

漁港泊地を対象とした底層貧酸素水改善 のためのマイクロバブル現地実験

THE FIELD EXPERIMENT OF USING MICRO-BUBBLE AERATION FOR
IMPROVEMENT OF HYPOXIC WATERS IN A FISHING PORT ANCHORAGE

武田真典¹・佐々木淳²・三上信雄³・佐々木洋之⁴・足立有平⁵・熊田康邦⁶
Masanori TAKEDA, Jun SASAKI, Nobuo MIKAMI, Hiroyuki SASAKI,
Yuhei ADACHI and Yasukuni KUMADA

¹正会員 修(工) (社)水産土木建設技術センター 研究開発部 (〒104-0045 東京都中央区築地2-14-5)

²正会員 博(工) 横浜国立大学大学院工学研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

³正会員 (社)水産土木建設技術センター 調査研究部 (〒104-0045 東京都中央区築地2-14-5)

⁴正会員 修(工) 元(社)水産土木建設技術センター 調査研究部 (五洋建設(株))

⁵非会員 (有)パイ・クリーン (〒194-0031 東京都町田市南大谷1312-13)

⁶非会員 修(工) 日本ミクニヤ株式会社 東京支店 (〒213-0001 川崎市高津区溝口3-25-10)

In late years, a micro-bubble aeration system attracts attention as a means of improving bottom hypoxic waters. In the present study, we examined the performance of the system applied to a fishing port anchorage where hypoxic slack waters often appear during summer. We performed field experiments and then developed a numerical model capable of reproducing the measured data. Forcing the model, we reproduced the observed hydrodynamic and water quality fields during the operation of the micro-bubble aeration system. From the numerical results, we found that the system can improve the bottom hypoxic waters up to the horizontal scale of 25 m. This indicates that the total improvement of the present targeted area would be achieved if 4 to 7 sets of the system are properly allocated covering whole of the area.

Key Words : Konoura fishing port, trench in the port depths, the removal of an air bubble

1. はじめに

漁港内外の静穏水域は、水産動植物の生息空間や産卵場所として非常に有効な環境条件を有しており、蓄養や中間育成等、つくり育てる漁業の場としての活用が図られている。しかし、これらの水域の多くは外海との海水交流が十分ではないため、水質悪化等の問題を抱えており、水域環境の改善が喫緊の課題となっている。このような水質や底質が悪化することにより底層水が貧酸素化した場所に対し、水質を改善する手段として、近年、マイクロバブル発生装置（以下、装置）による水質改善技術が注目されている。

底層貧酸素水を改善するためには高酸素水を長時間底層に留めることが重要となり、マイクロバブルの浮上速度は極めて小さいことから、本装置を適用することにより底層貧酸素水を水平方向に広い範囲で改善可能であると期待できる。しかし、従来のノズルを直接水面下に下ろす装置の稼働方式では、副次的に発生する径の大きい気泡の混在により湧昇流

が励起され、貧酸素を改善できる範囲は極めて限定されてしまう問題が一方では指摘されていた。

上記問題点を踏まえ、佐々木ら^{1) 2)}は、閉鎖的な塩水湖である福井県日向湖を対象にマイクロバブルの現地実験を行い、気泡を除去した形で高酸素水のみを貧酸素層に供給できる新しい稼働方式を採用し、その有効性を確認した。また現象に忠実な数値モデルによる再現計算を行うことにより、本装置規模では日向湖のような広い場所での貧酸素の改善は困難であり、漁港泊地等の比較的狭い場所に対して本装置を適用することが有効であるとの結論を得た。

以上の点より、本研究では第2種の漁港に指定されており養殖・中間育成・種苗放流等が行われている秋田県金浦漁港をモデル水域にマイクロバブルの現地実験を実施した。また、併せて数値モデルによる再現計算を行うことにより、モデルの現地適用性の検討を行うとともに、底層が貧酸素化した状況で本装置を稼働させた場合の予測計算を行い、漁港泊地を対象とした場合の水質改善効果について検討を行った。

2. 現地観測と実験の概要

本研究で対象とした金浦漁港は、図-1、図-2 に示すように、港奥に水深 6.0～6.6m 程度の窪地を有している。また、窪地の北西側には海水交換を促進するために潜堤付き孔開き防波堤が設置されており、3 日間で港内の海水が入れ替わる設計となっている。そのために港内の全体的な水質は良好に保たれているが、窪地内には長年にわたって有機物等が堆積していることにより、底質が悪化していることがこれまでに確認されており、夏季の停滞期における底層水の貧酸素化が問題視されていた³⁾。そこで、本研究では、まず金浦漁港の現況を把握するための現地観測を 2005 年 7 月 25 日から 8 月 10 日にかけて実施し、2006 年 8 月 25 日から 9 月 2 日にかけて、窪地を対象としたマイクロバブルの現地実験および水質改善効果把握のための現地観測を実施した。



図-1 金浦漁港

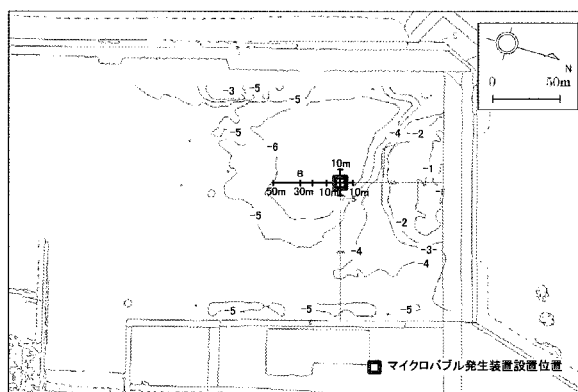


図-2 窪地周辺地形（水深単位：m）

2005 年に行った現況把握のための現地観測は、流況を把握するために、図-1 の A 点に ADCP および水位計を設置し、流向・流速・水位の計測を行うとともに、導水孔内の流速を電磁流速計で計測した。また、水質変化を把握するために、自記式水質計を図-1 の A、B 点表層と下層に設置し、水温、塩分、溶存酸素 (DO) を計測した。さらに、水質の平面・鉛直分布を把握するために港内全域の複数点で投げ込み式水質計による計測および採水分析を行った。

その他、底質分析および窪地周辺での底泥酸素消費試験も併せて行った。

2006 年に行った、装置を設置した状況下での現地観測についても、2005 年と同様の観測を行うとともに、装置周辺に図-3 に示す水質調査の測点を追加し、装置の稼働による効果の把握を行った。

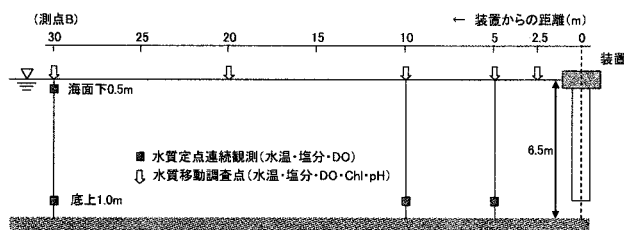


図-3 マイクロバブル発生装置近傍の調査点

本実験装置の概要を図-4 に示す。図のように本研究では、円筒管内で径の大きな気泡を大気中へ逃し、微細気泡を含んだ高酸素水のみを底層に供給する方法を採用した。ここでマイクロバブルとは、発生時に $10\mu\text{m}$ ～数十 μm の直径を有する気泡のことを指している⁴⁾。また、マイクロバブルは発生直後に上昇しながら径を収縮させ、マイクロナノバブルに変遷するとされ、収縮を開始する限界気泡径は $65\mu\text{m}$ との報告がある⁵⁾。従って、円筒管内においては少なくともマイクロバブル以外の気泡については全て取り除く必要があると考えられ、本手法は従来採られてきた手法における欠点を改良した方式であることが分かる。本研究で用いた装置の諸元を表-1 に示す。

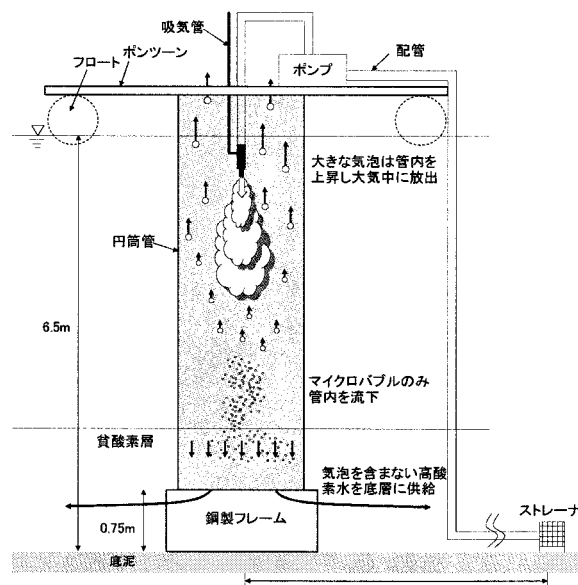


図-4 実験装置の概要

表-1 装置諸元

ノズル	(有)パイ・クリーン社製 YJ-35 型
ポンプ容量	1100L/min, 5.5kw
空気量	220L/min (±10%)

3. 数値シミュレーションの概要

(1) 数値モデル

流動場の解析は、佐々木ら²⁾と同様に気泡を含まない密度流場の再現を行うことから、準三次元マルチレベルモデルを用いた。また、水質場の解析には低次生態系モデルを使用した。

(2) 計算領域

計算領域は、港口を境界に設定し、漁港泊地内を対象とした。

(3) 境界条件

a) 潮汐

港口境界にて水位の観測データを与えた。

b) 水質

港口境界および導水孔にて水温・塩分・D0 の観測データを与えた。その他の水質項目については、採水調査結果より得られた値を一定値与えた。

c) 気象

地上気象観測データ（秋田）およびアメダスデータ（象潟）の1時間毎の観測値（気温、海面気圧、蒸気圧、風向、風速、日射量、降水量）を与えた。

d) 海底

底泥の酸素消費量は、調査結果を基に設定した。

(4) 計算条件

計算条件は表-2 に示すとおりである。

表-2 計算条件

項目	設定条件
再現期間	2005/7/25～2005/8/10 2006/8/25～2006/9/1
計算領域	610×670m
格子幅	$\Delta X = \Delta Y = 5.0\text{m}$
鉛直区分	0.6～0.25m
時間ステップ	2.5s
鉛直拡散係数	$1.0 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}^2$

(5) 装置の設定条件

装置の設定条件は、図-5に示すように計算領域内において円筒管部分を壁境界に設定し、吐出口の計算格子において装置からの供給量（流量）に応じた流速を水平4方向に与えた。また、供給される水質条件は、水温・塩分についてはストレーナ設置位置の値を用い、D0については水温・塩分より算出される飽和酸素濃度を毎時与えた。

ここで佐々木ら²⁾により行われた日向湖でのマイクロバブルの現地実験においては、ストレーナより水を吸い込み円筒管より高酸素水を吐き出す過程において、2～3℃程度の水温上昇が見られたが、本実験においては特に水温上昇は確認されず、吸い込み口と同水温・同塩分の高酸素水が常時底層に供給されていた。

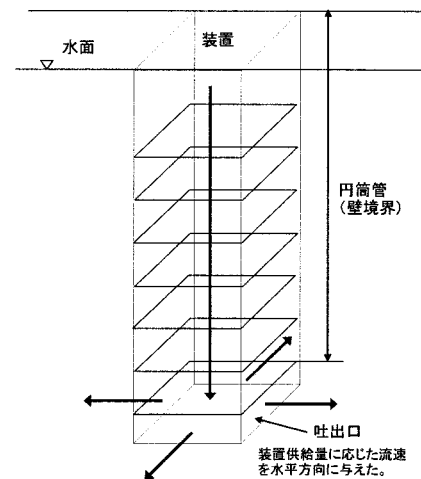


図-5 装置の設定条件

4. 現地観測結果と再現計算結果

(1) 2005 年観測結果と再現計算結果

図-6～図-8 に、2005 年に行った現地観測時の気象データ、観測地点 A 点および B 点における水温、塩分ならびに D0 の観測結果を示す。なお、図-8 については現況再現計算結果を併せて示す。

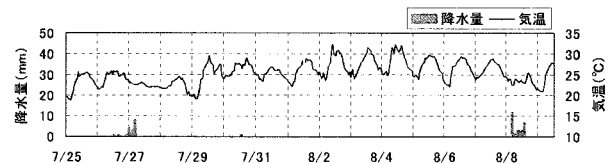


図-6 気象データ

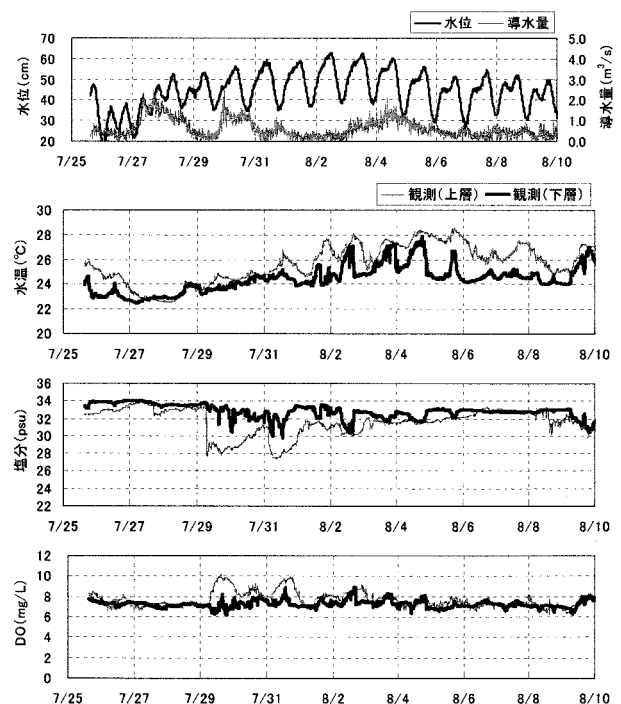


図-7 A 点における観測結果

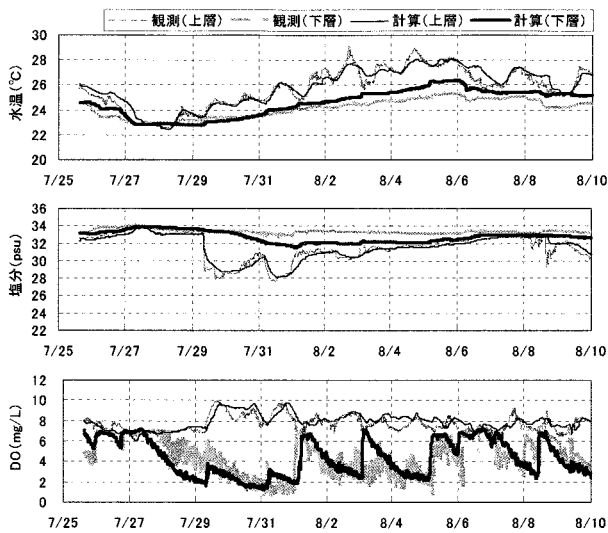


図-8 B点における観測結果と再現計算結果

B点下層では、7月29日頃からの塩分低下に伴い、DOが2mg/L以下に低下する貧酸素状況が確認された。また、DOが緩やかに減少した後、急激に濃度が上昇する現象が8月1日や8月5日以降に何度か見られた。これは、導水孔からの外海水の流入と窪地周辺の地形条件による流況変化により、水塊の移動が生じることに起因した現象と考えられる。

図-8の再現計算結果を見ると、上層の水温、塩分、DOについては、両者はよく似た時間的変動を示していることが分かる。下層については、水温の計算値が観測値と比較して高い値で推移し、塩分は観測値と比較して低い値で推移する傾向が見られる。また、DOについては、時間的変動にズレが生じる部分が見られるが、期間を通して見ると、本数値モデルは金浦漁港において特徴的に見られるDOが断続的に低下する様子を良好に再現しているといえる。

(2) 2006年観測結果と再現計算結果

図-9～図-11に、2006年に行ったマイクロバブルの現地実験における現地観測時の気象データ、観測地点A点およびB点における水温、塩分ならびにDOの観測結果を示す。また図-11については再現計算結果を併せて示した。なお、本装置の稼働期間は現地実験を開始した8月25日の翌日である26日午前7時より9月1日午前7時までの約1週間である。なお29日の午前10時～12時は、点検のために一時的に装置稼働を停止している。

2005年の現地観測時に比べ、上層・下層共に全体的にDOが高い値で推移していることが分かり、降雨が確認された8月29日～31日の期間における上層と下層との密度差が最も大きく見られた期間についても底層DOの大きな低下は見られていない。そのため、図-12に示すように、装置から5、10、30mの点に設置した自記式水質計によるDOの観測結果にも明確な違いが確認されず、連続観測計によりマイクロバブルの稼働による効果を把握することは困難であった。

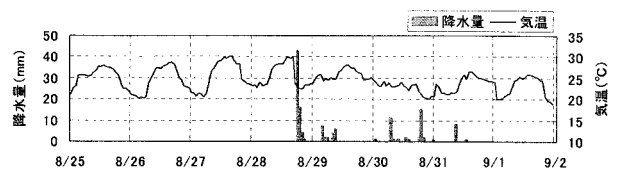


図-9 気象データ

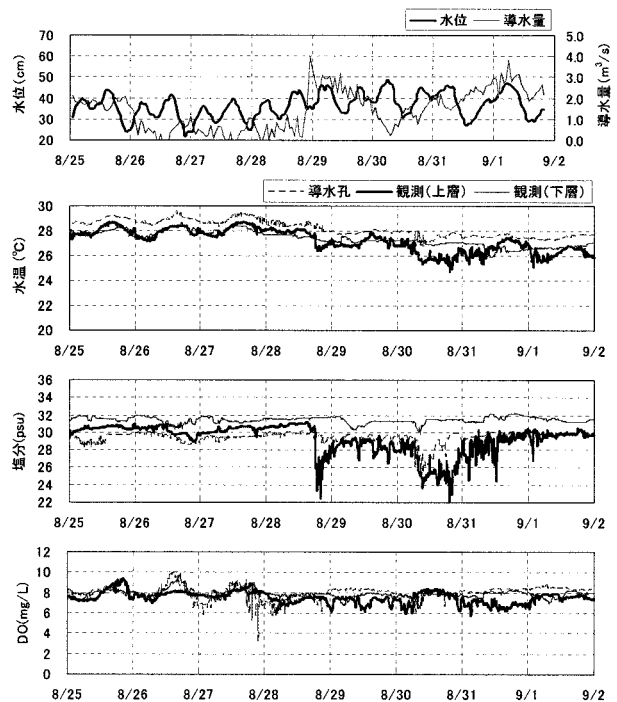


図-10 A点における観測結果

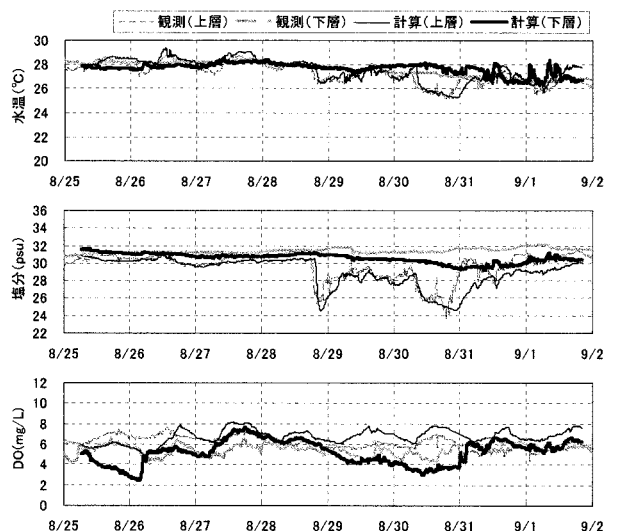


図-11 B点における観測結果と再現計算結果

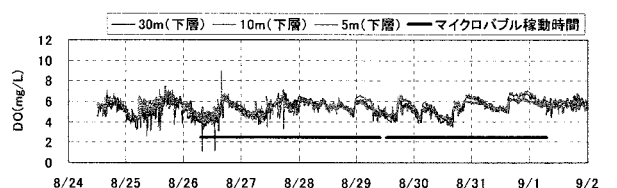


図-12 装置近傍調査点における観測結果

図-13、図-14には、装置周辺で行った投げ込み式水質計による定点移動観測結果を基にした、密度とDOの断面分布とDOの再現計算結果を示す。

前述のとおり、観測期間中のDOは比較的高い値で推移しており、マイクロバブルの効果を把握しにくい状況であったが、装置から10m程度の範囲において底層のDOが0.3～0.4mg/L程度周囲に比べて高くなっている状況が確認された。なお観測で用いた水質計は「アレック電子機」製の多項目水質計「AAQ1183」であり、DOの観測精度は±0.1mg/Lである。このことから、微小な差ではあるが、装置稼働によって高酸素水が等密度層に沿って水平方向に広がったものと判断される。また、装置周辺では底層のみではなく、鉛直方向にもDOの上昇が見られた。再現計算結果を見ると、DOの絶対値に若干のズレがあるが、分布傾向およびDOの上昇量は概ね再現していることが分かる。数値モデルでは、気泡混入による密度変化を考慮していないが、装置周辺での鉛直方向へのDO上昇も再現していることが分かる。このときの流速分布を見ると装置周辺で微小な上昇流が発生していることが確認されたことから、現地においてもDO分布は装置周辺の流況変化の影響を受けて鉛直方向にも拡散していたものと考えられる。

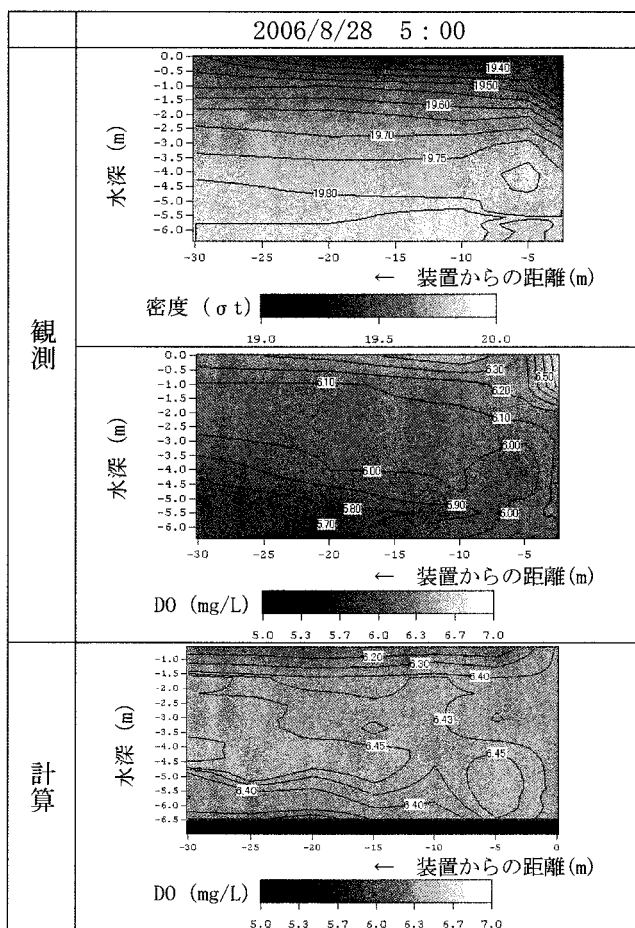


図-13 DOの観測結果と再現計算結果

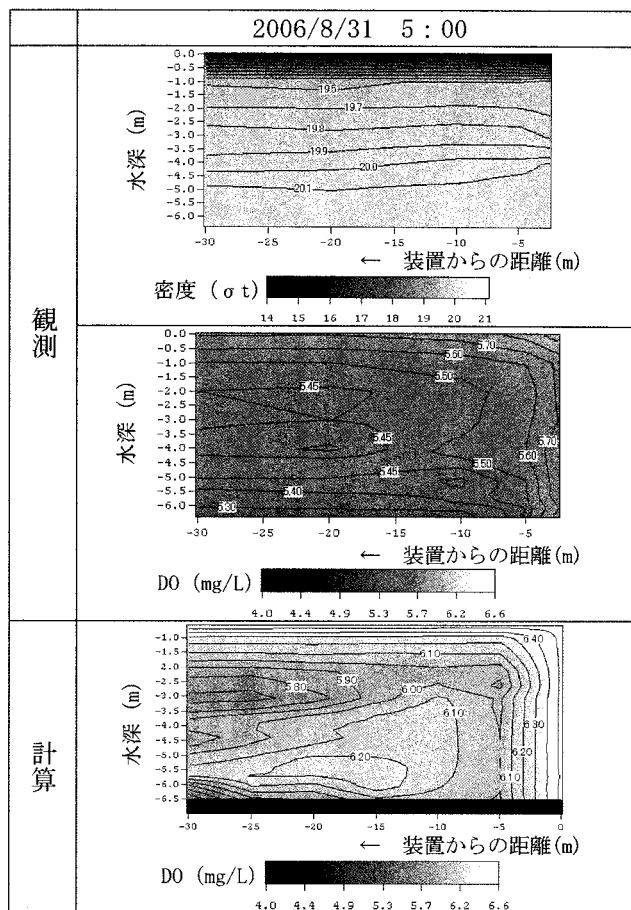


図-14 DOの観測結果と再現計算結果

5. 水質改善効果の予測

以上のように、現地観測によりマイクロバブルの効果を把握するとともに、本数値モデルにより実測値を概ね再現できたことから、マイクロバブルの効果を考慮した計算が可能であることが確認された。

そこで、本モデルを使用して2005年の現地観測結果を対象に、装置を窪地内に設置することを想定した予測計算を試み、貧酸素化した状況下でのマイクロバブルの効果把握を行った。装置の設置位置、装置規模は2006年の現地実験と同様の条件とした。

図-15に現況再現計算結果、図-16に装置を設置した場合の予測計算結果を示す。また、現況と予測の差分値を図-17に示す(0.5mg/L以上上昇した部分のみを表示)。これより、本装置を底層が貧酸素化した状況下に適用した場合には、装置から5mの点では3.0mg/L程度、20mの点で1.0mg/L程度上昇しており、25m以上の範囲まで影響していることが予測された。

ここでの予測結果は、比較的マイクロバブルの効果範囲が広く、DOの上昇量も大きい時間帯を抽出して示したものである。図-18には抽出した7月30日を含む7月27日～8月3日の期間について、装置より5m～30mの範囲の底上1.0mでのDO変化を比較したものを示す。この結果より、装置を稼働させ

ない状況下での DO 濃度がもともと高い場合には、装置を稼働させた場合の地点間の差異が明確に見られなくなる傾向にあることが分かる。したがって、周辺の水質状況や流況により、効果範囲および DO 上昇量は、図-17 に示す結果より小さくなる場合が多かったと考えられる。

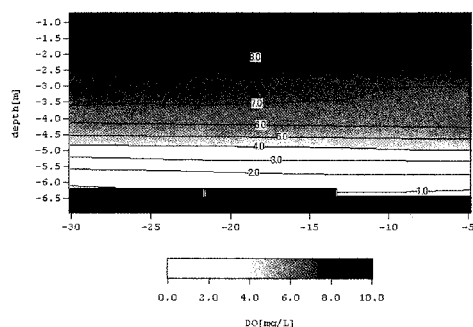


図-15 現況再現計算結果 (2005/7/30 12:00)

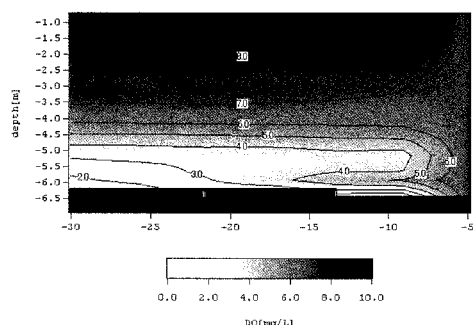


図-16 予測計算結果 (2005/7/30 12:00)

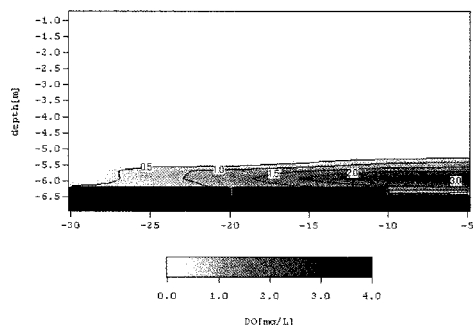


図-17 現況と予測の差分値 (2005/7/30 12:00)

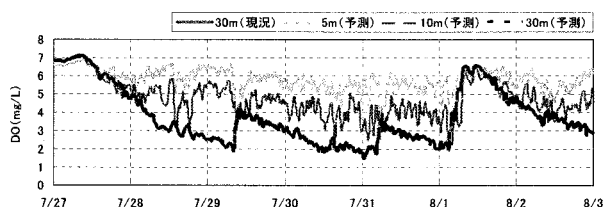


図-18 装置からの距離による DO 時系列の比較

6. おわりに

漁港泊地等の比較的狭い領域において、一時的に酸素濃度が低下する箇所に対してマイクロバブルを用いることにより、底層水の貧酸素化を解消できることが考えられる。今回のマイクロバブル現地実験

は、比較的 DO 濃度が高い状況で行われたことから DO は 0.3~0.4mg/L 程度の上昇に留まったと考えられるが、少なくとも 10m 以上の範囲には影響していることが確認された。また、貧酸素化した状況下におけるマイクロバブルの適用を想定した予測計算を行った結果、25m 以上の範囲まで影響していることが予測された。

ここで、本装置により貧酸素化した状況下における窪地内全域の DO を上昇させるために必要な装置の台数を見積もると、装置を中心に 30m 四方の範囲で 2.0mg/L、40m 四方の範囲で 1.0mg/L の DO を上昇させる能力が本装置にはあると考えられる。このことから、窪地の面積約 6300m² に対し、窪地内の DO を 3mg/L 以上に維持するためには 4 台の装置、4mg/L 以上に維持するためには 7 台の装置が必要であると予測され、今後設置数の増加や装置規模を大きくするなどの対策が必要であると考えられる。

今後は、底層が貧酸素化した状況を対象に、装置を多数設置した場合や装置規模を大きくした場合を想定した条件下で、数値モデルによる複数ケースの計算を行い、貧酸素化改善のための適切な装置の配置計画や設置規模等について、より詳細な検討を進める予定である。

謝辞：本調査は、水産庁「自然エネルギーを利用した水域環境改善委託事業」により実施されたものである。現地調査の実施にあたっては、秋田県農林水産部水産漁港課と由利振興局農村整備課並びに秋田県漁業協同組合の多大なるご協力を頂いた。また、本検討の実施にあたっては、(独)水産総合研究センター養殖研究所 生田部長、日本大学生産工学部長井准教授、(独)土木研究所寒地土木研究所 山本上席研究員より貴重なご意見とご指導を頂いた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 佐々木洋之・武田真典・岡野崇裕・佐々木淳・足立有平：気泡を除去した新しいマイクロバブル発生装置稼働方式による現地実験，土木学会第 61 回年次学術講演概要集，No. II-198，2006。
- 2) 佐々木洋之・佐々木淳・武田真典・岡野崇裕・足立有平：閉鎖性水域におけるマイクロバブル発生装置を用いた溶存酸素供給効果の把握，海岸工学論文集，第 53 巻，pp.1171-1175，2006。
- 3) 中泉昌光・川合信也・三浦浩・佐々木政博・野呂隆行：自然調和型漁港における水産動植物の生息環境の創造に関する長期モニタリングとその評価，海洋開発論文集，第 20 巻，pp.1037-1042，2004。
- 4) 大成博文：マイクロバブル，日本機械学会誌，第 108 巻，1042 号，p694，2005。
- 5) 大成博文・都並結依・大成博音・山本孝子：マイクロバブルの発生機構と収縮特性，水工学論文集，第 50 巻，pp.1345-1350，2006。