

1. 諸言

貧酸素化の要因となる密度成層を解消するために、表層水を密度噴流として底層へ放出して海水混合を促進する手法が注目されている¹⁾。底層に放出した表層水の挙動を把握して海水混合に効果的な表層水の供給方法を提案することが重要である。成層場における密度噴流の挙動は時空間的に複雑に変化するため、底層で放出した表層水の挙動や空間的な拡散過程を把握する必要がある。そこで、本研究では染料を用いて表層水を底層に放出した場合の密度成層場の流体運動に関する可視化実験を実施し、LIF法²⁾を用いて密度噴流の挙動やそれに起因する海水の混合状況について検討した。

2. 実験概要

(a) 実験方法

実験は図-1に示すように、長さ 400 cm、幅 25 cm、高さ 50 cmの水槽内に、淡水層厚が $h_1 = 5$ cm、塩水層厚が $h_2 = 15$ cmとなるように淡水と塩水を注いで密度成層を形成した。水底から 1 cmの位置に放出口（断面：2cm×2cm）を設置し、水中ポンプで取水した表層水を放出口から水平方向に放水した。ここで、二次元密度噴流として取り扱うために、撮影領域内には奥行きが 2 cmとなるように仕切り版を設置した。また、放出口の下端に原点を取り、放出方向に x 軸を、鉛直上向きに y 軸を取った。海水の混合状況を可視化するために、淡水をウラン溶液で予め染色しておき、YAGレーザーを照射してウラン溶液の挙動をHDカメラで撮影することで輝度分布を取得した。HDカメラの解像度は1920×1080 pixel、フレームレートは 60 fpsで、表層水を放水してから120秒間撮影した。実験条件は表

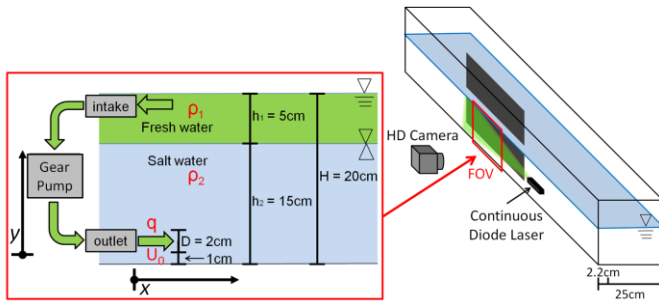


図-1 実験概略図

-1に示すように、初期密度差： $\Delta\rho/\rho_1$ と単位幅あたりの放出流量： q をそれぞれ3パターン変化させ、これらが海水混合に及ぼす影響について検討した。

(b) 撮影画像の加工

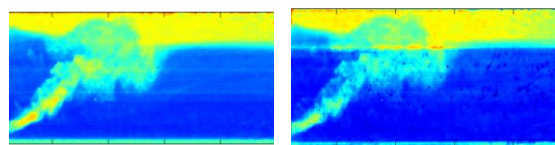
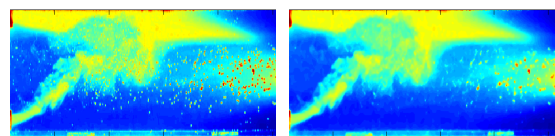
CASE 2-2の噴流の撮影画像を図-2(a)に示す。本研究では、撮影画像に以下の加工を施して解析に用いた。まず、水槽壁面の汚れの影響を排除するためにノイズ除去を実施した(図-2(b)参照)。続いて、レーザーの減衰に起因する輝度の空間勾配が生じるため、空間勾配の補正を実施した(図-2(c)参照)。さらに、レーザーの出力に起因して実験ケース毎に輝度の誤差が生じるため、任意点における輝度を基準となる輝度に補正した(図-2(d)参照)。

(c) 密度分布の推定

取得画像の輝度分布から密度分布を推定するために、

表-1 実験条件

CASE	淡水密度 $\rho_1 \times 10^3$ (g/cm ³)	塩分 S (%)	塩水密度 ρ_2 (g/cm ³)	密度差 $\Delta\rho/\rho_1$ ($\times 10^{-2}$)	単位幅流量 q (cm ² /sec)	初期流速 U_0 (cm/sec)	運動量 $\rho_1 q U_0$ ($\times 10^{-3}$ NS)
1-1	9.9		1.0038	0.39	6.7	3.4	0.23
1-2	9.9	5.0	1.0039	0.40	13.6	6.8	0.932
1-3	9.9		1.0038	0.39	20.4	10.2	2.08
2-1	9.9		1.0078	0.79	6.8	3.4	0.23
2-2	9.8	10.0	1.0077	0.79	13.6	6.8	0.93
2-3	9.8		1.0077	0.79	20.4	10.2	2.08
3-1	9.9		1.0118	1.19	6.8	3.4	0.23
3-2	9.8	15.0	1.0116	1.18	13.6	6.8	0.93
3-3	9.9		1.0117	1.18	20.4	10.2	2.08



(c) 空間勾配の補正 (d) ケース毎の輝度補正
図-2 画像処理

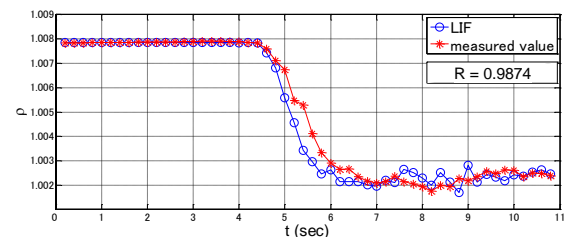


図-3 LIF法の結果と実測値との比較

任意点の塩分を塩分計（KENEK製）で測定し、輝度との関係式を算出した。輝度分布から推定した塩分と塩分計の測定値から算出した放出口近傍の密度の時系列を図-3に示す。LIFによって推定された密度変化は、塩分計による実測値よりも変動が大きいですが、両者の値の相関係数は $R = 0.98$ であり、定量的に概ね一致していた。

3. 結果と考察

CASE2-2 の海水の混合状況を図-4 に示す。図-4 (a) によると、放出口から水平に放出された噴流は、周囲流体とのせん断の影響によって徐々に水平流速を失いながら浮力の影響を受けて密度界面まで上昇する。その後、界面近傍に内部跳水を伴いながら沖へと流出する様子が確認できる。図-4 (b) によると、実験開始 120 秒後には、放出口から放出される表層水と底層水の密度差は徐々に小さくなり、また、界面近傍には混合層を成した定常状態へと遷移していくことが確認できる。混合領域の面積の大きさに違いはあるものの、全ケースで底層に供給された表層水は同様の挙動を示した。

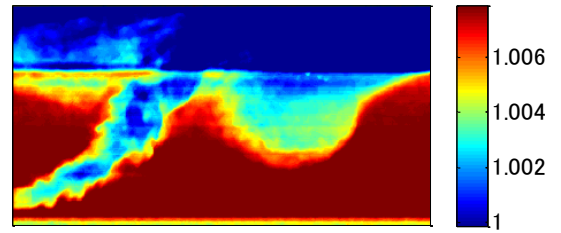
塩水層の密度が初期密度の 80% を下回る領域の面積を混合領域： A と定義し、各ケースにおける A の時間変化を図-5 に示す。いずれのケースにおいても、 A は内部跳水域が消滅するまで線形的に増加し、ある値に収束していくことがわかる。また、放水を開始して約 120 秒後には、全てのケースにおいて海水の混合領域の時間変化が定常状態に達すると判断できる。

海水の混合状況が定常状態になる $t = 120\text{sec}$ の CASE 1-3 と CASE 3-1 の $x/H = 0.6, 1.2, 1.8$ における密度の鉛直分布を図-6 に示す。横軸は、初期状態での密度の断面平均： ρ_m を用いて無次元化しており、 $\rho/\rho_m = 1.0$ となると海水が完全に混合されたことを意味する。密度差が小さく噴流の運動量が多い CASE 1-3 では、 $x/H = 0.6, 1.2$ において成層構造の解消が確認できる。ただし、 ρ/ρ_m が 1 を下回っているのは、閉じた系に低密度水を供給し続けているためだと考えられる。また、 $x/H = 1.8$ においては、 $y/H = 0.2$ 以下で密度変化がない。一方、密度差が大きく噴流の運動量が小さい CASE 3-1 では、どの地点においても $y/H = 0.3$ 以下の領域で密度変化は確認できず、底層水の混合が確認できなかった。

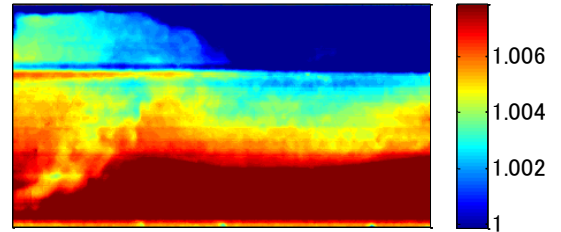
4. 結言

本研究では、LIF 法によって密度成層場の海水混合評価を行った。本研究で得られた結果は以下ようである。

- ・ウラン溶液を用いた可視化手法によって、密度成層場の海水の混合評価が可能であることがわかった。
- ・本研究で実施した可視化実験により、底層に供給した表層水の挙動や海水の混合領域、混合状況を評価することができた。



(a) $t = 13 \text{ sec}$



(b) $t = 120 \text{ sec}$

図-4 密度噴流の挙動

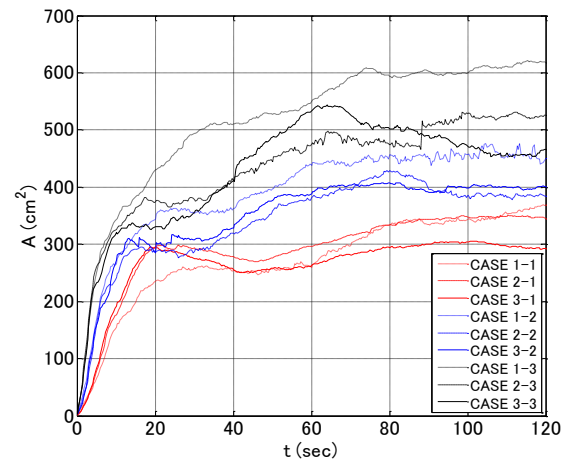
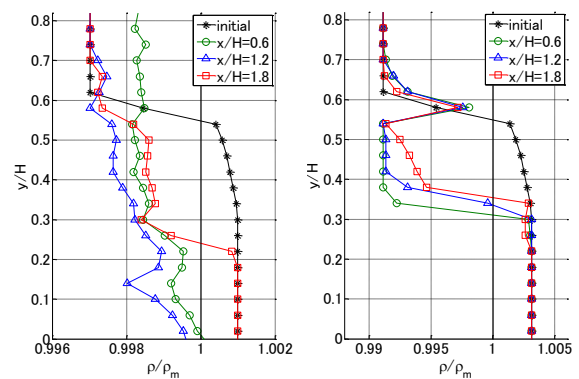


図-5 A の時間変化



(a) CASE 1-3

(b) CASE 3-1

図-6 鉛直密度分布の空間変化 ($t = 120\text{sec}$)

参考文献

- [1] 東京湾におけるモデル水域別対策検討調査報告書。関東経済産業局, pp. 42-114, 2007.
- [2] Stephen W. Allison, William P. Partridge. Laser-Induced Fluorescence Imaging. 2003.