

# 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。塩水週上は河口域の利水、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次元的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、複断面水路によ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様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に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<sup>-</sup>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 km<sup>2</sup>、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 km<sup>2</sup>、湖容量 $721 \times 10^6$  m<sup>3</sup>、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

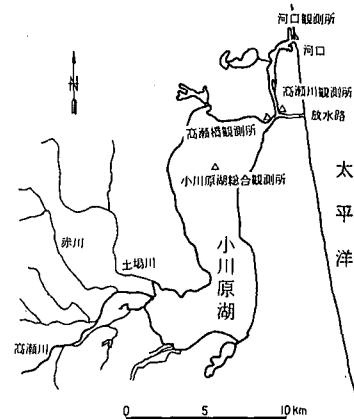


図-1 高瀬川河口部の概要図

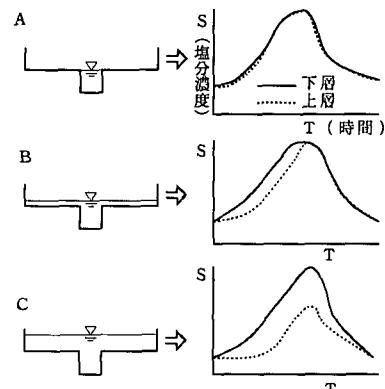


図-2 塩分濃度変化のパターン

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

化し始めるが最大濃度が同程度になる。CはBより淡水位が高く、濃度変化は上層が遅れ、最大濃度も下層の濃度まで達しない。今回の実験はBの強混合的な場合とCの緩混合的な場合について行った。

### 3. 実験装置及び実験方法

#### (1) 実験装置

図-1の高瀬川河口部をモデルとし、昭和61年に建設省高瀬川工事事務所が作成した河床縦横断面図を参考にし、図-3の様な水路を製作した。複断面部の水路長は4mで図-3(c)の様な左右対称な複断面水路である。塩水槽端ゲート位置から流下方向の距離をx、水路中心軸から水路幅方向の距離をyとする。高瀬川と比較した場合、縮尺は鉛直方向に約1/50、水平方向に約1/1500の歪模型となる。これを密度フルード相似模型として実験した。水路床勾配は0である。両端の水槽は塩水側が太平洋、淡水側が小川原湖を想定している。これらの水槽には越流堰を設置し、これにより水位を調節する。塩淡水境界のゲートを開ける速度を調節することにより疑似的に潮汐を与えていた。即ち、図-4の様に小川原湖(淡水槽側)水位を一定とし、河口(塩水槽側)では潮汐を単純に sine curveと考え、小川原湖と河口の水位差が最大となるまでの時間 $\Delta T$ をゲート操作時間としている。このときの塩水槽側の水位は $\Delta T$ 間の水位の平均値 $h_m$ を与える。従って、この実験水路は逆流時の平均的な流れを表現できる。

#### (2) 実験方法

淡水は水道水、塩水は水道水に食塩を溶かし、相対密度差0.002を調節して使用した。各ケースの水位に合わせた後、ゲートを所定の時間で全開させる。塩分濃度の測定には導電率計(本体KENEK MK-203、センサーMKTS-50-04)を使用した。流速は大鋸屑等を用いてx方向の表面流速をビデオカメラで撮影し求めた。塩分濃度の測定位置は縦断方向に $x=141\text{ cm}$ (上流)、 $x=365\text{ cm}$ (下流)の2断面であり、横断面測定位置は図-3(C)に示すNo.1~No.8である。流速はNo.2~No.8の水面での流速である。可視化は塩水に螢光染料のウラニンを混入し、 $x=172\text{ cm}$ 、 $x=308\text{ cm}$ を中心として水路上方及び側方から写真撮影した。

実験条件は高瀬川工事事務所の各観測所(図-1参照)で測定された水位及び塩分濃度のデータを基に表-1の様に設定した。CASE1は1991年11月3日~11月4日の緩混合的な場合で図-2のCに相当する。CASE2は1991年11月8日の強混合的な場合でBに相当する。

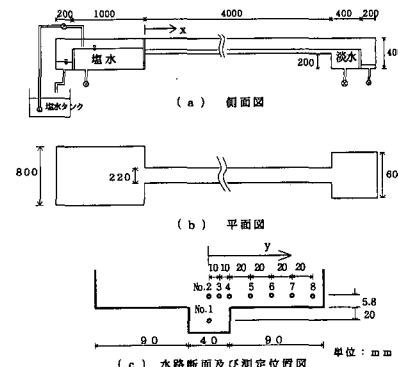


図-3 実験装置の概要図

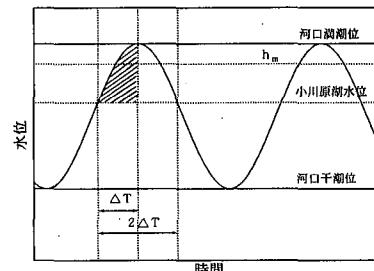


図-4 水位変化の模式図

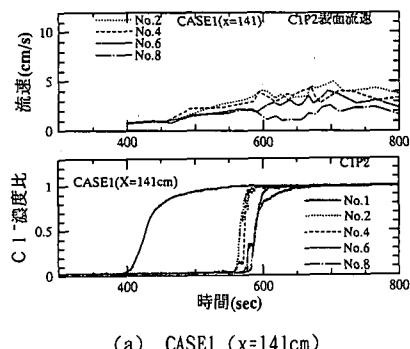
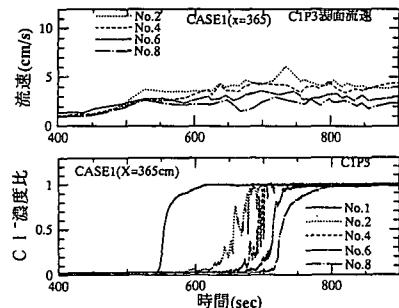
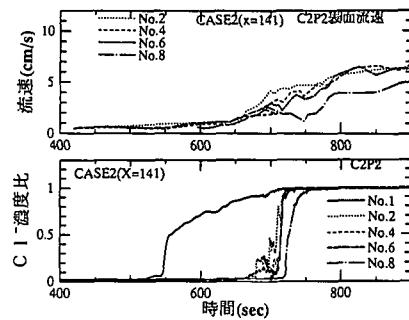
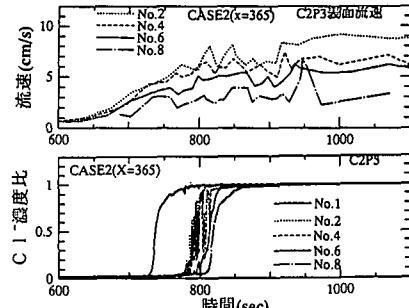
表-1 実験条件

CASE	水位(cm)		水位差 $\Delta h$ (cm)	相対密度差 $\Delta \rho/\rho_2$	ゲート操作 時間(sec) $\Delta T$
	淡水槽 $h_1$	塩水槽 $h_2$			
CASE1	4.88	5.15	0.27	0.002	167
CASE2	4.80	5.26	0.46	0.002	216

### 4. 実験結果及び考察

#### (1) 流速及びCl<sup>-</sup>濃度比の時系列

図-5はCASE1の上流及び下流の表面流速、Cl<sup>-</sup>濃度比の時系列である。図-6はCASE2の同様の図である。このCl<sup>-</sup>濃度比は塩水槽のCl<sup>-</sup>濃度に対する比である。表面流速は初期には水路中央(No.2)と側壁付近(No.8)では差がほとんどみられないが、流速が大きくなるに従いそれらの差が表れてくる。Cl<sup>-</sup>濃度比はCASE1、CASE2とも下流において、水路中央に対する側壁付近の濃度変化の遅れ時間が上流に比較して大きくなる。これは前述した様にx方向の流速がy方向に勾配をもつためである。また、各ケースとも下流におけるCl<sup>-</sup>濃度変化時の水路中央付近上層の乱れが大きくなる傾向がある。鉛直方向については、水路中央において、測点No.1(下側)とNo.2(上側)の2点についてだけであるが濃度変

(a) CASE1 ( $x=141\text{cm}$ )(b) CASE1 ( $x=365\text{cm}$ )図-5 表面流速及び $\text{Cl}^-$ 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 $\text{Cl}^-$ 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流速勾配の関係

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 $\text{Cl}^-$ 濃度比が0.05～0.90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40～110 cmの範囲に分布し、下流側( $x=365\text{ cm}$ )でのそれは約150～200 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

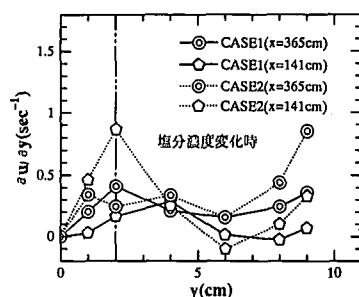


図-7 流速勾配の分布

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、フロントの長さと流速勾配  $\partial u / \partial y$  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、フロントの長さと流速勾配 (shear) との相関はあると言える。

## (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の経過時間であり、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

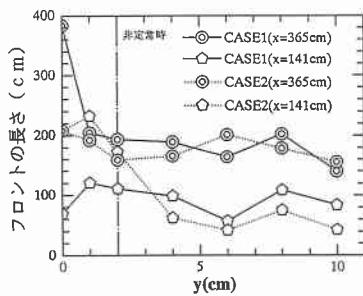


図-8 フロント長さの分布

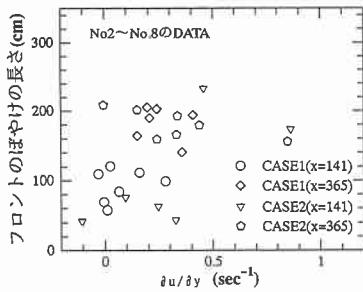


図-9 フロント長さと流速勾配の関係

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<sup>-</sup>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<sup>-</sup>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

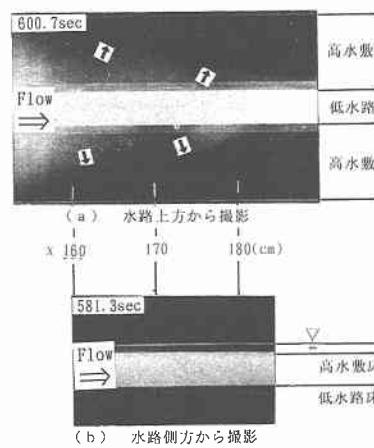


写真-1 CASE 1 上流部の混合過程

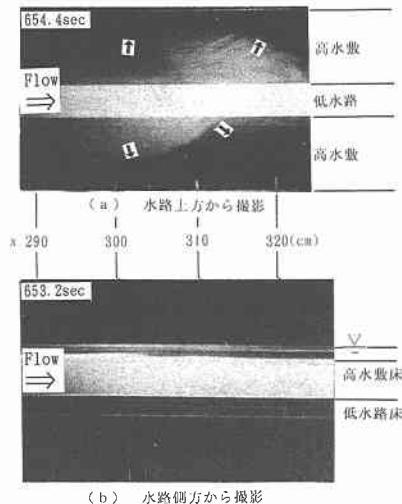


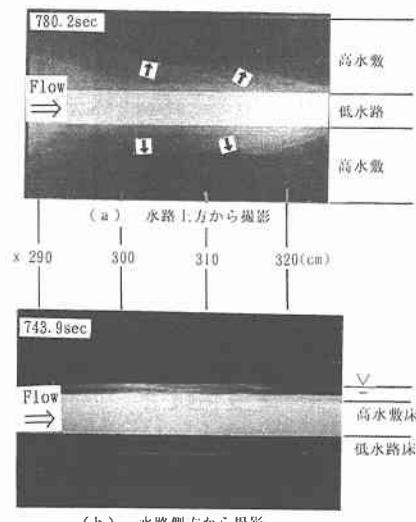
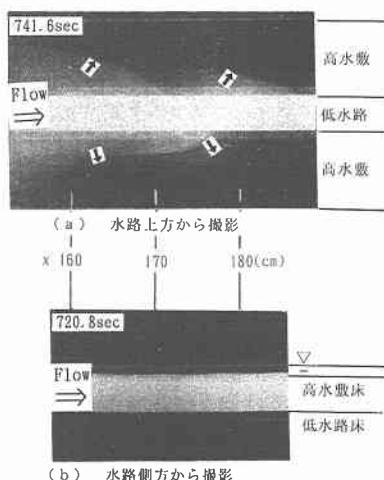
写真-2 CASE 1 下流部の混合過程

れる。これらの組み合わせにより Cl<sup>-</sup>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。



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、東北大学眞野明助教授、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った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所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、260p.  
 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.