菊池川河口沿岸域における砂州上の流れ および潟土動態について MACROTIDAL FLOW AND SEDIMENT TRANSPORT OVER SAND BAR

IN THE KIKUCHI RIVER ESTUARY

大本照憲1・平川隆一2・澤田誠一³・多久義宣⁴ Terunori OHMOTO, Ryuichi HIRAKAWA, Seiichi SAWADA, and Yoshinobu TAKU

¹正会員 工博 熊本大学教授 大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本県熊本市黒髪二丁目39番1号)
 ²正会員 博(工) 佐賀大学助教 理工学部都市工学科理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)
 ³正会員 熊本県土木部港湾課 (〒862-0912 熊本県熊本市水前寺六丁目18番1号)
 ⁴学生会員 熊本大学 大学院自然科学研究科博士前期課程 (〒860-8555 熊本県熊本市黒髪二丁目39番1号)

In the Kikuchi River, which is situated in the northern part of Kumamoto prefecture, eutrophicated sediment deposition in the estuary has become a serious social problem in recent years. Therefore, Ministry of Land, Infrastructure and Transport has developed the renaturalization project of sand beach, which is located downstream of spur dike constructed in Edo period in estuaries of Kikuchi river. In this study, in order to grasp effects of spur dike on tidal currents, sediment transport, the flow velocity was measured over the sand bar by Stream-pro Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) and radio-controlled model boat equipped with Workhorse ADCP in the period of spring tide. The results showed that spur dike generated strong horizontal circulation currents and accelerated sediment deposition over the sand bar.

Key Words : Kikuchi river, Spur dike, Tidal currents, Sediment transport, River estuary, Stream-pro ADCP, Field measurement

1. はじめに

近年、菊池川の河口・沿岸域では上流から運ばれる家 庭雑排水、畜産・水田等農業廃水に含まれる栄養塩が微 細土砂に付着し、凝集・沈殿、堆積、流動するために水 質に加えて底質も汚染されやすい環境となっている. さらに、治水安全度を高めるためにほぼ1960年から1980年 の約20年間に実施された河砂利採取および河道改修に よって河道全般に亘って河床が著しく低下した.特に、 河川感潮域においては消失した砂州も多く、この間に平 均河床高は約2m低下したことから、有明海特有の強い 潮流が菊池川に流入し易い環境が整い、沿岸域の微細土 砂で富栄養化した潟土が河川感潮域の河岸に堆積してい ることが認められる.

このため、河口域では砂質性の河床が潟土で覆われ、 ヤマトシジミやテナガエビの漁獲量が激減するなど、生物の生育・生息環境が著しく劣化したことが懸念されている.この状況を改善するために、国土交通省により、 平成18年度から22年度までの5カ年間の計画で菊池川下 流域自然再生事業が実施されている.

河川感潮域におけるこれまでの研究^{1), 2), 3}では,対象河 川の干満差は小さく,有明海沿岸部のような干満差の大 きい河川感潮域^{4, 5, 6}での水際近傍における砂河床への 潟土の堆積機構,浅水流の流動機構 に関しては十分な 検討が成されていない.本研究では前報⁶を発展させ, 干満差の大きい菊池川河口域において平水時の潟土の輸 送と堆積メカニズムの解明を目的とし,特に砂州上の潟 土の動態を砂州境界部を含めた土砂輸送にまで拡大して 検討した.

2. 現地観測

(1) 研究対象地の概要

調査対象地は、図-1に示す河口から2.4km上流付近の 石積水制がある左岸に設定した. 観測実施日は平成19年 9月13日(大潮)および平成20年9月2日(中潮)で行い,満潮 前後約1時間の上げ潮及び下げ潮最強流を計測した.図



-2はその水位波形を示す.なお平成20年の観測は、図-2 の潮位および波形が平成19年9月13日の大潮と酷似して おり、前日の大潮の潮位とさほどさほど変化がないため 中潮で観測した.計測線は、平成19年では水際近傍の覆 砂上の流れを観測するため、水際から河道中央に向けて 横断方向25mの長さ(図-1の赤と緑の矢印)に設定し、L4 とL5の間に位置する透過性の木杭水制の影響を考慮した L10を追加した.なお、後述のStream Pro ADCPではL1、 L2における計測が困難なことから計測は行っていないた め、計測線はL3~L9およびL10の8計測線である.平成 20年の計測線では、より広域的な範囲での流れを捉える ため横断方向80mの長さ(図-1の青の矢印)に設定した計9 測線とした.また、平成19年の観測においては同年7月 に起こった出水により捨石が一部破壊されているが、平 成19年12月に修復された.

(2) 観測方法

流れの測定は、平成19年9月の観測では各測線にロー プを張り、Stream Pro ADCP(2MHz)を測線に対し平行に なるように移動させて曳航観測した.また、平成20年9 月の観測ではRDI社製のWorkhorse ADCP(1200 k Hz)を用 いて観測を行った.前述のStream Pro ADCPは最大測定 水深が2mであり、最大水深が5m以上の平成20年におけ る観測対象地には適していないため、ラジコンボートに 搭載したWorkhorse ADCPを用いた.なお、ラジコン ボートを用いたADCP移動観測は操作性、機能性に優れ ていることから、既往研究によって計測性能の評価^{7).8}、

図-3 潟土の堆積厚分布

観測⁹⁾が行われている.各計測線における横断面内の土 砂濃度についてはADCPから流速と同時に得られる水中 散乱体からの反射強度を利用して懸濁粒子の濃度が推定 できる^{10,11)}.本研究では,水質チェッカー(WQC-20A) とADCPを同一地点で同時観測し,ADCPの超音波反射 強度から濁度への校正式を算出した.また,潟土の堆積 厚および粒度分布についての計測にはハンディ・ジオス ライサーを用い,各測線上において河岸から流心方向に 35mの区間を設定し,2.5m間隔で計測した.

3. 砂州上における潟土堆積厚

図-3は、養浜事業が平成19年3月に実施されその6ヶ月 経過後の平成19年9月と20ヶ月経過後の平成20年11月に おける砂州上の潟土堆積厚の平面分布を示したものであ る.河口から1.8km~2.4km区間の左岸水際部において養 浜事業が実施されたが、砂質性の砂州上には、図-3a)に 示されるように、養浜事業から約6ヶ月経過後にほぼ全 域に亘って潟土が堆積し、潟土の堆積厚は水際で大きく、 流心方向に漸減する傾向を示した.また、x=20mおよび 50mにおいては、砂州上に透過型の木杭上向き水制が設 置されており、x=50mにおける木杭水制根付部上流側で は潟土の堆積厚さは極大値を示し、約40cm程度だった.

約20ヶ月経過後の平成20年11月に計測した図-3b)では、 L1からL7の水際から横断方向距離25mの区間では一様 に30cm程度の堆積傾向を示し、平成19年および平成20



まの砂堝 トでけ 润 きの流れがけ

年の何れにおいても石積水制直下流域の砂州上では, 潟 土は堆積する傾向がある.特に平成20年11月の計測では x=90mにおける石積水制直下流域において潟土の堆積 厚さは極大値約50cmを示し,平成19年9月の潟土の堆積 傾向とは異なり,木杭水制根付部上流側の顕著な堆積が 見られなかった.この要因として,平成19年9月観測時 は木杭水制の河床からの突出高さは50cm程度であった が,潟土が30cm以上堆積することで木杭水制周辺が潟 土により覆われ,河床からの突出高さが大幅に低下した こと,および平成19年7月の出水により石積水制先端の 捨石が流出したが,平成19年9月に捨石の修復されたこ とにより流れ場の変化したことが示唆される.

4. 砂州上における平面流況

ADCPによる横断面流況の計測結果をもとに水深方向 に平均化された流速ベクトルを図-4および図-5に示す. 平成19年9月の観測においては、下げ潮時の流速は上げ 潮に比べて遅かったため、傾向を分かりやすくするため にベクトルの大きさを2倍にしている.

図-4a)より、大潮では上げ潮極大流速は計測線L3~L9 で約35cm/sとなっており、計測線L10ではL5に較べて流 速が急減し、その極大値も27cm/sとなっている.このこ とから上向きの木杭水制によって流速を低減させ潟土を 水制根付部に堆積させている.また全ての計測線におい 水際部で流速が遅く、流心部に近づくにつれ流速が早く なり、横断方向に類似した流速分布を形成している.L6 ~L9のy=60m~70m付近においては、横断方向に流心向 きの流れが生じており、木杭水制の影響を受けにくいL6, L9においても同様の傾向を示すことから、木杭水制によ る流向制御効果では無く、捨石欠損部の影響によること が考えられる.

図-4b)では下げ潮時にも関わらず全般的に上流向きの 流れを取り、その上流向きの流速極大値は約18cm/sで あった.なお捨石欠損部の直下流では、局所的に下流向 きの流速極大流速はL3で35cm/s、L4で20cm/s、L10で 18cm/sを示していることが認められる.計測線L3、L4お よびL10ではy=60m~70mで下向きの大きな流速を示し たのは、平成19年7月の出水によって捨石が流出した部 分から噴流状の短絡流が発生したためであり、下げ潮時 に砂州上で全体的に逆流が生じたのはこの強い短絡流に 対する補償流により形成されたものと考えられる.砂州 上における潟土堆積厚の水平分布は、下げ潮時にも関わ らず砂州上に上流向きの流れが生じたことが強く作用し ていると考えられ、この原因として石積水制、捨石欠損 が挙げられる.

図-5a)より平成20年9月大潮時の上げ潮における砂州 近傍上の水深平均流速は全般的に水際から離れるに従っ て増大する傾向を示し、L4~L9では砂州境界付近で若 干大きな流速を示し、その極大流速は全ての計測線にお いて40cm/s前後となっている.平成19年9月の上げ潮の 水深平均流速に較べて横断方向変化は緩やかであり、木 杭水制による流速低減効果も顕著に効いていないことが 分かる.なお、L4、L5の河岸近傍では流心部の流速に 較べて相対的に低いものの一部逆流速が生じている.

一方,図-5b)の下げ潮における流れは、上げ潮時と同様に水際から離れるに従って増大する傾向を示し、砂州



図-7 L8における土砂濃度の横断分布(平成19年)

境界の水際寄りで若干大きな流速を示し、v=60m~80m おいて流速は極大値を示し、その大きさはL1~L4で 50cm/s前後, L5~L10では40cm/s前後である. また, L5 ~L9のy=50~60mにかけて流速ベクトルの向きが左岸 方向に傾いており、L7およびL8では微小ではあるが逆 流速が発生している. 平成19年9月の観測結果と較べれ ば、下げ潮時における砂州上の流れは大幅に異なり、顕 著な逆流域は形成されていない. 前報¹³⁾では、石積水制 により逆流域が形成されたものと判断したが、その後に 石積水制に大きな変化は無いことから、現在考えられる 要因としては、捨石の修復および砂州形状の変化が挙げ られる. 平成19年7月出水によって形成された捨石欠損 部からの噴流状の短絡流により水平循環流が形成された 可能性が高い. また, 石積水制背後のL1およびL2の水 際周辺部においては流速がほぼゼロに近く、死水域を形 成しているのが目視できた.

5. 主流部と砂州の土砂交換機構

(1) 土砂濃度の横断面分布

超音波流速計による反射強度と濁度との相関から,土 砂濃度の横断面分布を図-6~8示す.ここでは,土砂濃 度は濁度に等しいと仮定している¹².計測線は潟土の堆 積が顕著であったL3~L5を選出した.図中のz軸は水面 からの距離(m)を表している.また底層の白い箇所は反 射強度の欠損部である.

図-6から全般的な傾向について大潮時の上げ潮最強流 における土砂濃度は、砂州上および水際から20m-25m離 れた領域では横断方向に変化が小さく鉛直方向の変化が 卓越すること、また、水際から12m-20m離れた砂州境界 近傍においては横断方向の変化を無視出来ないことが分 かる.

一方,下げ潮最強流における土砂濃度は,全般的に横 断方向に変化が小さく鉛直方向の変化が卓越し,上げ潮 時の様に砂州境界近傍において横断方向の変化が顕著で は無い.

菊池川の平成15年の定点観測[®]では、河口から2.2km付 近の澪筋部である河岸近傍では、土砂濃度は大潮の上げ 潮最強流時において極大値350mg/L、下げ潮最強流時に おいては50mg/Lであり、上げ潮と下げ潮で大きく異 なっていた.このため、砂州上の土砂濃度は、澪筋部に 較べて上げ潮時で小さく下げ潮時で大きく、上げ潮時と 下げ潮時の濃度差は小さい.

図-7の計測線L8は、潟土の堆積厚が流下方向に較べて 横断方向に卓越し、砂州上の平均的土砂動態を表すもの と考え選んだ.上げ潮時の土砂濃度は、全般的にはL3~ L5における土砂濃度と同様な傾向を示すが、水際近傍で は水面付近で大きくなることが注目される.一方、下げ 潮時の土砂濃度は、全般的にはL3~L5に較べて水際近 傍で若干大きくなる.



図-8 土砂濃度の横断面内分布(平成20年9月)

図-8は、平成20年9月における砂州を含めた土砂濃度 の広域観測結果を示している.図より、特徴的な点とし て全般的に上げ潮時においては、河床突起部近傍で高濃 度域が形成され、土砂濃度の等値線は河床形状と同位相 の分布形状を示していることが挙げられる.また、砂州 の上流端計測線L1においては水面近傍に高濃度水塊が形 成されていることが注目される.平成19年9月の場合と の比較では、水際から約25m以内の領域に当たる砂州上 の濃度は、ほぼ同程度の大きさであることが分かる.砂 州周辺の土砂濃度は、地形および密度成層の影響を受け た3次元的な流れ場の影響を受け、特に突起部周辺で上 昇流および谷部で下降流の発生が示唆される.また、計 測線L1における水面近傍の高濃度水塊は、砂州上で巻き 上げられ潟土を大量に含んだ流れが石積水制から流心部 に流出したことによるものと推察される.

一方,下げ潮時においては全般的に水際から60m以内 において水面近傍で土砂濃度が底面に較べて高く,鉛直 方向に土砂濃度の逆転現象が現れていることが注目され る.また,上げ潮時に較べて傾向は弱いが,底面近傍で は土砂濃度の等値線は河床形状と同位相の分布形状を示 していること分かる.水面近傍で土砂濃度が底面に較べ て高く現れたのは,砂州上の高濃度水塊が水面近傍から 流心部に排出したことが示唆される.また,土砂濃度が 突起部周辺で高く谷部で低いのは,突起部で上昇流およ び谷部で下降流の発生したことが推察される.さらに, 下げ潮時の土砂濃度は,上げ潮時に較べて砂州境界領域 では水面近傍で高く、底面近傍では低くなる傾向のある ことがわかる.

本研究では、計測線上の土砂濃度は2回の計測結果から再現性の高い傾向のあるものを定性的に示しているが、 土砂輸送を定量的に議論するためには、二次流および乱 流拡散による輸送機構を検討する必要がある.

(2) 横断面土砂輸送量

ADCPにより取得された主流速および土砂濃度から各 計測線下の横断面を通過する土砂輸送量を平成19年9月 においては砂州上,平成20年9月においては砂州上と流 心側の砂州境界領域の両者で算定する.なお,鉛直方向 の積分領域は水面と底面近傍においては欠損部が生じて いることから,河床から0.36mの高さを下限とし水深の 90%を上限に設定した.以上の条件をもとに各計測線下 の横断面平均土砂輸送量Q,(kg/s)は次式で表現できる.

$$Q_s(x,t) = \int_A u(x, y, z, t) \cdot c(x, y, z, t) dy dz \quad (1)$$

ここに, *u*(*x*, *y*, *z*, *t*) および*c*(*x*, *y*, *z*, *t*) は各計測線 下の流速と土砂濃度, *A* は計測線下の流水断面積であ る. 上流方向の輸送量を正としている. 平成19年9月お よび平成20年9月に観測した横断面土砂輸送量をそれぞ れ, 図-9および図-10に示す. なお, L10は杭水制の位置 を示している.

図-9より、上げ潮時において横断面土砂輸送量は杭水 制位置L10の土砂輸送量を除けば最下流の計測線L9から



図-9 砂州上の土砂輸送量の流下方向変化(平成19年9月)

上流のL3の間でほぼ一様に増大傾向を示している.砂州 境界領域から横断方向の土砂輸送を無視すれば,杭水制 位置L10の周辺を除けば,相対的に上げ潮最強流におい て砂州上で潟土は洗掘傾向にあることが認められる.

一方,下げ潮時において横断面土砂輸送量はL7において最大値を示し,杭水制位置L10の土砂輸送量を除けば 放物上の空間分布を示す.図-9の土砂輸送量から,図-3a)に示された平成19年9月における潟土の堆積厚が杭水 制の直上流側において堆積傾向を示すことが分かる.

図-10から,上げ潮時において横断面土砂輸送量は全般的に上流に向かって増大傾向を示し,特にL3からL2の間で顕著な増大が見られる.下げ潮時において横断面土砂輸送量は,各計測線において大きな変化は無く,若干,流下方向に減少傾向のあることが分かる.上げ潮時において土砂輸送量がL3からL2の間で急激な増大を示す原因として顕著な潟土堆積の場所が杭水制の直上流位置からその上流に当たる石積水制直下流位置に移動し,L3からL2の間での潟土巻き上げが活発化したことが予想される.

6. まとめ

本研究では、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潟土河床への底質変化を 解明するため、Q-Boat搭載のADCPを用いて現地観測を 行い、大潮時最強流の流速、土砂濃度よび潟土堆積の相 互作用について検討した.得られた結果は以下の通りで ある.

- 平成19年9月の下げ潮時に観測された砂州上で上向きの流れが生じた原因として、平成19年7月出水によって形成された捨石欠損部からの噴流状の短絡流により水平循環流が形成された可能性が示唆され、この水平循環流は、水際の潟土堆積を促進する。
- 2) 平成19年9月における潟土堆積厚が透過型の木杭上向 き水制根付部の直上流で極大値を示したのは、木杭 上向き水制の流速低減効果によることが示された.
- 3) 砂州境界領域における土砂濃度は、河床突起部で高く、谷部で低くなり、土砂濃度の等値線は河床形状と同位相の分布形状を示す。
- 4)砂州境界領域から横断方向の土砂輸送を無視すれば、 上げ潮最強流において砂州上で潟土は洗掘傾向にあ



図-10 砂州境界領域の土砂輸送量の流下方向変化(平成20年9月)

ることが示された.

5) 平成20年9月の上げ潮時において土砂輸送量が石積水 制直下流のL3からL2の間で急激な増大を示す原因と して,顕著な潟土堆積の場所が杭水制の直上流位置 からその上流に当たる石積水制直下流位置に移動し, L3からL2の間での潟土巻き上げが活発化したことが 示唆された.

謝辞:本研究を遂行するに当たり,国土交通省九州地方 整備局菊池川河川事務所の協力を得た.ここに記して感 謝の意を表す.

参考文献

- 1) 川西澄, 胡桃田哲也, Mahdi Razaz, 水野雅光, 福岡捷 二:太田川放水路における塩水遡上と懸濁粒子の輸送特 性,水工学論文集,第52巻, pp.1321-1326, 2008.
- 2) 安達貴浩,衛門久明,橋本彰博,高橋大吉:那珂川河口 域における塩水侵入の現地観測ならびに数値シミュレー ション,河川技術論文集,第8巻,pp489-494.
- 3) 鈴木伴征,石川忠晴,横山勝英,三河川感潮域における エスチュアリー循環の現地計測と数値計算,河川技術論 文集,第9巻, pp 259-264,2003.
- 4) (財)河川環境管理財団:河川整備基金自主研究事業 河川 汽水域の水環境と生物環境に関する研究, 2006.
- 5) 横山勝英,宮崎晃一,河野史郎:筑後川感潮河道と有明海奥部における高濁度水塊の広域移動に関する現地観測,水工学論文集,第52巻,pp.1339-1344,2008.
 6) 大本照憲,平川隆一:菊池川河口域における流れと物質
- 6) 大本照憲,平川隆一:菊池川河口域における流れと物質 輸送について,河川技術論文集,第11巻,pp.333-338,2005.
- 7) 橘田隆史,岡田将治,新井励,下田力,出口恭:ラジコンボートを用いたADCP移動観測の計測精度評価法に関する一考察,河川技術論文集,第14巻,pp295-330,2008.
 8) 島田友典,渡邊康玄:ADCPを搭載したラジコンボートに
- 8) 島田友典,渡邊康玄: ADCPを搭載したラジコンボートに よる流水中の流速測定精度,土木学会第62回年次学術講 演会概要集, pp.211-212, 2007.
- 9) 岡田将治,橘田隆史,森本精郎,増田稔:ADCP搭載無人 ボートを用いた四万十川具同地点における洪水流観測, 水工学論文集,第52巻,2008.
- 川西 澄,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,1996, 海岸工学論文集.第44,巻,pp1081-1090, 1996.
- 国土交通省 国土技術政策総合研究所:国土技術政策総合 研究所資料 沖積河川の河口域における土砂動態と地形・ 底質変化に関する研究,2002.
- 12) 横山勝英,梅田信,石川忠晴:七ヶ宿貯水池への濁質輸送,第53回年次学術講演会概要集,pp750-751,1998.
- 13) 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.

(2009.9.30受付)