

海洋モデルを用いた噴流が密度成層場に及ぼす影響に関する研究

A NUMERICAL STUDY ON EFFECT OF JET ON DENSITY STRATIFICATION BY THE REGIONAL OCEAN MODELING SYSTEM

河海工学分野 松家 弘道

閉鎖性内湾湾奥部の密度成層の緩和策として、底層へ浮力噴流を放水して鉛直混合を促進する技術が提案されている。海洋モデルを用いた予測によって影響は湾スケールに及ぶと報告されたが、浮力噴流の放水口近傍の挙動に対して検討されてこなかった。本研究では、海洋モデルを用いて、既往の水理実験の再現計算を行い比較し、密度成層場に放水された浮力噴流に対する海洋モデルの有用性を検討する。さらに、閉鎖性港湾海域を想定し、密度界面近くに放水された浮力噴流が密度分布に及ぼす影響予測を行った。

As a mitigation for density stratification in a closed-off section of enclosed inner bay, vertical mixing accelerated technology which uses buoyancy jet released to the bottom layer was proposed. The prediction using by the the regional ocean modeling system(ROMS) reported that the influence affects to a bay scale. However, the behavior near the discharge of the buoyancy jet has not been considered. In this study, the reproduction calculation was executed the past hydraulic model experiment by using ROMS. Comparing its result to the experiment, usefulness of ROMS was considered with regards to the buoyancy jet on density stratification. In addition, assuming the enclosed harbor sea, the impact of the buoyancy jet released near density interface on density profiles was simulated.

1 研究背景・目的

底生生物を死滅させ、風や潮汐変動などの影響を受けて広範囲に渡って影響を及ぼすことから、閉鎖性内湾における底層の貧酸素水塊は環境問題となっている¹⁾。特に、港湾海域の底層の貧酸素化は深刻化しており、密度成層の発達の原因として挙げられる。改善策として底層へ浮力噴流を放水して鉛直混合を促進する技術が提案され²⁾、影響予測では浮力噴流の影響は湾スケールに及ぼすと報告されている³⁾。その影響予測³⁾では、鉛直方向に静水圧近似を仮定した海洋モデルを用い、放水地点を含む沿岸域から湾への流れを考慮し検討したが、浮力噴流の放水口近傍の挙動や噴流によってもたらされる密度成層への影響は考慮されなかった。

そこで、本研究では、既往の水理実験⁴⁾の再現計算を海洋モデルを用いて行い、結果を比較することで、密度成層場に放水された浮力噴流の予測に対する海洋モデルの有用性を検討する。加えて、密度成層の発達で底層の貧酸素化が問題となっている大阪湾港湾海域の堺浜をモデルにし、密度界面近くで放水された浮力噴流が密度分布に及ぼす影響を予測する。

2 数値解析で用いる海洋モデルの解説

用いる海洋モデル ROMS_AGRIF は、ブジネスク近似を仮定しており、鉛直座標系に座標を用いて自由表面に対応している。支配方程式は、運動方程式、静水圧平衡の式、連続の式、状態方程式、移流拡散方程式から成る準3次元モデルである⁵⁾。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla u - fv \quad (1)$$

$$= -\frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial z}(\overline{u'w'} - \nu \frac{\partial u}{\partial z}) + F_x + D_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla v + fu \quad (2)$$

$$= -\frac{\partial \phi}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z}(\overline{v'w'} - \nu \frac{\partial v}{\partial z}) + F_y + D_y$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{-\rho g}{\rho_0} \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

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

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T = -\frac{\partial}{\partial z}(\overline{T'w'} - \nu_\theta \frac{\partial T}{\partial z}) + F_T + D_T \quad (6)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla S = -\frac{\partial}{\partial z} (\overline{S'w'} - \nu_0 \frac{\partial S}{\partial z}) + F_S + D_S \quad (7)$$

ここで \vec{v} は流速ベクトル, u, v は x, y 方向の流速成分, t は時間, f はコリオリパラメータ (本研究では無視), ϕ は動圧 ($\frac{P}{\rho_0}$), F_x, F_y は x, y 方向の外力項, D_x, D_y は x, y 方向の分子粘性項と渦粘性項の総和, ρ は密度異常 (流体密度とブジネスク近似流体密度の差), ρ_0 はブジネスク近似流体の基準密度, g は重力加速度, T は温位, S は塩分, F_T, F_S はそれぞれ温位, 塩分の流入/流出項, D_T, D_S は温位, 塩分に対する拡散項と渦拡散項の総和を表す. また, “ $\bar{\quad}$ ” は空間平均, “ $'$ ” は空間平均からの変動成分を表す.

空間の離散化にはスタッガード格子を, 乱流モデルとして水平方向にスマゴリンスキーモデルを, 鉛直方向に Mellor-Yamada 2.5 Level モデルを用いる. 側方境界条件として, 自由表面と鉛直積分流速には長波近似を, 3 次元流速及びスカラー変数には Orlandi 放射条件を課している. 鉛直境界条件として, 底面に no-slip 壁面条件を課した.

3 海洋モデルを用いた既往の水理実験との比較

3.1 計算目的及び計算条件

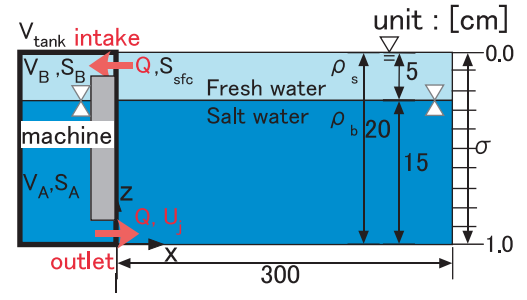
既往の水理実験⁴⁾では水槽内に密度成層場を形成し, 鉛直循環装置を介して, 表層水を底層に放流することによって鉛直 2 次元的な浮力噴流を発生させ, LIF 法を用いた画像解析によって噴流の挙動を評価している.

計算条件の概要を図-1 に示す. 鉛直循環装置は水槽の左側面に設定している. 計算領域は水平格子サイズ Δx を 2 cm, Δy を 1cm, 鉛直格子は等間隔で 10 で離散化し, 原点を同図 (b) の下側境界に接する放水地点の底面とした. ここに, 水深は 20.0cm, 水路幅は 20.0cm, 淡水である表層厚は 5.0cm, 塩水である底層厚は 15.0cm, 表層水密度は 0.9999g/cm³, 底層水密度は 1.0077g/cm³, 放水流速は 6.8 cm/s である. 2 次元的な浮力噴流の挙動を再現するため, 水槽左側面に対し取水口・放水口を最上層・最下層格子に水路幅方向全てに設置した. 水路の側面及び底面は no-slip 条件とした.

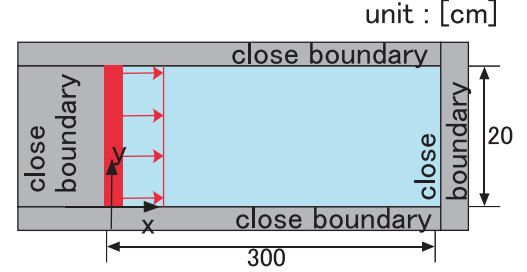
放水条件を記す. 放水による計算直後の計算の発散を防ぐため, 放水流量 Q には次式の tanh 関数を用いた.

$$Q = Q \times \tanh\left(\frac{t}{2}\pi\right) \quad (8)$$

ここに, t は底層水放水後の経過時刻である. 水理実験では鉛直循環装置内の密度の鉛直分布は初め水槽内と同じであり, したがって, 装置内の流体は表層水塩分



(a) 側面図



(b) 平面図

図-1 計算領域の概要

S_s を持つ流体 A ($=0\text{psu}$) と底層水塩分 S_b ($=10\text{psu}$) を持つ流体 B に分けられる. 装置の体積 V_{tank} ($=180\text{cm}^3$) から, 初期における流体 A , 流体 B の体積 V_A, V_B は 108, 72 cm^3 である. 流体 A が全て水槽に放水される時間は式 (8) を時間積分して 4.4 秒後と求められる. 4.4 秒後以降, 流体 B が放水される. 4.4 秒までに V_B は増加し, 流体 B は取水した表層水と混合する. 本研究では, 表層水と混合した流体 B は装置内で均一に混合するものと仮定し, 流体 B の塩分 S_B を 4.4 秒後までは式 (9) で, 以降は式 (10) で算出する.

$$S_B^{new} = \frac{(V_B^{old} - Q\Delta t)S_B^{new} + (Q\Delta t)S_{sfc}}{V_B^{old} + Q\Delta t} \quad (9)$$

$$V_B^{new} = V_B^{old} + Q\Delta t$$

$$S_B^{new} = \frac{(V_{tank} - Q\Delta t)S_B^{old} + (Q\Delta t)S_{sfc}}{V_{tank}} \quad (10)$$

ここに, S_B^{new}, S_B^{old} は現時刻, 前時刻での流体 B 塩分, Q は放水流量, Δt は刻み時間幅, S_{sfc} は取水塩分である.

3.2 計算結果と考察

図-2 は放水地点から 2, 10, 20, 30 cm 地点での各計測深度の密度混合率の時間変化であり, 上は実験結果, 下は計算結果である. 縦軸は流体密度を領域内の平均値 ρ_m で除した値, 横軸は放水後からの経過時間, 凡例は深度 z を底面からの高さ H で除した値であり, 0 が水底, 1 が水面を表す. 実験結果における z/H と比較するため, 計算結果では最も近い計測地点を選定した. なお, ρ/ρ_m は 1.0 に近づくほど流体が混合されていることを意味する. 同図 (a) の計算結果の ρ/ρ_m は約 20 秒後で収束し, 各深度で値は 0.998-1.000 であ

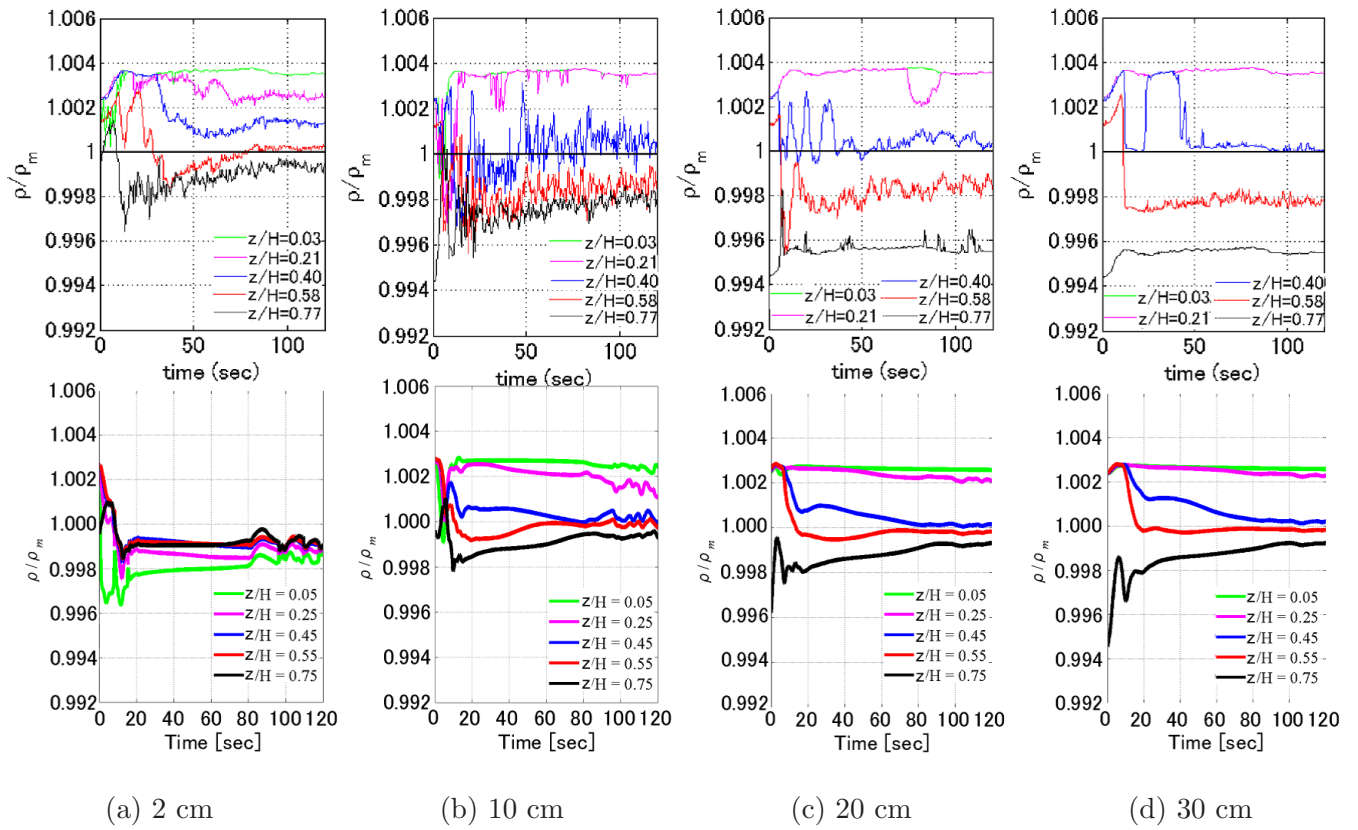


図-2 計測地点の各深度での密度混合率の経時変化 (上) 実験結果 (下) 計算結果

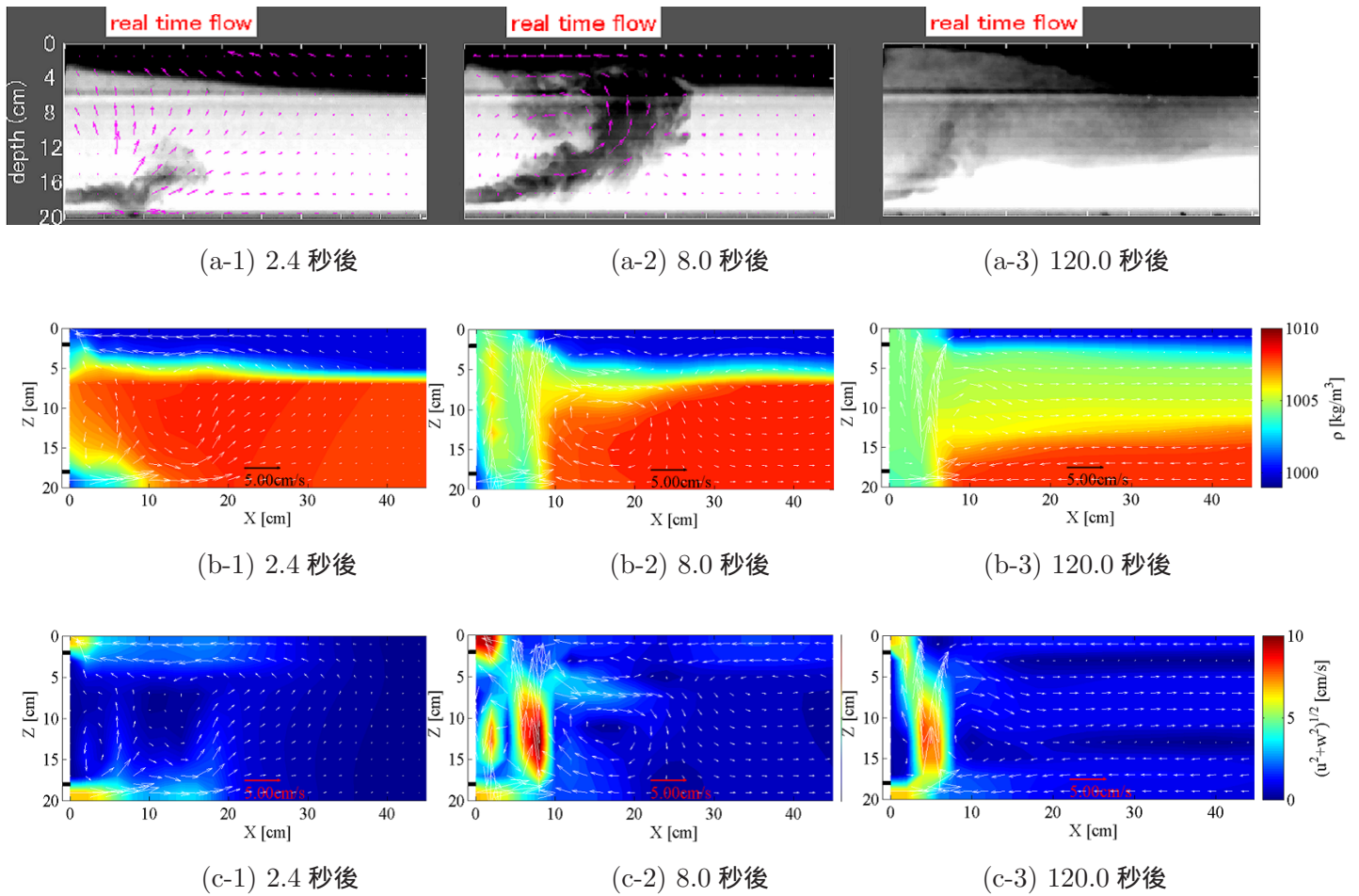


図-3 浮力噴流放水後の流速・密度の鉛直断面図の比較 (a) 実験結果 (b),(c) 計算結果

る．この挙動は放水口近傍の流体が鉛直方向で混合されていることを意味し、実験結果とは異なる挙動である．(b),(c),(d) の計算結果の ρ/ρ_m は約 20 秒後各深度で値が安定する．その後の ρ/ρ_m は、 $y/H = 0.45$ では減少し、 $y/H = 0.55$ では横ばい、 $y/H = 0.75$ では増加し、それぞれ 1.000 の値に収束していくのが見て取れる．これは計算では表層と中層にある水塊がより希釈・混合していることを意味する． $y/H = 0.05$ では 1.002 前後で横ばいであり、 $y/H = 0.25$ では放水口に近い (b) ほど減少している．これより、放水口から離れた地点以降に関して、実験結果を概ね定量的・定性的に再現出来ている．

図-3 は放水後からの経過時間 2.4, 8.0, 120.0 秒における放水縦断方向の鉛直断面図である．各経過時間は、放水直後、密度界面に到達時、実験で現象が定常化したときである．同図の縦軸は深度、横軸は放水地点からの距離、ベクトルは流速 (u, w) の合成流速 [cm/s] であり、(a) は実験結果、(b)(c) は計算結果である (ただし、(a-3) のベクトルは未検出)．(a) のカラーは黒いほど密度が小さく、白いほど密度が大きいことを示す．(b) のカラーバーは密度を示しており、(c) のカラーバーは x, y 流速の絶対値を示す．放水直後 (2.4 秒後) の流速分布と密度界面高さの鉛直断面図は再現できているのが見て取れる．密度界面に到達する時 (8.0 秒後) の流速・密度分布は計算結果と異なる (c-2) を見ると流速の絶対値が 10cm で浮上しているのが見て取れ、(b-2) と併せてみると浮力の効果で浮力噴流の浮上しているのが見て取れる．定常状態 (120.0 秒後) の密度分布は、(a-3) と図-2-(d) より、定性的に再現出来ているのが見て取れる．

以上より、海洋モデルでは放水直後の放水口近傍の浮力噴流の挙動は浮力の影響で考慮できないが、放水口から離れた水域の密度分布を再現できることが明らかとなった．

4 密度界面近くで放水された噴流が密度成層場へ及ぼす影響

4.1 想定領域の選定及び計算目的・計算条件

密度成層の発達により底層水が貧酸素化した海域を想定して、密度成層場で浮力噴流が及ぼす影響を予測する．本研究では、大内ら⁶⁾の密度流拡散装置に着目した．表層水と底層水の混合水を密度界面で水平放水することで鉛直混合を促進させる技術であり、現地実験によって効果が検証されている⁷⁾．計算領域は、底層の貧酸素化が深刻化している大阪湾港湾海域の堺浜 (図-4) をモデルに設定した．堺浜は閉鎖性の強い汽水域であり、潮汐の影響で密度界面高さが一日で上下に変動することが考えられ、固定される密度流拡散装置



図-4 計算対象領域とする堺浜の位置

の放水口高さとの関係性が変化して噴流の挙動が変化すると考えられる．

そこで、放水口高さが (i) 密度界面、(ii) 密度界面上部、(iii) 密度界面下部の場合を想定し、密度成層場において噴流が密度分布に及ぼす影響を予測する．現地観測結果⁸⁾を基に図-5のように設定した．閉鎖性領域として水平スケール 500m × 500m、水深 10m の一様底面とし、水平格子サイズ $\Delta x, \Delta y$ を 5m、鉛直格子を座標で 10 分割、水面下 1m を表層、底面から 6m を底層、間の水塊 3m を中層とし、表層と底層の塩分 T_s, T_b を 19.9, 31.2psu、水温 S_s, S_b を 26.0, 20.7、密度 ρ_s, ρ_b を 1011.6, 1021.6kg/m³ と設定した．また、放水口高さ d を 5, 6, 7m とした．密度流拡散装置の機能を参考に⁹⁾、放水速度を 0.5m/s、放水流量を 2.5m³/s とし放水口から +x 方向に 6 時間放水した．領域の原点は放水地点での底面 0.0m とし、中層は線形補間で求めた．放水流体の密度は表層と底層にある取水口での流体密度の平均値を用いた．

4.2 計算結果

図-6 は各放水条件における計算初期及び 6 時間後の放水縦断方向の密度の鉛直断面図であり、縦軸は深度、横軸は放水地点からの距離、カラーバーは密度 [kg/m³] を示す．同図より、6 時間後、密度界面の水底からの高さは、密度界面に放水時は 5m、上部に放水時は 4m、下部に放水時は 6m である．すなわち、放水によって密度界面近くにあった底層水が酸素供給されやすい環境になったことを意味し、500m × 500m の閉鎖性水域より広域にも影響を及ぼすことを示唆している．

図-7 は各放水条件における座標 $(x, y) = (500, 0)$ での密度の時間変化であり、横軸は経過時間、縦軸は密度、凡例の値は深度を示す．同図は密度界面の高さと密度の変化を表しており、密度界面放水時は深度 2.5 ~ 4.5m で減少して横ばい、上部に放水時は深度 2.5 ~ 5.5m で減少し続け、下部に放水時は深度 9.5m で上昇している．

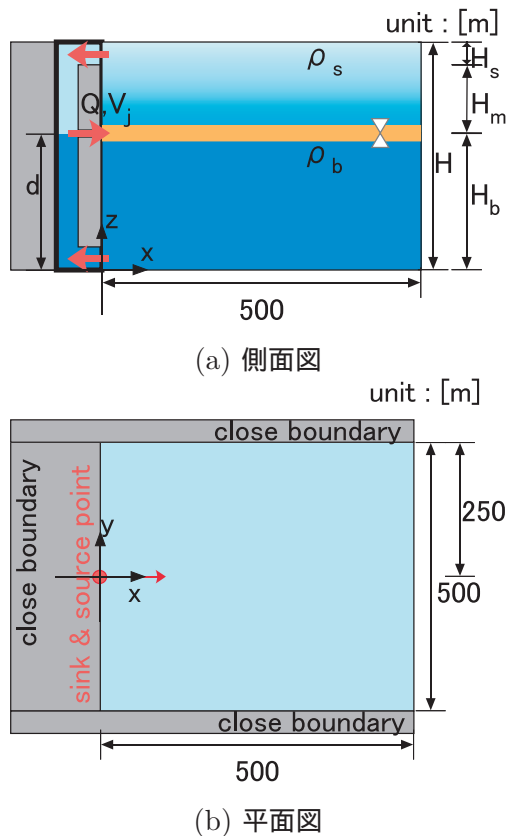


図-5 計算領域と放水条件の概要

図-8 は座標 $(x,y) = (250, 0)$ での深度毎の x 流速の時間変化であり、縦軸は x 流速、横軸は放水後からの経過時間、凡例の値は深度を示す。同図より、時間経過で最大 x 流速をとる深度は変化し、密度界面に放水時は深度 4.5m から 5.5m、上部及び下部に放水時は深度 4.5m から 6.5m である。下部に放水時については x 流速が深度方向で不連続かつ不安定であり、得られた結果は期待できない。

図-9 は、密度界面上部に放水時、座標 $(x,y) = (250, \pm 75)$ での深度毎の x,y 流速の時間変化であり、縦軸は $x(y)$ 流速、横軸は放水後からの経過時間、凡例の値は深度を示す。同図より、密度界面高さで流速が発達しており、 y 座標 $(250, \pm 75)$ で x 流速は同傾向、 y 流速は正負逆転した値を取っており、 $x=0$ を軸とする線対称な流れが見て取れる。すなわち、密度界面に沿って放水及び放水直角方向に発達する内部波が発達し、その影響で密度界面の低下を招いていると考えられる。

5 結論

本研究の結論を以下にまとめる。

- 海洋モデルでは放水直後の放水口近傍の浮力噴流の挙動は浮力の影響で考慮できないが、放水口から離れた水域において密度分布を再現できることが明らかとなった。
- 密度界面近くで放水された噴流が密度分布に及ぼ

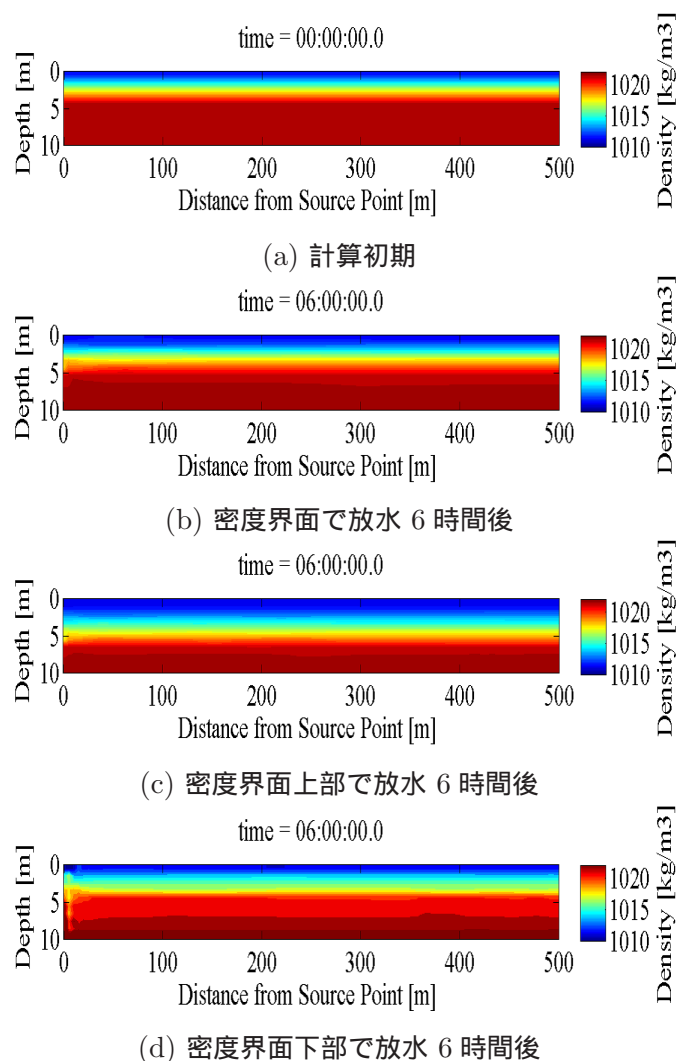
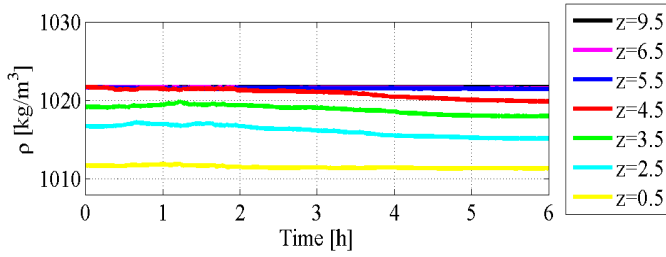


図-6 放水縦断方向の密度の鉛直断面図

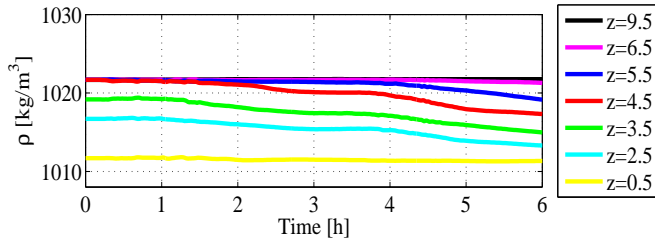
す影響を予測した結果、密度界面またはその上部放水時において、密度界面高さが低下する。それはより下方の水塊に対し酸素供給されやすい環境を形成したことを意味し、500m x 500m の閉鎖性水域より広域にも影響を及ぼすことが示唆された。密度界面高さが低下する原因として内部波の発達が確認でき、内部波は放水方向及び放水直角方向に密度界面に沿って流れることがわかった。

参考文献

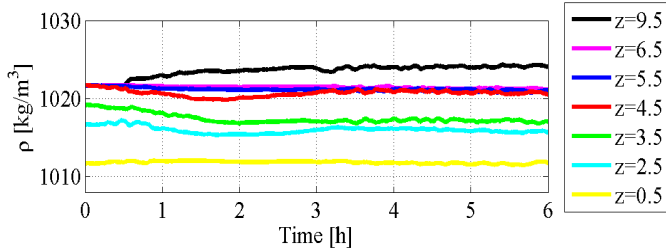
- 柳 哲雄 (2004) : 貧酸素水塊の生成・維持・変動・消滅機構と化学・生物的影響, 日本海洋学会, vol.13, pp.451-460.
- 森 信人・佐地泰昭・中尾正喜・石川貴司・重松孝昌・矢持 進 (2008) : 数値シミュレーションを用いた大阪湾への都市排熱放出の影響評価, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp.1346-1350.
- 重松孝昌・前川雅俊・中尾正喜・矢持 進 (2012) : 双方向ネスティングを導入した海洋モデルによる閉鎖性海域への都市排熱が水温に及ぼす影響に関する研究, 海岸工学論文集, Vol.68, No.2, pp.1146-1150.
- 古城鉄也 (2011) : 表層水を底層供給した場合の画像解



(a) 密度界面で放水 $(x,y) = (500,0)$



(b) 密度界面上部で放水 $(x,y) = (500,0)$

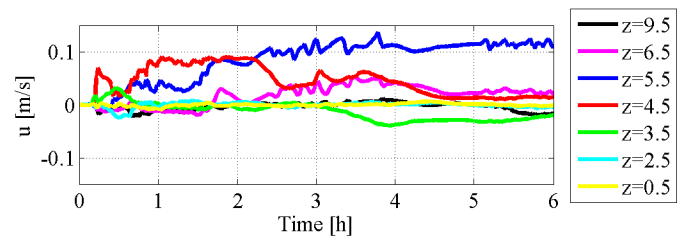


(c) 密度界面下部で放水 $(x,y) = (500,0)$

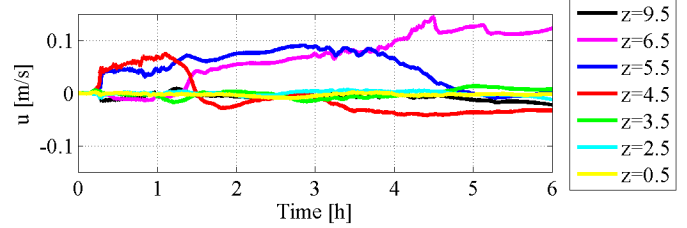
図-7 各放水条件における密度の時間変化

析手法を用いた密度成層場の混合評価に関する基礎的研究, 大阪市立大学卒業論文, Vol. 51, pp. 50-53.

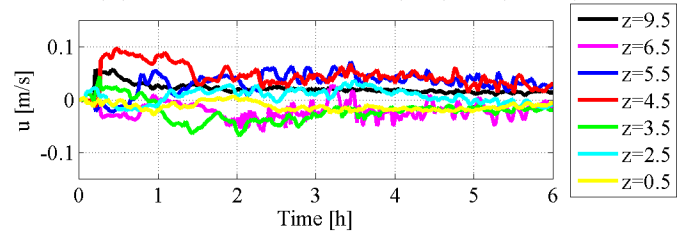
- 5) Alexander F.Shchepetkin and James C.McWilliams (2005): The regional oceanic modeling system (ROMS) : split-explicit free-surface, topography-following-coordinate oceanic model ,Ocean Modeling 9 , pp . 347 404.
- 6) 大内一之・山磨敏夫・小林勝弥・中村 充 (1998) : 密度流拡散装置の研究開発, 日本造船学会論文集, No. 183 , pp.281-289.
- 7) 大塚耕司・中谷直樹・大内一之・粟島裕治・山磨 敏夫 (2007) 五ヶ所湾における密度流拡散装置の環境修復効果, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 6 , pp.57-63.
- 8) 神戸港湾空港技術調査事務所 (2013) : 大阪湾水質定点自動観測システム 観測のあらまし, 2010.4~2011.9.
- 9) ナカシマプロペラ株式会社
: <http://www.nakashima.co.jp/>



(a) 密度界面で放水 $(x,y) = (250,0)$

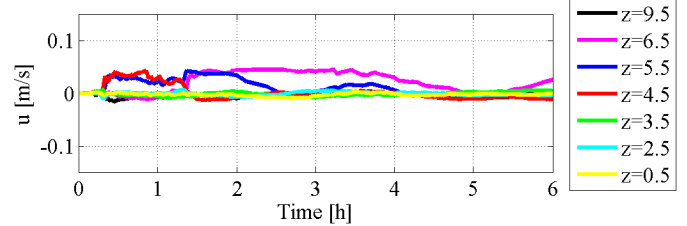


(b) 密度界面上部で放水 $(x,y) = (250,0)$

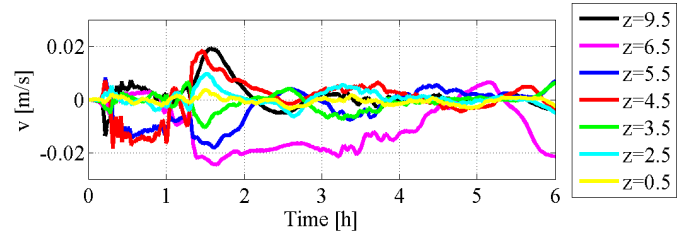


(c) 密度界面下部で放水 $(x,y) = (250,0)$

図-8 各計測深度での x 流速の時間変化



(a) 計測地点 $(x,y) = (250, 75)$



(b) 計測地点 $(x,y) = (250,-75)$

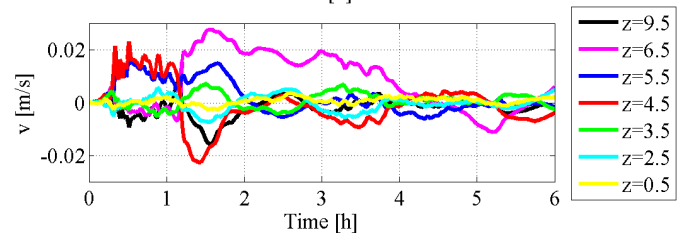
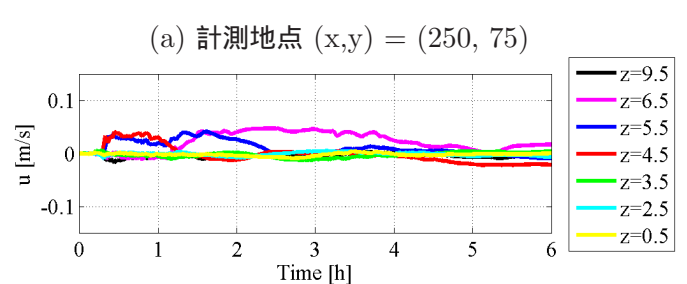


図-9 密度界面上部に放水時の x,y 流速の時間変化