

河口域のロック周辺における密度流の構造

和田 清*・Harry Yeh**

1. 緒 言

船舶航行用のロック（閘門）は、本来の機能に加えて魚類等の遡上・降下用バイパスや遊泳力の弱い浮遊生物の輸送経路としての機能も兼ね備えている。このような人工的な環境改変によって流れ場がどのように変化し、その流れ場の構造が生物の分布・移動・定着とどのように関わっているかを明らかにすることは、河口域の生態環境場を考える上できわめて重要である。

河口域周辺に形成される水塊の流動機構は、主に熱塩密度流によって支配されており、混合型の河口密度流、塩水楔や内部波、密度噴流型の問題として研究されている (Turner, 1973; 玉井, 1980)。また、ロック内部の二層密度流を lock-exchange problem として取扱った数多くの成果がある (Simpson, 1982)。しかしながら、それらの流動場については、一様幅の実験水路を用いたロック内部などの鉛直 2 次元的な議論が多く、ロック出入口周辺に発生する複雑な渦構造を含めた密度流の 3 次元的挙動についてはほとんど明らかにされていないのが現状である。さらに、水理実験成果を現地にもどのように反映させるかという scale effect の課題も重要である。水理実験では、Richardson 数、Reynolds 数 (Re 数) および Schmidt 数を一致させることが要求され、それらの影響については、塩水楔における優れた研究成果がある (Arita and Jirka, 1987)。また、Re 数が 10^3 以上の現象では、Gravity Current の定性的な性質は Re 数にほとんど無関係であるという指摘もなされている (Simpson and Britter, 1979)。米国ワシントン州シアトル市には、ワシントン湖（淡水）と Puget Sound（塩水）を結ぶ人工運河に大小 2 つのロック (Hiram M. Chittenden Locks, 大ロック：長さ 250 m, 幅 25 m, 水深 16 m) が設置されている。第二著者は、米国工兵隊と協力して密度流に関する現地調査を含めた一連の研究を継続して行っている (Mausshardt, et al., 1994)。

このような背景から、本研究は、生物の分布・移動に

重要な役割を果たす、ロック周辺の 3 次元的な密度流の構造を明らかにする第一歩として、二層密度流界面の分布形状の挙動に主眼を置き、水理実験に基づく流れの可視化手法によって、ロック出入口周辺における界面混合の素過程と渦構造を明らかにしようとしたものである。

2. 実験方法

実験は、米国ワシントン大学土木工学科の両面ガラス張りの鋼製水槽（水路長：3.0 m, 側壁高：0.9 m, 幅：1.2 m）内で行われた。図-1 に示したように、水槽内には、アクリル製の隔壁付きロック模型（幅 22 cm, 水路長 180 cm）がガラス側壁に隣接して設置されている。ゲート内部には、染料（フローレッシン）で着色された塩水が満たされている。アルゴンレーザー (Coherent Innova 製, 4 W) から出た光線は、約 1200 Hz で高速振動する resonant scanner によって薄いシート状のスリット光源（厚さ：約 2 mm）に置換される。ゲートを開けた後、塩水は流出しレーザー光線に接すると黄色に発光するので、スリット光源と垂直な位置にカメラとビデオを設置し（図中、(A) (B) (C) の位置）、隔壁端（図中、xyz の原点）周辺の密度流の 3 次元的な挙動が撮影できるように工夫した。なお、撮影断面の座標（レーザーシートの位置）は、隔壁端底面を原点にした場合、 $x = -25 \sim 15$ cm, $y = -4.5 \sim 19.5$ cm および $z = 0.5 \sim 4.0$ cm の範囲

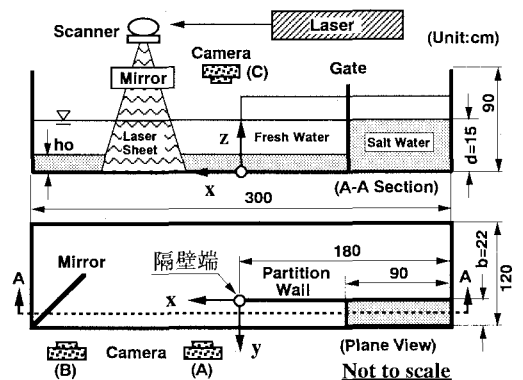


図-1 実験装置の概要

* 正会員 工博 岐阜高専助教授 環境都市工学科
 ** 正会員 Ph.D. University of Washington, Associate Professor,
 Department of Civil Engineering

で変化させた計 11 断面である。実験ケースは、隔壁を延長して一様幅 (22 cm) の 2 次元水路とした場合、ロック外側水域の底層 (層厚: h_0) がロック内部と同密度の塩水で覆われた場合 (Internal Bore: $h_0=0.5\sim 2$ cm), $h_0=0$ の Gravity Current (重力流) の場合を含めた計 8 種類である。なお、塩水の密度 ($\rho=1002$ kg/m³) および静水深 ($d=15$ cm) は一定としており、密度フルード数 F_d は 0.45~0.61 の範囲である。

3. 実験結果および考察

(1) 淡水侵入による密度界面の低下

写真-1(a) (b) は、ロックを流出した直後の塩水の平面的な広がり経過を示したものであり、撮影水平断面の座標 $z=4$ cm ($z/d=0.27$) における Internal Bore ($h_0=1$ cm) の場合である。なお、写真中の数値は、ゲートを開けた時点をもととした場合の経過時間である。隔壁端を流出した塩水の補償流として逆向きに淡水がロック内部へ流入しようとするので、同写真 (a) からわかるように、隔壁端周辺には塩水の広がり (白い部分) に鋭い楔を打ち込んだように淡水が侵入し (写真中、太矢印)、この領域では界面の位置が著しく低下していることを意味している。時間の経過とともにその領域は拡大されやがてガラス側面に達していることがわかる。その淡水侵入 (fresh water intrusion) は、水路軸に対して隔壁端部から θ の角度で斜めに流入するので、2 次元水路の場合のように、密度先端部の軸とその背後に生じる渦 (roll-up motion) の主軸は平行ではなく、 $\theta=30^\circ$ の角度で交差している。また、ロック出口中央付近 (写真中、★印) に

は隔壁端部からロック内部へ流入する淡水によって生じた擾乱が局部的に発生している。このように、一様幅の水路から片側だけ開放された領域 (半無限領域に相当) に流出する密度流では、側方からの淡水侵入の影響が全体の現象を大きく支配しており、密度フロント先端部の背後において密度界面の位置が低下することが大きな特徴である。

この界面低下の程度を一様幅の 2 次元水路の結果と比較してみよう。まず、流れと平行な x - z 断面内 (水路幅中央) における 2 次元水路の結果を写真-2 に示した。(a) は Gravity Current および (b) が Internal Bore の場合である。同写真から、Gravity Current の先端部分には、小規模の渦が発生する乱れた状態であるのに対して、Internal Bore の変化は非常に滑らかである。このような両者の差異は、Mausshardt et al. (1994) によって、Internal Bore の場合、2 次元の Kelvin-Helmholtz roll に近い規則的な形態で碎波し、Gravity Current は 3 次元の形態を示すより複雑な碎波過程を含むこととして知られており、これらの傾向は、本実験結果からもうかがうことができる。また、Gravity Current の先端には、淡水が塩水底部を這うようにして侵入する連行過程も見受けられる。いずれの場合においても、一様幅水路における密度界面の位置は、水深の約半分程度に限定されているといえる。

一方、3 次元の広がりをもつ場合が写真-3(a) (b) に示されており、ロック内の隔壁側に最も近い断面内 ($y/d=0.17$) のものである。写真-2 と比較すれば明らかなように、Gravity Current の場合には、①密度フロント先端部領域の縮小化、②その背後の界面位置の低下 (h_{min})、③隔壁端付近における密度フロントの急峻な勾

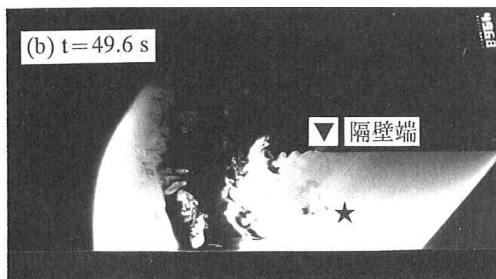
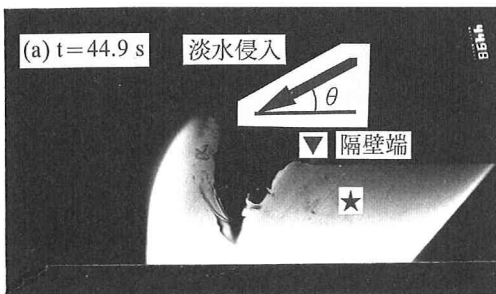
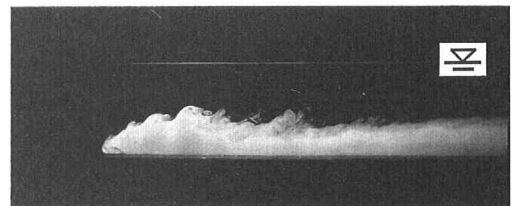
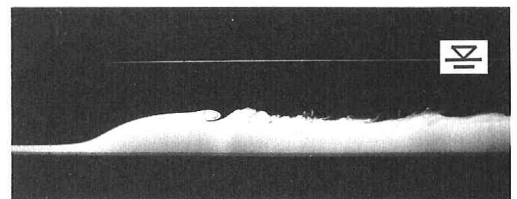


写真-1 Internal Bore の平面的な広がり ($z/d=0.27$)



(a) Gravity Current ($t=50.2$ s)



(b) Internal Bore ($t=50.2$ s)

写真-2 二次元水路における密度流の界面形態

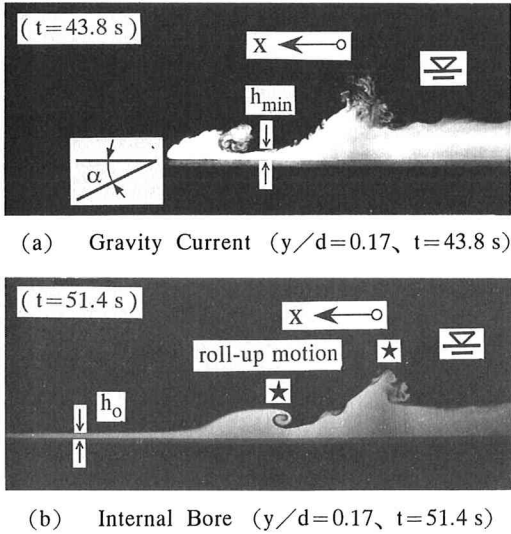


写真-3 隔壁を通過した後の密度流の界面形態

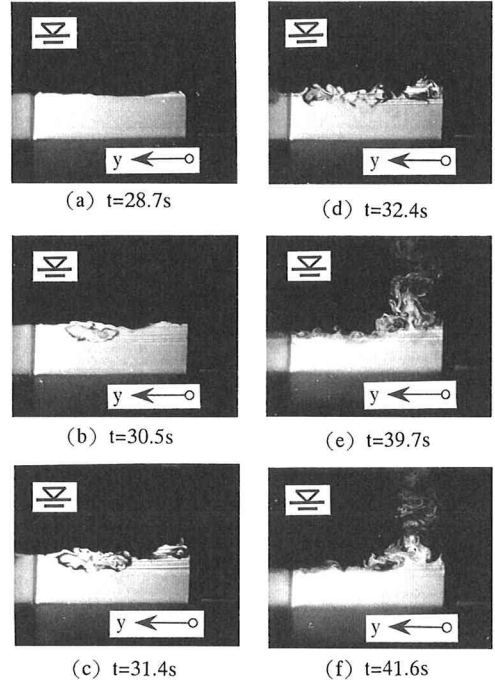


写真-4 ロック内部の界面混合形態

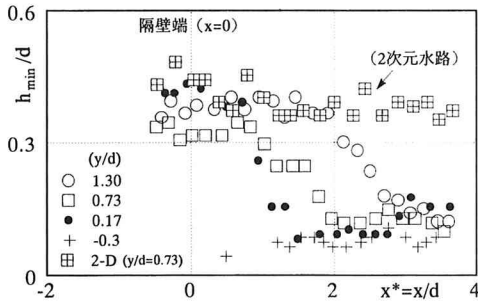


図-2 先端部背後に生じた界面低下量 (Gravity Current)

配, ④水面付近にまで達する界面の巻上げなど, 多くの点で差異がみられる。Internal Bore では, 上述の傾向とほぼ同様であるが, Gravity Current の場合に比べて, 先端部背後や隔壁端付近の界面巻上げ時 (写真中★印) に生じた roll-up の渦構造が滑らかである点が特徴である。このように, 3 次元的広がりをもつ場合, 密度フロント先端部背後には 2 次元の場合よりも密度界面はさらに低下し, 逆に隔壁付近では界面の巻上げの影響が水面付近にまで達するなど, 密度界面の勾配が空間的に大きく変化することがわかる。

ロック外に流出した塩水は, 淡水が楔状に侵入することによって密度流先端部背後の密度界面が著しく低下する。この界面低下量 (h_{min}) と密度先端部の位置 (x) の関係を Gravity Current の場合について示したものが図-2 であり, 2 次元水路の結果も併記されている。隔壁端 ($x=0$) を通過した Gravity Current は, 淡水の侵入の経過とともに隔壁に近い領域から順に塩水内部にまで界面低下の影響が及び, やがてガラス側面 ($y/d=1.47$)

に達した後も広い範囲で長時間, 密度界面が著しく低下した領域が継続して形成されることがわかる。また, この低下量は, 2 次元水路の場合や先端部が隔壁を通過する前の高さ比べて, 半分以下にまで低減している。

(2) 密度界面の巻上げと混合過程

ロック内部においても, 隔壁付近では界面の巻上げの影響が水面付近にまで達することが観察された。流れに垂直な $y-z$ 断面内において, Internal Bore ($h_0=0.5$ cm) が隔壁端部を出る直前 ($x=-5$ cm) のロック内部における連続記録を示したものが写真-4 である。なお, 写真中, 右側が隔壁, 左側がガラス面である。水路幅方向にほぼ様な高さの界面が形成された後 (写真 (a)), 断面中央付近の密度界面付近に偏平な楕円状の乱れがみられるが (写真 (b) (c)), これは密度流の先端部背後に生じた渦 (roll-up motion) が可視化されているものと思われる (写真-2 (b) および 3 (b) 参照)。また, 断面右側 (隔壁側) にも乱れが発生しており (写真 (c) (d)), 隔壁端外側から流入する淡水によって界面に擾乱が生じたものと推察される。さらに時間が経過すると, 写真 (e) (f) のようにその擾乱は成長・増大して, 水面付近にまで達するほど界面を巻上げる。しかし, 断面左側では顕著な巻上げは発生しておらず, この界面の巻上げは水路幅中央までの隔壁側に限られており, 隔壁端に発生した剥離渦の強さが水路断面内で不均一な分布をしていることを示している。なお, ロック内部の奥まった位置 ($x=-25$

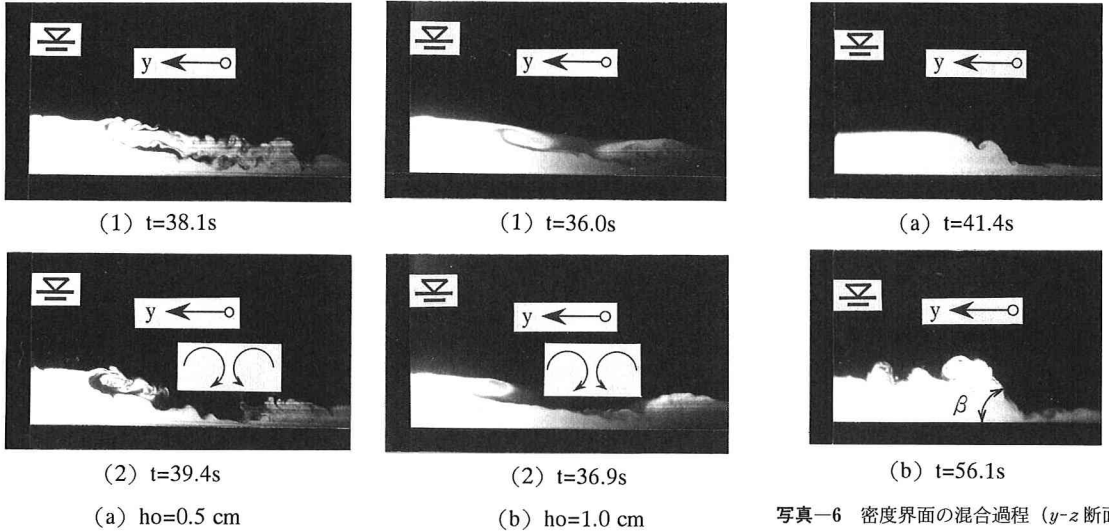


写真-5 ロック外の密度界面の混合過程 (Internal Bore)

写真-6 密度界面の混合過程 (y-z 断面)

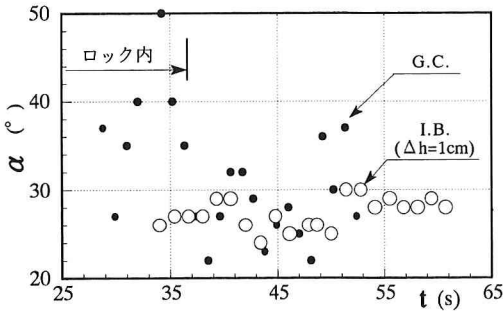


図-3 密度界面の角度 α の時間変化 (x-z 断面)

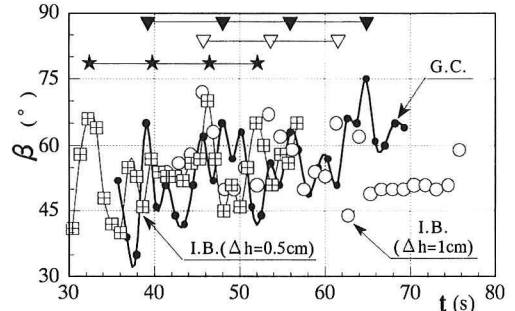


図-4 密度界面の角度 β の時間変化 (x-z 断面)

cm)における界面の巻上げは、同様に隔壁側から水路幅中央までの範囲に限定されていることが確認されている。

一方、密度流が隔壁端から出た後の位置 ($x=15$ cm) における、同様な $y-z$ 断面内の Internal Bore の挙動が写真-5(a: $h_0=0.5$ cm) および (b: $h_0=1$ cm) に示されている。ロックを出た Internal Bore は、片側の拘束がなくなるので、横断方向に密度界面の勾配が生じていることがわかる。さらに、写真-5(a) では、写真-4でも見られたように、密度流の先端部背後に生じた渦 (roll-up motion) が可視化されており、その中心がやや外側に偏向している。その後、淡水が塩水塊を巻き込みながら、密度界面の位置が低下していることがわかる。また、左側 (ガラス面) に渦が一部残って可視化されていることは、前述した roll-up motion の主軸が水路軸と垂直ではなく斜めに傾いていることと関連している。同じ Internal Bore でも、 $h_0=1$ cm の場合には、写真 (b) のよう

に、淡水が塩水塊に食いつくようにして広がる形態 (写真中、矢印) が明瞭に現われている。

(3) 密度界面における渦発生メカニズム

一般に、不均質な流れ場では等圧面と等密度面は一致せず、密度界面に循環 (あるいは渦度) を発生させる潜在的な力をもっている。その強さは、密度勾配 $\nabla\rho$ と圧力勾配 ∇P の外積 ($\nabla\rho \times \nabla P$) に比例する『Baroclinic Torque』として知られている (Yeh, 1991)。密度勾配が急変するところでは、常に渦を発生させるメカニズムが作用するといえる。

写真-3 に示した密度流 (Gravity Current, Internal Bore) の $x-z$ 断面形状 (流れ方向) に着目し、その先端部における密度界面の勾配 ($\tan \alpha$) の基本となる、密度界面と水平面とのなす角度 α (写真-3(a) 参照) の時間的な変動を示せば図-3 のようである。Internal Bore の場合には、その角度 α は $25\sim 30^\circ$ のほぼ一定値であり、界面勾配は時間経過によってほとんど変化しない。一方、

Gravity Current の場合は、Internal Bore に比べてその変動幅が大きいがわかる。この変動の大きさは、密度界面上で発生した剝離渦の時空間スケールとも密接に係わっているものと考えられる。すなわち、前述したように、Internal Bore の場合には、密度界面の勾配がほとんど一定で変化しないので、密度先端部の渦発生が安定して行われ、その結果、roll-upされた渦構造は非常に滑らかであり、2次元的な Kelvin-Helmholtz roll に近い碎波形態であったものと推察される。逆に、Gravity Current では、密度界面の勾配が常に変動しているため、渦の生成力が不規則に増減し、種々の渦スケールが発生する乱れた形態を示すものと考えられる。

また、流れ方向に垂直な y - z 断面における同様の整理を試みれば、図-4 のようである。ただし、塩水が隔壁端を通過した直後 ($x=2$ cm) の、密度勾配が急変する場合である。なお、写真-6 には、Internal Bore ($h_0=1$ cm) の場合における急峻な密度界面に発生した代表的な渦列が可視化されており、同写真 (b) のように、この密度界面と水平面とのなす角度を β としている。同図から、Gravity Current と Internal Bore、両者ともにその変動幅が大きく、ほとんど $\beta > 45^\circ$ の急な界面勾配を繰り返していることがわかる。この振動は界面に発生した剝離渦の周期とも密接に関連している可能性がある。図中、▼ ★ ▽ 印はそれぞれ Gravity Current と Internal Bore ($h_0=0.5, 1$ cm) の β の変動において、主要な最大値を記録した時間間隔を示しており、0.10~0.15 Hz の周波数をもつ比較的周期の長い変動が卓越していることを示している。さらに、詳細に見れば、他にも短い時間スケールでの振動が見受けられ、急峻な密度界面に発生した剝離渦は大小様々な時空間スケールから成り立っているものと推察される。したがって、隔壁端を出た塩水は、その周辺では密度界面が急激に変化するので、このような baroclinic torque による渦発生と、ロック内部へ補給される淡水の侵入によって発生する剝離渦が複雑に作用

しながら、3次元的な流動場が形成されているものと考えられる。

4. 結 言

従来、2次元的なロック水路内部の密度界面の混合過程はフロント先端部背後に発生した渦 (roll-up motion) によってほとんど決まるといわれている。一樣幅の水路から片側だけ開放された領域に流出する、3次元的な広がりをもつ密度流の場合には、それ以上に淡水侵入や急峻な密度界面の勾配によって生じた隔壁端部周辺に発生する不均一な渦の強さやスケールが、混合過程を考える上できわめて重要な役割を果たしていることが指摘された。

本研究は、第一著者が米国 University of Washington, Department of Civil Engineering に滞在中 (4~10月, 1993年) に行われた研究成果の一部を取りまとめたものである。

参 考 文 献

- Arita, M. and G. H. Jirka (1987): Two-layer model of saline wedge, II: Prediction of mean properties, J. Hydr. Engr., No. 113, pp. 1249-1263.
- Mausshardt, S., H. Yeh and C. Grandinetti (1994): Laboratory observations of gravity currents and internal bores, Proceedings of Fourth International Symposium on Stratified Flows, Grenoble, France.
- Simpson, J. E. and R. E. Britter (1979): The dynamics of the head of a gravity current advancing over a horizontal surface, J. Fluid Mech., Vol. 94, No. 3, pp. 477-495.
- Simpson, J. E. (1982): Gravity currents in the laboratory, atmosphere and ocean, Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 14, pp. 213-234.
- 玉井信行 (1980): 密度流の水理, 新体系土木工学第 22 巻, 技報堂出版, 260 p.
- Turner, J. S. (1973): Buoyancy effects in fluids, Cambridge Univ. Press, 324 p.
- Yeh, H. (1991): Vorticity-generation mechanisms in bores, Proc. Roy. Soc. Lond., A 432, pp. 215-231.