

風波によるマイクロバブルの分散・拡散と マイクロバブル浄化法の効果に関する研究

辻村太郎*・京藤敏達**

マイクロバブル浄化法は貧酸素状態の緩和だけでなく、水環境の改善方法としても期待されている。そこで本研究では、浅水湖沼におけるマイクロバブル浄化法に対する基礎的検討を行った。まず、風波下におけるマイクロバブルの拡散実験を行い、マイクロバブル浄化法を適用した場合に、その効果の及ぶ範囲を調べた。次いで、霞ヶ浦湖沼にマイクロバブルを注入したときの水質を測定した。その結果、マイクロバブルにより pH が増大することおよび湖水中の植物プランクトンは凝集せず分散されることが分かった。実湖沼にマイクロバブル浄化法を適用する場合には、本研究で得られた水質遷移に関する知見を考慮する必要があることが判明した。

1. 研究の目的

閉鎖性水域の水質改善方法としてマイクロバブルによる曝気が目ざされている。この手法は、主に密度成層がある比較的大水深の貯水池における貧酸素水塊および底泥を改質する際に効果的である（道奥ら, 2001）。また、数十ミクロンの気泡は生体活性を高める効果があり牡蠣やホタテの養殖場で用いられている（大成ら, 2002）。以上の事実を踏まえると、浅水深水域においてもマイクロバブル浄化法を適用することで、汚濁物質の浮上処理や生態系の活性を高める効果があると期待される。本研究では、風波によるマイクロバブルの移流拡散を評価することで、浅水深水域におけるマイクロバブル浄化法の有効性について検討する。

2. マイクロバブル発生装置について

(1) 装置概要

本研究グループで開発したマイクロバブル発生装置を用いた。発生装置はノズル部とポンプ部からなる。ノズル部を図-1 に示す。気液二相流体を高速で旋回させることにより、管路中心に高速で旋回する気体による空洞部が形成される。この高速旋回する流れ場に縮流、開放などの不安定を与えることにより渦崩壊が発生し、大きなせん断と圧力変動が生じノズル出口付近で微細気泡が発生する。このとき、混入する空気量による違いで渦崩壊の形状に変化が生じ過剰の空気を混入すると気泡径が大きくなる（金子ら, 2005）。本研究では電力量を 0.75 kW のポンプで給気量を 100 ml/min に固定し、マイクロバブルの生成を行った。マイクロバブルを十分に散布し、メスシリンダーと電子天秤を用い比重を計測したところ、比重は（水：マイクロバブル水）=（9.97：

9.82）であった。

(2) 円筒タンクによる実験

発生したマイクロバブルの性質を得るために 150 l の円筒タンクを用いて実験を行った。

a) 可視化実験

マイクロバブルを円筒タンクに散布し実験を行った。可視化は下部からライトを入射し、水平方向から画像を取得した。計測開始後、10 分間マイクロバブルの散布し、その後、散布を停止した。画像から各水深の輝度値を計測した。輝度値の時間変化を図-2 に示す。図-2 より輝度値をバブル濃度と仮定して、バブルの上昇速度を算定すると 0.2 cm/s となる。この結果は、一般的なミリバブルの上昇速度と一致しており、マイクロバブル発生時にミリバブルも同時に発生していることが原因と考えられ、ミリバブルによるマイクロバブルの連行上昇が行われている可能性があり、考慮する必要がある。

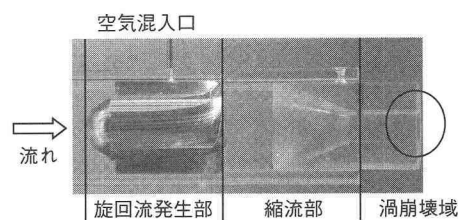


図-1 マイクロバブル発生装置のノズル部

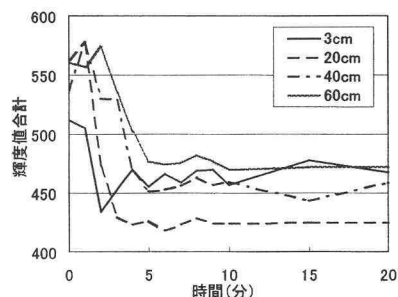


図-2 輝度値の合計の時間変化

* 学生員 修(工) 筑波大学大学院システム情報工学研究科
** 正 員 工博 筑波大学システム情報工学研究科助教授

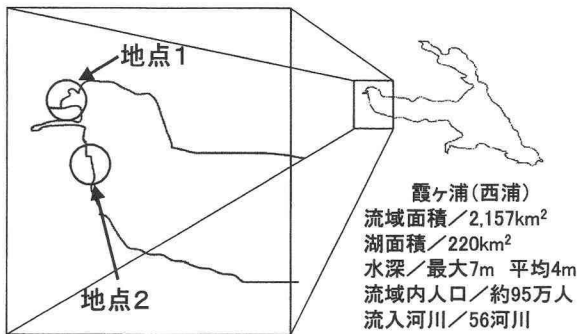


図-6 計測地点

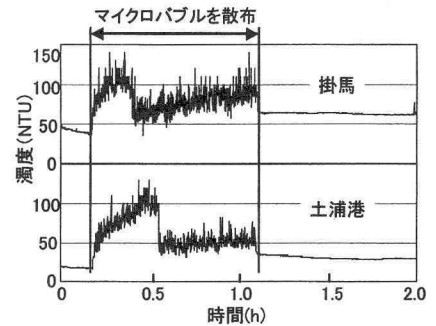


図-7 試験水の濁度変化

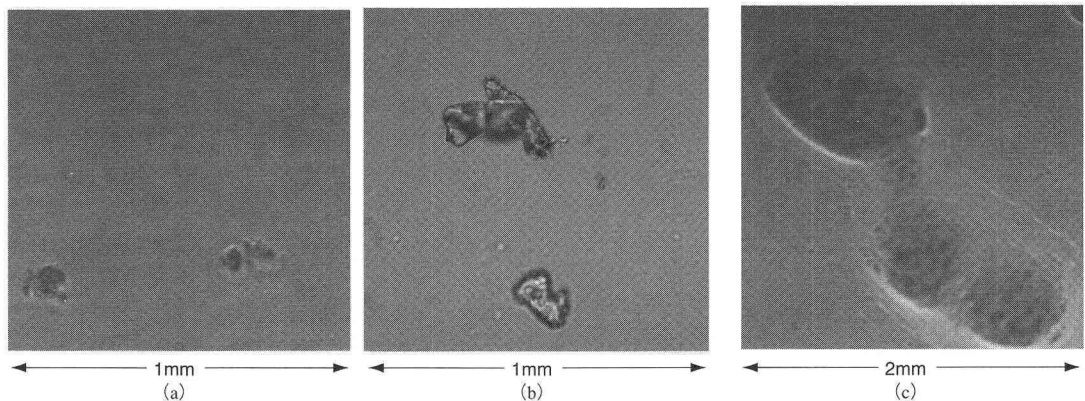


図-8 顕微鏡による取得画像

ブル散布停止後も散布前より濁度が高い値で推移している。これはマイクロバブルが汚濁物質に吸着し浮遊させていることが原因と考えられる。また、pHがアルカリ側に傾くと汚濁物質（主に植物プランクトン）の分散が引き起こされると言われており、本実験でもpHが7.5から7.75に変化しており、その結果、濁度が上昇した可能性も考えられる。

c) 顕微鏡による画像取得

b)と同様の条件で実験を行い、実験水を採取し顕微鏡を用いて画像を取得した。取得画像の一例を図-8に示す。(a)はマイクロバブル散布前、(b)(c)はマイクロバブル散布後の取得画像である。(a)を見ると0.1mmオーダーの懸濁物質が確認できる。(b)を見るとマイクロバブル散布前には見られなかった鋭角上の粒子が確認できる。これらはマイクロバブルにより浮上したものと考えられる。また、写真上部の粒子がマイクロバブルを介して結合しているように見える。これは、マイクロバブルによる凝集効果によるものとも考えられるが、サンプル数も少なく、更なる検討が必要である。(c)を見ると大規模汚濁物質がバブルによって包まれ他の汚濁物質と架橋している様子が見て取れる。

d) マイクロスコープおよび目視による観察

b)と同様の条件で、クイックマイクロスコープ(KEYENCE VH-5000)を用いて画像を取得し観察を行う。図-9に取得画像を示す。取得画像を見るとほとんど差は無く、ミリオーダーでの変化は確認されなかった。また、試験水は黄緑色で濁っており、マイクロバブルの散布によって脱色等の変化は確認されなかった。また、懸濁物質の浮上分離・沈降は、目視によっては確認されなかった。(ただし、マイクロバブル散布後水槽表面にヌルヌルした水膜を一部確認。)

(3) マイクロバブルによる水質浄化のまとめ

マイクロバブルを散布することによる懸濁物質の浮上分離について検討を行った。上記の結果よりマイクロバブルによる浮上効果は、懸濁物質により効果が異なることが分かった。沈降するサイズの懸濁物質には、浮上効果があり、浮上分離による水質浄化の可能性があることが示された。しかし、懸濁物質の再浮上や分散が増幅される可能性があり、実利用には更なる工夫が必要である。

4. 風波によるマイクロバブルの拡散

浅水深湖沼もしくは湖沼表層にマイクロバブルを作用

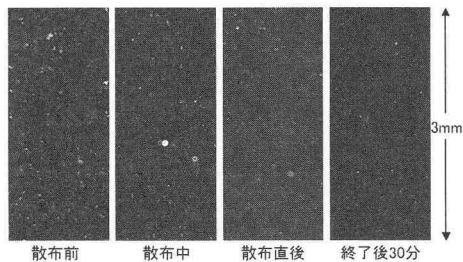
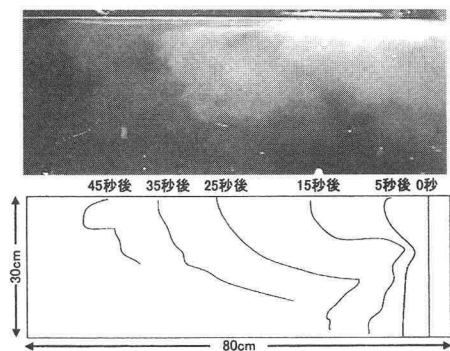


図-9 マイクロスコープ画像

図-10 マイクロバブルの分散
(上:画像 下:各時間のマイクロバブルの境界)

させた場合を想定し、風波下におけるマイクロバブルの拡散について実験および解析を行った。

(1) 静水中のマクロバブルの分散

静水時のマイクロバブルの分散を把握するための実験を行った。水槽内を二部屋に区切り、片部屋にマイクロバブルを10分間発生させ、その後区切りを無くしたときの画像を取得した。取得画像とマイクロバブルの境界の時間変化を図-10に示す。図より静水中のマイクロバブルの分散・拡散には、密度差が支配的であることが分かった。

(2) 風波下のマイクロバブルの分散・拡散

a) マイクロバブルの輸送

長さ15.0 m、幅0.4 m、高さ0.9 mの風洞水槽を用いた。送風機は風洞水槽の終端に設置し、吸出し方向に風を発生させる。吸い込み口には、整流装置を設置した。戻り流れの影響を軽減するため底面から11 cmの位置に水平板(厚さ2 cm)を設置し、二重構造とした。水槽の終端には消波装置を設置した。風洞入口部にマイクロバブル発生装置を設置した。実験装置の概要を図-11に示す。

マイクロバブルを10分間生成し、その後、風波を発生させ溶存酸素濃度を計測し、マイクロバブルを散布しない場合と比較した。吹走距離6.5 m、水深28 cm、風速7.5 m/sにおける溶存酸素濃度の変化を図-12に示す。マイクロバブルの有無に関わらず250秒までは同様の傾

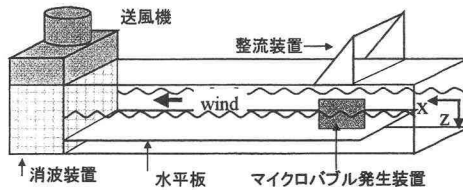


図-11 実験装置概要

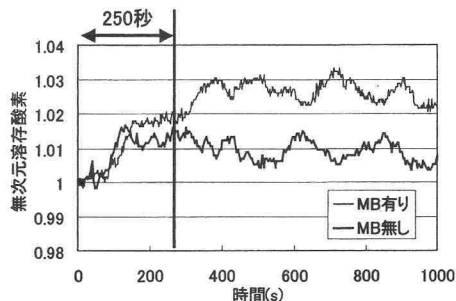


図-12 溶存酸素濃度の時間変化

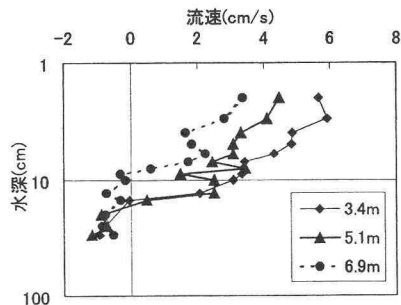


図-13 平均流速分布(電磁流速計)

向を示す。しかし、それ以後は同様の傾向を示さず、マイクロバブル有りの場合はさらに一段溶存酸素濃度が増加する。図より、マイクロバブルは250秒前後に到達している。これは水深2~10 cmの平均流速を用いて計算した値230秒とほぼ一致する。溶存酸素濃度量の20~60秒の変動は流速分布から大規模渦による変動が原因であると考えられる。また、300秒程度の長周期変動の原因は不明である。

b) マイクロバブルの効果範囲

マイクロバブルを注入しながら1時間風洞水槽を動かし、安定した状態で計測を行った。各位置の溶存酸素濃度を図-14に示す。マイクロバブルの効果は吹走距離が伸びるにしたがって低下している。また、水深方向には波長のオーダー以上までマイクロバブルが拡散している。これらから、風波が存在する場合は、マイクロバブルは表層の吹走流により水平方向に移流され、風波(特に波長以上の深さには大規模渦)によって水深方向に輸送さ

れることが分かった。

(3) 風波下のマイクロバブルの分散・拡散の推定

マイクロバブルの浮上効果を考慮した以下の移流拡散方程式を用いて解析を行う。

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla \beta) - v \frac{d\beta}{dx} + w \frac{d\beta}{dz} - R \quad (1)$$

$$R = -q\delta(z) = -\frac{\beta_0}{w}\delta(z) \quad (2)$$

ここで β はマイクロバブルの濃度, D は拡散係数, w はマイクロバブルの浮上速度, q は風波表面で交換されるガス流束, β_0 は表層でのマイクロバブル濃度を表す。また, 流下方向に x 軸, 水深下方向に z 軸を取る。充分時間経過後の定常状態の解を数値的に求める。よって, 式(1)の左辺は0となる。流速および拡散係数は実験値(辻村ら, 2005)を用いた。ただし, 低層近くの流速が微流速で負となる場合は流速を0とにおいて計算を行った。境界条件として, 表層の乱流拡散による z 軸正方向のフラックスとマイクロバブルの浮力による z 軸負の方向のフラックスが等しいと仮定して (Buckingham, 1997)

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial z} \right|_{z=0} = -\frac{w}{D}\beta_0 \quad (3)$$

を用いた。また $x=0$ で $\beta=1$ (基準空隙率で正規化) とした。計算結果を図-15に示す。図を見るとマイクロバブルの効果範囲は, 吹走流とマイクロバブルの上昇速度に強く支配されている。また, 計算結果では, 低層部へのマイクロバブルの拡散が表現できていない。これは移流拡散方程式に問題があると考えられる(辻村ら, 2005)。

5. 結 論

霞ヶ浦湖水にマイクロバブルを注入したときの水質を測定した結果, マイクロバブルにより, pHが増大することおよび湖水中の植物プランクトンは凝集せず分散されることが分かった。実湖沼にマイクロバブル浄化法を適用する場合には, 本研究で得られた水質遷移に関する知見を考慮する必要があることが判明した。また, 風波下のマイクロバブルは表層の吹走流によって水平方向に移流され, 風波によって水深方向に拡散することが分かった。マイクロバブルの輸送範囲は表層流速とマイクロバブルの浮上時間に大きく支配される。移流拡散方程式では, この風波下の拡散現象を表現できないことが判明した。

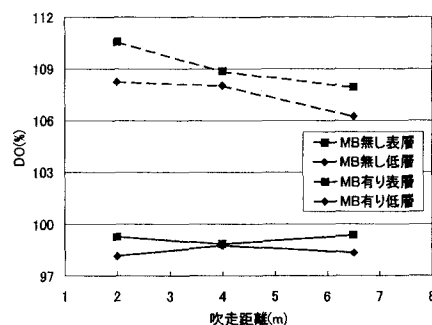


図-14 安定した溶存酸素濃度

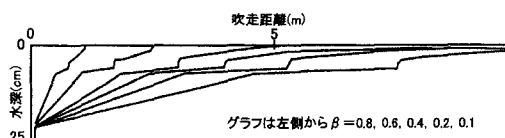


図-15 定常な移流拡散方程式による計算結果

謝辞: 本研究を遂行するにあたり, 基盤研究(A)(2)代表 足立泰久(筑波大学)「農業環境におけるコロイド界面現象と流体運動が協同する物質動態とその予測制御」の補助を受けました。また, 本研究室の加藤貴久君に顕微鏡画像の取得を手伝って頂きました。ここに, 謝意を表します。

参 考 文 献

- 石井淑夫・田村隆光・塚田隆夫・辻井薫編(2005): 泡のエンジニアリング, 株式会社テクノシステム, 920p.
- 大成博文・前田邦男・松尾克美・山原康嗣・渡辺勝利・石川並木(2002): マイクロバブル技術によるカキ養殖効果, 第46回水工学論文集, pp. 1163-1168.
- 道奥康治・神田徹・大成博文・森口昌仁・松尾昌和・白澤静敏・松尾克美(2001): マイクロバブルによる富栄養貯水池の水質改善工と浄化効率, 第45回水工学論文集, pp. 1201-1206.
- 金子公久・京藤敏達・山田麗徳・坂入信之(2005): 渦崩壊を利用した微細気泡生成法に関する実験的研究, 第32回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集.
- 国立環境研究所(2001): 湖沼において増大する難分解性有機物の発生原因と影響評価に関する研究(特別研究), 国立環境研究所特別研究報告, 38p.
- 辻村太郎・金子公久・京藤敏達・武若聡・榊原潤・羽田野祐子(2005): 風波下の拡散現象に関する実験的研究とモデル化, 第49回水工学論文集, pp. 1201-1206.
- Michael J. Buckingham (1997): Sound speed and void fraction profiles in the sea surface bubble layer, Applied Acoustics, Vol.51, No.3, pp. 225-250.