

密度成層場における VCF 堤体誘起流の挙動に関する実験

Experimental Study on Behavior of Vertical Circulation Flow Generated by VCF-Breakwater under Density Stratified Field

遠藤 徹¹・重松孝昌²

Toru ENDO and Takaaki SHIGEMATSU

We have developed a new breakwater, named as VCF-Breakwater for generating vertical circulation flow which transports oxygen-rich surface water into the anoxic sea bottom. In this study, the behavior of the vertical circulation flow was measured using dye and PIV technique and salinity profiles were also measured by salinometers. Based on the experimental results, the effectiveness of the VCF breakwater is discussed.

1. 緒 言

臨海都市港湾海域では、密度成層が発達する夏季になると表層から底層への酸素供給が低下するとともに、水底における酸素消費が増加することによって底層が貧酸素化する。底層に貧酸素水塊が発生すると底生生態系に直接的な影響を及ぼす。また、気象擾乱の影響を受けてこの貧酸素水塊が湧昇されるとその影響は広範囲に拡がり、浮遊生態系にも影響を及ぼす。このような背景の下、貧酸素海域の溶存酸素環境の改善に向けて、表層水供給装置（小松ら, 1999）、鉛直混合促進装置（金山ら, 2004）、高濃度酸素水発生装置（片倉ら, 2006）等の開発が行われており、著者らも自然エネルギーを用いて酸素を豊富に含んだ表層水を沖側底層へ輸送して鉛直循環流を誘起することができる堤体（以下、VCF 堤体と称す）の開発を行っている（重松ら, 2003(a)）。

VCF 堤体は、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（図-1 参照）。本 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、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。

均一密度場における VCF 堤体による誘起流動の特性に関しては、数値計算および水理実験によって検討が行われ、VCF 堤体の有効性が検証されている（Endo ら, 2006）。さらに、重松ら（2003(b)）は、室内実験によって密度成層場における VCF 堤体の効果を検討してその

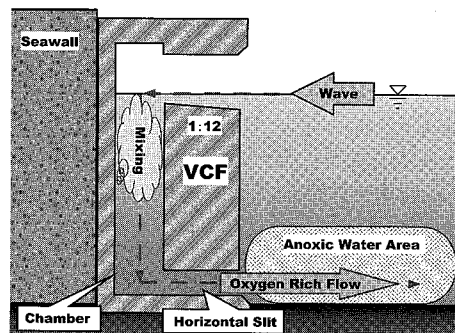


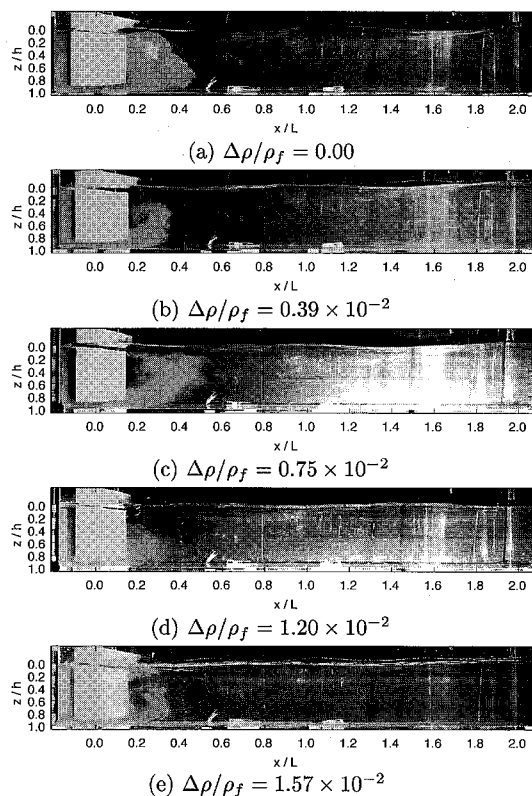
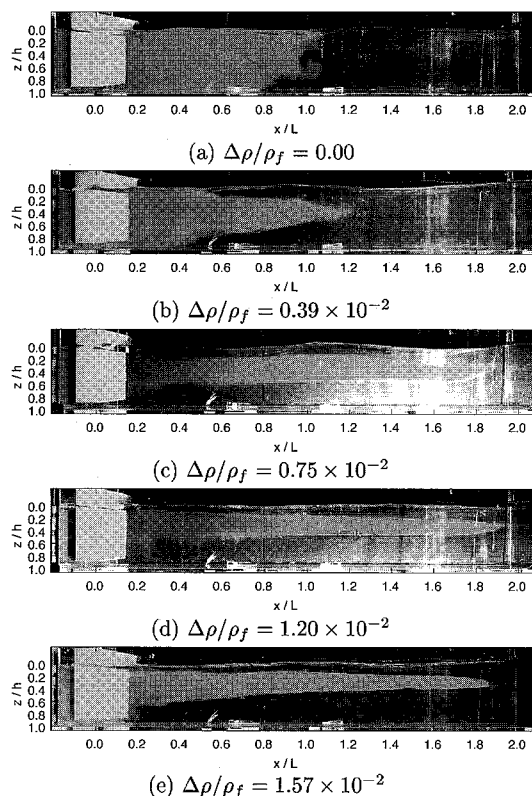
図-1 VCF 堤体の概念図

有効性を示しているが、密度成層を破壊するメカニズムの詳細については十分に解明できていない。本研究では、染料を用いた可視化実験および PIV 画像流速計測法を用いて、VCF 堤体誘起流による密度成層場の混合過程について詳細な検討を行い、密度成層場における VCF 堤体の有効性について再検討することを目的とする。

2. 実験概要

実験は、図-2 に示すような長さ 4.0 m、高さ 0.5 m、幅 0.25 m のアクリル水槽内に VCF 堤体の模型を設置して実施した。密度成層は、予め密度を測定しておいた塩水を水深 $h=12.0$ cm まで注ぎ、その上に淡水をゆっくりと注いで全水深が $h=15.0$ cm となるようにした。表-1 に、初期の表層と底層の密度差 $\Delta\rho/\rho_f$ および波浪条件を示す。波浪条件は、夏季の大阪湾湾奥部の水深 10 m の海域における実測データを参照して、周期 $T=0.5$ s、入射波高 $H=0.75$ cm、波長 $L=38.6$ cm、波形勾配 $H/L=0.02$ の規則波とした。また、表層と底層の密度差および密度層厚は、夏季の大阪湾港湾エリアにおける塩分と水温の実測データを参照して、 $\Delta\rho/\rho_f=0.0, 0.39\times 10^{-2}, 0.75\times 10^{-2}, 1.20\times 10^{-2}, 1.57\times 10^{-2}$ とした。実験開始前の密度の鉛直プロファイルの一

1 学生会員 工(修) 大阪市立大学大学院 工学研究科都市系専攻 日本学術振興会特別研究員(DC2)
2 正会員 工(博) 大阪市立大学准教授 工学研究科都市系専攻

図-4 染料の空間分布 ($t/T=20$)図-5 染料の空間分布 ($t/T=80$)

に鉛直混合が促進され、その範囲は $x/L=0.4 \sim 2.0$ に及ぶが、密度成層が比較的強固な場合には、鉛直混合は堤体の極近傍に限られ、広範囲な鉛直混合は期待できないことが明らかになった。ただし、下部通水部から底層沖へと輸送された表層水は、密度躍層のすぐ下に新たな層を形成して沖側に伝播するため、中層への酸素供給には資することが期待される。

(2) VCF 堤体近傍の流速場

PIV によって計測された遊水室内および VCF 堤体前面域の流速場を図-6 に示す。図-6 は、下部通水部から流れが発生し始めて堤体近傍前面域における流体運動が定常状態に達したと考えられる 80 周期後の一周期平均流速のベクトル図を示している。

図-6(a)によると、均一密度場では、表層水は岸向き平均流を有し、遊水室内で混合された後に下部通水部から沖側底層へ輸送され、その後、水底直上を沖向きに水平に流れて $x/L=0.6$ あたりで上昇しており、堤体前面沖側領域に広範囲にわたって鉛直循環流が形成していることが確認できる。すなわち、均一密度場の場合、堤体前面域では底層で沖向きの二層を成した流体構造が生成されることになる。

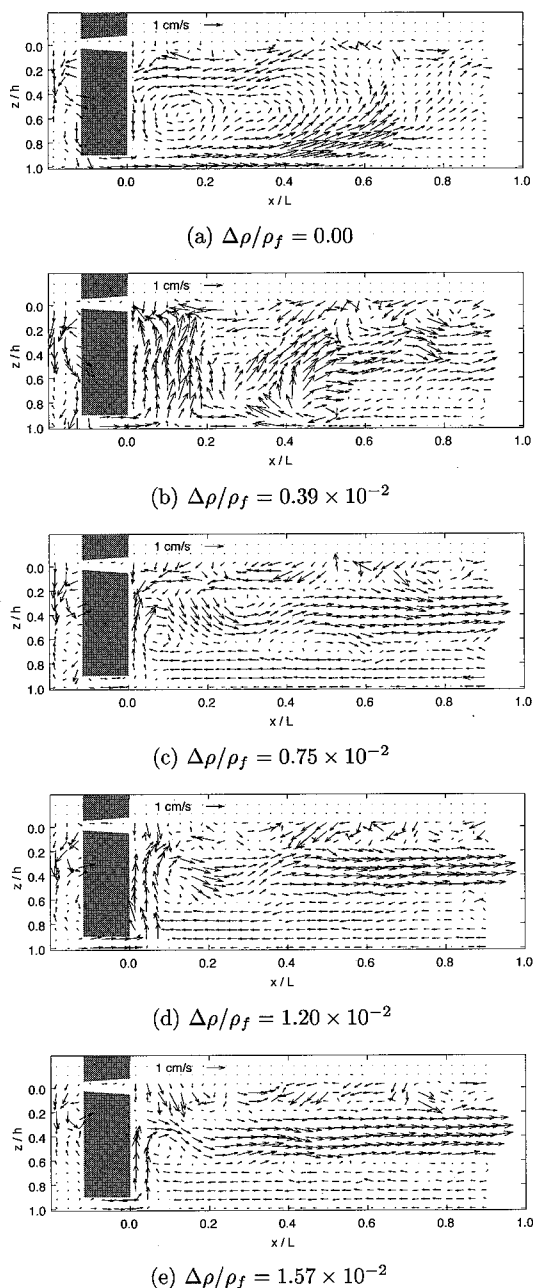
一方、密度成層場では、浮力の影響により堤体近傍で

上昇流が発生していることが、図-6(b)～(e)からわかる。そのため、下部通水部より沖側底層へと輸送された表層水は密度界面まで上昇し、密度界面近傍に層厚を有して沖側へと輸送されることが確認できる。また、この中層沖向きの平均流の発生にともなって、底層領域には岸向きの流れが誘起される。すなわち、密度成層場における VCF 堤体前面域の平均流動場は三層構造を有することがわかる。

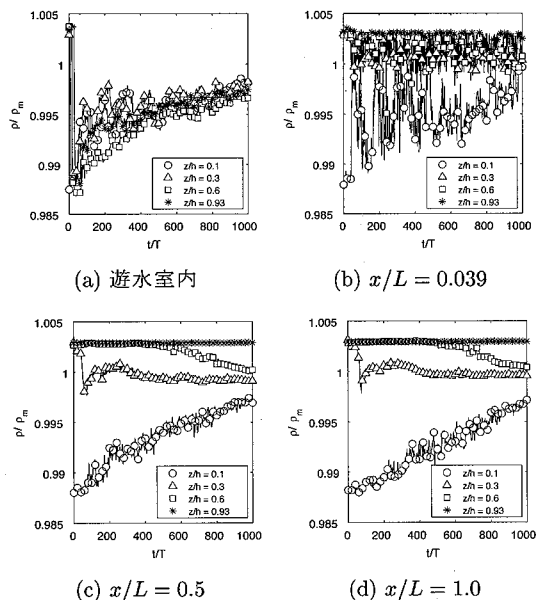
以上のように、密度成層場における VCF 堤体による誘起流の挙動について検討した結果、密度成層が強固な場合には、本 VCF 堤体の成層破壊効果は期待できないことがわかった。ただし、密度成層が強固な場合でも、底層における流動を促進する効果は有するといえる。

(3) 密度の時間変化

成層強度が最も強い $\Delta\rho/\rho_f=1.57 \times 10^{-2}$ の場合の密度の時空間変化を図-7 に示す。縦軸は、密度の空間平均 ρ_m を用いて無次元化しており、 $\rho/\rho_m=1.0$ となると完全に鉛直混合が行われたことを意味する。図-7(a)は遊水室内の密度の時間変化を示したものであるが、いずれの水深においても実験開始直後に密度が低下し、その後徐々に混合する過程が示されている。実験開始直後の急激な相対密度 ρ/ρ_m の低下は、この期間に上部通水部か

図-6 一周期平均流速ベクトル図 ($t/T=80$)

ら遊水室内に流入してくる水塊が淡水であり、これが遊水室内で混合されるためである。その後の ρ/ρ_m の増加は、堤体の前面近傍で表層水と下部通水部から沖側に輸送された水塊の一部が混合されて密度が増加し、この水塊が上部通水部から遊水室内に流入してくるためである。図-7(b)において $z/h=0.1$ の密度が大きく変動しているのは、堤体前面の水面近傍でこのような激しい混合が行われていることを表している。遊水室内で混合されて下

図-7 密度の時空間変化 ($\Delta\rho/\rho_f=1.57 \times 10^{-2}$)

部通水部から沖側に放出された水塊は、密度界面下に供給され続けるため、密度界面下にはよく混合した水塊が存在することになる。そのため図-7(c)および(d)で $z/h=0.3$ における ρ/ρ_m が最も速く1に近づく。この層に供給される全水量は時間の経過とともに増加するため、この混合層厚は時間の経過とともに増大し、やがて $z/h=0.6$ においても相対密度が1に近づくようになる。

図-8に、堤体から1波長沖における密度の時間変化を示す。いずれの初期密度成層強度においても、 $z/h=0.3$ における密度混合が最も速く、次いで $z/h=0.6$ 、 $z/h=0.1$ の順に混合が進むことがわかる。長時間経過すれば $z/h=0.93$ においてもやがて混合することがわかる。この水底直上における密度が混合し始める時間は、初期の密度成層強度が小さいほど速い傾向が見られ、初期密度界面下に供給される混合水塊の供給速度は、初期密度強度が小さいほど大きいと推察される。そこで、下部通水部から放出される水塊の流速と成層強度との関係を図-9に示す。図-9中の水平平均流速は、下部通水部における水平流速を $t/T=80 \sim 100$ 間で時間平均した $\langle u \rangle$ を水粒子速度 ($v_0=\pi H/T$) で正規化している。図-9によれば、 $\Delta\rho/\rho_f=0.75 \times 10^{-2}$ でずれが生じているが、おおむね初期密度強度が小さければ下部通水部の平均流速が大きくなるという相関が見られた。ただし、本実験は閉じた系における長時間実験であるため、実海域において本実験で得られたように水底直上の水塊が表層水と混合するとは限らない。

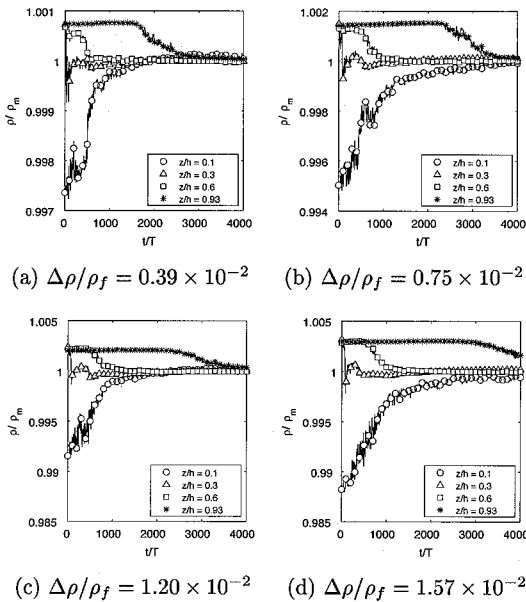


図-8 1波長沖の密度の時空間変化

4. 結 言

本研究は、VCF 堤体によって誘起される鉛直循環流の流動特性に及ぼす密度成層の影響を詳細に検討したものである。本研究結果によると、下部通水部から底層の高密度水塊中に放出された低密度の表層水は、浮力によって放出直後に密度界面まで上昇し、界面下を沖側へと伝播する層を形成する。その結果、中層の沖向き流動によって底層部には岸向き流動が誘起され VCF 堤体の沖側には三層構造を有するため、VCF 堤体の誘起流による密度成層の破壊効果は確認できなかった。

VCF 堤体を実海域に設置することを想定すると、塩分差が 10 % 程度以下の塩分成層場であれば、VCF 堤体は十分な鉛直混合機能を有し、底層貧酸素化の抑制に寄与することが期待されるが、強固な成層が発達した場合には、下部通水部から沖側に放出される水塊は中層部に供給されるため、開発当初に期待していた効果が発揮されないと言わざるを得ない。しかしながら、適用時期を

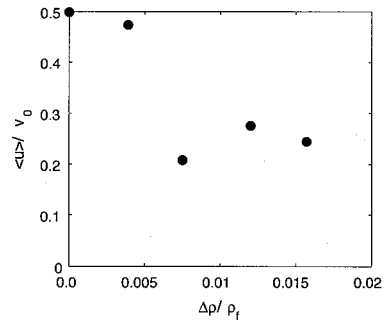


図-9 下部通水部の水平平均流速と密度強度の関係

考慮すれば堤体前面域に発達する鉛直循環流により夏季の密度躍層の形成自体を阻害できる可能性があるため、VCF 堤体の適用にあたっては、長期的な効果について今後検討する必要があるといえる。

参 考 文 献

- 片倉徳男・村上和男・高山百合子・上野成三(2006): 酸素飽和度 200 % の高濃度酸素水発生装置を利用した底質浄化効果と最適放流量の設計方法, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 1176-1180.
- 金山 進・佐々木洋之・佐々木淳・岡田知也・春谷芳明・城野清治・廣海十朗・中瀬浩太(2004): 密度流を利用した底層貧酸素対策装置の効果とその再現計算, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 1166-1170.
- 小松利光・岡田知也・中村由行・中島信一・長谷部崇・藤田和夫・井芹 寧(1999): 閉鎖性水域底層への表層水供給による水質改善効果, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 1111-1115.
- 重松孝昌・池田憲造・小田一紀(2003(a)): 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, VII-378, pp. 57-68.
- 重松孝昌・池田憲造・小田一紀・小池敏也・延廣玲子・遠藤徹・藤田 孝・戸川 進(2003(b)): 密度成層場における鉛直循環流誘起堤体の効果に関する研究, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 1206-1210.
- Endo, T. and T. Shigematsu (2006): Numerical and Experimental Study of New Breakwater Promoting Vertical Circulation Flow, Proceedings of the 30th International Conference, Vol. 5, pp. 4779-4791.