

河口密度流の流速・密度場の非定常特性と混合形態の分類

加 藤 始*・三 村 信 男**

1. 研究の目的

河口密度流は、従来、弱・緩・強混合の3タイプに分類して取り扱われてきた。しかし、実際の感潮河川では、河口からの距離や月齢により混合形態が変化することも多く、潮汐1周期の間での混合形態の遷移も見られる。このような河口密度流の混合形態の違いや時間的・場所的の非一様性は、塩水の遡上を左右するだけでなく重力循環流や乱れの変動を通して汚染物質の拡散や循環、底泥の輸送にも大きな影響を与えと考えられる。わが国では、従来定常な塩水楔の流れについての研究は多く行われてきたが(たとえば吉田, 1988)、緩・強混合型の流れに関する研究は少ない。最近、福岡ら(1982)、大橋ら(1991)の現地観測にもとづく研究があるが、全てのタイプにわたる河口密度流の流速場や密度場の構造に関しては十分に知られていない。

著者ら(加藤ら, 1989; Kato・Mimura, 1990)は、緩・強混合型の河口密度流を発生させうる小型の実験装置を構築して、各種の混合タイプの実験を行い、流れの場と塩分輸送特性を検討した。本研究では、実験装置に改良を加えてさらに詳細な実験を行い、緩・強混合型の河口密度流における流れや塩分濃度分布を測定した。それに基づいて、塩分輸送フラックスの解析を行い、河口密度流の流速場の構造と塩分輸送特性とをより明らかにしようとするものである。

また河口密度流の混合形態の分類指標については、従来 Hansen & Rattray (1966) の2パラメータ方式がよく知られているが、必ずしも便利な形とは言えない。より実際の指標としては、Fischer (1972, 1979) による Estuarine Richardson 数の提案があるが、その有効性はまだ十分に検証されていない。本研究では、実験室で観測された河口密度流の分類を行い、Estuarine Richardson 数の分類

指標としての有効性に検討を加えることも目的としている。

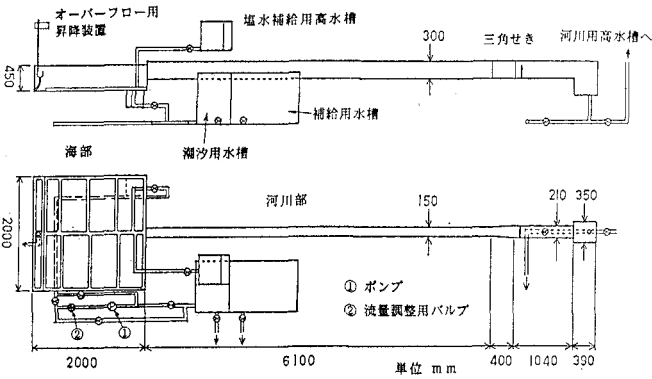
2. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

実験装置は 図一1 に示すように、幅 15 cm、有効長 6.5 m の河川部水路と海部の平面水槽(幅 2 m×長さ 2 m)、潮汐発生装置、オーバーフロー堰などよりなっている。潮汐は海部の水槽と別の水槽との間で塩水を給・排水して発生させた。前報と同様、水槽間のバルブやオ

表一1 実験条件

ケース名	振幅(cm)	Q(cm³/s)	ε	粗 度
R 2-1	1.5	25	0.0020	有 り
R 2-2	1.5	50	0.0020	有 り
R 2-3	1.5	50	0.0020	有 り
S 2-1	1.5	25	0.0020	な し
S 2-2	1.5	50	0.0020	な し
S 2-3	0.6	25	0.0020	な し
S 2-4	0.6	50	0.0020	な し
S 2-5	0.6	50	0.0050	な し
S 2-6	0.6	75	0.010	な し
R 3-1	1.5	25	0.0015	有 り
R 3-2	1.5	50	0.0015	有 り
S 3-1	1.5	25	0.0015	な し
S 3-2	1.5	50	0.0015	な し
S 3-5	0.6	50	0.0038	な し



図一1 実験装置略図

* 正会員 工博 茨城大学教授 工学部都市システム工学科
** 正会員 工博 茨城大学助教授 工学部都市システム工学科

オーバーフロー堰をパソコンで制御し、正弦波形をもった潮汐が安定して起こせるようにした。今回は海面水位あるいは堰の高さを測定してパソコンにフィードバックし、自動修正させることによって、潮汐水位変化の一層の安定化を可能にした。その結果、20サイクル以上潮汐を繰り返した場合でも、水位変化の誤差は1 mm 以下におさえられた。

(2) 実験方法

今回の実験では全てのケースで潮汐周期は $T=2.0$ 分、平均水深は 4.0 cm とし、その他の条件を表-1 のように組合せて、各種混合形態の流れを作り出した。表中で Q は河川流量、 ε は塩・淡水の相対密度差である。粗度ありのケースでは高さ 5 mm の角柱を 20 cm の間隔で水路底面にはりつけた。周期は水路の短さを考慮して小さくとしたものであり、河床は水平である。

測定の概要は、潮汐サイクルを数周期繰り返し、この間に所定の河川断面において、塩分濃度 (8~9 断面) と流速 (2 断面) の鉛直分布を測定するというものである。空間的に測定点が多いため、一回の潮汐サイクルで全てのデータを取得することはできない。そこで、異なった潮汐サイクルの測定データを重ね合わせて、一周期分の塩分濃度と流速のデータセットとした。

各点の塩分濃度の測定は、導電率計を用いて行った。流速の鉛直分布は主として水素気泡法を用いて測定した。一方、摩擦速度を求めるための底面近傍の流速の測定には hot-film 流速計を用いた。流速分布の測定間隔を 6 秒としたので、潮汐サイクルを 20 等分した位相ごとにデータを得たことになる。座標軸は、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った。

上に述べた方法で、空間的に多くの点における塩分濃度と流速の時間変化を測定するためには、前報で述べたように、海部の水槽の底部から塩水の補給を行ない、潮汐現象の再現性を確保することが必要である。本研究では、再現性を河口のすぐ外側 ($x=-10\sim-40$ cm) での濃度分布を用いて確認することとし、予備実験により、20サイクル程度潮汐を起こし続けても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。この必要補給量は底面粗度があるケースほど大きく、河川流量の約 3~8 倍程度であった。図-2 は本実験における 16 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るが、各サイクルではほとんど差がなく、現象の再現性の良さを示している。

3. 流速分布と濃度分布の変化

実験結果の最初に、各混合タイプにおける流速分布と

濃度分布の測定結果を示す。

図-3 には強混合 (R2-1) と弱混合 (S2-6) の場合の流速分布の 1 周期間の変化を示している。強・緩混合の場合、流れが反転する位相のときを除き流速分布はほぼ一様となるが、弱混合の場合、上層流速はたえず海向きとなり、上げ潮時には下層流入、上層流出となっている。

図-4 には濃度と流速の時空間分布の例として、強混合型となった Case R2-1 の結果を示している。上げ潮時の各点の濃度分布はほぼ鉛直に一樣である。それだけでなく、強混合型のもう一つの条件ともいえる x 方向の

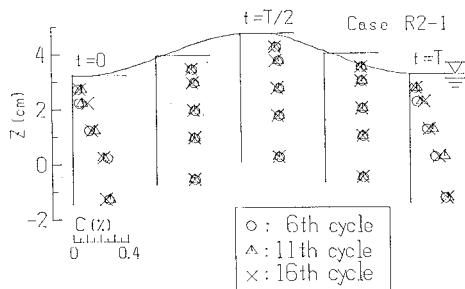


図-2 河口外での鉛直濃度分布の再現性

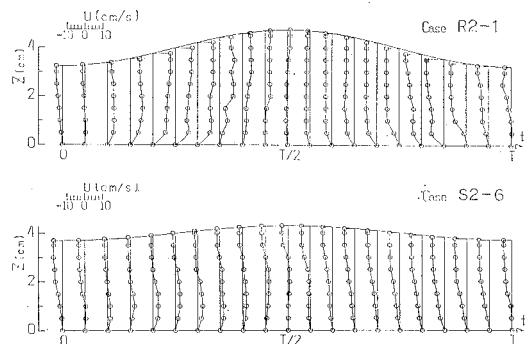


図-3 流速分布の 1 周期間の変化

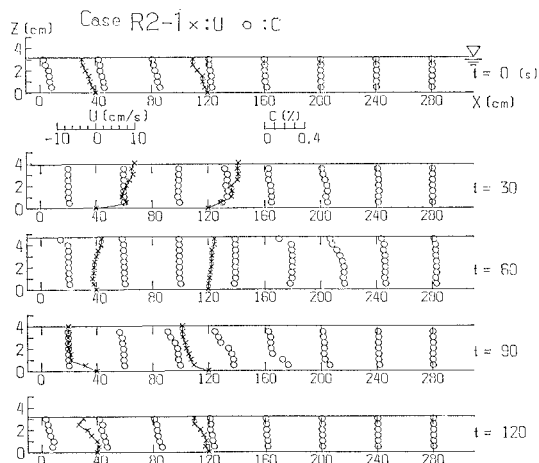


図-4 濃度と流速の時空間分布 (強混合の場合)

濃度勾配がついており、典型的な強混合タイプの濃度分布が形成されていたことがわかる。これは今回潮汐周期を $T=2$ 分と短くした効果と考えられる。一方、このケースでも下げ潮時には鉛直方向に濃度が非一様になり緩混合的な濃度分布となっている。このことは、緩・強混合の現象の境界は単純ではなく、一周期間においても上げ潮と下げ潮の位相で異なった混合タイプが現れうることを示している。

以下の議論では、従来の研究との対応をとるために、混合タイプを判定しておく必要がある。そこで本研究では各ケースごとの混合タイプを、主として上げ潮時の、しかも特に塩水先端部の鉛直濃度勾配によって決めることにした。

図-5 と図-6 は流速と塩分濃度の断面平均値の 1 周期間の変化を、後で述べる式 (8) の u_i , C_i の形で示しており、図-4 は強混合の場合 (R2-1) の $x=40$ と 120 cm のもの、図-5 は緩混合 (S2-1) と弱混合 (S2-6) のときの $x=120$ cm のものである。強・緩混合の場合、上げ潮時と下げ潮時の C_i の変化は非対称となっている。この非対称性の主な原因は、上の図-3 について述べた上げ潮と下げ潮時の鉛直濃度勾配の差にある。これに対して弱混合の場合、塩・淡水の混合がすくなく、塩水くさびが平行移動的に出入りするだけなので、 C_i はほぼ左右対称な変化をしている。

図-7 には鉛直流速分布に対数法則を適用して求めた u_* の測定例 (S2-1) を示している。ここに示していないケースも含めて (多少位相差が生じる場合もあるが)、 u_* はほぼ u に比例する。

4. 混合形態の分類

河口密度流の混合形態の分類指標としては、従来 Hansen & Rattray の 2 パラメータ法がよく知られている。一方、Fischer (1972) はエスチャリーの成層度を表す無次元パラメータとして次式のような Estuarine Richardson 数 (E.R. 数) R

$$R = \varepsilon g Q_f / W U_i^3 \quad \dots\dots\dots (1)$$

を提案している。ここで $\varepsilon = \Delta \rho / \rho$, W は水路幅, U_i は r.m.s. 潮流流速である。 R は流れを安定化しようとする水路単位幅当りの浮力と、潮汐によって与えられる混合促進力との比を表している。

式 (1) はさらに

$$R = (1/F_{ri}^2) \cdot (U_f/U_i)^3 \quad \dots\dots\dots (2)$$

と書きかえられる。ここに U_f は河川平均流速, $F_{ri} = U_f / (\varepsilon g h)^{1/2}$ は密度フルード数, h は平均水深である。

E.R. 数の混合形態の分類指標としての有効性を調べるため、各実験ケースごとに U_i/U_f , F_{ri} , R を求め、実験で得られた混合タイプを $F_{ri}^2 - (U_f/U_i)^3$ 平面にプロッ

トした。得られた結果を図-8 に示す。

図-8 の中には、E.R. 数 R が一定値をとる 3 本の線が示されているが、強混合から弱混合までがほぼ R の大小によって分離している。Fischer (1979) は現地の弱混合型と強混合型の流れの遷移は、およそ $0.08 < R < 0.8$ の間で生じることを示唆しているが、今回の実験では $0.15 < R < 0.8$ が遷移領域となっている。これは Fischer が示した値に近く、図-8 の結果は E.R. 数による分類が有効なことを示している。

反面、この図では緩混合と強混合の点が十分良く分類されていないところがある。これは潮汐による混合促進力のパラメータとして単に r.m.s. 潮流流速をとったためであると考えられる。すなわち、今回のような小規模の装置では、滑面の場合底面近傍での乱れの発生が弱く強混

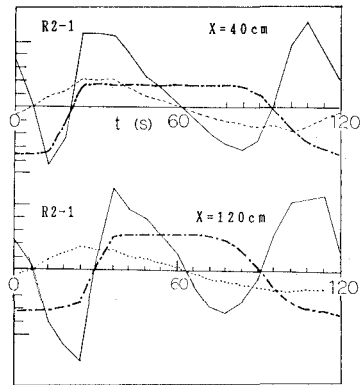


図-5 U_i , C_i , $U_i \cdot C_i$ の変化 (強混合)

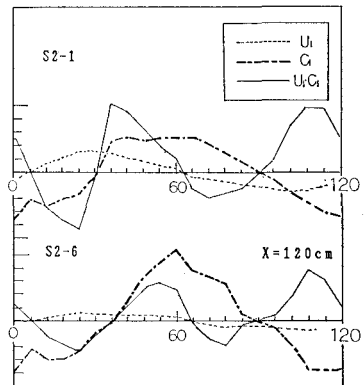


図-6 U_i , C_i , $U_i \cdot C_i$ の変化 (緩・弱混合)

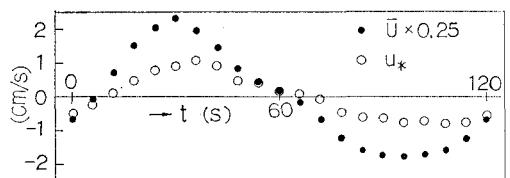


図-7 u_* の測定例 (Case S2-1)

合にはなりにくい。粗度ありのケースでは、粗度からの剝離渦の発生によって混合が進むが、r.m.s. 潮汐流速を用いたのでは、この底面粗度の有無による乱れの効果がうまく表現されていない。

そこで潮汐流速 U_t の代わりに摩擦速度 u_* を用いることにし、それで置き換えた modified estuarine Richardson 数 R'

$$R' = \varepsilon g Q_f / W u_*^3 = (1/F_{ri}^2) \cdot (U_f/u_*)^3 \quad \dots\dots\dots (3)$$

を使ってプロットしてみると図-9 が得られる。ここで用いた摩擦速度 u_* は、底面付近の流速分布から対数則を仮定して求めたものの r.m.s. 値である。図-9 では図-8 よりも緩混合と強混合の分離がよく、潮汐流による乱れの効果を取り入れるためには、 R' が有効なことがわかる。

5. 塩分輸送特性

つぎに、塩分輸送特性の検討結果について示す。本研

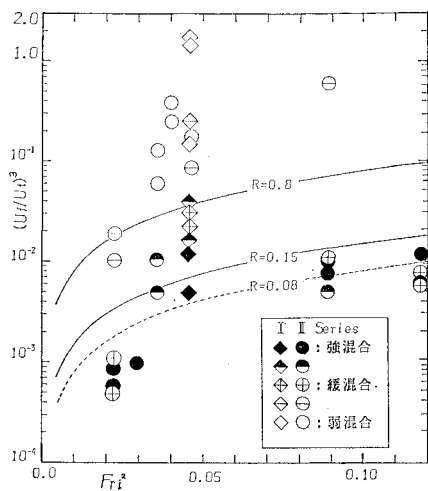


図-8 R による混合形態の分類

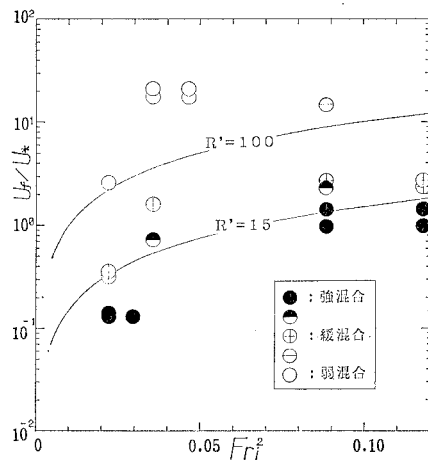


図-9 R' による混合形態の分類

究では各タイプの河口密度流の混合現象の違いを明らかにする目的で、塩分輸送フラックスの構造を詳細に検討した。そのため、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た。

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、Fischer (1972, 1979) に従って

$$u(x, z, t) = u_0(x) + u_1(x, t) + u_s(x, z) + u'(x, z, t), \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$C(x, z, t) = C_0(x) + C_1(x, t) + C_s(x, z) + C'(x, z, t), \quad \dots\dots\dots (5)$$

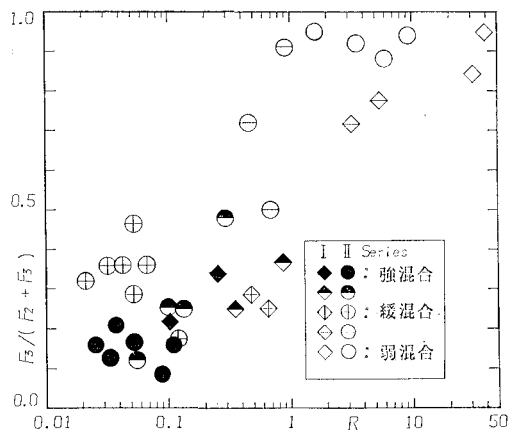


図-10 フラックス成分 F_2 と F_3 の大きさの比較

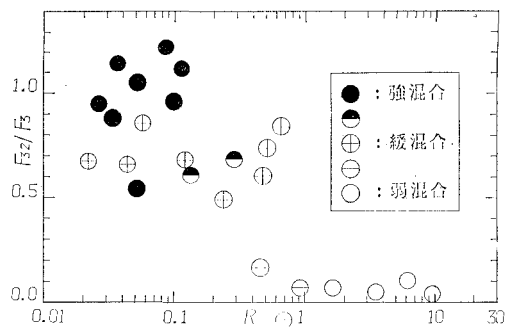


図-11 F_3 成分中の F_{32} 項の大きさの変化

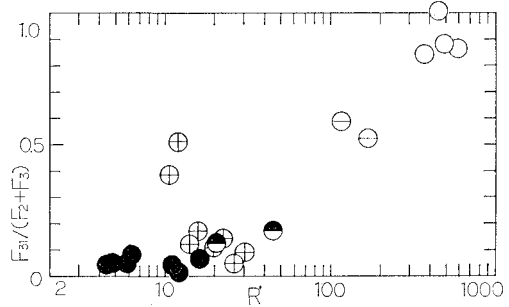


図-12 重力循環流成分 F_{31} の割合の変化

のように分解する。本研究では水深変化が無視できないので、河積 A も次のように分解する。

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

(一)を鉛直平均量, $\langle \rangle$ を1周期平均量とすると,

$$u_0 = \langle \bar{u} \rangle, C_0 = \langle \bar{C} \rangle, A_0 = \langle A \rangle \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$u_1 = \bar{u} - u_0, C_1 = \bar{C} - C_0, A_1 = A - A_0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

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

で与えられ、残りの量が u', C' である。なお、宇野木ら(1973)は現地データに関して類似の解析を行っているが、そこでは式(4), (5)の u_s, C_s 成分と u', C' 成分の分離は行われておらず、本研究ではこの分離により以下の議論が可能となっている。 $\langle u \rangle, \langle C \rangle$ の計算で Fischer は水位変化を無視しているが、ここでは、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。そうすると総塩分フラックス F は次のように表される。

$$F = \langle A \cdot \bar{u} \bar{C} \rangle = F_1 + F_2 + F_3, F_3 = F_{31} + F_{32} + F_{33} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、

$$F_1 = C_0 A_0 u_0 + C_0 \langle A_1 u_1 \rangle \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$F_2 = A_0 \langle u_1 C_1 \rangle + \langle A_1 u_1 C_1 \rangle + u_0 \langle A_1 C_1 \rangle \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{31} &= A_0 \langle u_s C_s \rangle + \langle A_1 \cdot \bar{u}_s \bar{C}_s \rangle \\ F_{32} &= A_0 \langle \bar{u}' C' \rangle + \langle A_1 \cdot \bar{u}' C' \rangle \\ F_{33} &= A_0 \langle \bar{u}_s C' \rangle + \langle \bar{u}' C_s \rangle \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$+ \langle A_1 \cdot \bar{u}_s C' \rangle + \langle A_1 \cdot \bar{u}' C_s \rangle \quad \dots\dots\dots (14)$$

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_{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、 $x=40$ cm と 120 cm の2つの断面において行った。

その結果を図-10~12に示す。ここでは流れの成層度を表すパラメータとして4で述べた R あるいは R' を用いる。河川流によるもの以外の総塩分フラックス $F' (= F_2 + F_3)$ に対する F_3 の寄与率を上記の R を横軸にとって示すと、図-10のように成層度が増すほど F_3 の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、図-4に示したように成層の減少に伴って断面平均濃度 C_1 の波形に歪が生じるのが主な理由である。なお F_2 の値を上げ潮時と下げ潮時に2分して計算してみると、上げ潮時の方が潮時の5~10倍くらい大きい。

図-11は、各ケースの F_{32}/F_3 を R を横軸にとって示したものである。この図から、成層が弱いケースではシア・乱流拡散の寄与の項 F_{32} が大きいことが分かる。

図-12は重力循環流の項 F_{31} と $F' (= F_2 + F_3)$ の比を modified E.R. 数 R' に対してプロットしたものである。図-12は弱混合になるほど、 F' の中で F_{31} の占める割合が大きくなること、すなわち、いわゆる重力循環流による塩分輸送が卓越することを示している。

以上示したように、塩分フラックスの各成分の比率の変化は、 R, R' とよく対応しており、これはE.R. 数の有効性を別の角度から再確認したことになる。

6. 結 論

本研究では、強・緩混合型の流れに主体をおいた各種混合形態の河川密度流の実験を行い、流速と塩分濃度場の非定常特性を調べるとともに、塩分輸送フラックスの詳しい解析を行い、実験室で生じている河川密度流の塩分バランスについていくつかの点を明らかにした。

また、混合形態の分類指標として、Estuarine Richardson 数が有効であることを示した。ただし、実験室の規模の現象では、底面から出る乱れの効果を表現するためには、潮流流速を摩擦速度で置き換えた modified E.R. 数の使用が適切であることが分かった。

謝辞

最後に、本研究を行うにあたり実験とデータ整理に協力して頂いた大学院生の真中剛、登坂弘明君、学部学生の斉藤一明、小粥太郎、平野有志君、及び図面の作成に協力して頂いた研究室の学生諸君に心より感謝致します。

参 考 文 献

- 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.
- 大橋行三・戒能 治(1991): 肱川の感潮上限域における塩水遡上の現地観測, 水工論文集, 第35巻, pp. 281-286.
- 加藤 始・真中 剛・三村信男(1989): 河川密度流の内部流速場と塩分輸送特性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 199-203.
- 福岡捷二他(1988): 那珂川における塩水遡上の現地観測. 第32回水工論文集, pp. 203-208.
- 吉田静男(1988): 河川密度流とその解析方法, 1988年度水工学に関する夏期研修会講義集, pp. B-2-1-B-2-15.
- 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.
- Hansen, D. V. and M. Rattray (1966): New dimensions in estuary classification, Limnol. Oceanogr., Vol. 11, pp. 319-325.
- Kato, H. and N. Mimura (1990): Experimental Study on the Velocity Field and Salinity Transport of the Tidal River Flow. Intl. Conf. Phys. Modeling of Transport and Dispersion. IAHR, pp. 6A.1-6A.6.