画像解析手法を用いた密度成層場における 噴流の海水混合評価に関する研究

遠藤 徹¹・古城 鉄也²

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

E-mail:endo@urban.eng.osaka-cu.ac.jp

²正会員 東亜建設工業株式会社 湾奥部浅場造成作業所 (〒136-0075 東京都江東区新砂3-11-10)

E-mail:t_kojou@toa-const.co.jp

閉鎖性海域の水質悪化は著しく、特に港湾海域では密度成層の発達による底層水の貧酸素化が深刻な問題となっている。成層場を緩和する海水混合技術が多く開発されているが、密度場の流体運動は時空間的に複雑な挙動を示すため、現地に適用する際には事前に混合効果を把握しておく必要がある。本研究では、密度場に噴流を作用させた水理実験を実施し、画像解析手法により海水混合特性について検討した。

同条件の成層場に対して異なる噴流を作用させた結果、噴流リチャードソン数により混合効果を整理できる可能性があることが示唆された。また、成層場の形状の異なる場に同条件の噴流を作用させた結果、噴流の発達領域が広範囲に及ぶように噴流を作用させることでより効果的に海水が混合できることが明らかとなった。

Key Words : LIF, density stratified field, jet, water mixing

1. はじめに

海水交換が乏しく希釈拡散効果の低い閉鎖性海域の水質悪化は著しく、様々な環境問題が発生している。特に港湾海域では、夏季に発生する底層水の貧酸素化が深刻である。遠藤ら¹⁾が通年にわたって実施したDO濃度の鉛直分布の実測結果によると、堺泉北港では春から晩秋にかけて慢性的な貧酸素状態に陥っていた。底層水の貧酸素化は水域生態系に影響を及ぼすだけでなく、底層の嫌気化により硫化水素などの有毒ガスの発生や内部負荷の増大など、沿岸域の水質環境にも深刻な影響を及ぼすことになり、閉鎖性海域の環境保全には貧酸素化の改善が重要な課題といえる。

貧酸素化の要因として、夏季に発達する密度成層が挙げられる。港湾海域では夏季になると日射や降雨の影響により強固な密度成層が発達するため、鉛直方向の海水混合が制限され底層への酸素供給が遮断されることとなる。このため、密度成層を緩和する海水混合促進技術が多く開発されている。たとえば、海岸構造物に作用する波浪エネルギーを利用して構造物前面部の海水混合を促進する手法が提案されている^{2,3)}。しかしながら、密度場の流体運動は時空間的に複雑な挙動を示すため、当初期待していた改善効果が得られない場合が多々ある。また遠藤ら⁴⁾は、太陽エネルギーを利用して表層水を底層

に供給する装置を作成し現地実験を実施したが、混合範囲は放出口近傍に限定されていた。このように、波浪や太陽光などのような自然エネルギーを利用する場合には、利用できるエネルギーに対してどのくらいの効果が得られるのか事前に把握する必要がある。一方、電力により水流発生装置を稼働して水域の鉛直混合を促進する手法^{5,6)}も提案されており、一定の改善効果が報告されている。しかしながら、この場合も装置を稼働するための電力コストを低減するためには、密度成層場に対する海水の混合特性を事前に把握し、対象海域に応じた設計や配置を検討することが重要となる。

これまでに海水混合促進技術の混合効果について数値計算や水理実験による検討が行われている。ただし、これらの水理実験では、各地点における濃度や速度の時間変化を計測器で計測するものであった。このため、多点で計測するなどの工夫は行われていたが、空間的な定量評価には至っておらず、噴流そのものの効果や連行現象の発達過程を定量的に評価することが困難であった。このような中、画像処理と可視化技術の発達に伴い、空間的な流体運動の可視化計測が可能となってきた。特に、密度場など時空間的に流体運動が変化するような現象を把握するには有効な手法である。古城ら⁷⁾は、蛍光染料である Rhodamine B を密度情報の媒体とし、撮影に民生用のカラーC-MOS カメラを用いた流体密度の画像計測

手法を開発し、密度成層場に噴流が作用した際の海水混合メカニズムについて時空間的に検討した。

そこで本研究では、水理実験により密度成層場に噴流を作用させ、画像解析手法により密度成層場の密度の時空間変化を計測し、密度構造と噴流による海水混合効果について検討することを目的とした。

2. 画像解析手法

流体密度の空間分布の計測には、古城ら⁷⁾と同様にレーザー励起蛍光法（LIF: Laser-Induced Fluorescence）を用いた。この手法は、蛍光剤を溶解させた流体にレーザー光を照射したときに励起される蛍光強度から蛍光染料の濃度分布を計測するものである。本計測手法は前述したように、海水混合の空間変化を面的に捉えることが可能であるとともに、計測器自体が流体運動に影響を及ぼさないという利点を有しており、本研究で扱う噴流の海水混合効果を評価するのに適している。

本研究で実施したLIFの画像解析手法の手順を図-1に示す。蛍光染料にはRhodamine Bを用いた。これは、Rhodamine Bの吸収スペクトルのピーク（550 nm）が本研究で用いるレーザー光の波長（532 nm）に近く発光効率が高いこと、また、照射するレーザー光が緑色であるのに対してRhodamine Bは赤色の蛍光を示すため、得られた撮影画像のRed-RGB値を解析に用いればレーザー光の影響が無視できるという利点がある。

密度成層場の形成には、食塩により密度を調整した高密度水と低密度水を用い、高密度水と低密度水のRhodamine B濃度がそれぞれ20 $\mu\text{g/l}$ と70 $\mu\text{g/l}$ となるようにRhodamine Bを溶解した。これは、事前に実施した実験から、Rhodamine B濃度が10~80 $\mu\text{g/l}$ 程度の濃度域において、Rhodamine B濃度と撮影されたRed-RGB値に線形関係が見られたためである。実験開始時には、レーザーを水面上から照射し、染料の蛍光強度をHDビデオカメラで撮影した。図-2(a)に撮影した元画像を示す。元画像より、Rhodamine B濃度が高い上層が明るく、濃度が低い下層が暗くなっていることが確認できる。その後、元画像からRed-RGB値を抽出した。図-2(b)にRed-RGB値の分布を示す。この画像には、壁面や気泡などに起因する光学ノイズや、光の減衰による偏光が含まれる。そこでこれらの影響を除去するために、前者には半径5 pixelのメディアンフィルターを適用し、後者にはBeer-Lambertの法則を適用した。最後に、Red-RGB値からRhodamine B濃度を計算し、予め求めておいた補正関数によりRhodamine B濃度から塩分に換算し、その後、流体密度を推定した。ここで、本手法では塩分分布をRhodamine Bの蛍光強度から間接的に求めているが、食塩とRhodamine B溶液の

図-1 画像解析による流体密度分布計測の流れ

図-2 画像解析による密度分布の推定手順

シュミット数（動粘性係数と拡散係数の比）が近いため、両者の拡散挙動は同一のものと仮定している。また、Rhodamine Bは塩化物の影響により蛍光強度が低下するため、食塩水に溶解する際には少量のカルキ抜き剤を溶解した。このようにして計測された密度分布を、図-2 (c)に示す。下層において、レーザー光の散乱に起因する筋がみられるが、噴流による流体の混合の様子を面的に捉

表-1 実験条件

Case	噴流密度 ρ_j [kg/m ³]	上層密度 ρ_L [kg/m ³]	下層密度 ρ_H [kg/m ³]	上層厚 h_L [mm]	下層厚 h_H [mm]	躍層厚 h_p [mm]	噴流リチャードソン数 Ri_j
A1	1000						0.287
A2	1005						0.236
A3	1011	1000	1028	65	65	0	0.174
A4	1016						0.123
A5	1022						0.062
B1			1019	40	40	50	0.196
B2			1016	65	65	0	0.166
B3	1000	1000	1016	40	90	0	0.166
B4			1025	90	40	0	0.257

えることができています。

3. 水理実験

水理実験は、図-3に示すような長さ1,800 mm、高さ300 mm、幅250 mmの亚克力水槽を用いて実施した。水槽内に、Rhodamine Bを溶解した高密度水： ρ_H と低密度水： ρ_L を注ぎ、全水深が $H = 130$ mmとなるように密度成層場を形成した。噴流は、密度を調整した流体を貯めたタンクから水中ポンプを用いて水底に設けた放出口から放出することで作用させた。放出口の径は13 mmとし、実験水槽の水底から13 mmの位置に下端を設置した。ここで図-3 (b) に示すように、放出口の先端部から鉛直におろした水底の地点に原点をとり、噴流方向に x 軸を、また、水底から鉛直上向きに y 軸を設定した。水槽の上部からNd:YAGレーザーを2 mm厚のシート状で x 軸方向に照射し、噴流による密度成層場の混合の様子をC-MOSカラーカメラ（SONY社製、HDR-XR520V）で撮影した。撮影された動画から任意の時間の画像を取りだし、前述の画像解析手法により流体密度の時空間変化を計測した。

実験では、作用させる噴流と密度場による混合状況の違いについて検討するため、表-1に示す9通りの条件で実施した。まず、同条件の密度成層場に対して流体密度が異なる噴流を作用させた場合に海水混合効果にどのような違いがあるのかを検討するため、Case Aでは5通りの条件を設定した。さらに、実海域においては海域の環境条件や季節によって上層と下層の層厚などの成層の構造が異なるため、成層場の形状の違いによる噴流の混合効果について検討するために、Case Bでは噴流の流速と密度は同じで成層構造を変化させた4通りの条件を設定した。

ここで、噴流の諸元を表す指標として噴流リチャードソン数： Ri_j を次式のように定義した。

(a) 実験装置

(b) 噴流と密度成層場

図-3 水理実験装置の概要

$$Ri_j = \frac{\{(\rho_H - \rho_j)\}gD_j}{u_j^2} \quad (1)$$

ここで、 ρ_H は下層の流体密度、 ρ_j は噴流の流体密度、 D_j は放出口の高さ、 u_j は噴流の流速である。

4. 実験結果および考察

(1) 噴流による密度場の変化

図-4に、Case A1の成層場の混合の様子を示す。同図 (b) より、放出口から放出された噴流は浮力の影響に

図-4 噴流による密度場の混合の様子 (Case A1)

より徐々に上昇し、躍層間で激しく混合している様子が確認できる。その後、同図(c)より、上層と下層の流体を混合しながら躍層間を冲向きに進んでいる様子が確認できる。以上より、本画像計測手法で噴流による成層場の海水混合を評価することが可能であると言える。

(2) 噴流の違いによる混合特性

同条件の密度場に対して異なる条件の噴流を作用させた場合のCase Aに着目する。噴流を作用させてから120秒経過後の各ケースの混合状況を図-5に示す。 Ri_j が最も大きいCase A1が良く混合しており、 Ri_j が小さくなるにつれて混合具合も穏やかになる傾向が見られる。これは、 Ri_j が小さい場合は噴流流体と下層流体との密度差が小さいため、噴流に作用する浮力の影響が小さくなり成層場の混合効果も小さくなったためと考えられる。

次に、流体密度が $\rho_H/\rho_{H0} < 0.8$ (ρ_{H0} は初期の下層流体密度)となる領域を混合面積： E と定義し、各ケースの混合面積の時間変化を図-6に示す。ここで、縦軸の混合面積は撮影領域の面積： A で無次元化している。同図より、混合面積は噴流を作用させてから線形的に増加し、約10秒経過後には混合面積の時間変化がほぼ定常状態になっていることが確認できる。また、 Ri_j が大きいほど定常状態となった時の混合面積も大きくなる傾向が見られた。

続いて、撮影領域内の水平平均密度分布から次式のように定義したポテンシャルエネルギー： Φ により成層場の混合効果について検討する。

$$\Phi = \int_0^w \phi dx \cdot d \quad (2)$$

ここで、 w は撮影領域の幅、 d は水槽の奥行き、 ϕ は x 軸上の任意点における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であり、次式で表される。

$$\phi = \int_0^H \{(\bar{\rho} - \rho) \cdot gy\} dy \quad (3)$$

ここで、 g は重力加速度、 ρ は任意点における流体密度、 $\bar{\rho}$ は x 軸上の任意点における密度の鉛直方向の平均値で、

図-5 噴流作用 120 秒後の Case A の混合の様子

図-6 Case A の混合面積の時間変化

 図-7 Case A のポテンシャルエネルギーの変化量 $\Delta\Phi/\Phi_0$ とリチャードソン数 Ri_j の関係

$$\bar{\rho} = \frac{1}{H} \int_0^H \rho dy \quad (4)$$

である。 ϕ 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あり、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。

噴流が作用することによって初期のポテンシャルエネルギー Φ_0 から変化した量を $\Delta\Phi (= \Phi_0 - \Phi)$ として、 $\Delta\Phi$ と Ri_j との関係を図-7に示す。ここで、 $\Delta\Phi$ は初期の Φ_0 で無次元化している。同図より、 Ri_j が0.2以下であれば $\Delta\Phi$ はほぼ一定の値を取り、 Ri_j が0.2より大きな噴流を作用させると $\Delta\Phi$ が増加するような傾向が見られた。このことから、 Ri_j がある値より小さい範囲は成層場のポテンシャルエネルギーの変化量は同程度であるが、ある値を超えると Ri_j に応じて成層場が混合しやすくなることを意味している。

以上より、 Ri_j に対する混合面積とポテンシャルエネルギーの変化量で異なる傾向が見られたものの、海水混合を促進するためには噴流の Ri_j を大きくすることが望ましいということが明らかとなり、 Ri_j で密度成層場の混合効果を整理することが可能であることが示唆された。ただし、本研究の実験ケース数では定量的な結論には至らず、今後は流速なども変化させた実験ケースを実施することによる詳細な検討が必要であるといえる。

(a) Case B1

(b) Case B2

(c) Case B3

(d) Case B4

図-8 噴流作用 120 秒後の Case B の混合の様子

(3) 成層場の形状の違いによる混合特性

形状が異なる成層場に対して同条件の噴流を作用させたCase Bに着目する。噴流作用120秒後のCase Bの混合状況を図-8に示す。成層の上層と下層の間に躍層を有するCase B1は噴流密度に近い上層まで上昇するため躍層間での混合が小さい。一方、下層厚が厚いCase B2やB3は下層厚の薄いCase B4に比べて発達領域が広範囲に形成されていることが確認できる。

続いて、図-9に $x = 240$ mm地点における水柱ポテンシャルエネルギー： ϕ の時間変化を示す。ただし、縦軸 ϕ は初期水中ポテンシャルエネルギー： ϕ_0 で無次元化している。同図より時間の経過とともに徐々に水柱ポテンシャルエネルギーが小さくなっていることが確認できる。

図-9 $x=240\text{ mm}$ 地点における水柱ポテンシャルエネルギー ϕ の時間変化

ただし、長時間噴流を作用させていると下層厚が薄い Case B1, B4よりも、下層厚が厚い Case B2, B3の方が混合効果が大きくなる傾向が見られる。これは Case B1, B4のように下層厚が薄い場合は噴流の発達領域が放出口近傍に限定されるため、噴流の場を乱す効果が低下したためであると考えられる。このことから、同条件の噴流で効果的に海水を混合するためには、噴流の発達領域が広範囲に及ぶように作用させることが重要であると言える。

5. 結論

本研究は、密度成層場における噴流の海水混合効果を評価するために、染料を用いた流体の可視化による画像解析手法を用いて、同条件の成層場に対して異なる噴流を作用させた場合と異なる形状を有する密度場に対して同条件の噴流を作用させた場合の混合効果の違いについて水理実験により検討したものである。本研究により得

られた結論は以下の通りである。

- (1) 本研究で用いた可視化手法により、成層場に噴流を作用させた場合の流体の混合効果を時空間的に評価することが可能となった。
- (2) 噴流による流体混合効果をポテンシャルエネルギーで整理した結果、混合効果は噴流リチャードソン数により整理できる可能性があること、また、層厚の異なる成層場に同条件の噴流を作用させた場合は発達領域が広範囲に及ぶように噴流を作用させることが効果的であることが確認できた。

参考文献

- 1) 遠藤徹, 重松孝昌: 港湾海域における底質の酸素消費特性の季節変化に関する研究, 海岸工学論文集, Vol.56, No.2, pp.1051-1055, 2009.
- 2) 佐伯信哉, 岡田修平, 中村孝幸: 波浪エネルギーを利用した鉛直混合促進型護岸の密度成層場における効果について, 海洋開発論文集, Vol.25, pp.759-764, 2009.
- 3) 大村智宏: 漁港における海水交換型構造物の開発について, 海洋開発論文集, Vol.26, pp.13-18, 2010.
- 4) 遠藤徹, 水田圭亮, 臼井諒, 田中宏史, 重松孝昌: 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, 海洋開発論文集, pp.1117-122, Vol.20, 2010.
- 5) 角屋浩二, 石川健二, 金山進, 中瀬浩太, 小谷拓: 流水発生装置による閉鎖性水域の密度成層の緩和について, 土木学会論文集, Vol.54, pp.1021-1025, 2007.
- 6) 北真人, 黒川岳司: 噴流型流動促進装置導入による貯水池内の流況と水質の変化, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.68, No.4, pp.1663-1668, 2012.
- 7) 古城鉄也, 遠藤徹: 噴流による密度成層の緩和に関する可視化実験を用いた検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.1226-1230, 2013.

A STUDY ON WATER MIXING EFFECT OF JET IN DENSITY STRATIFIED FIELD USING A LIF METHOD

Toru ENDO and Tetsuya KOJO

Sea Bottom environment in ports and harbors becomes hypoxic or anoxic condition by formation of density stratification during summer season. It is necessary to understand the mixing effect of jet in density stratified field before applying water mixing technologies in actual site.

In this study, we carried out laboratory experiments on the water mixing under density stratified field and we measured the spatial distribution and temporal changes of density by using a LIF method. The results of this study were as follows: (1) It is suggested the possibility that the mixing effect will be able to be prediction by Richardson number about a jet acting on the density stratified field. (2) It is found that to supply a jet in such a way that the extent of the impact of jet becomes widely was effective for the relaxation of density stratified field.