

ガタ土と砂礫で構成される河床を有する 筑後川感潮域の洪水時の土砂移動と河床変動

BED VARIATION AND SEDIMENT TRANSPORT DURING A FLOOD IN THE CHIKUGO RIVER ESTUARY WITH COMPLEX BED STRUCTURES

金子祐¹・福岡捷二²・川邊英明³
Yu KANEKO, Shoji FUKUOKA and Hideaki KAWABE

¹学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 都市環境工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²フェロー 工博 Ph.D. 中央大学研究開発機構教授 (同上)

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

It is known that the vertical structure of the river bed of the Chikugo River estuary consists of complex structures of gata-soil and sand. In this study, we develop a new model of bed variation analysis in the river estuaries with complex structures of bed layers, and we clarify the mechanism of bed variation and the amount of sand supply from the Chikugo River estuaries to the Ariake Sea during a flood. In the model, when the rate of volume of gata-soil is larger than the porosity of sand, bed variation are calculated by the GBVC method and continuity equation of sediment which takes into account the sediment discharge of sand and erosion speed of the cohesive material so as to correspond to the volume of gata-soil and sand. This is because the gata-soil has characteristics of the transportation different from sand and mixture of the sand and the gata-soil has great influence on the bed variation.

Key Words : *bed variation analysis , temporal changes in water surface profiles , complex structure , sand , cohesive sediment , chikugo estuary*

1. 序論

筑後川は有明海に注ぐ最大の河川であり、年間流入流量の約45%を占めている。このため、筑後川から有明海への土砂輸送量は、有明海の水域環境にとって重要である。これまで筑後川では、ガタ土に着目した議論が数多く行われている一方、砂の移動流出に着目した研究は少ない。鈴木ら¹は、筑後川感潮域において測定された柱状コアサンプリングや超音波河床材料調査の結果から、筑後川感潮域では洪水流と潮汐の作用によって、ガタ土と砂が複雑な堆積構造を形成し、特異な河床変動が起こっていることを示した。彼等は、ガタ土の鉛直方向の含水比変化、粒度分布の変化に一定の関係があることに着目して土砂輸送モデルを構築し、筑後川における洪水時の河床変動と有明海への砂の流出量を見積もった。しかし、鈴木らが用いたガタ土河床の洪水流河床変動モデルにはいくつかの問題が残されている。本研究では、鈴木らの解析の不十分な点を修正した新しい洪水流河床変動解析モデルを用いて、筑後川感潮域の洪水時の流れと河床変動機構を明らかにす

るとともに、有明海への砂の流出量を適切に見積ることを目的とする。

2. ガタ土と砂礫で構成される河床のモデル化 及び流れと河床変動解析法

筑後川感潮域では潮汐の作用により、海域から微細なガタ土が河道内に運搬され堆積する。また、洪水流によって上流域から砂が運ばれることにより、図-1, 2 に示すように鉛直方向に複雑な河床構造を形成している。17.2km地点にはT.P.+0.6mの塩止め用の床止めが設置されており、塩水遡上の限界となっている（大潮を除く）。このため、床止め下流域の10km~17kmは潮汐の影響が相対的に弱く、含水比約200%の非常に緩いガタ土が河床表層に1.5m程度堆積している。ガタ土は砂と異なる特有の浸食形態を示す²ことから、筑後川感潮域の河床の変動の機構は砂礫河川とは異なる。鈴木らはこのような複雑な構造を有する河床について、含水比が70%を超えるガタ土層には関根の浸食速度式³、含水比が70%を

下回る砂層には芦田・道上の掃流砂量式を用い、観測された水面形の時間変化や河床変動を再現するため、芦田・道上式の係数を17→85に設定している。しかし、鈴木らの解析では、ガタ土と砂の混合した状態は考慮してはず、このため、砂の移動に及ぼすガタ土の粘着力の影響を考慮していないこと、また、ガタ土層に流入する砂の量を考慮してはず、砂の連続性が保たれていない等の問題が残されていた。本研究では、これらを考慮し、それぞれの河床材料の移動機構を考慮した新しい河床変動モデルを開発し、これを用いて筑後川感潮域の洪水時の河床変動機構を説明し、有明海への砂の流出量を算定する。

(1) 対象区間と対象期間

筑後川感潮域での洪水流と河床変動及び有明海への砂の流出量を把握するため、解析対象区間は図-3に示す筑後大堰(23km)~有明海までとする。対象洪水は鈴木らと同様に平成21年の3,850m³/s(6月)と3,650m³/s(7月)の2洪水について検討を行う。筑後川感潮域では潮汐に伴うガタ土の移動により河床高が日々変化している。そこで、洪水による河床変動量を正確に把握出来るよう平成21年洪水の直前・直後に河床横断面形が縦断間隔200m毎に観測された。また同年に、図-3に示すように洪水前後の縦横断鉛直方向の河床材料分布、洪水時の水面形の時空間分布が詳細に観測されている。上下流端境界条件には、22kmと-0.2km地点の観測水位ハイドログラフを与える。上流からの土砂の流入条件は、経年的な地盤高変化の比較的小さい筑後大堰下流地点で平衡流砂量を与えた。

(2) 一般底面流速解析法

鈴木らは水深積分した渦度方程式を用いた準三次元解析法を流れ場の解析に用いたが、この解析法は浅水流の仮定や流速鉛直分布の簡略化により、解くべき方程式を減らした解析法であった。しかし、筑後川感潮域では、ガタ土の存在により10km~17km区間で洪水時に2m以上の河床低下が生じ、下流域では諸富川・早津江川との分合流やデレーケ導流堤が建設されているなど、静水圧分布からの圧力偏差や流れの三次元性が洪水時の河床変動に影響を与えると考えられる。そこで、本研究ではそれらを考慮することが出来る一般底面流速解析法(GBVC法)⁴⁾を適用する。一般底面流速解析法は、平面二次元解析の枠組みで鉛直方向流速と圧力の鉛直分布を計算することなく、流れの三次元性を考慮した上で、底面での静水圧分布からの圧力偏差と底面流速を評価出来る特徴を持つ準三次元モデルである。底面流速は渦度の定義式を水深積分した式(1)より評価する。

$$u_{bi} = u_{si} - \varepsilon_{ij3} \Omega_j h - \frac{\partial W h}{\partial x_i} + w_s \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - w_b \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \quad (1)$$

ここで、 $i, j=1, 2(x, y$ 方向)、 u_{bi} : 底面流速、 u_{si} : 水表面流速、 ε_{ij3} : エディトンのイプシロン、 Ω_j : 水深積分渦度、 h : 水深、 W : 水深平均鉛直方向流速、 w_s ,

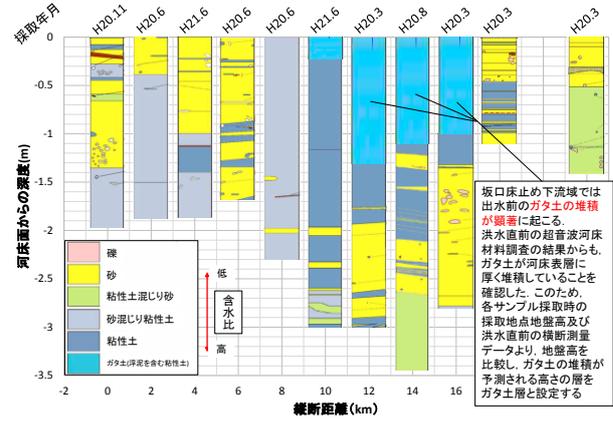


図-1 河床材料鉛直柱状図

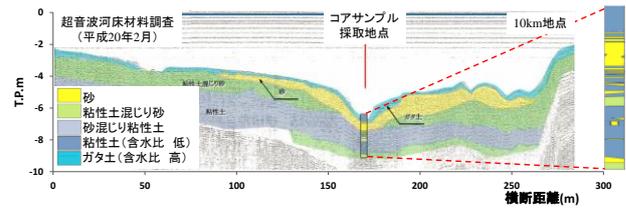


図-2 超音波河床材料調査結果(10km地点)

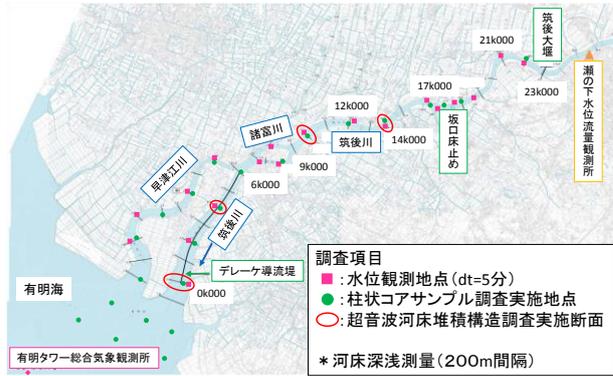


図-3 対象区間と観測位置

w_b : 水表面、底面の鉛直方向流速、 z_s, z_b : 水面高、河床高を表す。なお、流速鉛直分布は式(2)で示す三次多項式より近似している。

$$u'_i = u_i - U_i = \Delta u_i (12\eta^3 - 12\eta^2 + 1) + \delta u_i (-4\eta^3 + 3\eta^2) \quad (2)$$

ここで、 u_i : i 方向流速、 U_i : i 方向水深平均流速、 $\eta = (z_s - z)/h$ 、 $\Delta u_i = u_{si} - U_i$ 、 $\delta u_i = u_{si} - u_{bi}$ を表す。

底面の静水圧分布からの圧力偏差は、式(3)で示す水深積分した鉛直方向運動方程式を解くことで得られる。

$$\frac{dp_b}{\rho} = \frac{\partial W h}{\partial t} + \frac{\partial h W U_j}{\partial x_j} + \frac{\tau_{bj}}{\rho} \frac{\partial z_b}{\partial x_j} \quad (3)$$

ここで、 dp_b : 底面の静水圧分布からの圧力偏差、 ρ : 水の密度、 τ_{bi} : 底面せん断応力を表す。一般底面流速解析法ではここで示す方程式の他に、水深積分連続式、水深積分運動方程式、水深積分渦度方程式、水表面流速の方程式、底面の静水圧からの偏差圧力の方程式及び鉛直方向流速の方程式が解かれる。詳細は文献^{4),5)}を参照されたい。

(3) 河床構造のモデル化と河床変動解析

初期の河床構造は、ボーリングにより採取された

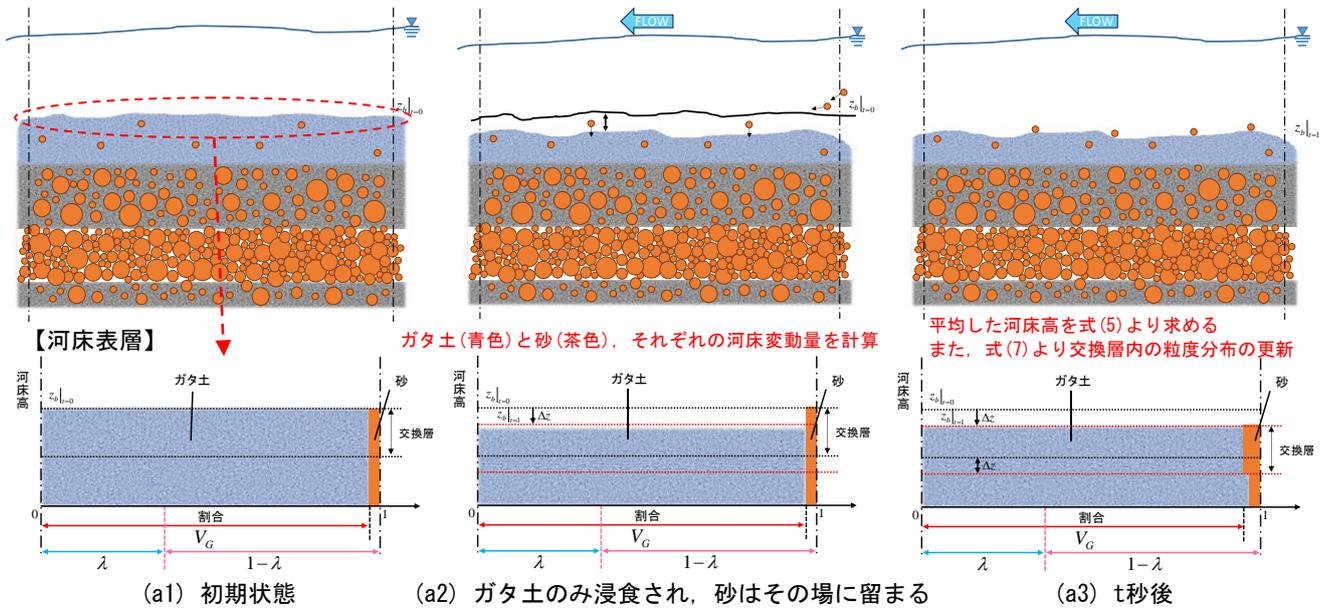


図-4(a) ガタ土と砂の混合河床の河床変動のモデル図 ($V_G \geq \lambda$ の場合の河床低下: 掃流力が小さい場合)

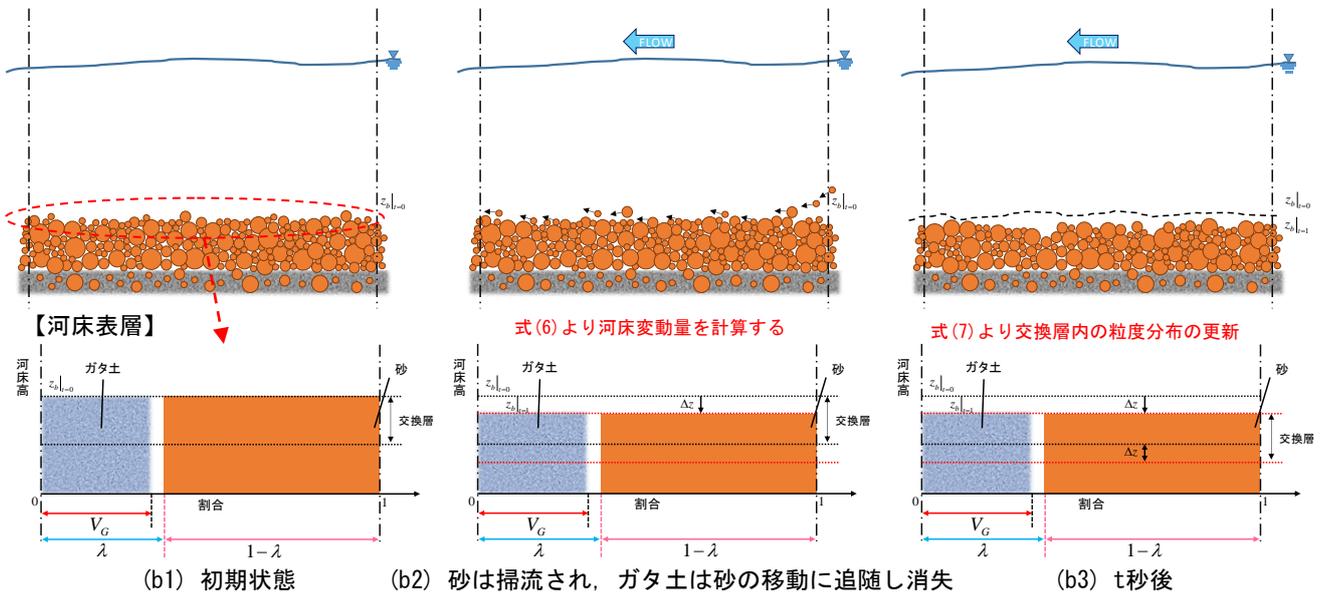


図-4(b) ガタ土と砂の混合河床の河床変動のモデル図 ($V_G \leq \lambda$ の場合の河床低下)

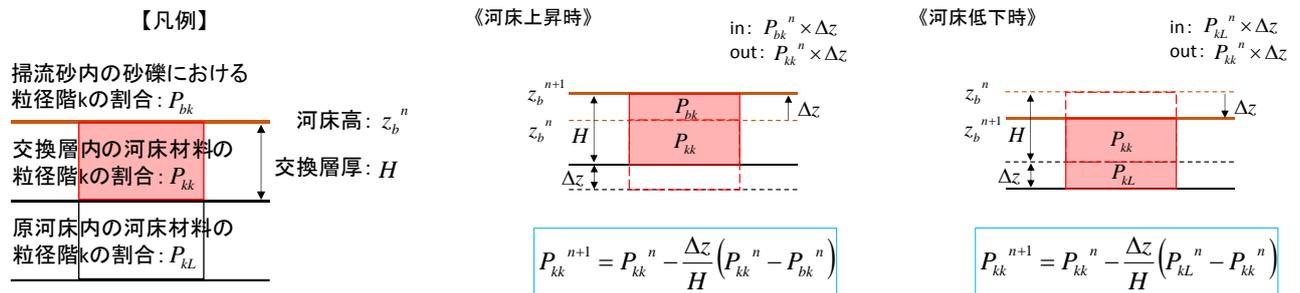


図-5 交換層内における計算のイメージ図

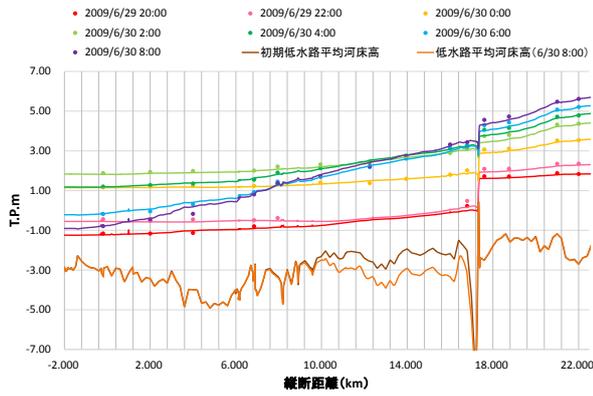
各観測位置の河床材料のコアサンプルデータに基づき、鉛直方向10cm毎の粒度分布と水含有率を解析に取り込んだ。横断面内の分布は考慮せず、縦断分布は実測データの線形補間値を与えた。

粘着性材料の浸食速度の式として関根らの式(4)を用いた³⁾。

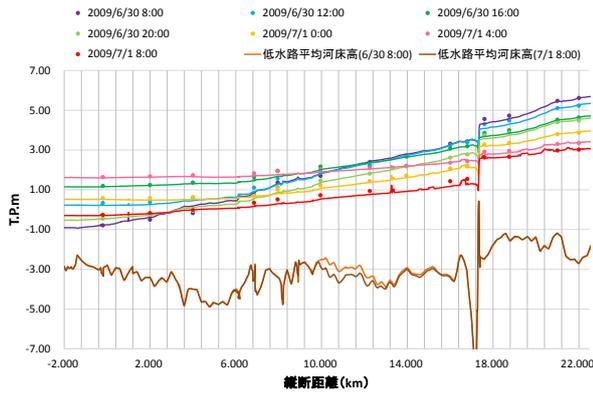
$$E_s = \alpha \cdot R_{wc}^{2.5} u_*^3 \quad (4)$$

ここで、浸食速度 E_s は粘性土の種類や水温に依存する係数 α と水含有率 R_{wc} 、摩擦速度 u^* の関数で表される。横山ら⁶⁾は筑後川洪水でガタ土の浸食に伴う地中温度の変化を観測し、式(4)の $\alpha=0.21 \times 10^{-5}$ を得た。本研究では、このガタ土の浸食速度式と芦田・道上の流量式を用いて河床変動の定量化を試みた。

図-4 にガタ土と砂から成る河床が洪水中に浸食



(a) 6月洪水増水期



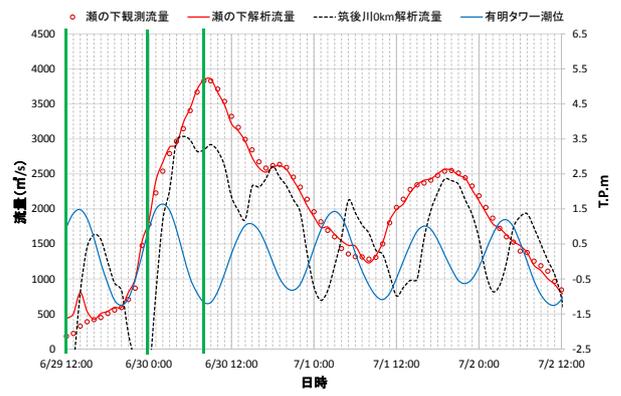
(b) 6月洪水減水期

図-6 縦断水面形の時間変化と平均河床高

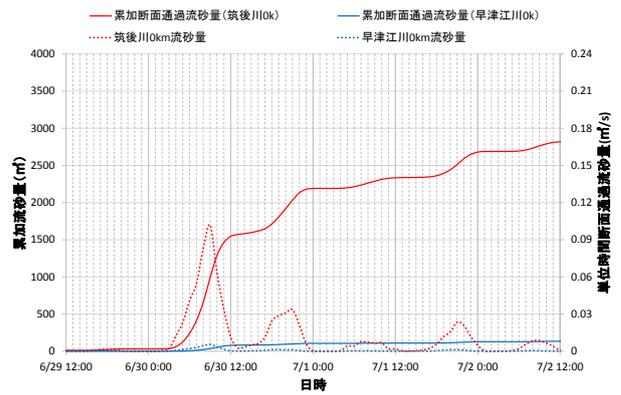
され、どの様な層が河床表面に露出するかを表現するための考え方を模式的に示す。河床に占めるガタ土の存在割合が砂の空隙より大きい状態にある場合と小さい状態にある場合で層内の砂の移動特性が異なる。図-4(a)に示すようにガタ土の存在割合が砂の空隙よりも大きい場合($V_G \geq \lambda$)、つまり、ガタ土が砂を含んでいるような状態では、ガタ土の存在が層の粘着性を増し、砂の移動及び河床高の変動に大きな影響を及ぼすと考える。解析ではこの層の状態を抽象化して考え、図-4(a)の下図に示すように砂のみの領域とガタ土のみの領域が分かれた状態を仮定する。そして、それぞれの河床変動量をそれぞれの移動形態に則した式を用いて計算し、平均した河床高を式(5)により求める。これはガタ土と砂が混合状態にある場合には、流砂量式またはガタ土の浸食速度式を単独で適用するには問題があると考えたためである。掃流力の違いによりガタ土と砂の浸食量は異なる。このため、掃流力が小さい場合にはガタ土のみ浸食し、砂はその場に留まる(図-4(a)参照)。一方、掃流力が大きい場合には砂とガタ土の双方の河床変動量が計算される。

$$z_b^{n+1} = z_b^n - \left(\frac{q_{i+1} - q_i}{\Delta x} \right) \Delta t - V_G \cdot E_s \Delta t \quad (5)$$

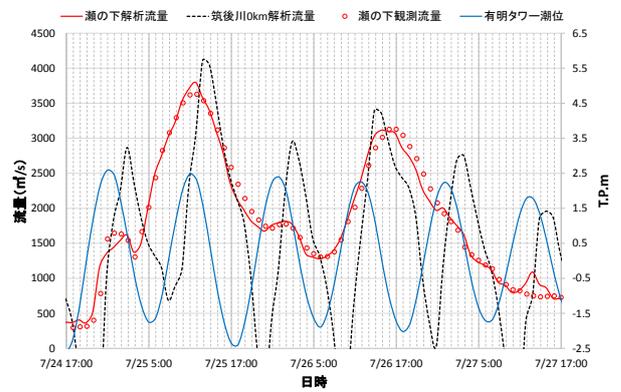
ここで、 z_b は河床高、 q は粒径 $75\mu\text{m}$ 以上の砂の流砂量、 V_G は河床表層に占めるガタ土(粒径 $75\mu\text{m}$ 未満)の体積割合を表す。



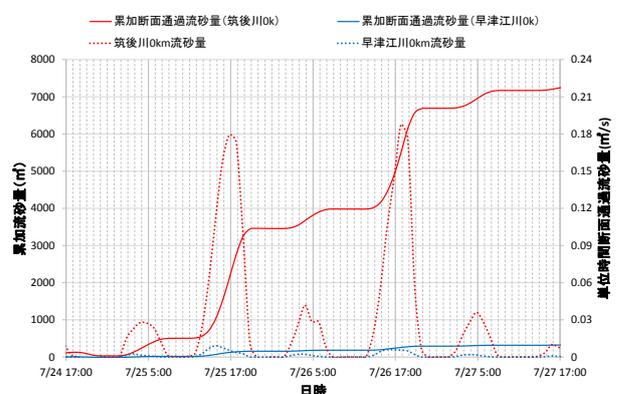
(a) 流量ハイドログラフと有明海潮位 (6月洪水)



(b) 流砂量ハイドログラフと累加流砂量 (6月洪水)



(c) 流量ハイドログラフと有明海潮位 (7月洪水)



(d) 流砂量ハイドログラフと累加流砂量 (7月洪水)

図-7 流量・有明海潮位・流砂量の関係

一方、図-4 (b) に示すようにガタ土の体積割合が砂の空隙よりも小さい場合($V_G < \lambda$), つまり、砂の空隙内にガタ土が存在するような状態では、空隙内のガタ土は砂の移動に追随し、ガタ土の消失は河床高の変動にほとんど影響を及ぼさないと考え、河床変動量を式(6)で示す土砂の連続式で計算する。

$$z_b^{n+1} = z_b^n - \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{q_{i+1} - q_i}{\Delta x} \right) \Delta t \quad (6)$$

ここで、 λ は砂の空隙率(0.4)を表す。

筑後川感潮域では、上流域から運ばれて来る砂と潮汐が運ぶガタ土が混じり合うことで、河床表層が質的に変化する。混合砂礫河床の河床変動モデル⁷⁾では、河床表層に流砂との間で砂粒を交換し粒度分布が変化する交換層を考えることで、流水による分級作用をうける河床変動を表現する。本研究では、導いた式(5), (6)から求められる河床変動量と交換層内の粒度割合の連続式である式(7)より粒度分布の更新を行い(図-5 参照), ガタ土と砂が混在した河床の河床変動を表現する。

$$\frac{\partial P_k}{\partial t} + \frac{\partial (wP_k)}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

ここで、 $w = -\Delta z / \Delta t$ は河床高変動速度(下向き正), Δz は河床高変動量, P_k は粒径階 k の存在割合を表す。 V_G は式(7)から求められるガタ土(粒径75 μm 未満)の粒径割合と含水比より算出する。

また、粒径の小さなガタ土は一度移動を開始すると再び河道内には堆積せず、流れに乗って海まで流下するとして扱う。

3. 解析結果と考察

図-6 に水面形の解析結果と観測値の時間変化及び低水路平均河床高の解析値を示す。水位の低い時間帯で若干の差異が見られるものの、実線で示す解析水面形はプロットで示す観測水位を概ね再現している。また、平均河床高の推移を見ると、6月洪水増水期に10km~17km区間で1.5m程度の河床低下が生じている。これは図-1 で示した河床表層に堆積していたガタ土がフラッシュされたことによるためである。図-7 に流量ハイドログラフと有明海の潮位、及び河口から有明海への単位時間当たり断面を通過する流砂量と断面通過累加流砂量を示す。(a), (c)では黒い破線で筑後川0.0km地点の解析流量、赤線で瀬の下地点の解析流量、赤いプロットで瀬の下地点の観測流量、青線で有明海の実測潮位を示す。また、(b), (d)では赤と青の破線と実線でそれぞれ筑後川と早津江川の0.0km地点における流砂量ハイドログラフと累加流砂量を示す。これらより、瀬の下地点(25.5km)の流量の解析値は観測値を概ね再現することが出来ている。また、河口(0.0km)の流量ハイドログラフは洪水中でも有明海の潮位変動の影響を強く受けており、下げ潮時に流量がピークに達していることが分かる。筑後川河口から有明海に流出す

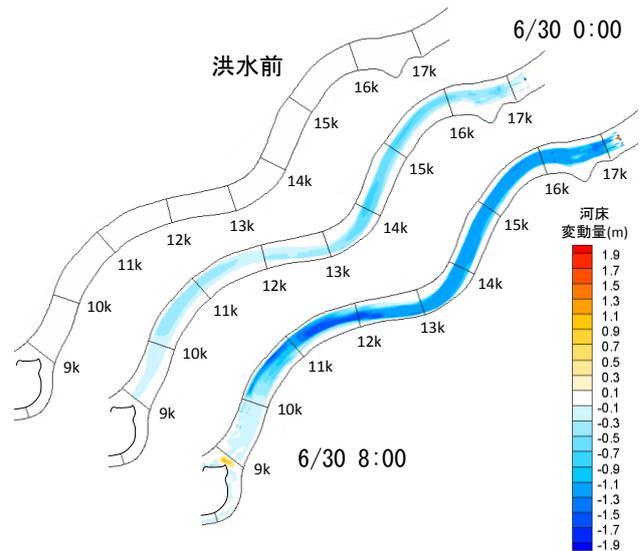


図-8 河床変動量の時間変化 (9km~17km)

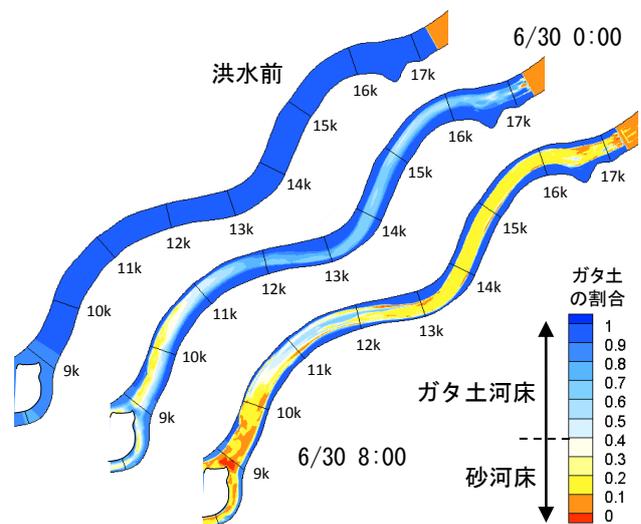


図-9 河床表層の河床材料の時間変化 (9km~17km)

る流砂量も河口の流量と同様に、有明海の潮位変動と共に変化し、干潮時に最も多くの砂が流出していることが分かる。洪水のピーク流量は瀬の下地点と同程度であるが、7月洪水の有明海への砂の流出量は6月洪水の砂の流出量の2倍以上の値となっている。これは、6月洪水時は小潮のため潮位差が3m程度であったのに対し、7月洪水時は中潮のため潮位差が5m程度あり、より多くの流量が河口から流出したためであると考えられる。

河床表層を構成する河床材料の時間変化を把握するため、図-7 (a) 中のハイドログラフの緑色の棒線ですす時刻における9km~17km区間の河床変動量コンターの解析結果を図-8 に示す。図-9 は同地点の河床表層に占めるガタ土の体積割合の解析結果であり、白~青色がガタ土河床、白~赤色が砂河床である。これらより、洪水前に10km~17kmに堆積していたガタ土が6月洪水増水期に全て掃流され、洪水ピーク時には、砂が河床面に露出していることが分かる。この区間では粗度が上昇することが予測されることから、解析ではこの区間の粗度係数を観測水面形を再現するように0.021→0.028に時間的に変化

させた。次に洪水前後の河床変動量コンターの比較を図-10に示す。(a)は23km~14km, (b)は15km~5km, (c)は6km~有明海の区間を表す。それぞれ左側が洪水前後の実測値, 右側が洪水前後の解析結果を示している。本解析では, 実測より得られたガタ土が多く堆積し, 鉛直方向に粒度分布の変化の大きい区間(10km~17km)での河床洗掘の傾向を良好に再現している。しかし, 6kmより下流域で実測の河床変動量よりも小さな傾向を示す結果となった。これは筑後川感潮域では河床に存在するガタ土の影響で, 砂同士のかみ合わせが弱まり, 砂だけの均一状態で存在している場合よりも砂の移動がしやすいためであると考えられる。

4. 結論

本研究では, 密に観測された筑後川感潮域の洪水時の水面形の時間変化, 河床材料や縦横断面形の観測データを用い, 砂とガタ土が入り混じった複雑な河床構造を有する筑後川感潮域における洪水流と河床変動の検討を行った。以下に主な結論を示す。

- 1) 筑後川感潮域での洪水時の河床変動を再現するため, 砂とガタ土の輸送特性, 混合状態に応じた掃流・浸食形態を考慮し, 時々刻々変化する表層と各層内の土砂のやり取りについて新しいモデル化を行った。そして, 観測水面形の時間変化を解とした洪水流のGBVC法とこの新しい河床変動モデルを用いた一体解析を行うことによって洪水時の観測流量ハイドログラフ及び河床変動を説明した。これより, 本解析手法が筑後川感潮域の洪水流・河床変動の解明に有効であることを示した。
- 2) 平成21年に発生した2洪水によって, 10,000^m程度(6月:約2,800^m, 7月:約7,200^m)の砂が筑後川から有明海へ流出していることを示した。筑後川感潮域では洪水時だけでなく, 平水時の大きな潮位変動により発生する流れによって有明海へ砂が流出している。今後は, 平水時についても有明海への砂の流出量について検討をする必要がある。

参考文献

- 1) 鈴木健太, 島元尚徳, 久保世紀, 福岡捷二: 筑後川感潮域の洪水時の河床変動解析, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.67, No.4, I_877-I_882, 2011.
- 2) 海田輝之, 楠田哲也, 二渡了, 粟谷陽一: 柔らかい底泥の巻き上げ過程に関する研究, 土木学会論文集, 第393号/II-9, 1988.5.
- 3) 西森健一郎, 関根正人: 粘着性土の浸食過程と浸食速度式に関する研究, 土木学会論文集B, Vol.65, No.2, pp.127-140, 2009.6.
- 4) 内田龍彦, 福岡捷二: 浅水流の仮定を用いない水深積分モデルによる底面流速の解析法, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.68, No.4, I_1225-I_1230, 2012.
- 5) 内田龍彦, 福岡捷二: 様々の水深積分モデルを用いた

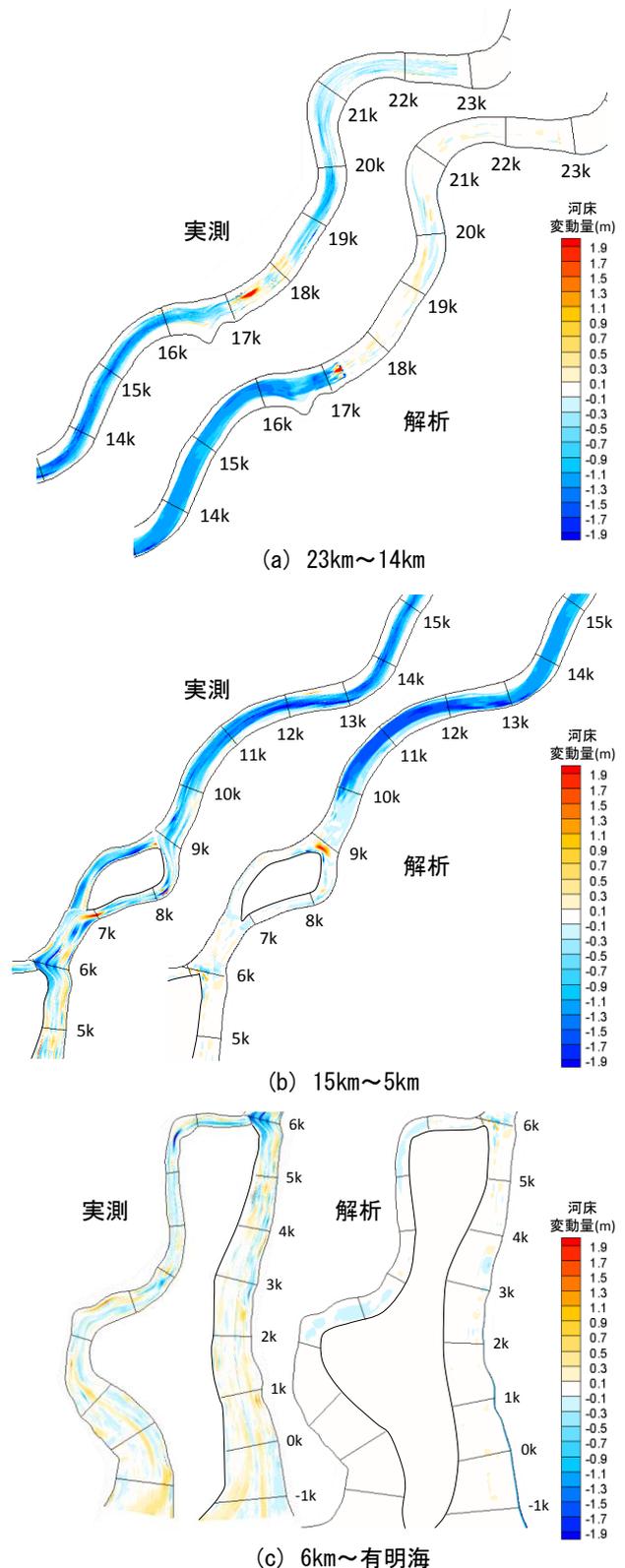


図-10 河床変動量コンター図 (洪水前後)

- 湾曲部三次元流れ機構と適切な解析法の考察, 土木学会年次学術講演会, 第II部門, 2016.
 - 6) 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.71-82, 2008.3.
 - 7) 平野宗夫: Armoringをともなう河床低下について, 土木学会論文報告集, 第195号, pp.55-65, 1971.11.
- (2015.9.30受付)