

簡易数値モデルに基づく粒径別掃流砂量の算定

EVALUATION ON BED-LOAD TRANSPORT OF NON-UNIFORM SEDIMENTS USING A SIMPLIFIED NUMERICAL MODEL

加藤靖之¹・二瓶泰雄²・重田京助¹

Yasuyuki KATO, Yasuo NIHEI and Kyosuke SHIGETA

¹学生会員 学(工) 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻修士課程
(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

²正会員 博(工) 東京理科大学准教授 理工学部土木工学科(同上)

We present a new technique of evaluation for bed-load transport using a simplified numerical model and a previous bed-load formula of non-uniform sediments. In this technique, we calculate lateral profiles of bed shear stress in a cross section using the simplified numerical model and introduce the calculated bed shear stress into the bed-load formula. We evaluate the bed-load transports in the Edogawa, Arakawa and Tamagawa Rivers. The results indicate that the bed load in the Edogawa River is larger than that in the Arakawa and Tamagawa Rivers due to larger bed shear stress in low-flow conditions. It is also found that the bed-load transports of coarse sand are larger than the corresponding suspended-sediment load.

Key Words : *bed-load transport, particle-size distribution, numerical simulation, suspended-sediment transport, Tokyo bay*

1. はじめに

様々な河川・海岸構造物の建設や過剰な砂利採取に起因して、いくつかの水系では土砂収支のバランスが崩れ、河床低下や海岸侵食が問題化した。これに対処するためには、流域全体にわたり、どの粒径の土砂がどの程度生産・輸送されているかを把握し、それに基づいて総合的土砂管理を推進していくことが必要不可欠である¹⁾。

この総合的土砂管理を念頭にした浮遊砂・ウォッシュロードモニタリングは、既に瀬沼川流域²⁾、筑後川流域³⁾、東京湾流域⁴⁾などで行われている。ここでは採水や光学式濁度計等という一般的な観測法により実施されている。一方、掃流砂に関してはハイドロフォンなど多くの観測法が提案されているが、浮遊砂・ウォッシュロード観測法と比べるとその汎用性は低く、個別的にいくつかの掃流砂観測が行われている程度に留まっている⁵⁾⁶⁾。

一方、掃流砂に関する室内実験はこれまで数多く行われており、それらの結果に基づく掃流砂量式が提案されている^{7)・8)}。また、これらの掃流砂量式に基づく河床変動シミュレーションも活発に行われている^{9)~11)}。この掃流砂量式の現地河川への適用性に関しては今後検討すべき重要な課題であるが¹²⁾、数値解析ではこの掃流砂量式は一定の信頼性を得た形で用いられている。以上のことから、土砂動態把握に必要な、ある横断面全体を通

過する掃流砂量を評価するには、現状では、掃流砂量式とその式中の底面せん断力等を算定するための数値モデルを組み合わせた手法が有効であると考えられる。

本研究では、既存の掃流砂量式と簡易河川流モデルに基づく横断面全体の掃流砂量評価法を提案し、それを用いて実河川における掃流砂量を推定することを試みる。ここでは、掃流砂量算定に必要な底面せん断力の横断分布を低計算負荷で推定可能な簡易河川流モデルを構築し、それと既存の粒径別掃流砂量式⁹⁾を組み合わせた横断面全体の掃流砂量評価法とする。本手法の適用対象としては、干潟再生を重要課題として抱える東京湾の土砂供給源である江戸川、荒川、多摩川とする。この計算結果に基づいて、各河川における粒径別掃流砂量を年間及び出水時において比較・検討すると共に、著者らが別途行っている浮遊砂量の観測結果⁴⁾と比較する。

2. 本手法の概要

(1) 基本的な枠組み

河川横断面を通過する掃流砂量の時間変化を簡便に算定するために、掃流砂に関する汎用的な観測手法が確立していないことを考慮して、本研究では、既存の掃流砂量式と簡易河川流モデルを融合した掃流砂量算定法を導入する。本手法の基本的な枠組みとしては、図-1に示す

ように、1) 対象とする横断面の流量、水位、横断面形状、底質粒径分布を収集し、2) それらを入力条件として、簡易河川流モデルにより水深平均流速や摩擦速度、底面せん断力(掃流力)の横断分布を算定する。最後に、3) 得られた掃流力を粒径別掃流砂量式に代入し、掃流砂量の横断分布を算出する。以下では、2) の簡易河川流モデルと3) の掃流砂量モデルについて記述する。

(2) 簡易河川流モデル

掃流砂量式に含まれる掃流力の横断分布を簡便に算出し得る河川流モデルについて記述する。河床変動シミュレーションでは標準的な平面二次元モデルにおける主流方向運動方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = gI + A_H \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) - \frac{C_f}{D} u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (1)$$

ここで、 t は時間、 x, y は主流、横断方向、 \bar{u}, \bar{v} は x, y 方向の水深平均流速、 D は水深、 g は重力加速度、 I は水面勾配を表している。底面摩擦係数 C_f は、マンニングの粗度係数 n を用いて、以下のように与えられる。

$$C_f = \frac{gn^2}{D^{1/3}} \quad (2)$$

また、式(1)中の \bar{A}_H は水深平均された水平渦動粘性係数であり、ここでは、最も一般的な0方程式モデルに基づいて、次のように与えられる。

$$\bar{A}_H = \beta \kappa U_* \frac{D}{6} \quad (3)$$

ここで、 β は任意の定数、 κ はカルマン定数(=0.40)、 U_* は摩擦速度(= $\sqrt{C_f u}$)である。本研究における計算対象はある一つの横断面であり、また、式(1)をそのまま用いると計算負荷が大きい。さらに、入力条件となる観測データも限られているので、ここでは、式(1)から重要な項のみを抽出した次式を基礎方程式とする。

$$gI + \bar{A}_H \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} - \frac{C_f}{D} u^2 = 0 \quad (4)$$

式(4)の運動方程式の計算手順について記述する。図-1に示すように、入力データは、一般に入手が容易な水位と横断面形状、流量の観測値である。それより、式(4)中の水深 D は水位と横断面形状から与えられるが、水面勾配 I については実測値が一般に無く、単純には設定できない。そこで、得られている流量 Q の実測値を活用して水面勾配を決定することを試みる。すなわち、水面勾配をある値に仮定し、式(4)を解き、水深平均流速の横断分布や流量を算出する。これと同じ作業をある範囲の水面勾配に対して実施し、流量の計算値と観測値の差が最小となる水面勾配を選定する。この誤差最小の水面勾配を与えた時の計算結果から得られる掃流力 τ を次式より

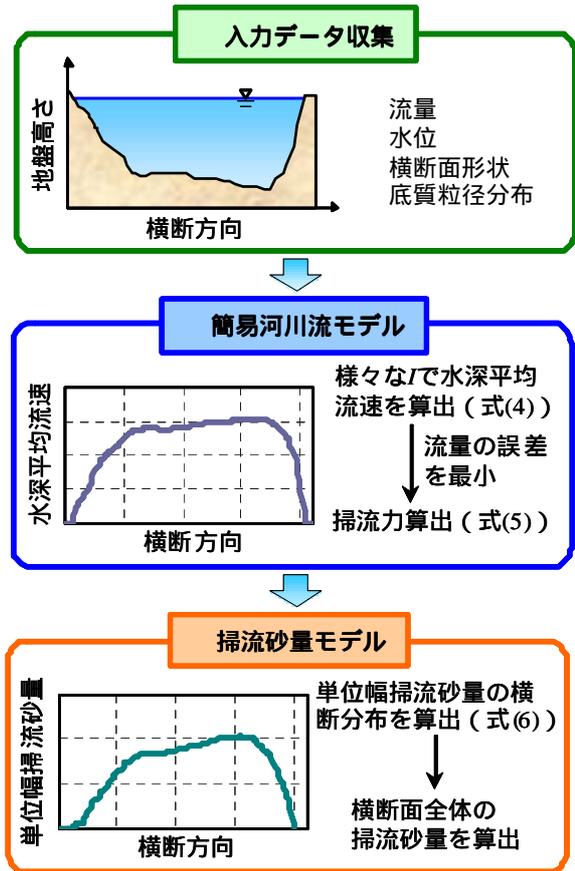


図-1 本手法の基本的な枠組みと計算フロー

求め、それを後述する掃流砂量モデルに代入する。

$$\tau = \rho C_f u^2 \quad (5)$$

ここで、 ρ は水の密度である。なお、式(4)の数値解法としては、有限差分法を用い、同式左辺第二項の水平拡散項には二次精度中央差分を適用する。

(3) 掃流砂量モデル

粒径別掃流砂量を把握するために、芦田ら⁹⁾が提案する土砂粒径別(粒径階)の掃流砂量式を用いる。この式では、粒径階 i における単位幅掃流砂量 q_{bi} が次式のように表される。

$$q_{bi} = 17 \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) g d_i^3 \tau_{*e}^{3/2}} \times \left(1 - \sqrt{K_c \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}}} \right) \left(1 - K_c \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}} \right) f_{mi} \quad (6)$$

ここで、 σ は土粒子の密度、 d_i は粒径階 i の平均粒径、 τ_{*ci} と τ_{*i} は粒径階 i の無次元限界掃流力と無次元掃流力(= $\tau/(\sigma-\rho)gd_i$)、 τ_{*e} は無次元有効掃流力(= τ_{*i})、 f_{mi} は底質内における粒径階 i の含有率である。また、 K_c は限界掃流力の補正関数であり、 $K_c = 1.0$ として与える。無次元限界掃流力 τ_{*ci} の与え方は、Egiazaroffの式¹³⁾を用いた芦田・道上⁷⁾を参考にして、 $d_i/d_m = 0.4$ (d_m :土



図-2 計算対象地点の位置（笠目橋は浮遊砂の観測地点）

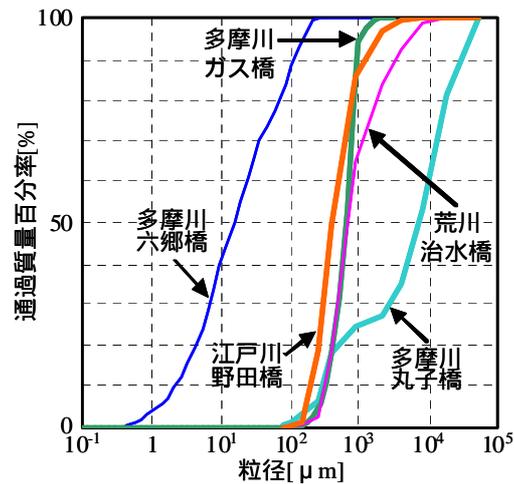


図-3 各河川における底質の粒径加積曲線

砂平均粒径)を閾値とする次式を採用する。

$$\frac{d_i}{d_m} \geq 0.4 \quad \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*cm}} = \left\{ \frac{\log_{10} 19}{\log_{10}(19d_i/d_m)} \right\}^2 \quad (7a)$$

$$\frac{d_i}{d_m} < 0.4 \quad \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*cm}} = 0.85 \frac{d_m}{d_i} \quad (7b)$$

ここで、 τ_{*cm} は平均粒径に対する無次元限界掃流力であり、その算出に際しては、岩垣の式¹⁴⁾を用いる。計算の手順としては、図-1に示すように、簡易河川流モデルにより得られた掃流力 τ と粒径別限界掃流力を比べて掃流砂発生の有無を各横断地点において判定する。掃流砂が発生する地点では式(6)により単位幅掃流砂量を求め、それを横断方向に積分して、横断面全体の掃流砂量を粒径別に算出する。

3. 江戸川・荒川・多摩川における掃流砂量の算定

(1) 計算条件

上述した簡易河川流モデルと掃流砂量モデルから構成される本手法を用いて、東京湾主要流入河川であり、河口部に干潟を抱える江戸川と荒川、多摩川における掃流砂量を算定する。計算地点は図-2に示すように、江戸川では野田橋(39.3km)、荒川では治水橋(41.9km)、多摩川では丸子橋(13.0km)、ガス橋(10.4km)、多摩川大橋(8.4km)、六郷橋(5.6km)とする。また、江戸川・野田橋、荒川・笠目橋(28.6km)、多摩川・丸子橋では、光学式濁度計(Compact-CLW、(株)JFEアレック製)による連続観測を2006年度より別途実施している⁴⁾。なお、江戸川・野田橋と荒川・治水橋、多摩川・丸子橋は順流部と見なせるが、多摩川の残り3地点は感潮域に位置する。計算期間としては、2006年8月1日から2007年9月15日までである。この期間中には、これらの河川で大きな洪水を記録した台風0709号出水が含まれる。なお、本計算では、河川流計算では、横断面全体の流速・掃流力分布を求めるが、掃流砂量計算では、低水路のみを対象とし、

高水敷では掃流砂は発生しないと仮定する。

本計算の入力データとして用いる底質の粒径加積曲線を図-3に示す。ここでは、各横断面の低水路3箇所にて、河床表層の底質をグラブ式採泥器により採取し、ふるいわけもしくはレーザー回折式粒度分析測定装置(SALD-3100、(株)島津製作所製)により粒度分析を行った。図中には3箇所の結果の平均値が表示されている。なお、多摩川・多摩川大橋における結果は多摩川・ガス橋と類似しているので省略している。また、底質の採取時期は江戸川、荒川及び多摩川・丸子橋・六郷橋では2007年11~12月であり、残りの多摩川の地点では2008年9月である。いずれも後述する台風0709号出水後に底質を採取した。これより、底質粒径分布は河川間の違いと共に、多摩川では流下方向に大きく異なる。底質粒径分布以外の入力条件として、流量の時系列データとしては二瓶ら¹⁵⁾の結果を与える。また、水位は国土交通省・水文水質データベース、横断面形状は各河川管理者による測量データをそれぞれ用いる。また、河川流計算上のパラメータとしては、定数 β は1.0、マンギングの粗度係数は低水路と高水敷でそれぞれ $0.035\text{m}^{-1/3}\text{s}$ 、 $0.100\text{m}^{-1/3}\text{s}$ とする。

(2) 簡易河川流モデルの妥当性の検証

本手法の核となる簡易河川流モデルの妥当性を検証するために、簡易河川流モデルにより得られた水深平均流速の横断分布の計算値と別途行われた観測値との比較を図-4に示す。ここでは江戸川・野田橋における低水時(2007年9月4日1時)と出水時(同年9月9日15時)の結果を示す。観測値としては、著者らが行っている固定設置された水平設置型超音波ドップラー流速分布計(H-ADCP600kHz、Teledyne RDI製)により計測された一つの高さにおける流速横断分布¹⁶⁾を対数則と仮定して水深平均流速に換算したものである。なお、出水時の結果としては、高水敷に冠水する計算データも存在するが、検証用のH-ADCPデータは低水路内に限定していること、また、掃流砂量のピ

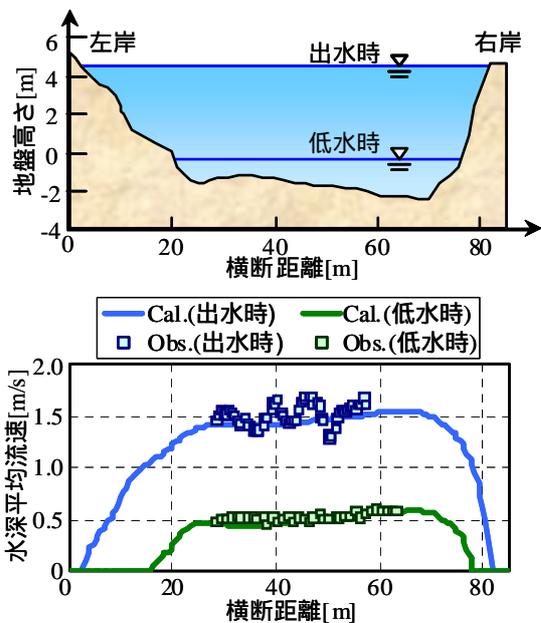


図 - 4 水深平均流速の横断分布に関する計算値と観測値の比較 (江戸川・野田橋, 低水時: 2007年9月4日1時, 出水時: 同年9月9日15時)

ークが今回選定した時刻近くに現れたことを考慮して、この結果を選定している。これを見ると、観測された流速分布では、変動があるものの大局的には右岸側の流速が大きい。計算結果も類似した流速分布パターンが再現されており、低水時・出水時共に、水深平均流速の計算値は観測値と概ね一致する。これより、本論文で提示している簡易河川流モデルの妥当性が検証された。

(3) 掃流砂量と浮遊砂量の比較

a) 時間変動特性

江戸川と荒川、多摩川における掃流砂・浮遊砂輸送特性を比べるために、全期間の流量、浮遊砂量、掃流砂量の累積値の時間変化を図-5に示す。ここでは、江戸川・野田橋、多摩川・丸子橋の結果であり、荒川では流量と掃流砂量は治水橋、浮遊砂量は笹目橋の結果を用いる。これを見ると、この期間中には、同図(a)に矢印で示すように、4つの出水イベントが生じており、出水イベントは前述した台風0709号による大出水(2007/9/6~9/15)に相当している。累積流量は、3河川共に連続的に増加しており、出水時の増加量はそれほど顕著でない。一方、累積浮遊砂量に関しては、累積流量と異なり、出水時に急激に増加しており⁴⁾、特に大出水となった出水イベントではその傾向が顕著である。累積浮遊砂量の大小関係は、出水イベントの前までは、荒川>江戸川>多摩川となっていたが、出水イベントにおいて多摩川で大出水が起こった影響で、そのイベント後では、荒川>多摩川>江戸川の順となった。次に、累積掃流砂量に着目すると、低水時には、江戸川では微増しているものの、荒川や多摩川ではほぼ一定となり、この2河川では低水時には掃流砂は発生していない。また、出水イベント時

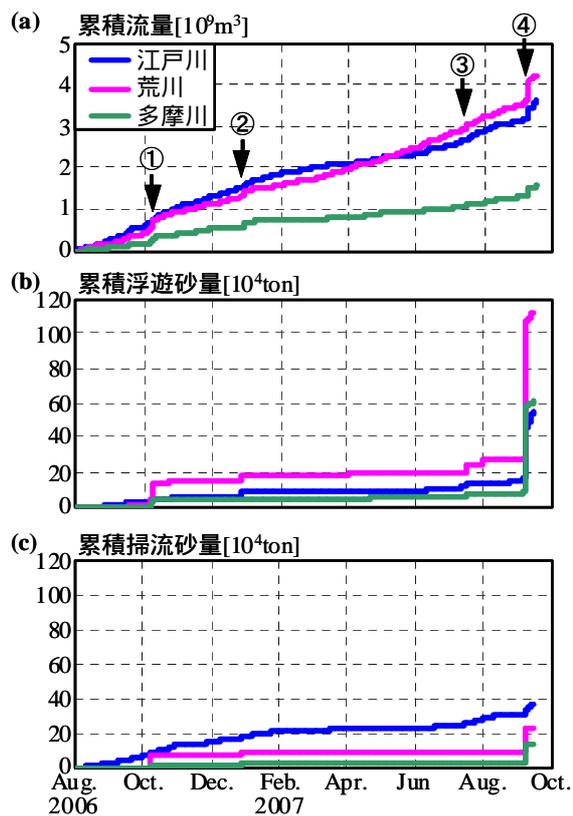


図 - 5 各河川における流量(a)と浮遊砂量(b)、掃流砂量(c)の累積値の時間変化

表 - 1 年間(2006/8/1~2007/7/31)と出水イベント(2007/9/6~15)における流量と浮遊砂量、掃流砂量の累積値の比較(図中のb/aは、年間とイベントにおける累積値の比率)

河川	期間	流量 [10 ⁹ m ³]	浮遊砂 A [kt]	掃流砂 B [kt]	B/A
江戸川	年間a	3.13	135.2	280.8	2.08
	イベント④b	0.43	310.9	63.3	0.20
	b/a	0.14	2.3	0.23	-
荒川	年間a	2.73	259.4	89.0	0.34
	イベント④b	0.67	829.2	140.3	0.17
	b/a	0.25	3.2	1.6	-
多摩川	年間a	1.29	70.4	26.3	0.37
	イベント④b	0.29	438.2	114.2	0.26
	b/a	0.22	6.2	4.3	-

には3河川共に掃流砂量は増加するが、その傾向は相対的に荒川や多摩川で大きくなる。掃流砂量の大小関係は、江戸川>荒川>多摩川となり、浮遊砂と異なり江戸川の掃流砂量が顕著になっている。

b) 年間及び出水時の総流砂量

上記の結果を用いて、年間(2006/8/1~2007/7/31)と出水イベント(2007/9/6~15)における総流量及び総浮遊砂量、総掃流砂量をまとめたものを表-1に示す。ここでは、これらの総量を図-5と同じ地点において算出すると共に、各量の出水イベントでの値と年間値の比率(表中b/a)、掃流砂量と浮遊砂量の比(BA)も合わせて示す。

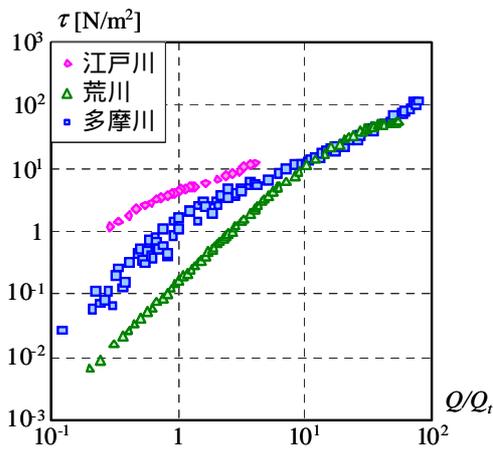


図-6 各河川における掃流力 τ と流量比 Q/Q_i の相関図
(Q_i :各河川における低水時と出水時を分ける流量の閾値)

大出水が行ったイベントにおける総流量は年間値と比べると0.14~0.25年分となっているが、この時の総浮遊砂量は23~62年分と極めて大きい。一方、この時の総掃流砂量は、江戸川では0.23年分と流量と同程度であるが、荒川や多摩川では1.6年分、4.3年分と浮遊砂ほどではないが大きな値となっている。また、掃流砂量と浮遊砂量の比率(BA)に関しては、江戸川の年間値を除き、0.17~0.37となっており、掃流砂量は浮遊砂量よりも小さく、その差は出水イベント時の方が大きい。

河川間の掃流砂量の差を調べるために、各河川における掃流力 τ (式(5))を図-6に示す。図中の横軸は、流量を低水時と出水時を分ける流量の閾値 Q_i で無次元化した Q/Q_i である。この閾値 Q_i は、江戸川では $150\text{m}^3/\text{s}$ 、荒川では $100\text{m}^3/\text{s}$ 、多摩川は $50\text{m}^3/\text{s}$ とする¹⁵⁾。また、掃流力 τ としては低水路全体の平均値を用いる。流量比が1より小さい低水時の場合には、江戸川の掃流力 τ が多摩川や荒川よりも1~2オーダー程度大きい。一方、出水時では、流量規模が大きくなると多摩川や荒川の掃流力は江戸川よりも顕著になる。この掃流力の違いを反映して、低水時には江戸川の掃流砂量が、出水時には多摩川や荒川の掃流砂量が各々卓越する。

c) 粒径別掃流砂量の比較

粒径別に掃流砂量と浮遊砂量を比べるために、各出水イベント時の粒径別総掃流砂量と総浮遊砂量を図-7に示す。ここでは、粘土・シルト分(粒径 $75\mu\text{m}$ 以下)、細砂分($75\sim 250\mu\text{m}$)、中砂・粗砂・礫分($250\mu\text{m}$ 以上)に分類している。これより、3河川、全出水イベントに共通して、粘土・シルト分と細砂分は浮遊砂量が大きく、中砂分はその逆となっている。このように、総量としては浮遊砂量が掃流砂量よりも大きいものの、中砂分に関しては常に掃流砂量が大きい。また、細砂分についても掃流砂量は浮遊砂量とほぼ同オーダーである。

これらの結果と各河川河口部に位置する干潟の底質特性を比べる。江戸川と荒川、多摩川における河口(前浜)

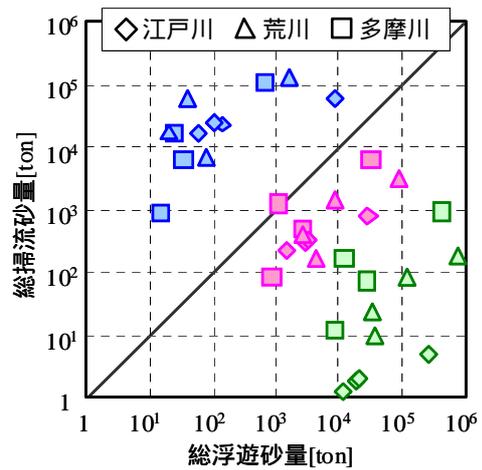


図-7 4つの出水イベント時における粒径別総掃流砂量と総浮遊砂量の比較(図中の緑色は粘土・シルト分、ピンク色は細砂分、青色は中砂・粗砂・礫分を示す。)

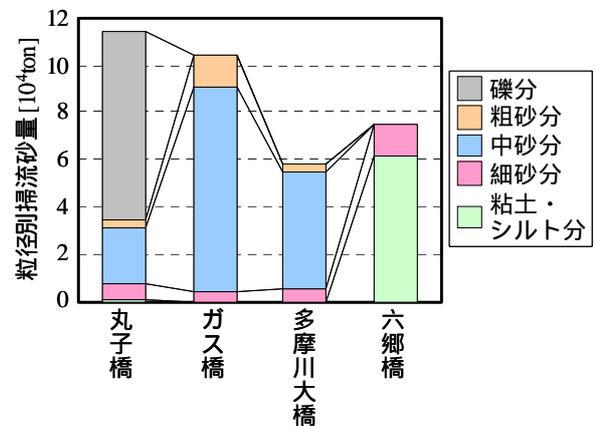


図-8 出水イベント(2007/9/6~15)における粒径別掃流砂量の流下方向変化

干潟の底質材料はそれぞれ細砂分、粘土・シルト分、中砂分と報告されている¹⁷⁾。これらの土砂供給に及ぼす浮遊砂・掃流砂の寄与としては、荒川では浮遊砂、多摩川では掃流砂、江戸川では両者が、干潟材料と対応する粒径を有する土砂を供給しており、河川毎に干潟材料の土砂供給過程が異なることが明らかとなった。

(4) 掃流砂量の流下方向変化

底質粒径分布に特徴的な差異が見られた多摩川下流域における掃流砂量の流下方向変化を図-8に示す。ここでは、掃流砂量が最も顕著であった出水イベントの期間中に生じた総掃流砂量を、粘土・シルト分、細砂分、中砂分($250\sim 850\mu\text{m}$)、粗砂分($850\sim 2000\mu\text{m}$)、礫分($2000\mu\text{m}$ 以上)と分けて算出している。これより、4地点における全粒径の掃流砂量の総和は、概ね6万~11万tonの間を推移している。一方、粒径別に見ると、図-3に示している底質粒径分布を反映して、地点間の差が著しい。すなわち、最も上流側の丸子橋では礫分が顕著となるのに対して、ガス橋や多摩川大橋では中砂分、最も下流側の六郷橋では粘土・シルト分が顕著となっている。この結果

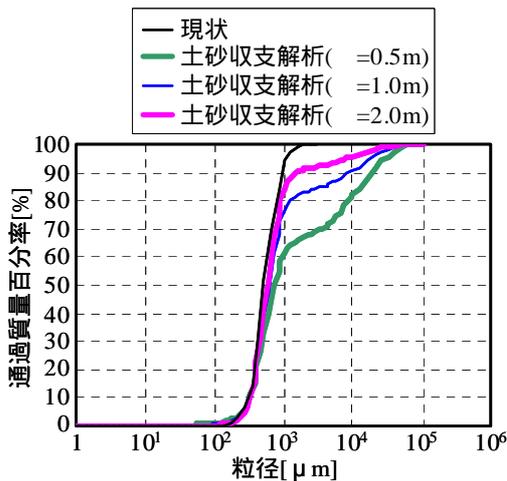


図-9 現状及び土砂収支解析により得られた底質の粒径加積曲線の比較(多摩川・ガス橋)

より、例えば、丸子橋で輸送された礫分はガス橋、多摩川大橋で確認できず、土砂輸送の不連続性が見られる。

この計算結果から土砂収支解析を行い、上流からの流入土砂量と下流への流出土砂量の差が対象エリアの土砂体積や粒径分布の変化に及ぼす影響を調べる。図-9は、ガス橋周辺を対象として現状及び土砂収支解析から得られた底質粒径分布を示す。ここでは土砂が交換する鉛直層厚 δ を仮定し、3ケースの δ の結果を示す。これより、鉛直層厚 δ が2mでも底質の礫分は明確に増える。今回の計算では、底質粒径分布が河床表層堆積物の結果であるので、より深い地点に礫分が堆積している可能性が高い。

なお、今回の掃流砂量評価に用いた底質データは、河床表層でかつ出水イベントの後、計算対象断面のみのものである。そのため、河床材料の出水前後の非定常変化や鉛直・縦断方向変化がこの結果には考慮されていない。上記の議論を深化するには、これらの影響を考慮した粒径別土砂輸送・河床変動シミュレーションを行うことは必要不可欠であり、今後、実施する予定である。

4. おわりに

本研究では得られた主な結論は以下のとおりである。

- 1) 現地河川では連続的な観測が困難な掃流砂量を算出することを目的として、既存の掃流砂量式と簡易河川流モデルに基づく横断面全体の掃流砂量評価手法を提案した。この簡易河川流モデルによる水深平均流速の計算結果は観測値と概ね一致し、簡易河川流モデルの基本的な有効性が検証された。
- 2) 本手法を江戸川と荒川、多摩川における掃流砂量評価に適用したところ、江戸川では低水時に、荒川・多摩川では出水時に掃流砂量が顕著になること、その要因が低水時と出水時における掃流力特性の違いに起因することが示された。また、掃流砂量の大小関係としては、江戸川>荒川>多摩川となっており、

浮遊砂量と異なっている。

- 3) 浮遊砂量と掃流砂量を比べると、全粒径分や粘土・シルト分、細砂分としては浮遊砂量の方が大きい、中砂・粗砂・礫分に関しては掃流砂量が大きい。
- 4) 多摩川下流域における粒径別掃流砂量を算定した結果、底質粒径分布の差に対応して、粒径別の土砂輸送量の不連続性が見られた。

謝辞：本研究では、国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所・荒川上流・下流河川事務所、京浜河川事務所に横断面形状をご提供して頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 藤田光一：“広域総合土砂(物質)管理”の理念と実践との隔たりをどう埋めるか、月刊海洋, Vol.32, No.3, pp.179-184, 2000.
- 2) 平林桂, 平館治, 望月達也, 藤田光一, 松尾和己, 坂野章, 服部敦, 塚原隆夫, 梅野浩一, 渡辺敏, 近藤和仁, 山形宙, 李参熙, 赤木泰雄: 洪水時広域採水による濁沼川水系の土砂動態観測, 水工学論文集, Vol.42, pp.1045-1050, 1998.
- 3) 横山勝英, 鈴木伴征, 味元伸親: 筑後川の河床変動要因と土砂動態の変遷, 水工学論文集, Vol.52, pp.997-1002, 2007.
- 4) 重田京助, 二瓶泰雄, 坂井文字, 大塚慧: 東京湾主要流入河川における浮遊土砂輸送特性に関する基礎的検討, 水工学論文集, Vol.52, pp.913-918, 2008.
- 5) 澤井健二: 流砂計測技術の現状と展望, 砂防学会誌, Vol.54, No.2, pp.75-84, 2001.
- 6) 水山高久, 野中理伸, 藤田正治: 常願寺川津之浦下流砂防堰堤におけるハイドロフォンによる流砂観測, 砂防学会誌, Vol.55, No.3, pp.56-59, 2004.
- 7) 芦田和男, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, No.206, pp.59-69, 1972.
- 8) Meyer-Peter, E. and Müller, R.: Formulas for Bed Load Transport, I.A.H.R., Stockholm, 1948.
- 9) 芦田和男, 江頭進治, 劉炳義: 蛇行流路における流砂の分級および河床変動に関する数値解析, 水工学論文集, Vol.35, pp.383-390, 1991.
- 10) 清水康行: 沖積河川の縦断形と河床材料分布形の形成について, 土木学会論文集, No.521/ -32, pp.69-78, 1995.
- 11) 竹林洋史: 直線河道の砂州に関する土砂水理学的研究, 立命館大学学位論文, pp.1-139, 1999.
- 12) Romero, M. and Fernandez, J.: Quantification of sediment transport rates in a high mountain river in Bolivia, Proc. of ISEH, 2007 (CD-ROM).
- 13) Egiazaroff, I.V.: Calculation of Nonuniform Sediment Concentrations, Proc. ASCE, HY 4, 1965.
- 14) 岩垣雄一: 限界掃流力に関する基礎的研究() 限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, No.41, pp.1-21, 1956.
- 15) 二瓶泰雄, 高村智之, 渡邊敬之: 東京湾主要流入河川における流量モニタリングの現状と課題, 海岸工学論文集, Vol.54, No.2, pp.1221-1225, 2007.
- 16) 二瓶泰雄, 木水啓: H-ADCP 観測と河川流計算を融合した新しい河川流量モニタリングシステムの構築, 土木学会論文集 B, Vol.63, No.4, pp.295-310, 2007.
- 17) 東京湾河口干潟保全検討会: 東京湾河口干潟保全再生検討報告書, pp.262-291, 2004.

(2008.9.30 受付)