

河川域のロック式ゲートによって生じる密度流の分布とその構造

岐阜高専 正員 和田 清

1. はじめに： 船舶航行用のロック（閘門）を通じて周囲に形成される水塊の流動機構、特に密度流の構造を明らかにすることは、河川域の生態環境場を考える上できわめて重要である。しかしながら、その流動場については、従来、一様幅の2次元水路を用いたロック内部の議論が多く、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次元の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。そこで本研究は、密度フロントの分布形状に主眼を置き、流れの可視化手法（レーザー発色法）によって、ロック内外における密度流の混合過程を実験的に明らかにしたので、その結果の一部を報告する。

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：300cm、側壁高：90cm、幅：120cm）内で行われた。図-1のように、水槽内には、アクリル製の隔壁付きロック模型（幅22cm、水路長180cm）が設置され、ロック内には、染料（フローレセン）で着色された塩水が満たされている。ゲートを開けた後、塩水は流出しアルゴンレーザー（Coherent Innova 製、4W）に接すると黄色に発光するので、その挙動をカメラとビデオで撮影した。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の2次元水路とした場合、ロック外の水域が同密度の塩水で覆われた場合（以下、Internal Bore： $h_0 = 0.5 \sim 2.0$ cm）および $h_0 = 0$ の場合の重力流（Gravity Current）を含めた計8種類である。なお、塩水の密度（ $\rho = 1002 \text{ kg/m}^3$ ）および水深（ $h = 15$ cm）は一定とした。

3. 結果および考察： 写真-1は、Internal Bore（ $h_0 = 1.0$ cm）の平面的な広がりを示したものであり、撮影断面 $Z = 4.0$ 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、密度フロント先端の背後では密度界面の位置が低下していることを示している。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、流れと平行な断面内における写真-2 (a)は重力流、(b)がInternal Bore の場合である。前者の先端部分には、小規模の渦が規則的に発生する乱れた状態であるのに対して、後者の変化は非常に滑らかである。また、Internal Bore の場合は2次元的な Kelvin-Helmholtz roll に近い形態で砕波し、重力流は3次元的な形態を示し複雑な砕波過程を含むことが知られているが¹⁾、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。いずれにしても、2次元的な密度流の界面位置は、水深の半分以下に限定されているといえる。一方、3次元的な広がりをもち場合が写真-3の

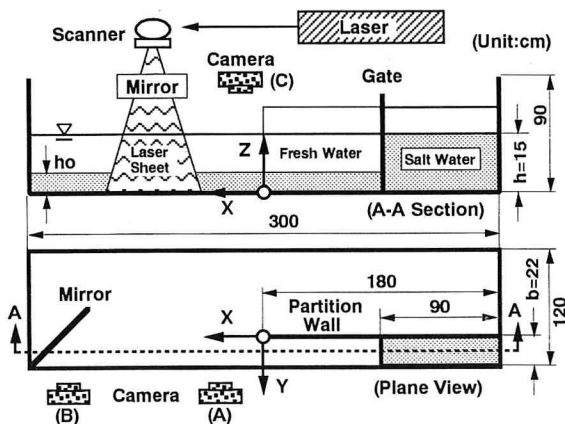
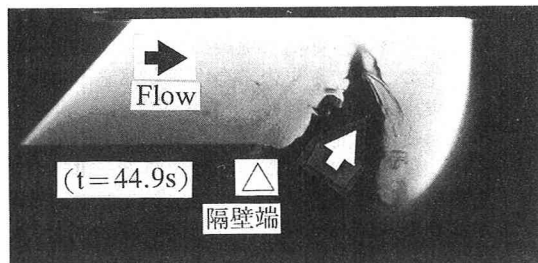


図-1 実験装置

写真-1 Internal Bore ($h_0 = 1$ cm、 $Z = 4$ cm)

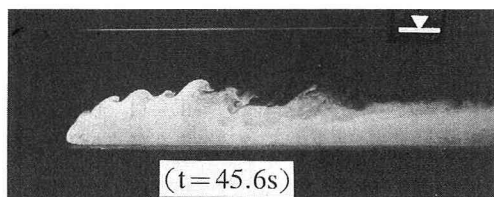


写真-2 (a) 重力流 (2次元、Y=11cm)

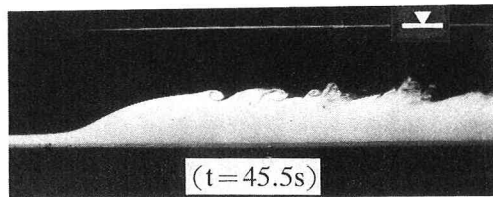


写真-2 (b) Internal Bore (2次元、Y=11cm)

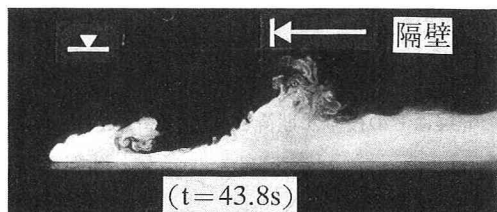


写真-3 (a) 重力流 (3次元、Y=2.5cm)

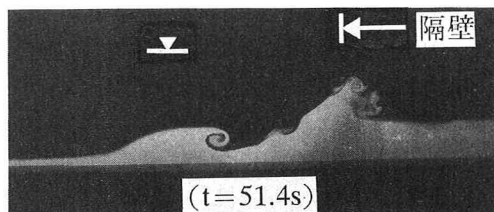


写真-3 (b) Internal Bore (3次元、Y=2.5cm)

ようであり、隔壁側に最も近い撮影断面 (Y=2.5cm) である。写真-2と比較すれば明らかなように、重力流の場合には、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、③隔壁端付近における密度フロントの急峻な勾配、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、重力流の場合に比べて渦構造が滑らかである点が特徴である。このように、3次元の広がりをもつ場合には、密度フロント先端部は2次元の場合よりもさらに界面は低下し、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、密度フロントの勾配が空間的に大きく変化することがわかる。さらに、写真-4はInternal Boreが隔壁端部を出る直前 (X=-5cm) の、流れと垂直な断面内のものである。写真(a)より、断面中央から左側にかけて密度界面付近に乱れがみられるが、これは密度フロントの先端部背後に生じた渦が可視化されているものと思われる (写真-2 (b) 参照)。また、断面右側 (隔壁側) にも乱れが発生しており、隔壁端部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 (b) のようにその擾乱は増大して、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生じておらず、渦の強さの断面内での不均一性をうかがうことができる。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』として知られており¹⁾、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。したがって、隔壁端付近ではこのような Baroclinic Torque による渦発生と、ロック内部へ補給される淡水の流れによって発生する剥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推察される。

4. おわりに： 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によってほとんど決まるといわれているが、ロックから周辺水域に流出入する3次元的な広がりをもつ場合には、それ以上に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。

【謝辞】本研究は、著者が米国ワシントン大学に滞在中 (4~10月, 1993年) に行われた研究成果の一部であり、その機会を与えて頂いた同大学土木工学科 Prof. Harry Yeh に深く感謝いたします。

(参考文献) 1) Harry H. Yeh : Vorticity-generation mechanisms in bores, Proc. R. Soc. Lond. A 432, pp.215-231, 1991.