

表層水供給装置による港湾海域底層の 環境改善に関する現地実験

A FIELD EXPERIMENTAL STUDY ON ENVIRONMENTAL IMPACT BY
SURFACE WATER SUPPLY TO THE BOTTOM IN A PORT AND HARBOR

遠藤徹¹・水田圭亮²・臼居諒³・田中宏史³・重松孝昌⁴

Toru ENDO, Keisuke MIZUTA, Ryo USUI, Hiroshi TANAKA and Takaaki SHIGEMATSU

¹ 正会員 工博 大阪市立大学大学院助教 工学研究科 (〒 558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

² 工修 パシフィックコンサルタンツ(株) 大阪本社水工技術部 (〒 554-0052 大阪市中央区安土町 2-3-13)

³ 学生会員 工学 大阪市立大学大学院工学研究科 前期博士課程 (〒 558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

⁴ 正会員 工博 大阪市立大学大学院教授 工学研究科 (〒 558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

In ports and harbors, hypoxic or anoxic water has occurred frequently at the sea bottom. In this study, we carried out a field experiment for supplying surface water with oxygen to the bottom of sea by using surface water supplying device. We supplied surface water to the bottom of sea by using the surface water supplying device in the actual sea under hypoxic condition and we measured water quality profiles near the device. In this paper, we examined the improvement effect on sea bottom environment by surface water supplying. Furthermore, we discussed about the flow pattern of water which was supplied to the bottom of sea by conducting numerical calculations.

Key Words : Water surface supply, bottom environment, field study, numerical simulation

1. はじめに

閉鎖性海域の水質劣化は著しく、特に、夏季になると強固な密度成層構造を有する港湾海域では、底層への酸素供給が遮断されるため慢性的な貧酸素状態に陥っている。底層水の貧酸素化は海底に棲息する生物に直接影響を与えるのは勿論のこと、硫化水素やメタンガスが発生するため沿岸域に棲息する生物や人間への悪影響が及ぶこととなる。また、貧酸素化が慢性化すると海底に還元物質が蓄積するため、海水混合が生じ始める秋になっても貧酸素化が解消されなく、港湾海域において慢性的な貧酸素化の改善が重要な課題であるといえる。

このような背景の中、閉鎖性海域の貧酸素化の改善技術として、表層水を底層へ連続供給することによって底層環境の改善を目的とする表層水供給装置¹⁾、底層へマイクロバブルを供給することによって直接酸素供給を行う微細気泡発生装置^{2),3)}、表層水を底層へ送り込むことによって発生する循環流によって鉛直混合を促進し海水の停滞性を改善する流水発生装置⁴⁾、などが開発され、現地実験による改善効果の検討が行われている。著者らは、港湾海域に適用可能な貧酸素化の改善技術として、波浪エネルギーを利用して表層

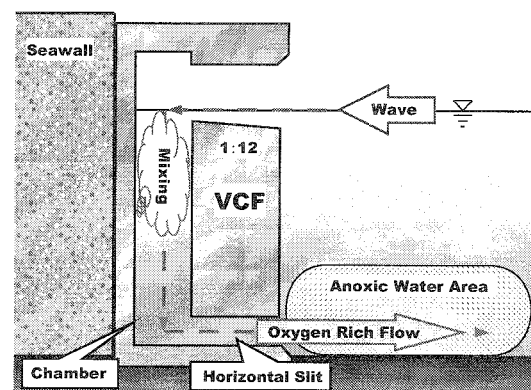


図-1 VCF 堤体による底層への表層水供給メカニズム

水を底層へ供給し海水の鉛直混合を促進する消波堤体⁵⁾ (以下、VCF 堤体) の開発を行っている。

VCF 堤体は、図-1 に示すように、上部通水部、遊水室および下部通水部からなる消波構造物である。上部通水部から遊水室に波が進入することによって遊水室と堤体前面に水位差が発生し、これによって下部通水部から沖向きの流れが誘起される仕組みとなっている。VCF 堤体を鉛直護岸前面に設置することによって、遊水室内で混合された表層水が水底近傍に供給され、貧酸素化構造の要因である密度成層を破壊するとともに、

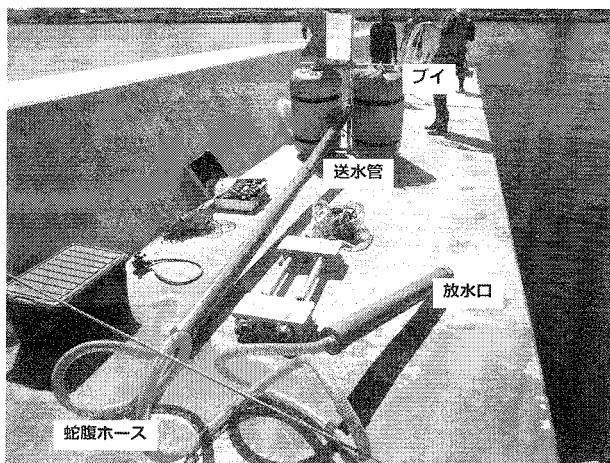


図-2 表層水供給装置

底層域に溶存酸素が供給されて底層環境が改善されることを期待している。これまでに、室内の水理模型実験によって VCF 堤体による表層水供給効果については既に検証している⁶⁾が、実際の海域における溶存酸素濃度の改善効果については検討していない。そこで、本研究では、底層への表層水供給による貧酸素化海域の環境改善効果について検討するため、提案堤体の表層水供給機能を模擬した表層水供給装置を用いて現地実験を実施した。さらに、数値計算を実施して表層水の供給方法について検討した。

2. 表層水供給装置の概要

実海域に鉛直循環流誘起堤体の実機を設置することは経済的に困難であるため、本研究では鉛直循環流誘起堤体の表層水供給機能を模擬した表層水供給装置を製作し、これを用いて底層への表層水供給実験を実施した。表層水供給装置は、(a) 電源となる太陽光発電システム、(b) 表層水取水ポンプ固定用ブイ、(c) 表層水送水ホース、(d) 放水口、によって構成されている (図-2)。太陽光発電システムは、最大出力 175W のソーラーパネル (SUNTECH 社) を 2 枚用いて発電し、充放電コントローラー (Morning Star 社) によってシールドバッテリー (12V, 60Ah, 2 台) への蓄電と取水用水中ポンプへの送電の制御を行っている。表層水取水ポンプ固定用ブイには、ブイを海上に浮かべたときに水中ポンプ (KOSHIN 社 : DC-24V, 3.8A, 50W, 最大吐出力 63.0ℓ/min) が水面下 0.5m の表層水を取水することができるように水中ポンプを取り付けた。表層水送水ホースは、塩ビパイプと蛇腹ホースを用いており、水中ポンプによって取水した表層水を鉛直管に貯水することで水頭差を生じさせ、この水頭差によって表層水が送水ホースを通して海底に設置した放出口から底層へ放出される仕組みとなっている。放水口は、塩ビパイプに 30cm 間隔で直径 4cm の円形の穴を 3 つあけた。

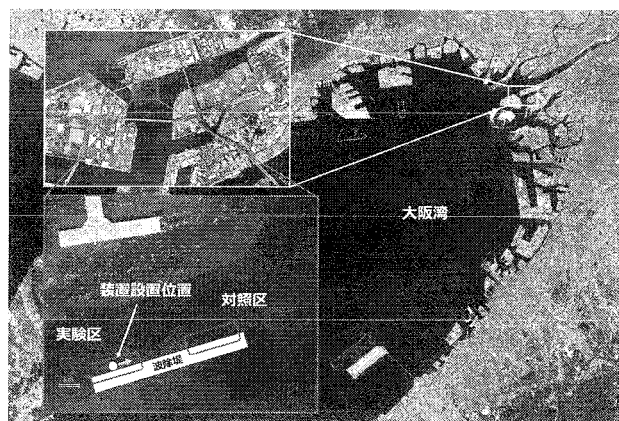


図-3 表層水供給実験の実験地点

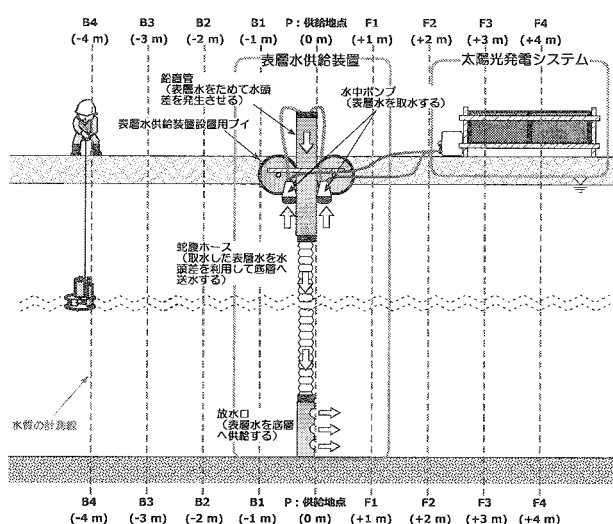


図-4 水質の計測地点

3. 実海域における表層水供給実験

(1) 実験概要

表層水供給実験は、図-3 に示す大阪市漁業協同組合 (大阪市此花区常吉 2 丁目 10-12) の棧橋から約 40m 沖合に位置する常吉波除堤にて実施した。実験は、図-4 に示すように表層水供給装置を設置し、放水口を海底に設置した。実験では、放出口を設置した地点を基準として、表層水放出方向の前後に 1m 間隔で水質の鉛直分布を計測した。水質の計測項目は、Hydrolab MS-5 (環境システム (株)) を用いて溶存酸素濃度を、また、Compact CTD (JFE アレック (株)) を用いて水温・塩分・密度・クロロフィル a の蛍光量・濁度を計測した。表層水供給が底層環境に及ぼす影響について検討するため、表層水供給装置を設置した実験区とは別に表層水供給装置を設置しない対象区を設け、この 2 地点における水質の空間構造について比較検討した。表層水供給装置は、2009 年 9 月 20 日に設置し 9 月 22 日から 10 月 6 日まで稼動したが、天候とバッテリー蓄電容量

の影響により、表層水供給装置稼働中に一連の水質計測が実施できたのは9月26日のみであった。

(2) 実験結果

実験では、装置の表層水供給能力を把握するために放出口の流速を電磁流向流速計(JFEアレック社)を用いて計測した。放出口は0.3m間隔に径が4.0cmの円形の穴が空いており、各放出口から約0.2m/sの流速が確認でき、本システムによる底層へ供給された表層水の流量は45ℓ/minであった。

図-5に、2009年9月29日に計測した、装置が稼働してから1時間後の実験区と対照区の水質の計測結果を示す。水温は実験区および対照区ともに全水深にわたってほぼ均一で水温躍層は確認できなかった。塩分の空間分布によると、実験区、対照区ともに水面下1.5mから2.0mの範囲に塩分躍層が形成されており、塩分成層によって実験海域が密度成層構造を有していることが確認できる。しかしながら、実験区および対照区に密度の空間分布に明瞭な違いは見られず表層水供給装置による影響は確認できなかった。

Chl-aの蛍光量の空間分布によると、放出口近傍の蛍光量の値は表層の植物プランクトンが底層へ供給されたため対照区と比べて高くなっており表層水供給の影響が確認できる。また、実験区の濁度に関して、放出口の極近傍で対象区と比べて高い値を示しており表層水供給により底質が巻き上がったと考えられる影響が確認された。一方で、放出口近傍のDO濃度の値は対照区と比べて若干低い値を示した。これは、海底に堆積していた還元的物質が表層水供給によって巻き上げられたため、水中での酸素消費が生じたためと考えられる。つまり、流量45ℓ/min程度の表層水を貧酸素化した海域の底層に供給しても、影響範囲としては装置近傍に限定され、場合によっては底層水の貧酸素化を助長するという結果であった。しかしながら、還元物質による酸素消費は酸素を供給した初期に発生するため、長期間酸素供給を行うことによって巻き上げによる酸素消費は抑制することが可能であると考えられる。今回の実験では実施できなかったが、今度、本装置の電力システムを改良し長期間表層水を連続供給できるような仕組みを考える必要があるといえる。

4. 密度成層場混合モデル

今後、本装置を運用するに当たって、効果的な放出方法を検討しておく必要がある。そこで、簡易的な密度流体モデルを用いて表層水供給方法について検討した。

(1) 基礎方程式

本研究で用いる数値モデルは、流体密度が水温と塩分のによって時空間的に変化する流体運動を対象としている。流体運動の基礎方程式は、式(1)～(5)に示すよ

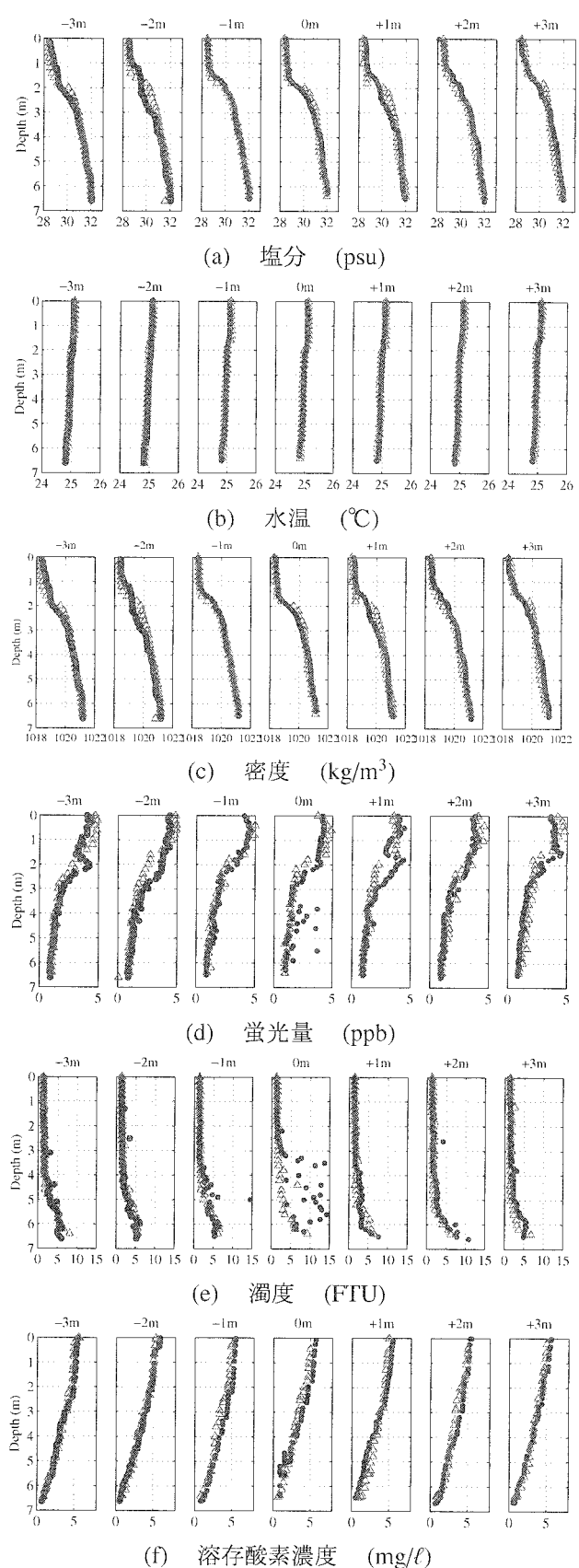


図-5 表層水供給による水質の鉛直分布変化 (●: 実験区, △対照区)

うに、密度変化を考慮した連続の式、Navier-Stokes運動方程式、水温および塩分の輸送方程式であり、流体密度は水温と塩分の間数とした状態方程式⁷⁾によって

求めた.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{1}{3} \frac{\mu}{\rho} \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) - \mathbf{g} \quad (2)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \nabla \cdot (S \mathbf{u}) = \nabla \cdot (D_s \nabla S) \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (T \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) \quad (4)$$

$$\rho = f(S, T) \quad (5)$$

ここで, t は時間, ρ は流体密度, $\mathbf{u}$ は流速ベクトル (u, v), p は圧力, $\mathbf{g}$ は重力加速度, μ は粘性係数, ∇ は $(\partial/\partial x, \partial/\partial y)$, S は塩分, D_s は塩分の拡散係数で本モデルでは塩化ナトリウムの $1.24 \times 10^{-9} (\text{m}^2/\text{s})$ を用いた. また, T は水温, κ は温度拡散率 (m^2/s) であり, 熱伝導率 $\lambda (\text{J/s/m/K})$ と比熱 $c_p (\text{J/kg/K})$ を用いて,

$$\kappa = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (6)$$

で表される. ただし, $c_p = 4.2 \times 10^3$, $\lambda = 0.58$ とした. ここで, 本来ならば拡散係数に渦動粘性係数を用いるべきであるが, 今回のモデルには渦粘性が考慮できていない.

流体密度 $\rho (\text{g/cm}^3)$ は, 少数 3 桁以下の値である σ を用いて以下のような関数として表される.

$$\rho = 1 + 10^{-3} \sigma \quad (7)$$

$$\sigma = -\frac{(T - 3.98)^2 (T + 283.0)}{503.57 (T + 67.26)} + (\sigma_0 + 0.1324) \left\{ 1 - A_i + B_i (\sigma_0 - 0.1324) \right\} \quad (8)$$

ここで, A_i および B_i は係数であり次式であたえられる.

$$A_i = T(4.7869 - 0.098185T + 0.0010843T^2) \times 10^{-3} \quad (9)$$

$$B_i = T(18.030 - 0.8164T + 0.01667T^2) \times 10^{-6} \quad (10)$$

また, σ_0 は水温が 0°C の時の σ で,

$$\sigma_0 = -0.069 + 1.4708Cl - 0.00157Cl^2 + 0.0000389Cl^3 \quad (11)$$

である. ここで, Cl は塩化物イオン濃度で, Knudsen が海水中に存在する主要成分イオンは一定の比で存在するという仮定の下に提案した以下の関係式を用いて求めた.

$$Cl = \frac{S - 0.00305}{1.805} \quad (12)$$

(2) 基礎方程式の解法

川崎ら⁸⁾は, 固気液多相共存場に対する数値解法を構築し, 様々な水理現象に適用してその妥当性について

確認している. 本数値解析では, 川崎らのアルゴリズムを参考にして, 基礎方程式 (1) から式 (4) を以下のように移流項と非移流項に分離し, 各物理量の移流計算をした後で, 移流後の値を用いて非移流項の計算をする部分段階法を用いた.

[移流段階]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{u}^n \cdot \nabla \rho^n = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u}^n \cdot \nabla \mathbf{u}^n = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \mathbf{u}^n \cdot \nabla S^n = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u}^n \cdot \nabla T^n = 0 \quad (16)$$

[非移流段階]

$$\frac{\rho^{n+1} - \rho^*}{\Delta t} = -\rho^* \nabla \cdot \mathbf{u}^{n+1} \quad (17)$$

$$\frac{\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^*}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho^*} \nabla p^{n+1} + \mathbf{F}^* \quad (18)$$

$$\frac{S^{n+1} - S^*}{\Delta t} = -S^* \nabla \cdot \mathbf{u}^* + \nabla \cdot (D_s \nabla S^*) \quad (19)$$

$$\frac{T^{n+1} - T^*}{\Delta t} = -T^* \nabla \cdot \mathbf{u}^* + \nabla \cdot (\kappa \nabla T^*) \quad (20)$$

ここで, Δt は時間間隔, $\mathbf{F}$ は NS 方程式右辺の圧力勾配項以外の外力ベクトルである. 上付きの n , $*$, $n+1$ はそれぞれ計算段階の物理量を表しており, n は $n\Delta t$ の時, $*$ は移流計算後, $n+1$ は $(n+1)\Delta t$ の時の物理量である. 移流段階の計算には, 移流計算には風上差分や中心差分と比べて計算精度が良いとされている CIP 法⁹⁾を用いた. しかしながら, CIP 法では界面などの濃度勾配が大きくなる場合にはアンダーシュート, オーバーシュートが生じる. 本研究では, 密度成層場に表層水を供給する現象を扱うため, 放出口近傍ではアンダーシュートおよびオーバーシュートに起因する流体場の不安定が発生する. そこで, CIP 法の中でもアンダーシュート, オーバーシュートを防ぐ有理関数 CIP 法¹⁰⁾を用いた.

続いて, 非移流段階の式 (18) は, 移流段階で求めた物理量を用いて SMAC 法の手順で計算した. 非移流段階の水温および塩分の方程式の左辺第 1 項は, 保存性を考慮した場合に現れる速度勾配項である. また, 塩分および水温の非移流段階の式 (19) および式 (20) の計算には, 中心差分法を用いた.

式 (18) には, 1 つの方程式中に 2 つの未知数が存在するためこのままでは解を求めることができない. そこで, 一時的に圧力勾配項を p^n を用いて仮の流速 $\mathbf{u}'$ を求める.

$$\frac{\mathbf{u}' - \mathbf{u}^*}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho^*} \nabla p^n + \mathbf{F}^* \quad (21)$$

式 (18) から式 (21) を差し引くと,

$$\frac{\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}'}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho^*} \nabla \cdot \Delta p \quad (22)$$

を得る。ただし、

$$\Delta p = p^{n+1} - p^n \quad (23)$$

である。ここで、式(22)の発散を取り、質量保存式(17)を用いて u^{n+1} の項を消去すると以下に示すように Δp に関する Poisson 方程式が得られる。

$$\nabla^2 \delta p = \frac{\rho^*}{\Delta t} \nabla u' + \frac{\rho^{n+1} - \rho^*}{\Delta t^2} \quad (24)$$

式(24)から得られた Δp を用いて、NS 方程式の解を求めることができる。なお、Poisson 方程式の解法には SOR 法を用いた。次のタイムステップの p^{n+1} 、 u^{n+1} は式(23)と式(22)より、

$$p^{n+1} = p^n + \Delta p \quad (25)$$

$$u^{n+1} = u' - \frac{1}{\rho^*} \nabla \cdot \Delta p \Delta t \quad (26)$$

である。

(3) 交換密度流の再現計算

赤堀らは、密度流数値計算モデルの構築を目的として、交換密度流の実験と再現計算を実施している¹¹⁾。本数値モデルの妥当性を確認するために、赤堀ら¹¹⁾が実施した交換密度流の実験を参考にして同条件の交換密度流の再現計算を実施した。計算条件は、図-6の $t = 0.0(s)$ に示すように、計算領域を水平長さ1.0m、水深を0.155mとし、初期条件として、水槽の左半分の領域の流体密度を1030kg/m³、右半分の領域の流体密度を1000kg/m³とした。境界条件は、左端と右端の壁面および水面は free-slip 条件とし、底面は no-slip 条件を課した。図-6に、計算結果を示す。時間の経過とともに高密度水塊は密度フロントを形成しながら右方向へと移動し、界面で生じた渦によって密度の拡散が生じていることが確認できる。参考として、赤堀らが実験結果と比較して再現性を確認した密度流数値計算モデルの計算例を図-7に示す。ただし、本数値モデルによる計算結果と水平軸が左右対象となっている。赤堀らの結果と比較した結果、本数値モデルによって交換密度流が良好に再現できており、本モデルの妥当性が確認できた。

5. 底層への表層水供給の混合計算

(1) 計算概要

現地観測で実施した海域を対象として混合計算を実施した。計算領域は、水平方向に8m、鉛直方向に7mとした。初期条件として、水温は25℃の一定とし、塩分は上層を28psu、下層を32psuとして水面下1.5mから2.0mに躍相を有するように設定した。左端と右端は開境界条件として、Neumann 境界条件を課し、上端は free-slip 条件を、下端は no-slip 条件を課した。

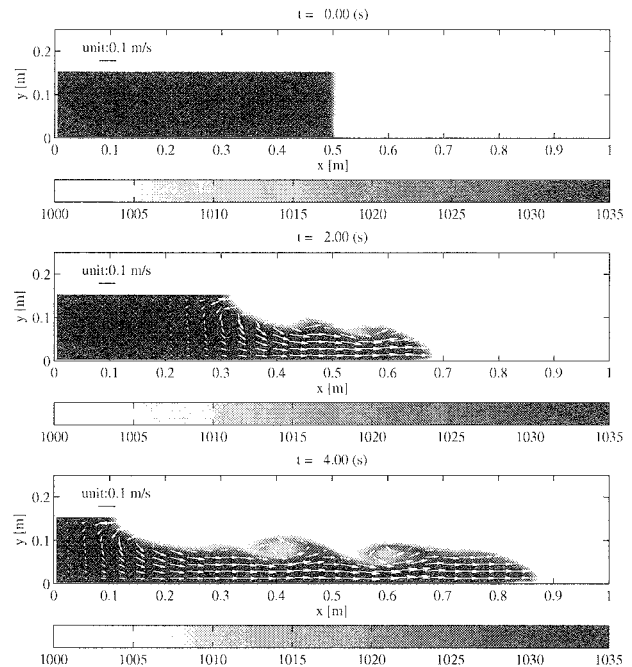


図-6 交換密度流の再現計算

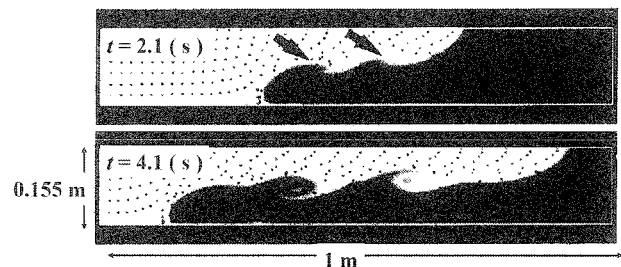


図-7 赤堀ら¹¹⁾が実施した交換密度流の計算結果

(2) 計算結果

図-8(a)に、現地実験を対象として再現した塩分の混合計算の結果を示す。ここで、底層から供給した流速は $u=0.2(m/s)$ である。図-8(a)によると、放出口から右方向へ放出された表層水は、放出口近傍では水平方向へと供給されているが、放出口から0.5mの辺りから浮力の影響によって上昇していることが確認できる。そのため、放出口から0.5mの範囲にまでしか表層供給による影響は見られず、現地実験の結果と同様の結果であった。続いて、図-8(b)に、流速を現状よりも2倍にした計算結果を示す。流速を2倍にすると、放出口から水平方向に放出された表層水は、放出口から約2.0mの地点まで達し、その後浮力の影響によって上昇した。

そこで、底層へ供給する表層水の流量と流速を変化させて計算を実施した。図-9に表層水の供給流量 q と水平方向の到達距離 L の関係を示す。流量 q が $0.02m^2/s$ 以下では、到達距離 L は流量によって決まるが、 q が $0.04m^2/s$ の時を見てみると、同じ流量でも流速によって到達距離が2倍程度大きくなることが分かる。このことから、表送水供給による表層水の到達距離は流量のみでなく流速によっても変化するため、効果的に表層

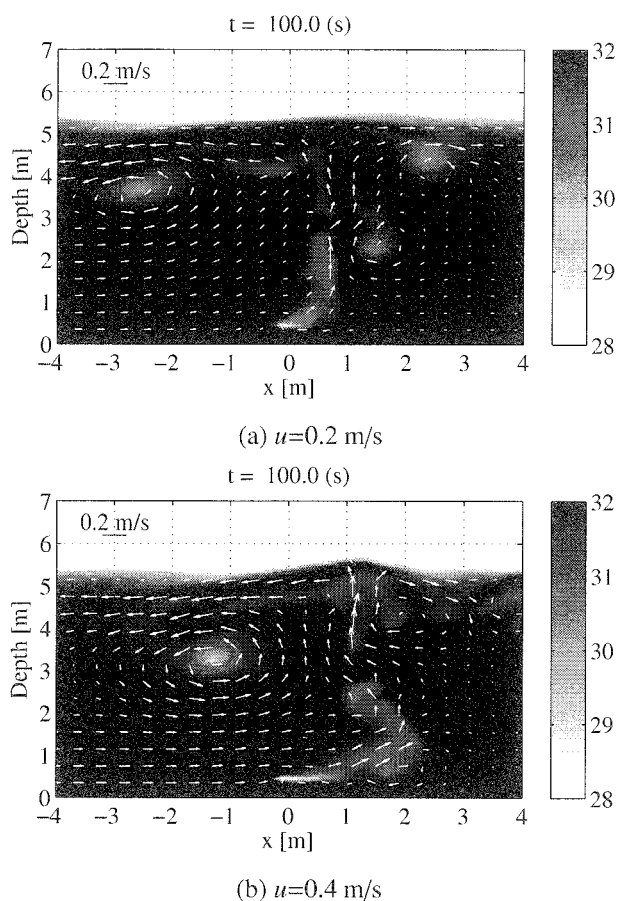


図-8 混合計算の結果

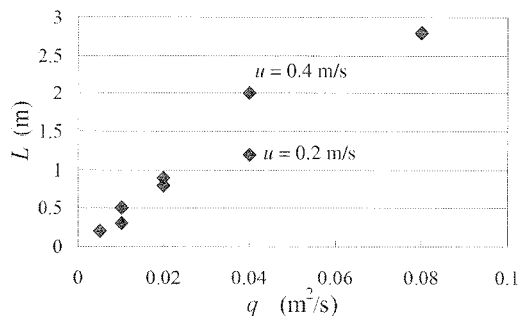


図-9 表層水供給流量と水平到達距離の関係

水を底層へ供給するためには、流量のみでなく流速に関しても供給方法を検討する必要があると考えられる。

6. 結論

底層への表層水供給による環境改善効果を検討するため、太陽光エネルギーを利用した表層水供給装置を用いて現地実験を実施した結果、本装置の表層水供給能力は最大で 45.0ℓ/min 程度であり、本装置の供給能力

による海水混合範囲は放出口のごく近傍に限定され、また、貧酸素化した海域の底層に表送水を供給した直後は底質の巻き上がりによって底層水の貧酸素化を助長する結果に至った。このため、還元物質の巻き上げを考慮して表層水の連続供給を実施して、長期的なモニタリングを検討する必要がある。さらに、供給する表層水の流量を変化させて表層水の水平方向の到達距離の関係について検討したところ、到達距離は流量のみによって決まるのではなく、流速によっても変化することがわかった。

謝辞：本研究は、科学技術振興機構シーズ発掘試験研究(A)(課題番号:11-013, 代表者:遠藤 徹), および、日本学術振興会科学研究費基盤研究(B)(課題番号:20360263, 代表者:中尾正喜)の補助を受けた。また、現地実験を実施するにあたり大阪市漁業協同組合の関係者の方々に多大なるご協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 小松利光・井上徹教・長谷部崇・西本誠・藤田和夫・井芹寧・中島信一：表層水底層連続供給による水質底泥改善技術，海岸工学論文集，第 47 巻，pp. 1156-1160, 2000.
- 2) 大野嘉典・五明美智男・磯部雅彦・田中陽二・鯉淵幸生：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，海洋開発論文集，第 23 巻，pp. 727-732, 2007.
- 3) 武田真典・佐々木淳・三上信雄・佐々木洋之・足立有平・熊田康邦：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，海洋開発論文集，第 23 巻，pp. 733-738, 2007.
- 4) 金山進・中瀬浩太・角屋浩二・小谷拓：流水発生装置による閉鎖性水域の密度成層および底層海水停滞の緩和に関する現地実験，海洋開発論文集，第 23 巻，pp. 751-756, 2007.
- 5) 重松孝昌・池田憲造・小田一紀・藤田孝(2002)：底質環境の改善を目的とした鉛直循環流誘起堤体の開発，海岸工学論文集，第 49 巻，土木学会，pp.791-795.
- 6) Endo, T. and Shigematsu, T.: Numerical and experimental study of new breakwater promoting vertical circulation flow, *International Conference on Coastal Engineering*, Vol.5, pp. 4779-4791, 2006.
- 7) 有田正光編著：水圏の環境，東京電機大学出版局，1998.
- 8) 川崎浩司・大谷智樹・中辻啓二：固気液多相共存場に対する統一数値解法の構築と複雑水理現象への応用，第 48 巻，海岸工学論文集，pp. 1026-1030, 2001.
- 9) 矢部孝・肖鋒：固体・液体・気体の統一解法と CIP 法(1)，(解説) 数値流体力学，第 7 巻，第 2 号，pp. 70-81, 1999.
- 10) Xiaoa, F., Yabe, T. and Ito, T.: Constructing oscillation preventing scheme for advection equation by rational function, *Computer Physics Communications*, Vol. 93, pp. 1-12, 1996.
- 11) 赤堀良介・清水康行・中山卓：鉛直方向に密度境界面を持つ流体の混合に関する数値計算，水工学論文集，第 43 巻，pp. 521-526, 1999.