筑後川感潮域の洪水中の河床変動解析

BED VARIATION ANALYSIS
IN THE CHIKUGO RIVER ESTUARY BY THE FLOOD FLOWS

鈴木健太¹・島元尚徳²・久保世紀³・福岡捷二⁴ Kenta SUZUKI, Hisanori SHIMAMOTO, Seiki KUBO and Shoji FUKUOKA

1学生会員 中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻(〒122-8551 東京都文京区春日 1-13-27)
2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丁目2番1号)
3国土交通省 九州地方整備局 筑後川河川事務所 調査課 (同上)
4フェロー 工博 Ph.D 中央大学研究開発機構教授 中央大学理工学部特任教授
(〒122-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

A series of fisherie issues in the Ariake sea has been believed to be caused by a lack of sand supply from the Chikugo river on the basis of few investigations of characteristics and amount of sediment transport in the the Chikugo river estuary. The core sampling and super-sonic echo sounder indicates that the vertical structure of mid stream of the Chikugo river estuary is consists of complex alternate layer and the rate of water content is much different to each layer. To make the rate of sand transport in the Chikugo river estuary clear, the authors applied unsteady quasi-three dimensional flood flow and river bed variation analysis using observed temporal changes in water surface profiles of 2009 flood. In the analysis, the bed layer which the rate of water content upper than 70% is calculated by the experimental equation of erosion speed of the cohesive material. The results of analysis indicates that the rate of sand supply is strongly affected by the tidal level change of the Ariake sea.

Key Words: Sand, Alternate layer, Unsteady bed variation analysis, Temporal changes in water surface profiles

1. 序論

有明海は最大6mに及ぶ潮位変動により多様な生態系が形成されている。この有明海で、近年海苔の変色やアサリの不作といった漁業問題が発生し問題視されている。この一連の問題の大きな原因として、有明海に注ぐ最大の河川であり、全河川流域の約35%を占める筑後川流域からの土砂流出量、特に砂分の減少が有明海の底質泥化を助長しているとの報告がなされている¹⁾.

実際に有明海湾奥部や、筑後川感潮域の河岸際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に覆われている。これは、有明海特有の大きな潮位変動を日々繰り返す中で、有明海から運搬され堆積したものである。このように、普段の河川流量で我々が目にすることのできる筑後川の姿から、砂分量は少なく、有明海への土砂供給量は少ないと考えられてきた。これまでに、粘着性を有する材料の浸食について、例えば関根らは、カオリンなどの粘土を用いた基礎的な研究を積み重ね、粘着性土の浸食速度式を提案した2)。また六角川感潮域で採取した互層状態でないサンプルについてにも同様の室内実験を実施し、提案した浸食速度式を適用し得ることを示した3)。また、横山らは筑後川感潮域の粘着性を有するガタ土やシルトなどの細粒分に着目し数多くの検

討を行ってきた. この中で, 温度計を用いた独創的な方 法で洪水中の河床高の時間変化を観測し、関根らが提案 した粘着性土の浸食速度式を基に筑後川でのガタ土層の 浸食速度の実験式を得た4). しかし、河床の砂やガタ土 層と砂の互層構造に着目した研究は少なく,砂の存在量 や有明海への流出量が量的に少ないものとみなされてき た5. このため、有明海の環境変化の議論では、シル ト・粘土の堆積が増大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 多くの研究がなされ、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蓄積されてこな かったことから、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を行い、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, 河床を構成する材料に関して多 くの知見を得た⁶. 著者らはこれらの研究を更に進め、 2009年洪水を対象に、観測された水面形の時間変化を解 とした非定常準三次元洪水流と河床変動の一体解析を適 用し、筑後川感潮域での土砂流出現象の説明を試みた⁷. しかし、有明海特有の大きな潮位変動と複雑な河床構造 を有する筑後川感潮域から有明海への土砂流出量を定量 的に見積もるまでには至っていない. これらの研究を進 める中で, 2010年7月に発生した3400m3/s(速報値)の洪 水に対して、セグメント式の掃流センサーを洪水前に設

置し、洪水中の河床低下のタイミングと変動量を観測した.これは、導線で連結した鉛直方向10cm毎の中空セグメントが洪水中に掃流され、電圧が変化したタイミングを記録することで河床高の時間変化を観測するものである.図-1に掃流センサー設置個所の洪水前後の鉛直材料構造と、各層が掃流された時間の重ね合わせを示し、河床が洗掘されてセンサーが流出した時刻と各地点での水位ハイドログラフに対する有明海潮位の関係を図-2に示している.これらより、洪水流と潮位変動に伴って洪水中に相当量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.そこで、本論文では、河床材料が互層をなす筑後川感潮域における河床材料の掃流・浸食特性を考慮することにより、数値シュミレーションにより実現象を再現し、洪水中の河床変動を定量的に評価することを試みている.

2. 検討対象区間の河床材料特性

(1)検討対象区間

検討対象区間の平面図及び観測項目を図-3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勾配である. 2009年6月に瀬の下水位流量観測所(25.5km)において,平均年最大流量2850㎡/sに対して,3850㎡/sの流量が観測された.洪水中に,縦断水面形の時間変化を把握する目的で,図-3に赤丸で示す場所において,5分間隔で詳細な水位時系列が観測された.対象洪水ピークは有明海での潮位が最干潮時と重なり,河道内の水位は有明海の潮位変化の影響を強く受けていた洪水であった.

(2) 筑後川感潮域の河床材料特性

筑後川感潮域の河床材料特性を把握する目的で、図-3中の青四角に示す地点において概ね2km間隔の河床材 料調査が行われた. 河床材料調査は、各観測点におい て主流部と思われる個所にエアーバイブレーターの振 動によりサンプラーを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, 鉛直方向河床柱状図が 作成された. コアサンプリング調査は、各横断調査面 内の一点の鉛直河床材料特性を示し、必ずしも観測点 の横断河床材料分布を代表したことにはならない。そ こで、超音波河床堆積構造調査の結果とコアサンプリ ング調査結果の比較を行った. 超音波河床堆積構造調 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-4に10.0km地点における コアサンプリング調査と、超音波河床堆積構造調査の 比較を示す. 鉛直河床構成は河岸際で粘着性土が堆積 していることが超音波河床堆積構造調査の結果では見

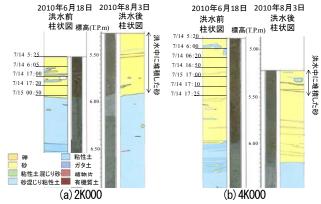


図-1 2010年洪水中砂層の掃流のタイミング

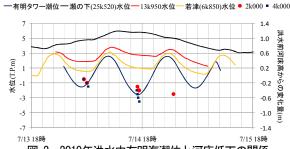


図-2 2010年洪水中有明海潮位と河床低下の関係



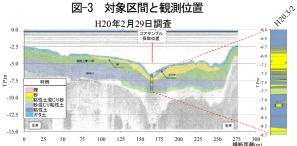


図-4 コアサンプル調査と超音波河床堆積構造調査の 比較(10kmを例に)

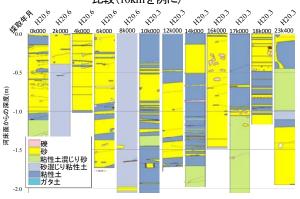
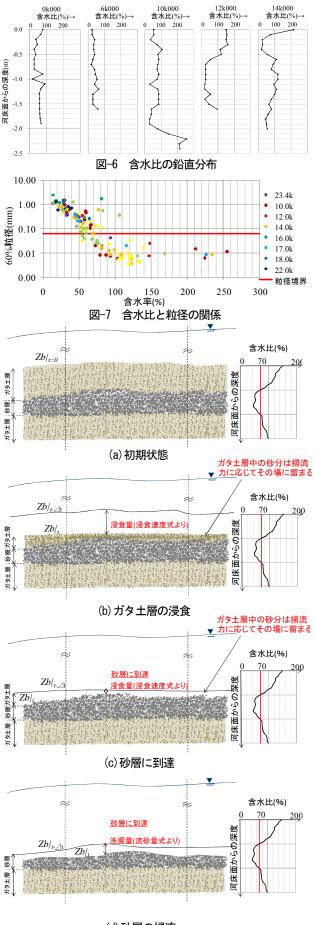


図-5 コアサンプル調査結果

てとれる. これは、大きな潮位変動を日々繰り返す過程 の中で、上げ潮時に有明海から運搬されてきたガタ土が、 引き潮時に河岸際に堆積したものであると考えられる. しかし、河岸際を除く河道中央部においては、双方の調 査結果は良好な一致を示しており、コアサンプル調査の 結果を縦断的な河床材料の鉛直分布特性の把握に用いる ことが可能である。コアサンプリング調査の結果を図-5 に示す。0km~6kmの区間では、河床表層を厚い砂層が 覆い,砂分が卓越している.一方で,10km~14kmの区 間は表層を粘性土が覆い、その下を粘性土と砂が複雑な 互層構造をなしていることがわかる. この付近の河床表 層に粘着性土が多いのは、14km付近が塩水の遡上限界 で、上げ潮時に有明海から運搬されるガタ土(細粒分)が フロッキュレーションを起こし,砂層の上に堆積してい ためと考えられ、横山らの結果⁴に整合する. また、採 取されたサンプルを基に、鉛直方向10cm毎の粒度分布、 含水比を調査した、含水比の鉛直分布を図-6に示す、コ アサンプリング調査の結果から、砂分が卓越していた 0km~6kmの区間では含水比が低く、鉛直方向の変化は少 ない. 一方で, 河床表層を粘性土が覆い, 粘性土と砂が 互層をなして存在している10km~14kmの区間では鉛直方 向に含水比の変化が大きい. また、図-7に示すように含 水比とd₆₀粒径の関係を考察した.赤線で砂分と細粒分の 粒径境界を示している. 含水比とd60粒径には一定の関係 があり、概ね含水比が70%を超えると細粒分が卓越し、 大きいものでは250%を超える含水比に達している. こ れは、砂層の上に存在するガタ土の締め固めが進行して おらず、浮泥の様な状況で堆積していると考えられる.

3. 互層をなす筑後川感潮域の洪水時の河床変動

筑後川のような感潮河川では、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. 福岡らは、洪水時に河道内で起 きる各種の水理現象は、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、対象区間内の観測水 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、洪水中の流れ場と河床高時間 変化を再現している8. 岡村・福岡らは本解析手法を石 狩川洪水に適用することで、時空間的に境界条件が変化 する河川での河床変動と流れ場の双方を再現し、河床変 動について重要な知見を得た⁹. 著者らはこれまで、最 大6mの潮位変動を有する筑後川感潮域の洪水流下特性 と、それに伴う砂の移動特性を明らかにするため、2007 年7月に発生した洪水に、観測された縦断水面形の時間 変動を解とした非定常平面二次元流解析を適用した10. しかし、この解析は洪水中の河床変動を考慮していない ため, 実際にどの程度河床変動が生じ, 有明海へ砂が流



(d)砂層の掃流 図-8 互層をなす河床における河床変動の概念図

出したかを定量的に評価するには至っていない. そこで, 2009年6月に発生した洪水に対し、内田、福岡らによる 静水圧分布を考慮せずに鉛直流速分布、底面流速を求め ることができる渦度方程式を用いた準三次元洪水流解析 と河床変動の一体解析11)を適用し、筑後川感潮域から有 明海への土砂流出現象の定量化を試みた⁷⁾. 解析におい て、筑後川感潮域の特徴である河床鉛直互層構造を、密 に観測された10cm毎の鉛直粒度分布を初期条件として取 り込むことで表現した.解析の簡便化の為,粒径の小さ なガタ土を非粘着性の材料として扱い、限界掃流力を超 え一度移動を開始したら再び河道内に堆積はせず、流れ にのって海まで流下するとして扱っている. しかし, 実 洪水中のガタ土は、砂と同様の掃流形態を示さず、特有 の浸食形態を示すことが考えられる12). このように実現 象と解析モデル化の乖離により、鉛直方向に複雑な互層 構造をなす筑後川感潮域の河床変動を精度よく説明する に至っていない、本論文では、これらの検討を更に進め、 洪水中に、時々刻々どの様な材料の層が河床表面に露出 しているかに着目し、各層の土砂の移動機構を考慮に入 れ、複雑な互層構造をなす筑後川感潮域の河床変動と有 明海へ流出する砂の量を説明することを目的としている.

(1) 互層をなす筑後川感潮域での河床変動のモデル化

これまで、粘着性材料に関する様々な研究がおこなわれてきた. 関根らは、式(1)に示すように粘着性を有する河床において、浸食速度を求める実験式を提案した²⁾.

$$Es = \alpha \cdot R_{wc}^{2.5} u_*^3 \tag{1}$$

浸食速度は粘性土の種類や水温に依存する係数αと水 含有率 R_{uv} 、摩擦速度 u_* の関数で表される、横山らは2006年に筑後川で発生した洪水を対象にし、温度計を用いて 時々刻々の地中の温度変化を観測することで、ガタ土の 浸食速度に関根の式を適用し、 α =0.21×10 5 と算定した 4). 本研究ではこれらの粘着性土の浸食速度式と、掃流砂の 流砂量式を組み合わせることで河床変動の定量化を試み た. ここで、河床が互層をなす筑後川感潮域での河床変 動について、本研究で採用した考え方を図-8に示す. (a) に示すように、初期条件として各観測位置で採取さ れたコアサンプル結果を基に鉛直方向10cm毎の粒度分布, 水含有率の情報を取り込む. ここで、断面内での横断分 布は持たせず、縦断分布は実測値の線形補間値を与えた. また、粒度分布は混合粒径として扱う. 先の含水比と粒 径の関係から、含水比が概ね70%を超えると細粒分が卓 越し、砂の流砂形態とは大きく異なると考えられる。 そ こで、(b)に示す様に含水比が70%を超える層に達した 場合、関根らによる粘着性土の浸食速度式を用いて地盤 高を解析した. ここで、ガタ土に相当する微細な材料は これまでの検討⁷⁾と同様に限界掃流力を超え一度移動を 開始したら再び河道内に堆積はせず、流れにのって海ま で流下するとして扱っている. また, ガタ土層中に少量

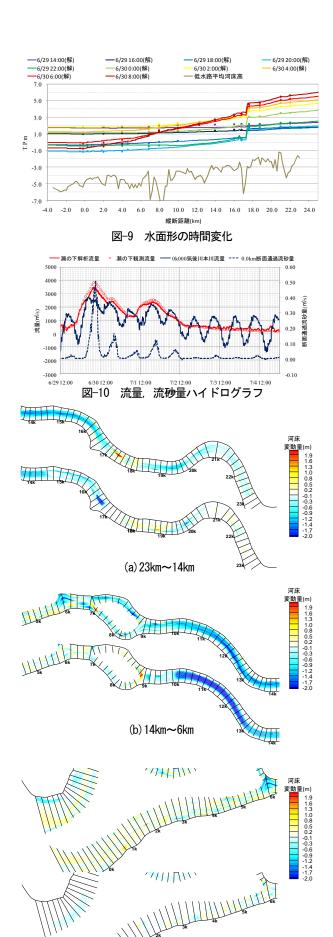
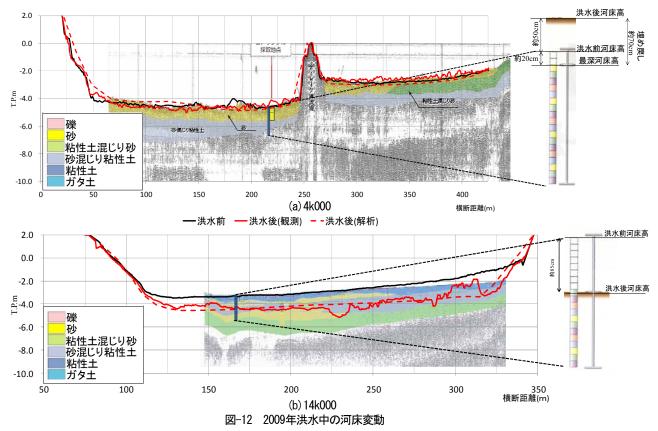


図-11 河床変動量コンタ一図

(c) 6km~有明海



含まれる砂分は掃流力に応じて下流へ掃流されるか、その場に留まるかを判定した. 浸食が進み、(c)に示すように含水比が70%を下回る砂層に到達した時点で河床変動解析を浸食速度式から掃流砂の流砂量式に切り替え、流砂量と河床高変化を計算した. 洪水中の時々刻々の地盤高変化は、時空間的に密に観測された水面形の時間変化に影響が現れていると考えられる. そこで、芦田、道上の掃流砂量式の係数は、水面形の時間変化、洪水前後の河床変動量の実測値からのズレがそれぞれ最少になるように85に決定し、式(2)を用いた.

$$q_{B_k} / P_k u_* d_k = 85\tau_{*k} \left(1 - \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}}} \right)$$
 (2)

このように本解析で採用した式が芦田・道上の式の係数と異なるのは、砂とガタ土の互層状態が異なり掃流形態が洪水毎に一様でないなど、様々な要因が考えられるしかし、これらの影響が積分された形で表れている観測水面形の時間変化に対し、これを解とするように解析することで実現象を再現できると考えている.

(2) 河床変動解析の条件

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、測量時の地盤高は洪水直後の地盤高を表していない。そこで、2009

年に洪水による河床変動量を把握するため、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出来るだけ小さ くすることにより、貴重なデータを得た、解析対象区間 は23.0km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22.8km, 下流に0.0kmで観測された水位ハイドログ ラフを与えた. 上流からの土砂流入条件は, 経年的な地 盤高変化が比較的少ない筑後大堰下流の洪水前後での河 床変動量が実測値と近くなるような流砂量を試行錯誤的 に求め、与えた、図-9に解析水面形と観測水面形の時間 変化の比較を示す、実線で解析により求めた縦断水面形 の時間変化を示し、同色の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. 観測水位と解析水位は、有 明海が満潮時で水面勾配がほぼ水平になる時間帯で若干 の差異がある。しかし、洪水ピークを含むその他の各段 階において解析水面形は観測水面形を再現できている. 図-10に流量ハイドログラフと流砂量ハイドログラフの 重ね合わせを示す、赤線で瀬の下水位流量観測所におけ る解析流量,赤色マーカーで同地点の観測値を示す.ま た,青線で筑後川0.0km地点の解析流量と,破線で筑後 川本川0.0km地点における流砂量の時系列変化を示して いる. 瀬の下地点の解析流量は波形, ピーク流量共に観 測値を良好に再現している. 下流(0.0km)の流量時系列 は洪水ピーク中も有明海の潮位変動の影響を強く受けて

いることがわかる. 筑後川河口から有明海に流出する流 砂量も流量と同様に、有明海の潮位変動と共に時間的に 変化し、有明海の干潮時刻に重なった洪水ピーク時に最 も多くの砂が流出されている. その後, 洪水減水期には, 縦断水面勾配が大きくなる有明海干潮時に満潮時に比べ 多くの砂が流出していることがわかる.これは**図-1,2** に示す2010年洪水中に観測された河床高時間変化の傾向 と一致している. 次に河床変動量コンターの比較を図-11に示す. (a)は23km~14km, (b)は14km~6km, (c)は6 km~有明海の区間である. それぞれ上段が実測, 下段が 解析を示している. それぞれの区間の河床材料特性は, 日々の潮位変化により河床が互層構造をなしている9km ~17kmの区間と、砂分が卓越している18km~23km、有明 海~9kmに大別される. (1)の河床変動のモデル化でも述 べたように、河床が互層をなしている区間について、詳 細に測られた鉛直方向粒度分布, 水含有率を取り込み, それぞれの層に応じた掃流、浸食の形態を考慮し、観測 水面形の時間変化に解析値がほぼ一致するように流砂量 式の係数を同定することで解析値は観測値の洗掘、堆積 傾向を良好に再現している. しかし、ガタ土と砂が互層 をなして存在している9km~17km区間において、解析値 は観測値より大きな洗掘が生じている. これは、ガタ土 層中の含水比や、砂との互層形態が縦横断鉛直的に、ま た洪水毎に様々に変化しており、筑後川2009年洪水中の 洗掘速度は、必ずしもこれまでに報告されている実験結 果や現地での観測値^{2),3),4)}で説明が出来なかったためであ ると考えられる. この点に関して、浸食速度中の水含有 率のべき乗を2.0乗程度の値にすると河床変動量、水面 形の時間変化共に観測値と解析値の差異が少なくなるこ とが明らかになったが、他洪水での検証が必要である. 2009年洪水中に、図-3 中に星印で示す4.0kmと14.0km地 点 に予め洪水前に器具を設置することにより、洪水中 の最大洗掘深と、埋め戻し深が観測された. 各地点の実 測、解析による河床高の変化と超音波河床堆積構造調査 の結果を重ね合わせて図-12に示す. 4.0km地点では洪水 中に約20cmの砂層が掃流された. また, 洪水後河床高 は、洪水前河床から50 cm高く、洪水時の最深河床は洪 水前河床高から20 cm低い値が記録された. このことよ り, 洪水中の河床変動は約70cmの埋め戻しが生じてい たことがわかる. 14.0km地点では洪水中に約85cmの洗 掘が生じ、洪水前に河床表層を覆っていたガタ土と、そ の下の互層が掃流されたことが実測値から示され、解析 値と良好な対応関係にある.

4. 結論

(1) 空間的に密に観測された河床構造調査の結果, 筑後 川干潮域では河口から6kmの区間では河床表層を砂

- 層が覆っており、砂分の多い河床材料特性となっている.一方、10kmから14kmの区間では日々の潮位変動を繰り返す中で有明海から運搬されてきた粘着性のガタ土と砂が複雑な互層構造をなし、鉛直方向に含水比、粒度分布が大きく異なる.
- (2) 鉛直方向の含水比と粒径には一定の相関関係があり、含水比が概ね70%を超えると細粒土砂が卓越する.
- (3) 観測水面形の時間変化を解とした洪水流と河床変動の一体解析を適用した. 鉛直方向に詳細な粒度分布,水含有率を考慮し,それぞれの材料特性に応じた浸食・掃流形態を考慮し,観測水面形の時間変化に解析値がほぼ一致するように流砂量式の係数を同定することで複雑な互層構造と大きな潮位変動を有する筑後川感潮域の洪水中の河床変動を説明した.
- (4) 2010年洪水中にセグメント式掃流センサーを用いて河床高の時間変化を観測した。筑後川感潮域の河床変動は有明海潮位の影響を強く受け、水面勾配が急になる干潮時に大きな洗掘が生じ、洪水減水期に砂の埋め戻しが生じる。また、解析により求めた2009年洪水中の流砂量の時間変化も有明海の潮位変化の影響を強く受け、2010年洪水中の傾向と一致した。今後は、上流域から感潮域への土砂流入量の検討と、2010年度洪水での更なる検討を行い、有明海への砂流出量のより定量的な見積もりを行う予定である。

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) 西森研一郎, 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.
- 3) 西森研一郎, 関根正人, 樋口敬芳, 赤木俊雄: 実河川に堆積した粘着性土の浸食速度評価に関する実験的研究, 水工学論文集, 第52巻, pp.541-546, 2008.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 入江靖, 石川博基, 前田昭浩, 山口広喜, 坂本哲治, 福岡 捷二, 渡邊明英筑後川感潮域における洪水流と土砂移動, 河 川技術論文集, 第15巻, pp.297-302, 2009.
- 7) 鈴木健太, 松尾和巳, 島元尚徳、福岡捷二:河床が互層をなす 筑後川感謝域における洪水流による河床変動と砂移動機構に関 する研究, 河川技術論文集, 第16巻, pp. 131-136, 2010
- 8) 福岡捷二: 石礫河川の移動床水理の諸問題と解決への道筋, 第 44回水工学に関する夏季研修会講義集, Aコース, pp.1-25, 2008.
- 9) 岡村誠司, 岡部和憲, 福岡捷二: 洪水流の縦断水面形変化と準 三次元流解析方を用いた石狩川河口部の洪水中の河床変動解析, 河川技術論文集, 第16巻, pp.125-130, 2010.
- 10)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.
- estuaries and coasts. , Vol.1, pp.101-108, 2009. 11)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用, 水工学論文集, 第53巻, pp.1081-1086, 2009.
- 12)海田輝之,楠田哲也,二渡了,栗谷陽一: 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-9,1985

(2010. 9. 30受付)