

複断面水路における河口密度流の混合特性

藤原 広和*・沢本 正樹**・神山 尚人***

1. はじめに

河口部における流れは、様々な因子によって支配され、その河口の特徴によって複雑な流動形態がみられる。塩水遡上は河口域の利水、生態環境を考える上で極めて重要である。河口域周辺の密度流は、混合型の河口密度流、塩水楔、密度噴流型の問題として研究されている(玉井, 1980)。しかし、和田ら(1994)の指摘のように単断面水路を用いた鉛直2次元的な議論が多く、水平方向を含めた3次元挙動についてはほとんど明らかにされていない。本研究は青森県東南部に位置する高瀬川河口部をモデルとしている。高瀬川河口部は、汽水湖である小川原湖と太平洋を結ぶ感潮河川であるが、複断面河道に起因する複雑な流動混合が生じていることがこれまでの現地観測等(藤原, 田中, 1993)でわかっている。複断面水路の密度が一樣な流れについては多くの成果があるが、複断面水路密度流の混合機構は未だ明らかにされていない。また、石川ら(1991)は小川原湖に侵入する塩分を半経験的モデルによって検討している。そこで、複断面水路での混合量を見積もるための第一歩として高瀬川をモデルとした水路模型を作成し、その混合過程、特性を流速、 Cl^- 濃度の測定、可視化等によって実験的に明らかにしようとしたものである。

図-1は高瀬川河口部の概要図である。高瀬川の流域面積は866.9 km²、幹線流路延長は63.7 kmで八甲田山系八幡岳に源を発する。小川原湖は湖面積65.6 km²、湖容量721×10⁶ m³、平均水深11 m、最大水深約25 mである。また、河口から小川原湖までは約6.5 kmである。河口より約5.7 km上流に放水路があるが、ゲートは通常閉められているので、塩水は普段高瀬川を経由し侵入する。小川原湖の年平均水位は約T.P.+40 cmである。

2. 複断面水路における混合

複断面水路における混合過程は、潮汐による河口部の水位変化により塩水は先に低水路に混合しながら侵入

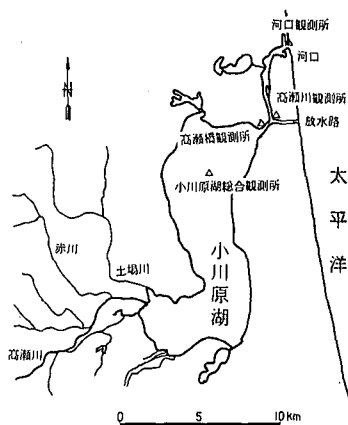


図-1 高瀬川河口部の概要図

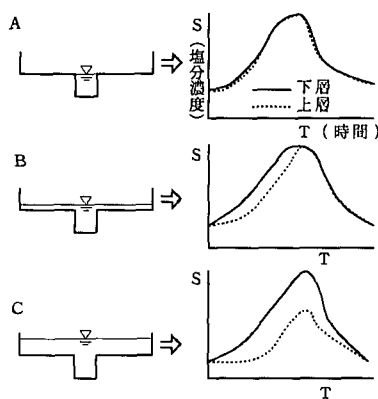
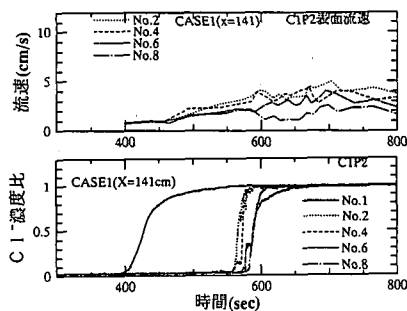
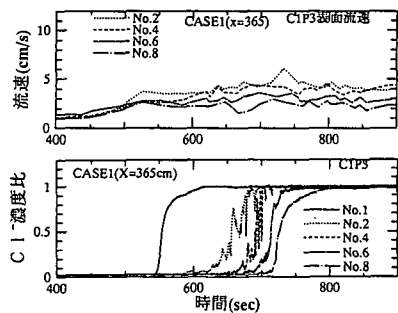
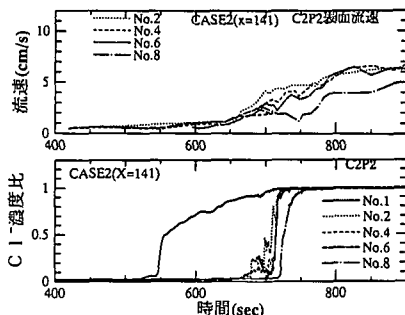
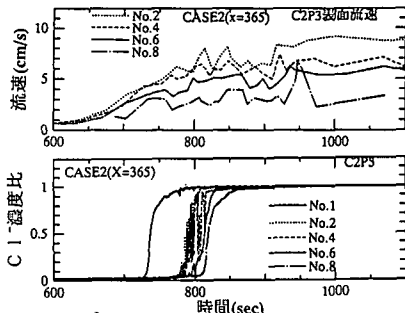


図-2 塩分濃度変化のパターン

し、特に低水路と高水敷の流速差による shear により水平方向への混合が促進される。このとき、低水路と高水敷の塩分変化は主に河口部の潮汐と淡水位(小川原湖の水位)に支配される。図-2は3つのパターンの淡水位に同様の潮汐を1周期与えたときの下層と上層の塩分濃度変化の模式図である。Aは淡水位が低い場合であり、上層と下層の塩分変化が同時に起こり、最大濃度も同程度になる。Bは淡水位がAより高く高水敷上まで淡水が広がっている場合で、上層の塩分変化は下層より遅れて変

* 正会員 八戸高専講師 建設環境工学科
 ** 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科
 *** 学生会員 東北大学大学院

(a) CASE1 ($x=141\text{cm}$)(b) CASE1 ($x=365\text{cm}$)図-5 表面流速及び Cl^- 濃度比の時系列 (CASE 1)(a) CASE2 ($x=141\text{cm}$)(b) CASE2 ($x=365\text{cm}$)図-6 表面流速及び Cl^- 濃度比の時系列 (CASE 2)

化の下層に対する上層の遅れ時間は下流側が小さくなる傾向がある。図-7 は塩分濃度変化時の表面平均流速 (u) から求めた流速勾配 $\partial u / \partial y$ の分布である。 $y=2\text{ cm}$ の低水路と高水敷の境界部では $\partial u / \partial y$ が大きくなる傾向を示しており、境界での shear が大きいことを示す。 $y=6\text{ cm}$ の高水敷中央付近では小さくなる傾向がある。 $y=9\text{ cm}$ で $\partial u / \partial y$ が大きいのは側壁付近であるための粘性の影響である。この流速勾配 $\partial u / \partial y$ は水平方向の混合との関係が大と考えられる。

(2) 密度フロントの長さと言速勾配の関係

混合の尺度として密度フロント部のぼやけの長さを考え、図-5、図-6 から Cl^- 濃度比が $0.05 \sim 0.90$ に変化するのに要する時間を各測点について求める。そして、その時間とこの区間の平均表面流速との積をフロントの長さ (フロント部のぼやけの長さ) として分布を示したものが図-8 である。これより、高水敷上の $y=2 \sim 10\text{ cm}$ に着目すると上流側 ($x=141\text{ cm}$) ではフロントの長さが約 $40 \sim 110\text{ cm}$ の範囲に分布し、下流側 ($x=365\text{ cm}$) ではそれは約 $150 \sim 200\text{ cm}$ の範囲に分布しており、下流側ほど混合が促進されていると言える。高水敷上の分布形状は CASE 2 の下流側 ($x=365\text{ cm}$) では $y=6\text{ cm}$ で混合が促進されているといえ、それ以外の CASE 及び測定位置では逆に $y=6\text{ cm}$ でフロント長さが周辺と比較して小さくなっている。これは図-5、図-6 より、他の CASE

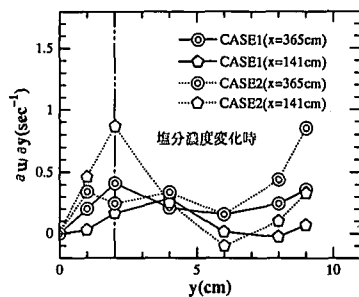


図-7 流速勾配の分布

に比較して塩分変化時の流速が大きいことが影響しているものと考えられる。また、 $y=6\text{ cm}$ では図-7 より $\partial u / \partial y$ も周辺の分布と比較し小さい値を示す傾向がある。そこで、フロントの長さと言速勾配 $\partial u / \partial y$ との関係を図-9 の様にプロットしてみた。これより多少のバラツキはあるが、フロントの長さと言速勾配 (shear) との関係はあると言える。

(3) 混合過程の可視化

写真-1 は CASE 1 の上流側での混合過程を撮影したものである。写真の左上の時間は水路に塩水が侵入してから経過時間であり、図-5、図-6 の時間と対応する。(a) は水路上方から撮影したものであり、水平方向の流れの様子を示しており、黒い矢印は淡水と塩水との境界

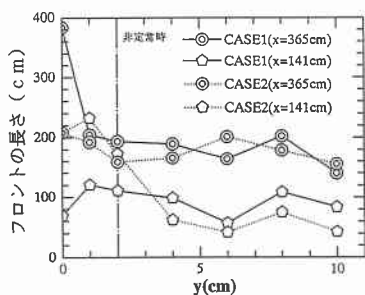


図-8 フロント長さの分布

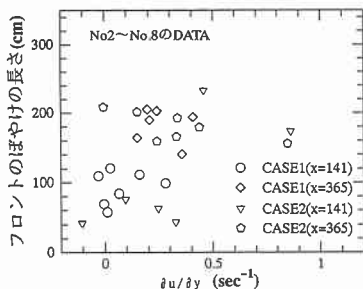


図-9 フロント長さと流速勾配の関係

を示している。(b)は水路側方から撮影したものであり、鉛直方向の流れの様子を示す。写真-2、写真-3、写真-4は各々CASE 1の下流側、CASE 2の上流側、CASE 2の下流側の同様の写真である。写真-1(a)は高水敷上での塩水の混合であり、徐々に高水敷全幅に広がるのがわかる。写真-1(b)はその前の低水路に塩水が満たされた状態であるが、特に大きな変化は見られない。写真-2(a)では塩水フロントの大規模な渦があり、かなり乱れて混合している様子がわかる。写真-2(b)はその直前の鉛直方向の運動を捉えているが低水路が塩水で満たされて、内部波が観察された。従って、写真-2(a)の高水敷上での塩水の水平方向の混合は、鉛直方向の運動の影響を受けている。この内部波の影響は図-5の下流側の Cl^- 濃度比の時系列にもみられ、特に低水路上層のNo.2の塩分変化時の変動成分として表れている。さらに流速が大きいCASE 2の写真-3(b)、写真-4(b)では上流側、下流側において内部波が観察されている。同様に高水敷上の水平方向の混合も写真-3(a)、写真-4(a)より内部波の影響が表れており、写真-1(a)の様に塩水淡水の境界が直線的ではない。これは図-6よりCASE 2上流側、下流側のNo.2の Cl^- 濃度比の時系列の変動成分として表れており、CASE 1下流側と同様な機構によって塩水が混合している。即ち、複断面水路の混合の特徴として、低水路部では上下層の密度差により内部波が表れ、高水敷上ではshear (流速勾配) による水平方向の混合が促進さ

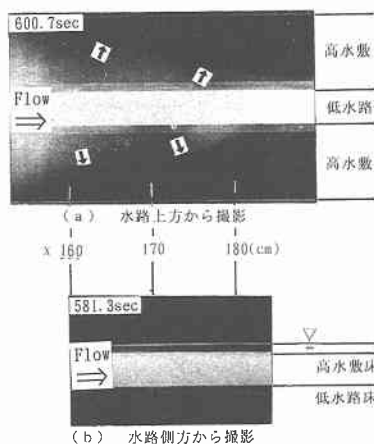


写真-1 CASE 1 上流部の混合過程

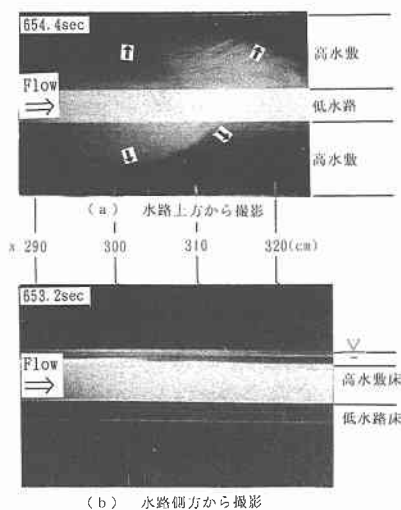


写真-2 CASE 1 下流部の混合過程

れる。これらの組み合わせにより Cl^- 濃度の変化時に乱れが生じている。

5. おわりに

本研究の主な結論は次の通りである。

- (1) 混合時の塩分変化の乱れは内部波の様な鉛直方向の運動に起因する。
- (2) 高水敷上では水平混合が卓越しており、shear と関係する。
- (3) 複断面水路における密度流の混合は低水路部の鉛直方向の運動とshear による水平方向の運動の複合により生じている。

今後は単断面水路との比較により、複断面水路に起因する混合量がどの程度なのか見積もる予定である。

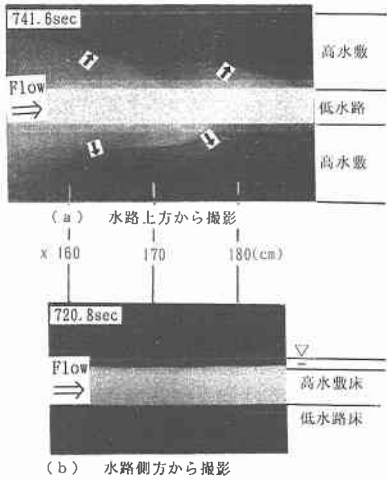


写真-3 CASE 2 上流部の混合過程

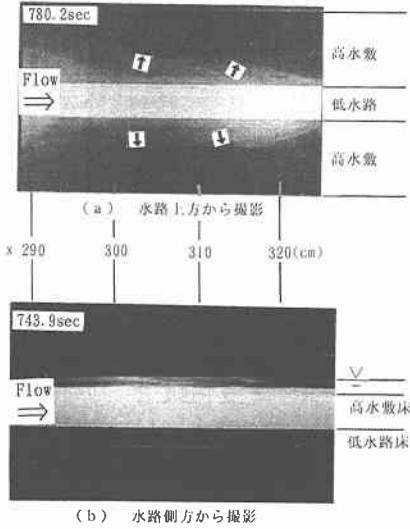


写真-4 CASE 2 下流部の混合過程

本研究を行なうにあたり、助言頂いた東京工業大学石川忠晴教授、東北大学真野明助教授、東海大学田中博通助教授、八戸工業大学西田修三助教授に謝意を表します。また、資料等を提供して下さい東北地方建設局高瀬川工事事務所に感謝致します。本研究の一部は笹川科学研究助成によるものである。また、本研究の公表にあたり、小川記念基金の補助を受けた。あわせて謝意を表します。

参 考 文 献

石川忠晴・板井雅之・小沢康彦 (1991): 小川原湖に侵入する塩分の計算モデルの検討, 水工学論文集, 第 35 巻, pp. 191-196.
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.
藤原広和・田中博通 (1993): 高瀬川感潮域の現地観測による水理特性について, 水工学論文集, 第 37 巻, pp. 171-176.
和田 清・H, Yeh (1994): 河口域のロック周辺における密度流の構造, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 311-315.