

河口密度流の非定常特性に関する実験的研究

加藤 始*, 真中 剛**, 三村信男*

(平成元年8月31日受理)

Experimental study on the unsteady characteristics of tidal estuary flow

Hajime KATO*, Tsuyoshi MANAKA** and Nobuo MIMURA*

Abstract—Experiments of tidal estuary flow of various mixing type including nearly well mixed type were carried out using a small scale tidal flume apparatus. Both time and spatial variations of salinity and current velocity have been measured elaborately by producing sinusoidal tide many times under the identical conditions. Then the features of the variation of velocity and salinity profiles were examined for each mixing state.

In the cases of partially mixed or well mixed type, the depth-mean velocities were found to be in good agreement with the computed velocities obtained from a numerical model with neglect of vertical stratification. In order to investigate the salt transport mechanism the velocity and salinity data were analyzed by dividing them into four components, respectively. It was confirmed that the dominant component of the salt transport flux is a so-called gravitational circulation term in the case of rather weakly mixed type, while it is a shear-diffusion term in the case of nearly well mixed type.

For the check of the dynamical condition at the river mouth, the variation of the densimetric Froude number F_{r_i} was examined. It was found that the section where $F_{r_i}=1$ moved considerably with the phase of the tide and that it entered into the river at the time of the maximum ebb current. This suggests that the river mouth condition cannot be set up in a simple form.

1. まえがき

潮汐作用によって塩水が河道部奥深くに侵入し、河川水と混合する現象は河口密度流と呼ばれている。この現象は Stommel¹⁾の提案以来、一般に弱・緩・強混合型に分類して議論されている。弱混合型は主として、潮汐の小さな河川に見られるもので、塩水と淡水があまり混合せず二層状態となり、海水はいわゆる塩水くさびを形成して河川に侵入する。強混合型は潮汐の

大きな河川に見られ、鉛直方向に密度が一様化し、主として水平方向にのみ密度勾配が存在する。緩混合型はその中間的なもので、水平及び鉛直の両方向に密度勾配が存在する。実際の感潮河川においては、河口からの距離、月齢、潮位差、河川流量等によって混合形態はさまざまに変化していることが知られている²⁾。

定常状態または定常に近い状態の弱混合型については従来から研究例も多く、その力学的構造についてもかなりよく解明されている。即ち、河口付近で内部フ

* 茨城大学工学部建設工学科(日立市中成沢町)

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316, Japan

** 茨城大学大学院工学研究科建設工学専攻(日立市中成沢町)

Graduate Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316, Japan

フルード数が1となることが知られており³⁾, それを使った塩水くさび形状の計算法も確立されている⁴⁾。一方, 緩・強混合型についての研究は従来, Ippen⁵⁾らの大型水路を使った実験例以外, 主として現地観測データを使って行われている。国内での研究例としては, 宇野木⁶⁾の巴川等のデータの解析, 海外においては Fischer⁷⁾の現地データをもとにした流れの横断方向に対する拡散や塩分輸送特性に関する研究等のいくつかがあるが, その数はあまり多くない。また最近では, Oey⁸⁾や Murakami⁹⁾がそれぞれいろいろな仮定を使って解析的にこの種の流れの力学的解明を試みている。この様に研究例, 特に実験によるものが少なく, さらに流れの構造が複雑になるためにその力学的構造を十分に解明するまでには至っていない。実験例が少ないのは吉田ら¹⁰⁾が指摘しているように, 小規模実験装置で強混合の流れを起こすことが困難なためであるからとも考えられる。本研究は以上の事項を踏まえて, 種々の工夫を施した小規模実験装置を用いて, 非定常な弱混合並びに緩・強混合型に近い河口密度流を発生させ, その流速場・密度場の構造や塩分輸送特性を明らかにしようとするものである。即ち, 野外データのように直ちに現地の現象そのものを示すものではないが, 実験室における利点を生かした測定を試みた。そのため, 塩水の補給量や潮汐の再現性, 河口の境界条件にも配慮し, 各種混合形態における流速・塩分濃度・潮位等を詳細に測定した。そして, これらのデータをもとに, 成層を考慮しない河川潮汐の流速の計算値との比較, 内部フルード数の測定による河口条件の検討, 塩分輸送特性の解析を行った。

2. 実験方法

2.1 実験装置

本研究に用いた実験装置は図-1の略図に示すように, 河川部水路(勾配0, 幅15cm×長さ610cm×高さ310cm)と海部平面水槽(幅2m×長さ2m), 潮汐発生装置, 二つに区切られた塩水貯水槽(潮汐用及び塩水補給用)から成る。潮汐の発生は, 基本的には海部水槽と潮汐用塩水補給水槽との間で塩水をポンプによって出入させ, 河川流量と後に述べる塩水補給量に相当する水量をオーバーフロー堰により排水することにより行う。そのためパソコンからのDA変換電圧を利用して, 水位が正弦波形となるようにニードルバルブの開度及びオーバーフロー堰の上下動を制御することによって潮汐を発生させた。これによって, 水槽部

における水位変化の誤差を5サイクル以上繰返し行っても1mm以内におさめることができた。得られた潮汐波形状の一例を図-2に示している。

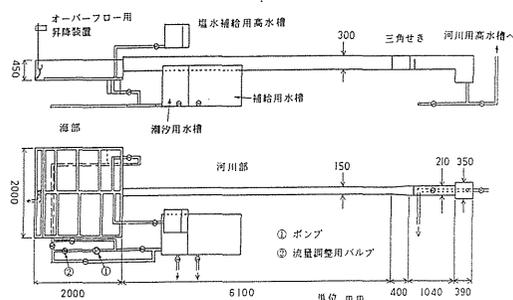


Fig. 1 A sketch of the experimental equipment.

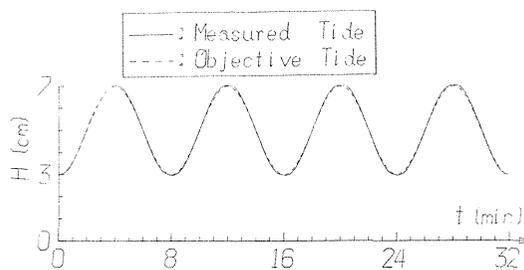


Fig. 2 An example of measured and objective tide variation.

2.2 実験方法

実験条件は, 塩水と淡水の相対密度差 $\varepsilon=0.002$, 平均水深を5cm, 河床勾配をゼロの一定とし, 潮汐周期2種類, 振幅3種類, 河床粗度(高さ8mm, 間隔11cm)の有無, 河川流量2種類, これらの条件を組み合わせ表-1に示すように7種類の実験ケースを行い, 各種混合形態の流れを発生させた。

水位の測定には容量式波高計, 塩分濃度の測定には導電率計を使用した。流速の測定は水路の中心軸に沿って, 水素気泡発生装置とタイマー付きモータードライブ・カメラを用いて行った(写真撮影間隔は15または10秒)。ここで特に弱混合の場合には, 淡水と塩水が上下2層の成層状態となるために, 水素気泡発生装置を2系列用いて上下層別々の電圧で気泡を発生させた。流速とその乱れの測定には Hot-film 流速計も使用し, これらのデータはAD変換器により記録した。

Table 1 Experimental cases.

ケース名	T (min)	振幅 (cm)	Q (cm ³ /s)	粗度
R-1	5	4	50	有り
R-2	8	4	50	有り
R-3	8	4	110	有り
S-1	8	4	50	無し
S-2	8	4	110	無し
S-3	8	2	50	無し
S-4	8	1	50	無し

座標の取り方は河口の水路中心底面を原点とし、上流向きに x 軸を、上向きに z 軸を設定した。

2.3 塩水の補給量について

大きさの限られた実験装置において長時間にわたって実験を繰返す場合、塩・淡水の混合によって生じる中間濃度の水を排除し河口の境界条件を一定に保つため、適当な塩水を補給することが必要である。定常状態の実験においてもこれは同じであるが、この補給量として従来の研究では河川流量に対して一定割合の値が用いられてきており、その決定法は明確でない。

本実験と類似の装置を用いた松永¹¹⁾の定常実験においては、河口付近の塩水と淡水の境界面の高さが時間的に変化しない場合の補給量を適正補給量と考え、多くのデータから次式が得られた。

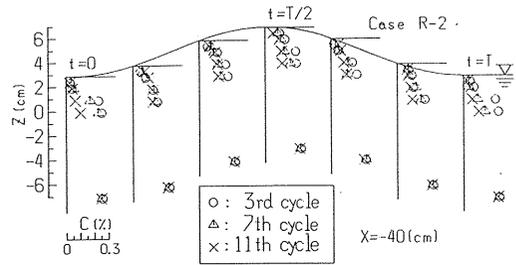
$$Q_0' = 0.63 \varepsilon^{-1/6} q^{4/3} \quad (\text{cm}^3/\text{s}) \quad (1)$$

ここで、 Q_0' : 定常実験における適正補給量, ε : 相対密度差, q : 単位幅当りの河川流量である。

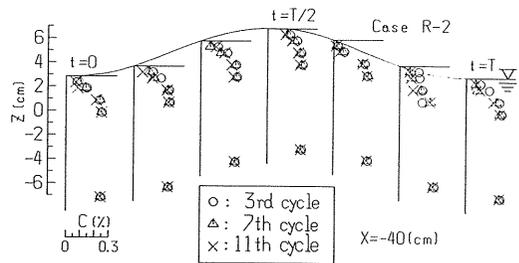
定常実験に比べて塩・淡水の混合がはるかに大きい今回のような非定常実験では、(1)式で求めた Q_0' よりも相当大きな補給量の必要性が予想される。そこで本実験では、試行錯誤的に補給量 Q' を変えた予備実験を繰り返して行い、各実験ケースにおける Q_0' に相当する量 Q_a' を求めた。即ち、潮汐を十数サイクル以上繰返し発生させても河口のすぐ外側で鉛直塩分濃度分布があまり時間的に変化しない補給量を、今回の非定常実験の適正補給量 Q_a' とした。その結果を表-2 に示す。定常流の場合の 3~17 倍もの量となった。特に粗度を用いたケースではその量が大きく、これは後に示す流速の乱れと密接な関係があると考えられる。なお、図-3 (b) には適正補給量を用いた場合の、図-3 (a) にはそれよりも少ない場合の河口のすぐ外側の鉛直濃度分布を示してある。これらの比較から適正補給量を用いた場合の現象再現性の良さがわかる。

Table 2 RMS values of velocity fluctuations.

ケース名	Q_a' (cm ³ /s)	Q_a' / Q_0'
R-1	153	17.3
R-2	115	13.0
R-3	135	5.3
S-1	28	3.2
S-2	73	2.9



(A) $Q' = 19.9 \text{ (cm}^3/\text{s)}$



(B) $Q' = 115 \text{ (cm}^3/\text{s)}$

Fig. 3 Time variation of salinity profiles for different supplying rate of salt water.

3. 実験結果及び考察

3.1 流速の乱れについて

図-4 は種類のケースでの一周期間の流速変化の測定例 ($x=40\text{cm}$, $z=2\text{cm}$) を示したものである。S-1, S-4 のように滑面のケースでは流速変動があまり見られないのに対して、粗度を用いたケース R-2 では上げ潮及び下げ潮の最盛期に大きな流速変動が発生していることがわかる。

今回、この変動、即ち流速の乱れの大きさを各実験ケースごとに、定量的に比較することを試みた。ある

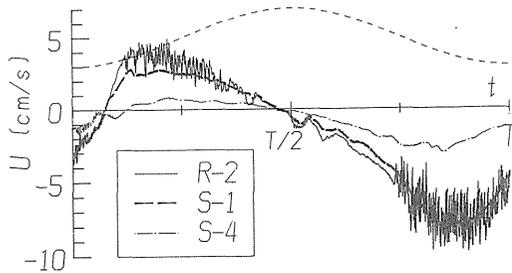


Fig. 4 Examples of current velocities measured by using a hot-film anemometer ($x=40\text{cm}$, $z=2\text{cm}$).

時刻 t における流速を $U(t)$, その時点での平均的な流速(潮汐変動成分)を $U_0(t)$, 乱れの成分を $U'(t)$ とすると,

$$U(t) = U_0(t) + U'(t) \tag{2}$$

とおける。本来 $U_0(t)$ には同じ潮汐位相でのアンサンブル平均を用いるべきであるが、ここでは1周期間のデータで計算を行うので、 $U_0(t)$ には移動平均を用いた。この場合、平均を取る時間の長さ t_a のとり方が問題であるが、 t_a を変えて1潮汐周期についての U' の rms の値 U'_{rms} を計算してみると図-5 の様な結果が得られた。即ち、ほとんどのケースで U'_{rms} は t_a と共に単調に増加するが t_a が周期 T の1%程度のところで U'_{rms} の変化率が急減するかあるいは増加が一旦止まることがわかる。ここでは便宜的に t_a を T の1%とし、各ケースの乱れの平均値 (U'_{rms}) を比較すると表-3 の様になる。即ち底面粗度がある場合の乱れは、粗度無しの場合の10倍以上になっている。2.4で述べたようにこれらの値は塩水の補給量と密接な関係を持つと思われる。

3.2 流速及び濃度分布の変化

図-6にR-1, R-2, S-1, S-4のケースの流速及び塩分濃度の時空間分布を示す。ケースR-1は前節に示した様に流速の乱れが最も強いケースであり、上げ潮から満潮時にかけては強混合的な濃度分布になっている。ケースR-2もそれに近い形になっているがやや混合が緩やかになり、さらにS-1では緩混合的な濃度分布図になっている。また、ケースR-1, R-2とも下げ潮時には流速の乱れは大きい、濃度分布から比較的二層流的な流れになっていることがわかる。また滑面で

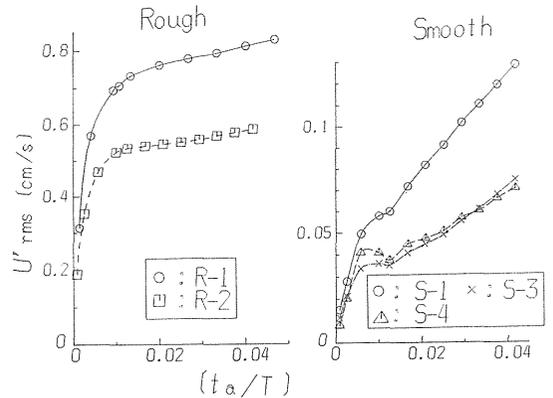


Fig. 5 RMS values of Velocity fluctuations and averaging time length.

Table 3 Optimum supplying rate of salt water.

ケース名	U'_{rms} (cm/s)
R-1	0.700
R-2	0.525
S-1	0.0579
S-3	0.0360
S-4	0.0409

潮汐振幅が1cmと小さいケースS-4では、塩水がくさび状になって出入りしていることがわかる。この場合、上層では常に下流向きの流れとなるが、一方、下層では上げ潮時にはくさびの侵入に伴って弱い上向きの流れが底部に発生し、下げ潮時には底面まで下流向きの流れになることがわかる。

図-7はケースR-2, S-1, S-4の $x=40\text{cm}$ における流速分布図をさらに時間的に詳しく表したものであり、この図から上に述べた各種の流れの違いが良く確認できる。なお、図中の点線は塩・淡水の界面(濃度が底部の1/2になる高さ)を示しているが、どのケースも上げ潮から下げ潮、もしくはその逆に変った直後、急激にその位置が変化しており、混合の強いケースほどその変化が大きい。

3.3 内部フルード数の時間的変化について

定常状態に近い塩水くさび型の河口密度流では、河口部において内部フルード数が一般に1となるという河口条件が使われている。

本研究では非定常な流れにおける河口条件を検討するために弱混合に相当するケースにおいて、河口内外での内部フルード数 F_{ri} の時間的変化を調べた。図-8

はその一例(ケース S-4)を示したものである。河口からかなり外側の $x = -80\text{cm}$ の位置では上流側の $x = -40\text{cm}$ よりも F_{ri} の値が小さくなっており, これは実験装置の特性によるかもしれない。即ち $x = -80\text{cm}$ では必ずしも現地の現象に合った値を忠実に示していないかもしれないが, その他の断面ともあわせて考慮すると, 潮位変化にともなってかなりの幅を持つ

て F_{ri} の値は変化していると言える。特に下げ潮・上げ潮の最盛期には $F_{ri} = 1$ の位置はかなり河口の内・外に移動していることがわかる。このことは非定常な流れにおける河口条件が単純な形では設定できないことを示している。

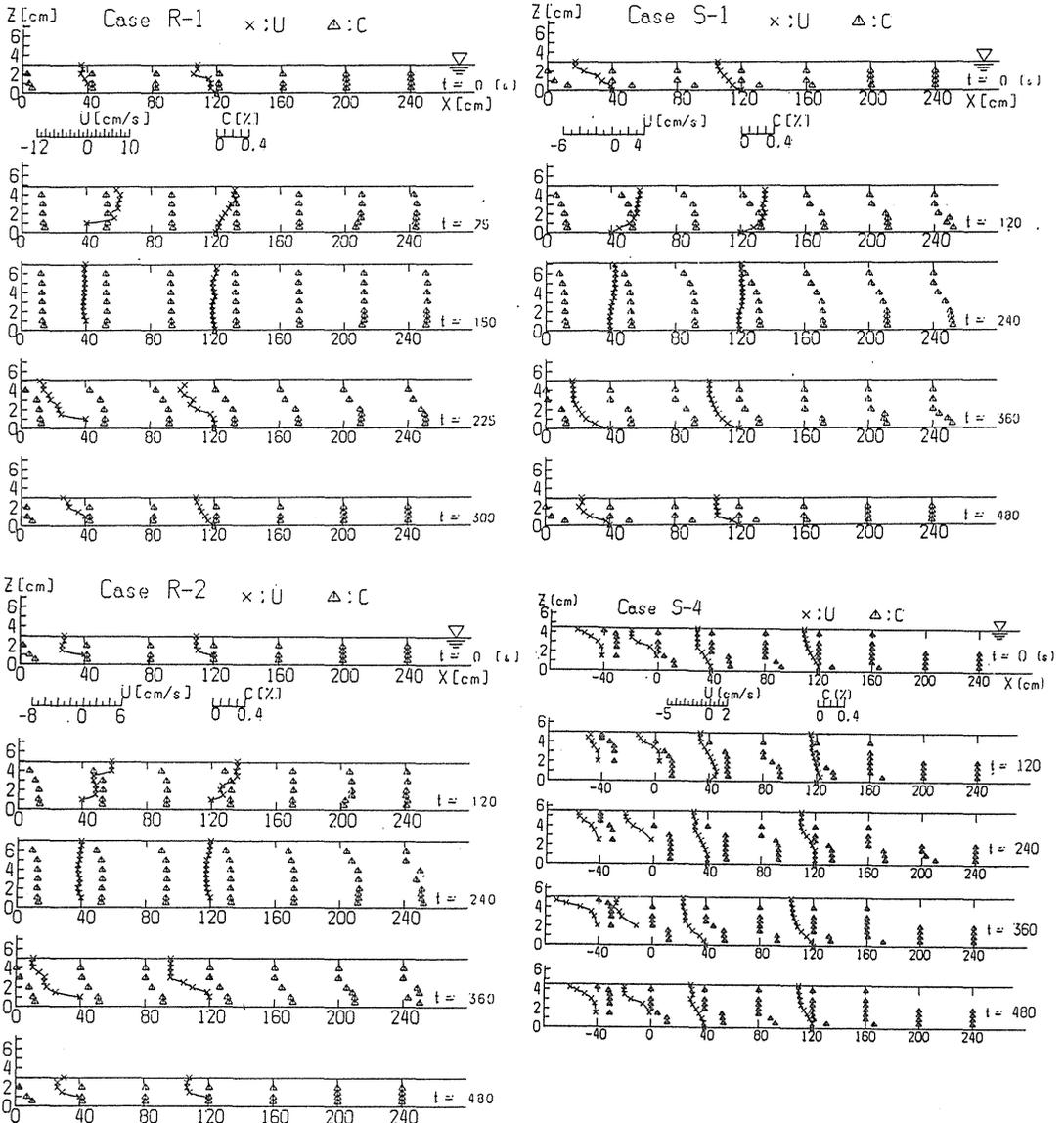


Fig. 6 Time and spatial variations of salinity and current velocities.

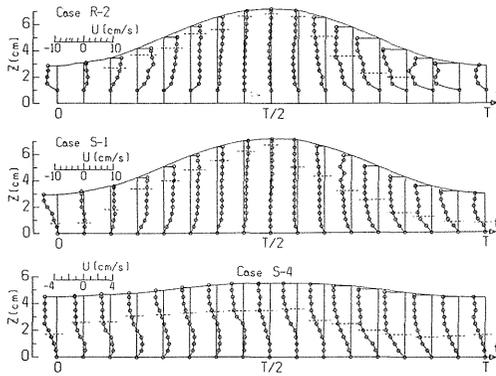


Fig. 7 Time variation of current velocity profiles and the depth of interface over a tidal cycle ($x=40\text{cm}$).

3.4 河川潮汐の数値計算結果との比較

従来、比較的混合が大きいエスチャリーにおいては、潮流流に及ぼす塩・淡水の成層の影響は小さいといわれている⁵⁾。ここではそれを確認するため、塩・淡水の密度差による成層の影響を考慮しない宇野木^{12),13)}の方法に従った差分方程式を数値的に解く方法により、今回の実験条件における潮流流の計算を行い、実測データと比較した。この場合の運動方程式及び連続の式は次の通りである。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} = -g \frac{\partial D}{\partial x} - \frac{gn^2 |U| U}{R^{4/3}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} = -\frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (3)$$

ここで D は水深、 Q は断面流量、 U は断面平均流速、 B は河幅、 R は径深(または平均水深)、 n はマンニングの粗度係数である。境界条件としては、河口 $x=0$ で水位変化を、河川上流端で完全反射の条件(Q =河川流量)を与える。 n の値は Kajiura¹⁴⁾の理論で計算し、 $n=0.011\sim 0.0068$ とした。図-9がこの計算値と実測値から求めた断面平均流速を比較したものである。混合が大きいケース R-2 では全体的にはよく一致しており、水平方向の密度勾配の効果が小さいことを示している。一方、ケース S-1, S-3 と成層度が大きくなるに伴って位相及び流速値の相違が大きくなる。また、ケース R-2 においても下げ潮の最盛期には、計算値と実測値

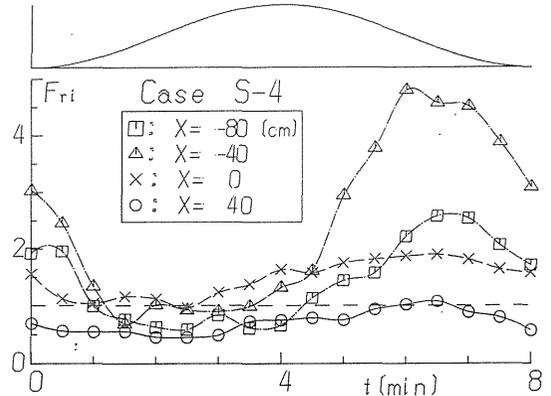


Fig. 8 Time variation of densimetric Froude number over a tidal cycle.

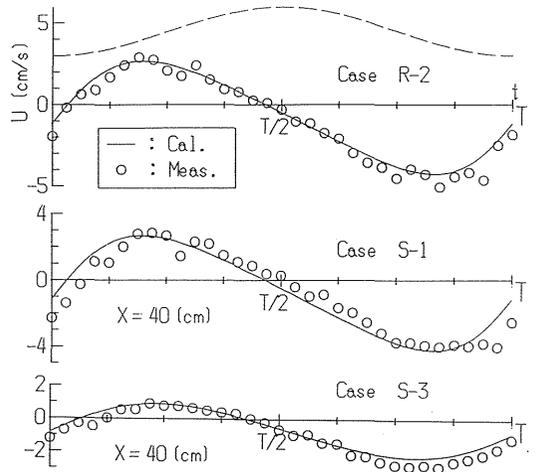


Fig. 9 Comparison of the computed and measured sectional mean velocities.

の違いが見られる。このことは、図-6と合わせて考えると、この位相では濃度分布がやや二層流に近い状態となるためではないかと考えられる。

3.5 塩分輸送特性

河道内でのある鉛直断面において、一潮汐を通しての総塩分輸送量を種々の機構からなる寄与に分解し、その特性を各ケースについて調べた。今回河幅の中央に沿って測定した流速 u 及び塩分濃度 C を幅方向に一定、さらに潮位変化は河道部においては($x=120\text{cm}$ まで)一定と仮定し、 u, C と河川断面積 A を Fischer⁷⁾

及び宇野木⁶⁾に従って

$$\left. \begin{aligned} u(x, z, t) &= u_0(x) + u_1(x, t) + u_2(x, z, t) \\ C(x, z, t) &= C_0(x) + C_1(x, t) + C_2(x, z, t) \\ A(t) &= A_0 + A_1(t) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

の様に分解する。(‐)を鉛直平均、 $\langle \rangle$ を一周期平均とすと、 $u_0 = \langle u \rangle$, $C_0 = \langle C \rangle$, $A_0 = \langle A \rangle$ である。さらに、

$$u_1 = \bar{u} - u_0, \quad C_1 = \bar{C} - C_0, \quad A_1 = A - A_0 \quad (5)$$

と表わされ、残りの量が u_2 , C_2 である。 F を総塩分フラックスとすると、

$$F = \langle A \cdot \bar{u} C \rangle = F_1 + F_2 + F_3 \quad (6)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= C_0 A_0 U_0 + C_0 \langle A_1 u_1 \rangle \\ F_2 &= A_0 \langle u_1 C_1 \rangle + \langle A_1 u_1 C_1 \rangle + u_0 \langle A_1 C_1 \rangle \\ F_3 &= \langle A \cdot \bar{u}_2 C_2 \rangle \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

である。 F_1 は定常な河川流による成分であり、 F_2 は鉛直断面内における平均流速と平均濃度とが時間とともに変動することにより生じる成分、 F_3 は u と C の鉛直平均量からの偏差による成分である。このうち F_3 における u_2 , C_2 を Fischer⁷⁾に従って、

$$\left. \begin{aligned} u_2 &= u_s(x, z) + u'(x, z, t) \\ C_2 &= C_s(x, z) + C'(x, z, t) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

と分解すると、

$$u_s = \langle u \rangle - u_0, \quad C_s = \langle C \rangle - C_0 \quad (9)$$

である。 $\langle u \rangle$ 及び $\langle C \rangle$ の計算においては Fischer は水位変化を無視しているが、本実験では潮汐振幅は平均水深に比べ無視できないので、低潮位より上の高さについては水がある時間帯についてのみの平均とした。 F_3 の計算で0となる項を省くと

$$F_3 = F_{31} + F_{32} + F_{33} \quad (10)$$

となり、ここで

$$\left. \begin{aligned} F_{31} &= A_0 \langle \bar{u}_s C_s \rangle + \langle A_1 \cdot \bar{u}_s C_s \rangle \\ F_{32} &= A_0 \langle \bar{u}' C' \rangle + \langle A_1 \cdot \bar{u}' C' \rangle \\ F_{33} &= A_0 \langle \langle \bar{u}_s C' \rangle + \langle \bar{u}' C_s \rangle \rangle + \langle A_1 \cdot \bar{u}_s C' \rangle + \langle A_1 \cdot \bar{u}' C_s \rangle \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

である。 F_{31} は残差流による成分、 F_{32} はシアと乱流拡散効果による成分である。 $x=40\text{cm}$, 120cm における実験データを基にこれらの成分の計算結果を表-4に示す。吉田ら¹⁰⁾は河口二層流の流況を支配するパラメー

Table 4 Each term of salt transport flux.

	x[cm]	F	F ₁	F ₂	F ₃	F ₃₁	F ₃₂	F ₃₃
R-1	40	4.16	-6.47	8.32	2.31	-0.03	1.97	0.37
	120	1.67	-6.99	5.76	2.90	0.30	2.79	-0.21
R-2	40	-0.08	-9.96	7.41	2.44	0.44	2.07	-0.03
	120	1.82	-5.40	4.43	2.79	0.56	2.47	-0.24
R-3	40	0.51	-9.22	7.01	2.73	1.78	0.42	0.53
	120	0.22	-1.90	1.05	1.06	0.91	-0.08	0.29
S-1	40	2.79	-6.07	6.29	2.48	0.28	2.25	0.05
	120	2.97	-3.51	4.86	1.61	-0.25	1.66	0.21
S-2	40	1.18	-8.41	6.75	2.84	1.37	1.09	0.38
	120	-0.34	-4.24	2.08	1.82	1.10	0.44	0.32
S-3	40	-2.23	-9.91	2.19	5.50	3.54	1.36	0.59
	120	-0.51	-7.19	1.51	5.17	3.88	0.81	0.48
S-4	40	-2.39	-9.03	1.05	5.59	5.01	0.45	0.13
	120	-0.34	-4.79	0.23	4.23	3.77	0.3	0.13

タとして、河口での潮汐による変動流振幅 u_{10} と淡水断面平均流速 U_{10} との比 $\lambda_0 = u_{10} / U_{10}$ を採用している。ここでは、流れの成層度を表わす同様のパラメータとして $U_{rms} = \langle u_1'^2 \rangle^{1/2}$ と u_0 の比を用いることにする。河川流によるもの以外の総フラックス成分 $F_2 + F_3$ に対する F_3 の寄与率を横軸に U_{rms} / u_0 をとって示すと図-10のようになる。これより成層度が増すほどその寄与率が大きくなるのがわかる。逆に緩・強混合形に相当するケースで F_2 の寄与率が大きくなるのは、成層の効果により u_1 と C_1 の時間変化に位相差が生じるためである。

さらに表-4に示すように、 F_3 のうち成層の強いケースでは F_{31} が、弱いケースでは F_{32} が主要項となっている。このことは、弱混合になるほど重力循環流による塩分輸送が卓越し、強混合に近づくほどシア・乱流拡散の効果が大きくなることを示している。

また、1周期を通しての総塩分輸送量の F は0に近い値を示すのが理想であるが必ずしもそうっていない。今回は、河幅の中心軸に沿って測定した値をその断面における代表値としているが、実際には中央と壁に近い端の部分では流れが同じとは限らない。この点

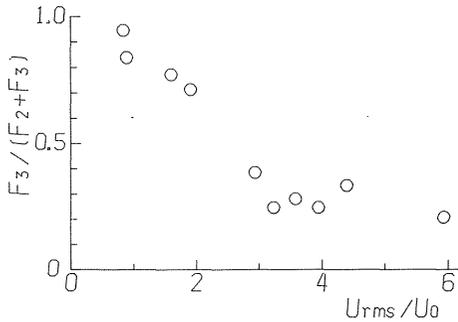


Fig. 10 Variation of the rate of salt transport by advective diffusion vs. stratification index.

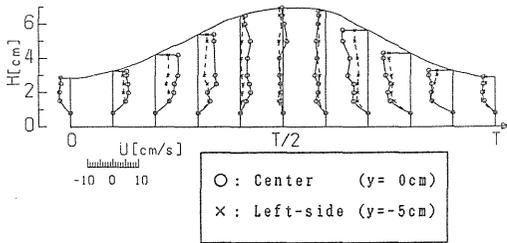


Fig. 11 Comparison of velocity profiles at the center and side position at an identical cross section.

をチェックするため図-11には、水路中央 ($y = 0$ cm) と中央から 5 cm だけずれた点 ($y = -5$ cm) での流速分布の測定例 (Hot film 流速計を 2 本使った反復測定による) を示している。この図の結果からわかるように、水路の中央と端の部分では流速分布に多少の差が見られる。さらにより確かな値を求めるには、断面に対する横方向の違いも考慮する必要がありそうである。

4. 結 論

本研究では、非定常における各種混合形態に相当する河口密度流の実験を行い、補給量や河口条件等にも着目して、流速と塩分濃度の時空間的な変化を詳細に測定した。そしてこれから測定値をもとに、混合形態の違いによる流速・濃度分布の特徴を調べ、塩分輸送フラックスを各成分に分けてその特性を明らかにした。本研究における主要な結論を以下に述べる。

(1) 緩・強混合タイプの流れでは、従来から指摘される通り、流速、塩分濃度とも鉛直方向に一様にな

ることが確認された。特に、粗度がある場合に強混合が出現したが、これは粗度による強い乱れの発生によるものであると考えられる。

(2) 平均時間を潮汐周期の 1% とする移動平均により流速の乱れを計算し、潮汐流の乱れに対する底面粗度の効果を定量的に求めた。またこれにより求めた値は、塩分の補給量と密接な関係があると考えられる。

(3) 緩・強混合に相当するケースでの鉛直平均流速は、密度差を考慮しない数値計算により求めた値とよく一致した。このことは流速分布が鉛直方向に一様化した場合、水平方向の密度勾配の効果は小さいことを示している。また、緩・強混合に相当するケースでも下げ潮の最盛時には、計算値と実測値がやや異なるが、これはこの位相では流れがやや二層的な傾向を示すためではないかと考えられる。

(4) 河川流によるもの以外の塩分輸送フラックス F_2 , F_3 の間では、弱混合に近くなるほど流速と濃度の鉛直平均量からの偏差に基づく F_3 の値が大きくなり、その主要成分はいわゆる重力循環流の効果 F_{31} であった。逆に、緩・強混合に近づくとシア・乱流拡散の効果 F_{32} が F_3 の主要成分となる。

(5) 非定常における河口条件を検討する目的で、弱混合において河口の内外において内部フルード数 F_{ri} を調べた。その結果、従来の定常状態の河口条件である $F_{ri} = 1$ の断面は潮汐とともにかなり移動し、下げ潮時の最盛期には河道内まで入ってくるのがわかった。このことは、非定常流における河口条件が単純な形では設定できないことを示している。

謝 辞

最後に、今回の実験装置の第一段階の整備に協力していただいた元大学院生の芝沼知君、実験とデータ整理に協力してくれた元卒研生の小貫務君、佐久間大亮君、実験の合間に図の整理を手伝ってくれた卒研生の斉藤一明君、登坂弘明君に感謝致します。また、本論文の作成に協力してくれた水理研究室の諸君にも感謝致します。

参 考 文 献

1) Stommel, H. : The role of density current in estuaries, Proc. 5th Cong. I. A. H. R., pp.305

- 312, 1953
- 2) 須賀 堯三: 感潮河川における塩水くさびの水理に関する基礎的研究, 土研資料1537号, 255p., 1979
 - 3) 福岡 捷二・福嶋 祐介・守屋 祥一・新庄 高久: 河口密度流の流動機構と塩水くさびの河口条件, 土木学会論文報告集, 第327号, pp.61~71, 1982
 - 4) 玉井 信行: 密度流の水理, 技報堂出版, 260p, 1980
 - 5) Ippen, A, T : Salinity Intrusion in Estuaries, Estuary and Coastline Hydrodynamics, pp.598~629, 1966
 - 6) 宇野木 早苗: 河川潮汐の研究(第3報), 第20回海岸工学講演会論文集, pp.371~376, 1973
 - 7) Fischer, H. B. : Mixing in Estuaries, Mixing in Inland and Coastal Waters, Academic Press., pp.229~278, 1979
 - 8) Oey, L. Y. : On steady state salinity distribution and circulation in partially mixed and well mixed estuaries, Phys. Oceanogr., Vol.14 , pp. 629~645, 1984
 - 9) Murakami, M. : Dynamical Structure of Vertically Two-Dimensional Estuary in Steady State, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol.42, pp.224~239, 1986
 - 10) 吉田 静男・藤井 浩之: 感潮河口流の密度構造, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 419~423, 1980
 - 11) 松永 透: 河口密度流に関する研究—塩水くさびに関する基礎的実験—, 昭和60年度卒業論文, 1985
 - 12) 宇野木 早苗: 河川潮汐の研究(第1報), 第15回海岸工学講演会論文集, pp.226~235, 1968
 - 13) 宇野木 早苗: 河口付近の潮汐現象, 1974年度水工学に関する夏期研修会講義集, pp.B-6-1~B-6-29, 1974
 - 14) Kajiura, K : On the Bottom Friction in an Oscillatory Current, Bull. of the E. R. I. ,Vol.42, pp.147~174, 1964