

# 密度流を利用した底層貧酸素対策装置の効果とその再現計算

金山 進\*      ・佐々木洋之\*\*      ・佐々木 淳\*\*\*  
岡田知也\*\*\*\*      ・春谷芳明\*\*\*\*\*      ・城野清治\*\*\*\*\*  
廣海十朗\*\*\*\*\*      ・中瀬浩太\*\*\*\*\*

密度成層の発達した閉鎖性海域内の窪地状地形内の貧酸素の解消に動力を用いた鉛直混合促進装置を適用した。底層に放流された低密度の表層水の湧昇を補う形での周辺水の引き込みによる密度成層の緩和と底層貧酸素の解消が流況、水質調査により確認された。さらに、この状況は数値シミュレーションによって概ね再現され、対象とする海域の条件に応じた装置の仕様、台数、設置位置の計画への数値シミュレーションの利用に展望が得られた。また、底層のリン酸態リンの減少、底泥の硫化物減少など、本装置による底層貧酸素解消の効果を示唆する結果が得られた。

## 1. はじめに

閉鎖性海域では、海底への有機物の集積や密度成層の形成による底層水の停滞、これに伴う底層の貧酸素化、栄養塩の溶出による富栄養化の進行という問題が生じていることが少なくない。このような問題への抜本的な対策としては、陸域などからの負荷を軽減するとともに既に悪化してしまった底泥の浚渫除去を行った上で地形や構造物の改変により海水の滞留を解消することが望ましいが、こういった方策は規模の大きな事業となることが多く簡単には実施できないのが現状である。

このような背景の下、動力を用いた鉛直混合促進装置などの可搬型の水質浄化装置による流動停滞の解消が今後大きな役割を担うようになる可能性があり、近年盛んに開発が進められている（例えば、大内ら, 1998, 宮岡ら, 1999）。これらによる水質改善が効率的、効果的に進められるためには、対象とする海域の条件に応じた装置の仕様、配置、設置台数の計画手法が要求され、そのためには、装置による水質改善効果を予め把握する方法が必要となる。本研究では、表層の低密度海水を海底付近から放流することにより発生する密度流の効果を利用して窪地状地形の海底の貧酸素を解消する装置の効果を現地において効果を検証するとともに、その再現計算を通じて、数値シミュレーションに基づく設計・計画手法の可能性を検討した。

## 2. 流水発生装置

### (1) 流水発生装置による鉛直混合の原理

本研究において対象とする流水発生装置による鉛直混合の原理は図-1 に示す通りであり、密度成層の発達した閉鎖性海域において表層水を海底に送り込むことにより発生する循環流を利用するものであり、図のようにトレンチ状の地形となっている場合には特に効果が大きい。

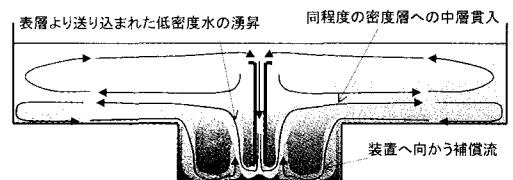
底層部に放流された低密度の表層水は周辺の海水を連行しつつ上昇し、底層部ではこれを補う形で周辺の海水が装置の放水部に向かって流れ込む。一方、周辺水との混合により密度を増しつつ上昇した放流水は、自らと同程度の密度の層に達した時点で水平方向に向きを変えて周囲へ広がるため、いわゆるショートサーキットは起こらず、広い範囲の海水がトレンチ内に引き込まれる。試算結果によれば、この流量は装置による純粋な放流量よりも大きい。

### (2) 試作機の概要

試作機の概要を図-2 に示す。本体は直径 3.6 m の円



(1) 底層水停滞による水質悪化の機構



(2) 表層取水・底層放水による密度流

図-1 底層放水式の流水発生装置による鉛直混合の原理

- |           |      |                                     |
|-----------|------|-------------------------------------|
| * 正会員     | 博(工) | 五洋建設(株) 技術研究所 課長                    |
| ** 正会員    | 修(工) | 五洋建設(株) 技術研究所                       |
| *** 正会員   | 博(工) | 横浜国立大学助教授 大学院工学研究院システム部の創生部門        |
| **** 正会員  | 博(工) | 国土交通省国土技術政策総合研究所沿岸海洋部 海洋環境研究室 主任研究官 |
| ***** 正会員 | 理 博  | (社)日本海洋開発産業協会 技術開発部 技術開発チーフマネージャー   |
| ***** 正会員 | 理 博  | (株)海洋開発技術研究所 社長                     |
| ***** 正会員 | 理 博  | 日本大学教授 生物資源科学部海洋生物資源科学科             |
| ***** 正会員 |      | 五洋建設(株) 環境事業部 事業課長                  |

盤状であり、4つのフロートによって水表面に留まる。中心軸上に取り付けられた出力7.5kWのモーターで船用インペラを回転させて、下向きの流れを発生させる。

図-3に示すように、4つのフロートの間から吸入された表層水はフレキシブルホースを通じて底層に送られ、海底面上50cmに立ち上げられた放水ゲージから放水される。

使用電圧は三相200Vであり、陸上より電気配線する。運転の開始・停止および流量の調整は陸上の操作盤より行う。インバータにより駆動モーターの回転数を変化させて流量を調整するが、22(m<sup>3</sup>/min)の中速運転と36(m<sup>3</sup>/min)の高速運転の2段階を設定した。

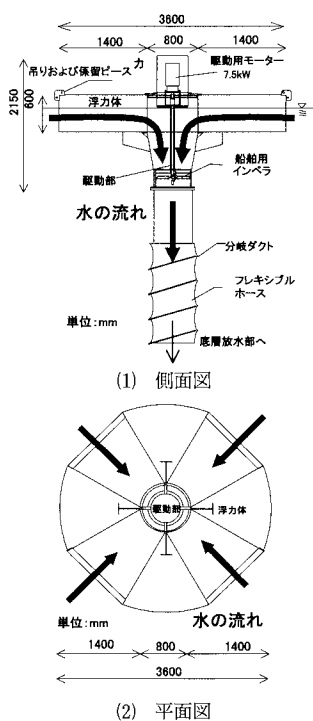


図-2 試作機の概要

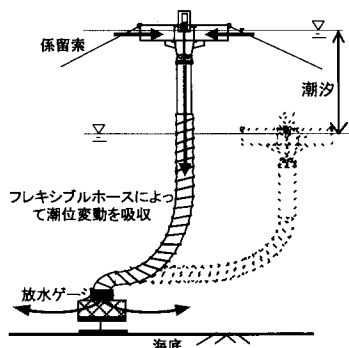


図-3 試作機の設置状況

### 3. 現地実証試験と再現計算

#### (1) 現地実証試験の概要

現地実証試験は東京都野鳥公園の東岸に位置する閉鎖性海域(図-4)において実施した。

当水域は幅約200m、水深約5mの水路状領域の終端部にあたり、中央部には周辺よりも2m程度深い一辺約100mのトレンチ状の地形が存在する。この海域は底層部の水温が夏場でも22~24(°C)と表層に比べて低く、DOも1(mg/L)程度と低い。トレンチ内ではこの傾向がさらに顕著で、水温が約20(°C)、DOはほぼ0(mg/L)である。また、塩分もトレンチ内では30(psu)以上であることから、強い密度成層が形成されており、これがトレンチ内の海水の停滞と貧酸素化を引き起こしていると考えられる。図-5は2002年9月3日における測定結果であり、この状況を顕著に示す代表的なものであるが、夏場から秋口を通じて概ね同様な傾向を示した。このように当地点は海水の上下混合、密度成層の低減が水質改善に効果的であると考えられる。

現地実証試験は2003年の7月末から10月初旬にかけて実施し、この間、連続1週間程度の運転を数回に分けて行った。代表測点は図-6に示す通りであり、流水発生装置をトレンチ部の中央にあたるA点に設置し、水路状をなす対象海域の中心線に沿って測点を配置した。

ここでは測点BにおけるADCPによる流速鉛直分布の連続測定結果と測点Cにおける水温・塩分・DOの連続測定結果を中心に報告する。

#### (2) 再現計算の概要

再現計算には静水圧近似の3次元レベルモデルに佐々木ら(1998)に準拠した低次生態系モデルを組み込んだものを用いた。測点Eより岸側の領域を対象とし、平面格子間隔は2mとした。鉛直方向の層分割については、

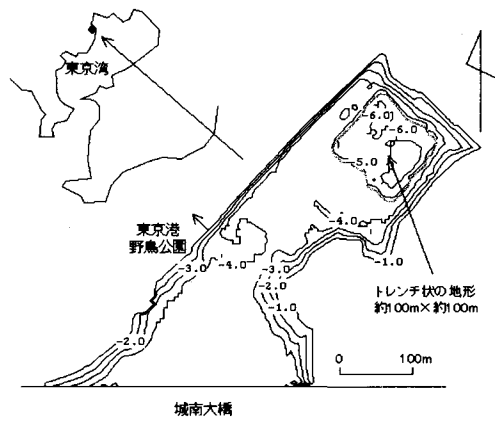


図-4 現地実証試験地点

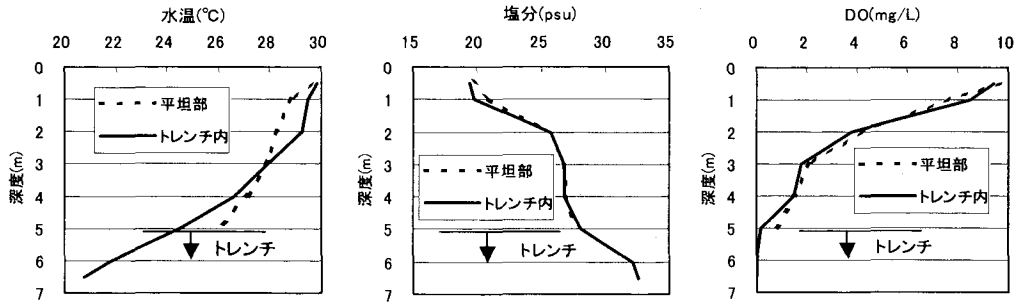


図-5 現地実証試験地点における水温・塩分・DO

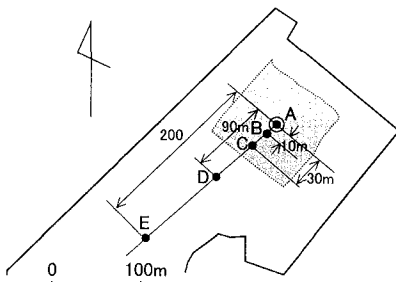


図-6 現地実証試験における測点

干潮位-0.25 m以浅を第1層とし、第2層以深は0.25 mの等間隔とした。

沖側境界では測点Eにおける水温・塩分・DOの実測値と芝浦地点における天文潮位を入力した。日射量は東京気象官署のデータ、気温、気圧、風は羽田地点のデータを入力した。

実証試験期間中に実施した数回の運転のうち、2003年8月29日からの高速運転期間(36 m<sup>3</sup>/min)を再現期間とした。ただし、この期間は運転中に流水発生装置の本

体と放水ゲージの連結に一時的に不具合が生じたため、装置が正常に稼働していた9月2日までを対象とした。

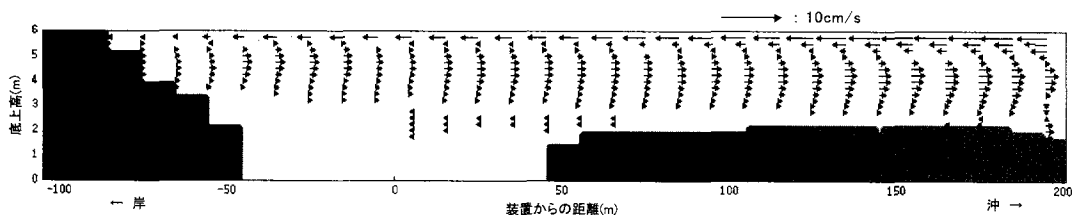
### (3) 現地実証試験結果と再現計算結果

図-7は再現期間中の代表的な日時の密度流場の計算結果を示したものであり、流水発生装置設置点Aから沖側境界測点Eを含む水路中心線上の縦断面図である。

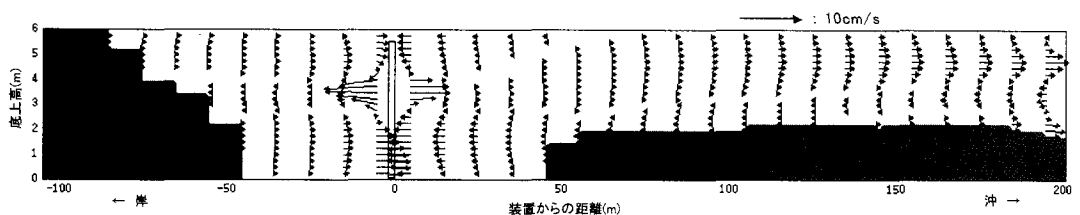
図-7(1)は装置稼働前の2003年8月29日14:20の流況場を抽出したものであるが、この時は南西、すなわち岸向きに風速約3 m/sの吹送があり、潮汐は上潮時にあたる。吹送による岸向きの流れは、密度成層のため深度1~2 m程度で補償流を生じており、トレンチ内には殆ど影響を及ぼしていない。

図-7(2)は装置稼働後の2003年8月30日12:00の流況である。東北東4.5 m/sの吹送があり、ちょうど干潮時にあたる。底層では装置に向かう流れが生じ、トレンチ内に周辺の海水が持ち込まれるとともに、中層では装置から遠ざかる流れが発生して周囲に広がっている。この状況は図-1(2)に示す本装置の原理に対応している。

図-8は再現期間のうち装置が稼働している間の測点



(1) 装置稼働前(8月29日14:20)



(2) 装置稼働中(8月30日12:00)

図-7 代表時における計算流速縦断面図

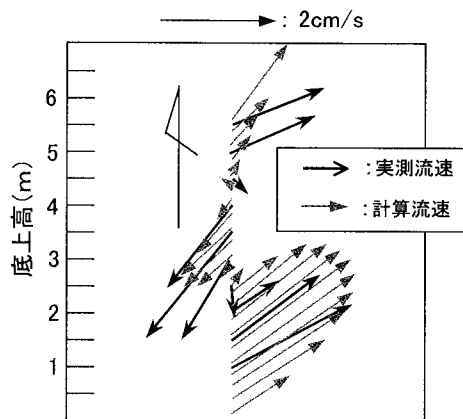


図-8 装置近傍での流速分布

Bにおける ADCP の測定結果を測定層毎に平均したものをその再現計算結果とともに示したものであり、水平方向の流速ベクトルを海底面からの高さに対して並べたものである。流向は、底層では北東、中層では南西、表層では再び北東という分布になっているが、装置がB点の北東10 mに設置されていることを考慮すると、図-1(2)や図-7(2)にみられる本装置の原理に対応した密度流場に符合しているといえる。計算流速と実測流速の整合は概ね良好であり、本装置による密度流場は静水圧近似の密度流モデルでもかなりの精度で再現できる可能性が認められる。

図-9は、気温・全日射量、風速ベクトル・潮位と装置から30 m離れたトレンチ内の測点Cにおける水温、塩分およびDOの連続観測結果を再現計算結果とともに示したものであるが、8月29日16:00の装置運転開始後にトレンチ内の海水と周辺水の混合が進み、底層DOが上昇しており、実測値と計算値の整合も概ね良好である。

#### (4) 底層貧酸素解消の効果について

装置の本格的な運転の始まる以前の8月21日と約1ヶ月におよぶ断続的な運転を経た10月10日に代表測点において採水分析を行った。この中から無機リンに関する結果を図-10に示すが、他の測点に比べてトレンチ内底層におけるリン酸態リン濃度の減少が著しいことがわかる。これは、トレンチ内外の混合による希釈と底層DOが上昇したことによるリンの溶出抑制の効果である可能性が高い。

トレンチ内代表測点Bと平坦部代表測点Dにおいて底泥を採取し、装置運転前後での硫化物含有量の比較を行った結果を図-11に示す。

平坦部測点Dで硫化物が増加しているにもかかわらず、トレンチ内の測点Bでは減少している。数値の変化

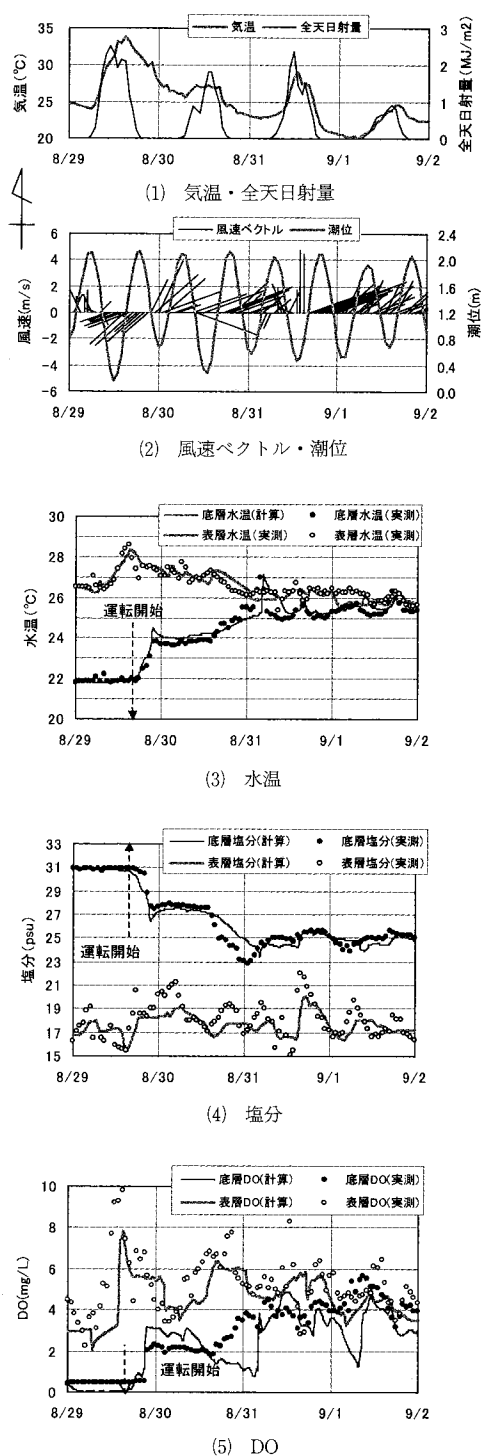
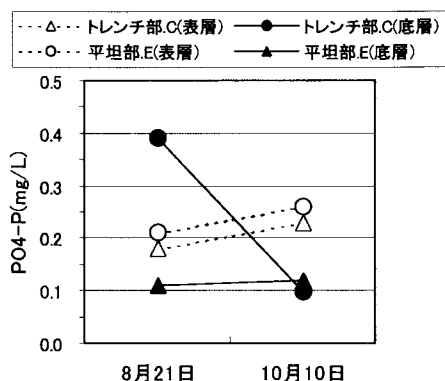
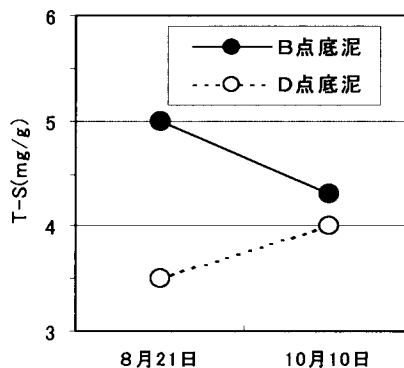


図-9 トレンチ内での水温・塩分・DO

が小さいため、可能性を示唆するにとどまるが、装置の運転によってトレンチ内底泥の嫌気的環境が改善の方向に変化している可能性が高い。



図一10 リン酸態リン濃度の変化



図一11 底泥の硫化物の変化

#### 4. おわりに

密度成層の発達した閉鎖性海域において表層水を海底に送り込む方式の底層貧酸素対策装置について、その効果の実証と再現シミュレーションを行った。

底層に放流された低密度の表層水の湧昇と中層での拡散、これを補う形での周辺水の引き込みによる底層貧酸素の解消という本装置の原理が検証されるとともに数値シミュレーションによって再現された。これによって、本装置の効果を裏付ける実証データが取得されるとともに、対象海域の条件に対応した仕様設計、配置計画に際しての数値シミュレーションの利用に展望が得られた。

地形改変や恒久構造物を伴わない可搬式の装置による水質浄化は、中小規模の海域浄化事業を中心に今後大きな役割を担う可能性を有しており、様々な方式の装置が提案されている。多くの実績データが蓄積され広く評価・認知されることが現時点における課題の一つである。

が、本装置もその役割の一旦を担うべく、さらなるデータの蓄積を進める所存である。

**謝辞：**本報に関する調査研究は社団法人日本海洋開発協会が、五洋建設株式会社、株式会社海洋開発技術研究所、東京製綱繊維ロープ株式会社および芙蓉海洋開発株式会社に委託実施したものであり、平成13年度、平成14年度および平成15年度の新規海洋産業創出研究開発補助事業として日本小型自動車振興会の補助を受けました。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 大内一之・山磨敏夫・小林勝弥・中村 充 (1998): 密度流拡散装置の研究開発, 日本造船学会論文集, 第183巻, pp. 1036-1040.
- 宮岡修二・石垣 衛・辻 博和 (1999): 閉鎖性海域における強制循環による水質改善工事, ヘドロ, 第74巻, pp. 42-46.
- 佐々木 淳・佐賀 宏・磯部雅彦 (1998): 東京湾における富栄養現象の再現計算, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 1036-1040.