

肱川感潮域における3成層密度流の連行係数の検討

Studies on the Entrainment Co-efficient of
Three-Layered Flow in Hiji Tidal River

愛媛大学農学部 正 員 大 橋 行 三
戒 能 治

1 緒 言

感潮河道に見られる成層流れは、淡水と海水との、所謂、上下層の層厚に比べてそれらの中間層の層厚が相対的に大きく、玉井が指摘するように連続的・多段的な密度場の変化を適切に把握する工夫が必要である。又、3成層モデルによって成層過程の情報を多くし、ひいてはそれらの運動予測の精度を向上させる目的がある。本研究は、肱川における定点経時観測データに基づいて玉井が導入した3成層モデルの適用を検討すると共に、主要な成層状況について各層間の連行係数を計量し、²⁾菅らが実験値から求めた界面抵抗則との対比及び各ケースの関数形を求めて、それらの妥当性を吟味した。

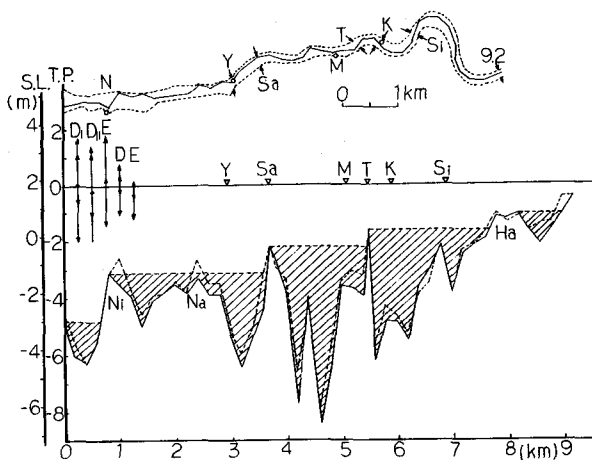


図1 最深河床縦断面図及谷線図 (D, E: 潮汐振幅例)

2 観測値の特性

図1の肱川感潮域(約10 km)の5.5 km地点にはT-浅瀬があり、河川の淡水表流量(Q_f)が $50 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下では海水遡上に強い影響を及ぼすことがわかっている。^{3), 4)} いま、 Q_f を支配因子と見做して浅瀬上下流における経時の鉛直濃度分布を観測値に基づいて基準化し、潮汐波形に対する成層過程の実況図として描けば図2, 3となる。両図の比較から、 Q_f が $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下となれば、T浅瀬を境にして下流側の分布が強混合型に近くなり、上流側のそれは浅瀬の狭窄効果を受けて強混合から弱混合型まで遷移することがわかる。なお、狭窄効果は別途究明するとして、⁵⁾ここではT浅瀬より上流のKと S_i (6.85 km)の両地点を対象とした。

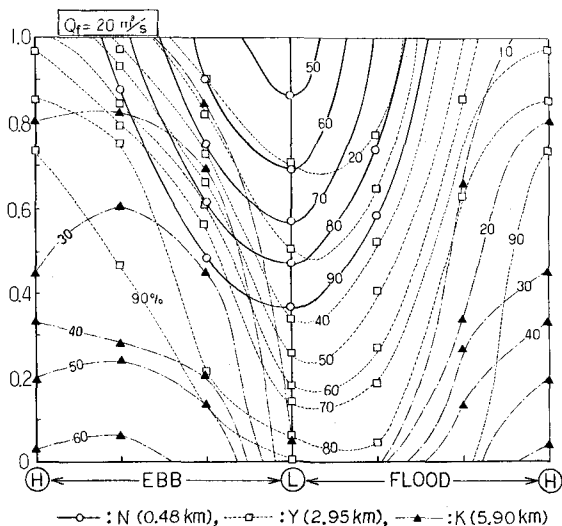


図2 混合分布の基準モデルによる比較図($Q_f = 20 \text{ m}^3/\text{s}$)

観測値は、 Q_f が $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度の時を選び、 $1/4 \sim 1 1/4$ 日間(約15分間隔、鉛直30 cm毎、流心定点)に水温、電気伝導度(EST-3)及び流速(岩崎電気広井式)の測定から得た。これらの値は、潮位・時間平

面にプロットして等値線図を描いた後、所定の15分間隔時の鉛直分布値を読みとった。なお、電導度から塩素量濃度への変換は実験公式⁴⁾を用い水理公式集⁶⁾に従って求めた。

3 諸定義と基本式

3 成層モデルは図4の如く各層の記号を用いて定義する。又、第1及び第2界面は水面及び底面の密度(ρ_S, ρ_B)から定める。

$$\left. \begin{aligned} \rho_H &= \rho_S + 0.1 \cdot \Delta\rho \\ \rho_L &= \rho_B - 0.1 \cdot \Delta\rho \\ \Delta\rho &= \rho_B - \rho_S \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

各層ごとの平均値はバー記号で表示し、全層平均流速と同密度を $\bar{U}, \bar{\rho}$ とする。

各定義によるリチャードソン数 (R_i)

1° 全層平均の R_i ($\bar{R}_i$)

$$\bar{R}_i = \Delta\rho \cdot g \cdot H / (\bar{\rho} \cdot \bar{U}^2) \dots\dots\dots(2)$$

2° 相対速度による R_i (R_{ij})

$$R_{ij} = g \cdot \Delta\rho_{ij} \cdot h_j / (\bar{\rho}_i \cdot \Delta u_{ij}^2) \dots\dots(3)$$

ここに、 $\Delta\rho_{ij} \equiv |\bar{\rho}_i - \bar{\rho}_j|$, $\Delta u_{ij} \equiv \bar{u}_i - \bar{u}_j$

3° 層相互 (i 層から j 層へ) の R_i (R_{ij})

$$R_{ij} = g \cdot \Delta\rho_{ij} \cdot h_j / (\bar{\rho}_i \cdot \bar{u}_j^2) \dots\dots\dots(4)$$

4° 局所的な R_i (R'_i), $\Delta z = 10 \text{ cm}$

$$R'_i = g \cdot (\Delta\rho/\Delta z) / (\rho_i \cdot (\Delta u/\Delta z)^2) \dots\dots(5)$$

ここに、 $\Delta\rho \equiv \rho_i - \rho_{i-1}$, $\Delta u \equiv u_i - u_{i-1}$

さらに、各層のレイノルズ数 (Re_i)

$$Re_i = \bar{u}_i \cdot h_i / \nu \dots\dots\dots(6)$$

各層の内部フルード数 (F_{di})

$$F_{di} \equiv \bar{u}_i / \sqrt{\epsilon \cdot g \cdot h_i} \dots\dots\dots(7)$$

ここに、 $\epsilon = (\rho_B - \rho_S) / \rho_B$

又、定数を c として岩崎数と界面摩擦係数 Ψ, f_i

$$\Psi = Re \cdot F_d^2 = Re \cdot R_i^1 \dots\dots\dots(8)$$

$$f_i = c \cdot \Psi^{-0.5} \dots\dots\dots(9)$$

次に、界面を通じての輸送過程の記述とその検討は、菅らが実験値に基づいて吟味した成果を踏まえて同一の立場をとる。即ち、相互連行係数に用いる代表流速は連行層の流速の大きさのみで表示され、その層平均の無次元数の関数として記述されると考える。例えば、中間層を連行層とする場合、被連行層の状態は十分に乱流であって、界面は不安定で乱れ速度によって界面近傍の流質が浮力効果に逆って連行層に混入する状況を想定する。従って、連行速度 (W_{eij})

$$W_{eij} = E_{ij} \cdot |\bar{u}_j| \dots\dots\dots(10)$$

ここに、i 層から j 層への連行係数 (E_{ij})、又、これは

$$E_{ij} \propto R_{ij}^{-n} \dots\dots\dots(11)$$

次式の関数形として提案されている。n: 定数

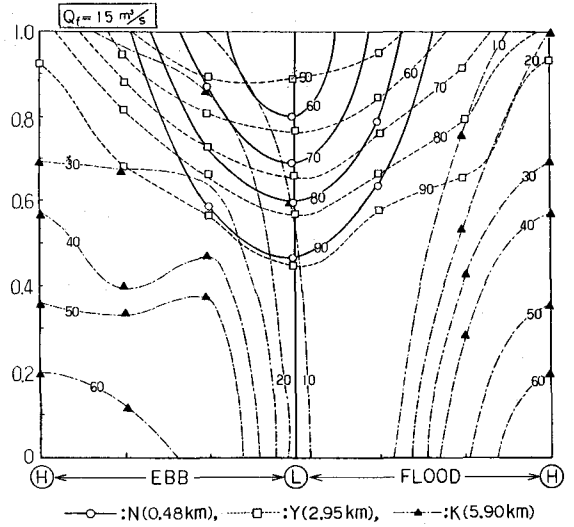


図3 混合分布の基準モデルによる比較図 ($Q_f=15 \text{ m}^3/\text{s}$)

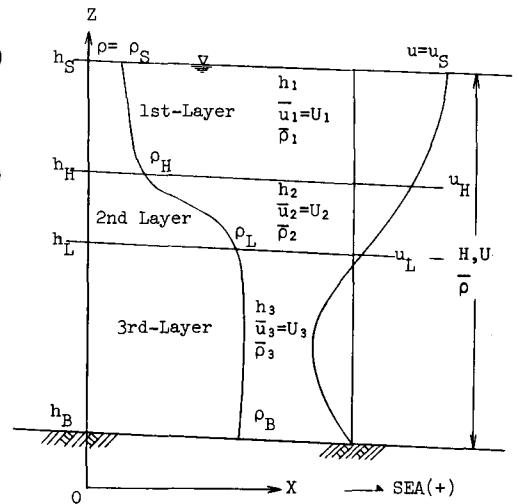


図4 3 成層モデルの概略図及び諸記号

玉井¹⁾が導いた基本式は、鉛直輸送項を相互連行係数で記述し、各層ごとの積分で層平均量に変換後、統一表示すれば以下の各式となる。²⁾ただし(10)式を用い、分散項を D_i で表わす。

$$\frac{\partial \bar{\rho}_1}{\partial t} + U_1 \frac{\partial \bar{\rho}_1}{\partial x} = \frac{(\bar{\rho}_2 - \bar{\rho}_1)}{h_1} E_{21} |U_1| + D_1 \dots\dots\dots (12)$$

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} + \frac{\partial (U_1 h_1)}{\partial x} = E_{21} |U_1| - E_{12} |U_2| \dots\dots\dots (13)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_2}{\partial t} + U_2 \frac{\partial \bar{\rho}_2}{\partial x} = \frac{(\bar{\rho}_1 - \bar{\rho}_2)}{h_2} E_{12} |U_2| + \frac{(\bar{\rho}_3 - \bar{\rho}_2)}{h_2} E_{32} |U_2| + D_2 \dots\dots\dots (14)$$

$$\frac{\partial h_2}{\partial t} + \frac{\partial (U_2 h_2)}{\partial x} = - E_{21} |U_1| + E_{12} |U_2| + E_{32} |U_2| - E_{23} |U_3| \dots\dots\dots (15)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_3}{\partial t} + U_3 \frac{\partial \bar{\rho}_3}{\partial x} = \frac{(\bar{\rho}_2 - \bar{\rho}_3)}{h_3} E_{23} |U_3| + D_3 \dots\dots\dots (16)$$

$$\frac{\partial h_3}{\partial t} + \frac{\partial (U_3 h_3)}{\partial x} = - E_{32} |U_2| + E_{23} |U_3| \dots\dots\dots (17)$$

上式中の4個の連行係数は、近似的に分散項を無視すれば2通りの方法で計算できる。

4 計算手法と手順

上記各式の左辺第2項は、定点の経時観測値からは直接求められないので次の如く近似した。即ち、15分間隔の観測値から中間の5分間隔時の二つの鉛直分布値を内挿し、所定時刻を中心に前後について全層平均流速を求めて水平移動距離を算定した。又、鉛直方向の積算間隔は10cm刻みとし、潮位は5分間隔の実測値を用いた。猶、以下の検討には5分刻みの計算値のうち15分毎の値を対象とした。

演算は、内挿計算の後、密度分布より第1及び第2の層界面を決め、各層平均値、各無次元数、各偏微分値及び連行係数の算定の順序で進めた。これらの計算結果の妥当性は、3定点14群の結果の相対的対比によって次項に述べる特徴等に矛盾の無いことから近似可能と判断した。

5 3成層の特徴

前記(1)式の界面定義に基づく計量結果から、各層の平均密度と層厚さを潮位に対してそれぞれプロットすれば図5、6となる。

各値のループは、いずれも対照的な形成過程を反映しており、それらの特徴をまとめれば

① 第1層は平均密度が8の字形ループとなり、最大値には高停潮位の相違が現われ、下げ潮時の密度も大きくなる。又、層厚は低潮位時に最大となる。

② 第2層の厚さは、低潮位を除き4割強となり逆3角形ループ

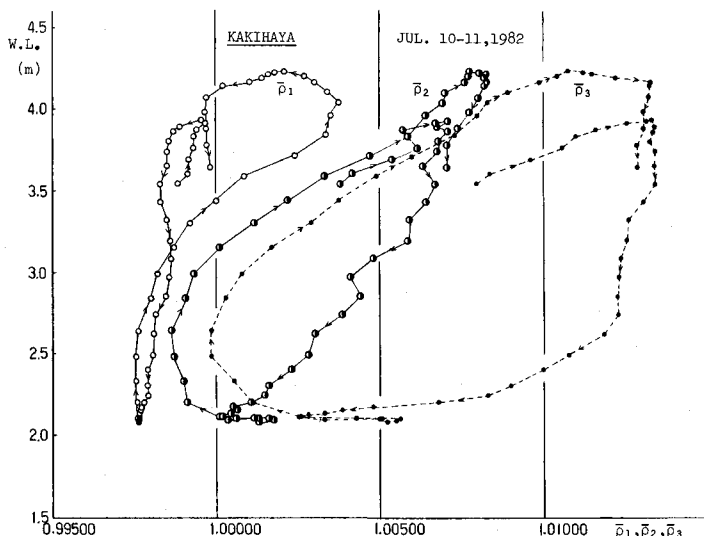


図5 各層平均密度の対潮位ループ(柿早橋:1982年7月10~11日)

である。又、下げ潮時前半では層厚比がほぼ一定の間に平均密度曲線は波状の変動が見られ、上流域からの混合水塊の流下や連行状況の変化が反映されるようである。

③ 第3層は、高高潮位後、2時間以上の陸向き流れと高濃度を維持し、下げ潮後半では急激な連行と退潮を受けて淡水化する。

以上の如く、前述 2. の経時分布の推移状況は3成層モデルによって極めて明瞭に分解され、それぞれの特徴を捉えることができる。つまり、第2層の混合層の占める比重の大きさが、層平均水量を通して表現され、成層過程の一次的側面が明らかにできた。

6 連行係数とその検討

観測値の鉛直分布から判断すれば、3層の中で最も流速が大きく他の層を連行する層は、海向きの流れ（正流）では、第1層次に第2層であり、陸向きの流れ（逆流）では、第2、第3層である。そこで、ここに取り上げる連行現象はこれらの事実に対応させて、正流の場合には界面の上層が連行層で下層が被連行層となる係数（ E_{21} 、 E_{32} ）を、又、逆流の場合には第2層のみが連行層で上、下層が被連行層となる係数（ E_{12} 、 E_{32} ）を見る。

従って、各流況に適合する範囲の連行係数ごとに、層相互リチャードソン数や岩崎数に対してプロットし、まとまった傾向が見出せる結果について関数形の表示を試みた。

なお、界面の安定性を調べるために玉井⁷⁾が求めたクーリガン数（ Γ ）の次の限界条件式を用いる。

$$\left. \begin{aligned} \Gamma &= Re^{0.196} \cdot F_d^{0.667} \\ \Gamma &< 2.43 \end{aligned} \right\} \dots\dots (18)$$

6.1 正流時の E_{21} 、 E_{32}

下げ潮時に表層の淡水塊が下層を連行する最も代表的な流況について、即ち、第1層が第2層を連行する場合の結果を図7に示す。

この場合の共通の性状として、第1層の流速分布は完全乱流と見做せる状態にあり、層厚がほぼ一定に保たれる。一方、第2層の流速と密度は共に遷移

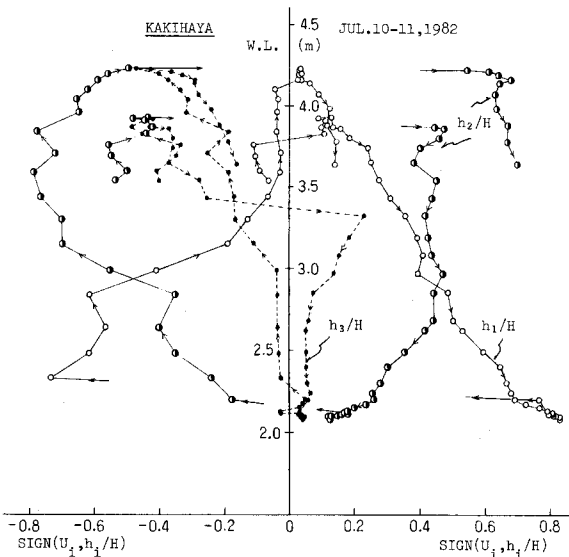


図6 各層の厚さの対潮位ループ（K：1982.7.10～11）

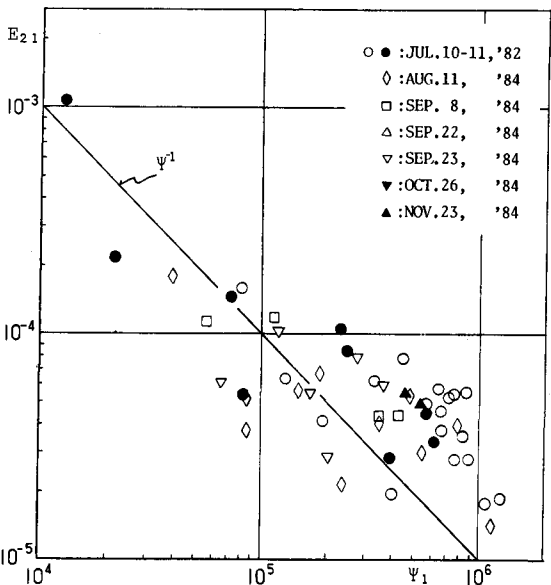


図7 海向き流れの表層を連行層とした連行係数（白：K，黒：Si）

域にあり急激な変化を示す曲線となる。

又、層厚は潮位に比例して減少する。同図の分布から連行係数 (E_{21}) は、第1層の岩崎数の-1乗に比例すると考えられる。

次に、第2層が第3層を連行する場合の結果を図8に示す。この場合の第3層は、殆んど静止状態に近く、潮位の低下と共に層厚が激減する。又、データの分布は岩崎数の-0.3乗の直線近傍にある。

E_{21} 、 E_{32} の双方は、いずれも岩崎数と良好に対応するが、それらの分布域は後者の方が10倍程大きく、その抵抗力の大きいことを意味している。

なお、上記の両ケースのクーリガン数は、限界値以上であり、不安定な前提条件を満足している。

6.2 逆流時の E_{12} 、 E_{32}

上げ潮時の前半においては強混合の水塊が遡上するため、3成層モデルの利点は薄れる。しかし、各鉛直分布値のチェックによって適合範囲を確認して以下の結果をえた。

まず、第2層が第1層を連行する場合のプロットを図9に示す。

この図は、層相互リチャードソン数との対応が良好であり、²⁾ 菅らが実験値から得た結果とほぼ同一の分布形状である。ただし、連行係数はその絶対値が10倍程大きい。

次に、第2層が第3層を連行する場合の結果を図10に示す。この結果は先の図8と同様に、岩崎数の-0.3乗に比例する。ただし、絶対値は正流時の値より10倍程大きい。これら第3層が被連行層となる場合の本質的な運動機構には、流れ方向の相違はあるが、大差の無いことを意味するようである。

逆流時における最も重要な特徴の一つは、図9、10で説明できる流況が高々一時間内外しか継続しない点にある。つまり、感潮挙動を連続的に解析するためには、この前後において複雑な挙動となる遷移時を如何にシミュレートするかが課題となる。

以上の各結果を得る過程において、計算値を支配する項は、(12)~(17)式のうち、体積保存式では層厚の時間的変化率が、又、質量保存式では連行に基づく流質の輸送項が、それぞれ最も重要である。従って、それらの予測精度を如何に向上させるかの工夫が必須となる。

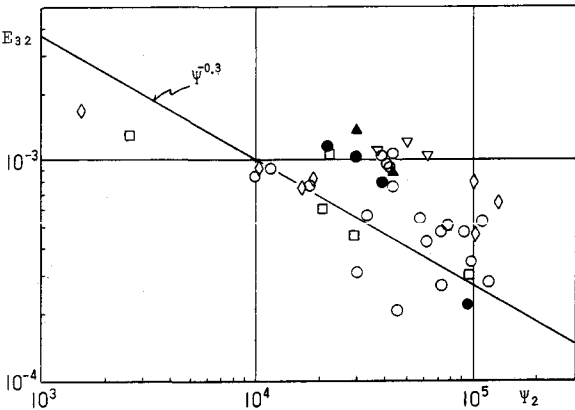


図8 海向き流れの第2層を連行層とした連行係数

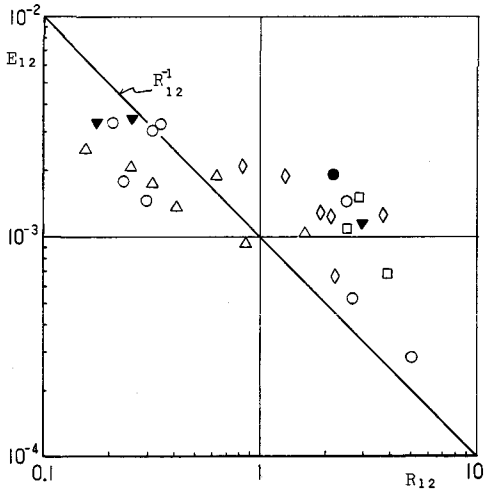


図9 陸向き流れの中間層を連行層とした連行係数 (横軸：層相互リチャードソン数)

3 成層モデルは密度分布が主導的な役割を果たすため、強混合を含むような連続的感潮密度流を追跡するには、更に有効な予測と修正のルーチンを加える必要がある。この他、高停潮時の複雑な非定常挙動を如何に把握するかが残された課題である。

7 結 論

① 玉井の提案した 3 成層モデルによって感潮河川密度流の成層過程が、各層の厚さ及び平均密度の対潮位ループの形状として表現され、流況の特徴が明瞭に把握できることを示した。

② 高、低の停潮時を除き、河道内の水塊が海か陸のいずれか一方へ連続的に流動する状況において、界面を通じての連行現象は、3 成層モデルによって良好に計量できる。又、連行係数と無次元数との関数形は以下の如く表現できる。

〔海向き流れ〕： $E_{21} \propto \Psi_1^{-1}$, $4 \cdot 10^4 < \Psi_1 < 1.5 \cdot 10^6$, $\Gamma_1 > 2.43$ (19)

$E_{32} \propto \Psi_2^{0.3}$, $1 \cdot 10^3 < \Psi_2 < 1.5 \cdot 10^5$, $\Gamma_2 > 2.43$ (20)

〔陸向き流れ〕： $E_{12} \propto R_{12}^{-1}$, $0.1 < R_{12} < 10$, $\Gamma_2 > 2.43$ (21)

$E_{32} \propto \Psi_2^{0.3}$, $1 \cdot 10^3 < \Psi_2 < 1 \cdot 10^6$, $\Gamma_2 > 2.43$ (22)

③ 本研究の観測値に基づく結果は、菅らが実験値から得た結果と部分的に符合したが、大部分は岩崎数との相関が良好であった。これは、観測値には内部波の変動効果や乱れによる付加力が包括され、岩崎数がかかる因子を含み得るためと考えられる。

最後に、本研究の現地観測と資料整理に協力いただいた本研究室専攻生に心より謝意を表します。

また、本研究は文部省科学研究費（一般 C）（ 61560269 ）の成果の一部であり、計算には愛媛大学情報処理センター M-180 及び京大大型計算機を使用したことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 玉井：連行を考慮した漸變成層流の基礎方程式，土木学会論文報告集，No 824，p. 95 ～ 102，1982
- 2) 菅ら：8 層系密度界面における連行速度について，第 27 回水理講演会論文集，p. 543 ～ 548，1983
- 3) 大橋：肱川感潮域における塩分侵入の非定常挙動に関する研究，第 28 回水講論，p. 59 ～ 66，1984
- 4) 大橋：浅瀬を越える河川密度流の運動機構の解析，昭和 57，58 年度科研費（一般 C）成果報告書 愛媛大学農学部，p. 1 ～ 43，1984
- 5) G. Ohashi: Field Studies on the Effect of Shallow Bed Contraction on Salt Intrusion and Mixing in Hiji Tidal River, (Abstract), Int. Symposium on Physical Processes in Estuary, Netherland, pl4-16, Sep., 1986
- 6) 水理公式集，土木学会，丸善，p. 582，1985
- 7) 玉井ら：淡塩 2 層境界面における抵抗係数について，土木学会論文報告集，No 271，1978

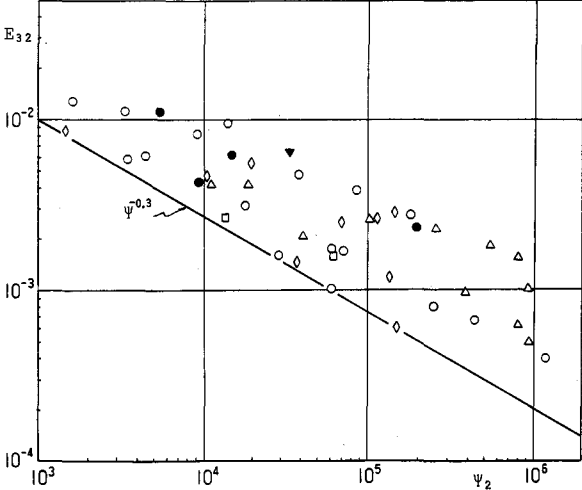


図 10 陸向き流れの中間層を連行層とした連行係数