

画像計測手法を用いた 密度成層場の流体運動に関する実験的研究 An Experimental Study on Fluid Motion in Density Stratified Field Using an Image Measurement Technique

環境水域工学分野 古城 鉄也

Abstract

近年、閉鎖性海域において密度成層を緩和するための海水混合促進技術が数多く開発されており、その効果に関する知見が望まれている。本研究ではまず、複雑な挙動を示す密度流体場を時空間計測するために民生用カメラを用いた簡易画像計測手法を開発した。次に、噴流が成層緩和に及ぼす影響について明らかにするため、基礎的な成層場を対象として実験を実施した。さらに、成層場の状態による緩和効果の違いについても検討し、海水混合促進技術を適用した際の成層の緩和過程の予測に有用なパラメータを定義した。

Fluid motion in density stratified field is visualized to evaluate Water-Mixing Technologies(WMT). First, we developed a simple image measurement method to estimate the spatial distribution of density of water. Then, we experimented to understand efficacy of WMT and verified that entrainment by jet and internal wave breakings are important to utilize WMT in density stratified field. Furthermore, we experimented on various types of stratified field changing Froude number and defined new stratification parameter that has a linear relation to the decrease in potential energy by WMT.

1. 序論

1.1 本研究の背景

夏季の港湾海域では強固な密度成層が形成されることで、エスチュアリー循環流等による酸素循環が停滞し、底層が貧酸素化して環境問題となっている。底層の貧酸素化を抑制するためには、成層を緩和もしくは解消する必要がある。

密度成層を緩和する方法として、鉛直循環流誘起堤体(重松ら [1]) や流水発生装置(金山ら [2]) など、表層水や密度調整水を底層に放出することにより浮力噴流を発生させ、海水混合を促進する技術が数多く開発されている。しかし、時空間的に複雑な流体運動を利用した海水混合促進技術を効率的かつ効果的に実海域に適用するためには、予め成層緩和効果を把握し、対象海域の条件に応じた設計や配置を行う必要がある。

1.2 本研究の目的

海水混合促進技術の実用化に向けて、遠藤ら [3] や佐伯ら [4] は水理実験を実施して装置稼働時の流況および密度変化の同時把握を試みた。これらの密度変化の計測には計測器が用いられているが、密度流は時空間的に非常に複雑な挙動を示すため、以上のような点計測ではなく、空間的な計測が必要である。また、縮尺模型を用いた水理実験においては、計測器が流況に及ぼす影響も無視できない。

近年、画像処理と可視化技術の発達に伴い、空間的な流体スカラー計測が可能となってきた。Xu ら [5] は、LIF(Laser-Induced Fluorescence) を用いて流体密度の空間分布を計測し、密度噴流の流体混合について時空間的に検討した。ただし、業務用カメラを用いた従来の LIF では、光学系の設置が複雑であることや、計測時間に制約があることが問題となる。一方、今日の民生用カメラの性能向上は著しく、高い時空間分解能で長時間の撮影が可能である。

本研究ではまず、複雑な挙動を示す密度流の流況を定量的に把握するために、民生用カメラを用いた流体密度分布の簡易画像計測手法を開発する。また、成層した海域に浮力噴流が作用した際の成層緩和について多方面から検討するための水理実験を実施する。そして、作用させる噴流と成層強度との関係を整理し、海水混合促進技術の実用化に向けて有用となるような知見を得ることを目的とする。

2. 画像計測手法の開発

2.1 計測原理・手順

流体中に溶解した物質をレーザー光で励起した際に、その物質が濃度や温度に依存した蛍光を示せば、その様子を撮影した画像から濃度や温度の分布を計測することができる。この原理を用いた画像計測手法が LIF であり、本手法では、まず LIF により流体中に溶解した蛍光染料の濃度を計測する。また、あらかじめ使用流体の密度を食塩により調整し、それに応じて染料の濃度を規定しておく。これにより、流体中の染料の濃度分布と流体の密度分布が一致するという仮定の下で、LIF を用いて計測した染料の濃度分布から流体密度分布を推定することが可能となる。本計測手法は、以下に示すように (a) 光学系の設定、(b) 蛍光染料の選定、(c) 画像処理のアルゴリズムの確立によって開発し、**図-1** に示すような手順で実施する。

2.2 計測手法の確立

(a) 光学系の設定

一般に、LIF で対象とする領域はマクロなもので 100 ~ 200mm 程度である。本手法においても十分にマクロな水理実験を想定して、対象領域を幅 260mm、高さ 130mm の矩形とした。光源には緑色 (532nm) の連続光で出力 5W の Nd:YAG レーザーを使用した。従来の LIF では撮影は高速度カメラ等、業務用のもので行い、そのほとんどがモノクロカメラである。そこで、レーザーの散乱光をキャンセルして蛍光のみを撮影するために、カメラ前面にバンドパスフィルターを設置する必要がある。一方、本手法では撮影に民生用の C-MOS ビデオカメラである SONY 社製の HDR-XR520V を用いた。カメラは 0.10mm/pixel の空間分解能および 30fps の時間分解能を有しており、非常に安価でありながら、高い時空間分解能で長時間撮影が可能である。また、後述する蛍光染料の選定実験を実施して本手法に最適な染料を選択する。

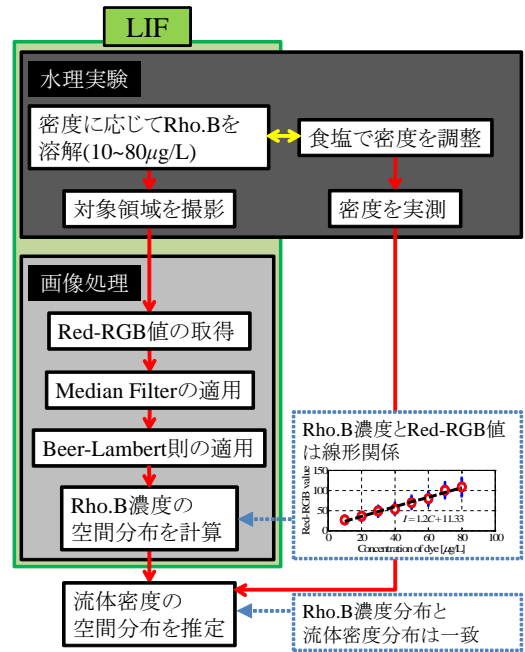


図-1: 密度分布の計測手順

これにより、カメラ内蔵の RGB フィルターの特性を利用してレーザー光と染料の蛍光を分離取得することが可能となり、別途フィルターを準備する必要がなく、光学系の設置が容易である。

(b) 蛍光染料の選定

本手法で用いる染料として、上述したようにカメラ内蔵の RGB フィルターでレーザー光と容易に分離取得できる蛍光を示すものが望ましい。さらに、撮影画像の輝度値と染料濃度との間に線形関係がある濃度域で使用する必要がある。そこで、Rhodamine B, Fluorescein, LDS 698 の 3 種の蛍光染料を用意して染料の選定実験を実施し、使用可能な濃度域について検討した。

染料の選定実験では、静止流体中に濃度を段階的に変化させながらそれぞれの染料を溶解してその様子を撮影し、**図-2** に示すような、染料の濃度と蛍光強度との関係を得た。赤丸は対象領域内の蛍光強度の空間平均値を、青棒は領域内の偏差を表わしている。Fluorescein に対しては取得画像の Green-RGB 値を、Rhodamine B および LDS 698 に対しては Red-RGB 値を、それぞれ染料の蛍光強度とした。また、レーザーの散乱光は概ね Green-RGB 値として記録されている。

図-2(a) より、10 ~ 80 $\mu\text{g/L}$ の濃度域において Rhodamine B 濃度と蛍光強度との間に線形関係がみられる。一方、**図-2(b)** に示すように、Fluorescein 濃度と蛍光強度との間にも線形関係がみられるが、Rho-

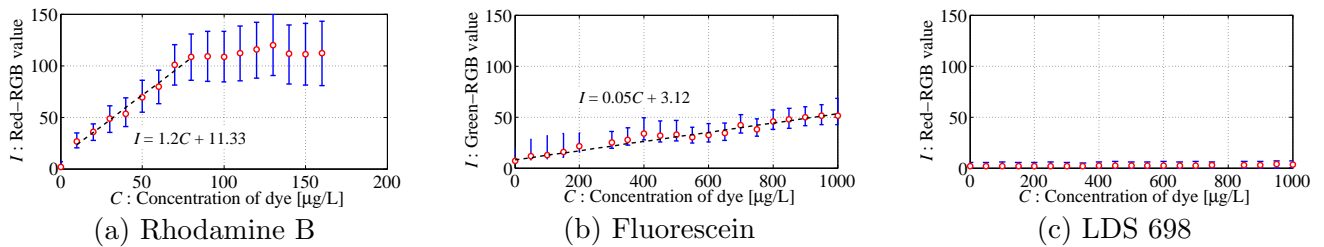


図-2: 各染料の濃度と蛍光強度との関係

damine B と比較して大量に溶解した場合でも蛍光強度は小さいことがわかる．さらに，Green-RGB 値を採用するので，同じく Green-RGB 値として取得される水槽内でのレーザーの散乱光を排除できない．また，図-2(c) より，LDS 698 を溶解度である $1,000\mu\text{g/L}$ で溶解しても蛍光はほぼ確認できず，本手法において LDS 698 は使用不可と判断した．以上より，Rhodamine B が本手法に最も適した染料であり，濃度に応じて Beer-Lambert の法則によるレーザー光の減衰に伴う蛍光強度の偏差が拡大しているが， $10 \sim 80\mu\text{g/L}$ 程度の濃度域において，取得画像の Red-RGB 値から線形的に対象領域内の Rhodamine B 濃度を計測することが可能である．

(c) 画像処理のアルゴリズム

カメラの RGB フィルターによってレーザーの散乱光は概ねキャンセルされるものの，気泡等に起因する大きな光強度を持った散乱光は Red-RGB 値にも記録されてしまう．取得画像に半径 5pixel のメディアンフィルターを施すことで，これらの特異な点を除去する．また，前述した蛍光強度の偏差は，取得画像に Beer-Lambert の法則を適用することで除去する．そして画像の Red-RGB 値分布から線形的に Rhodamine B 濃度分布を計算し，その後，流体密度分布を推定する．ここで，Rhodamine B と流体密度を決定づけている食塩のシュミット数はそれぞれ近い値を示し，両者の拡散挙動を同一とみなせることを確認している (Rehmann [6])．

3. 水理実験の概要

3.1 実験装置

実験には図-3 に示すような長さ 180cm，高さ 30cm，幅 25cm のアクリル水槽を用いた．噴流は，別途用意した水槽からポンプを用いて PVC パイプ製の放出口に供給することで，水平方向に発生させた．放出口は水底から 13mm の位置に下端を有するように設置し，幅 13mm の噴流を発生させた．噴流軸上

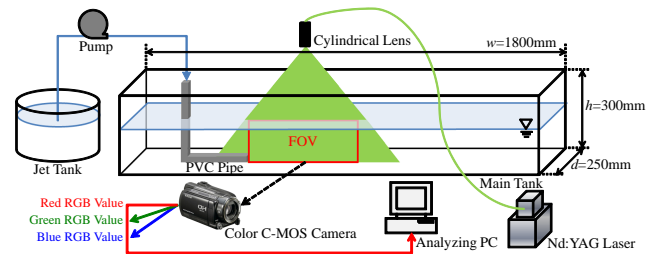


図-3: 実験装置の概要図

の流れに沿って，上方からシリンドリカルレンズを用いてレーザーを 2mm 厚の放射シート状に照射した．放出口の沖側をカメラ 1 台により撮影した．

3.2 密度成層

水槽内の成層には，Two-Tank Filling System (Daviero ら [7]) を用いた．2 つのタンクに異なる密度の水を入れ，流量を調整しながら水槽に供給することで，密度が連続的に変化する躍層型や，密度界面を有する 2 層型等，成層の密度分布を自由に調節可能とした．ここで，高密度水と低密度水にそれぞれ $20\mu\text{g/L}$ ， $70\mu\text{g/L}$ の Rhodamine B を溶解した．また蛍光強度の水質依存性を考慮し，使用水の水温と pH を規定して市販のカルキ抜き剤を添加した．

4. 噴流の成層緩和効果に関する基礎的実験

4.1 実験概要および条件

海水混合促進技術の効果を検討するため，単純な 2 層型の成層場に対して浮力噴流を作用させ，その様子を撮影した．実験条件は，低密度水と高密度水および噴流の密度をそれぞれ調整することで変化させた．実験条件を表-2 に示す．また，成層と噴流の緒言を示した概念図を図-4 に示す．噴流に着目したパラメータとして，勾配リチャードソン数 Ri_j を式 (1) で定義した．そして， Ri_j を変化させて CASE 1~CASE 5 を設定した．これは，同様の成層場に対して噴流を作用させているが， Ri_j が大きいほど噴流に働く浮力の影響が大きく，より密度流的な流動となることを意

味している。

$$Ri_J = \frac{((\rho_H - \rho_J)/\rho_H) g D_J}{u_J^2} \dots\dots\dots (1)$$

次に成層場のパラメータとして、全水深で層平均化した密度フルード数 Fd を式 (2) で定義した。そして、 Fd を変化させて CASE 5~CASE 9 を設定した。これは、同様の噴流を異なる成層場に作用させており、 Fd が大きいほど与えられた外力に対して成層場が脆く、より緩和しやすいことを意味している。

$$Fd = \frac{u_J}{\sqrt{((\rho_H - \rho_L)/\rho_H) g H}} \dots\dots\dots (2)$$

ただし本実験においては、簡単のため流体密度のみを変化させており、そのため Ri_J および Fd を決定づけているのも流体密度のみであることに注意する必要がある。まず、水槽内が完全に成層したら噴流を発生させ、2分間作用させた。この様子を撮影し、2分後噴流を静止させるとともに撮影を停止した。その後、10分ほどかけて水槽内の流体の静止を待つと、与えた外力に応じて緩和された成層場が確認される。緩和された成層場の密度分布を計測するために、この様子を撮影して実験を終了した。

4.2 結果および海水混合促進技術の効果に関する考察

Ri_J の最も大きな CASE 1 と Fd の最も大きな CASE 9 について、時刻 $t = 120\text{sec}$ における流体混合の様子を図-5 に示す。CASE 1 では噴流に働く浮力が大きく、噴流が上昇してゆく過程での連行、および界面到達後に発生する内部跳水と内部砕波によって流体が混合していることがわかる。CASE 9 では下層域における密度流的挙動は弱まっているが、成層が脆いため大規模な内部砕波が確認でき、それにより流体が混合していることがわかる。

撮影領域内の水平平均密度分布から式 (3) で算出したポテンシャルエネルギー $\Phi[\text{J}]$ について、実験前後での値を各ケースで比較したものを図-6 に示す。

$$\Phi = wd \int_0^H (\bar{\rho} - \rho) g y dy \dots\dots\dots (3)$$

ただし w , d , $\bar{\rho}$, および g はそれぞれ水槽の長さとして幅、密度の鉛直平均値、および重力加速度である。これは、成層場の持つ強度をエネルギーとして表現した指標で、理論的にはその成層場の密度分布を均一にするのに必要なエネルギーとして知られる。流体混合の結果、全ケースで Φ の低下が確認される。なお、

表-1: 実験条件

CASE	Jet			Stratified field		Fd
	ρ_J [kg/m ³]	u_J [m/sec]	Ri_J [-]	ρ_L [kg/m ³]	ρ_H [kg/m ³]	
1	1000		0.287			
2	1005		0.236			
3	1011	0.11	0.174	1000	1028	0.590
4	1016		0.123			
5	1022		0.062	1000		0.590
6				1005		0.651
7	1022	0.11	0.062	1011	1028	0.757
8				1016		0.902
9				1022		1.275

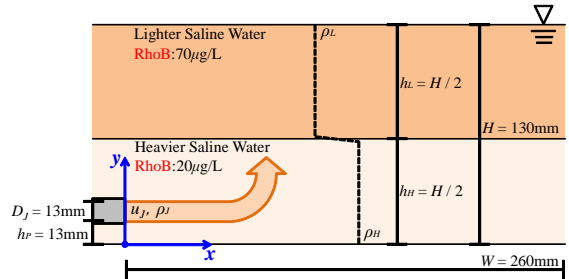


図-4: 密度成層および浮力噴流の概念図

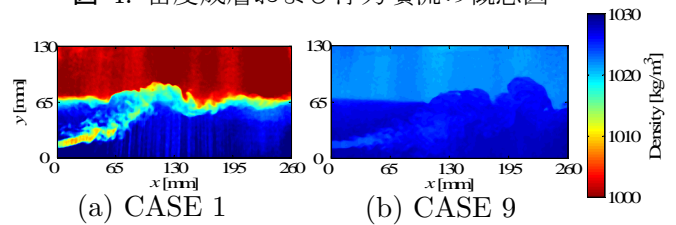


図-5: 撮影領域の様子 ($t = 120\text{sec}$)

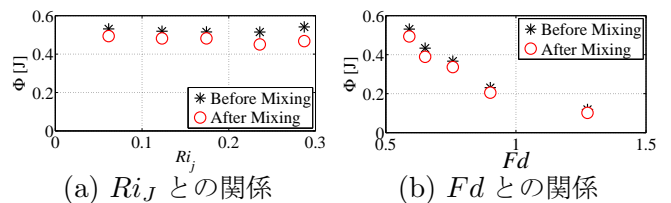


図-6: 実験前後でのポテンシャルエネルギーの比較

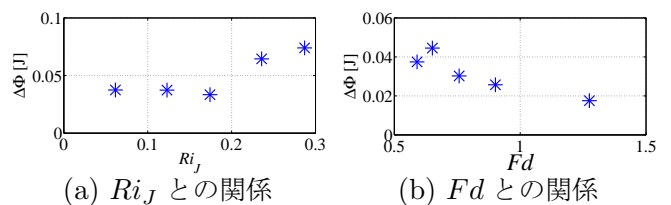


図-7: ポテンシャルエネルギー低下量の比較

Fd の大きな、つまり脆い成層ほど初期の Φ が小さいことがわかる。実験中の流体混合による Φ の低下量 $\Delta\Phi$ を各ケースで比較したものを図-7 に示す。これはほぼ同等の外力を与えた結果、如何に成層が緩和したかを示している。図-7(a) より、 Ri_J が 0.2 を超えるあたりから $\Delta\Phi$ が急増すると考えられ、CASE 2 と CASE 3 とで $\Delta\Phi$ に約 2 倍の差がみられる。一方図-7(b) より、 Fd と $\Delta\Phi$ との間には負の相関がみられる。以上より、噴流には表層水に近い密度を与えて Ri_J を大きくすれば効果的な成層緩和が期待できる。一方、 Fd は成層の脆さを表す指標であり、 Fd の大

きなケースでは大規模な流体混合が確認されたにもかかわらず、 Fd と $\Delta\Phi$ との間には負の相関があり、ポテンシャルエネルギー低下の観点からは脆い成層ほど海水混合の効果が弱まることが示唆された。

5. 成層の状態と緩和に関する実験

5.1 実験概要および条件

前述のように、 Fd が大きく成層が脆いほどその緩和過程が穏やかであることが示唆された。そこで、 Fd を構成する各パラメータを表-2 に示すように変化させて実験を実施した。具体的には噴流の流速 u_J 、下層の密度 ρ_H 、および全水深 H を変化させた。また、上下層の厚さは共に $H/2$ とした。前述の実験と比較してより長時間の現象を把握できるように、噴流は30分間作用させることとし、それに伴う水深変化の影響を排除するため、噴流には別タンクを用いず、成層場の水面付近の水を供給して発生させた。

5.2 結果および成層の形態と緩和に関する考察

図-8 に示すように、撮影領域内の沖側 $x=240\text{mm}$ 付近の鉛直密度分布から算出した水柱ポテンシャルエネルギー $\phi[\text{J}/\text{m}^2]$ の時系列を図-9 示す。ただし

$$\phi = \Phi/wd \dots\dots\dots (4)$$

である。また、 $x=240\text{mm}$ は噴流の確立領域を含まない十分沖側の領域である。図-9 より、全ケースで時間が経つにつれ ϕ が減少していることが確認でき、また CASE 5~CASE 8 については、 $t=1000\text{sec}$ あたりで ϕ が 0 に近い値をとるように漸近していることがわかる。 ϕ の減少する様子は各ケースで異なっており、またそれは Fd のみによっては決定していないように思われる。例えば、全ケース中で Fd が中間的な CASE 5 において ϕ の減少傾向が最も急であるように見て取れる。CASE 5 は ϕ の初期値（以下 ϕ_0 ）が大きく、また同様に ϕ_0 の大きな CASE 1 についても ϕ の減少傾向が比較的大きいことがわかる。

以上より、 ϕ の低下には Fd が負の働きを、 ϕ_0 が正の働きをしていると仮定し、新たな成層強度指標として、 ϕ_0 に Fd を乗じた値 $\phi_{Fd}[\text{J}/\text{m}^2]$ を以下の式 (5) で定義した。

$$\phi_{Fd} = Fd \times \phi_0 \dots\dots\dots (5)$$

ϕ_{Fd} は、密度勾配等も考慮した包括的かつ絶対的な成層強度としての ϕ_0 に、その成層場の外力に対する

表-2: 実験条件

CASE	u_J [m/sec]	ρ_J, ρ_L [kg/m ³]	ρ_H [kg/m ³]	H [mm]	Fd [-]
1	0.11		1028	130	0.590
2	0.11		1028	100	0.673
3	0.11		1014	130	0.829
4	0.11	1000	1014	100	0.945
5	0.22		1028	130	1.180
6	0.22		1028	100	1.346
7	0.22		1014	130	1.658
8	0.22		1014	100	1.890

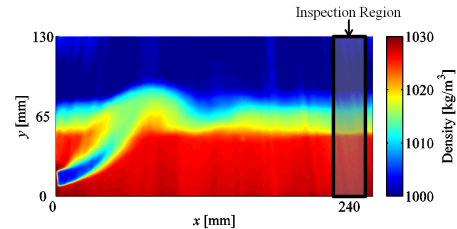


図-8: 水柱ポテンシャルエネルギーの算出領域

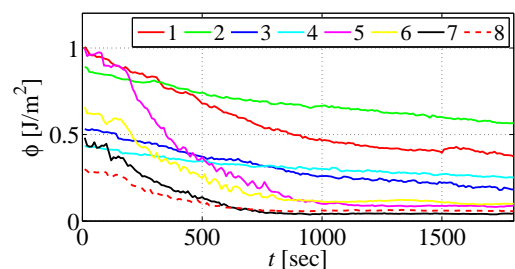


図-9: 水柱ポテンシャルエネルギーの時間変化

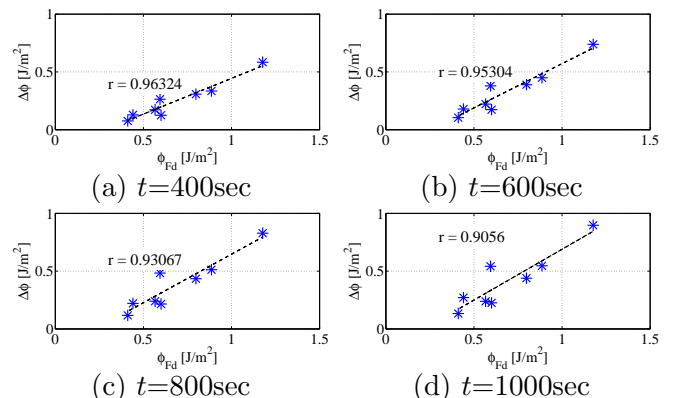


図-10: 水柱ポテンシャルエネルギー低下量と成層強度との関係

相対的な強度としての Fd を乗じることにより、より複合的かつ具体的な成層強度を意味している。図-9 より ϕ が各ケースの特徴を有した減少を示していると判断した $t=400\text{sec} \sim 1000\text{sec}$ に関して、200sec ごとに初期状態からの ϕ の減少量 $\Delta\phi$ を算出した。そして、 $\Delta\phi$ と ϕ_{Fd} との関係を図-10 に示す。検討した各時刻において $\Delta\phi$ と ϕ_{Fd} との間に強い相関がみられ、また各ケースで ϕ が概ねある値に収束する $t=1000\text{sec}$ においても同様に $\Delta\phi$ と ϕ_{Fd} との間に強い相関が確認される。また、その相関係数 r は総じて 0.9 以上であることがわかる。

以上より、本研究における幾何学および力学的条件下においては、成層の緩和過程における水柱ポテンシャルエネルギー変化量 $\Delta\phi$ を新たな成層強度指標としての ϕ_{Fd} で整理できることがわかった。 ϕ_{Fd} は次元 J/m^2 を有する値であり、また実海域を想定した際に Fd はほぼ同値を示すと考えられるのに対して、 ϕ_0 は水深 H を含むためスケールに応じて変化する等のことから、現象の相似則の検討および成立が必要ではあるが、実海域における成層緩和過程の予測に展望が持たれた。

なお、本稿では割愛しているが、密度界面に躍層を有する場合についても同様の検討を行い、躍層の形態に関わらず $\Delta\phi$ を ϕ_{Fd} で整理できることを確認している。

6. 結論

本研究ではまず、流体密度分布を簡易に計測するために、民生用カメラを用いた画像計測手法を開発した。次に、噴流が成層緩和に及ぼす影響について明らかにするために、基礎的な成層場を対象として実験を実施した。さらに、作用させる噴流と成層強度との関係を整理するために、成層場の条件をより具体的に設定して実験を実施した。以上より、海水混合促進技術の実用化に向けて有用な知見を得ることを本研究の目的とした。本研究により得られた成果を以下に記す。

- 蛍光染料として Rhodamine B を適切な濃度域で使用し、種々の光学条件を実験準備や画像処理の過程で満足することにより、民生用カメラで撮影した画像から撮影領域内の Rhodamine B 濃度分布、さらには密度分布を計測可能であることが示された。
- 成層場に浮力噴流が作用する際、下層域で噴流と周囲流体との間に働くせん断力、および密度界面に発生する内部跳水と内部波により流体混合が起きていることが確認され、また噴流の勾配リチャードソン数 Ri_j について検討した結果、噴流には極力表層水に近い密度を与えることが望ましいといえる。
- フルード数 Fd は成層の脆さを表す指標でありながら、同流速噴流に対してはポテンシャルエネルギーの低下量と負の相関を持ち、また、成層場の持つ初期のポテンシャルエネルギーに Fd を乗

じた成層強度 $\phi_{Fd}[J/m^2]$ はポテンシャルエネルギー低下量との間に強い正の相関を持つことが確認された。

参 考 文 献

- [1] 重松孝昌, 池田憲造, 小田一紀. 貧酸素化の抑制を目的とした鉛直循環流誘起堤体の開発. 土木学会論文集, No. 741, pp. 57–67, aug 2003.
- [2] 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, Vol. 23, pp. 751–756, 2007.
- [3] 遠藤徹, 重松孝昌. 密度成層場における vcf 堤体誘起流の挙動に関する実験. 海岸工学論文集, Vol. 54, pp. 1236–1240, 2007.
- [4] 佐伯信哉, 中村孝幸, 岡田修平. 密度成層場における鉛直混合促進型護岸の効果と混合特性について. 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 65, No. 1, pp. 796–800, 2009.
- [5] Duo Xu and Jun Chen. Experimental study of stratified jet by simultaneous measurements of velocity and density fields. *Experiments in Fluids*, Vol. 53, No. 1, pp. 145–162, 2012.
- [6] C.R. Rehmann. *Effects of Stratification and Molecular Diffusivity on the Mixing Efficiency of Decaying Grid Turbulence*. PhD thesis, Stanford University. Dept. of Civil Engineering, 1995.
- [7] G. J. Daviero, P. J. W. Roberts, and K. Maile. Refractive index matching in large-scale stratified experiments. *Experiments in Fluids*, Vol. 31, No. 2, pp. 119–126, 2001.

討議

討議 [西岡真稔 准教授]

励起光の進行方向の減衰は考慮されているが、レーザーシートとカメラの間における蛍光の減衰に関しても考慮されるべきかと思われる。それに関してどのように考えているか。

回答

そのことについては特に検討していなかったが、確かに3次元現象を2次元計測しているため、多少なりともそのような蛍光の減衰はあるものと考えられる。ただし、一般に2次元LIFにおいてそのような3次元性を持った光の減衰に関しては考慮されていないし、また考慮することが不可能だと考えられる。理論的には、3次元LIFを実施する際には可能だといえる。

討議 [矢持進 教授]

概要集に「実海域における成層緩和過程の予測に展望が持たれた」と記されているが、具体的にはどのような根拠を持ってそのような結論に至ったのか。

回答

確かに、本研究で得られた結果と実海域における流体運動との相似性についての検討にまでは至らなかったため、海水混合促進技術の効果に関して具体的な議論を進めるには時期尚早である。ただし、前述のように密度分布を綿密に考慮した絶対的な成層強度パラメータとしてのポテンシャルエネルギーと、その成層場が与えられる外力に対してどの程度の強度を有するかという相対的なパラメータとしてのフルード数とを包括的に考慮することで、少なくとも本研究における幾何学的・力学的条件下では現象の整理が可能となったといえる。また、簡易な画像計測手法を確立したことで、水理実験による検討が今後より多く実施されることも期待される。これらを考慮して、あえてそのような表現をさせていただいた。

討議 [重松孝昌 教授]

このような流体運動の結果、水面が多少変動するものと考えられる。その影響を受けないようレーザーを水底から照射する必要があるかと思うが、あえて水面上から照射した理由はなにか。

回答

本水理実験においては、可能な限りマクロな領域を撮影するという目標があったため、流体の存在以外に起因するレーザーの減衰は極力抑える必要があった。そこで、水底からレーザーを照射する場合、アクリル水槽(厚さ1cm)の存在によるレーザーの減衰を危惧し、あえて水面から照射する方法を選んだ。

討議 [重松孝昌 教授]

5節で見られている流体混合は、噴流が作用することによるものだけではなく、表層での取水によって循環流が起きていることにも起因しているのではないか。

回答

取水口を撮影領域から離れた場所に設ける等、取水の影響が直接撮影画像に現れるというようにことに対しては対策を講じている。また今回実施している程度の流量では、当然Kelvin-Helmholtzの不安定等は確認されず、取水による循環流に起因する乱流混合はないといえる。ただし、流速を計測していないため定量的なことはお答えできないが、確実に循環流は起きており、それにより密度界面での物質拡散が助長されていることは十分考えられる。

討議 [小林知広 講師]

カメラによって解像度等も変わってくるかと思うが、一般にこのような計測手法で対象と出来る範囲はどの程度か。

回答

本研究における撮影範囲および空間解像度は概要集に記載した通りであり、また一般にLIFで対象とされる範囲もマクロなもので200mm程度のスケールである。解像度に関しては、研究対象によって必要となる値が変わってくるかと思うが、基本的に昨今のハイビジョン規格に対応したカメラであれば十分に高い解像度が得られるものと考えられる。そこで、マクロ撮影を実施する場合はカメラよりもレーザーの出力が重要となってくるものと考えられる。参考までに、本実験においては出力5Wのレーザーを使用している。