

複断面および単断面水路における密度流の混合特性の相違について

Comparison of Mixing Characteristics of Density Current between
in Compound Channel and in Single Section Channel

藤原広和*・沢本正樹**・田中博通***

By Hirokazu FUJIWARA, Masaki SAWAMOTO and Hiromichi TANAKA

The experiments are performed to study the mixing characteristics of the density current in the compound channel which is model of the Takase River estuary. The surface flow velocity and the salinity are measured in the experiment. The results of the experiments are compared with those in the single section channel. The results of this study showed that the density current in the compound channel was more mixed than that in the single section channel. The results also indicated that the mixing quantity had correlation with the horizontal shear.

Keywords : tidal river, esutuarine density current, compound channel, salinity

1. はじめに

流体の混合現象は水系に限れば、塩水の遡上、温排水、水質汚濁、取水、湖の淡水化等、多くの水理環境問題、生態環境に影響を及ぼし、これらの対策・計画上、混合過程、混合量等を適切に評価することは非常に重要である。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おり¹⁾、単断面水路を用いた鉛直2次元論的議論が多い。水平方向を含めた3次元論的挙動はほとんど明らかにされていない²⁾。また、複断面水路における一様な密度の流れについては多くの研究がある³⁾が、そこでの密度流に関したものはほとんど見ら

* 正会員 八戸工業高専講師 建設環境工学科
(〒039-11 青森県八戸市田面木上野平16-1)

** 正会員 工博 東北大学教授 工学研究科土木工学専攻
(〒980-77 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉)

*** 正会員 工博 東海大学助教授 海洋学部海洋土木工学科
(〒424 静岡県清水市折戸3丁目20-1)

れない。本研究は、河床地形に着目し、青森県東南部に位置する汽水湖である小川原湖と太平洋を結ぶ感潮河川である高瀬川をモデルとし、複断面水路の模型を用い、単断面水路との比較により複断面であることによる塩水の混合の影響がどの程度なのか、また、流速、塩素イオン濃度の測定、可視化などにより、複断面水路における塩水の混合過程・特性を実験的に明らかにしようとするものである。また、複断面水路密度流の混合量の算定を試みるための基礎となるものである。

図-1は青森県東南部に位置する高瀬川河口部の概要図である。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現地観測⁴⁾などでわかっている。高瀬川は流域面積866.9km²、幹線流路延長63.7kmで、八甲田山系八幡岳に源を発する1級河川である。小川原湖は湖面積65.6km²、湖容量721×10⁶m³、平均水深11mである。河口より5.7km上流に放水路があるが、洪水時以外はゲートは閉められているので、海水は通常高瀬川を経由し、侵入する。小川原湖の年平均水位は約T.P.+40cmである。

2. 実験装置および実験方法

実験水路の概要図を図-2に示す。これは昭和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作成したものであり、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の歪み模型となる。また、両端には小川原湖と太平洋に相当する淡水槽と塩水槽が設置されており、塩水槽側のゲートの開放により塩水が侵入する。このゲートを開ける速度を調節することにより擬似的に潮汐を与える⁵⁾。この実験水路では逆流時の平均的な流れを表現できる。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(図-2)。表-1に実験条件を示す。CASE1、CASE2は複断面水路によるものであり、CASE3、CASE4は単断面水路によるものである。塩水と淡水の水位差(Δh)の違いにより、CASE1とCASE3、CASE2とCASE4が対応している。つまり、CASE1の単断面の場合がCASE3であり、CASE2の単断面の場合がCASE4である。また、これらの条件は高瀬川工事事務所で測定されたデータを基にしている。表-2は実験条件の基となった高瀬川工

事事務所のデータをまとめたものである。高瀬川観測所における上層塩分と下層塩分の比C₁₁/C₁₂より、CASE1(CASE3)は1991年11月3～4日の緩混合的な場合で、CASE2(CASE4)は1991年11月8日の強混合的な場合に相

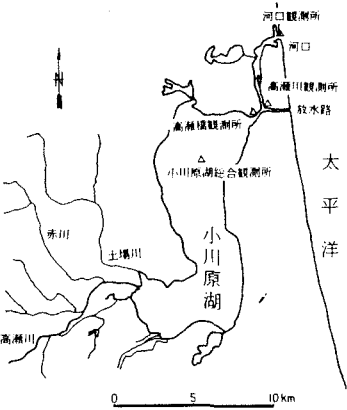


図-1 小川原湖付近概略図

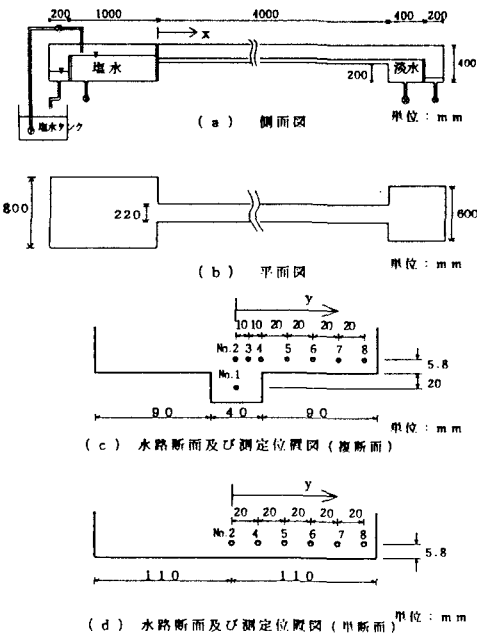


図-2 実験装置概略図

表-1 実験条件

CASE	水位(cm)		水位差 Δh (cm)	相対密度差 Δρ/ρ ₂	ゲート操作 時間(SEC) ΔT
	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
CASE3	1.61	1.88	0.27	0.002	167
CASE4	1.53	1.99	0.46	0.002	216

当する。淡水は水道水、塩水は水道水に食塩を溶かしたもので、相対密度差は0.002である。両端の水槽の水位を各ケースの水位にあわせた後、塩淡水境界のゲートを所定の

表-2 高瀬川工事事務所の観測データ

年. 月. 日	河口水位 (T. P. cm) と時間			小川原湖水位 (T. P. cm)	高瀬川観測所最大流速 (cm/s) と時間	高瀬川観測所最大塩分 (ppm) 及び時間		高瀬川観測所最小塩分 (ppm) 及び時間		Cl ⁻ /Cl ₂	対応する実験ケース
	干潮	満潮	干潮			上層Cl ₁	下層Cl ₂	上層	下層		
1991.11.3 ~ 11.4	19:00	3:00	8:00		3.00	5.00		24.00			CASE 1
	-6	55	12	34	45	5000	12400	800	700	0.403	CASE 3
1991.11.8	9:00	16:00	23:00		16.00	19.00		12.00			CASE 2
	17	66	-18	30	63	14400	16200	900	800	0.889	CASE 4

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 KENEK MKTS-50-04）を使用した。流速はオガクズ等を用いて 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 = 141cm（上流）、x = 365cm（下流）の 2 断面であり、横断面の測定位置は図-2 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。可視化は塩水に蛍光染料のウラニンを混入して、紫外線を照射し、x = 172cm、x = 308cm を中心として水路上方及び側方から写真撮影した。

3. 実験結果および考察

3. 1 流速および塩素イオン濃度比の時系列の比較

ここでは下流側（x = 365cm）のみの結果について述べる。図-3 の左は CASE1、CASE3 下流部における表面流速および塩素イオン濃度比の時系列であり、図-3 の右は CASE2、CASE4 下流部における同様のものである。ここで塩素イオン濃度比とは塩水槽の塩素イオン濃度に対する比である。図-3 より、流速は複断面水路では測定位置により大きな違いがあり、水路中央では流速値が大きく、側壁に近づくにつれ徐々に小さくなる

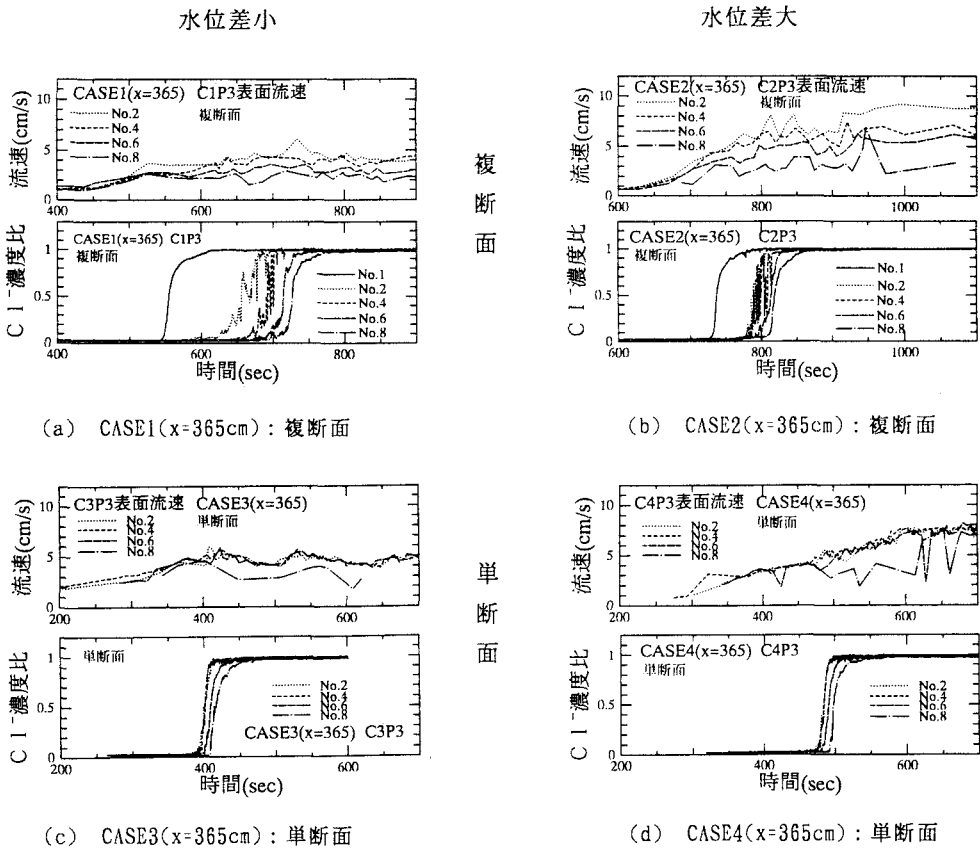


図-3 表面流速および Cl⁻ 濃度比の時系列

傾向がある。単断面水路では側壁付近では流速値が小さくなる傾向が見られるが、それ以外はほとんど流速差は無く、一様である。水位差大の場合でも同様のことがいえ、複断面水路の方がshearが大きいといえる。塩素イオン濃度比の時系列は水位差小の場合では、複断面水路では濃度比が上昇を始めてから1に達するまでの時間が長くなり、濃度の時間的変化が比較的緩やかである。水位差大の場合でも同様のことがいえる。また、複断面水路の低水路部および低水路と高水敷の境界付近では塩分変化時に大きな乱れを生じている。単断面水路では水位差小の場合と水位差大の場合を比較するとshearが小さいためか、No. 2～No. 8がほとんど同時に塩分濃度が変化しており、測定位置による塩分変化の時間的な差はほとんど無く、複断面水路に比べ時間差が短い。また、塩分変化時に多少の乱れはあるが、複断面に比べると変動はかなり小さい。

3. 2 密度フロント長さの分布の比較

混合の尺度としては密度フロント部のぼやけの長さを考え、 $C1$ 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、その時間と濃度変化時の平均表面流速 u との積を密度フロントの長さ、即ち混合している長さとして分布を示したのが

3. 2 密度フロント長さの分布の比較

混合の尺度としては密度フロント部のぼやけの長さを考え、 $C1$ 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、その時間と濃度変化時の平均表面流速 u との積を密度フロントの長さ、即ち混合している長さとして分布を示したのが

図-4である。これより、複断面水路では、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40～110cmの範囲に分布し、下流側 ($x = 365\text{cm}$) でのそれは約150～200cm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ことがわかる。高水敷上の分布形状はCASE2の下流では $y = 6\text{cm}$ で混合が促進されているといえ、それ以外では逆に $y = 6\text{cm}$ でフロントの長さが小さくなっている。このことは図-5の塩分濃度変化時の平均表面流速の分布をみると、流速がCASE2下流では他のCASEと比較して大きいことが影響していると考えられる。また、図-4より単断面では、上流側は80cm以下に分布している。下流側は約70～110cmに分布しており、下流側ほど混合しているといえるが、複断面水路との比較では混合距離は短く、混合量は小さいといえる。そこで、単断面水路に比較して複断面水路の混合量の影響がどの程度なのか見積もるために、CASE1とCASE3およびCASE2とCASE4において、それぞれ対応する位置でのフロントの

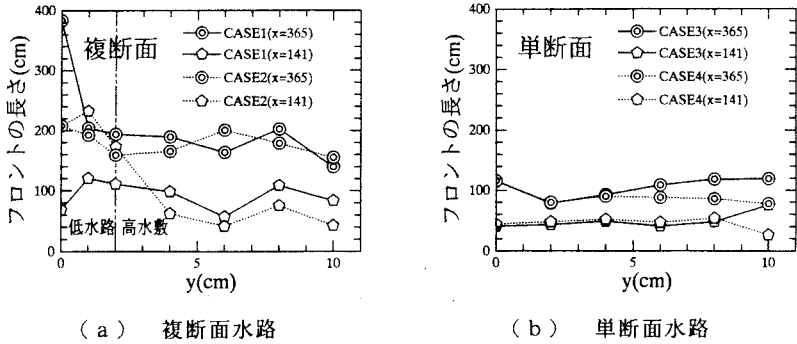


図-4 密度フロントの長さの分布

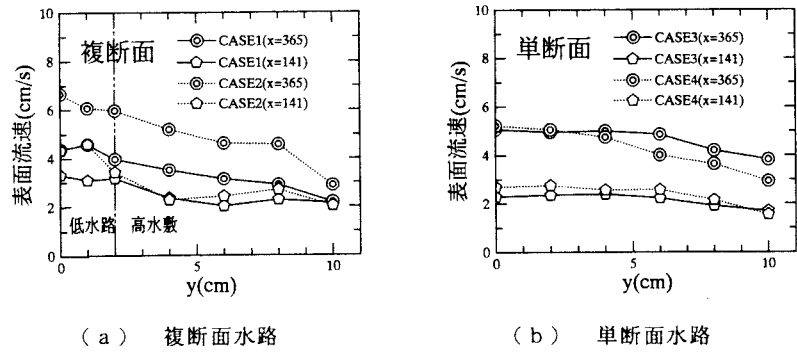


図-5 表面流速の分布

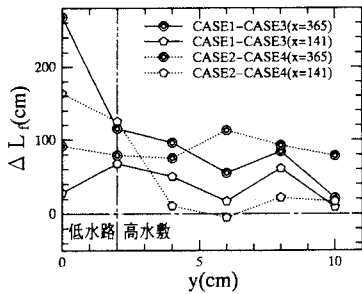


図-6 フロント長さの差の分布

長さの差 (ΔL_f) の分布を求めたものが図-6である。これより、複断面水路における密度流の混合は単断面水路より混合量は大きいといえる。高水敷上に着目すると、低水路との境界で大きい値を示す傾向があり、これはshearの影響が大きいと考えられる。また、CASE2とCASE4の下流での

フロントの長さの差は大きくなるが、これは前述の様にCASE2下流での流速が他と比較して大きいことが影響している。

3. 3 流速勾配と密度フロント長さの関係

図-7は塩分濃度変化時における平均表面流速から求めた流速勾配の分布である。これより、複断面水路では低水路と高水敷の境界付近および水路の側壁付近でshearが大きい。図-4のフロントの長さの分布と同様に $y=6\text{cm}$ では小さくなる傾向がみられ、密度フロント長さに関係していることが考えられる。単断面水路では、流速勾配は側壁付近で大きくなるという傾向はみられるが、複断面水路と比較すれば、ほとんど無いに等しい。そこで、複断面水路における流速勾配とフロントの長さの関係を図-8に示す様にプロットしてみた。これより、相関係数は0.55であった。

3. 4 可視化による混合過程の比較

ここではCASE2とCASE4を比較した場合について述べる。写真-1はCASE2とCASE4の上流部の混合過程を撮影したものである。同様に写真-2はCASE2とCASE4の下流部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-3

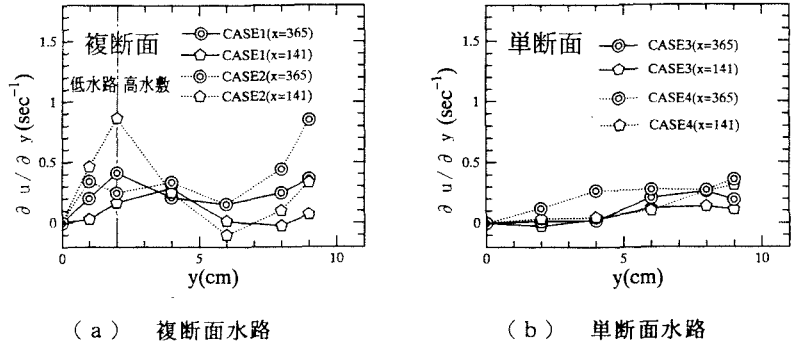


図-7 流速勾配の分布

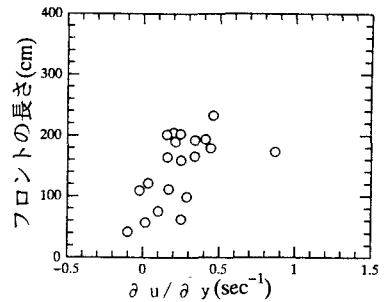
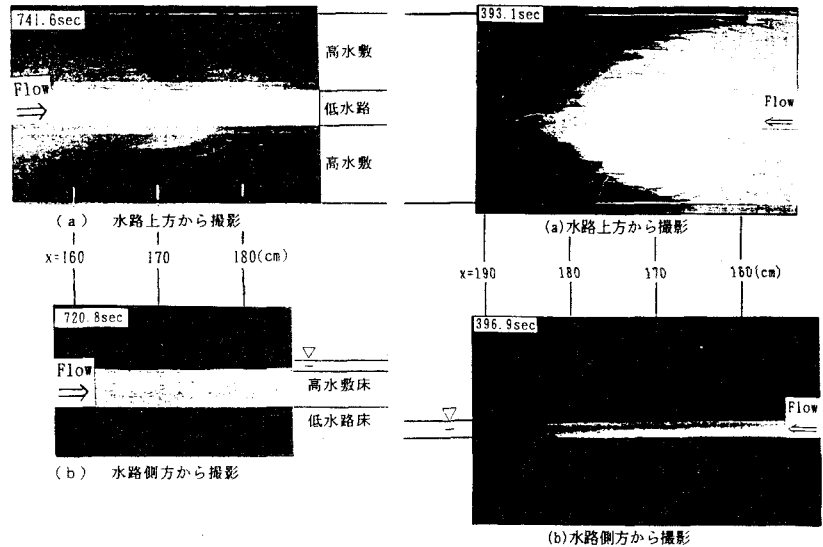


図-8 流速勾配とフロント長さの関係

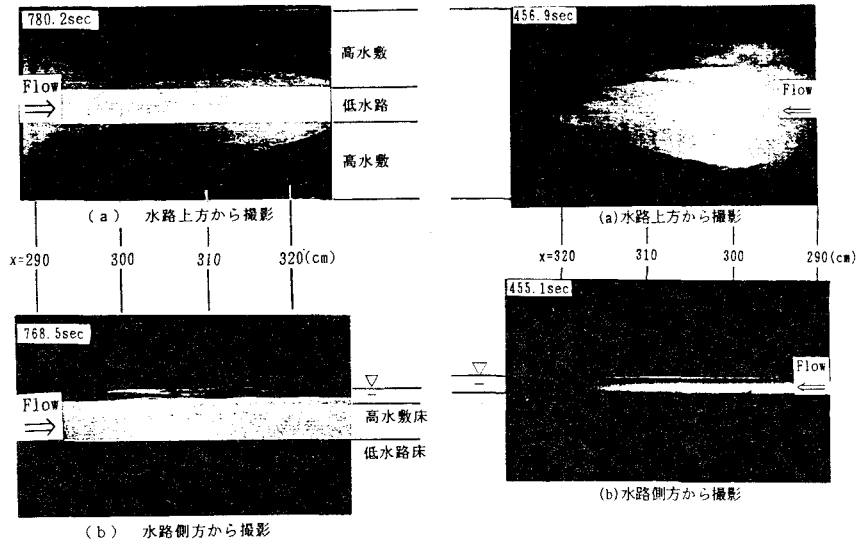


(1) CASE 2 (2) CASE 4

写真-1 CASE2、CASE4の上流部の混合過程

の時間と対応している。(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-1と写真-2をみると単

断面では、側方からの撮影写真を見ると、くさび状に侵入している様子がわかる。上方からの撮影のものをみると上流側で丸みを帯びたフロント部が下流側では流速差のため若干細長くなっており、先端部が筋状になり混合しているのが確認できる。複断面水路では下流で水平方向の大規模な渦がみられる。鉛直方向をみると低水路部で内部波が発生し塩淡水の境



(1) CASE 2

(2) CASE 4

写真-2 CASE2、CASE4の下流部の混合過程

界が不安定になっている様子がわかる。このことから、複断面水路の混合は鉛直方向の内部波と高水敷上の流速差によるshearによる影響があるといえる。これらの渦や内部波は図-3のCASE1、CASE2にみられる塩分変化時の乱れと関連していると考えられる。単断面水路では水平方向の渦はみられない。複断面水路では最初低水路に侵入した塩水が、shearにより水平方向に広がって混合していく様子が確認できた。

4. おわりに

本研究により得られた主要な結論は次の通りである。

①複断面水路では単断面水路より混合量が大きい。これは主に高水敷と低水敷間の水平shearによる。②複断面水路における塩分変化時の乱れは可視化実験で確認された内部波と関連している。③shearと密度フロントの長さの相関係数は0.55である。④複断面水路における密度流の混合は、最初低水路に侵入した塩水がshearにより水平方向に広がり混合していく。

最後に本研究を行うに当たり、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。また、本研究は笹川科学研究助成によるものである。

参考文献

- 1) 玉井信行:密度流の水利、新体系土木工学第22巻、技報堂出版、260p、1980。
- 2) 和田清・H. Yeh: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、1994。
- 3) 例えば、今本博健・石垣泰輔・武藤裕則:複断面水路流れにおける低水路流れと高水敷上流れの混合機構に関する実験的研究、水工学論文集、第36巻、pp. 139-144、1992。
- 4) 藤原広和・田中博通: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、1993。
- 5) 藤原広和・沢本正樹・神山尚人:複断面水路における河口密度流の混合特性、海岸工学論文集、第42巻、pp. 416-420、1995。