

# ガタ土と砂礫で構成される筑後川感潮域の 洪水及び平水時の土砂移動と河床変動 Bed variation and sediment transport by floods and tide in the Chikugo River estuary with complex bed structures

14N3100011B 金子 祐  
Yu KANEKO

**Key Words :** bed variation analysis, 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淡水とそれに伴う土砂輸送量は、有明海の水環境にとって重要である。鈴木ら<sup>1)</sup>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(図-1,2 参照)、特異な河床変動が起こっていることを示した。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きたが、砂の移動流出に着目した研究は少ない。鈴木らは、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、鈴木らの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、鈴木らの解析モデルの問題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し、有明海への砂の流出量を見積る。次に、筑後川感潮域は我が国最大の干満差(最大6m)を有する有明海の潮位変動の影響を受けるため、上げ潮時に海域から河道内に淡水が流入し、再び海に流出する。この水のボリュームは平常時の流量に比べ非常に大きく、それに伴う土砂移動量も大きくなる。そのため、平水時の潮汐流による流動及び土砂輸送量は、有明海の環境問題を検討する上で洪水時と同様に重要である。そこで本研究では、筑後川感潮域での洪水時及び平水時の大きな潮位変動に伴う土砂移動に着目し、有明海への年間土砂流出量を見積もることを目的とする。

## 2. 対象区間と対象期間

対象区間は図-3 に示す筑後大堰(23km)~有明海までとする。対象は平成21年に発生した年平均最大流量を超える3,850m<sup>3</sup>/s(6月)と3,650m<sup>3</sup>/s(7月)の2洪水について検討を行う(表-1 参照)。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

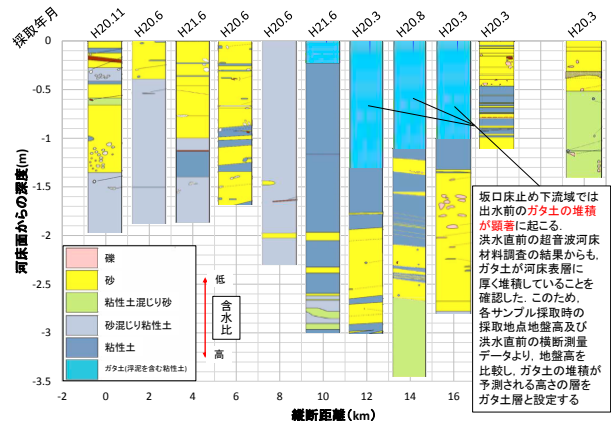


図-1 河床材料鉛直柱状図

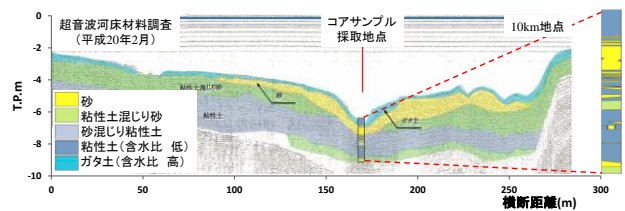


図-2 超音波河床材料調査結果(10km地点)



図-3 対象区間と観測位置

表-1 対象洪水詳細

	6月洪水	7月洪水
ピーク流量	3850[m <sup>3</sup> /s]	3650[m <sup>3</sup> /s]
洪水ピークの回数	2	2
洪水継続時間(日)	3	3
潮位変動の大きさ	小潮	中潮
年平均ピーク流量	2850[m <sup>3</sup> /s]	
計画高水流量	9000[m <sup>3</sup> /s]	

洪水の直前・直後に縦断間隔200m毎に河床横断面形が観測された。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。

### 3. 河床のモデル化と河床変動解析法

ガタ土と砂で形成された複雑な河床構造は、ボーリングにより採取された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むことで再現した。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、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説明するため、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いません。このため、砂の移動量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、ガタ土層を流出入する砂の量を考慮していません。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、これらの問題点を考慮し、さらに、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、これを用いて非定常準三次元洪水河床変動解析を行った。ガタ土は砂と異なる特有の浸食形態を示すことから、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と考えられる。そこで、ガタ土の浸食速度式と、芦田・道上の流砂量式を用いて河床変動の定量化を試みた。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ものと考えられる。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、それぞれの河床構成材料の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(1)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のは不正確である。掃流力が砂の限界層流力以下の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、砂の限界層流力を超えた場合には砂とガタ土の双方の河床変動量が計算される。

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

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、 $E_s = \alpha \cdot R_{uc}^{25} \cdot u_*^3$ ( $E_s$ は粘性土の浸食速度、係数

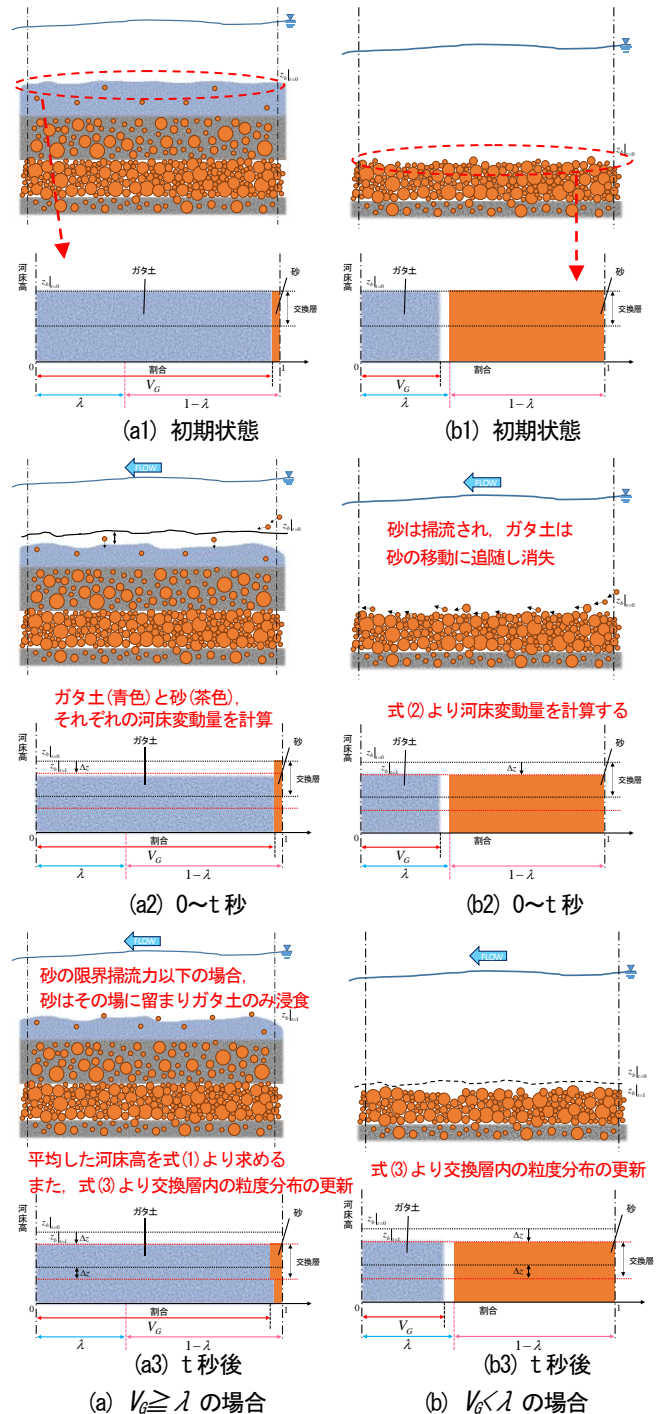


図-4 河床変動のモデル図 (河床低下)

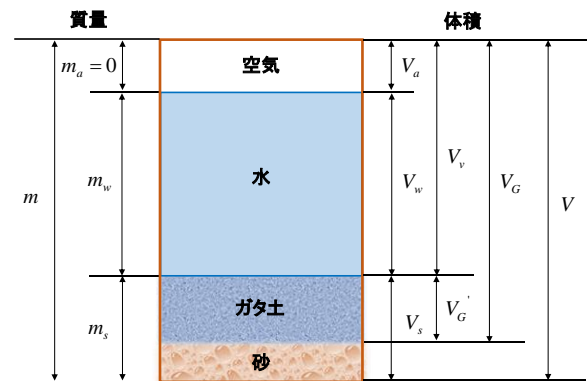


図-5 各層の重量と体積 ( $V_G$ の割合について)

$\alpha=0.21 \times 10^5$ ,  $R_{wc}$ は水含有率,  $u^*$ は摩擦速度) を表す.

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従し, 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(2)で示す土砂の連続式で計算する.

$$z_b^{n+1} = z_b^n - \frac{1}{1-\lambda} \left( \frac{q_{i+1} - q_i}{\Delta x} \right) \Delta t \quad (2)$$

ここで,  $\lambda$ 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(1), (2)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(3)より粒度分布の更新を行い, ガタ土と砂が混在した河床の河床変動を表現する.

$$\frac{\partial P_k}{\partial t} + \frac{\partial(wP_k)}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

ここで,  $w = -\Delta z / \Delta t$  は河床高変動速度 (下向き正),  $\Delta z$  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(3)から求められるガタ土 (粒径  $75\mu\text{m}$  未満) の粒径割合と含水比より算出する (図-5 参照).

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.

#### 4. 解析結果

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再現している. 図-7 に流量ヒ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あたりに断面を通過する流砂量と断面通過

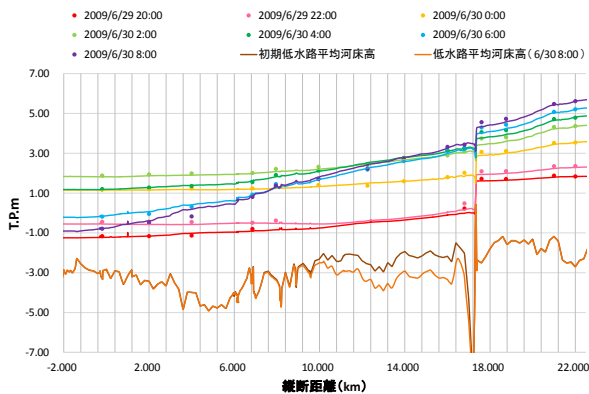
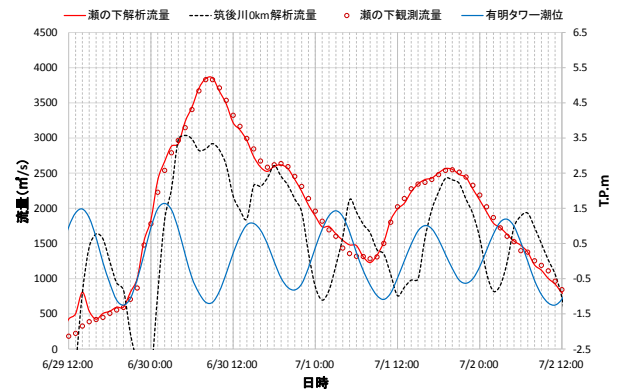
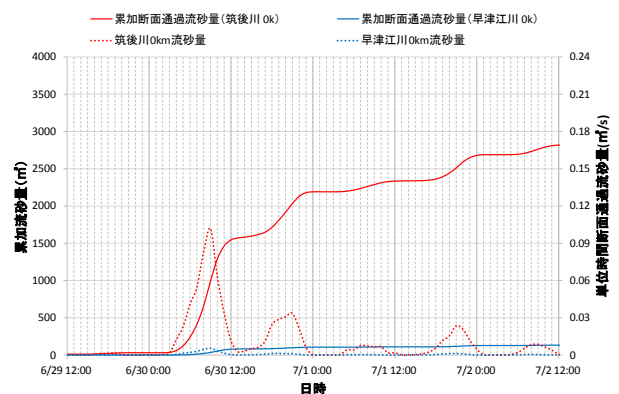


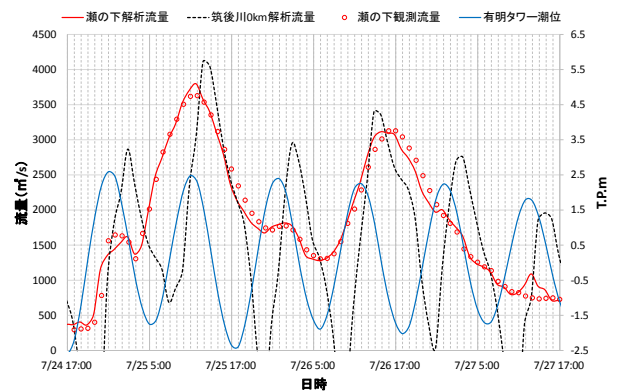
図-6 縦断水面形の時間変化と平均河床高



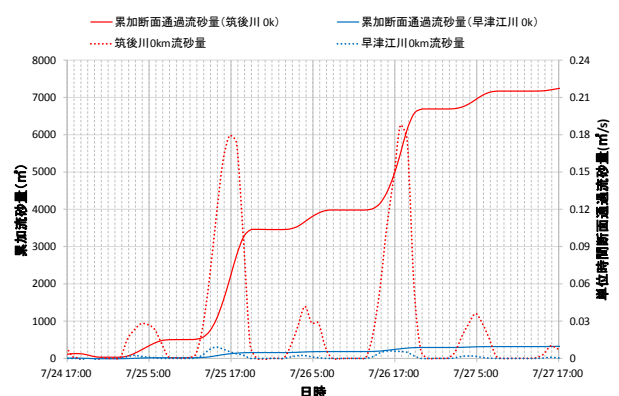
(a) 流量ヒドログラフと有明海潮位 (6月洪水)



(b) 流砂量ヒドログラフと累加流砂量 (6月洪水)



(c) 流量ヒドログラフと有明海潮位 (7月洪水)



(d) 流砂量ヒ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



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で同程度であるが、7月洪水の有明海への砂の流出量(約 7,200 m<sup>3</sup>)は6月洪水の砂の流出量(約 2,800 m<sup>3</sup>)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。

次に洪水前後の河床変動量コンターの比較を図-8に示す。(a)は 15km~5km, (b)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。

図-9に大潮~中潮~小潮の一連のサイクルを含む平水時の15日間の筑後川河口での流量・流速ハイドログラフと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。これらより、平水時は潮位変動と共に順流と逆流を繰り返し、小潮時よりも大潮時の方が流速・流量共に2倍程度大きいことが分かる。またこれに伴い、大潮時に多くの砂が移動し、1サイクル(15日間)で 150 m<sup>3</sup>の砂が筑後川から有明海へ流出していることが明らかになった。これを洪水期間を除いた平水時年間の流砂量(11.5ヶ月分)に換算すると約 3,450 m<sup>3</sup>となる。

## 5. 結論

本研究では、密に観測された水面形の時間変化、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。その結果、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。また、平成21年に発生した2洪水によって、10,000m<sup>3</sup>程度(6月:約2,800m<sup>3</sup>, 7月:約7,200m<sup>3</sup>)、平水時の潮汐流により3,450m<sup>3</sup>程度の砂が筑後川から有明海へ流出しており、合算すると年間1万m<sup>3</sup>を超える砂が有明海へ流出していることが明らかになった。

## 参考文献

- 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中の河床変動解析, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.67, No.4, I\_877-I\_882, 2011.

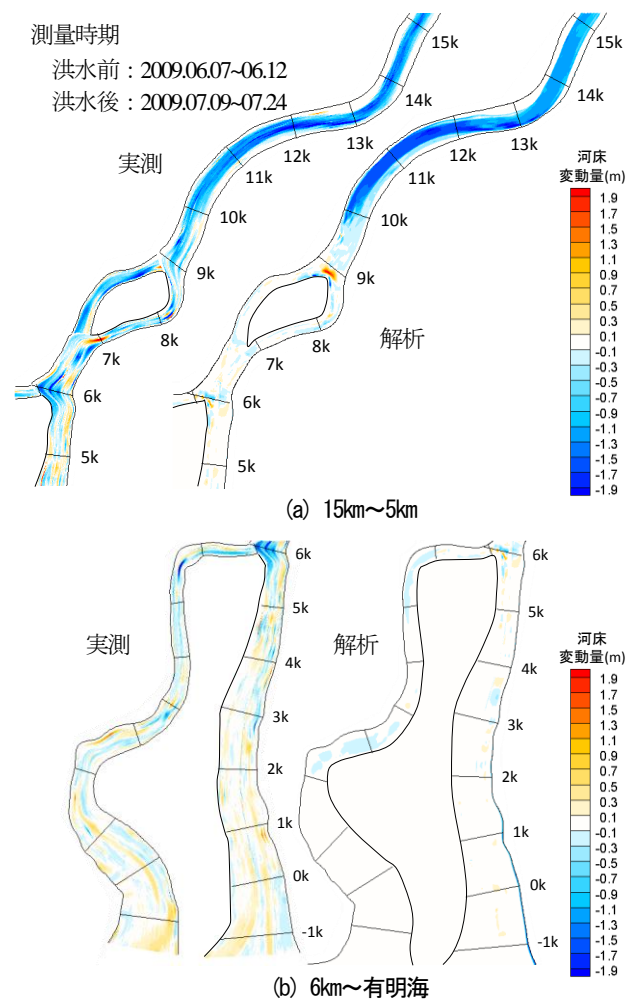


図-8 河床変動量コンター図(洪水前後)

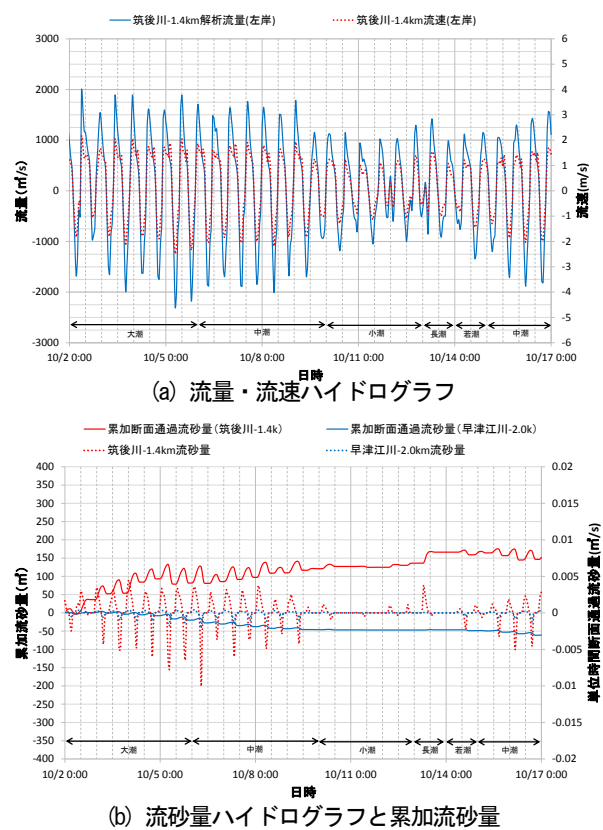


図-9 流量・流速・流砂量の関係(平水時)