

# 微細気泡曝気システムの開発過程における 課題とその対策について

## PROBLEMS AND SOLUTIONS IN DEVELOPMENT OF A MICRO-BUBBLE SYSTEM

大野嘉典<sup>1</sup>・五明美智男<sup>2</sup>・磯部雅彦<sup>3</sup>・田中陽二<sup>4</sup>・鯉渕幸生<sup>5</sup>

Yoshinori OONO, Michio GOMYO, Masahiko ISOBE,  
Yoji TANAKA and Yukio KOIBUCHI

<sup>1</sup>正会員 東亜建設工業株式会社 技術研究開発センター (〒230-0035 神奈川県横浜市鶴見区安善町1-3)

<sup>2</sup>フェロー 博(工) 東亜建設工業株式会社 環境事業室 (〒102-8451 東京都千代田区四番町5)

<sup>3</sup>フェロー 工博 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 (〒227-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

<sup>4</sup>正会員 博(環) (独法) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

<sup>5</sup>フェロー 博(工) 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 (〒227-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

Oxygen-deficient water in the enclosed coastal seas becomes more serious recently. Micro-bubble technology has been paid attention as a method to relieve oxygen-deficient water by aerating directly just above the sea bottom. Field studies on development on the micro-bubble systems have been done at some areas in Tokyo Bay since 2003. This paper presents the problems in these development processes and the solutions. The problems are the rise power of the big air bubble included in the micro-bubble, protection of equipment by pressure build-up and an energy supply way to equipment. To solve it, the method of measures was examined about these problems. 1)Development of a big air bubble remover. 2)Equipment protection system development by pressure measure. 3)Self-sufficient energy use which doesn't require an electric transmission cable.

**Key Words :** Micro-bubble, oxygen-deficient water

### 1. はじめに

東京湾をはじめとする閉鎖性海域では、富栄養化による赤潮や、夏期の貧酸素化、貧酸素水の湧昇による青潮などが恒常的に発生するようになり、魚貝類の大量斃死など生態系への影響が大きな問題になっている。

その対策としては、河川等からの流入負荷の削減や底泥からの栄養塩の溶出を抑える浚渫や覆砂工事が行われてきたが、根本的な解決にまで至っていないのが現状である。その中で、近年、着目されている技術が、湾内底層における貧酸素化を直接改善することを目的にした、微細気泡による酸素供給技術である。

しかし、貧酸素化改善のための微細気泡曝気システムは研究途上にあり、その実用化と普及のためには、効果などの情報とともに装置・運転などのシステム運用に関する体系的な議論が必要と思われる。

本研究では、著者らが2003年から実用化に向けて実施してきた微細気泡曝気システムの現地実験をふまえ、開発過程で明らかになった装置・運転方法・全体システムに関する課題とその対策について報告する。

### 2. 微細気泡曝気システムの課題

#### (1) 微細気泡曝気装置の基本構成

微細気泡曝気システムの基本構成(図-1)は、微細気泡を生成する微細気泡発生ノズル等の微細気泡発生設備、微細気泡発生設備に気体を供給するコンプレッサー等の送気設備、気体を微細化するための剪断または加圧に必要な圧力を供給する水中ポンプ等の送水設備、それらを稼働させる電力供給設備で構成される。微細気泡発生機構等の特殊な部分を除けば、単純なシステムであり現地への適用が容易に見えるが、微細気泡曝気装置およびその使用方法に

起因する大きな気泡の混入や目詰まりなどの装置に関連する技術課題や装置に供給する電力や維持管理などの稼働に関する技術課題を解決する必要がある。以下に、個別の課題と対応について記述する。

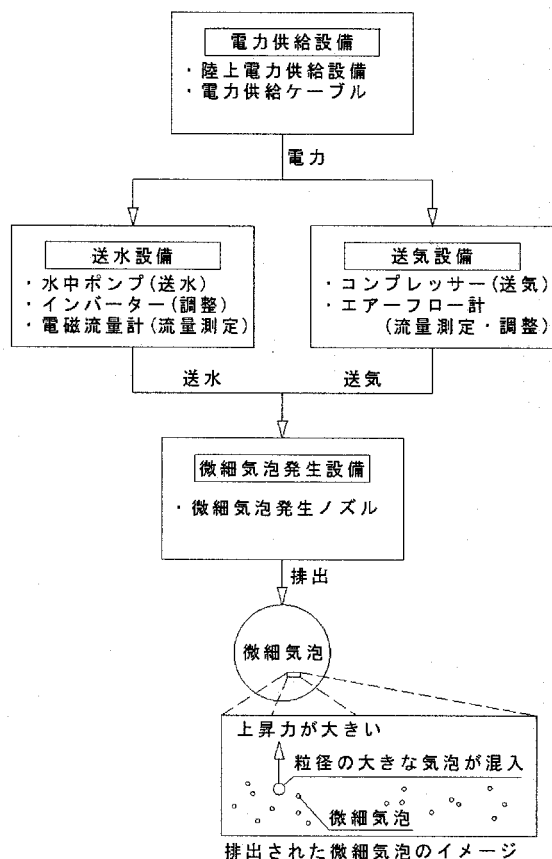


図-1 微細気泡曝気装置の概略基本構成

## (2) 装置に関連する技術課題

### a) 大きな粒径の気泡の課題

微細気泡発生装置から放出された溶解効率の高い微細気泡によって、貧酸素水塊を効率的に解消させるためには、貧酸素水塊の発生要因である成層下に、直接微細気泡による酸素供給を行うことが望ましいが、微細気泡発生装置から排出された気泡の中に混入している微細気泡以外の大きな気泡の上昇力によって、成層が破壊され、効率的に貧酸素水塊を解消できない課題<sup>4)</sup>がある。

その解決方法として、微細気泡発生設備に供給する送気量を減らして、微細気泡発生設備から排出される微細気泡以外の大きな気泡の発生を抑える方法があるが、酸素供給量も減らす事になるため、最適な送気量の調整が必要となる。

本報告では、後述するように、大きな粒径の気泡対策を室内実験にて検討した。

### b) 装置保護の課題

本研究の装置開発過程において、微細気泡発生設備のトラブルによって、想定以上の圧力負荷が装置

にかかり、装置の故障を多発したケースがあった。

トラブルで発生する負荷は、装置の規模が大きいくほど装置へ与える影響大きいため、貧酸素水塊を解消させるような大規模な装置を設置する場合は、故障リスクを低減させるために、装置保護システムのような対策が必要になる。

装置保護システムの開発を室内にて行い、2005年度に実施した新浜湖（千葉縣市川市）の現地実験<sup>6)</sup>にて、その効果を確認した。

### c) 送水量の設定

微細気泡曝気装置の送水量の設定方法として、水中ポンプの回転数を制御しているインバーターの周波数を、電磁流量計の計測値を確認しながら調節する方法を試用していた。室内にて、インバーターの周波数と送水量の関係が求め、インバーターの周波数設定だけで、現地の送水量設定を行った。

## (3) 稼働に関する技術課題

### a) 電力供給設備の課題

陸からの送電設備から海底に電力供給ケーブルを設置して電力供給をおこなう方法では、電力供給ケーブル延長に伴う損失があるため、設置に使用するケーブル径は、送電量と電力供給ケーブル設置長に応じて大きくなる。そのため、陸から離れた場所へ装置を設置することが困難である。また、設置した電力供給ケーブルが一般船舶によって損傷したり、漏電によって人体へ危害を与えたりする可能性があるため、電力供給ケーブルの養生や維持管理が必要である。

装置の頭上に発電機を設置したフロートを浮かべて電力供給する方法もあるが、燃料給油の管理や油の流出等の監視が必要となる。本報告では、ケーブルの設置の管理等を必要としない、太陽光発電を利用した微細気泡曝気装置の利用を試みた。

## 3. 大きな粒径の気泡除去対策

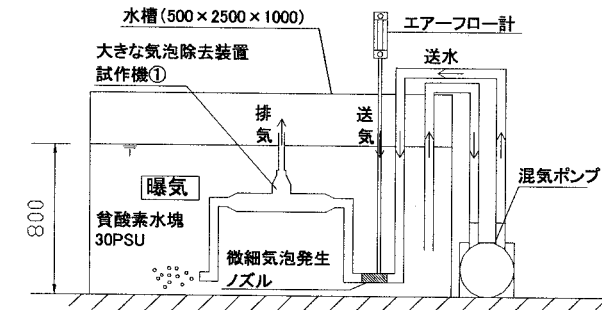
### (1) 上昇速度を利用した大きな粒径の気泡除去

微細気泡発生ノズルから排出された気泡の中に混入している大きな粒径の気泡を除去するために、気泡の上昇速度を利用した気泡除去装置の試作機（図-2）を作成し、その効果を室内実験にて確認した。

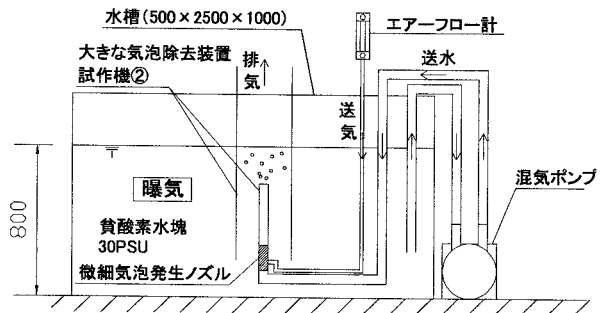
室内実験は、亜硫酸ナトリウムにて無酸素化した30PSUの人工海水の水1m<sup>3</sup>に、送水量40L/min、送気量1.5L/minの設定条件で、気泡除去装置無しのケースと、試作機①および②を用いたケースで曝気を行った。試作機の評価として、試作機から酸素溶解に寄与している微細気泡が除去されていないことの確認を気泡除去装置無しのケースにおける溶存酸素の時系列変との比較で行った。

室内実験の結果を図-3に示す。試作機①および②のケースにおける溶存酸素の時系列変化は、気泡除去無しのケースに比べて、曝気初期の段階から勾配が緩く、酸素溶解に寄与している微細気泡が大きな気泡の上昇流れに連行されて、定常的に排気されていることが分かる。

この結果より、気泡の上昇速度を利用した気泡除去には、溶解酸素の効率を低下させる問題があるため、材料分級に利用されている遠心分離の原理を用いた、大きな粒径の気泡除去装置の検討を行った。



(a) 配管の拡幅による大きな気泡の除去法（試作機①）



(b) 二重管による大きな気泡の除去法（試作機②）  
図-2 上昇速度を利用した大きな粒径の気泡除去装置の試作機

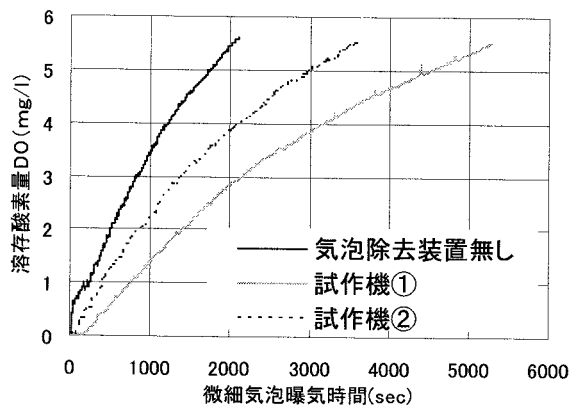


図-3 気泡除去装置による溶存酸素の時系列変化

## (2) 遠心分離装置の理論的検討

微細気泡発生ノズルから排出される海水と気泡の混合流体に遠心力が作用するように円柱状の遠心分

離装置の外周から接線流として流入させる。これにより、遠心分離装置内の混合流体は分級が発生して、粒径の大きな気泡が中心に集まると仮定して、遠心分離装置の理論的検討を行った。

海水中に含まれる気泡に作用する遠心力は、

$$F = \frac{\pi}{6} d^3 (\rho_a - \rho_s) r \omega^2 \quad (1)$$

となる。ここで、 $F$ ：気泡に作用する遠心力 (N)、 $d$ ：気泡直径 (m)、 $\rho_a$ ：気泡の密度 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $\rho_s$ ：海水の密度 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $r$ ：装置の中心から気泡までの作用距離 (m)、 $\omega$ ：気泡に作用する角速度 (rad/s) である。

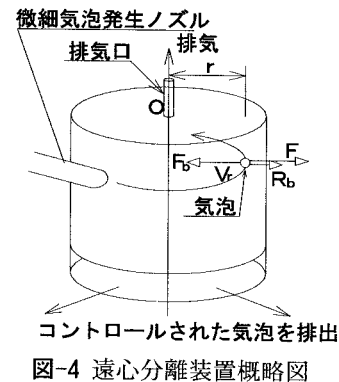


図-4 遠心分離装置概略図

海水の密度 $\rho_s$ に対し気泡の密度 $\rho_a$ の値はかなり小さいため、海水中に含まれる気泡は、遠心力を受けた比重の重い海水により中心へ押し出される。これにより、気泡に作用する力は、図-4における $F_b$ ：気泡が中心に向かう力と $R_b$ ：中心に向かう気泡に作用する抗力になる。

気泡が中心に向かう力と抗力が釣り合っていると、気泡が中心に向かう速度を求めると

$$V_r = \sqrt{\frac{4r\omega^2 d(\rho_s - \rho_a)}{3C_D \rho_s}} \quad (2)$$

となる。ここで、 $V_r$ ：気泡が中心に向かう速度 (m/s)、 $C_D$ ：気泡の抵抗係数  
気泡の抵抗係数は、ストークスの抵抗則が成り立つとして、

$$C_D = 24/\text{Re}_p \quad (3)$$

とする。ここで、 $\text{Re}_p$ ：粒子レイノルズ数であり、次式より求める。

$$\text{Re}_p = dV_r \rho_s / \nu \quad (4)$$

ここで、 $\nu$ ：海水の動粘性係数である。  
以上により、気泡が中心に向かう速度は

$$V_r = \sqrt{\frac{r\omega^2 d^2 V_r (\rho_s - \rho_a)}{18\rho_s \nu}} \quad (5)$$

$$\therefore V_r = d^2 \frac{r\omega^2 (\rho_s - \rho_a)}{18\rho_s \nu}$$

となる。よって、気泡粒径が大きいほど、中心へ向かう速度が速いことが分かる。この結果より、気泡粒径が大きいほど装置の中央へ集やすいため、効率的に気泡が除去できることが分かる。

### (3) 遠心分離装置の室内実験による検証

遠心分離装置の検証は、簡易微細気泡曝気装置（図-5）の水槽の中に、亜硫酸ナトリウムにて無酸素化した30PSUの人工海水作成し、送水量50L/min、送気量0.5～4.0L/minの条件で、遠心分離装置によるケースと遠心分離装置無しのケースにおける曝気実験を行った。

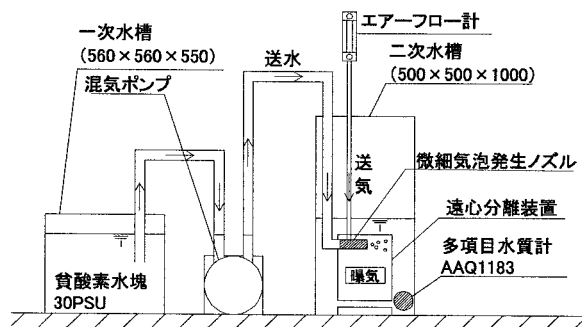


図-5 簡易微細気泡発生装置概略図

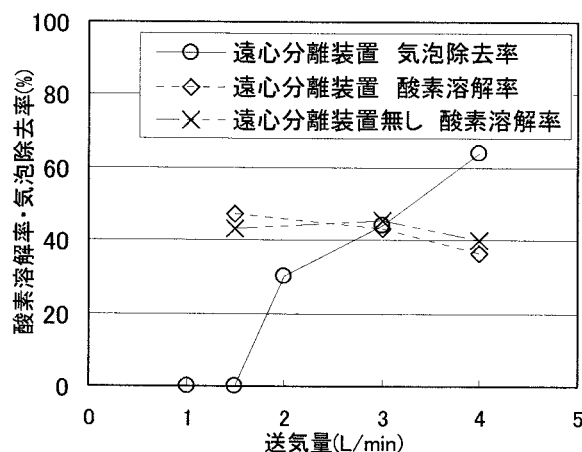


図-6 酸素溶解率の比較及び気泡除去

検証は、供給酸素量と酸素溶解効量の割合で求めた酸素溶解効率を用いて、酸素溶解に寄与している微細気泡が大きな気泡が排気されていないかどうかの確認と送気量と水中下方置換で計測した遠心分離装置の排気量との割合から気泡除去率を求め、この

実験で使用した遠心分離装置によってコントロールされている気泡粒径における送気量の確認で行った。

検証実験結果を図-6に示す。遠心分離装置と遠心分離装置無しの酸素溶解率における差は殆ど無く、酸素供給に寄与している微細気泡が除去されていない事が分かる。また、この実験に使用している遠心分離装置では、送気量が2～4L/minの設定時の排気量を除いた遠心分離装置から排出量は1.4～1.6L/minであった。送気量1.5L/min以下の設定では、排気を確認されなかったことより、送水量50L/min、送気量1.5L/minの条件で排出されている気泡粒径で、コントロールされていることがいえる。

気泡粒径の正確な計測ができなかった点で、理想気泡粒径に設定された遠心分離装置を作成できず現地実験に用いることができなかったが、特定の気泡径に設定された遠心分離装置を完成させて、現地に設置できれば、遠心分離装置の排気状況を確認するだけで、最適な微細気泡発生ノズルの送量条件を求めることができる。

## 4. 装置保護の対策および送水量の設定

### (1) 装置保護の対策

目詰まりなどのトラブルによって、装置配管内の圧力が急上昇する現象を監視するために、水中ポンプと配水ホースの間に圧力センサーを設置し、装置内の圧力が監視できるシステムを構築した。これにより、装置内の状態が常に把握できるようになった。

さらに、トラブル等によって発生する大きな圧力負荷による装置の故障を防止するために、圧力センサーの信号を受信するアンプ値を利用し、上限値を超えると水中ポンプの電流供給回路と接続されているマグネットスイッチへ信号を発信して、装置を停止させる制御方式を採用した。

図-7に示すような、装置保護システムの調整および動作確認を現地実験と同規模の微細気泡曝気装置で室内試験を行ない、装置保護システムを完成させた。

### (2) インバーターによる流量設定

装置保護システムの開発と同時に、水中ポンプの回転数を制御するインバーターの周波数と微細気泡発生ノズルへの送水量の確認を実施した。その結果を図-8に示す。水中ポンプ毎の特性により近似直線の勾配に違いがあるが、インバーターの周波数と送水量には比例関係があることが判明した。

この結果より、高価な電磁流量計を利用せずに、流量を設定する事ができるようになった。

### (3) 現地実験における装置の検証

2005年度に実施した新浜湖の現地実験にて、装置



### (3) 太陽光発電の発電量の検討

太陽光発電の発電量の検討によく用いられるパラメーターとして、1日の間に直射日光が地表を照らした時間である日照時間が用いられるが、発電量の値をみる限り、日射量の強弱によって発電量も変動しているため、全天日射量と装置の消費電力の関係から発電量の推測を行った。

2006年9月1日から9月19日の期間における気象庁の全天日射量と、装置の稼働時間の関係を図-12に示す。この図より、全天日射量と稼働時間には相関がみられ、全天日射量 $1\text{MJ}/\text{m}^2/\text{day}$ あたりの $85\text{W}$ 太陽電池4枚における装置の稼働時間は、近似式より $42\text{min}$ が求まる。装置の消費電力約 $100\text{W}$ から $85\text{W}$ 太陽電池1枚あたりの発電量を求めると $17.6\text{Wh}$ が求まる。

### (4) 太陽光発電の実用性

晴天時における全天日射量は、一般に $20\text{MJ}/\text{m}^2$ 程度である事より、装置を1日中連続運転させるには、この実験にて使用した $85\text{W}$ 太陽電池が8枚以上あれば可能である。微細気泡発生ノズル単体あたりの酸素供給量と対象としている貧酸素水塊の酸素消費量が確定できれば、物理的に水質改善は可能である。

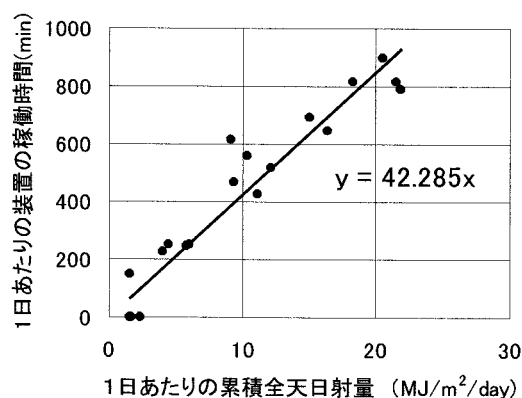


図-12  $85\text{W}$ の太陽電池4枚における全天日射量と装置稼働時間の関係

## 6. まとめ

貧酸素改善のための微細気泡曝気システムは研究開発段階であり、その実用化と普及のためには、効果などの情報とともに装置・運転などのシステム運用に関する体系的な議論が必要であると考え、著者らが2003年から現地にて実施してきた微細気泡曝気システムの検討結果より、以下の成果について報告を行った。

### (1) 大きな粒径の気泡による課題とその対策

実験当初から問題になっていた、装置から放出された微細気泡の中に大きな粒径の気泡が混入するこ

とによる成層破壊問題においては、さまざまな試作機を作成して対策を検討した結果、材料などの分級に使用されている技術であり、どの微細気泡発生ノズルでも応用できる遠心分離装置が提案できた。

### (2) 装置保護システムの課題とその対策

微細気泡発生設備のトラブルによって、想定以上の圧力負荷が装置にかかり、装置の故障を多発したケースがあった。装置保護システムによる圧力計測によって、初期異常の把握等容易にできるようになり、故障回避に効果があった。装置保護システムが作動する機会は現地実験では確認されなかったが、室内試験にて正常に稼働することを確認しており、故障が多発するトラブルの経験から、大規模な装置を稼働させるには必要な装置であるといえる。

### (3) 電力供給設備の課題とその対策

陸上から装置まで電力供給ケーブルを設置して電力供給を行う方法では、陸から装置までの距離が遠くなるにつれて設置が困難であり、かつ電力供給ケーブルの維持管理が必要である。そこで、容易に装置へ電力供給できる太陽光発電による小規模な微細気泡曝気装置の稼働を試験的に行い、太陽光発電利用による微細気泡曝気装置の実用性をまとめた。

謝辞：本研究は日本学術振興会科学研究費基盤研究S（課題番号 14102026）の補助によるものである。

### 参考文献

- 1) 鯉淵幸生，佐々木淳，磯部雅彦：東京湾における窒素・リンに着目した物質循環機構，海岸工学論文集，第48巻，pp. 1076-1080，2001.
- 2) 鯉淵幸生，磯部雅彦，佐々木淳，藤田昌史，五明美智男，栗原明夫，田中真史，Mohammad Islam，鈴木俊之：貧酸素水改善に向けた現地微細気泡実験，海岸工学論文集，第51巻，pp. 1156-1160，2004.
- 3) 佐々木淳，小出摩耶子，長田正行，柴山知也，磯部雅彦：東京湾三番瀬における微細気泡を用いた青潮水改善効果の数値的検討，海岸工学論文集，第50巻，pp. 981-985，2003.
- 4) 田中真史，佐々木淳，柴山知也，磯部雅彦：窪地海域を対象とした微細気泡エアレーションによる貧酸素水改善効果の解析，海岸工学論文集，第51巻，pp. 1161-1165，2004.
- 5) 田中陽二，磯部雅彦，鯉淵幸生，五明美智男，大野嘉典：閉鎖性海域での微細気泡による水質改善効果の数値解析，海岸工学論文集，第52巻，pp. 1126-1130，2005.
- 6) 田中陽二，磯部雅彦，鯉淵幸生，五明美智男，大野嘉典：新浜湖における水環境特性と微細気泡による曝気効果の検討，海岸工学論文集，第53巻，pp. 1164-1170，2006.