

図-2 潮位変化の実測例

15 または 10 秒間隔の潮汐位相ごとに、水路の中心軸に沿って測定した。この際、淡水と塩水では気泡の出かたに差があるため、2 系列の水素気泡発生装置を使用し、上層用の陰極線 (50 μ のタングステン線使用) は電動式の昇降装置に取り付けて、たえず高さや電圧の調節を行った。流速と乱れの測定には hot-film 流速計も使用した。また、水面から一定の距離での測定のため、水面と同期して上・下するパソコン制御の昇降装置も使用した。座標のとり方は、河川にそって河口から上流向きに x 軸をとり、 z 軸を河床から上向きにとる。

(3) 塩水の補給量と潮汐の再現性

定常な塩水楔の実験においても塩水の補給量の決定は重要であるが、従来の研究では河川流量に対して一定の割合の値が使われており、その決定法は明確ではない。今回と同じ実験装置を使った定常実験 (松永, 1985) においては、適正な補給量 Q_0' を、河口のすぐ外の海部での内部境界面の高さが時間と共に変化しない場合の補給量と考えて、多くの実測データから次の式が得られている。

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

ここに q は単位幅河川流量 ($\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$) である。

今回の非定常実験においては、定常実験の場合より塩・淡水の混合ははるかに大きいから、式 (1) が与える値よりかなり大きな塩水補給量が必要と予想された。そこで予備実験により、10 サイクル程度潮汐を起こし続けても、河口のすぐ外 $x = -10 \sim -40 \text{ cm}$ において下方の塩分濃度が低下せず、しかも各潮汐位相での水面付近での濃度分布がほとんど変わらない塩水の補給量を試行錯誤的に求めた。その結果は表-2 の通りで、定常流のときの式 (1) の値の約 3~17 倍の値が得られた。表-2 の結果は粗度があるケースほど適正補給量が大きいくことを示しており、これは後で示すように、流速の乱れの大きさと密接に関係している (図-4 参照)。本実験では、この大きさの補給量を用いた。図-3 は本実験における 11 周期後までの河口のすぐ外での塩分濃度の鉛直分布の測定結果であり、現象の再現性の良さを示している。

3. 流速分布と塩分濃度分布の変化

実験結果の最初に、流速分布と塩分濃度分布の測定結果を示す。まず図-4 は 3 つのケースにおける 1 周期間

表-2 適正補給量 Q_0'

ケース名	T (分)	Q (cm^3/s)	Q_0' (cm^3/s)	Q_0'/Q_0
R-1	5	50	153	17.3
R-2	8	50	115	13.0
S-1	8	50	28	3.2
R-3	8	110	135	5.3
S-2	8	110	73	2.9

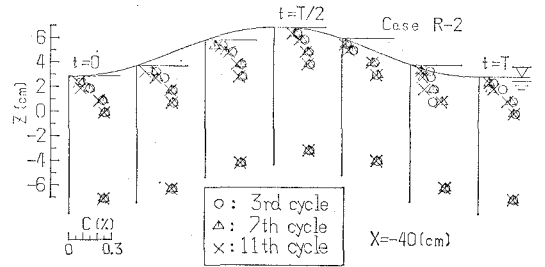


図-3 河口の外での鉛直濃度分布の再現性 ($x = -40 \text{ cm}$)

の流速変化の測定例 ($x = 40 \text{ cm}$, $z = 2 \text{ cm}$) である。滑面のケースとは対照的に、粗度有りのケース (R-2) では大きな乱れが発生していることがわかる。

図-5 は塩分濃度の空間分布の測定例で、ケース R-2 の 3 潮時 ($t/T = 1/4, 1/2, 3/4$)、ケース R-2 の 2 潮時 ($t/T = 1/4, 1/2$)、ケース S-1 の $t = 1/2T$ の時のものを示している。ケース R-1 は底面粗度によって発生する乱れが最も強い場合であり、上げ潮時から最大潮位時にかけていわゆる強混合的な濃度分布になっている。ケース R-2 もケース R-1 に近いが、やや混合が緩やかになっており、ケース S-1 (粗度無し) ではさらに混合が減少して緩混合程度の濃度分布になっている。

図-6 は R-2, S-1, S-4 の 3 ケースの $x = 40 \text{ cm}$ における 1 周期間の流速分布であり、図中には点線で濃度が底面の $1/2$ の値になる高さも示されている。この図から、強ないし緩混合の場合 (ケース R-2, S-1)、流速分布は底面付近を除いて、従来から言われているように鉛直方向に一様になる傾向を示すことが確認できる。図中の点線の位置を淡塩界面と考えると、これらのケースでは、界面が大きく上下することがわかる。しかも上げ潮

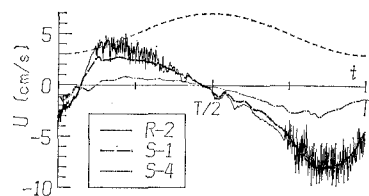


図-4 Hot-film による流速の測定例 ($x = 40 \text{ cm}$, $z = 2 \text{ cm}$)

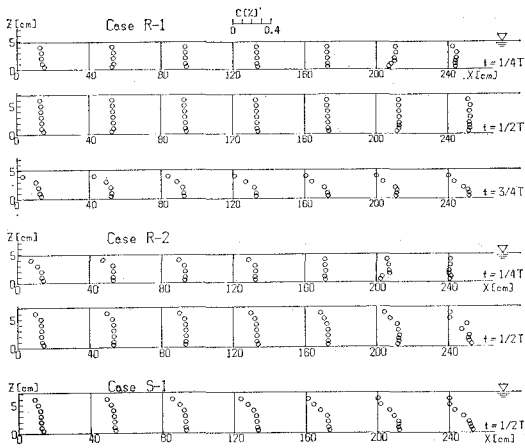


図-5 塩分濃度分布

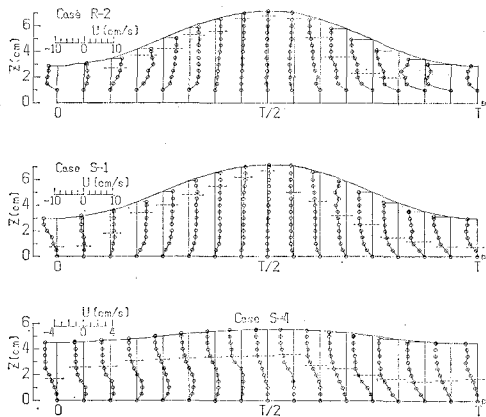
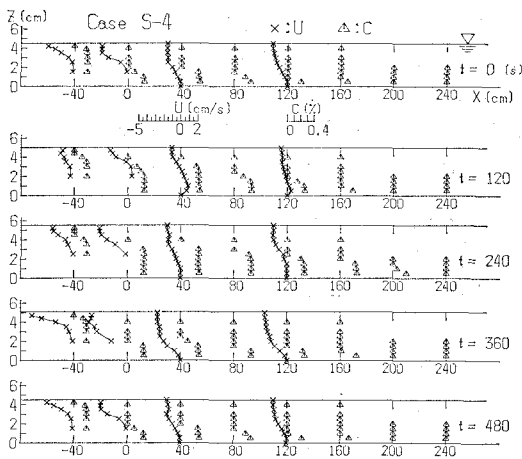

 図-6 1周期間の鉛直流速分布と界面位置の変化 ($x=40$ cm)


図-7 流速・塩分濃度の時空間分布

の位相では混合がすみ界面は素早く表面近くまでせり上がるのに対して、下げ潮の位相では、逆に界面は急速に低下し2層流的になる。ケースS-4のように弱混合に近くなると、上層では常に下流に向かって流れ続ける一方、下層では塩水くさびの侵入に伴って流れが上流向きとなる位相が現れる。このケースでは、界面は潮位の変化に伴って上下するのみである。図-7はケースS-4のこうした流速 ($x = -40 \sim 120$ cm) と濃度の時空間分布を別の形で示したものである。

定常状態に近い河口密度流では、一般に河口付近で内部フルード数 F_{ri} が増加し、河口部で F_{ri} が1になるという河口条件が従来から使われている (例えば福岡ら, 1982)。非定常実験における河口条件を検討するために、弱混合に近いケースS-3とS-4について、河口の内外の数点で内部フルード数の時間的変化を調べたところ、図-8の様な結果がえられた。図-8から、内部フルード数が1となる断面は潮汐位相と共になんかなり移動しており、下げ潮最強時にはかなり河口の外に出ること等がわかる。これは非定常の実験を行う上でも十分注意すべき点であり、また河口密度流のモデル化での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。

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、潮汐流に及ぼす塩・淡水の成層の影響は小さいと言われている (Ippen, 1966)。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無視し、宇野木 (1968, 1974) 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汐流の計算を行い、実測データと比較した。水深を D 、断面流量を Q 、断面平均流速を U 、河幅を B 、径深 (または平均水深) を R 、マンニングの粗度係数を n とする。運動方程式と連続の式は次式で与えられる。

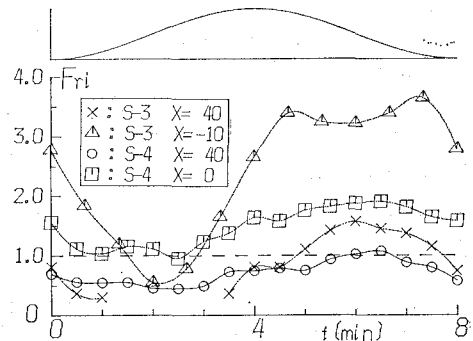


図-8 1周期間の内部フルード数の変化

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

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

境界条件は河口 $x=0$ で水位変化を、河川上流端で河川流量を与える。粗度係数は Kajiura (1964) の理論で計算して、 $n=0.011 \sim 0.0068$ とした。

数値計算結果と実測した断面平均流速との比較例が図—9である。この図の上側に示したケース R-2 と、最も強混合型に近いケース R-1 では、位相・大きさともかなり良く一致しており、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、図—9 のケース S-1 では、流速の値はよく一致するものの位相のずれが少しでっており、弱混合に近いケース S-3 や S-4 では、位相だけでなく、流速の最大値にも 20% 程度の差が現れた。

5. 塩分輸送特性

河口部におけるある鉛直断面を通しての 1 潮汐サイクル間の総塩分輸送量を種々の機構からの寄与に分解し、その特性を調べた。そのため流速 u と塩分濃度 C は幅方向の平均値を表すものと仮定し、これらと河積 A を Fischer (1972) や宇野木ら (1973) に従って

$$u(x, z, t) = u_0(x) + u_1(x, t) + u_2(x, z, t) \dots (4)$$

$$C(x, z, t) = C_0(x) + C_1(x, t) + C_2(x, z, t) \dots (5)$$

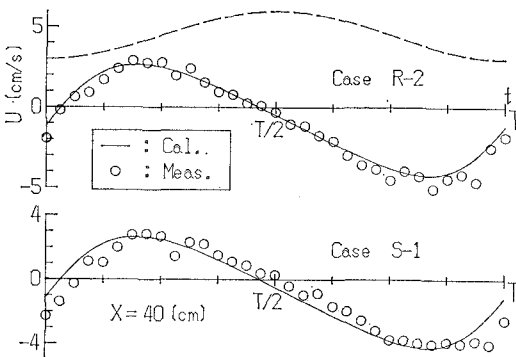
$$A(x, t) = A_0(x) + A_1(x, t) \dots\dots\dots (6)$$

のように分解する。() を鉛直平均量、 $\langle \rangle$ を 1 周期平均量とすると、 $u_0 = \langle \bar{u} \rangle$, $C_0 = \langle \bar{C} \rangle$, $A_0 = \langle \bar{A} \rangle$ である。さらに u_1 , C_1 , A_1 は

$$u_1 = \bar{u} - u_0, \quad C_1 = \bar{C} - C_0, \quad A_1 = \bar{A} - A_0 \dots (7)$$

で与えられる。残りの量が u_2 , C_2 であり、断面平均をとると $\bar{u}_2 = 0$, $\bar{C}_2 = 0$ となっている。そうすると総塩分フラックス F は次のように表される。

$$F = \langle A \cdot \bar{u} \bar{C} \rangle = F_1 + F_2 + F_3 \quad \dots\dots\dots (8)$$



図—9 断面平均流速の数値計算結果との比較

ここで、

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= C_0 A_0 u_0 + C_0 \langle A_1 u_1 \rangle \\ F_2 &= A_0 \langle u_1 C_1 \rangle + \langle A_1 u_1 C_1 \rangle + u_0 \langle A_1 C_1 \rangle \\ F_3 &= \langle A \cdot \bar{u}_2 \bar{C}_2 \rangle \end{aligned} \right\} \dots (9)$$

である。 F_1 は定常な河川流によるフラックス成分、 F_2 は鉛直断面内での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である。 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が、これはさらに次のように分けられる。Fischer (1979) に従って

$$u_2 = u_s(x, z) + u'(x, z, t) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$C_2 = C_s(x, z) + C'(x, z, t) \quad \dots\dots\dots (11)$$

と分解すると、

$$u_s = \langle u \rangle - u_0, \quad C_s = \langle C \rangle - C_0 \quad \dots\dots\dots (12)$$

である。 $\langle u \rangle$, $\langle C \rangle$ の計算で Fischer は水位変化を無視しているが、ここでは、平均水深に比べて潮汐振幅が無視できないため、低潮位より上の高さでは水がある時間だけについて平均値を計算した。 F_3 は、明らかに 0 になる項を除くと次のように表される。

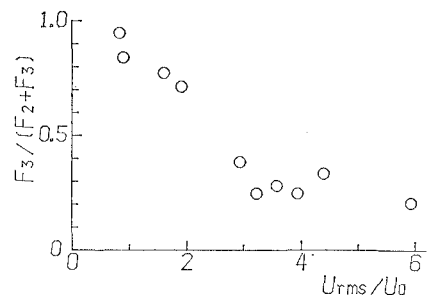
$$F_3 = F_{31} + F_{32} + F_{33} \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} F_{31} &= A_0 \langle \bar{u}_s \bar{C}_s \rangle + \langle A_1 \cdot \bar{u}_s \bar{C}_s \rangle \\ F_{32} &= A_0 \langle u' C' \rangle + \langle A_1 \cdot u' C' \rangle \\ F_{33} &= A_0 \langle \langle u_s C' \rangle \rangle + \langle u' \bar{C}_s \rangle \\ &\quad + \langle A_1 \cdot \bar{u}_s C' \rangle + \langle A_1 \cdot u' \bar{C}_s \rangle \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

F_{31} は残差流による成分、 F_{32} はシアと乱流拡散効果を表す成分である。

実験データに基づいたこれらの成分の評価は、河口 ($x=0$) から上流へ、 $x=0.4 \text{ m}$ と $x=1.2 \text{ m}$ の 2 つの断面において行ったが、その結果を図—10 と表—3 に示す。吉田ら (1980) は河口で二層流の流況を支配するパラメータとして、河口での潮汐による変動流速振幅 u_{10} と淡水断面平均流速 U_{10} の比として $\lambda_0 = u_{10}/U_{10}$ を提案している。ここでは流れの成層度を表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。河川流によるものの以外の総塩分フラックス F に対する F_3 の寄与率を



図—10 移流拡散による塩分輸送量の変化

上記の比を横軸にとって示すと図-10のように成層度が増すほど寄与率が大きくなっている。緩・強混合のケースにおいて F_3 の寄与が小さくなる、即ち F_2 の寄与が大きくなるのは、成層の強化に伴って断面平均流速 u_1 と断面平均濃度 C_1 との時間変化に位相差が生じるためである。

さらに、表-3 からわかるように F_3 の成分のうち、成層が強いケースでは F_{31} が、成層が弱いケース (R-1 と R-2) では F_{32} が主要項となっている。すなわち、弱混合になるほど、いわゆる重力循環流による塩分輸送が卓越し、強混合になるほど、シア・乱流拡散の効果が大きくなっている。

6. 結 語

本研究では、緩・強混合型まで含めた各種混合形態の河口密度流の実験を行い、流速と塩分濃度の時間的ならびに空間的な変化を詳しく測定した。その結果、流速・密度場の混合形態の違いによる変化の特徴を調べると共に、双方を各成分に分けて、塩分輸送フラックスの特性を明らかにした。本論文における主要な結論は次の通りである。

(1) 緩・強混合タイプの流れでは、従来から指摘されている通り、流速、塩分濃度とも鉛直方向に一樣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) 緩ないし強混合と見なせ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で求めた流速値とよく一致する。これは、(1) のように流速分布が鉛直方向に一樣化した場合、水平方向の密度勾配の効果が小さいことを示している。

(3) 河川流によるもの以外の塩分フラックス F_2 と F_3 で、弱混合に近いケースほど流速と濃度の鉛直分布に基づく F_3 が大きくなるが、その主要部分はいわゆる重力循環流による成分であった。一方、緩ないし強混合では、当然ながら F_3 のなかでシア・乱流拡散によるフラックスが増大する。

(4) 河口条件を検討するため、弱混合のケースについて河口の周辺における内部フルード数 F_{ri} の変化を調べたところ、 $F_{ri}=1$ となる断面は潮汐位相とともにかなり移動し、下げ潮流速最強時には河川の中にまで入ってくることがわかった。これは、単純な形では河口条件が設定できないことを示している。

表-3 塩分輸送量の各項

ケース名	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	-0.34	-4.24	2.08	1.82	1.10	0.44	0.32
	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

謝 辞

最後に、今回の実験装置の第一段階の整備に熱心に協力して頂いた芝沼知君 (当時 茨城大学大学院生)、実験とデータ整理に協力して頂いた小貫 務、佐久間大亮両君 (当時学部学生) に心より感謝いたします。

参 考 文 献

- 宇野木早苗 (1968): 河川潮汐の研究 (第1報), 第15回海岸工学講演集, pp. 226~235.
- 宇野木早苗・上嶋英機・山下皓一 (1973): 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.
- 宇野木早苗 (1974): 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, Bコース, pp. B-6-1~29.
- 須賀寛三 (1979): 感潮河川における塩水くさびの物理に関する基礎的研究, 土研資料, 第1537号, 255 p.
- 福岡捷二・福岡祐介・守屋祥一・新庄高久 (1982): 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, No. 327, pp. 61~71.
- 松永 透 (1985): 河口密度流に関する研究一塩水楔に関する基礎的実験, 茨城大学建設工学科昭和60年度卒業論文, 78 p.
- 吉田静男・藤井浩之 (1980): 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.
- Fischer, H.B. (1972): Mass transport mechanism in partially stratified estuaries, J. Fluid Mech., Vol. 53, pp. 671~687.
- Fischer, H.B. (1979): Mixing in estuaries, Mixing in Inland and Coastal Waters, Academic Press, pp. 229~278.
- Ippen, A.T. (1966): Salinity intrusion in estuaries, Estuary and Coastline Hydrodynamics (ed. Ippen, A. T.), McGraw-Hill, pp. 598~629.
- Kajiura, K. (1964): On the bottom friction in an oscillatory current, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 42, pp. 147~174.
- Stommel, H. (1953): The role of density current in estuaries, Proc. 5th Cong. I.A.H.R., pp. 305~312.