

河床が互層構造をなす筑後川感潮域における洪水 水流による河床変動と砂移動機構に関する研究

CHARACTERISTICS OF SAND TRANSPORT BY FLOOD FLOWS IN THE
ESTUARY OF THE CHIKUGO RIVER WITH COMPLEX RIVER BED LAYERS

鈴木 健太¹・松尾 和巳²・島元 尚徳³・福岡 捷二⁴

Kenta SUZUKI, Kazumi MATSUO, Hisanori SHIMAMOTO and Shoji FUKUOKA

¹学生会員 学士 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒112-8551東京都文京区春日1-13-27)

²正会員 国土交通省九州地方整備局筑後川河川事務所長 (〒830-8567福岡県久留米市高野1-2-1)

³非会員 国土交通省九州地方整備局筑後川河川事務所調査課長 (〒830-8567福岡県久留米市高野1-2-1)

⁴フェロー Ph.D 工博 中央大学理工学部特任教授・中央大学研究開発機構教授
(〒112-8551東京都文京区春日1-13-27)

A series of environmental issues in the Ariake sea has been believed to be caused by a lack of sand supply from the Chikugo river to the Ariake sea on the basis of few investigations of characteristics and amount of sediment transport in the the Chikugo river estuary . To make clear the characteristics of river bed material, the core sample survey and supersonic echo sounding has been conducted .Its shows that the sand and gata-soil are exiting with complex layer structure of sand and gat-soil respect to depth. And authors applied unsteady quasi three-dimensional river bed variation analysis using observed temporal changes in water surface profiles of 2009 flood. The result of analysis demonstrated that bed variation occurred in the river channel and sand was transported from the Chikugo river to the Ariake sea. In addition, the river bed movement and deformation was ascertained by 3D laser scanner data measured in the ordinary flow under the daily tide change.

Key Words : Sand, Quasi 3D bed variation analysis, Temporal changes in water surface profiles

1. 序論

有明海は、湾の形と日々繰り返される最大6mもの大きな潮位変動により、我が国最大級の干潟を有し、多様な生態系が形成されている。近年、この有明海で、アサリの不作や海苔の変色等の漁業問題が発生し、問題視されている。これら一連の問題の主因として、有明海に流入する河川流域のうち、最大の規模を誇る筑後川流域からの土砂流出量、特に砂の供給量減少が挙げられており、有明海の底質泥化の進行を助長しているのではないかとの報告がある¹⁾。有明海湾奥部や筑後川感潮域の河岸際には、阿蘇の噴火を起源とするガタ土と呼ばれる粘着性の細粒分が多量に見られる。これは、大きな潮位変動を日々繰り返す有明海から運搬され、堆積したもので、この様に普段の川の流れて目にするのできる筑後川感潮域の様子から、我々が見ることのできない水面下の低水路河道も河岸同様に、ガタ土で覆われており、砂の存在量、有明海への流出量は少ないとみなされてきた。

筑後川感潮域の河床材料特性について、横山らは粘着性を有するガタ土やシルトなどの細粒分に着目し、底泥

層の形成や浸食、流動特性に関する知見を蓄積してきた。しかし、砂の存在量や有明海への流出量については、量的に少ないものとみなされ²⁾³⁾、有明海での環境変化の議論では、砂の流入量が少なく、シルト・粘土が影響していることに注目した議論が多くなっている。このように、筑後川ではガタ土が中心の研究がなされ、筑後川感潮域全体での縦断的な砂の存在量や、移動量に関する知見が十分でないことから、入江、福岡らは2007年に発生した洪水について集中的な現地調査によって河床を構成する材料について調べ、更に、洪水期間中の水面形の時間変化を観測し、大きな潮位変動を有する筑後川感潮域での洪水流下特性に関して知見を得た⁴⁾。Suzuki, Fukuokaらは2007年洪水を対象に、観測された水面形の時間変化を解とした非定常平面二次元解析を適応し、解析により求めた掃流力と、河床材料の関係から、洪水中に筑後川感潮域の広い範囲で砂が移動している可能性があることを示した⁵⁾。本研究では、これら、調査研究をさらに進めて、大きな潮位変動を有する筑後川感潮域における河床変動特性、特に砂の移動特性に着目して筑後川感潮域の流砂特性の解明を目的とする。

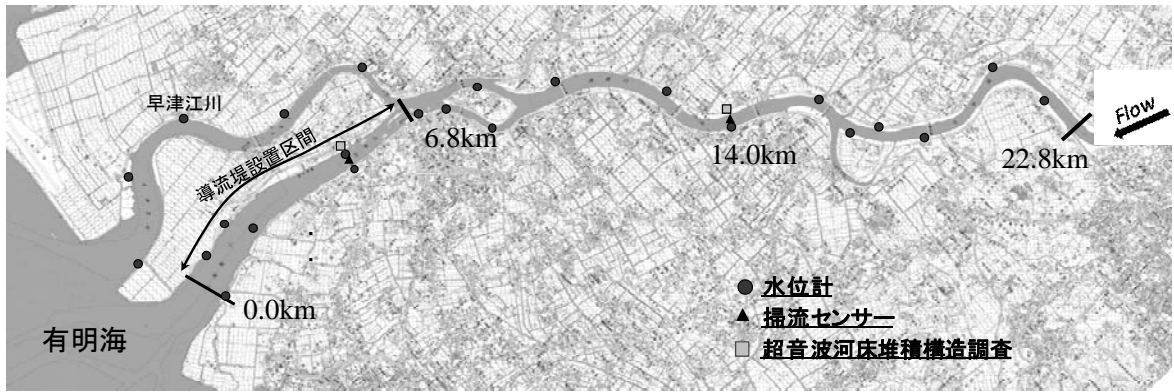


図-1 対象区間平面形と観測項目

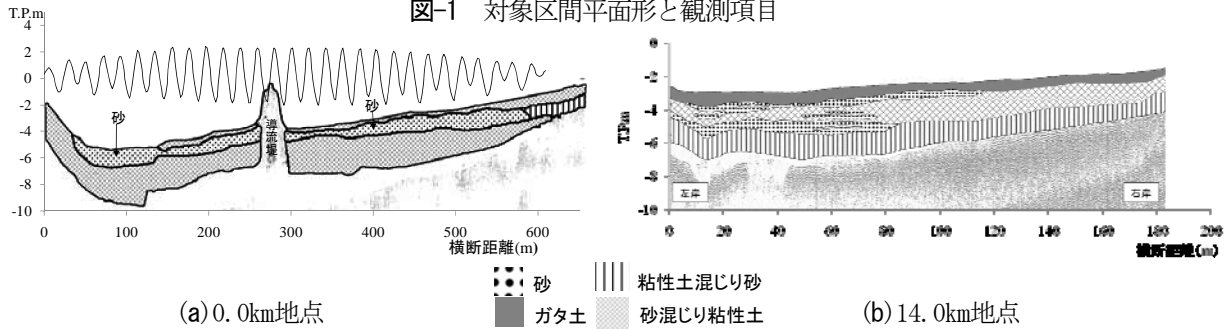


図-2 超音波河床堆積構造調査 (洪水前)

2. 対象区間と観測項目

検討対象区間の平面図を図-1に示す。筑後川感潮域での洪水流下特性と河床変動及び、有明海への砂の流出量を把握するために、検討区間は23.0km地点の筑後大堰から有明海までの区間とした。検討区間の平均的な縦断河床勾配は約1/7000と緩流で、対象区間の全域において有明海の潮位変動の影響を受ける感潮河川である。河口から6.0km地点で早津江川に分派し、本川の0.0km～6.2kmの区間は土砂堆積を防ぐ目的で、デ・レーケ導流堤が流路を横断的に二分する様に設置されている。0.0kmの横断面図と、河口水位観測所での潮位の重ね合わせを図-2(a)に示す。この様に導流堤設置区間では、高い潮位時には左右で水表面を共有するが、導流堤を挟み地盤高が異なるため、流れや砂の移動特性も異なる。本論文では、導流堤を挟み地盤高の低い左岸側を主流部、右岸側を副流部と呼ぶ。2009年6月30日に、瀬の下水位流量観測所における年平均最大流量2850m³/sに対し、3850m³/sの洪水が発生した。この洪水期間中に、図-1中に●印で示す地点において、概ね縦断方向2km間隔、観測時間間隔5分で水位が観測された。観測された各地点の水位ハイドログラフを図-3に示す。瀬の下流量観測所(25.5km)での洪水ピークは有明海が干潮時に発生しており、各水位観測点での水位は洪水中有明海の潮位変動の影響を強く受けていることが分かる。

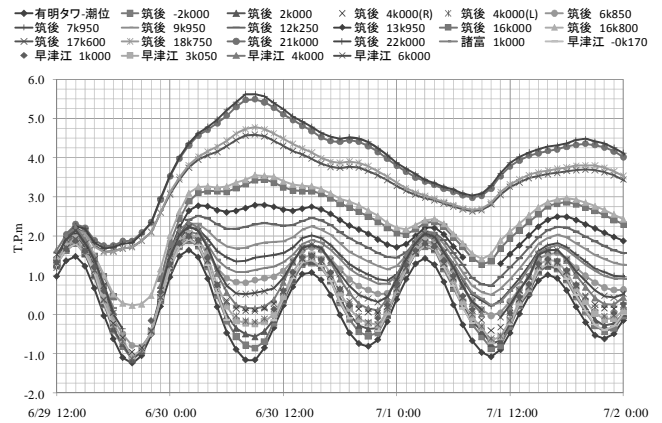


図-3 2009年6月洪水観測水位ハイドログラフ

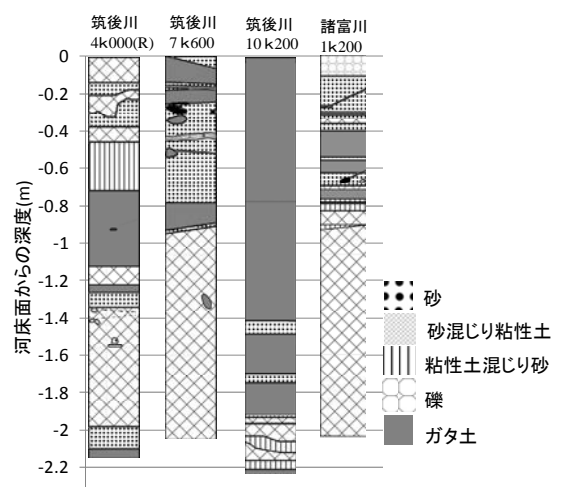


図-4 代表地点の柱状コアサンプル(洪水前)

3. 対象区間の河床材料特性

筑後川感潮域の河床材料を把握するため、コアサンプリング調査と超音波を用いた河床堆積構造調査が行われた。コアサンプリング調査は、円柱サンプラーをエアパイプレーター振動により所定の深度まで押し込み、乱れの少ない連続試料が採取された。採取された試料を分析することで、どのような種類の河床材料が、河床面からどの深さの位置に、どの程度の厚さ存在するかを識別可能で、河床材料柱状図を作成することができる。図-4に各地点における柱状コアサンプリングの結果を示す。同時に、採取された試料から、深度方向約2mまでの含水比と粒度分布が鉛直10cm毎に調査された。含水比と粒度分布をそれぞれ図-5、図-6に示す。筑後川4.0kmと7.6km、諸富川1.2kmは河床面から概ね1mは砂と粘性土が複雑な互層構造をなしており、粘性土の含水率は100%を超えている。一方、筑後川10.2km地点は河床表層を厚いガタ土が覆っている。

また、図-1に■印で示される各地点においては超音波を用いた河床堆積構造調査がおこなわれた。本調査は異なる周波数の超音波を河床面に照射し、反射特性を解析することで河床の鉛直-横断方向の堆積構造を把握することができる。図-2に代表的な断面である0.0kmと14.0kmにおける超音波河床堆積構造調査の結果を示す。(a)に示す0.0km地点では、各層と潮位の高さ関係から、干潮時にも水面下に没している河道中央部に厚さ約1mの砂層が横断的に広く分布していることが分かる。一方、(b)に示す14.0km地点には横山らの調査研究により明らかになっているように、日々の潮位変動を繰り返す中で、河岸際だけでなく河道内にもガタ土が堆積し易い傾向にある²³⁾。しかし、14.0km地点においても河道中央部に砂層が存在し、その上にガタ土が堆積し砂層の下に厚い粘性土混じり砂が見取れる。

4. 掃流センサーを用いた洪水時の河床変動観測

2009年洪水時の河床変動量を明らかにするため、掃流センサーを用いた観測が行われた。観測は4.0km地点と14.0km地点の二断面で行われた。4.0km地点は導流堤が設置されている区間であり、河床高が低い主流部(導流堤左岸)に設置された。14.0km地点は緩やかな湾曲部に位置しており、潮位変動の影響を受けガタ土の堆積し易い場所である。観測器具は洪水前に河床に埋設し、洪水中に河床高の低下と共に器具に取り付けられたリングが追従して低下することで最深河床

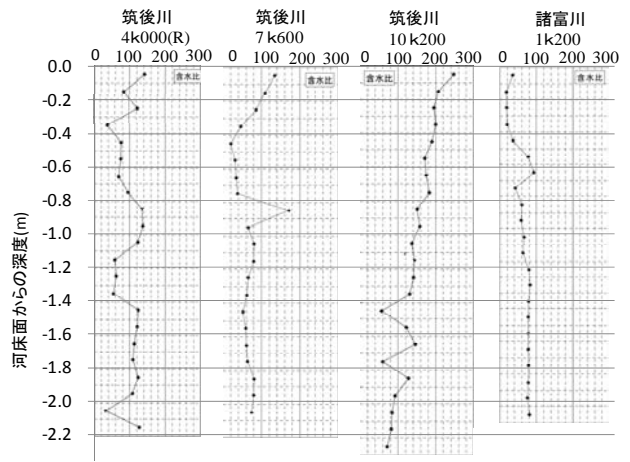


図-5 鉛直方向含水比

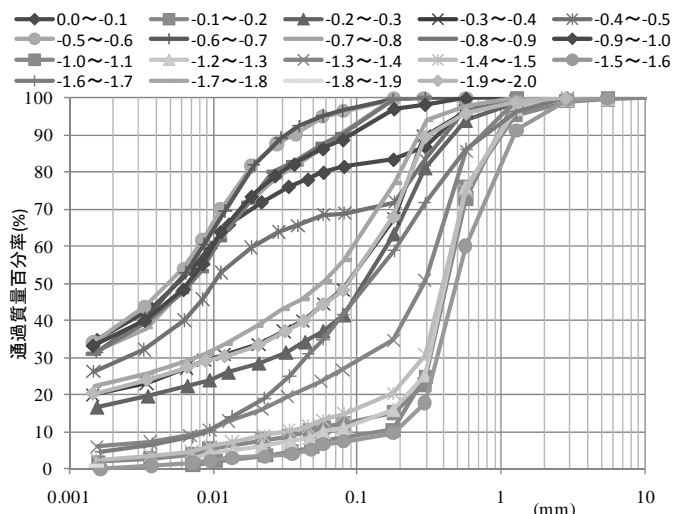
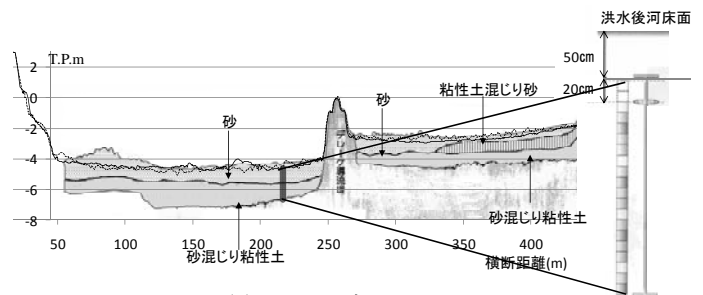
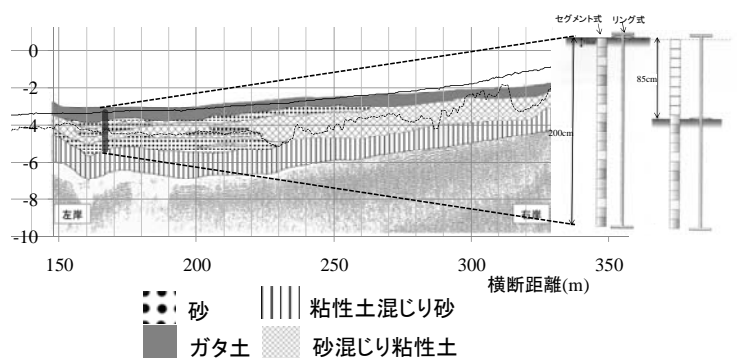


図-6 鉛直方向粒度分布(14.0km)

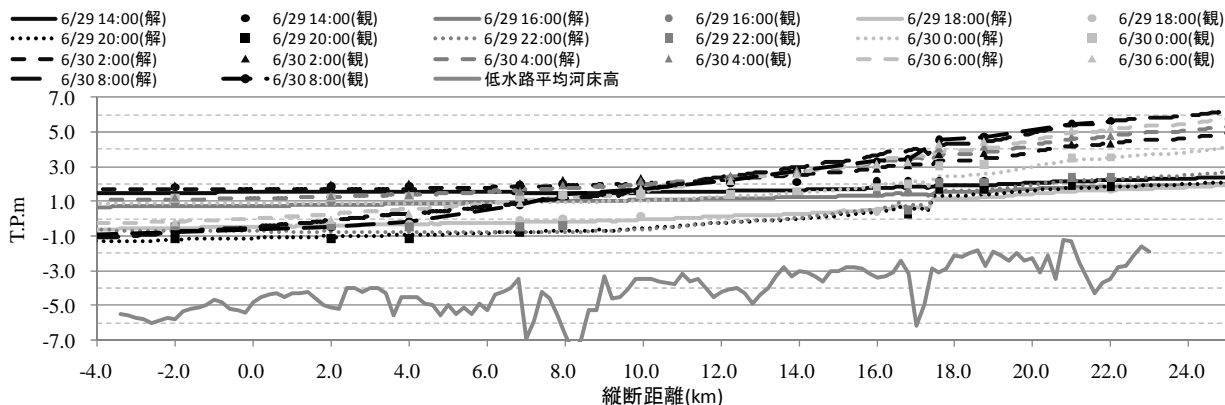


(a) 4.0km地点

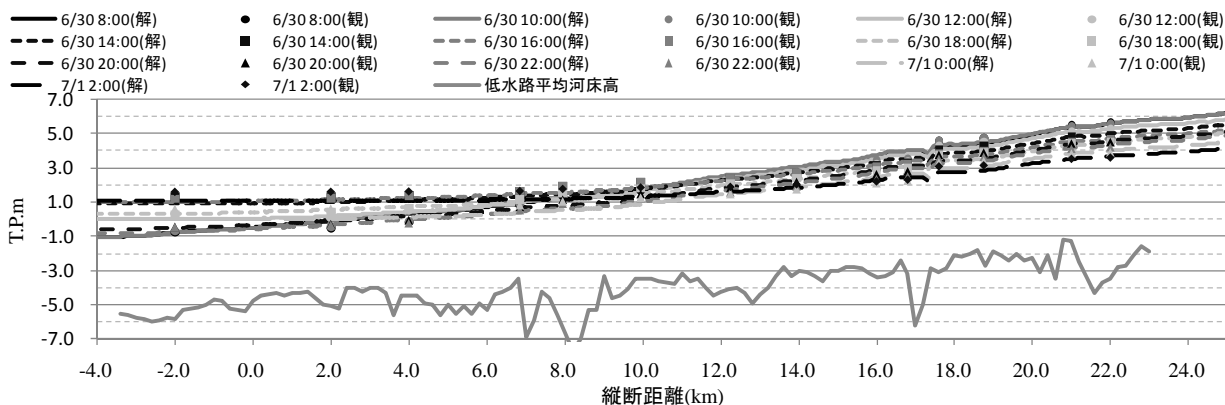


(b) 14.0km地点

図-7 掃流センサーを用いた河床変動観測



(a) 洪水上昇期-洪水ピーク



(b) 洪水ピーク - 洪水減水期

図-8 縦断水面形の時間変化

高を観測する。また、最深河床高を示すリング上の土砂層厚を測定することで、埋め戻し深を観測する。器具はガタ土の堆積による河床高復元を避けるため洪水後すぐに回収された。14.0 km地点に設置された掃流センサーは洪水ピークの6月30日にすぐに回収されず、7月25日にピーク流量(3650 m³/s)を迎えた洪水でも河床高の変化を観測した。つまり、2度の洪水を経験した後の河床高変化量を示している。図-7に掃流センサーによる河床変化高と、砂層と粘土層の互層状態を表した超音波河床堆積構造調査結果(洪水前)の重ね合わせを示す。図中の実線は洪水前の横断測量、破線は洪水発生後の横断測量結果を示す。14.0 km地点では二回の洪水を経験することで約80 cm河床が低下し、ガタ土だけでなく、砂層も掃流されたことが分かる。一方、4.0 km地点は、河床変動量が14.0 km地点に比して小さいが、洪水中に20 cm砂層が掃流され、その後約50 cmの埋め戻しが確認された。図-9に、洪水後に4.0 km~5.0 kmの区間でマルチビーム測量を用いて観測された地盤形状を示す。この測量は、船底に設置した器具から河床面に対し扇形(約150度)に音波を照射し、船で移動しながら空間的な地盤高を測定することができる。主流部では波長約20 m、波高約1 mの河床波が見られ、洪水中に河床波を形成しながら砂が下流へ移動していることが推定される。早津江川でも河床波が確認された。一方、10 km~14 kmの区間では、横山らの調査研究⁹⁾によると、このような河床波は確認できず河床堆積構造違いにより流動特性が異なると考えられる。

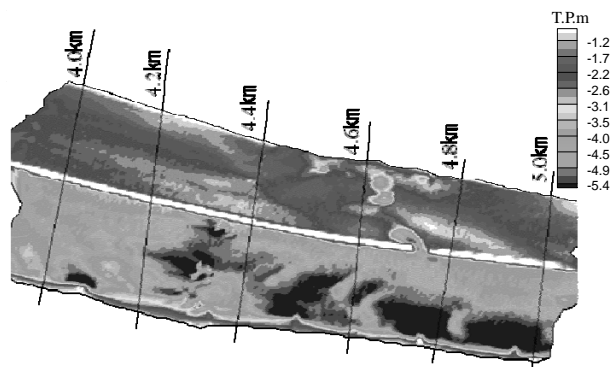


図-9 4.0 km~5.0 kmコンタ - 図(マルチビーム測量)

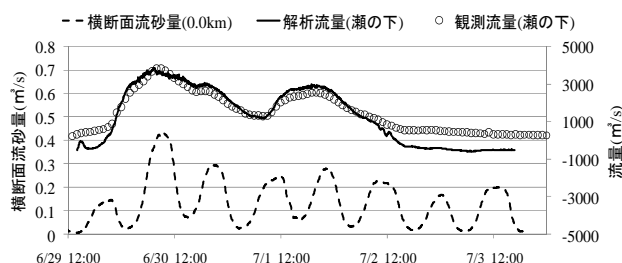
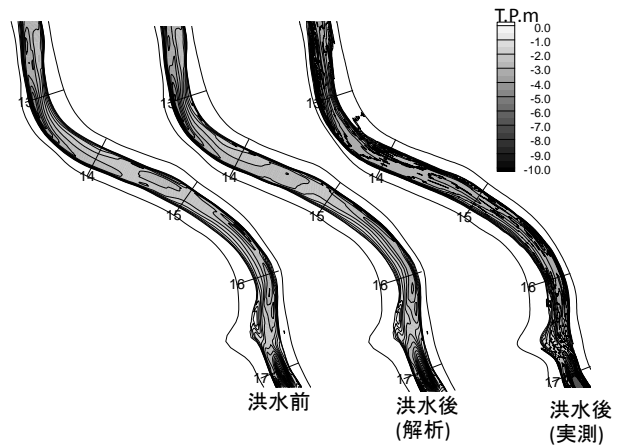


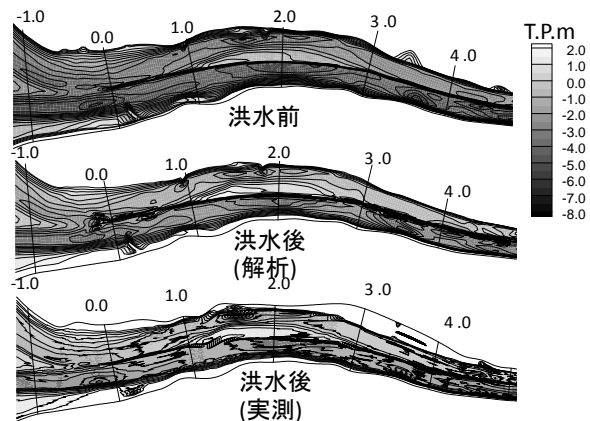
図-10 瀬の下(25.5 km)流量ハイドログラフと河口での推定土砂流出量(0.0 km)

5. 洪水流・河床変動一体解析

筑後川感潮域では潮位変動に伴い、海域からガタ土が河道内に運搬され、また河道から流出することで、河床高が日々変化している。つまり、洪水発生から洪水後の河床横断測量までに長い時間が経過すると、測量時の地盤高は必ずしも洪水直後の地盤高を表しているとは限らない。そこで、2009年には洪水による河床変動量を把握する目的で、洪水直前・直後に縦断方向200m間隔の詳細な地盤高測量を実施し、ガタ土の堆積による地盤高変化の影響を無視できる貴重なデータを得た。また、感潮河川では、潮位変動に伴い水位が大きく変動し、必ずしも洪水ピーク流量時の水位と洪水痕跡水位は対応しない。そのため、痕跡水位を洪水の最大水位と考え、痕跡水位に一致するように流れと河床変動を解析する従来の手法は感潮域では適切でない。川口・福岡らは、河道内で起きる水理現象の全ては水面形の時間変化に現れるという考えに基づき、流量に比して観測精度の高い観測水位時系列を上下流の境界条件に与え、観測水面形の時間変化を再現するように、流れ場と河床変動を一体的に解析することで、洪水時の河床高時間変化と流れ場を再現する手法を提案した⁶⁾。後藤・福岡らは太田川放水路に同手法を適用し、平成17年洪水時の河床高の時間変化を説明した。本論文では、ガタ土復元の影響をほぼ無視し得る洪水直前、直後の観測地盤高を用いて、内田・福岡によって提案された観測水面形の時間変化を解とした非定常準三次元洪水流・河床変動の一体解析法を適用することにより複雑な互層構造を有する筑後川感潮域における河床変動の特性を明らかにすることを旨とする。解析手法の詳細に関しては参考文献を参照されたい⁹⁾。検討対象区間は23.0 km地点に設置されている筑後大堰から有明海までの区間とした。対象区間内で分派している諸富川と早津江川についても本川と同様に解析を行った。境界条件は上流に22.0 km地点での観測水位、下流に有明海タワー水位観測所で観測された潮位を与えた。前述した通り、筑後川感潮域の河床には砂やガタ土が鉛直方向に複雑な互層をなして存在している。そのため、洪水初期に表面に存在している河床材料を代表粒度分布として、鉛直方向に一樣に扱おうと、洪水時の土砂移動量を適切に推定することが出来ないと考えられる。そこで本解析では、コアサンプリング調査から明らかになった鉛直方向10 cm毎の粒度分布を全て解析に取り込み、互層構造を表現した。ここで、ガタ土やシルト粘土として分類される小さな粒径の材料は、洪水中には、浮遊砂やウォッシュロードとして流下し、再び河道内沈降することは少ないと考えられる。そこで、0.062mm以下の粒径集団に関しては極めて小さい非粘着性材料として、一度移動を開始したら再び河道内に堆積はせず、流れにのって海ま



(a) 対象区間内上流部(12km~17km)



(b) 対象区間内中流部(0km~5km)

図-11 洪水前後河床変動量コンタ - 図

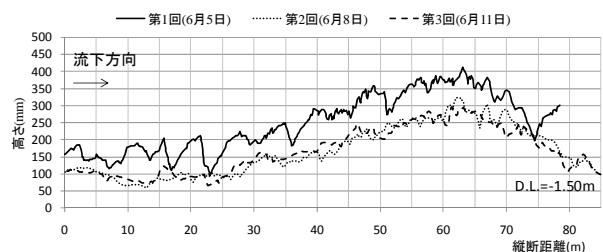


図-12 3Dレーザースキャナを用いた地盤高測量結果

で流下するとして扱っている。筑後川感潮域には土砂の堆積を防ぎ舟運のための航路を確保する目的で荒籠(あらこ)と呼ばれる水制が数多く設置されており、また、筑後川本川0.0 km~6.2 kmの区間には土砂堆積を防止する目的で、レーケ導流堤が設置されている。導流堤と規模の大きな荒籠は、流れ場や河床変動に無視しえない影響を与えていると考えられることから本解析では、構造物が設置されている地点の解析格子に、測量から得られた地盤高を与えることで、構造物の影響を取り入れた。図-8は解析により求めた水面形の時間変化と各水位観測所での観測水位の比較を示す。実線は解析より求めた縦断水面形の時間変化を示し、マーカーで同時刻の各観測所での観測水位を表している。これらの観測水位と

解析水位は、観測水面形を再現できている。有明海の干潮時は水面形は縦断的にほぼ一様勾配をとる。一方、満潮時には、8km~10km付近を境に下流側では、緩やかになり、時間帯によってはほぼ水平になっていることが見て取れる。図-10は瀬の下流量観測所(25.5km)における流量ハイドログラフの観測値と解析値の比較と、筑後川本川0.0km断面から流下する砂の流砂量ハイドログラフを示す。解析値は観測最大流量(3850m³/s)、観測波形ともに良好に再現出来ている。水面形の時間変化、流量ハイドログラフ共に、解析値と観測値が良好な対応関係にあることから、洪水時の流れ場も実現象を概ね説明出来ていると考えられる。図-11に洪水前後の地盤高と解析より求めた洪水後地盤高の比較を示す。(a)は対象区間内の上流部に位置する12km~17km(b)は対象区間内の下流部に位置する0km~5kmの地盤高を表す。上流部では実測の河床低下傾向を捉えられている。しかし、全体的に河床変動量が実測に比べ小さく計算されている。これは、前述したように、ガタ土を簡易的に浮遊状態で移動するとし、実現象の再現を試みたが、流下する土砂量を適切に見積もることができなかつたためであると考えられる。今後は、より実現象に近い洗掘、掃流形態を考慮することで、洗掘量の再現性を向上させる必要がある。一方、下流部では実測の、洗掘と堆積が斑状に現れる傾向を良く再現している。図-10に示す0.0km断面における流砂量のピークは瀬の下地点の流量ピークと流砂量のピーク発生時刻は一致している。また、洪水ピーク時だけでなく、洪水が減水し、ほぼ平水流量に戻った時間帯においても潮位変動により水面勾配が急になると、有明海へ砂が流出していることが分かる。このように筑後川感潮域では、大規模出水時だけでなく、日々の潮位変動により大きな流速が生じ、砂が移動していると思われる。そこで、筑後川4km付近において平水時の砂の移動状況を把握する目的で河床高の調査が行われた。この調査は高水敷から3Dレーザースキャナーを用いて、数cm間隔の地盤高データを取得することで河床波の形状と地盤高変化を捉えることが出来る。6月5日、6月8日、6月11日に同地点において測量が実施された。詳細な河床高縦断面図を図-12に示す。調査期間の瀬の下地点における平均河川流量76m³/sの潮汐を経験することで、河床形態に明確な変化があらわれている。第一回調査から第二回調査の3日間にかけて10cm程度の河床低下が生じ、変化の小さかった第二回調査から第三回調査の期間においても、平水時の潮位変動で砂が移動していることが確認された。

6. 結論

筑後川感潮域では有明海の大きな潮位変動でガタ土が

河岸際に堆積している。そのため、河道内の砂存在量や有明海への砂流出量は少ないと考えられてきた。本研究では、筑後川感潮域の河床材料や水面形の時間変化を密に観測したデータを用いて、準三次元河床変動解析を行うことにより、筑後川感潮域の砂移動特性と有明海への砂の流出について以下の知見が得られた。

- (1) コアサンプリング調査、超音波河床堆積構造調査の結果から砂やガタ土が複雑な互層構造をなしている。
- (2) 掃流センサーを用いた洪水時の河床変動量観測により、ガタ土層だけでなく砂層も掃流されていることが明らかとなった。また、下流部ではこれらの砂が河床波を形成しながら流下している。
- (3) 潮位変動と複雑な互層構造を有する筑後川感潮域において観測された水面形時間変化を解とした洪水流・河床変動の一体解析を行った。その結果上流域の河床低下傾向と下流部での洗掘・堆積傾向を説明できた。今後は、土砂の流下形態について更に検討する必要がある。
- (4) 大規模出水時だけでなく、潮位差の大きい日々の潮汐流により砂が河床波を形成しながら移動していることを示した

参考文献

- 1) 有明海・八代海総合調査評価委員会 報告書、平成18年12月21日
- 2) 横山勝英：河川の土砂動態が有明海沿岸に及ぼす影響について-白川と筑後川の事例、応用生態工学8(1)、61-72、2005
- 3) 横山勝英、山本浩一、金子裕：筑後川干潮河道における洪水時の底質侵食過程と有明海への土砂輸送現象、土木学会論文集 Vol. 64, No. 1, pp. 71-82, 2008. 3.
- 4) 入江靖、石川博基、前田昭告、山口広喜、坂本哲台、福岡捷二、渡邊明英：筑後川感潮域における洪水流と土砂運動、河川技術論文集 第15巻、pp. 297-302, 2009
- 5) Suzuki, K., Fukuoka, S. and Matsuo, K.: Bed material structure and sand transport by flood flows in the estuary of the Chikugo river, *Proceedings of the Third international conference on the estuaries and coasts*, Vol.1, pp.101-108, 2009
- 6) 川口宏司、藤堂正樹、福岡捷二：水面研時系列データに基づく交互砂州平均河床高の時間変化および流量ハイドログラフの解析、水工学論文集 第53巻、pp. 751-756
- 7) 後藤岳久、福岡捷二、安部徹：太田川放水路と旧太田川への洪水流量配分及び感潮域の河床変動、水工学論文集 第54巻、pp. 757-762
- 8) 横山勝英、長屋光彦、金子祐、山本浩一、高島創太郎：筑後川感潮河道における河床地形・材料の変動特性に関する長期連続調査、水工学論文集 第54巻、pp. 685-690, 2010.
- 9) 内田龍彦、福岡捷二：浅水流方程式と渦度方程式を連立した準三次元モデルの提案と開水路合流部への適応、水工学論文集 第53巻、pp. 1081-1086, 2009.

(2010. 4. 8受付)