

高瀬川感潮部の混合特性について

MIXING CHARACTERISTICS IN TIDAL PORTION OF TAKASE RIVER

水野俊輔¹・藤原広和²・杉田尚男²・沢本正樹³
Shunsuke MIZUNO, Hirokazu FUJIWARA, Hisao SUGITA and Masaki SAWAMOTO

¹学生会員 八戸工業高専専攻科 建設環境工学専攻 (〒039-1192 青森県八戸市田面木上野平16-1)

²正会員 博(工) 八戸工業高専助教授 建設環境工学科 (同上)

³フェロー 工博 東北大学大学院教授 工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉06)

Takase River in the southeast of Aomori Prefecture is a tidal river with the compound channel. Field measurement and laboratory experiments were carried out in order to understand mixing characteristics of river estuary in this paper. Salinities of Lake Ogawara were able to estimate from field data. Furthermore, experiments were performed in compound channel with the effects of narrow section. The transverse mixing coefficients were obtained from these results using diffusion equation, and compared with those in compound channel. It was showed that the mixing coefficients were related to the product density current parameter and cross-section of channel parameter. Therefore, it was found that Takase River estuary was influenced by compound channel from these results.

Key Words: tidal portion, compound channel, narrow section, transverse mixing coefficient, salt water intrusion

1. はじめに

流体の混合現象は水系に限れば、塩水遡上、温排水、水質汚濁、湖の淡水化等多くの環境問題に影響を及ぼし、これらの対策を計画する上で混合過程、混合量等を調査することは非常に重要である。しかし、河口部における混合は、河口流と潮汐、波と海浜流、河口部地形、河川水の塩淡水の密度差等、様々な要因によって複雑な流動混合が生じている。本研究では、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高瀬川河口部における混合特性について現地データと実験データの2つの視点から検討し、高瀬川河口部における混合特性の全体像を明らかにすることが目的である。藤原・沢本¹⁾は、複断面水路密度流の特性として実験および現地観測により水路横断方向の拡散係数を求めている。高瀬川は河口部に複断面河道部と狭窄部をもつ感潮河川であり、その混合過程は複雑である。また、小川原湖はヤマトシジミの産地であり、シジミの産卵・発生には、ある範囲の水温と塩分が必要である。塩水が遡上する河口部の混合過程を明らかにすることは、シジミ漁業を管理する上でも重要である。本研究では、高瀬川河口部における国土交通省高瀬川河川事務所の定点観測データから鉛直方向の混合について考察し、複断面水路に狭窄部を考慮した実

験を行い、既往の研究との比較から水平方向の混合について考察した。図-1は、小川原湖および高瀬川河口部の概要図である。図の α , β , γ , A-0~A-5, B-

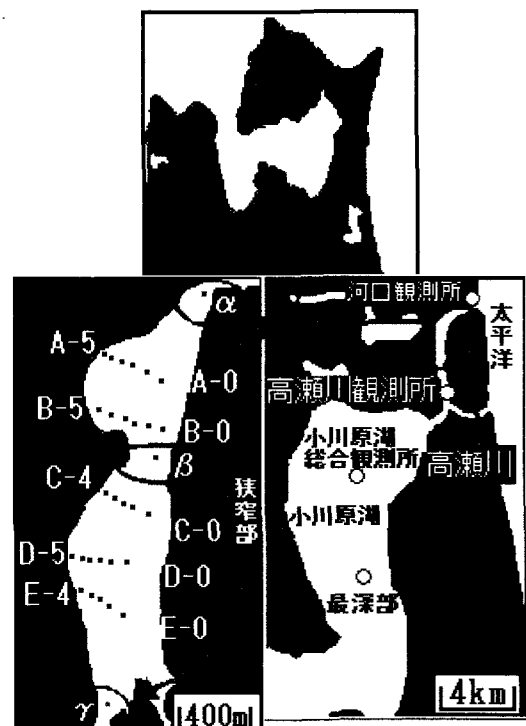


図-1 小川原湖と高瀬川河口部の概略図

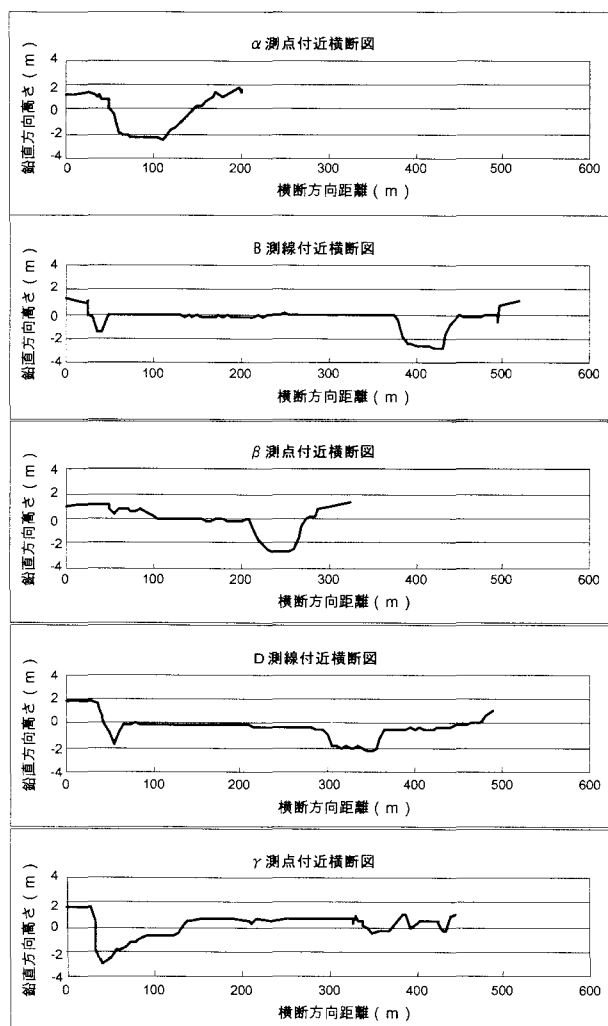


図-2 河口部の河床横断面図

0～B-5, C-0～C-4, D-0～D-5, E-0～E-4は現地観測が実施されたときの測点である²⁾。高瀬川の流域面積は866.9km², 幹線流路延長は63.7kmで八甲田山系八幡岳に源を発する一級河川である。小川原湖の北東部からは、太平洋に高瀬川が流出している。河口から約6.5km上流に小川原湖が位置している。また、河口より約5.7km上流には放水路があるが、洪水時以外はゲートが閉められているため、普段塩水は高瀬川のみを経由し流入している。小川原湖は湖面積63.2km², 湖容量714×10⁶m³, 平均水深約11m, 最大水深約25mである¹⁾。図-2は、図-1に示された高瀬川河口部の河床横断面図である。この付近は、河床地形が複断面形を成しており、その途中に狭窄部が存在する。

2. 現地データに基づく混合特性

(1) 高瀬川観測所の現地データ

高瀬川観測所の河口上流5.5km地点における現地データ(2002年1月～2004年3月)を用いた。現地データの測定項目は、流速、水位、上層・下層の塩分・水温であ

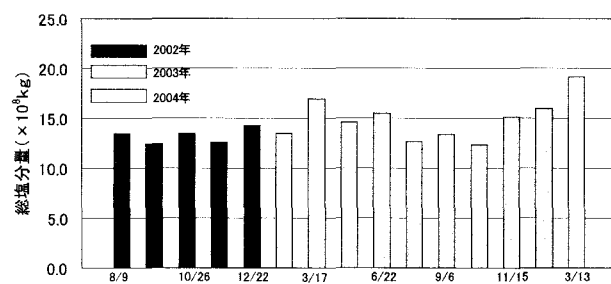


図-3 小川原湖の総塩分量の比較(2002年8月～2004年3月)

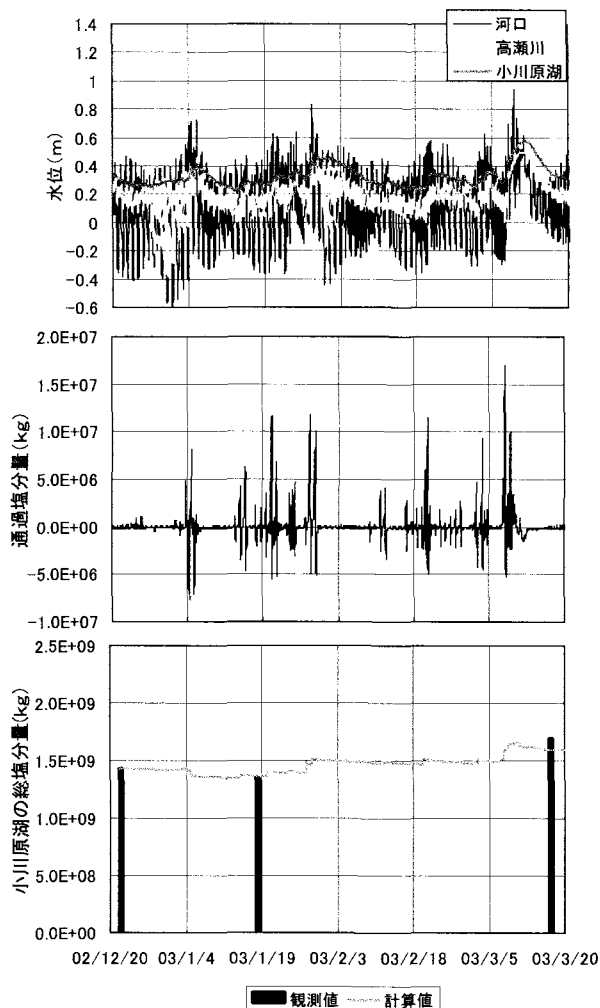
る。設置されている超音波ドップラー流速計(ADP)は、河床部(センサー面位置:約T.P.-2.9m)に設置され、水面まで0.25m間隔で流速が測定され、10分毎に平均化処理されている。塩分・水温計は流速計とほぼ同様の水平位置にあり、上層はT.P.-0.517m, 下層はT.P.-2.317mの位置で測定している。

(2) 小川原湖の現地観測データ

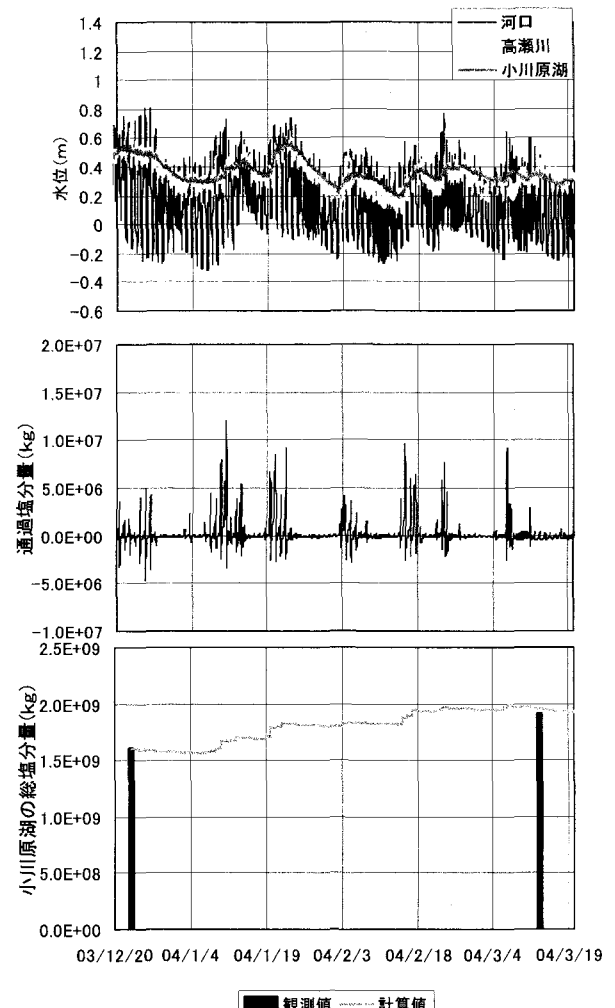
2002年8月～2004年3月の期間において、最深部の塩分調査を多項目水質計(ALEC社 クロロテックAAQ1183-PT)を用いて月1回程度実施した。水深方向に0.2m間隔で塩分を測定した。現地観測の結果から湖内の塩分が水平方向ではほとんど変化しないことが分かっている³⁾。そこで、最深部の塩分を基に小川原湖の体積から湖内の総塩分量を算定すると、図-3のようになる。2002年の総塩分量は流入・流出を繰り返している。2003年, 2004年ともに3月の総塩分量が、大きくなっている。これは、冬季に湖水水位が低くなるため、塩分の流入が多くなると考えられる。

(3) 河口の塩分流入・流出量

観測所のデータから、塩分通過量を算定する。流速は横断面の1点で測定しているが、過去の現地観測⁴⁾から、逆流時には横断面方向の流速分布が変化するため、必ずしも現地データが断面全体を代表するとはいえない。そこで、西田・中辻の方法⁵⁾により高瀬川観測所の各時間の水位, Cl⁻濃度, 流速からそれぞれ時間毎の断面面積, 断面平均塩分量, 断面平均流速を求め、それらから単位時間当たりの断面通過塩分量を求めた。例として、図-4(a)に2002年12月20日～2003年3月20日, (b)に2003年12月20日～2004年3月20日の水位時系列, 通過塩分量, 高瀬川の通過塩分量から求めた小川原湖の貯留塩分量(以下, 計算値とする)と実際の小川原湖の観測から求めた総塩分量(以下, 観測値とする)を示す。横軸の目盛は15日間隔である。図-4の横軸右端が2003年3月20日, 2004年3月19日になっているのは、うるう年のためである。各々2002年12月22日, 2003年12月23日を初期値としている。通過塩分量は、符号が正のとき小川原湖へ流入, 負のときに太平洋へ流出する。計算値と観測値を比較すると、図-4(a)より2002年は1月の計算値と観



(a) 2002年12月20日～2003年3月20日



(b) 2003年12月20日～2004年3月20日

図-4 高瀬川の通過塩分量の計算

測値の差が $0.13 \times 10^9 \text{ kg}$ である。しかし、3月は、 $0.90 \times 10^9 \text{ kg}$ の差がある。図-4 (b)より2004年3月は $0.47 \times 10^9 \text{ kg}$ の差がある。西田・中辻は1997年11月6日～11月25日の期間で、計算値は $1.65 \times 10^9 \text{ kg}$ となり、観測値は $1.41 \times 10^9 \text{ kg}$ と算定され、その差は $0.24 \times 10^9 \text{ kg}$ である⁵⁾。同じ方法で計算しているが、計算値と観測値の差は本研究の方が大きくなった。高瀬川河口部は河口と小川原湖の水位差によって、塩淡混合は強混合型から弱混合型など様々に変化する。また、複断面水路の効果で上層と下層の塩分流入に時間的な差が生じるときがある。このため、計算値と観測値との間に差が生じたと考えられる。

3. 実験から得られる混合特性

(1) 実験装置・方法

図-5に実験水路の概略図を示す。水路は高瀬川の河床縦横断面図を参考に、平均化した断面を鉛直方向に約1/50、水平方向に約1/1500の密度フルード数相似で、水平に設置してある。水路長は4.00mで図-5 (e)の様な左右対称な複断面水路である。両端の水槽の塩

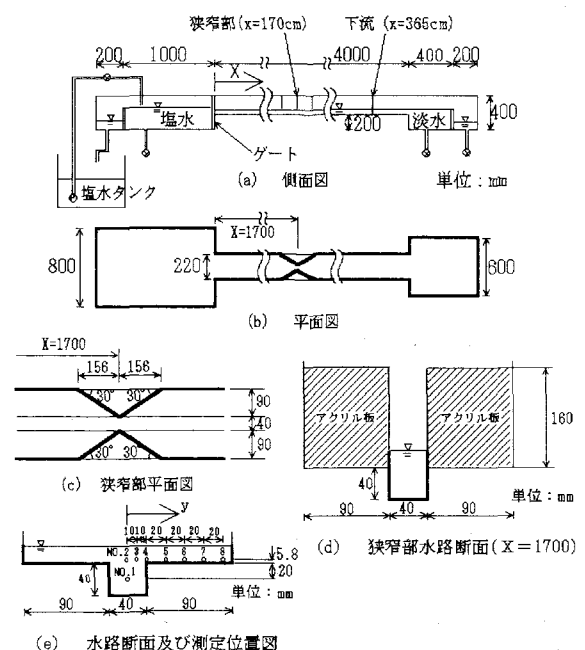


図-5 実験水路の概略図

水側は太平洋、淡水側が小川原湖を想定している。こ

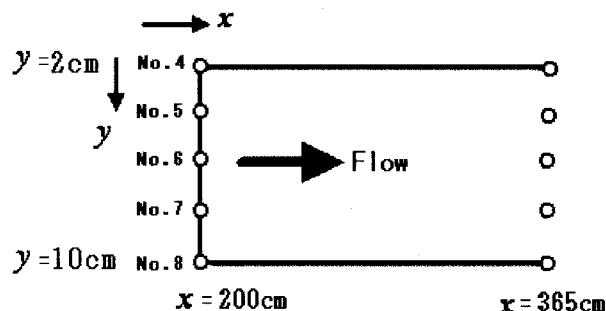
表－１ 実験条件

CASE	水面勾配 I	初期水位(cm)		塩淡水 水位差 Δh (cm)	ゲート操作 時間 ΔT (sec)	水路形状
		淡水槽 h_1	塩水槽 h_2			
CASE1	1/1481	4.88	5.15	0.270	167	複断面
CASE2	1/870	4.80	5.26	0.460	216	
CASE3	1/1481	1.61	1.88	0.270	167	単断面
CASE4	1/870	1.53	1.99	0.460	216	
CASE5	1/1538	5.18	5.44	0.260	124	複断面
CASE6	1/870	5.20	5.66	0.460	173	
CASE7	1/1481	4.88	5.15	0.270	167	複断面+ 狭窄部
CASE8	1/870	4.80	5.26	0.460	216	

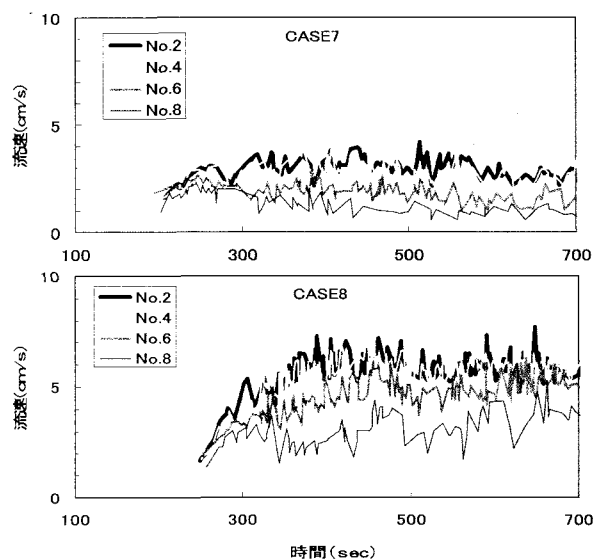
これらの水槽には越流堰を設置し、水位を調節している。塩淡水の境界をゲートで区切り、このゲートを開ける速度を調節することにより擬似的に潮汐を与えた。小川原湖の水位を一定とし、河口では潮汐を単純なsine curveと考え、小川原湖と河口の水位差が最大となるまでの時間 ΔT をゲート操作時間としている。淡水には水道水、塩水には食塩水を用い、塩淡水の相対密度差を0.002に調節して使用した。両端の水槽の水位を各ケースの水位にあわせた後、塩淡水境界のゲートを所定の時間で全開させる。塩分濃度の測定には導電率計(KENEK MK-203MKS-50-04)を使用した。図－５(a)のように塩水槽のゲート位置を原点とし、そこから主流方向を x 、図－５(e)のように水路中心軸を原点とし、そこから水路横断方向の距離を y とする。表面流速はパンチくずを流し、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 $x=200\text{cm}$ 断面(上流側)、 $x=365\text{cm}$ 断面(下流側)、表面流速の縦断測定位置は $x=315\text{cm}$ 断面で、塩分濃度の横断面測定位置は図－５(e)のNo.1～No.8である。実験条件は、各観測所(図－１参照)で測定された水位および塩分濃度のデータを基に表－１の様に設定した。CASE1¹⁾は1991年11月3日～11月4日の緩混合的な場合、CASE2¹⁾は1991年11月8日の強混合的な場合である。CASE3¹⁾は単断面水路においてCASE1と同様の塩水と淡水の初期水位差(以下、塩淡水位差とする)である。CASE4¹⁾は単断面水路においてCASE2と同様の塩淡水位差である。CASE5は1991年11月8日～11月9日の場合でCASE1とほぼ同様の塩淡水位差ではあるが塩水と淡水の水深が大である。CASE6は1991年11月8日の場合で塩淡水位差はCASE2と同様だが塩水と淡水の水深が大である。CASE7・CASE8はそれぞれCASE1・CASE2に狭窄部を設けたものである。

(2) 混合係数の計算方法

本研究では複断面水路において、高水敷の水深が浅い場合を対象とした。また、水路横断方向の流速は非常に小さいと考えられ、無視できるものとする。主流方向では移流により塩水が輸送されるものとし、次式のように表した。



図－６ 計算領域の概念図



図－７ CASE7およびCASE8の表面流速

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = k_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \quad (3.1)$$

ここで、 c ：塩分濃度、 t ：時間、 x ：主流方向座標、 y ：水路横断方向座標、 u ： x 方向の流速、 k_y ： y 方向混合係数である。この式に、 c と u を与えて k_y を求めた。本研究では2断面の測定結果を用いる。計算方法は、実験で得られた上流部と下流部の塩分とその間の表面流速を用いて、塩分濃度変化時の k_y を求める。計算では式(3.1)を差分化し、ADI法⁶⁾を使用した。計算は、高水敷上の図－５における $x=200\sim 365\text{cm}$ 、 $y=2\sim 10\text{cm}$ の間で行った。境界条件には $x=200\text{cm}$ 断面の実験データおよび $y=2\text{cm}$ 断面と $y=10\text{cm}$ 断面での実験データを用いた。水深方向には図－５(e)に記載されている位置である。図－６は計算領域の概念図であるが、この図の太線部分の塩分濃度を境界条件として与えた。計算格子幅により測定していない場所の塩分を与えないといけないことになるが、実験データより比例計算して補間した。流速も同様に実験データを与えている。 k_y を仮定し、 $x=365\text{cm}$ 断面の $C1^-$ 濃度比を求め、この断面平均値と実験値の $x=365\text{cm}$ 断面平均値との相関係数 R を計算する。 k_y を変化させながら R が最大になっ

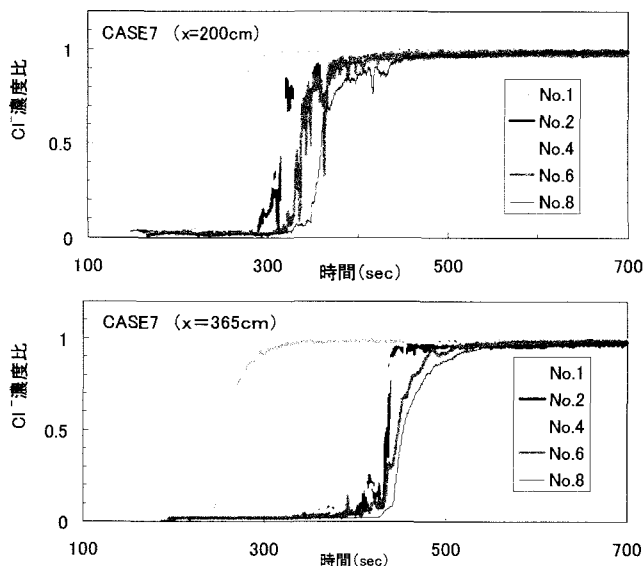


図-8 CASE7の上流部・下流部における Cl^- 濃度比

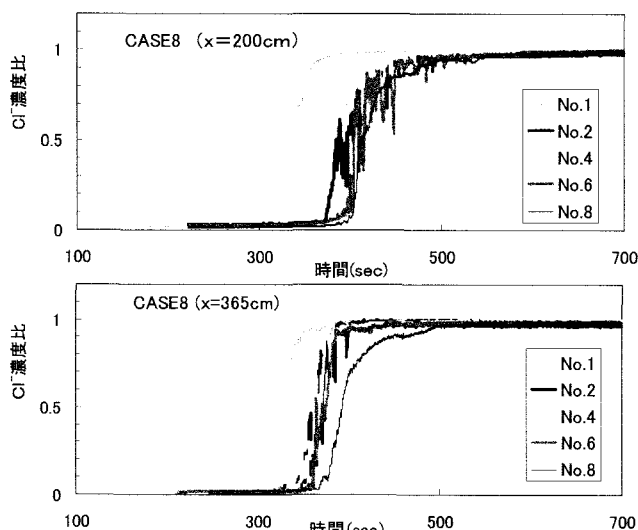


図-9 CASE8の上流部・下流部における Cl^- 濃度比

たときの k_y を求める。計算の格子間隔は $\Delta t=0.8\text{sec}$, $\Delta x=1.0\text{cm}$, $\Delta y=0.2\text{cm}$ である。

(3) 実験水路における混合係数

実験により得られた表面流速と Cl^- 濃度比を用いて(2)の方法により混合係数を求めた。図-7は、測定されたCASE7およびCASE8の表面流速である。図-8, 図-9はCASE7およびCASE8の上流部・下流部における Cl^- 濃度比(塩水槽の初期濃度を1としている)の時系列である。表面流速および Cl^- 濃度比のサンプリング間隔は 0.2sec である。与えた実験データは上流側($x=200\text{cm}$)のNo. 4~No. 8の Cl^- 濃度比とNo. 4~No. 8の表面流速である。これらより $x=365\text{cm}$ 断面における実験値と計算値の断面平均の時系列が図-10である。これはCASE7(複断面+狭窄部, 塩淡水位差小)の場合で,

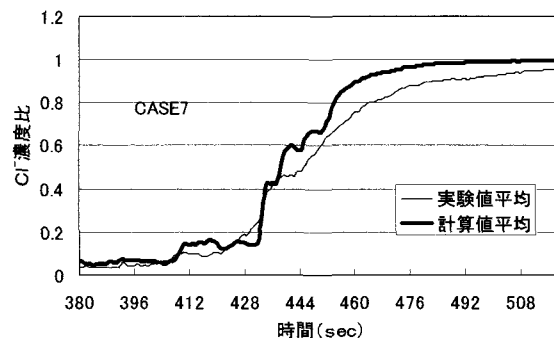


図-10 実験値と計算値の断面平均の時系列
(CASE7, 複断面+狭窄部, 塩淡水位差小)

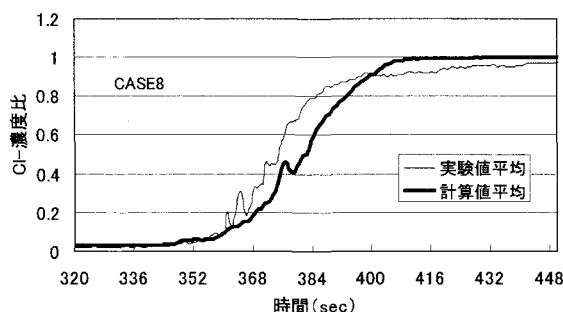


図-11 実験値と計算値の断面平均の時系列
(CASE8, 複断面+狭窄部, 塩淡水位差大)

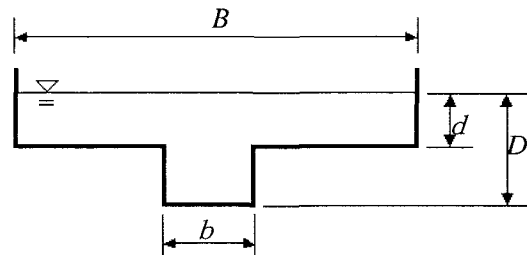
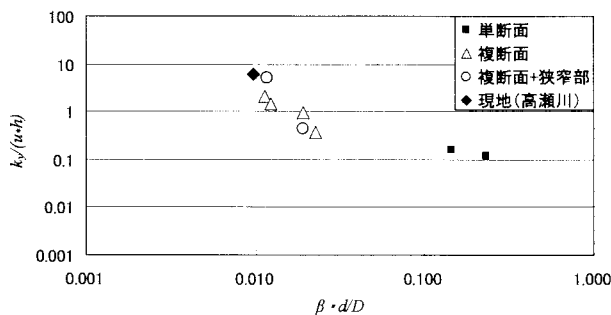


図-12 複断面水路の横断面と記号の定義

$=8.6\text{cm}^2/\text{sec}$, $R=0.993$ である。 R は実験時の Cl^- 濃度比の断面平均値が $0.1\sim0.7$ の区間で計算している。図-11はCASE8(複断面+狭窄部, 塩淡水位差大)の場合で, $k_y=1.0\text{cm}^2/\text{sec}$, $R=0.965$ である。今回実験を行ったCASE7とCASE8における k_y を比較するとCASE7の方が k_y の値が大きくなった。実験水路における既往の研究¹⁾と本実験の結果をまとめたものが表-2である。ここで r は全断面に対する径深で実験定常時に測定した水深から計算した。 u_* は摩擦速度で、全断面に対する平均値である。 h は水理水深, Δh は塩淡水位差, k_y は混合係数, $k_y/(u_*h)$ は無次元混合係数である。CASE7はCASE1に狭窄部を考慮したものだが、混合係数は大きくなっている。CASE2とCASE8を比較するとCASE8の混合係数の方が小さくなっている。既往の研究において、各CASEとも塩淡水位差小で混合係数が大きくなっている。従来の水路のアスペクト比による整理だと複断面水路密度流の無次元混合係数 $k_y/(u_*h)$ は逸脱してしまうので、複断面水

表-2 結果のまとめ

CASE	径深 r (cm)	摩擦速度 u_* (cm/s)	水理水深 h (cm)	塩淡水 水位差 Δh (cm)	混合係数 k_y (cm ² /s)	無次元混合 係数 $k_y/(u_*h)$	相関係数 R	水路 断面形
CASE1	1.242	0.907	1.82	0.27	3.4	2.06	0.981	複断面
CASE2	1.255	1.189	1.84	0.46	2.1	0.96	0.919	
CASE3	1.576	1.021	1.84	0.27	0.3	0.16	0.994	
CASE4	1.584	1.336	1.85	0.46	0.3	0.12	0.994	単断面
CASE5	1.427	0.953	2.13	0.26	2.9	1.43	0.977	
CASE6	1.508	1.304	2.27	0.46	1.1	0.37	0.990	
CASE7	1.273	0.918	1.87	0.27	8.6	5.02	0.993	複断面+
CASE8	1.291	1.206	1.90	0.46	1.0	0.44	0.965	

図-13 $k_y/(u_*h)$ と $\beta \cdot d/D$ の関係

路と塩水遡上の特性を複合して考えるに至った。一般に、複断面水路流れの特性は、低水路幅・全水路幅比 b/B 、低水路幅・低水路水深 b/D 、高水敷水深・低水路水深比 d/D の3つのパラメータで表され(図-12参照)、パラメータのわずかな変化が流れ場に影響する。全水路幅 B は十分大きいものとして、複断面水路のパラメータを d/D に着目してデータを整理してみた。そして、密度流のパラメータとして塩淡水の相対水位差 β に着目し、次式(3.2)のように定義した。

$$\beta = (h_2 - h_1)/h_2 \quad (3.2)$$

β は相対水位差、 h_1 は初期淡水水深、 h_2 は初期塩水深である。 β の大小は流速に関係する。さらに、複断面水路のパラメータ d/D と密度流のパラメータ β の積を求めた。単断面水路の場合は $d=D$ として計算している。図-13に $k_y/(u_*h)$ と $\beta \cdot d/D$ の関係を示している。 $k_y/(u_*h)$ で無次元表示しているのは、主に底面摩擦力と水深が水平方向の輸送を規定していることを意味する。この図から、断面形状が「単断面」と「複断面」ではその関係が異なることがわかる。複断面水路では、低水路と高水敷の間に生じる shear が大きいため、単断面とは流れの特性が異なる。また「狭窄部+複断面」と「複断面」のみの場合の関係は同様のものといえる。この関係は、現地の場合¹⁾ もほぼ当てはまることから水平方向の混合は複断面による影響が大きいことがわかる。

4. おわりに

(1) 現地データより小川原湖への貯留塩分量の算定した結果、ある程度の見積もりができることがわかった。しかし、河口の水位変動により塩淡水混合は、強混合型から弱混合型など様々に変化するため、高瀬川観測所の上下2点の平均データでは、観測値との誤差が生じる。

(2) 無次元混合係数は、複断面水路のパラメータと密度流のパラメータの積に関係する。

(3) 水路横断方向の混合係数を算定した結果、複断面に狭窄部を考慮した場合と複断面のみの場合の関係は同様のものといえる。この関係は、現地の場合にもほぼ当てはまる。

謝辞：本研究を行うにあたり、国土交通省東北地方整備局高瀬川河川事務所からは貴重なデータを御提供いただいた。また、現地観測では、小川原湖漁協の方々に御高配いただいた。併せて謝意を表します。最後に、本研究は科学研究費補助金(課題番号 14550517)による研究の一部であることを付記します。

参考文献

- 1) 藤原広和・沢本正樹：複断面水路密度流の横断方向拡散係数について、水工学論文集, 第45巻, pp. 961-966, 2001.
- 2) 藤原広和・石川忠晴・西田修三・鶴田泰士・沢本正樹：高瀬川の複断面河道部における塩水遡上特性, 水工学論文集, 第44巻, pp. 1005-1010, 2000.
- 3) 水野俊輔・高杉奨・藤原広和：小川原湖の塩分および水温分布に関する現地観測について, 平成14年度土木学会東北支部技術研究発表会概要, pp. 188-189, 2003.
- 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) 西田修三・中辻啓二：緩混合河川における流量と塩分輸送量の算定, 水工学論文集, 第43巻, pp. 869-874, 1999.
- 6) 河村哲也：応用数値計算ライブラリ流体解析 I, 朝倉書店, pp. 36-38, 1996.

(2004.9.30 受付)