

河川感潮部における物理諸量の分布と濁度の性状について

坂本 淳一¹・松本 治彦²・羽田野 袈裟義³・朝位 孝二⁴・天野 卓三⁵

¹正会員 中央開発株式会社技術センター (〒169-8612 東京都新宿区西早稲田三丁目 13-5)

E-mail: sakamoto@ckcnet.co.jp

²正会員 宇部フロンティア大学教授 人間社会学部 (〒755-0805 宇部市文京台二丁目 1-1)

E-mail: matumoto@frontier-u.jp

³フェロー会員 山口大学教授 大学院理工学研究科 (〒755-8611 宇部市常盤台二丁目 16-1)

E-mail: khadano@yamaguchi-u.ac.jp

⁴正会員 山口大学准教授 大学院理工学研究科 (〒755-8611 宇部市常盤台二丁目 16-1)

E-mail: kido@yamaguchi-u.ac.jp

⁵正会員 中電技術コンサルタント株式会社 (〒734-8510 広島市南区出汐二丁目 3-30)

E-mail: amano@cecnet.co.jp

河川感潮部では、底質を構成する微細な粒子が有機物を多量に含んでヘドロ化し、貧酸素化や硫化水素の発生による悪臭などの問題が生じている。河川感潮部の水質浄化対策を検討するには、底質の移動に影響を及ぼす底面せん断応力の見積もりが必要になる。本研究では、現地観測により河川感潮部における塩水の挙動と濁度の分布の状況を調べると共に、密度効果を考慮した底面せん断応力の評価を試みている。評価された底面せん断応力と濁度の測定値との関係を考察した結果、一定以上の水深で評価された底面せん断応力は、上げ潮時に侵入する塩水の先端部で大きく、底質の巻き上げに寄与することが推論された。

Key Words: estuary, bottom shear stress, turbidity, density gradient, slope of water surface

1. はじめに

河川感潮部は、緩勾配で流れが緩やかであるため、上流から流送された濁質が堆積しやすい環境にある。また、洪水時に浮遊状態で海域に流出した微細な濁質が、日々の潮汐変動において、くさび状に侵入・遡上する塩水流の比較的大きな底面せん断応力によって押し戻されて堆積する。さらに、河川感潮部は流域からの排水等が集中することから、栄養塩類の供給量が多く、その結果、有機物の堆積も顕著になる。特に、自流量の少ない都市河川では、相対的に流量が大きい塩水により流れが淀みやすく、有機物が堆積しやすい環境にあると考えられる。濁質や有機物の堆積が顕著な河川感潮部では、有機物を多量に含んだ微粒子がヘドロ化し、有機物の分解による溶存酸素濃度の低下¹⁾や硫酸塩還元菌の還元作用に伴う硫化水素²⁾の発生による悪臭などの問題も生じている。

ヘドロを含む底質は、塩水の入退潮に伴って移動

を繰り返すと考えられるが、著者らの一人はこれに着目し、河床に複数列のトラップを設けてヘドロと土砂礫を分別回収することを提案している³⁾。このような装置の設置位置を検討するためには、底質の移動に大きく影響すると考えられる底面せん断応力を適切に見積もることが重要となる。

河川感潮部の流れは、塩分分布の状態から弱混合型、緩混合型及び強混合型に大別されるが、同一の河川でもこれらが潮汐により、また同一の潮汐でも潮時により、異なる混合形態を示す。したがって、塩分分布を精度良く把握するためには現地調査を実施し、浄化対策に結びつくデータを収集することが不可欠となる。河川感潮部の現地観測の事例として、河原・名合による旭川^{4),5)}、二渡らによる六角川⁶⁾、福岡らによる那珂川⁷⁾、大橋・戒による肱川⁸⁾の観測等があるが、自流量の少ない都市河川では、土屋・和泉による目黒川^{9),10)}等数例があるに過ぎない。

本論文では、まずこれまで実施してきた自流量の

2. 現地調査の概要

現地調査は、宇部市の中央部を流れる真締川（流路延長約7km）を対象に実施した。なお、2~3日間無降雨が続いたときの真締川の流量観測値は、約0.2m³/sと極めて小さい。

図-1に示すように、真締川の感潮区間に4つの調査地点を設置して、一潮汐間の水質調査を行った。各調査地点の河口からの距離は、Stn. 1から順に260m, 620m, 920m, 1260mであり、Stn. 1~4の区間距離は1kmである。調査は1995年から2001年までの間に計17回実施している。採水は、各調査地点の河道中央において、一時間毎に同時に行い、塩化物イオン、電気伝導度、pH、濁度及び水温を測定している。採水深度は、表層、水面下0.5m, 1.0m, 以下1.0m毎に底層までとした。水深も錘測により、同位置、同時間に実測している。

また、1997年から1999年までの調査では、最下流のStn. 1において、流速、塩分、濁度及び水温の横断面測定を追加し、2000年以降は調査地点をStn. 2に移して同様の横断面測定を実施している。横断面測定は、横断方向5測線、水深方向に0.5m間隔で実施した。表-1に各測定項目の測定機器または分析方法を示す。なお、本研究では、底質の巻き上げの状況を把握するため、懸濁物質と相関の高いと考えられる濁度を測定している¹²⁾。各調査地点の採取水は、積分球方式により濁度を測定した。横断面測定では、赤外後方散乱方式のセンサを搭載した濁度計を用いて現地で直接測定している。

表-2には、Stn. 1において横断面測定を実施した第7回から第13回の調査実施日及び宇部港の潮位を示す。

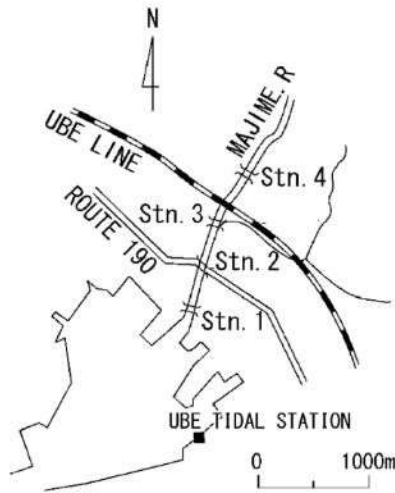


図-1 調査地点

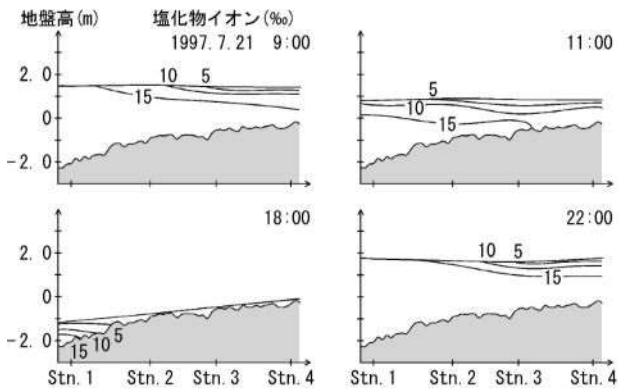
表-1 測定項目と測定機器・分析方法

	項目	測定機器・分析方法
縦断方向	塩化物イオン	硝酸銀適定法
	電気伝導度	電気伝導度計
	pH	ガラス電極法
	濁度	積分球式濁度計
	水温	サーミスタ水温計
横断方向	流速	電磁流向流速計(ACM210-D)
	塩分・水温	サリノメーター (E. I. L. ; MC5/2型)
	濁度	赤外後方散乱方式濁度計

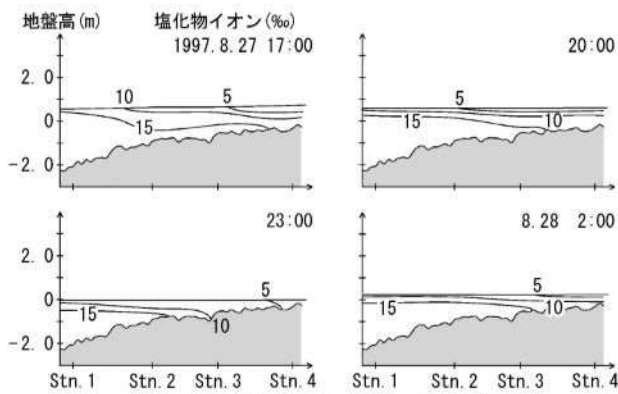
少ない中小河川の感潮域を対象とした現地調査の観測値¹¹⁾から、一潮汐間の水質の時間的・空間的変動や分布特性等について、特に塩分と濁度に着目して考察する。次に、密度効果を考慮した底面せん断応力の評価式を提示するとともに、現地調査による密度測定結果と一次元非定常流計算の結果を用いて底面せん断応力を評価する。さらに、底面せん断応力の評価結果と濁度との関係を分析し、これに起因する底質の巻き上げの状況を考察する。

表-2 調査実施日と宇部港の潮位

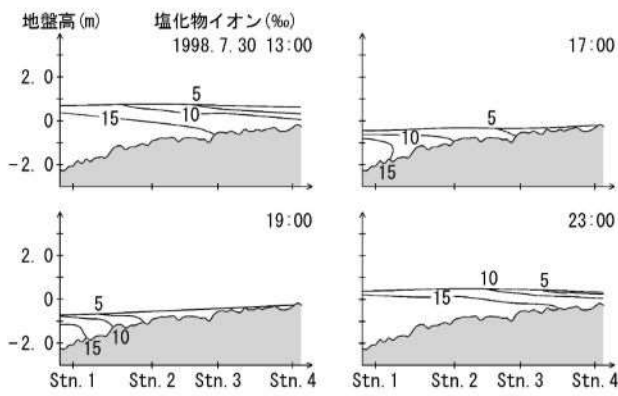
調査回	第7回	第8回	第9回	第10回	第11回	第12回	第13回
調査日	97. 7. 21	97. 8. 27-28	97. 10. 22-23	98. 7. 23	98. 7. 30-31	99. 8. 5-6	99. 10. 22-23
調査時間	9:00-22:00	17:00-5:00	13:30-1:30	8:30-21:30	13:00-2:00	15:00-3:00	19:30-7:30
	大潮	小潮	中潮	大潮	小潮	小潮	大潮
満潮	時刻	9:18	17:28	13:18	8:22	13:01	14:53
	潮位(cm)	380	306	313	354	305	320
干潮	時刻	15:49	23:32	19:23	14:52	19:08	20:55
	潮位(cm)	18	204	173	42	140	170
満潮	時刻	22:16	5:10	0:50	21:20	1:14	2:57
	潮位(cm)	412	286	271	392	324	322



a) 第7回(潮位380~18~412cm)



b) 第8回(潮位306~204~286cm)



c) 第11回(潮位305~140~324cm)

図-2 塩化物イオンの縦断面分布

3. 調査結果

ここでは、表-1に示す調査のうち、潮位差の異なる第7回、第8回及び第11回の調査結果を代表例として述べる。

(1) 塩化物イオンの縦断面分布

真締川における塩水の侵入・遡上の状況を把握するため、図-2に塩化物イオンの縦断面分布を示す。なお、真締川感潮部において、ほぼ塩水とみなされる部分は塩化物イオン濃度17~18%であり、一方ほ

ぼ河川水とみなされるのは濃度5%以下の部分である。そしてその中間の10~15%の領域が存在する。上げ潮時には、塩化物イオンのコンターが上に凸の形状を呈する塩水先端部が底面に沿って遡上する。塩化物イオン濃度の空間分布は上げ潮時においても連続的に遷移しており、塩水先端部の厳密な定義は難しいが、上げ潮時における底質の巻き上げとの関連では、塩水侵入の先駆をなし底面に沿って遡上する塩化物イオン濃度15%程度の水塊の運動が重要と考える。したがって、本研究では塩化物イオン濃度15%のコンターが河床と交わる位置を塩水先端部と定義して取り扱う。

a) 第7回(1997. 7. 21)

満潮時(9:00)には、塩水先端部はStn. 4よりも上流に達しており、Stn. 1付近では河川水をほぼ完全に混合している。下げ潮時(11:00)には、表層に河川水を流しながら塩水が後退し、干潮時には一旦Stn. 1よりも下流まで後退する。塩水が再度Stn. 1付近まで遡上するのは18:00であり、満潮時(22:00)には観測を開始した満潮時(9:00)とほぼ同様の分布を示している。

b) 第8回(1997. 8. 27~28)

満潮時(17:00)の図をみると、表層の塩化物イオン濃度は第7回に比べて小さく、混合の程度が弱いことが分かる。下げ潮時(20:00)には、表層に河川水を流しながら、かつコンターの傾きをほぼ水平にして塩水が後退していく。干潮時刻に近い23:00の図をみると、塩水先端部はStn. 2とStn. 3の中間の位置までしか後退していないことが分かる。上げ潮(2:00)に入っても、混合の程度は弱く、コンターの傾きを水平に近い状態に保ちながら、塩水が下層を遡上していく。

c) 第11回(1998. 7. 30~31)

満潮時(13:00)のコンターは比較的疎であり、緩混合型の分布を示している。下げ潮時(17:00)には緩混合型の分布を示しながら塩水が後退し、干潮時(19:00)に塩水先端部はStn. 1付近まで後退する。その後、上げ潮時(23:00)には緩混合型の分布を示しながら塩水が遡上する。

(2) 塩分の横断面測定とフラックスの評価

真締川の一断面における物質移動の状況を把握するため、流速及び塩分の横断面測定を行った。第7回、第8回及び第11回の調査では、Stn. 1において測定を実施している。このStn. 1における流速及び塩分の横断面測定結果を用いて式(1)より塩分フラックスを評価する。

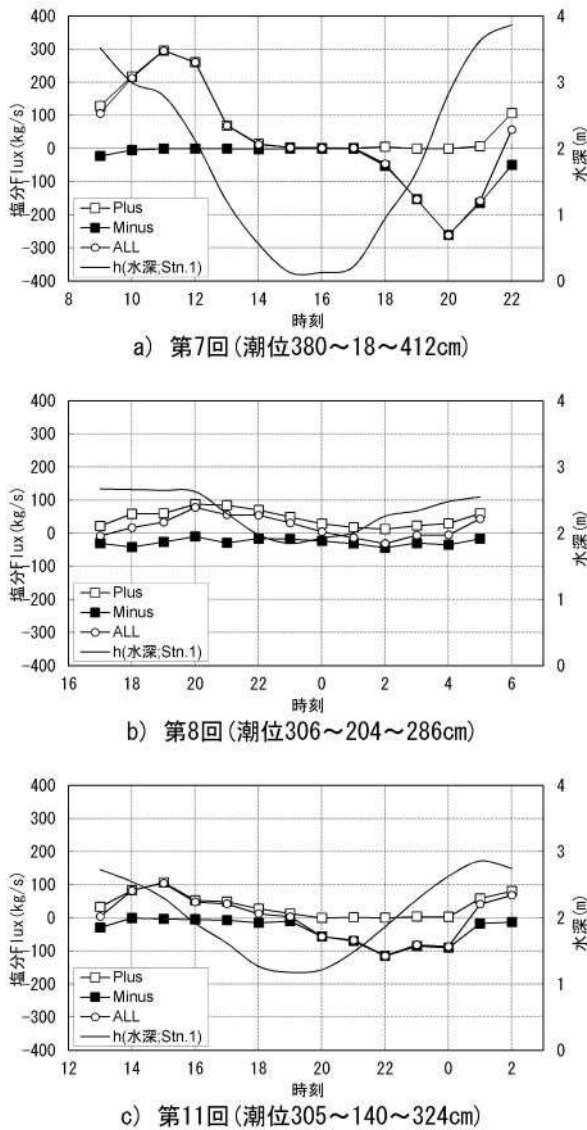


図-3 塩分フラックスの時間変動（下流向きを正とする）

$$Flux = \sum v_i c_i \Delta A_i \quad (1)$$

ここで、添え字*i*は横断面測定各測点を示し、*v_i*はその測点での流速、*c_i*は同じく塩分の測定値、 ΔA_i は測点*i*が代表する断面積要素であり、流速*v*は流速計による測定値と方位の測定値から河道縦断方向の速度成分に換算したものをを用いる。図-3にStn. 1における塩分フラックスの時間変動を示す。

なお、図-3の□は下流向き、■は上流向き、そして○は断面全体の塩分フラックス（○=□+■）であり、図の縦軸は下流向きを正とする。また、参考のため流速及び塩分の横断面分布を図-5に示す。

a) 第7回（1997.7.21）

満潮から約2時間後の11:00に下流向きの塩分フラックスが最大値を示す。Stn. 1における塩分は、表層を除いて高い値を示し、かつ塩水の後退によって

下流向きの流速が大きくなっている。水深も大きく、流量が最大となる時刻に塩分フラックスが最大となっている。上流向きの塩分フラックスが最大となる20:00についても、上下流の向きを変えて同様のことが言える。

図-3のa)をみると、干潮時刻を境に、上流向き、下流向きの塩分フラックスがほぼ同等の値を示している。干潮時にStn. 1よりも下流に後退した塩水が、上げ潮時には断面全体でほぼ上流向きの流れとなって遡上している。

b) 第8回（1997.8.27~28）

前節(1)で述べたように、潮位差の小さい第8回調査では、干潮時の塩水の先端はStn. 2~3に位置しており、Stn. 1断面には観測中、常に塩分が存在する状態にある。

図-3のb)では、観測したすべての時刻において、下流向き及び上流向きの物質移動がみられる。このことは、上げ潮時には、上層では下流向きの河川水の流れが、そして下層では上流向きの塩水の流れが存在することを反映している。

c) 第11回（1998.7.30~31）

第11回調査において、塩水の先端は、干潮時にちょうどStn. 1付近まで後退しており、塩分フラックスは干潮時刻にあたる19:00を境に、下流向きから上流向きへと転換している。

(3) 濁度の横断面測定とフラックスの評価

前節(2)で述べた塩分と同様に、Stn. 1で実施した流速及び濁度の横断面測定の結果から、式(2)より濁度フラックスを算定した。

$$Flux = \sum v_i s_i \Delta A_i \quad (2)$$

ここで、*s_i*は横断面測定各測点*i*の濁度の測定値である。Stn. 1における濁度フラックスの時間変動を図-4に示す。

なお、図-4の□は下流向き、■は上流向き、そして○は断面全体の塩分フラックス（○=□+■）を表しており、図の縦軸は下流向きを正とする。また、塩分の場合と同じく、参考として、濁度の横断面分布を図-5に示す。

a) 第7回（1997.7.21）

11:00から16:00までの下げ潮時に下流向きのフラックスが大きくなっている。これは、流速が次第に大きくなることにより、河床の底質を巻き上げながら流下しているものと考えられる。上流向きのフラックスが現れるのは、塩水がStn. 1に到達する18:00頃からであり、下層に侵入した上流向きの塩水の

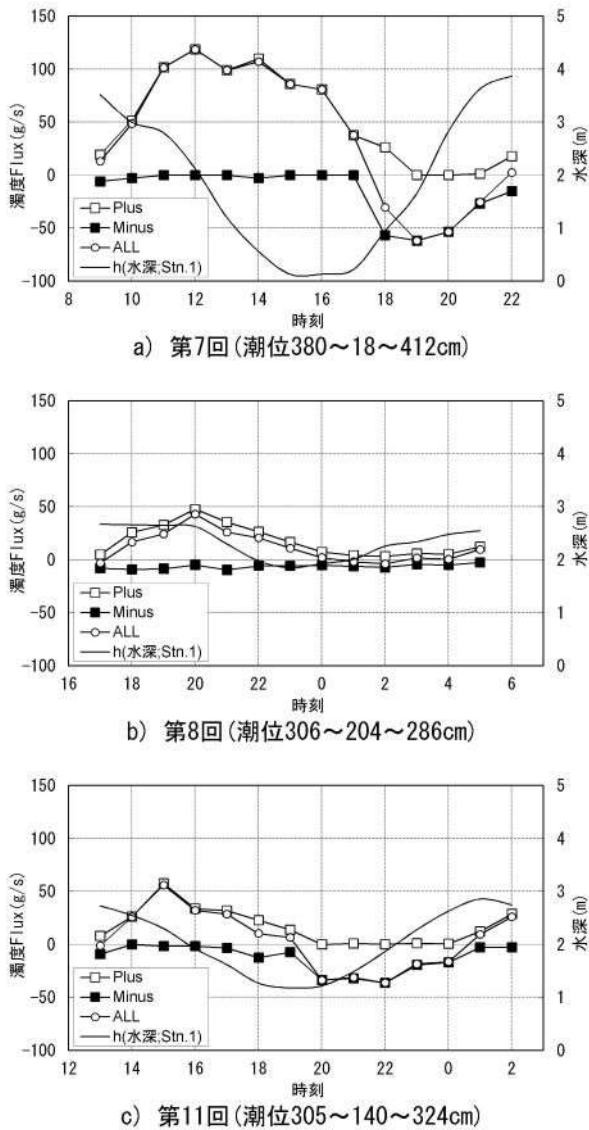


図-4 濁度フラックスの時間変動 (下流向きを正とする)

流れによって、底質の巻き上げが発生しているものと考えられる。

b) 第8回 (1997. 8. 27~28)

第8回調査は小潮であるため、絶対量は第7回の測定に比べて小さい。潮汐の1サイクル間の変動で見ると、下げ潮時の下流向きの濁度フラックスが大きい。これは、塩水が後退するとき、上層も下層も下流向きの流れであるため、下層の下流向きの流れが他の時間帯よりも速く、底質の巻き上げが活発であるものと考えられる。上流向きのフラックスは下流向きのフラックスと比較して50g/s以下と小さいながらも、測定中ほぼ一定の値を示している。また、上げ潮時の全濁度フラックスは、第7回の大潮時の結果とは異なり、上流向きとなる状態がほとんど見られない。これは、Stn. 1には塩水が侵入したままで、塩水先端部が通過して底質の巻き上げを起こすことがないためと考えられる。

c) 第11回 (1998. 7. 30~31)

前節(2)で示した塩分フラックスと同様に、干潮時刻にあたる19:00を境に下流向きから上流向きへと転換している。これは、Stn. 1付近に塩水の先端が存在する干潮時前後には、塩水先端部の移動にともなう下層の比較的速い流れによって底質の巻き上げが起こり、下層の濁度が上昇していることを反映している。

(4) 流速の鉛直分布

Stn. 1における流速の鉛直分布を図-6に示す。横断面測定では、横断方向に5測線を配置しているが、ここでは中央の3測線の測定値を用いた。

なお、塩淡境界付近で変曲点を持つような流速分布を考慮し、三次式の近似曲線を示すとともに、塩分及び濁度の鉛直分布も併記した。

a) 第7回 (1997. 7. 21)

満潮時(9:00)の流速は、全層で比較的小さい。潮位差が大きく、下げ潮時(11:00)には、全層で下流向きの流れとなり、特に表層の流速が大きい。上げ潮に入り、塩水が再度Stn. 1まで遡上してくる18:00には、下層で塩水による上流向きの流速、上層で河川水による下流向きの流速が同時にみられる。満潮時(22:00)は観測開始時(9:00)とほぼ同様の分布となり、全層で流速は小さい。

b) 第8回 (1997. 8. 27~28)

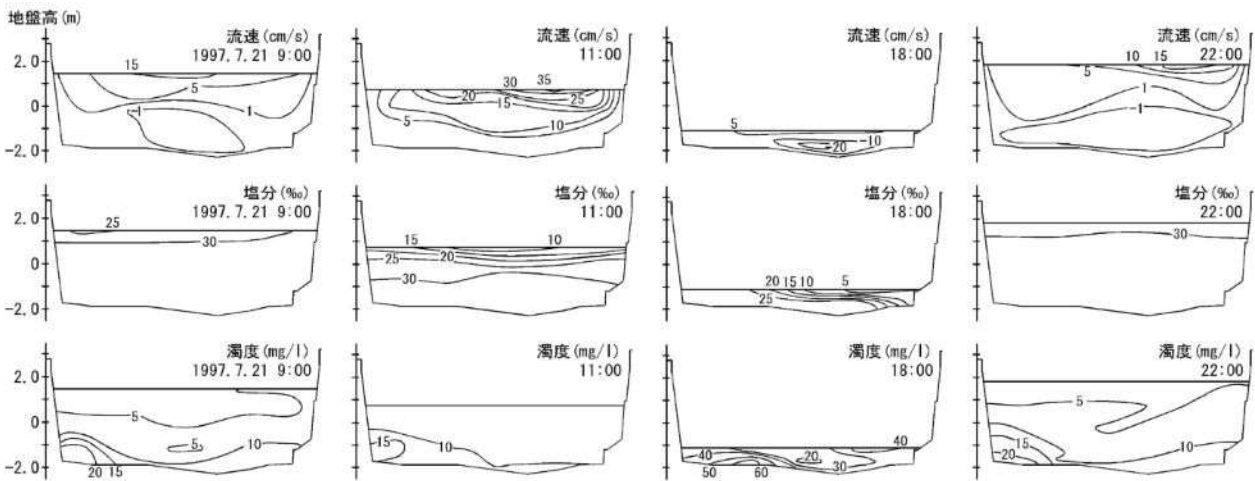
満潮時(17:00)、下げ潮時(20:00)、干潮時(23:00)及び上げ潮時(2:00)の分布を示す。潮位差が小さく、すべての潮時で流速が小さい。表層の河川水の流速が大きく、塩水層では上流向きの流速もみられるものの、その値は小さい。

c) 第11回 (1998. 7. 30~31)

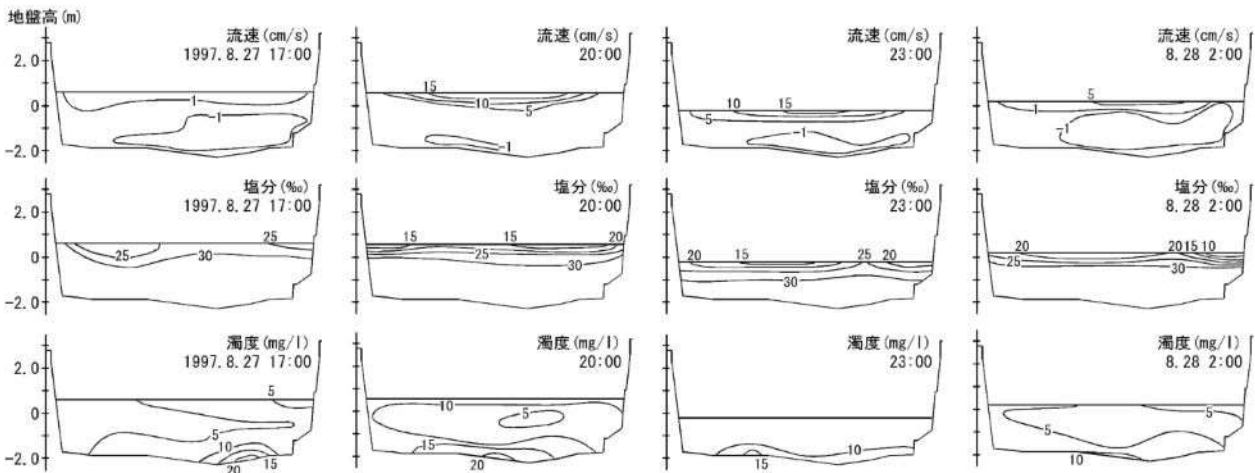
満潮時(13:00)の分布は、第7回の満潮時と類似しており、流速はほぼ全層で小さい。下げ潮時(17:00)及び干潮時(19:00)は、表層で河川水の下流向きの流速が大きく、その下の塩水層の流速は小さくなっており、第8回の分布形状と類似している。上げ潮時(23:00)には、流速は大きくないが、ほぼ全層で上流向きの流速を示している。

4. 底面せん断応力の評価

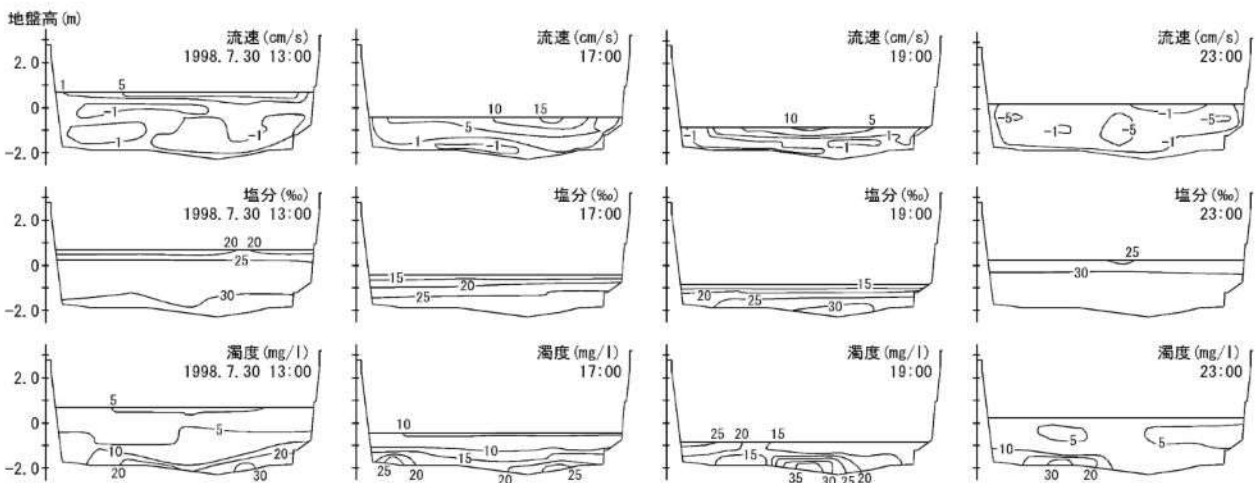
河川感潮部は密度流場であるため、対数+直線則によって流速の鉛直分布を評価することが適切と考えられるが¹³⁾、潮時による変化を考えると単純ではない。現時点では対数則による評価が行われている程度である¹⁴⁾。この場合、底面せん断応力を評価す



a) 第7回(潮位380~18~412cm, 上段: 流速, 中段: 塩分, 下段: 濁度)



b) 第8回(潮位306~204~286cm, 上段: 流速, 中段: 塩分, 下段: 濁度)



c) 第11回(潮位305~140~324cm, 上段: 流速, 中段: 塩分, 下段: 濁度)

図-5 Stn. 1における流速, 塩分及び濁度の横断面分布 (流速は下流向きを正とする)

るためには、底面ごく近傍の塩水層下部において、流速の鉛直分布を密に測定する必要がある。しかしながら、塩水先端部のような層厚の小さい部分では測定機器の制約もあり、実河川で正確な測定値を得ることは現実には難しい。また、山本ら¹⁵⁾は河床底面において噴流を発生させ乱流計測を行うことで、

底面せん断応力をレイノルズ応力で表し、底面の侵食速度と関連付けることを試みているが、その底面せん断応力の発生源がジェット噴流であるため、本研究への適用は困難である。

底質の移動には、底面せん断応力(掃流力)が大きく効くものと考えられるが、入退潮が繰り返される

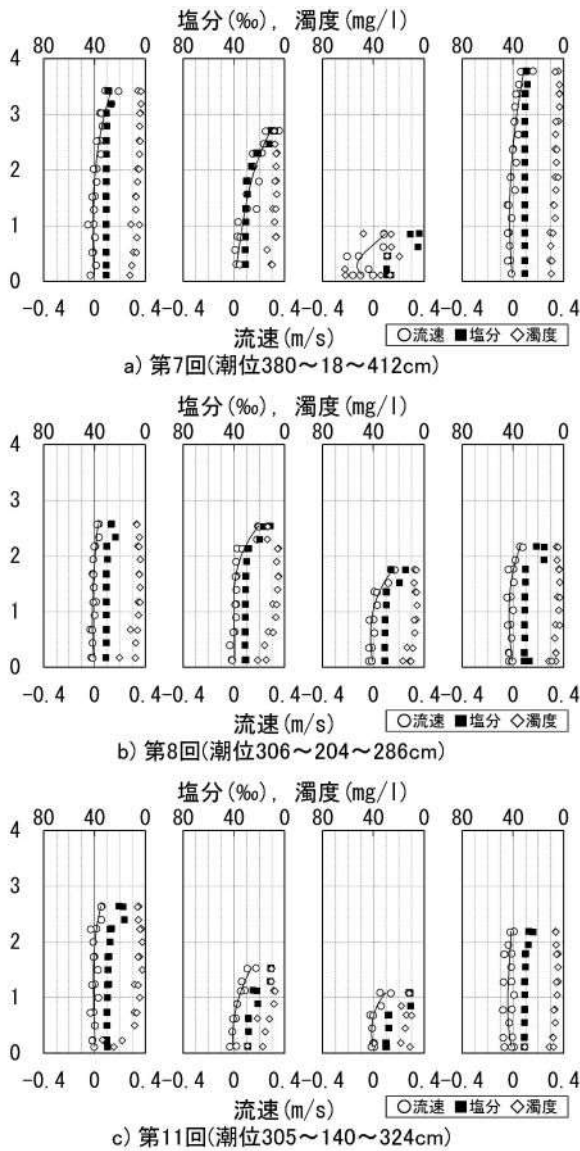


図-6 Stn. 1における流速及び塩分の鉛直分布（下流向きを正とする）

河川感潮部では、その評価にあたって、塩分による密度変化を考慮する必要がある¹⁶⁾。本研究では、密度変化を考慮した運動方程式に、現地調査から得られた密度分布と非定常流計算による水深及び流速を用いて、底面せん断応力の評価を試みた。

(1) 評価方法

密度変化を考慮した運動方程式は、

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v A) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \beta v^2 A) = \rho g A \sin \theta - \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \int_A \rho g (h-y) dA \right\} - \tau_b B \quad (3)$$

で与えられる。ここで、 A は流水断面積、 v は断面平均流速、 B は川幅、 h は水深、 y は底面から鉛直上向き、 x は水平流下方向にとった距離である。 τ_b は底面せん断応力であり、流れが底面を下流向きに擦ると

きを正とする。河道はほぼ一定幅の広長方形水路と考へ、式(3)において、右辺の積分で ρ を断面平均値 $\langle \rho \rangle = \rho_0 + \langle \Delta \rho \rangle$ (ρ_0 は淡水の密度、 $\langle \Delta \rho \rangle$ は淡水との密度差の断面平均)であり、左辺にはブシネスク近似を用いる。また、運動量補正係数を $\beta = 1$ と仮定し、水面勾配を I_w とすると、

$$h \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right) = gh I_w - \frac{\tau_b}{\rho_0} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{g \langle \rho \rangle h^2}{2 \rho_0} \right) \quad (4)$$

が得られる。 $\langle \Delta \rho \rangle / \rho_0 \ll 1$ 、 $\partial h / \partial x \ll 1$ と考へて、右辺第3項を近似すると、

$$h \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right) = gh I_w - \frac{\tau_b}{\rho_0} - \frac{1}{2} \frac{gh^2}{\rho_0} \frac{\partial \langle \rho \rangle}{\partial x} \quad (5)$$

が得られる。式(5)について、塩化物イオンの調査結果から算定した各調査地点の断面平均密度、別途実施した次元非定常流計算による水深及び流速を用いて各項を評価する。次元非定常流計算では、下流端境界条件として潮位の時間変動から河口で水深を与え、上流端境界条件は河口から約2.8km上流の潮止堰地点において流量を与えた。また、河床の粗度係数は既報¹⁷⁾より $n=0.03$ を与えた。ここで、式(5)の右辺第3項にある水平密度勾配 $\partial \langle \rho \rangle / \partial x$ は各調査地点における断面平均密度 $\langle \rho \rangle$ の差を地点間距離で除して求めた。式(5)の各項を評価した結果、左辺にある加速度項が一貫して相対的に小さいことが分かっており^{17), 18)}、式(5)の加速度項を無視した次の式、

$$\tau_b / \rho_0 = gh I_w - \frac{1}{2} \frac{gh^2}{\rho_0} \frac{\partial \langle \rho \rangle}{\partial x} \quad (6)$$

から底面せん断応力を評価した。

(2) 評価結果

図-7にStn. 1~2及びStn. 2~3間で式(6)により評価した底面せん断応力の時間変動を示す。また、同図には、式(6)の各項(水面勾配項、密度勾配項)の値と次元非定常流計算により求めた水深(2地点の平均水深)を示す。図-7から、底面せん断応力は、潮位差の大きい第7回調査では下げ潮時に正、それ以外で負となり、潮位差が小さい第8回調査では全潮時で負となっている。

内訳として、まず水面勾配項に着目する。ここで、水面勾配 I_w は、次元非定常流計算より求めた調査地点の水深を水位に換算し、地点間の差分をその距離で除して求めた。一般に、河口部における I_w は、潮流の下げ潮・上げ潮に対応して正・負の値をとる。したがって、水面勾配項は下げ潮時には正值、上げ潮時には負値となり、特に水位変動の大きい時間帯

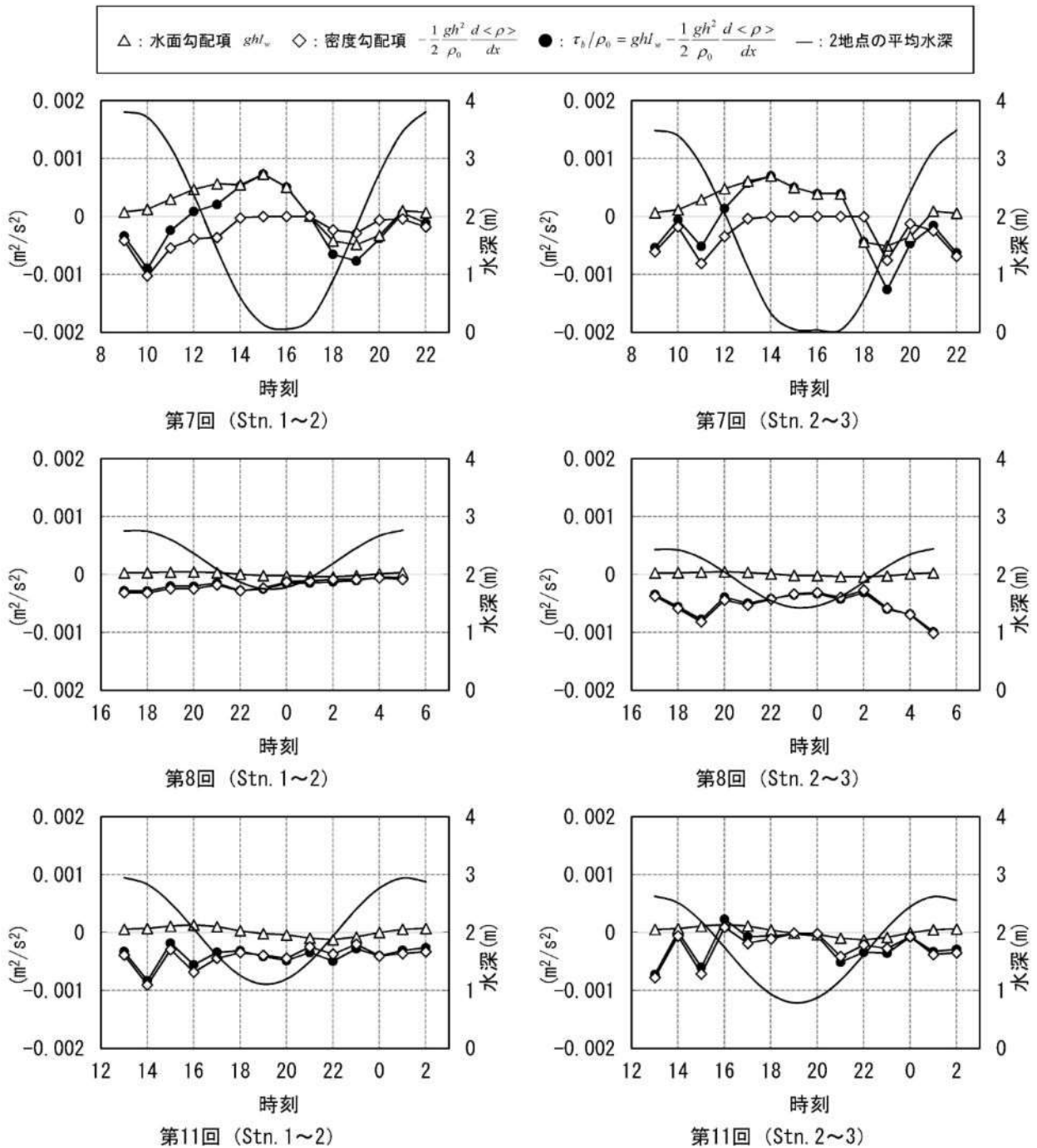


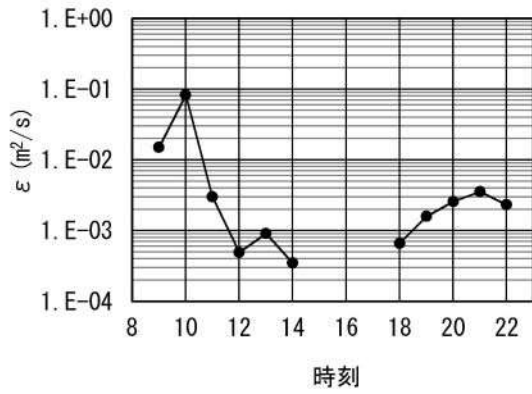
図-7 底面せん断応力及び各項の時間変動

で底面せん断応力に寄与している。第7回調査では、干潮時に塩水が Stn. 1 よりも下流に後退するため、その間は自流量のみの流れとなり、底面せん断応力は水面勾配項に支配される。潮位差の小さい第8回及び第11回調査では、干潮時でも塩水先端部が調査区間に存在するため、底面せん断応力は水面勾配項ではなく、密度勾配項に支配されている。

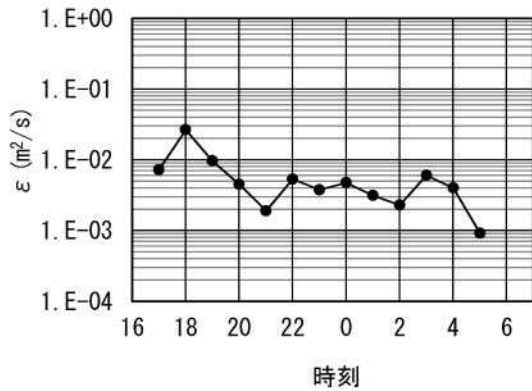
密度勾配項は、塩水の移動に伴って水平密度勾配 $\partial \langle \rho \rangle / \partial x$ が大きくなる上げ潮時及び下げ潮時に大きくなる。

第7回及び第11回、さらには第8回の Stn. 2~3

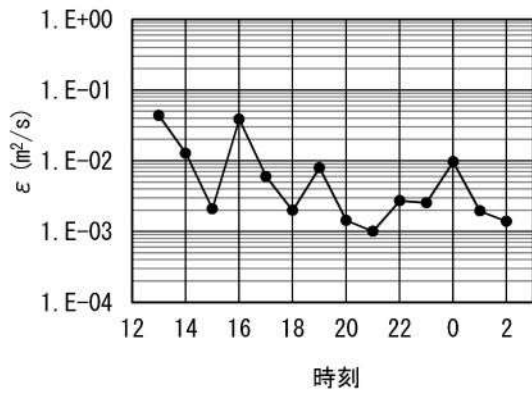
の評価結果をみると、下げ潮に入って3~4時間の間に密度勾配項の変動が見られる。これは、評価する両地点における河川水の厚さが影響している。評価する両地点において、河川水の厚さが異なるとき、両地点の塩分分布が有意に異なり、 $\partial \langle \rho \rangle / \partial x$ は大きくなる。逆に、 $\partial \langle \rho \rangle / \partial x$ が小さくなるのは、河川水が両地点において、同じような厚さで表層を流れている場合である。また、塩水先端部は等密度面の傾きが比較的大きく、その上流と下流とでは、河川水の厚さが異なる。したがって、塩水先端部が当該地点間を通過するときにも $\partial \langle \rho \rangle / \partial x$ は大きくな



a) 第7回(潮位380~18~412cm)



b) 第8回(潮位306~204~286cm)



c) 第11回(潮位305~140~324cm)

図-8 渦動粘性係数の時間変動 (Stn. 1)

る。一方、塩水先端部の通過がない第8回の Stn. 1~2 では密度勾配項に大きな変動は見られない。

上げ潮時には、塩水が河川水の下部に潜り込みながら遡上することで混合が強まり、等密度面の傾きが大きくなるため、 $\partial \langle \rho \rangle / \partial x$ が大きくなると考えられる。また、下げ潮時と同様に、塩水先端部の通過による $\partial \langle \rho \rangle / \partial x$ の増加も影響している。

(3) 渦動粘性係数の算出

乱流におけるせん断応力を求める式を底面に適用すると、式(7)のようになる。

$$\tau_b = \rho \varepsilon \left. \frac{du}{dy} \right|_{y=0} \quad (7)$$

ここで、 ρ は流体の密度、 ε は渦動粘性係数、 u は流速、 y は底面から鉛直上方の軸とする。

式(7)により、前節(2)で評価した底面せん断応力と底面における速度勾配から渦動粘性係数を算定することを試みた。まず、底面における速度勾配を求めるため、Stn. 1において測定した流速の鉛直分布を式(8)の三次曲線で近似した。これは、底面での境界条件を満足した上で、上層で下流側に凸、そして下層では上流側に凸という河川感潮部の流速分布の形状を表現でき、かつ取り扱いの簡便さも具備するものである¹⁹⁾。図-6にその一部を示したが、この近似式は実測値と概ね整合している。この近似式の導関数に $y=0$ を代入すると、式(9)が得られる。

$$u(y) = ay^3 + by^2 + cy \quad (8)$$

$$\left. \frac{du}{dy} \right|_{y=0} = c \quad (9)$$

この定数 c と τ_b/ρ_0 から求めた ε を図-8に示す。なお、第7回調査の15時から17時の間では、前述したように塩水が Stn. 1より下流に後退して水深が極端に小さくなり、十分な流速データが得られなかった。そのため、空値としている。

図-8をみると、 ε は概ね $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$ のオーダーで推移している。西ら²⁰⁾が極浅海域の潮間帯において、実測流速から渦粘性係数の時空間分布の推定を試みているが、その推定結果は $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$ のオーダーとなっている。このことから、 τ_b/ρ_0 の評価結果に大きな問題はないと考えられる。

5. 底面せん断応力、流速及び濁度の相互関係

(1) 底面せん断応力と流速の関係

式(6)により評価した底面せん断応力と流速の関係を図-9に示す。ここでは、Stn. 1において横断面測定を実施した第7回から第13回調査の結果を整理した。また、流速の測定値は、Stn. 1における横断面測定のうち、河道中央の測線の最深部の値を用いた。なお、測定上の都合から、Stn. 1~2の平均の底面せん断応力と Stn. 1の流速との関係を見ることにした。

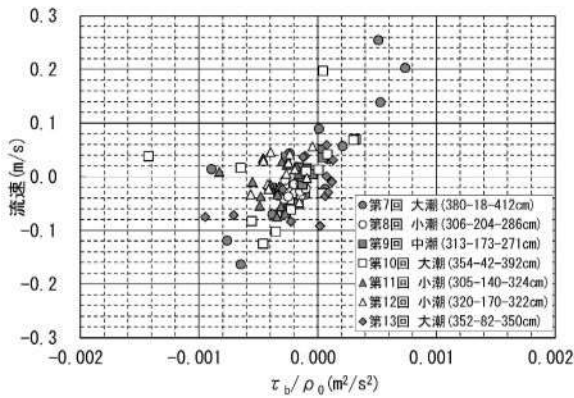


図-9 流速と底面せん断応力の関係

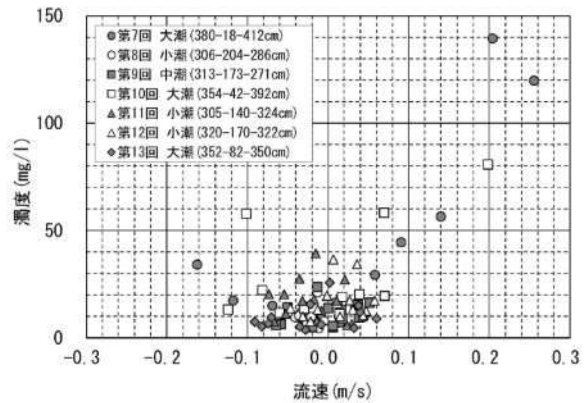


図-12 濁度と流速の関係

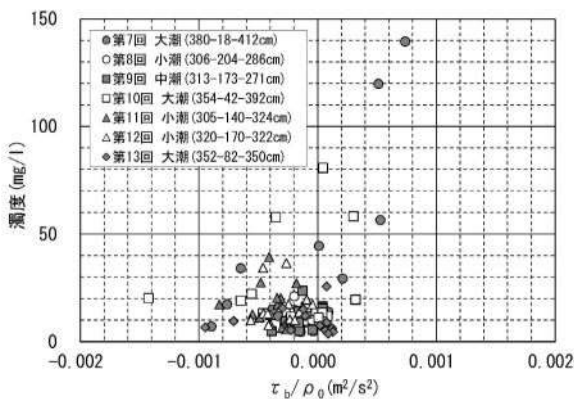


図-10 濁度と底面せん断応力の関係

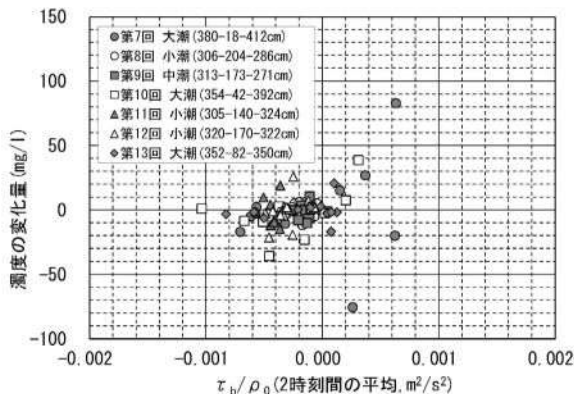


図-11 濁度の変化量と底面せん断応力の関係

図-9をみると、両者のいずれかが0に近い部分を除いて、全体の傾向として正の相関になっており、この評価方法の妥当性が示唆される。

(2) 底面せん断応力と濁度の関係

式(6)により評価した底面せん断応力と、底質の巻き上げの程度を反映する濁度に着目し、両者の関係を図-10に整理する。前節(1)と同様に、第7回から第13回調査の結果を整理し、濁度の測定値は、Stn. 1における横断面測定のうち、河道中央の測線の最深部の値を用いた。また、測定上の都合から、

Stn. 1~2の平均の底面せん断応力と Stn. 1の濁度との関係をみる。

大きな傾向として、底面せん断応力の絶対値が大きくなるに従い、濁度も大きくなっている。特に、底面せん断応力が正值をとるとき、その傾向は顕著である。つまり、下げ潮時により多くの巻き上げが生じているものと考えられる。また、既往の研究によると、底面せん断応力が $\tau_b/\rho_0=0.0002\text{m}^2/\text{s}^2$ ($\tau_b=0.2\text{N}/\text{m}^2$)を超えると巻き上げが起こることが多いとされているが^{14), 21)}、図-10からも類似の傾向がみられる。

なお、図ではプロットが左右対称でなく、底面せん断応力が同じ大きさでは $\tau_b/\rho_0>0$ の方が $\tau_b/\rho_0<0$ より大きな濁度を示している。これは、Stn. 1に至るまでの間に水塊がせん断応力を受けて流動した距離の違いの効果が出ていることが考えられる。

この効果を考慮すると、底面付近の濁度はその地点の同時刻の底面せん断応力だけで決まるものではなく、それまでの巻き上げによる影響を含んでいることが考えられる。そこで、連続する2時刻の濁度の差と底面せん断応力との関係を整理した。図-11は、前後する2時刻の濁度の差(後の時刻-前の時刻)と2時刻の底面せん断応力の平均値との関係を示したものである。全体の傾向として、原点を通りわずかに右上がりの分布となっている。下げ潮時には底質の巻き上げが継続的に発生し底面付近の濁度が上昇するのに対し、上げ潮時は塩水先端部の通過時に巻き上げられた浮遊粒子が次第に沈降し濁度が低下するものと考えられる。

(3) 流速と濁度の関係

流速と濁度との関係を図-12に整理する。流速及び濁度の測定値は、Stn. 1における横断面測定のうち、河道中央の測線の最深部の値を用いた。図-12

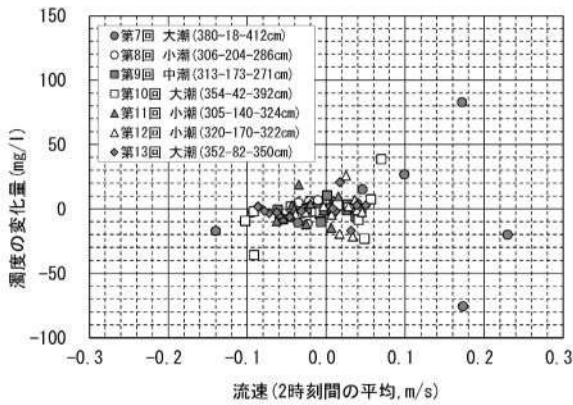


図-13 濁度の変化量と流速の関係

をみると、濁度と流速の関係は二次関数の分布に近く、最大流速、濁度の最大値ともに下流方向の流れで生じている。

次に、前後する2時刻の濁度の差（後の時刻-前の時刻）と2時刻の流速の平均値との関係を図-13に示す。図-13をみると、図-11と同様に右上がりの分布になっており、下げ潮時に濁度が増加する傾向にある。

6. まとめ

以上、山口県宇部市を流れる真締川感潮部における現地調査結果をもとに、塩分による密度変化を考慮した底面せん断応力の評価を試み、濁度と底面せん断応力及び流速との関係について述べた。本研究で得られた主要な結果を以下に示す。

- 1) 現地観測の結果、河川感潮部における潮汐に伴う塩化物イオン濃度の縦断面分布を図-2のように求めた。また、河口から260m上流のStn. 1における流速、塩分、及び濁度の横断分布を図-5のように求めた。
- 2) 塩分フラックスと濁度フラックスをそれぞれ式(1)と式(2)により評価し、Stn. 1におけるフラックスの一潮汐間の変動を下流向きと上流向きの成分に分けて、図-3及び図-4のように求めた。塩分フラックス、濁度フラックスとも満潮から2~3時間程度経過した時点で下流向きのフラックスが最大となった。また、第7回(大潮)の下げ潮時には全断面で下流向き、上げ潮時には全断面で上流向きとなったが、第8回(小潮)では常に下流向きと上流向きの成分が存在した。また、大潮時に顕著であるが、塩分フラックスに比べて濁度フラックスは下流向きのフラックスが長時間持続する傾向にある。

- 3) 密度変化を考慮した運動方程式の各項の中で、加速度項が一貫して相対的に小さいことを利用し、次元非定常流計算による水面形計算の結果に塩分分布の観測結果を加味して底面せん断応力の評価を行った。その結果、図-7に示すように、一定以上の水深を持つ時間帯では流下方向の密度勾配が支配的であること、この密度勾配が大きくなるのは等密度面の傾きが大きい時間帯であることが分かった。
- 4) Stn. 1の河道中央最深部の濁度と、式(6)によるStn. 1~2間の平均の底面せん断応力の関係を図-10に示した。両者は比較的良好な相関を示した。

謝辞：現地観測データを収集するにあたって、昼夜を問わず現地調査にご協力頂いた山口大学工学部羽田野研究室の卒業生、宇部フロンティア大学松本研究室内の卒業生に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鈴木伴征, 石川忠晴, 銭新, 工藤健太郎, 大作和弘: 利根川河口堰下流部における貧酸素水塊の発生と流動, 水環境学会誌, 第23巻, 第10号, pp. 624-637, 2000.
- 2) 長谷川清, 村上健: 感潮域における硫化水素の発生について, 第25回土木学会年次学術講演会講演集, 第2部, pp. 549-552, 1970.
- 3) 羽田野袈裟義: 河川感潮域のヘドロ及び土砂礫堆積用凹部, 特許公開 2007-277850, 日本国特許庁, 2007.
- 4) 河原長美, 名合宏之: 旭川感潮部および児島湾における表面水質と鉛直平均水質の特徴, 水質汚濁研究, Vol. 6, No. 3, pp. 135-144, 1983.
- 5) 河原長美, 名合宏之: 旭川感潮部における表面水質の統計的性質, 水質汚濁研究, Vol. 7, No. 4, pp. 232-238, 1984.
- 6) 二渡了, 楠田哲也, 大石京子: 強混合河川六角川感潮部における懸濁物質濃度の変動特性, 土木学会論文集, 第452号/II-20, pp. 71-79, 1992.
- 7) 福岡捷二, 嶋村春生, 鍛冶屋義信, 高橋 晃, 岡田和郎: 那珂川における塩水遡上の現地観測, 第32回水理講演会論文集, pp. 203-208, 1988.
- 8) 大橋行三, 戒能治: 肱川の感潮上限域における塩水遡上の現地観測, 水工学論文集, 第35巻, pp. 281-286, 1991.
- 9) 土屋十囀, 和泉清: 目黒川感潮部における水質変動と底泥堆積物の挙動, 第33回水理講演会論文集, pp. 637-642, 1989.
- 10) 土屋十囀, 和泉清: 都市河川の感潮域における水質と汚濁堆積物の挙動, 水工学論文集, 第35巻, pp.

- 573-578, 1991.
- 11) 松本治彦, 坂本淳一, 天野卓三, 隈崎博一, 羽田野袈裟義: 都市河川感潮部の水質と物質輸送の現地観測, 水工学論文集, 第42巻, pp. 799-804, 1998.
 - 12) 半谷高久, 小倉紀雄共著: 水質調査法(第3版), pp. 220-224, 丸善, 1995.
 - 13) 川西澄: 河川整備基金助成事業 河川感潮域における浮遊土砂動態と河岸干潟の地形と底質の変動に関する研究 報告書, 河川環境管理財団, 2005.
 - 14) 横山勝英: 河川整備基金助成事業 強混合型の河川汽水域における底泥の洪水時フラッシュと剪断強度変化に関する調査実験 報告書, 河川環境管理財団, 2006.
 - 15) 山本浩一, 横山勝英, 田中晋, 熊田康邦: 感潮域表層汚泥の再懸濁に関する現地実験, 海洋開発論文集, 第22巻, pp. 799-804, 2006.
 - 16) 椿東一郎: 水理学II, pp. 208-209, 森北出版, 1974.
 - 17) 坂本淳一, 松本治彦, 羽田野袈裟義, 天野卓三: 河川感潮部の底面せん断応力の評価に関する研究, 環境工学研究論文集, Vol. 45, pp. 51-58, 2008.
 - 18) 坂本淳一, 松本治彦, 羽田野袈裟義, 天野卓三, 光延清伸: 河川感潮部における底面せん断応力と濁度の関係について, 水工学論文集, 第55巻, pp. S1591-S1596, 2011.
 - 19) Hansen, D. V. and Rattray, M.: Gravitational circulation in straits and estuaries, *J. Marine Res.*, Vol. 23, No. 2, pp. 104-122, 1965.
 - 20) 西敬浩, 郷原慎一郎, Charles Lemckert, 外村隆臣, 山本浩一, 濱田孝治, 山田文彦: ラグランジュ・ブイを用いた潮間帯での渦動粘性係数・渦拡散係数の時空間分布推定, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 66, No. 1, pp. 1386-1390, 2010.
 - 21) 横山勝英, 山本浩一, 金子祐: 筑後川感潮河道における洪水時の底質浸食過程と有明海への土砂輸送現象, 土木学会論文集 B, Vol. 64, No. 1, pp. 71-72, 2008.
- (2014. 1. 21 受付)

DISTRIBUTION CHARACTERISTICS OF PHYSICAL QUANTITIES AND PROPERTY OF TURBIDITY IN ESTUARIES

Jun-ichi SAKAMOTO, Haruhiko MATSUMOTO, Kesayoshi HADANO, Koji ASAI and Takuzo AMANO

The formation of oxygen-poor water and the occurrence of hydrogen sulfide in estuary are caused by the sludge which contains a lot of organic substance. In order to examine measures against the water environment problems caused by the sludge, it is necessary to estimate bottom shear stress which exert an influence on the behavior of bottom material. Based on our study, the bottom shear stress was estimated by the method of using the change of water level obtained by one-dimensional unsteady flow analysis and the density distribution obtained by field observation. The estimated bottom shear stress was validated by comparison with coefficient of eddy viscosity. An increase in the bottom shear stress during flood tide is caused that the tip of saline wedge passes through a cross section.