3 水道水中で発生したマイクロバブル

図4 マイクロバブルの発生分布(水道水)

50～数百ミクロンの気泡径の増加も認められた。

そこでマイクロバブルの物理化学的特徴を示す。

- ①短時間(発生して10分以内)においては, 比重が増大する。長時間(1時間を越える)では, 逆に比重は減少する。
- ②水素イオン濃度が増大し, 弱アルカリ化する。
- ③水道水中の残留塩素が, 20～30分程度のマイクロバブルによるバブリングではほぼゼロになる。
- ④自然蒸発の約十倍の量の蒸発が可能となる。

以上の4点のほかにも重要な物理化学的特性の存在が示唆されているが, それらを含めて, 今後さらに明確な究明が必要と思われる。

5. マイクロバブル技術の適用例

マイクロバブル発生技術は, 図5に示されるように多くの分野で多様な適用が可能となりつつある。この契機は, 1998年7月24日付けの「日刊工業新聞」1面トップ記事で, マイクロバブル技術が広く紹介されたことにあった。その後, 日経メカニカル誌の同年12月号によって, 「日本の機械技術『世界一』」特集におけるマイクロバブルの「世界一認定」, 今年になって, 広島カキに関する6月27日のNHKニュース7における全国放送, 読売新聞他の連続報道などによって, より詳しい紹介がなされ, その普及が進んだ。

そこで, 本論では, ダム湖における水質浄化と広島カキの養殖に関する適用結果の一部を紹介する。

5.1 ダム湖における水質浄化実験

〇県Aダムは, 水力発電を主目的として建設されたが, 昨今, ダム湖水の水質改善にも重大な配慮がなされている。本ダムにおける水質問題は「アオコ」の発生に

図5 マイクロバブル技術の適用分野

伴う水質汚濁にある。このアオコは, ダム湖上流にある養豚場からの排水が湖水内に流入し, その有機性の汚れと高水温に起因して毎年大量発生する。

図6に, 本実験を行ったダム湖の平面図を示す。この図からも明らかなように, 実験はダム湖に流入する支流付近で行われた。

図7, 8には, W型装置およびダム湖における設置概略を示す。本装置は, 水深4m地点において, 川の横断方向に14m間隔で6機設置された。このそれぞれの装置に, 陸上に設置されたブローからパイプを通して空気が送入された。その際の装置1機あたりの送風量は約140リットル/分であった。

本装置の設置目的は, ダム湖表層部分において鉛直方向の循環流を形成させることによって, ①表層のアオコを下層に運ぶ, ②下層の低温水塊を表層に運ぶとともに表層の高温水塊を下層に下げることにことによって, 表

図6 マイクロバブル発生装置据付場所

図7 W型装置

層の水温降下でアオコの発生を制御する、③ダム湖を横断的に流体现象で遮断し、上流あるいは下流から発生したアオコの流出を遮断するなどにあった。

図9に、鉛直方向温度分布と濁度分布を示す。図中のW ②～⑤の番号は、左岸から右岸方向に設置された装置の番号であり、装置の直上、装置の中間、装置から下流へ100mの地点の温度および濁度が比較されている。これより、ダム湖表層における装置の直上部分で2度前後の水温低下が認められる。また、装置中間地点およびその付近において、下流100mと比較して、若干の水温低下が実現されている。なお、装置の中間点においては、下降流が形成されるため、表層から3m付近まで水温が一樣化している。一方、濁度は、水深2～3m付近で若干高いものの全体としては3mg/l以下で、この時点では顕著なアオコの発生が認められなかった。

図10に、アオコの発生がより顕著になったときのクロロフィルaおよび水温の縦断計測分布を示す。これより表層のクロロフィルaは、上流のM型装置を6機設置している部分で高く、下流のW型装置では、その値が極端に減少している。また、透視度は逆に上流のM型付近で低く、W型装置の下流で高くなっている。これは、M型装置付近でマイクロバブルによるアオコの浮上効果が若干、W型装置でのアオコの発生制御および下流方向へのアオコの流下を遮断した効果があったことを示している。

また図10には、水温の縦断分布も示されているが、これよりW型装置付近とその下流では表層において顕著な温度差が認められる。これは、W型装置によって形成された循環流のために、表層流の遮断が上下流で実現されたことを示している。

以上のように、上記の設置目的をほぼ実現する結果が得られたが、1998年度は、本ダムにおいて例年通りのアオコの発生がなく、上述の効果を十分確かめるまでには

図8 W型装置の設置概略（横断面）

至らなかったため、本年も継続して実験を行っている。

5.2 広島カキ養殖

1997年、1998年と、広島湾の養殖カキは、新種の赤潮とそれに付随して発生する酸欠現象によって壊滅的打撃を被り、その被害額は100億円以上とも言われている。この問題の核心は次の2つにある。

①ヘテロカプサ・サーキュラリスカーマを主とする植物性プランクトンによるカキの直接的斃死

②植物性プランクトンの斃死に伴って発生する無酸素水域による、いわゆる「酸欠」によるカキの斃死

昨年、一昨年における前者の最盛期には、1cc中に数万個も発生し、その死骸は赤い色を呈した「赤潮」となる。このヘテロカプサは、カキやアサリなど2枚貝のみに被害をもたらし、魚や人体には影響がないとされている。

この植物性プランクトンの斃死後に、海域で大規模な嫌気性分解が起こり、海全体の酸素濃度が低減し、いわ

図9 鉛直方向温度分布と濁度分布

図10 クロロフィル a および水温の縦断計測結果

ゆる「酸欠」問題が発生する。昨年被害を受けたカキ漁師は口々に、この酸欠によるカキの大量斃死の方が、「大規模で、恐い」と強調する。

(1) 装置開発

熱心な地元漁師からの依頼を受け、このカキ問題へのマイクロバブル発生技術の適用を検討することになった。すでにダム湖深層における無酸素水域の改善問題に取り組んだ経験を踏まえ、その装置の基本を適用することを考えた。ところが、現場のカキ漁師からは、以下の要望が出され、結局、さらに装置改良の工夫が必要となった。

①カキ筏は、一軒で20も30も持っており、装置はダム湖のような固定式でなく、持ち運び可能な、軽量のポータブル型にする。

②カキ筏でカキが吊り下げられている中に自由に装置が入られるように小型にする。

③装置を入れる位置は、6 m、10 m、16 m の3箇所にしたい。これらの深さでもマイクロバブルの大量発生を可能とする。

④赤潮に伴って発生する「酸欠」状態を解決する溶存酸素の供給を可能とする。

これらの要望と現地調査を踏まえ、以下の装置開発を行った。

①カキ筏 (23 m×10 m) 1 つに、マイクロバブル発生装置 (M2 型) 10 個を標準装備可能とする。

②ポンプは小型で強力な水中ポンプ (チタン製、750 W) を使用し、ポンプ 1 台につきマイクロバブル発生装置を 2 台設置する。これを 1 システムとし、装置の最大持ち運び可能距離を 20～25 m とする。

③装置の最大横幅は 36 cm とし、カキ筏内への円滑な挿入を可能とする。

④ポンプの電源は、船に搭載の発電機 (200 V) を利用する。装置を深い地点に設置した場合の供給空気量および供給空気圧の不足分を補うために小型コンプレッサーを用いる。本装置を用いた場合、空気自吸の限界は水深 6 m 地点であり、それよりも深い水深ではコンプレッサーを用いることにした。

図11～13に、マイクロバブル発生装置、本装置の設置の様子、カキ筏における装置据付の概略を示す。

(2) マイクロバブルの養殖効果

図14に、カキ筏中央部で計測した溶存酸素濃度を示す。この場合の計測点は、マイクロバブル発生地点直上であり、マイクロバブル発生装置設置の水深は約 10 m である。また、マイクロバブル発生装置 1 機あたりのマイクロバブル発生量は、毎分 5 リットルであった。海水マイクロバブルの特徴は、その気泡径が10～30ミクロンと小さく (自然海では、70～数百ミクロンの気泡が存在するとされている)、しかも大量に発生 (自然海の約120倍) する。本図からも明らかなように、マイクロバブル発生後60分で1～1.5 mg/l、さらに約100分で、2～3 mg/l の増加が認められる。

なお、これらの値は、マイクロバブル発生直上の値であり、この周辺では、その値がより低下する。また、水深 5～10 m の間で溶存酸素濃度の増加していることが注目される。さらにマイクロバブル発生装置 (水深 10 m に設置) よりも下の領域でも溶存酸素濃度が若干増加しており、潮流によってマイクロバブルが下層にも運ばれていることが推測される。

図11 マイクロバブル発生装置 (M2 型)

図12 マイクロバブル発生装置設置の様子

図13 カキ筏への装置設置概略

なお、マイクロバブルを発生させる前の状態は、水深5～15 m の水域で溶存酸素濃度が 4 mg/l 前後の値を示している。これより、約 1 mg/l の低減があるとカキの生育に関して危険状態、さらに 1 mg/l 低減するとすべてが斃死するとされている。計測日の8月6日の状態は、危険域に達する直前の状態だったことから、上述の本装置における溶存酸素濃度の増分は、危険域に達した時に、それを回避する重要な効果と考えられる。

図14 カキ筏中央部の溶存酸素濃度分布

図15 マクロバブルで成長したカキ

幸いにも本年は今のところ (8月末現在)、昨年並の赤潮は発生していない。そこで、6月以来、マイクロバブルをカキに、1週間で4時間程度の割合で注入してきた。マイクロバブルを注入すると、水中でカキの口が通常よりも約2倍ほど大きく開くことが観察されたが、これは、カキの呼吸が活発になったと思われることから、それが成長の向上をもたらすのではないかと期待された。

この予想通り、カキはみごとに成長を遂げつつある。図15には、マイクロバブルの注入がなされた「2年モノ」のカキが示されている。このカキの筏は、成長による重量増加で、その一部が水中に沈み込むほどになっていた。図16には、1年モノ、通称「若」と呼ばれるカキが示されている。この若の収穫は、広島湾で約30年にわたって

図16 マクロバブルで成長したカキ

1度もなされていないようであり、この復活は、カキ漁師や広島県にとって大きな朗報となり得る。このカキの生育ぶりは、3ヶ月で7~8cmほどの体長増加に現れており、これまでのカキの成長と比較すると、その増加率は約2倍に相当する。本カキの成長が続くと、本年12月には、30年ぶりの「若」復活が実現することが予想される。

6. お わ り に

マイクロバブルの水質浄化および溶存酸素向上効果などの事例の一部を紹介してきた。これらの結果からも明らかのように、マイクロバブルの適用分野は広く、その有効性は、マイクロバブルの高機能性に起因している。今後、さらに厳密な物理化学的究明を行うとともに、さまざまな適用分野で、その効果を確かめることが重要である。なお、マイクロバブルの赤潮防御効果については、別稿で報告する予定である。

参 考 文 献

- 1) 大成博文他：閉鎖性自然水域における污水浄化法の開発，土木学会論文集，No. 553/Ⅵ-33，p. 33-40，1996
- 2) 大成博文：マイクロバブル発生技術による広閉鎖水域の水質浄化，混層流，11，3，p. 263-266，1997
- 3) 大成博文：マイクロバブル発生技術と水環境蘇生，日本高専学会誌，3，4，p. 12-20，1998
- 4) 石川並木他：マイクロバブルの物理化学的特徴，土木学会第54回年次講演会概要集，Ⅱ，p. 514-515，1999