

大きな潮位変動を有する筑後川感潮域の洪水時の河床構造の変化と有明海への土砂流出量

THE CHARACTERISTICS OF BED MATERIALS AND ITS TRANSPORTATION BY FLOOD FLOWS IN THE CHIKUGO RIVER ESTUARY WITH COMPOSITE BED LAYERS

土木工学専攻 23号 鈴木 健太

Kenta SUZUKI

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社会問題化している。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⁾。横山らによると、1910年頃から植林や治山工事が積極的に行われたこと、また、1960年代に砂利採取が多く行われたことにより、河道内に流入、堆積する砂量が減少したと言われている。そのため、自然流域で生産された砂は、砂利採取等により低下した河床高を埋めるために使われ、有明海への砂流出量は 50 年前と比べると激減していると述べている²⁾。実際に有明海湾奥部や、筑後川感潮域の河岸際は写真-1 に示すように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。このように、普段の河川流量で我々が目にする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に関する研究は数多く行われているが³⁾⁴⁾、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、筑後川感潮域での河床変動特性や有明海への砂流出量は明らかになっていない。一方で筑後川流域全体の土砂収支に関して、平成 22 年に国土交通省は、表-1 に示すように流域を詳細に分割し、それぞれの分割流域で土砂生産量、ダム堆砂量、砂防・治山ダム堆砂量、砂利持出量、河道流出量、河道堆積量を求め、生産域から有明海までの空間的連続性のとれた土砂収支を算出した。具体的に H12 年～H20 年の期間では、年間に 356 千 m³ の砂礫生産があり、そのうち 129 千 m³ の砂礫が筑後大堰を通過していることが明らかとなった⁵⁾。そこで、本研究では、これまでの検討結果を踏まえて、複雑な互層構造をもつ筑後川感潮域における洪水時の河床変動解析モデルを構築し、洪水時の河床変動の実態を明らかにするとともに、このモデルを用いて年間どの程度の砂が有明海に排出されているのかを明らかにする。

2. 観測体制と検討区間の河床材料特性

対象区間は 23km から有明海までの区間とし、2009



写真-1 ガタ土堆積状況 (3k800 右岸)

表-1 筑後川流域土砂収支⁵⁾

項目	砂分(千m ³ /年)	推定の根拠
生産量	356	・傾斜角7度以上、910千m ² /年の生産量 ・生産速度は各ブロックに存在する砂防・治山ダムの堆砂量・堆砂期間 ・単位面積当たり生産土砂量は生産速度/深流面積 ・生産土砂量は各流域毎に生産土砂域面積×単位面積当たり生産土砂量 ・砂防・治山ダムから設定した比生産速度と治山ダムの比堆砂速度を比較検討し、各流域毎の比生産速度の妥当性を検証 ・実績堆砂量から年間堆砂量を算出(治水10ダム)
ダム堆砂量	137	・実績堆砂量から年間堆砂量を算出(治水10ダム) ・松原・下笠ダム、江川・寺内ダム4ダムの平均堆砂物粒度構成比の調査結果を基に地形・地質類似ブロック毎に適用(H22年調査) ・松原ダム(シルト25%、砂50%、礫25%) ・下笠ダム(シルト55%、砂15%、礫30%) ・江川ダム(シルト45%、砂45%、礫10%) ・寺内ダム(シルト55%、砂20%、礫25%)
砂防・治山ダム堆砂量	62	●砂防ダム堆砂推定量 ・砂防自衛より、各施設の設置年度、貯砂量、調査年度、深流面積、満砂・未満砂区分、位置情報などを基に実績堆砂量の経年変化を把握(1097基) ・砂防ダムのH22堆砂量推定値: 1529千m ³ ・砂防ダムのH13堆砂量推定値: 1141千m ³ ・砂防ダムのH13～H22年あたり堆砂量(1529-1141)/9年=43千m ³ /年 ●治山ダム堆砂推定量 ・土石流危険渓流カルテより、各施設の設置年度、貯砂量、調査年度、深流面積、満砂・未満砂区分、位置情報などを基に実績堆砂量の経年変化を把握(1097基) ・治山ダムのH22堆砂量推定値: 897千m ³ ・治山ダムのH13堆砂量推定値: 717千m ³ ・治山ダムのH13～H22年あたり堆砂量(897-717)/9年=19千m ³ /年 ●砂防・治山ダムの総堆砂量 ・年あたり堆砂量は62千m ³ /年(砂防ダム43千m ³ /年+治山ダム19千m ³ /年)
砂利持出量	11	・H12年～H20年に11千m ³ 砂利採取実績
河道流出量	157	・生産量356千m ³ から堆積量(治水ダム137・砂防・治山ダム62)を差し引いて算出
河道堆積量	17	・河道内の砂礫堆積量(河床形状変化・砂利採取)より算出
大堰通過量	129	・生産域からの河道土砂流出量、河道内土砂変動量(河道形状変化・砂利採取)を用いて、生産域からの土砂流入地点間の各区分毎で、上流から順次に収支を計算することにより河口域への土砂供給量(大堰通過量)を算出 ・河道通過157千m ³ ・砂利採取量11千m ³ ・河道堆積17千m ³ =129千m ³ /年

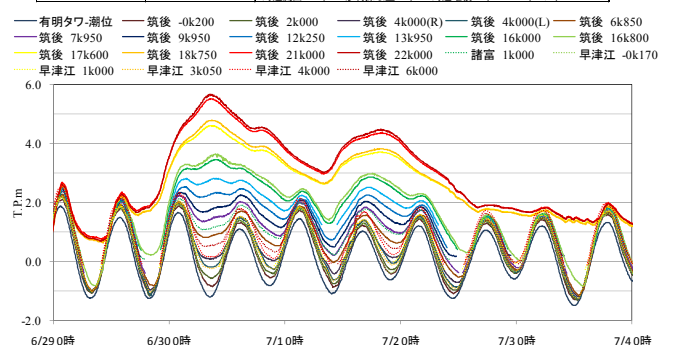


図-1 2009年6月洪水観測水位時系列

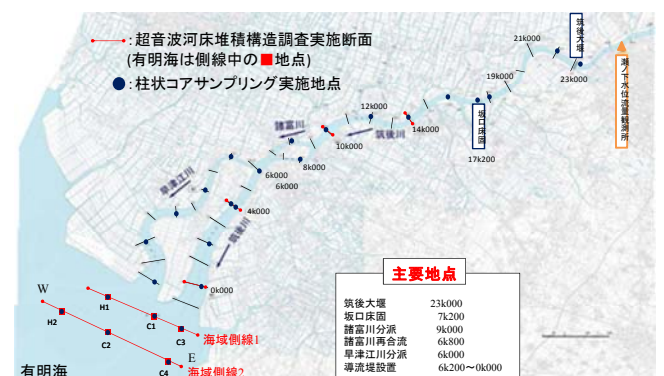


図-2 2009年洪水前後河床材料調査位置

年に $3850 \text{ m}^3/\text{s}$ の洪水が発生した。観測水位ハイドログラフを図-1に示す。洪水ピークは潮位が干潮時に発生し、水位は潮位変動の影響を強く受けていることが分かる。また、河床材料特性を把握するため、図-2に示すように、概ね2km間隔で河床構造調査が行われ、図-3に示すように河床材料柱状図が得られた。0km～6kmの区間では河床表層を砂層が覆っており、砂が卓越した材料特性を示している。一方、10km～17kmでは砂とガタ土が鉛直方向に複雑な互層構造をなして存在していることが分かる。互層をなしている地点の含水比は、図-4に示すように鉛直方向に大きく異なる。また、採取された柱状サンプルを基に鉛直方向10cm毎の粒度分布、含水比が計測された。図-5に含水比とd60粒径の関係を示す。含水比と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。

3. 互層をなす筑後川感潮域での河床変動解析

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、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、洪水時の流れ場と河床高時間変化を再現している⁶⁾。本研究では観測水面形の時間変化を解として、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。これまでに関根らは、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³⁾。

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

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_{wc} 、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、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、 $\alpha = 0.21 \times 10^{-5}$ 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-6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。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

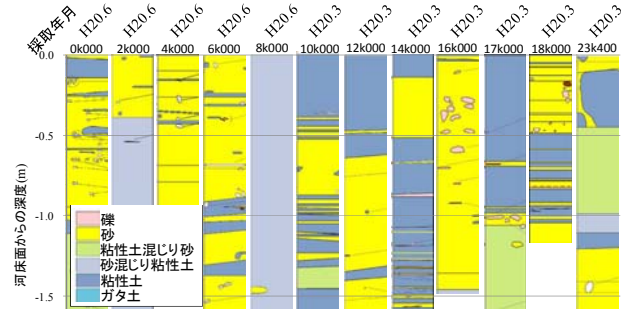


図-3 2009年6月洪水前鉛直柱状図

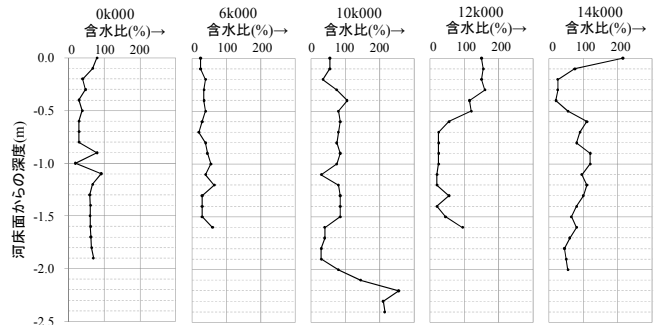


図-4 鉛直方向含水比分布の例

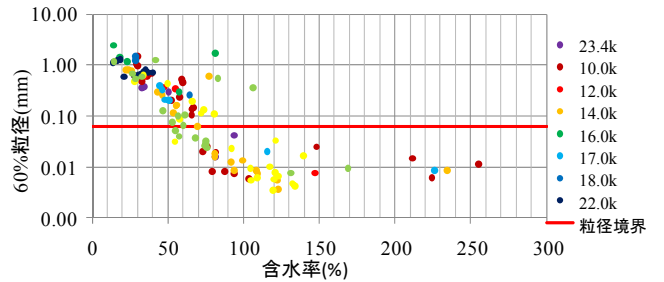


図-5 60%粒径と含水比の関係

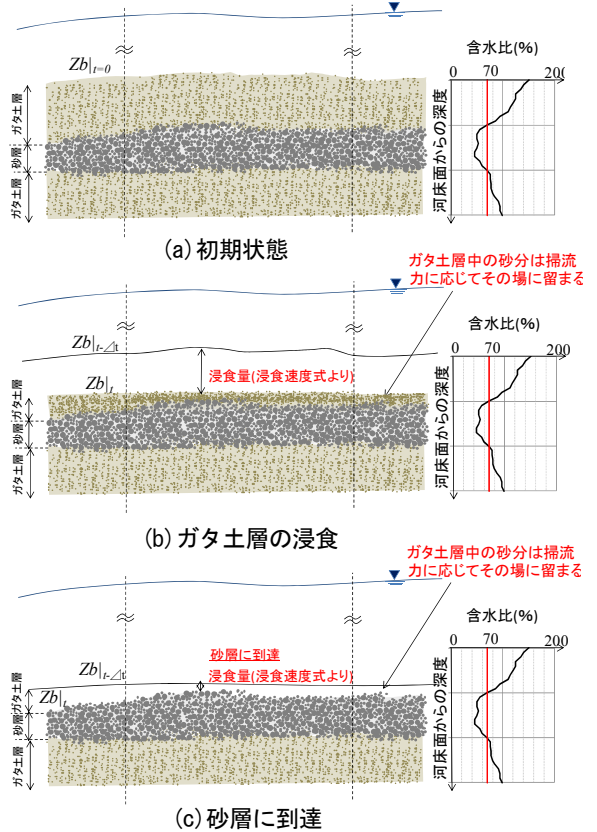


図-6 互層河床における河床変動の概念図

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、流れによ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。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。

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

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樣でないなど、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。

5. 解析結果

図-7に解析水面形と観測水面形の時間変化の比較を示す。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。河床変動量コンターの比較を図-8に示す。(a)は23km~14km、(b)は14km~6km、(c)は6km~0kmである。それぞれ上段が実測、下段が解析を示している。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。図-9に洪水前後での河床堆積構造の変化を示す。図は掃流センサーを用いて観測された河床変動量と、超音波を用いた河床堆積構造調査の結果を重ね合わせたものである。互層をなす14km地点では、洪水中に約85cmの河床低下が生じ、ガタ土層だけでなく、砂層も掃流されたことが、実測のデータからも示された。また、図-10に筑後川の主流部(導流堤左岸側)から続く有明海内のみず道部の超音波河床堆積構造調査の結果と大潮時の干潮水位の重ね合わせを示す。調査は洪水直後に行われた。河床表

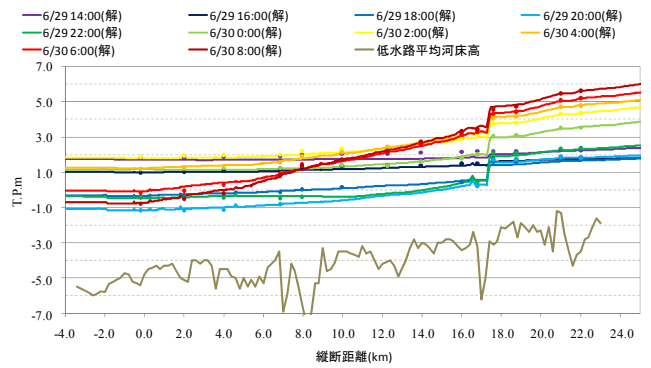


図-7 洪水水面形の時間変化

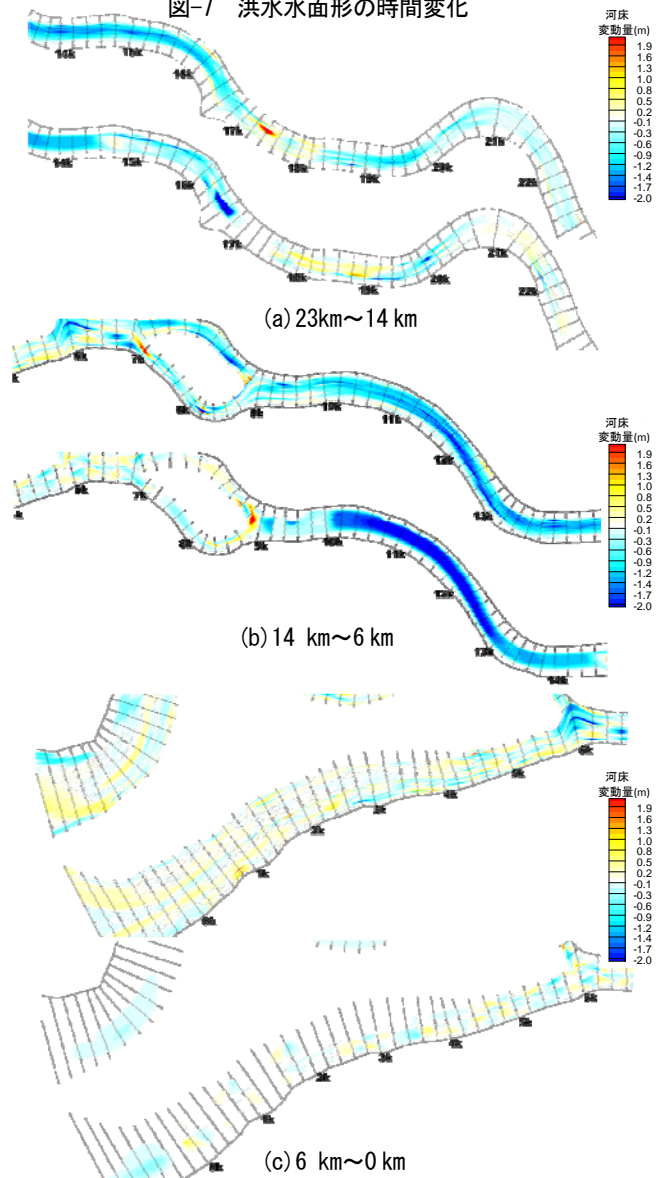


図-8 河床変動量コンター図

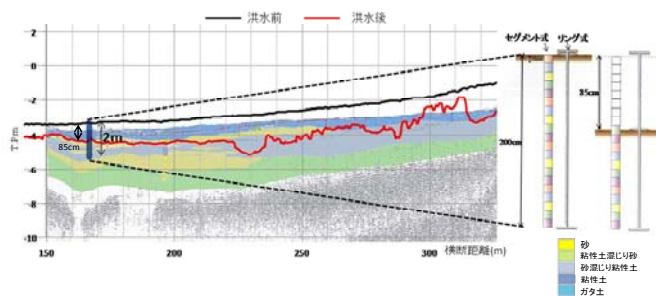


図-9 掃流センサーを用いた河床変動観測結果

層に乱れが生じ、横断幅約 300m、厚さ 1m 弱の厚い砂層が確認できる。このことから、2009 年洪水により大量の砂が筑後川から有明海に排出されたことが明らかになった。また、砂は概ね干潮水位より地盤高が低い個所に堆積していることが見て取れる。

6. 有明海への年間排砂量の算出

前章までの検討で、洪水時の土砂移動を定量的に説明できたことから、平水時にも同様の河床変動解析を適用し排砂量を求め、洪水時の排砂量と合算することで年間の砂流出量を概算した。図-11 に解析により求めた流量時系列と河口から有明海への単位時間断面通過砂量と累加断面通過砂量の関係を示している。(a) に洪水期間中 (b) に小潮～大潮を含む平水時の 15 日間分を示している。洪水中に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排出されている。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分かる。平水時は潮位変動と共に砂が順流・逆流を繰り返し、流量が増える大潮時に多くの砂が排出されている。一方で、小潮時の排砂量は大潮時に比して小さいことが明らかになった。以上の解析結果から、洪水時に約 45000 m³、平水時に約 67000 m³の砂が排出しており、合算すると年間 10 万 m³を超える砂が筑後川から有明海へ流出しており、上流域での土砂収支による砂の流出量⁵⁾と同程度の結果であることが分かった。排出された砂は日々の潮位変動により沖に運搬されると考えられる。また、先に示した調査結果より、砂は主に干潮水位以下のみず道部に堆積することから、約 10 万 m³/年の砂が河川流路の延長である有明海のみず道部分に平均的に 1 cm 堆積すると仮定すると、影響域は図-12 に示す範囲であることが明らかになった。

7. まとめ

これまで、砂の存在量や有明海への流出量が少ないと考えられていた筑後川感潮域において河床堆積構造を詳細に把握した。その結果、対象区間内下流部は砂分が卓越している。一方で、潮汐の影響でガタ土が堆積傾向にある中流部では砂層と粘性土が複雑な互層状態で存在しており、各層での含水比が大きく異なることが明らかとなった。互層をなす筑後川感潮域での河床変動を再現するため、それぞれの材料特性に応じた浸食・掃流形態を考慮し、モデル化することで、河床変動を定量的に説明した。河床変動解析を用いて年間の砂流出量を概算すると、10 万 m³を超える砂が排出

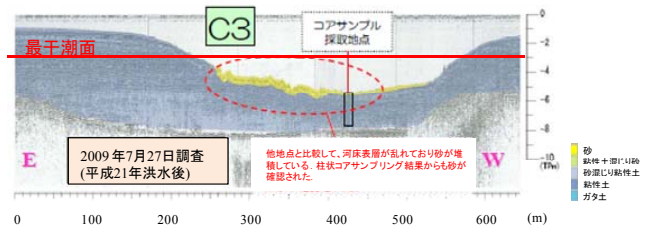


図-10 有明海みず道部の堆積構造 (洪水後)

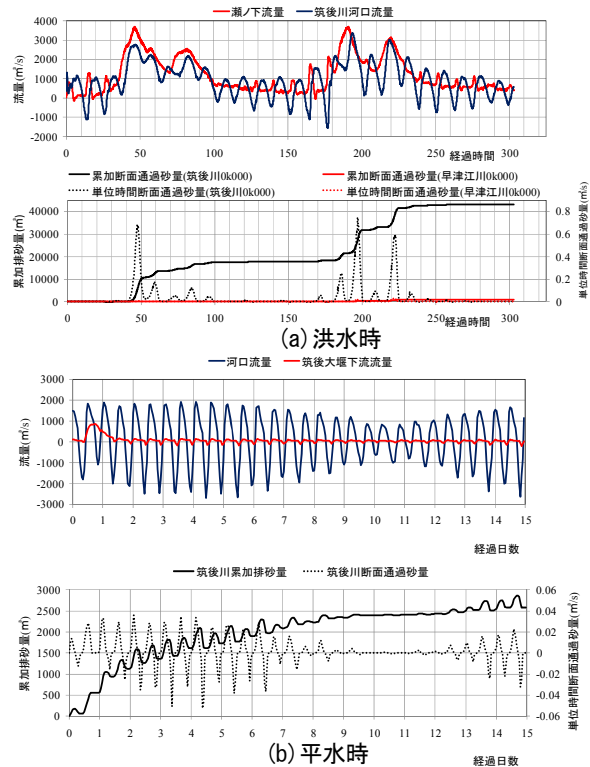


図-11 流量時系列と排砂量の関係



図-12 排砂量が有明海に与える影響域

されていることが明らかとなり、有明海に対する筑後川からの排砂量の影響域を示した。

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) 関根 正人、西森 研一郎、藤尾 健太、片桐 康博、粘性土の浸食進行過程と浸食速度式に関する考察、水工学論文集、47巻 2003年 541-546頁
- 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) 国土交通省九州地方整備局筑後川河川事務所第5回筑後川土砂動態調査に関するワーキンググループ説明資料2011
- 6) 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。