

# 感潮域複断面河道の流動機構と 微細土砂動態の解明

## FLOW STRUCTURE AND SEDIMENT TRANSPORT IN TOJINGAWA RIVER ESTUARY

大本照憲<sup>1</sup>・平川隆一<sup>2</sup>

Terunori OHMOTO and Ryuichi HIRAKAWA

<sup>1</sup>正会員 博 熊本大学教授 大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市中央区黒髪二丁目39番1号)

<sup>2</sup>正会員 博(工) 前橋工科大学准教授 工学部社会環境工学科 (〒371-0816 前橋市上佐鳥町460番地1)

Observations of suspended sediment concentration, salinity and current were made in the Tojingawa River estuary, Northern Kumamoto prefecture. The estuarine reaches are approximately 11 km in length, and are formed a compound channel by clay and silt. Flow measurements were undertaken in a straight part to investigate the effect of stratification on secondary flow in well-mixed estuary. Flow velocity was measured using a ADCP. Salinity was also carried out using a water quality monitoring sensor.

The measured data shows that the position of maximum flow velocity in the low-water channel convected downward on flood tides. Suspended sediment concentration profiles were very well-mixed both vertically and laterally. Salinity profiles showed a cross-channel salinity gradient have a sharp inclination than flood tides. The salinity profiles produce an effective transverse flow velocity distribution for natural compound channels.

**Key Words :** Tidal River, flow structure, sediment transport, o compound channel flow

### 1. 序論

著者等<sup>1)</sup>は、干満差の大きい菊池川感潮域において砂河床から微細土砂で構成されたガタ土河床への底質の変化過程を解明するため、2つの周波数を有する超音波測深器を用いてガタ土堆積厚の把握を試みた。その結果、両岸の縦断方向の計測から、ガタ土の堆積は、水際部では湾曲部内岸側の砂州形成部および河道拡幅部で大きく、最大150cm程度であること、また直線部の代表的断面における横断方向の計測から、ガタ土の堆積厚は緩やかな傾斜面上の水際部で約50cm、低水路に相当する河道中央部においてはゼロに近いことが認められている。

しかし、菊池川下流域においては川幅が約300mで河岸が複雑な境界を有していることから、微細土砂の輸送に影響を及ぼす複雑な流れ場に対する詳細な検討は困難であった。なお、既往研究において干満差の大きい感潮域における流れの三次元構造と横断方向の土砂輸送との関係を実証的に検討した事例は極めて少ない。

河口域の流動に関してRiddら<sup>2)</sup>は、オーストラリア北部のノーマンビー川の河口域において、上げ潮時には図

-1のようにマングローブの葉が河道中央部に収束しながら上流方向へ流れ、下げ潮時には図-2のようにマングローブの葉が側岸部へ発散しながら流下する現象を、水平方向に生じる塩水の密度差が河道に対をなす密度循環流の発生の支配的要因となることを指摘している。その中で塩分濃度および濁度の測定では、水面付近と底面付近だけの横断方向の移動観測によるものだけであり、横断面の流速分布ではある数点の定点観測によるため十分な河道内部の流況の把握はできていない。

水平対流や鉛直循環流に関しては、大本ら<sup>3)</sup>は熊本市南東部に位置する江津湖のうち、安定した密度成層を形成した下江津湖において、湖水より水温の低い河川流が流入したことにより水平温度勾配が生じ、その結果として水平対流が発生し、鉛直循環流を形成していることを、超音波測定器を用いた計測によってとらえることに成功した。

一方、開水路流れにおいて横断方向の流動機構に関してはいくつかの研究<sup>4-7)</sup>が行われている。例えば大本ら<sup>8)</sup>は、二次流が生じる最も基本的な流れといわれるアスペクト比が2の矩形開水路流れへDNSを適用し、固体および水面隅角部という境界条件の種類、ならびに側壁の傾

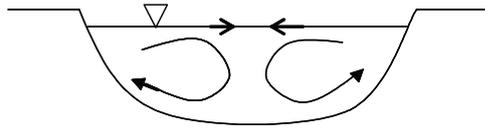


図-1 上げ潮時の横断面内の収束流.

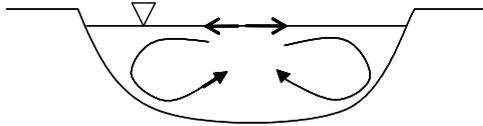


図-2 下げ潮時の横断面内の発散流.

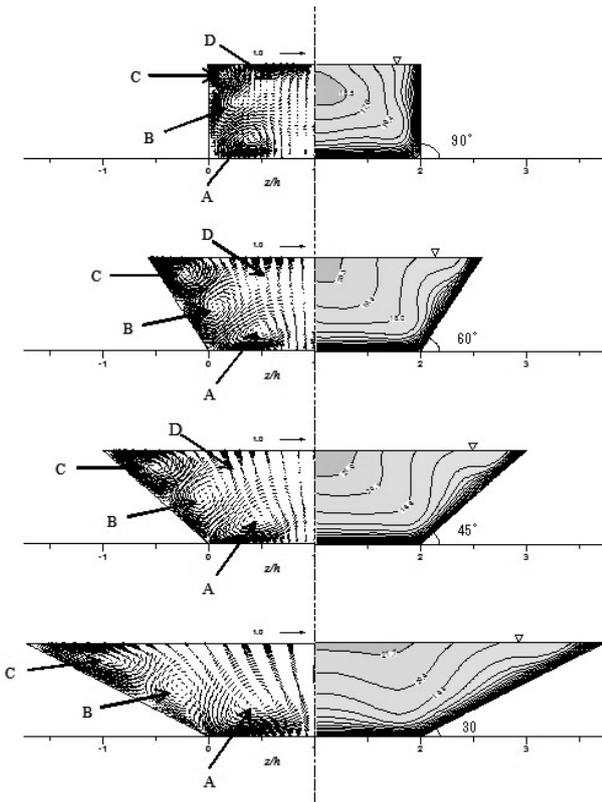


図-3 角側壁傾斜角の違いによる二次流ベクトルと主流速分布<sup>9)</sup>.

斜角を変えて二次流構造の解明を行うとともに、渦構造の抽出法を用いて管状旋回渦を直接観察することで、開水路隅角部の三次元乱流構造について考察した。そこで得られた側壁の勾配と二次流構造の関係を図-3に示す。側壁傾斜角を矩形断面に相当する $90^\circ$  から $60^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $30^\circ$  に変化させた。右半分は主流速 $U$ の分布を、左半分に二次流ベクトルを示す。歪みと二次流ベクトルの方向がよく一致している。壁面沿いにおいては二次流が壁面に向かう部分では主流速コンターも壁面に向けて歪み、逆に二次流が壁面から離れる部分では主流速コンターも壁面から凸型に歪んでいる。開水路の中心領域においては、傾斜角度が緩くなるに従い、水路中央部で卓越する二次流のうちA渦(側壁セル)が発達すると共に、D渦(側壁セルを構成するうち水面側のセル)の減衰が認められる。この結果、矩形断面では特徴的な現象であった水面



図-4 調査対象区域.

下に降下していた最大流速点が逆に水面へ上昇すると共に、最も傾斜角の緩い $30^\circ$  のケースでは、その最大流速点がさらに側壁寄りへスライドする水平移動現象が捉えられている。このような隅角部において一対の二次流が生じるといふ基本構造は、固体隅角部や水面隅角部にとどまらず、側壁が傾斜した台形断面においても普遍であることが明らかにされている。

そこで本研究では、菊池川のかつての本川であった唐人川河道の直線部に、微細土砂の堆積によって低水路側壁傾斜角が緩やかな複断面形状が形成されていることを見出し、横断方向へのガタ土の輸送機構を解明することを目的とした。

## 2. 研究対象地点の概要及び計測方法

### (1) 調査対象地点

研究対象である唐人川は、熊本県の三ノ岳に源を発し有明海に注ぐ、流域面積約 $16\text{km}^2$ 、流路延長約 $11\text{km}$ の二級河川である。調査地点は河口から約 $3.9\text{km}$ 付近で、図-4に示すように直線状の兩岸堤防と低水路側壁が緩やかな傾斜面の台形断面から成る複断面河道であり、幅が $46\text{m}$ 、低水路幅が約 $20\text{m}$ である。

### (2) 計測方法

2010年11月20日の日中の下げ潮と上げ潮の最強流時に、超音波流速分布計(RDI StreamPro ADCP)を測線に平行移動して鉛直横断面内の流速、流向、反射強度を得た。断面内の土砂濃度の推定<sup>9)</sup>は、濁度計(WQC-20AQ)とADCPの同時定点観測を行い、横山ら<sup>10)</sup>の変換方法を用いて反射強度から濁度への校正式を求めて行った。2010年12月3日の最強流時には、多項目水質計(YSI 600QS)を用いて水温、塩分、DO、pHの横断および鉛直プロファイルを取得した。観測日の潮位波形を図-5に示す。大潮で下げ潮と上げ潮の潮位が対称に近い波形である。また河口の水門は、計測時には常に解放されていた。

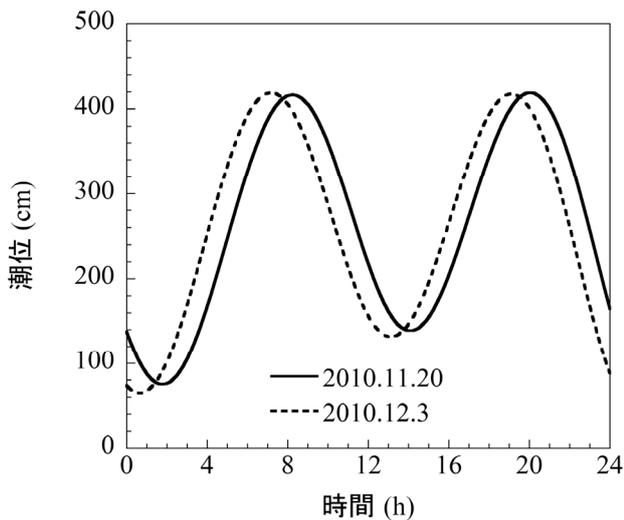


図-5 調査日の潮位波形.

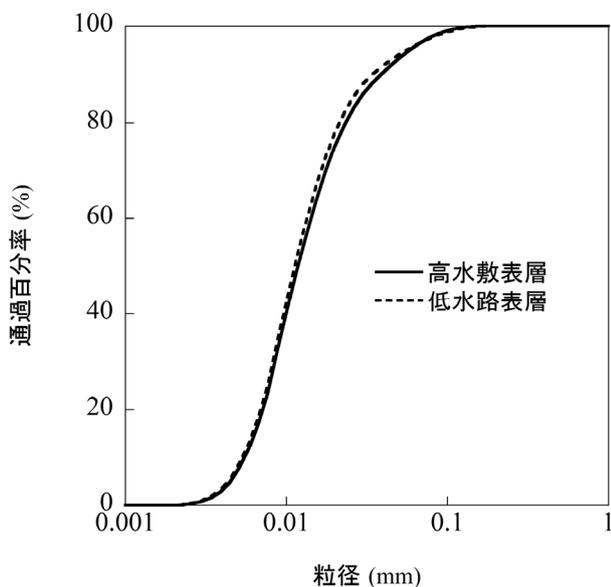


図-6 粒径加積曲線.

### 3. 計測結果及び考察

#### (1) 河床材料

観測対象地の高水敷および低水路表層の河床材料を採取し、粒径を調べた。その結果を図-6に示す。どちらの底質も中央粒径が約0.05mmであり、シルトの支配率が高くなっていた。このことから観測対象地においては、平水時においても菊池川<sup>1)</sup>と同様な潮汐による懸濁土砂の輸送が考えられ、土砂濃度が高い流れ場である可能性が高いことがわかる。

#### (2) 流量及び断面通過土砂量

横断面内の流量と通過土砂量の時系列変化を図-7、8に示す。流量はADCPで得られたものを用い、反射強度から推定した土砂濃度を観測時の断面積で積分し土砂量と

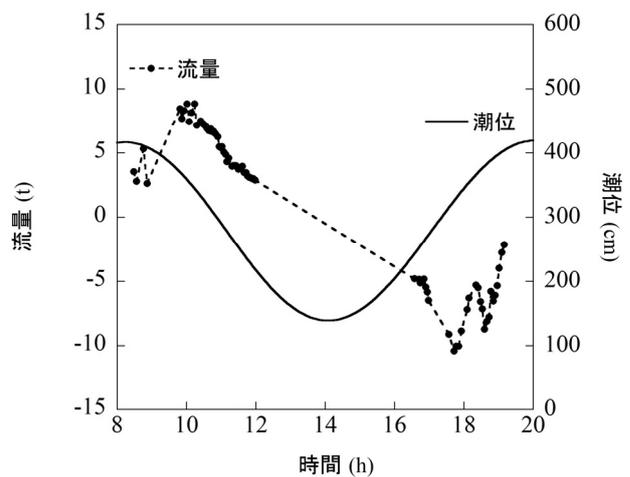


図-7 横断面内通過流量と河口潮位の時系列変化.

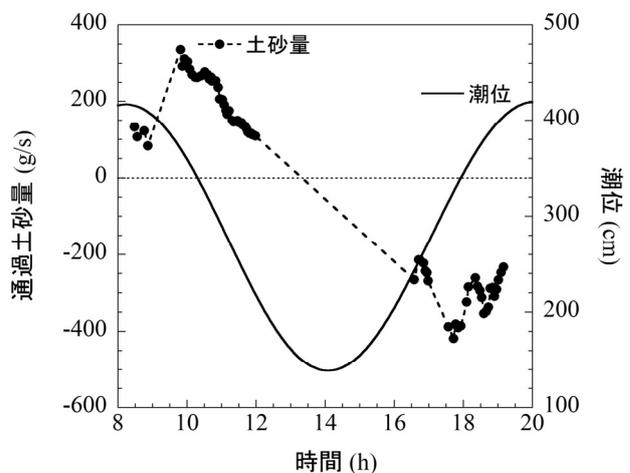


図-8 横断面内通過土砂量と河口潮位の時系列変化.

した。流量は、上げ潮時の最大は約10.2m<sup>3</sup>/sであるのに対して、下げ潮時の最大は約8.8m<sup>3</sup>/sである。上げ潮時には波状形状を示しているが、これは低水路から高水敷上に水が載った直後は低水路幅の範囲でしか計測が行えず、かつ低水路内の流速が低下したためであると考えられる。横断面通過土砂量は流量変化の影響を強く受けた変化特性となっている。最大通過土砂量は上げ潮時の400g/sに対して下げ潮時は33g/sであり、下げ潮時よりも上げ潮時のほうが大きい。本研究では潮位波形が下げ潮時と上げ潮時で対称となる日を観測日に選んだが、土砂量については上げ潮時と下げ潮時で非対称であった。

#### (3) 最強流時の土砂動態及び流況特性

図-9は、下げ潮時の土砂濃度の横断面内分布である。横断方向の変化は小さいが低水路肩付近の高水敷上で大きくなっている。鉛直方向へは水面付近で高く底面付近で逆に小さくなっている。これらのことから、低水路よりも水深が浅い高水敷上の土砂が巻き上げられて水面に浮遊していることが考えられる。すなわち、横断面内においては横断方向の土砂輸送が支配的であることがわか

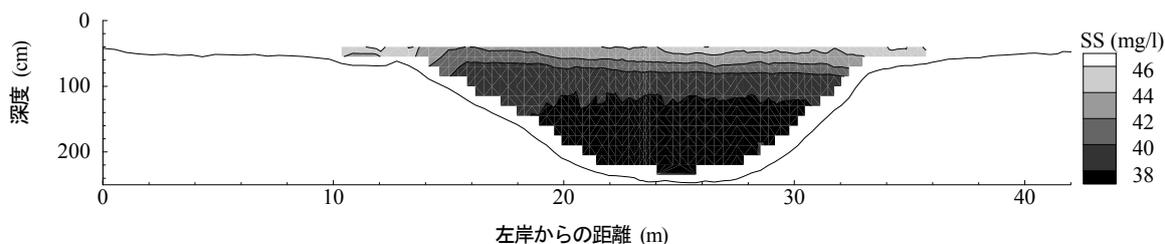


図-9 下げ潮最強流時における土砂濃度の横断面内分布.

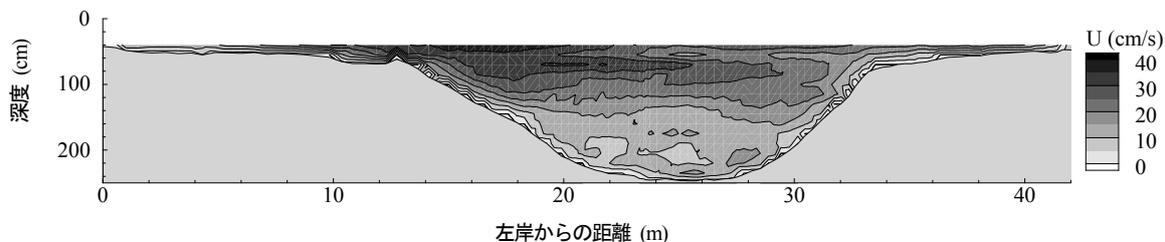


図-10 下げ潮最強流時における横断面内の主流速分布.

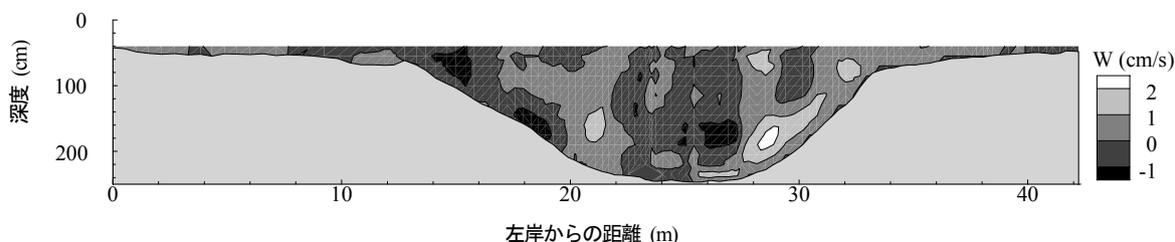


図-11 下げ潮最強流時における横断面内の鉛直方向流速分布.

る。

下げ潮時の主流速 $U$ と鉛直方向流速 $W$ の横断面内分布をそれぞれ図-10, 11に示す。水位は、本調査で対象とした一潮汐間では満潮時の約6割であり、高水敷上に50cm程度の水深がある状態となっている。低水路の側壁傾斜角は、右岸側が約 $20^\circ$ で左岸側が約 $15^\circ$ である。主流速は水面近傍で速く、最大流速位置が左岸側へとスライドする水平移動現象が確認できる。ただし目視では、表面流が右岸から左岸に寄ることは認識できなかった。また右岸低水路肩付近からは、低速域が水路中央側へと延びていることがわかる。このことから、低速流体が底面から上昇し、高水敷先端には斜昇流が生じていることが示唆される。すなわち、低水路床右岸側の底質は水面付近へと巻き上げられているといえる。鉛直方向流速は全般的に小さく、主流速の最大流速点において下降流が生じているが、その降下現象は起きていないことが示されている。また低水路右岸近傍では上昇流が発生していることから、この地点で二次流セルが形成されていることが考えられる。富永ら<sup>11)</sup>は、台形断面開水路流の三次元構造に関する実験において一般的に壁面傾斜角が $90^\circ$ より小さくなっていくと台形側壁渦が発生し、水面縦渦が減衰して弱くなり、底面縦渦が発達して水深規模の渦となり、幅が広い場合には中央領域に並列らせん流が誘起さ

れやすいと指摘している。このような台形側壁渦の存在は側岸の微細土砂の巻き上げを起す可能性があると考えられるが、本調査地点では左岸側の斜面の低い位置と右岸側の斜面の全体で上昇流が生じているため、右岸側の浸食が左岸側斜面に比べて進みやすく勾配が急になっていると考えられる。

図-12は、上げ潮時の土砂濃度の横断面内分布である。横断方向へは高水敷上で最大、低水路中央部で最小となり、鉛直方向では水面付近で高く底面付近で逆に小さくなっており、下げ潮時と同様に横断方向の土砂輸送が支配的であると考えられる。しかし下げ潮時に比べて横断方向の変化が見られ、低水路域では側壁斜面上部に高濃度域が存在している。

上げ潮最強流時の主流速 $U$ と鉛直方向流速 $W$ の横断面内分布をそれぞれ図-13, 14に示す。主流速の最大が約40cm/sで、最大流速点の降下現象が現れている。このことから、低水路中央付近では下降流の存在が示唆される。そこで鉛直成分に着目すると、流速は主流速の約3%の大きさで、低水路中心部で下降流になっており、このことから最大流速点の降下現象が起きていることがいえる。また図中に矢印で示すような二次流が発生していると考えられ、それによって低水路肩付近の上昇流の箇所でも主流速のコンター図が歪んでおり流速が遅くなってい

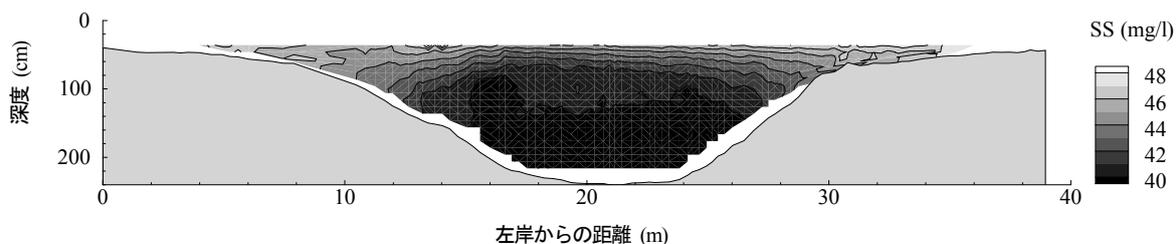


図-12 上げ潮最強流時における土砂濃度の横断面内分布.

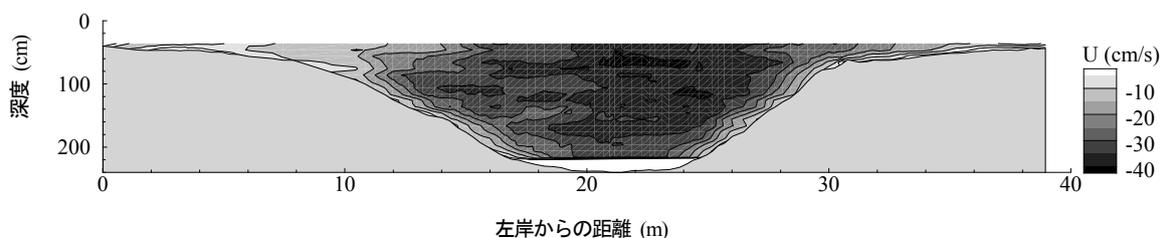


図-13 上げ潮最強流時における横断面内の主流速分布.

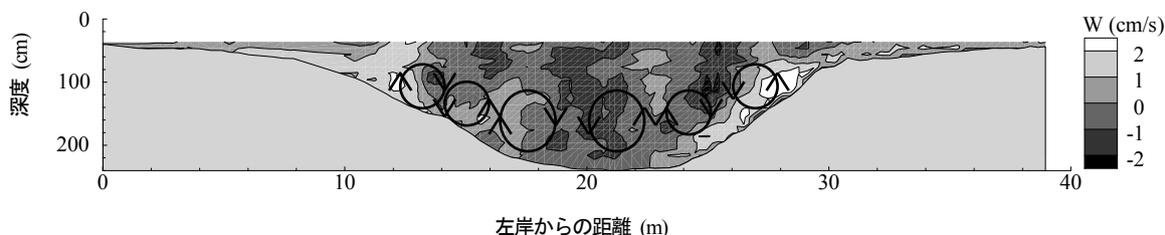


図-14 上げ潮最強流時における横断面内の鉛直方向流速分布.

ることがわかる。このような二次流セルの影響を受け上げ潮最強流時の主流速は横断方向に速度勾配が顕著に表れていると考えられる。

#### (4) 塩分濃度

下げ潮最強流時における塩分濃度の横断分布を図-15に示す。低水路中央部で低くそこから高水敷にかけて高くなっている。これは表層から半水深にかけて淡水の割合が多く、底層付近は海水の割合が多いためであり、下げ潮最強流時において安定的な密度成層が形成されていると考えられる。またこのことが図-10に示したように主流速を横断方向に一樣にし、鉛直方向の変化を大きくしたといえる。横断方向の濃度差は、高水敷水深の半分の深さで最も大きく約8.5pptであり、高水敷河床高では最も小さく約3pptである。これらのことから、満潮時に感潮域に蓄えられた海水は、下げ潮時にまず低水路上部から流下し、その後高水敷上や低水路河床付近を流下することが考えられる。

上げ潮最強流時における塩分濃度の横断分布を図-16に示す。全般的に下げ潮時とは逆に低水路位置で若干高くなり、高水敷に向かって相対的に低くなる傾向を示している。横断方向の濃度差は、低水路部の深い箇所が一番大きく約1pptであり、水面付近では約0.4pptである。

鉛直方向には下げ潮時に比べて緩やかに変化しており、河床に近づくにつれて少しずつ大きくなっている。これらのことから図-13の主流速分布は鉛直方向に一様化したと考えられる。

## 4. 結論

本研究は河川感潮域の最強流時の流れと土砂動態を明らかにすることを目的として、唐人川の直線複断面河道を対象に観測を行った。本研究で得られた結論は以下の通りである。

- (1) 上げ潮時の鉛直方向流速は河道中心部で下降流になっており、この下降流によって最大流速点の降下現象が起きていることが明らかになった。また河道中央部および水際部において、二次流セルが主流速や土砂濃度に影響していることが示された。
- (2) 下げ潮時の鉛直方向流速は小さく、このため主流速の最大流速点の降下現象は現れていなかった。また土砂濃度の逆転現象が起きていることから、上流から運ばれる微細土砂は浮遊土として流下することが示唆された。
- (3) 塩分濃度の横断方向変化によって水平対流が発生

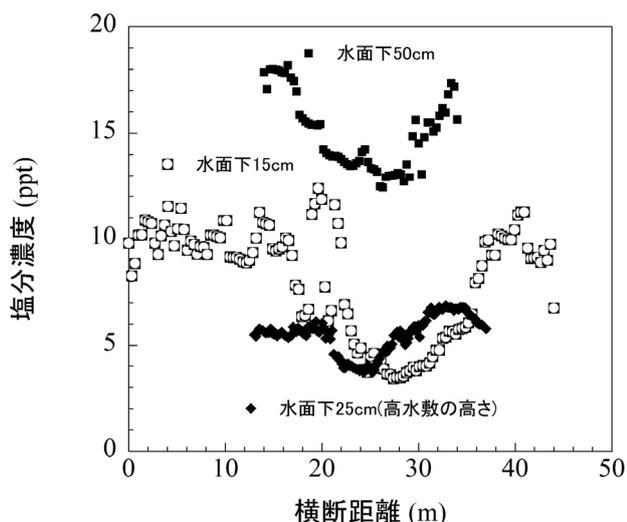


図-15 下げ潮最強流時における塩分濃度の横断分布.

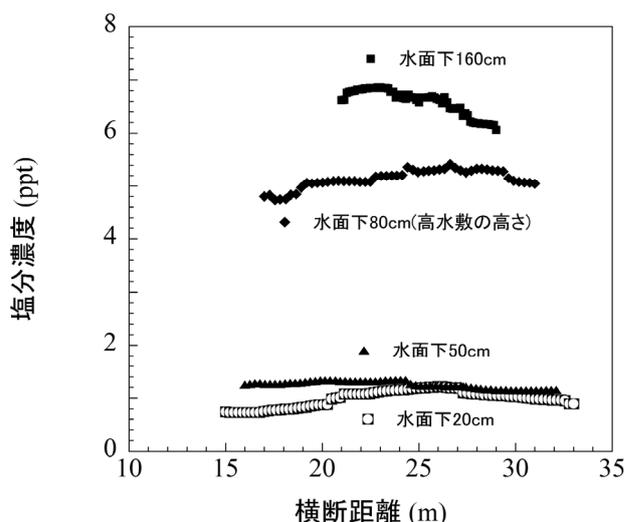


図-16 上げ潮最強流時における塩分濃度の横断分布.

することが示唆され、これによっておこる二次流が土砂濃度および主流速の空間分布に影響をおよぼしていることが示唆された。

#### 参考文献

- 1) 大本照憲, 平川隆一, 澤田誠一, 長岡一成, 森下和志, 山崎祥吾: 菊池川河口域における藩政時代の石積水制が流れおよび土砂動態に与える影響, 水工学論文集, 第53巻, pp.805-810, 2009.
- 2) P. V. Ridd, T. Stieglitz and P. Larcombe : Density-driven Secondary Circulation in a Tropical Mangrove Estuary, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 47, pp.621-632, 1998.
- 3) 大本照憲, 矢北孝一, 福島博文: 湧水を伴う湖沼の水平対流と水質特性, 水工学論文集, 第45巻, pp.1183-1188, 2001.
- 4) Nezu, I and Rodi, W. : Open channel flow measurements with a Laser Doppler anemometer, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.112, No.5, pp.335-355, 1986.
- 5) Tominaga, A and Nezu, I : Turbulent structure in compound open-channel flows, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.117, No1, pp.21-41, 1991.
- 6) Shiono, K and Muto, Y : Complex flow mechanisms in compound meandering channels with overbank flow, J. Fluid Mech.,

Vol.376, pp.221-261, 1998.

- 7) Taisuke ISHIGAKI, Koji SHIONO, Tong FENG and Renato N.SIQUEIRA : EFFECT OF STABLE DENSITY STRATIFICATION ON SECONDARY FLOW IN COMPOUND CHANNEL, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, VOL.45, pp.535-540, 2001.
- 8) 大本照憲, 林俊一郎, 本田逸郎: 直接数値シミュレーションによる開水路隅角部の三次元構造の解明, 土木学会論文集, No.810/II-74, pp.59-78, 2006.
- 9) 川西登, 小谷英史, 余越正一郎: 超音波ドップラー流速計を用いた感潮域の流動と懸濁物質濃度の現地観測, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.1081-1090, 1996.
- 10) 横山勝英, 藤田光一: 多摩川感潮域の土砂動態に関する研究, 水工学論文集, 第45巻, pp.937-942, 2001.
- 11) 富永晃宏, 江崎一博, 禰津家久: 台形断面開水路の三次元乱流構造に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第381巻, II-7号, pp.55-63, 1987.

(2013. 4. 4受付)