

複断面水路密度流の横断方向拡散係数について

TRANSVERSE DIFFUSION COEFFICIENTS OF DENSITY CURRENT IN COMPOUND CHANNEL

藤原広和¹・沢本正樹²

Hirokazu FUJIWARA and Masaki SAWAMOTO

¹正会員 八戸工業高専助教授 建設環境工学科 (〒039-1192 青森県八戸市田面木上野平16-1)

²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)

The Takase River estuary in Aomori Prefecture is a tidal river with the compound channel. Laboratory experiments and field measurements were carried out for this river in the past. The transverse diffusion coefficients were obtained from these results using diffusion equation. In the experiments, the values of $k_y/(u_*h)$ in compound channel were about 10 times of those in single section channel (k_y : diffusion coefficient, u_* : shear velocity, h : water depth). It was considered that this result was the effect by the compound channel. It was found that values of $k_y/(u_*h)$ required from field measurement data were larger than those got from experimental data. This result agreed with the conventional researches.

Key Words : tidal portion, compound channel, estuarine density current, diffusion coefficient

1. はじめに

感潮河川は、海水性・淡水性の生物が入り交じった豊かな生態系を有し、近年は貴重な自然環境を保全しようとする動きが強まっており、バランスを考えた地域開発が望まれている。そのためには感潮河川における自然環境の成り立ちについての理解を深める必要がある。本研究は複断面水路における塩水混合特性を把握することを目的として、高瀬川河口部の複断面河道部を対象に室内実験^{1),2)}と現地計測³⁾を行い、これらのデータを基に水路横断方向の混合係数を算定することを試みたものである。

Fischer⁴⁾は開水路横断方向への混合係数について実験や現地計測から求められた従来の結果をまとめているが、水路断面形状による考察は行われていない。また、池田・泉⁵⁾は浮遊砂の横断方向拡散係数を求めている。複断面水路では低水路と高水敷で水深が異なるため横断方向の流速差が生じる。そして、この流速差に起因する塩分濃度差が生じ、拡散型輸送が発生する。これに対し単断面水路は、横断方向の流速差は小さい。従って、単断面水路と比較した場合、複断面水路の横断方向混合係数は異なると予想される。本研究では実験データから、複断面水路および単断面水路における水路横断方向の混合係数を算出し比較する。また、現地計測データからも水路横断方向混合係数を算出し考察する。

図-1は青森県東南部に位置する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-0~B-5, C-0~C-4, D-0~D-5, E-0~E-4は現地計測が実施されたときの測点である³⁾。高瀬川河口部は、汽水湖である小川原湖と太平洋を結ぶ感潮河川であり、複断面河道になっている区間がある。高瀬川は流域面積866.9km², 幹線流路延長63.7kmで、八甲田山系八幡岳に源を発する1級河川であ

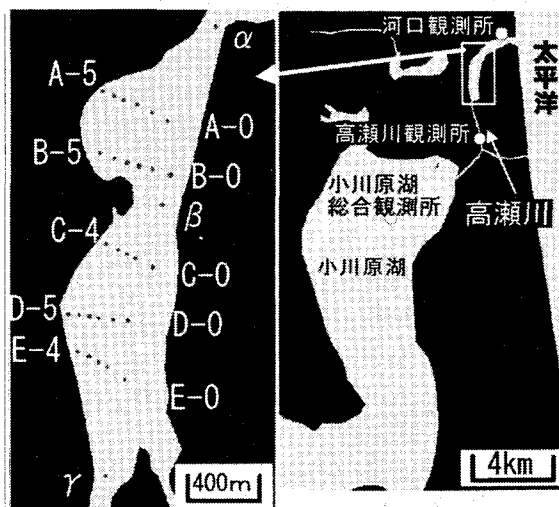


図-1 小川原湖および高瀬川河口

(3) 計算方法

実験では上流部と下流部の2断面において流速、塩分が測定されているので、これらのデータから塩分濃度変化時の k_y を求める。計算では(2)式を差分化し、ADI法を使用した。計算は高水敷上の図-3における $x=141\sim 365\text{cm}$ 、 $y=2\sim 10\text{cm}$ の区域を対象に行った。境界条件には $x=141\text{cm}$ 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使用した。図-4は計算領域の概念図であるが、この図の太線部分の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ければならないことになるが、測定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(各測点毎に2断面の平均値を求め、 y 方向にはNo.4~No.8の間でそれらのデータを比例補間している)。 k_y を仮定し、 $x=365\text{cm}$ 断面の塩分を求め、この断面平均値と実験値の $x=365\text{cm}$ における断面平均値との相関係数を計算する。 k_y を変化させながら相関係数が最大になったときの k_y を求める。現地データについても同様の方法で高水敷の横断方向拡散係数を求める。

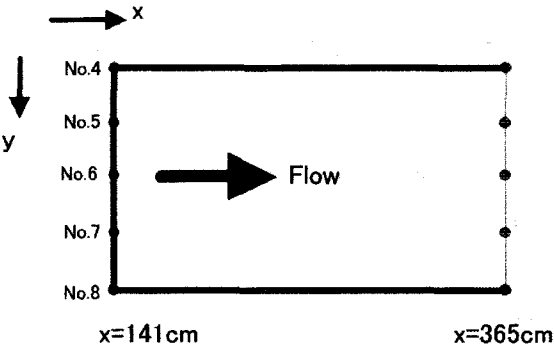


図-4 計算領域の概念図

3. 結果および考察

(1) 実験結果の概要^{1),2)}

実験条件を表-1に示す。CASE1、CASE2が複断面水路で、CASE1は水位差小、CASE2は水位差大である。CASE3はCASE1と同じ水位差で単断面水路の場合であり、CASE4はCASE2と同じ水位差で単断面水路の場合である。このときの実験結果の例を図-5、図-6に示す。図中(a)は $x=141\text{cm}$ 断面の表面流速およびCI濃度比の時系列であり、(b)は $x=365\text{cm}$ 断面のものである。サンプリング間隔は0.2secである。ここで、CI濃度比とは塩水槽のCI濃度初期値に対する比である。図-5より、CI濃度比は $x=365\text{cm}$ において、水路中央に対する側壁付近の濃度変化の遅れ時間が $x=141\text{cm}$ に比較して大きくなる。これは x 方向の流速 u が y 方向に勾配をもつことの効果が累積しているためである。図-6より、単断面水路では側壁付近の流速値が小さくなる傾向が見られるが、それ以外は

ほとんど流速差は無く、一様である。図-5より、複断面水路ではCI濃度比が上昇を始めてから1に達するまでの時間が長くなり、濃度の時間的な変化が比較的緩やかである。単断面水路では水位差小の場合(CASE3)と水位差大の場合(CASE4)を比較するとShearが小さいためか、No.2~No.8でほとんど同時にCI濃度が変化しており、測定位置による塩分変化の時間的な差はほとんど無く、複断面水路に比べ時間差は短かった。

CASE2、CASE4についても同様に流速とCI濃度比の時系列を得ているが、ここでは省略する。

(2) 室内実験における拡散係数

(1)で得られた時系列を使い、2.(3)の方法により拡散係数を求めた。与えられた実験データは $x=141\text{cm}$ 断面の

表-1 実験条件

CASE	水位 (cm)		水位差 Δh (cm)	相対密度差 $\Delta \rho / \rho_2$	ゲート操作 時間 (SEC) ΔT	水路断面 形
	淡水槽 h_1	塩水槽 h_2				
CASE1	4.88	5.15	0.27	0.002	167	複断面
CASE2	4.80	5.26	0.46	0.002	216	複断面
CASE3	1.61	1.88	0.27	0.002	167	単断面
CASE4	1.53	1.99	0.46	0.002	216	単断面

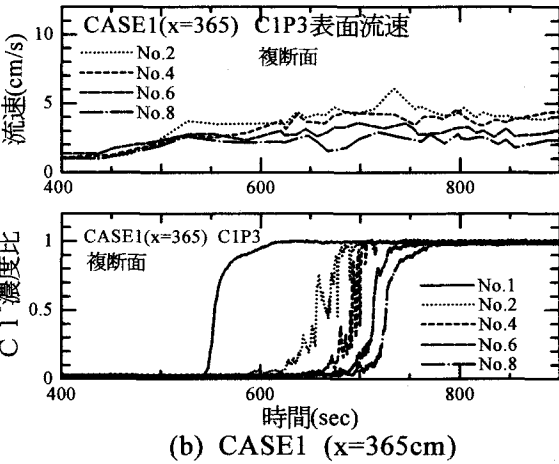
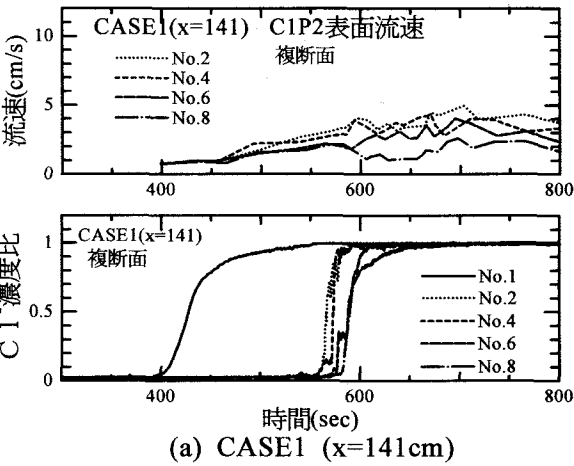
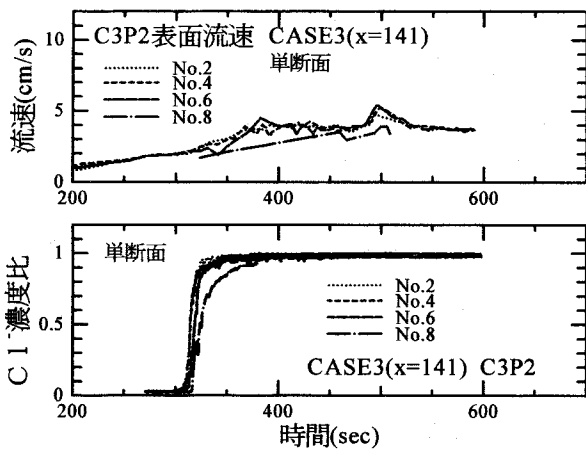
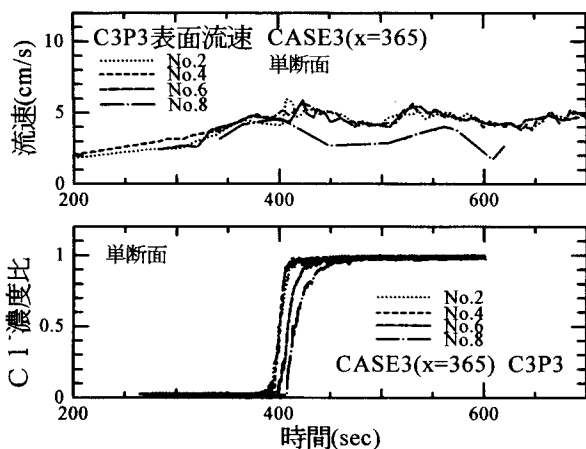


図-5 実験結果(CASE1)



(a) CASE3 (x=141cm)



(b) CASE3 (x=365cm)

図-6 実験結果(CASE3)

No. 4～No. 8, $x=365\text{cm}$ 断面のNo. 4とNo. 8の塩分時系列と2断面の平均したNo. 4～No. 8の流速である。これらより, $x=365\text{cm}$ 断面のNo. 4～No. 8のC1濃度比を, k_y を逐次変化させながら計算し, その断面平均値と $x=365\text{cm}$ 断面での実験値の断面平均値との相関係数 r を計算する。 r が最大のときの k_y を求めるという手順である。計算格子間隔は $\Delta t=0.8\text{sec}$, $\Delta x=1.0\text{cm}$, $\Delta y=0.2\text{cm}$ である。このようにして求めた $x=365\text{cm}$ でのC1濃度比の実験値と計算値の断面平均の時系列が図-7である。これは複断面水路の場合でCASE1である。 $k_y=3.4\text{cm}^2/\text{sec}$, $r=0.981$ であった。 r は実験時のC1濃度比の断面平均値が0.1～0.7の区間で計算している。図-8はCASE1に対応する単断面水路の場合でCASE3の同様の図である。図-9は複断面水路で水位差大の場合でCASE2のものであり, 図-10はCASE2に対応する単断面の場合でCASE4である。これらの結果をまとめたのが表-2である。ここに, I は水面勾配, R は径深, u_* は摩擦速度, h は水理水深, k_y は横断方向拡散係数, Δh は塩淡の水位差である。交番流における一様水路の実験における混合係数はSumer・Fischer⁶⁾によると $k_y/(u_*h)=0.06\sim 0.27$ である。本研究では単断面水路のCASE3とCASE4の $k_y/(u_*h)$ の値はその範囲内にあ

り, Sumer・Fischerの結果と一致する。しかし, 複断面水路のCASE1とCASE2の $k_y/(u_*h)$ は2.06と0.96で, Sumer・Fischerのそれより大である。複断面水路であるCASE1に対応する単断面水路のケースはCASE3であるので, これらの $k_y/(u_*h)$ の値を比較するとCASE1はCASE3の12.8倍である。同様にCASE2の $k_y/(u_*h)$ はCASE4の10.6倍である。従って, 複断面水路高水敷の $k_y/(u_*h)$ は単断面水路のその約10倍になっている。これは複断面水路のShearの効果と考えられる。

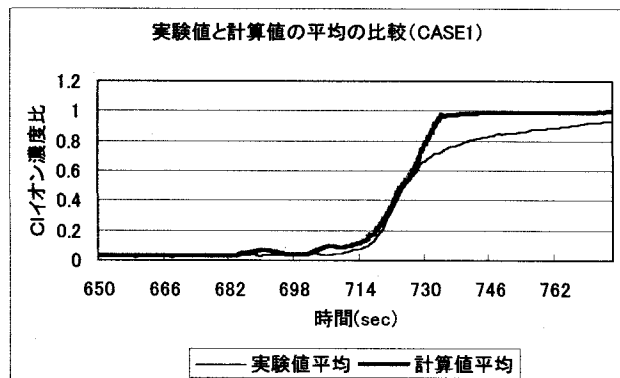


図-7 実験値と計算値の時系列(CASE1, 複断面)

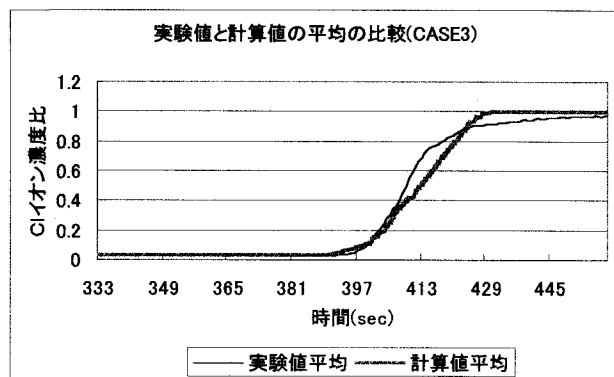


図-8 実験値と計算値の時系列(CASE3, 単断面)

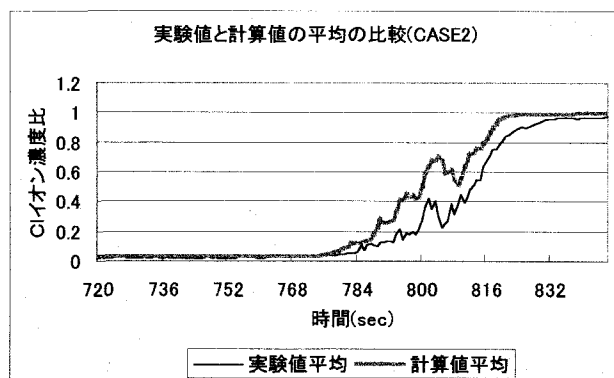


図-9 実験値と計算値の時系列(CASE2, 複断面)

表-2 計算結果のまとめ

CASE	I	R (cm)	u_* (cm/s)	h (cm)	k_y (cm ² /s)	$k_y/(u_*h)$	r	水路 断面形	Δh (cm)
CASE1	1/1481	1.242	0.907	1.82	3.4	2.06	0.981	複断面	0.27
CASE2	1/870	1.255	1.189	1.84	2.1	0.96	0.919	複断面	0.46
CASE3	1/1481	1.562	1.017	1.82	0.3	0.16	0.994	単断面	0.27
CASE4	1/870	1.583	1.783	1.85	0.3	0.09	0.994	単断面	0.46

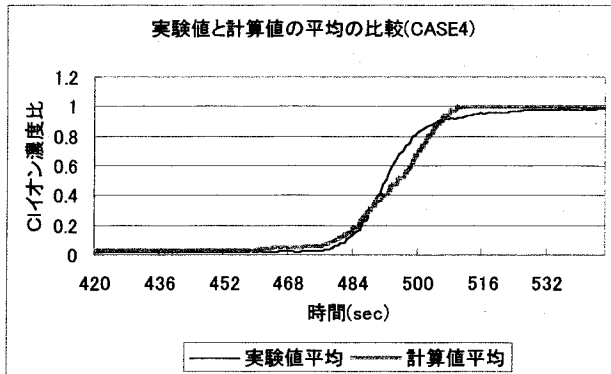


図-10 実験値と計算値の時系列(CASE4, 単断面)

(3) 現地における拡散係数

高瀬川河口の複断面河道部において過去に計測されたデータ³⁾を基に実験値と同様に拡散係数を求めてみた。図-1の α , β , γ 測点とABCDE測線において、水温計あるいは塩分計により水温や塩分が測定されており、水温は塩分計で測定された水温・塩分の相関関係から塩分に変換してある³⁾。サンプリング間隔は1分である。計算に使用したデータは1999年8月8日夜の塩水侵入時のA測線およびB測線のデータであり、このときの塩分の等値線図を図-11に示す。流速にはA測線およびB測線の浅瀬部の平均流速を使用した。すなわち、実験における $x=141\text{cm}$ 断面にあたるのがA測線であり、 $x=365\text{cm}$ にあたるのがB測線である。浅瀬部の流速は図-1の高瀬川観測所で測定されている流量から求められた。複断面河道部でも高瀬川観測所地点と同流量が通過し、マニング公式を適用できるものとして、複断面部の平均したマニングの粗度係数を求める。河口と小川原湖の水位から水面勾配、AおよびB測線の河床横断面積、潤辺を求め、左岸高水敷(左岸浅瀬)の平均流速を算出している。河口観測所と高瀬川観測所の距離は約5kmあるので、河口と小川原湖の水位差変化と高瀬川観測所の流速変化には数十分の時間差が生じるため、この時間差も考慮して計算された。高瀬川観測所の流量は西田・中辻の方法⁷⁾で求めた。水面勾配および流水断面積は小川原湖総合観測所と河口観測所の水位時系列から計算した。計算格子間隔は $\Delta t=60\text{sec}$, $\Delta x=5\text{m}$, $\Delta y=3\text{m}$ である。A-B測線間において拡散係数を求めたところ $k_y=0.08\text{m}^2/\text{s}$ であった。このときのB測線における塩分濃度の観測値の断面平均と計算値の断面平均の時系列が図-12である。計算時間内の平均摩擦速度 u_* は小川原湖総合観測所と

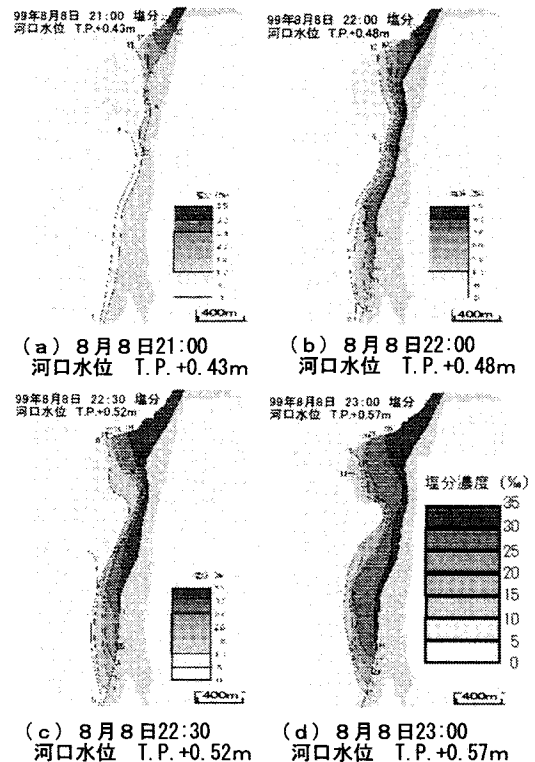


図-11 塩水侵入時の等値線図

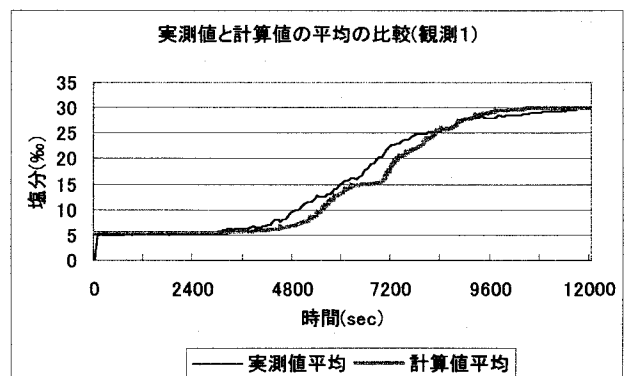


図-12 実測値と計算値の時系列(B測線)

河口観測所の水位から10分毎に求め、平均したところ 0.015m/s であった。水理水深 h は同様に計算時間内で平均して 0.831m であった。このときの $k_y/(u_*h)$ は 6.21 であった。複断面水路の実験値から求められた値と比較すると3~6倍である。また、Missouri Riverでは $k_y/(u_*h)=0.60$ である⁹⁾。これと前述のSumer・Fischerの

表-3 従来の研究と本研究の混合係数 $k_y/(u_*h)$ の値

Sumer・Fischer の研究 ⁶⁾	実験・一様水路		0.06~0.27
Wardの研究 ⁸⁾	現地・Cordova Bay Gironde Estuary		0.4~1.0
Yotsukuraらの研 究 ⁹⁾	現地・Missouri river		0.6
本研究	実験	単断面平均	0.125
		複断面平均	1.51
	現地	高瀬川複断面	6.21

実験の結果と比較すると、2~10倍になっている。現地では混合係数が実験室レベルのそれよりも大きくなる傾向がある。本研究においても同様の傾向があるといえる。さらにWard⁸⁾による交番流における実測では0.4~1.0である。高瀬川複断面河道部の浅瀬の $k_y/(u_*h)$ はWardのものと比較すると6.2~15.5倍である。(2)の結果では、複断面水路高水敷の $k_y/(u_*h)$ は単断面水路のその10倍であった。これより類推すると高瀬川河口部が複断面河道であることに起因して、 $k_y/(u_*h)$ が変化しているものであると考えられる。表-3に従来の研究と本研究における混合係数の計算結果の一覧を示す。

4. おわりに

本研究で得られた知見は以下の通りである。

(1)単断面水路の実験では $k_y/(u_*h)$ の値は従来の研究の範囲内0.06~0.27にある。

(2)実験室レベルでは複断面水路高水敷部の $k_y/(u_*h)$ の値は単断面水路のその約10倍である。

(3)高瀬川の現地計測結果から求めた $k_y/(u_*h)$ の値は実験室レベルより大きく、Wardの研究結果と比較すると6.2~15.5倍である。これは複断面水路による効果であると考えられる。

以上により水路断面形状により混合係数が大きく変化することが確認された。また、 k_y には密度効果による侵入、 y 方向の移流も含まれていると思われるが、それらは真の k_y と比較してかなり小さいものと考えられる。今後はさらに現地データの蓄積をして、検討していきたいと考えている。

謝辞：本研究を行うにあたり、貴重なご教授を頂いた東北大学大学院工学研究科真野明教授、東北大学大学院工学研究科田中仁教授、東京工業大学大学院総合理工学研究科石川忠晴教授ならびに大阪大学大学院工学研究科西田修三助教授に厚くお礼申し上げます。建設省東北地方建設局高瀬川総合開発工事事務所からは貴重なデータの御提供と観測に際し御高配を頂いたことに感謝いたします。現地観測とデータ整理では東京工業大学大学院石川教授研究室の皆様にご協力頂いたことに感謝します。

参考文献

1)藤原広和・沢本正樹・神山尚人：複断面水路における河口密度流の混合特性，海岸工学論文集，第42巻，pp.416-420, 1995.

2)藤原広和・沢本正樹・田中博通：複断面および単断面水路における密度流の混合特性の相違について，水工学論文集，第41巻，pp.515-520, 1997.

3)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.

4)Fischer, H.B.: Longitudinal dispersion and turbulent mixing in open-channel flow, Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 5, pp. 59-78, 1973.

5)池田駿介・泉典洋：浮遊砂の横断方向拡散係数について，土木学会論文集No. 434/II-16, pp. 47~55, 1991.

6)Sumer, S.M. and Fischer, H.B.: Transverse mixing in partially stratified flow, J. Hyd. Div., Proc. ASCE, Vol. 103, HY6, pp. 587-600, 1977.

7)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. 869-870, 1999.

8)Ward, P. R. B.: Transverse dispersion in oscillatory channel flow, J. Hyd. Div., Proc. ASCE, Vol. 100, HY6, pp. 755-772, 1974.

9)Yotsukura, N., Fischer, H.B. and Sayre, W.W.: Measurement of Mixing Characteristics of the Missouri River Between Sioux City, Iowa, and Plattsmouth, Nebraska, U. S. Geol. Survey Water-Supply Paper, 1899-G, 1970.

(2000. 10. 2受付)