

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

FUNDAMENTAL STUDY ON SUSPENDED-SEDIMENT TRANSPORT OF MAIN RIVERS FLOWING INTO TOKYO BAY

重田京助¹・二瓶泰雄²・坂井文子¹・大塚慧³

Kyosuke SHIGETA, Yasuo NIHEI, Ayako SAKAI and Satoshi OOTSUKA

¹学生員 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)

³非会員 東京理科大学 理工学部土木工学科(同上)

To examine the suspended-sediment transport from inland to coastal areas in Tokyo Bay, we have monitored the suspended-sediment transport in main rivers flowing into Tokyo Bay, which are the Edo, Ara, Tama, Naka and Sumida Rivers. In the field surveys, we have installed an optical sensor for measuring turbidity and water samplers to measure the sediment concentration and particle size under flood flow conditions. The observed results reveal that the fine sediments of particles less than $71 \mu\text{m}$ are mainly transported in the main rivers under several flood flow conditions. The transports of finer and coarser sediments are relatively dominant in the Ara River and the Edo and Tama Rivers, respectively.

Key Words : Tokyo Bay, suspended-sediment transport, wash load, particle size, turbidity

1. はじめに

赤潮や青潮、貧酸素水塊の形成などに象徴される水質汚濁化が未だに解消されない東京湾¹⁾の水環境を再生するためには、陸域対策として水質総量規制を推進することや、海域対策として内部生産の抑制や水質浄化機能を有する干潟環境の創出・再生が試みられている²⁾。このような陸域・海域対策を包括的に行うためには、陸域から河川、沿岸海域にわたる「流域土砂管理」³⁾を実施することは重要な施策の一つである。このため、山地域での土砂生産や市街地からの懸濁物質の流入、河川内の掃流砂・浮遊砂・ウォッシュロード動態、沿岸域における土砂移流・拡散・堆積過程、という流域—河川—沿岸域にわたる土砂輸送の量と質を計測することは必須である。

このうち陸域から東京湾への土砂輸送量の把握という観点に立つと、主要流入河川(江戸川、荒川、多摩川、中川、隅田川、鶴見川)における土砂輸送量を計測することが直接的に必要となる。しかしながら、既存の調査研究としては、多摩川における単発的な浮遊土砂輸送量調査の結果⁴⁾・⁵⁾が公表されている程度である。このように各主要流入河川から東京湾へ流入する土砂の量と質に関する情報は極めて限定されているのが現状である。

著者らは、陸域から東京湾への土砂・栄養塩・有機物

流入負荷調査・解析に関する取り組みを開始している⁶⁾。本研究では、その一環として、鶴見川を除く主要流入5河川において、浮遊土砂輸送量の連続モニタリングを実施し、各河川における浮遊土砂輸送特性の基本的特徴を明らかにする。ここでは、光学式濁度計による長期連続観測と自動採水機等による出水時採水観測を行い、各河川における浮遊土砂濃度(SS)輸送量や浮遊土砂粒径分布を計測する。これらの観測結果に基づいて、1)出水時における浮遊土砂輸送量や浮遊土砂粒径の時間変動特性、2)比流量 Q' と比浮遊土砂輸送量 L' の相関関係($L'-Q'$ 関係)、3)粒径別浮遊土砂輸送量を明らかにする。

2. 現地観測方法

図-1は、観測対象である江戸川、荒川、多摩川、中川、隅田川の位置とその流域図を示す。これらの河川における浮遊土砂輸送量を把握するために、光学式濁度計による濁度の長期連続観測と出水時における採水観測を実施している。各河川における観測地点は、図-1中の△印の位置に設けられ、江戸川では野田橋(河口より+39km)、荒川では新荒川大橋(+20km)もしくは笹目橋(+29km)、多摩川では調布堰(+13km)、中川では八条橋(+27km)、

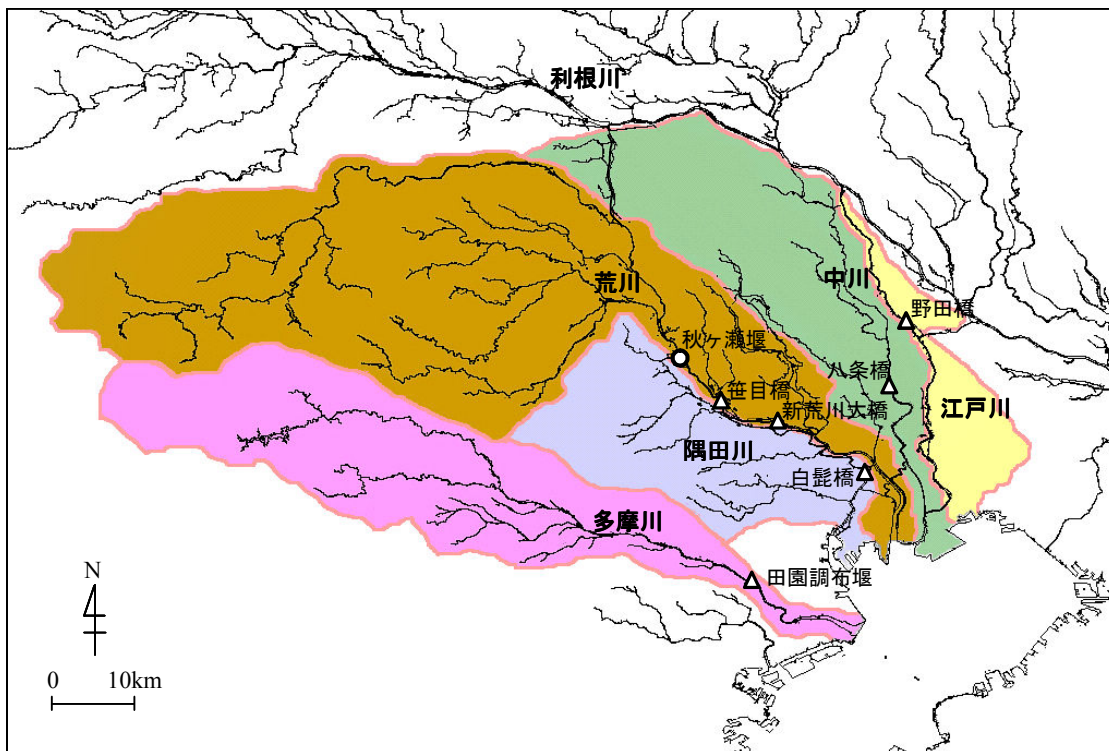


図-1 各河川の流域マップと観測地点 (図中△印は観測点を示す)

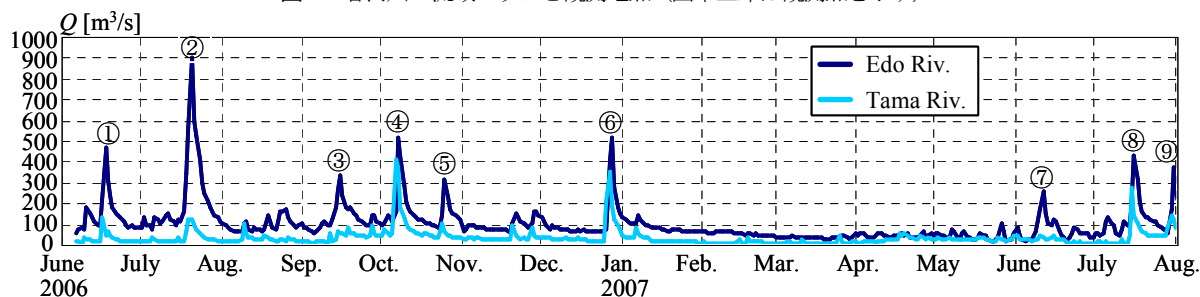


図-2 江戸川, 多摩川における日平均流量の時間変化

隅田川では白髭橋 (+9km) である。このうち江戸川・野田橋と多摩川・調布堰のみが順流域に位置し、その他の3地点は潮位変動の影響を受ける感潮域である。

各地点の流域面積や山林率 (流域面積に対する山林面積), 観測期間を表-1 に示す。なお, 江戸川の流域面積や山林率の算出には, 利根川分派点のデータに分派率 (=25%) を掛けたものを加算している。荒川では, 2006年7月7日~11月6日までは新荒川大橋で, 残りの期間では笹目橋で観測を実施している。観測期間は河川により異なっているが, 最も早く2006年6月より開始し, 現在では5河川全てで濁度モニタリングを行っている。ここでは, データ整理の都合上, 解析対象期間を各地点の観測開始日から2007年7月31日までとする。この対象期間には, 図-2 に示すように, 9個の出水イベントが発生した。なお, 2007年9月には台風0709号に伴う大出水が発生し, この出水時においても観測データを取得できているので, この結果に関しては後日報告する。

濁度計測には, ワイパー機能付光学式濁度計 (Compact-CLW, アレック電子(株)製) を用いる。また, 採

表-1 各河川における流域情報と観測地点・期間

河川名	地点名	流域面積 [km ²]	山林率 [%]	観測期間	採水イベント数
江戸川	野田橋	2224	62	2006/6/6~現在	8
荒川	新荒川大橋* 笹目橋**	2203	43	2006/7/7~11/6* 2007/6/28~現在**	2
多摩川	田園調布堰	1200	62	2006/7/31~現在	5
中川	八条橋	682	1	2007/7/11~現在	1
隅田川	白髭橋	535	5	2007/7/13~現在	0

水観測では, 橋上からのバケツ採水か, 自動採水機 (6712型ウォーターサンプラー, Teledyne ISCO 製) による採水を行っている。採水観測を行った出水イベント数を表-1 に示す。得られたサンプル水については, 濁度 (WQC-24, 東亜ディーケーケー(株)製), SS (ガラス繊維ろ紙法), 粒径分布 (レーザー回折式粒度分布測定装置 SALD-3100,

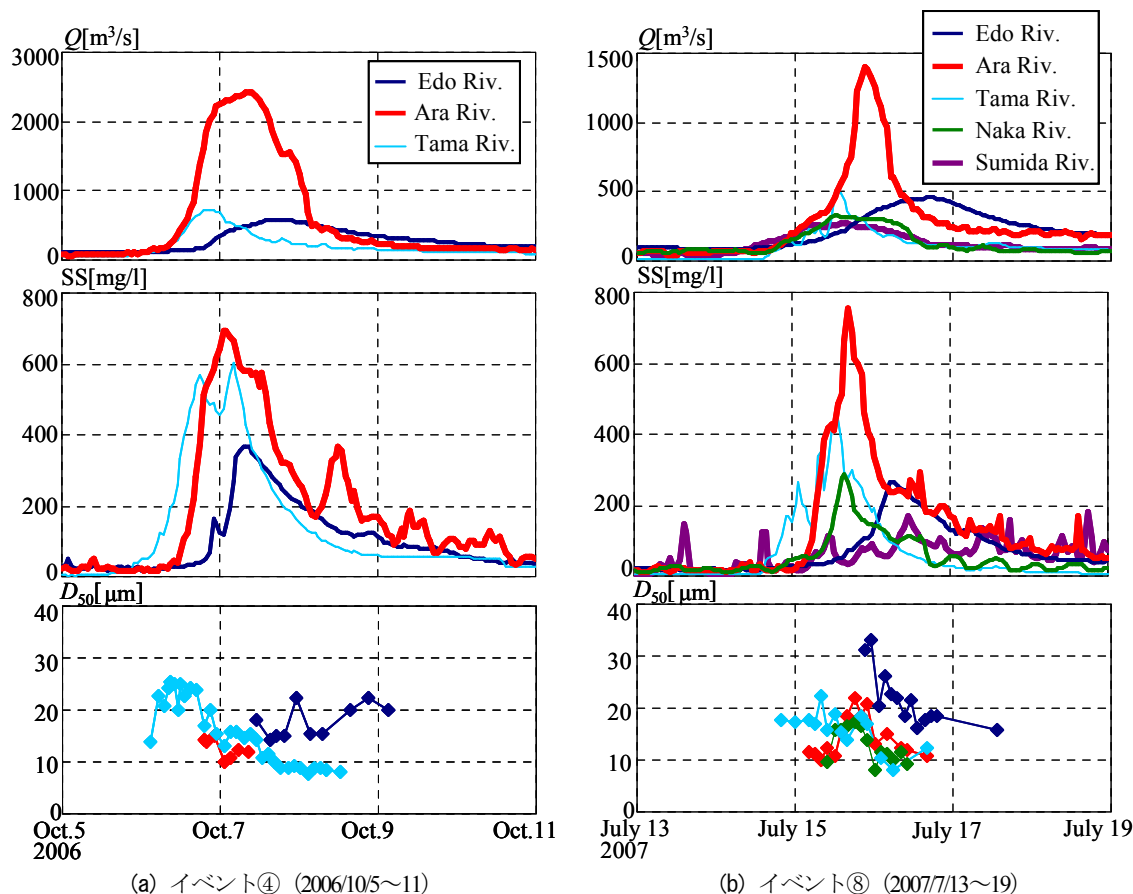


図-3 出水時における流量 Q (上段), SS (中段), 中央粒径 D_{50} (下段) の時間変化

(株) 島津製作所製) を分析する。

また浮遊土砂輸送量の算出には、各観測地点の流量データが必要であり、基本的には、隅田川を除き、二瓶ら⁷⁾と同じである。江戸川や中川では独自の $H-Q$ 式により、多摩川では堰測法による流量値を与える。また荒川では順流域末端の秋ヶ瀬堰 (34km) の流量値に流入支川や下水処理場からの放流量を加算した値とする。隅田川では、H-ADCP計測と数値解析による新しい河川流量計測システム⁸⁾により、 $H-Q$ 式を用いずに直接流量計測を行っている。これらにより時々刻々の流量値を取得し、また光学式濁度計により計測された濁度をSSに換算し、それらを掛け各河川の浮遊土砂輸送量の時系列データを求める。

3. 結果と考察

(1) 出水時におけるSSと浮遊土砂粒径の時間変化

複数河川において同時観測が行われている出水イベント④、⑧における流量 Q とSS、浮遊土砂中央粒径 D_{50} に関する時間変化を図-3に示す。イベント④ (2006/10/5~11) では江戸川・荒川・多摩川の結果が、イベント⑧ (2007/7/13~19) では全5河川の結果が各々示されている。なお、イベント⑧では、隅田川の採水観測が行われていないため、隅田川における中央粒径 D_{50} の結果は表示されていない。また、江戸川におけるイベント④では都合により

採水観測を流量ピーク付近から開始したため、増水期における中央粒径 D_{50} は示されていない。

a) イベント④

荒川や多摩川では年最大出水がイベント④において観測された。流量ピークは多摩川、荒川、江戸川の順に現われる。これは、表-1に示すように流域面積の大小と関連している。ピーク流量の大きさとしては、荒川が最も大きく、江戸川と多摩川の結果は同程度となっている。

一方、SSに関しては、荒川のSS最大値は他の2河川よりも大きいものの、その違いは流量と比べると小さい。また、多摩川のSSの方が江戸川よりも大きい。SSピークに着目すると、荒川や江戸川では流量ピークよりも前にSSピークが発生している。多摩川については、流量ピークを挟んで2つのSSピークが現われている。これらの3河川において共通している、SSピークが流量ピークの前に現われる、という濃度先行型⁹⁾が発生する要因の一つは、非降雨時に流域や河川内に蓄積された堆積土砂が出水時に流送されたためであると考えられる。また、多摩川で流量ピーク後に二つ目のSSピークが現われるのは、上流側のダム放流の影響であると考えられる。

中央粒径 D_{50} については、江戸川や荒川では、データ数が少ないため、明確な変動傾向は見られないが、多摩川では、 D_{50} のピークは増水期に現われており、増水期

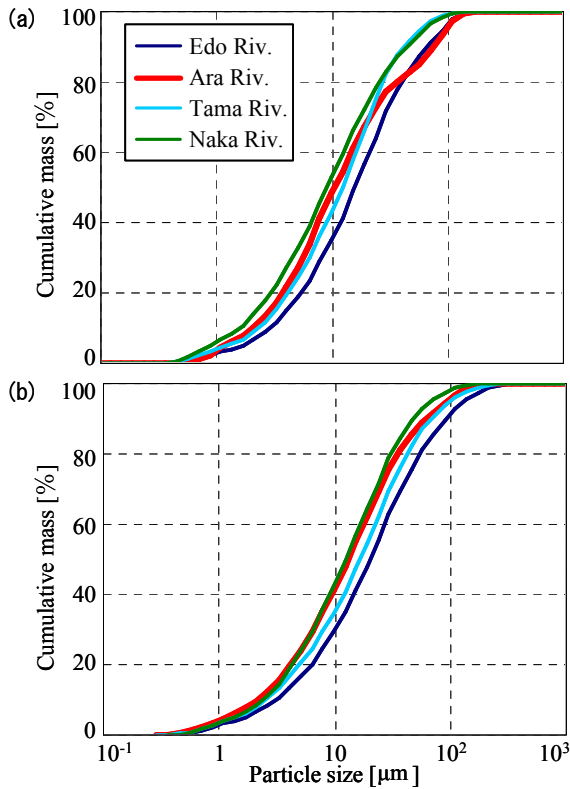


図4 低水時 (a) と出水時 (b) における浮遊土砂粒径分布

の D_{50} は減水期の値よりも大きい。また、いずれの河川も中央粒径が $30\mu\text{m}$ 以下であり、微細土砂からなるウォッシュロード成分が大部分を構成していることが分かる。

b) イベント⑧

イベント⑧における流量規模は、イベント④よりも一般的に小さい。ピーク流量の大小関係としては、荒川 > 多摩川 ≒ 江戸川 > 中川 ≒ 隅田川となっている。一方、SS に関しては、荒川 > 多摩川 > 江戸川 ≒ 中川 > 隅田川となっており、必ずしも流量と対応していない。SSピークと流量ピークの関係としては、荒川や江戸川ではイベント④と同じである。また、ダム放流が行われなかった多摩川では明確なSSピークは増水期初期と流量ピーク付近に見られる。前者はファーストフラッシュ現象に相当する。

また、浮遊土砂の中央粒径に関しては、江戸川が他の河川よりも大きい。また、江戸川では、増水期の D_{50} が減水期よりも大きい、というイベント④の多摩川と同じ傾向が確認される。この出水イベント時においても、全ての河川における浮遊土砂の中央粒径は $10\sim 35\mu\text{m}$ に収まり、この出水時でも微細土砂成分が大部分を占めている。

(2) 出水時・低水時における浮遊土砂粒径分布

各河川における浮遊土砂粒径分布を把握するために、出水時と低水時における浮遊土砂の粒径加積曲線を図-4に示す。ここでは、隅田川を除く4河川の結果が示されている。また、出水時データは、出水時の採水観測によ

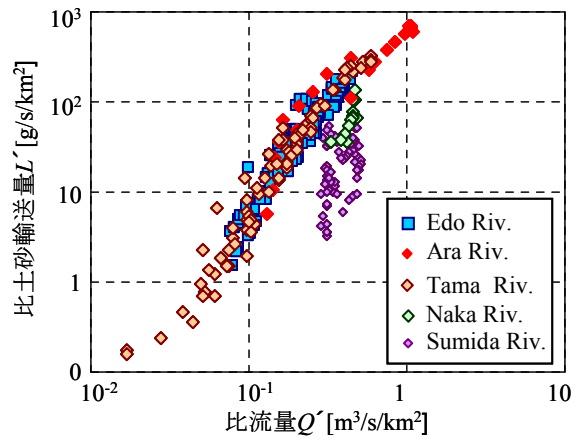


図-5 出水時における比流量 Q' と比土砂輸送量 L' の相関図

り得られたサンプル水に対する全データの平均値である。一方、低水時データは、2007年5～6月におけるある低水時に、表層バケツ採水されたサンプル水に対する結果である。これを見ると、まず、中央粒径としては、低水時では $8\sim 15\mu\text{m}$ であるのに対して、出水時では $12\sim 19\mu\text{m}$ となっており、出水時のほうが若干大きい。河川毎に低水時と出水時を比べても、中央粒径に関しては、出水時のほうが低水時よりも $3\sim 4\mu\text{m}$ 程度大きくなっている。出水時における土砂粒径の大小関係としては、江戸川 > 多摩川 > 荒川 ≒ 中川となっている。

浮遊土砂の粒径分布に関して、便宜的に $14\mu\text{m}$ 以下 (ウォッシュロード小)、 $14\sim 71\mu\text{m}$ (ウォッシュロード大)、 $71\mu\text{m}$ 以上 (浮遊砂) という3種類に分割し、各々の割合を求めた。その結果、 $71\mu\text{m}$ 未満に相当する「ウォッシュロード小」と「ウォッシュロード大」の和は、低水時で $87\sim 97\%$ と大部分を占め、出水時においても $87\sim 96\%$ と低水時と同程度の割合となる。このように、東京湾の主要流入河川では、浮遊土砂輸送過程においてウォッシュロード (ここでは $71\mu\text{m}$ 未満) の占める割合が高いことが示された。また、河川間で比較すると、出水時におけるウォッシュロード成分の占める割合が最も高いのは中川であり、最も低いのは江戸川である。

(3) 比流量 Q' と比土砂輸送量 L' の関係

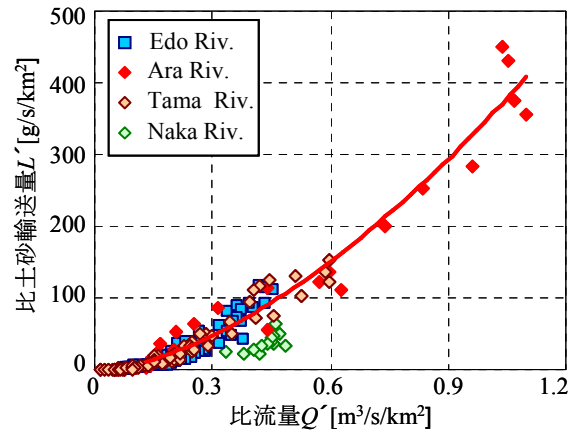
異なる流域規模を有する河川間の浮遊土砂輸送特性を比べるために、流量や土砂輸送量を各流域面積で除した、比流量 Q' と比土砂輸送量 L' の相関図を図-5に示す。ここでは、各河川の観測地点における流域面積として表-1に示される値を用いる。図中には、出水イベント時における結果を表示している。これより、同じ比流量条件下では、江戸川や荒川、多摩川の比土砂輸送量は同程度であるものの、これら3河川の結果は中川や隅田川よりも大きい。これは、表-1に示すように、隅田川や中川の山林率の割合が、他の三河川と比べて小さく、流域内における土砂

生産源が少ないためであると考えられる。このうち隅田川では、比流量と比土砂輸送量間のバラツキが大きく、土砂輸送量に対する流量依存性が他の河川と比べて低い。また、江戸川や多摩川における結果はほぼ一致しているが、一方、荒川に関しては、比流量 Q' に対する比土砂輸送量の増加率は、多摩川や江戸川よりも小さい。 $L'-Q'$ 式 ($L' = aQ'^b$, a, b : 係数) を求めたところ、係数 b は荒川、江戸川、多摩川ではそれぞれ1.70, 2.44, 2.43となり、比土砂輸送量に対する流量依存性が荒川と江戸川・多摩川で異なる。

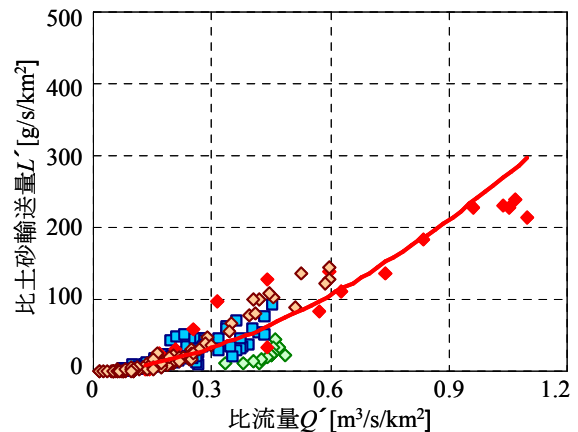
このような L' と Q' の相関関係が荒川と江戸川・多摩川の間で異なる要因を調べるために、粒径別に L' と Q' の相関図を作成した結果を図-6に示す。ここでも粒径分布を「ウォッシュロード小」、「ウォッシュロード大」、「浮遊砂」に分け、隅田川を除く4河川の結果が示されている。なお、図化の関係で対数を用いていないことに注意されたい。これを見ると「ウォッシュロード小」では江戸川、荒川、多摩川でほぼ同じ値であり、中川の比土砂輸送量が最も小さい。一方、「ウォッシュロード大」や「浮遊砂」では、江戸川や多摩川の方が荒川の結果よりも大きくなる傾向が見られる。このように、図-5に示した $L'-Q'$ 関係が、江戸川・多摩川と荒川で異なるのは、土砂粒径が相対的に大きい「ウォッシュロード大」や「浮遊砂」における $L'-Q'$ 関係の違いが反映されているためである。このように江戸川や多摩川では、相対的に大きな粒径における比土砂輸送量が大きくなっており、それには山林率が高いことが定性的に対応していると考えられる。

(4) 粒径別土砂輸送量

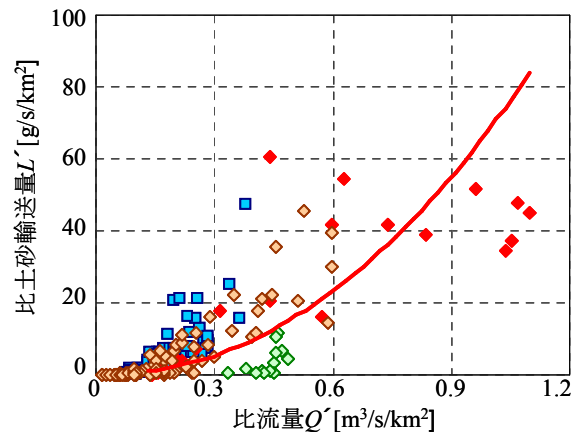
長期間にわたる粒径別土砂輸送量を河川間で比べるために、長期の濁度データが既に取得されている江戸川、荒川、多摩川を対象として、流量と粒径別浮遊土砂輸送量の累積値の時間変化を図-7に示す。図中には、2006年7月1日から2007年7月31日まで結果が図示されている。なお、この期間全てにおいて、多摩川や荒川では濁度観測が行われていないので、未計測の部分に関しては前述した $L'-Q'$ 式を粒径別に作成し、それを用いて土砂輸送量を算定している。また、図中には、土砂輸送量が大きい出水イベント(②, ④, ⑥, ⑧)を矢印で示す。まず、流量に関しては、年最大規模の出水時(江戸川ではイベント②, 荒川・多摩川ではイベント④)には流量の増加が目立つ。しかしながら、それ以外の出水時では急激な累積流量の増加はなく、低水時全体における流量増加の寄与が大きい様子が全ての河川で共通している。一方、土砂輸送量に関しては、小規模出水においても顕著に増加しており、土砂輸送量全体に占める出水時の寄与が高くなる傾向が、3河川の全ての土砂粒径において見られる。特に、年最大出水時には、各河川における土砂輸送



(a) ウォッシュロード小



(b) ウォッシュロード大



(c) 浮遊砂

図-6 比流量 Q' と粒径別比土砂輸送量 L' の相関図(出水時、図中実線は荒川の結果に関する近似式を示す)

量の増加量が著しい。

河川間における累積土砂輸送量を比べると、「ウォッシュロード小」に関しては、出水イベント④以降、荒川の輸送量が最も大きくなっており、合計で見ると、荒川>江戸川>多摩川の順となっている。累積流量は江戸川の方が荒川よりも大きいものの、出水時における最大流量は荒川において大きくなることが多いため(図-3)、出水時における「ウォッシュロード小」の輸送量が荒川

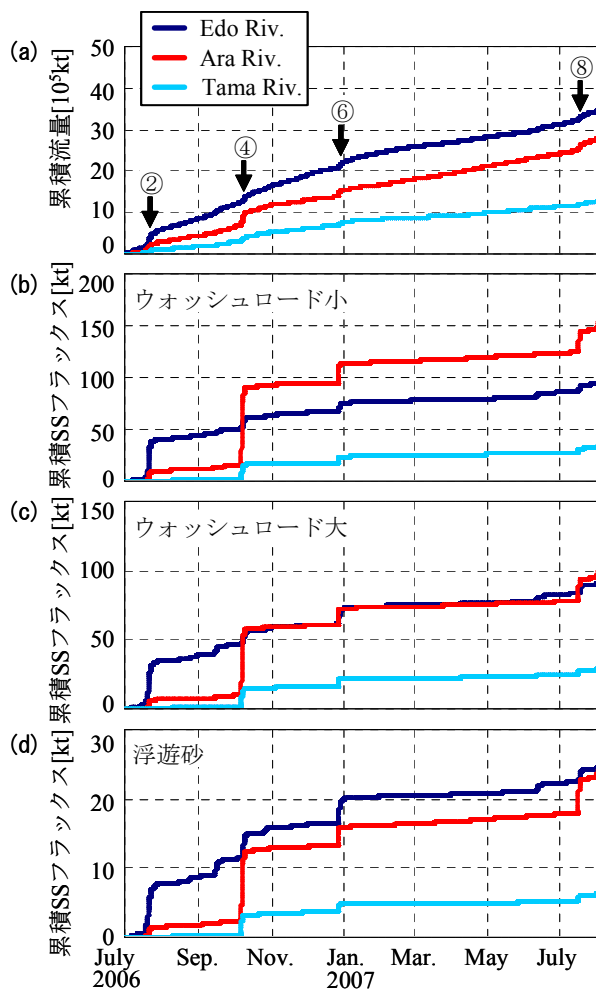


図-7 流量 (a) と粒径別土砂輸送量 (ウォッシュロード小 (b), ウォッシュロード大 (c), 浮遊砂 (d)) の累積値の時間変化

において卓越したものと考えられる。次に「ウォッシュロード大」に関しては、全般的に江戸川と荒川の値は同程度となっている。合計としては、荒川≒江戸川>多摩川となっている。荒川に関しては、「ウォッシュロード大」の輸送量は「ウォッシュロード小」の輸送量を下回るものの、江戸川や多摩川では、両者はほぼ同程度となっている。さらに、「浮遊砂」に関しては、全体としては江戸川の値が最も大きい、最終的には、「ウォッシュロード大」と同じ大小関係となっている。

以上のことから、「ウォッシュロード小」では荒川の輸送量が卓越するものの、「ウォッシュロード大・浮遊砂」では、荒川と江戸川の輸送量は同程度となっている。また、多摩川においても粒径が大きいほど、全体に占める割合も増えている。これらの結果は、前節で述べた粒径別土砂輸送量と比流量の関係と対応しており、流域内における土砂生産・輸送特性が粒径により異なることが明らかとなった。

4. おわりに

本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) 出水時における浮遊土砂粒径分布を調べたところ、全河川においてウォッシュロードとなる微細土砂成分が大部分を占めることが示された。また、浮遊土砂粒径の大小関係は、江戸川>多摩川>荒川≒中川となっている。
- 2) 同一比流量 Q に対して、江戸川、荒川、多摩川の比土砂輸送量 L は中川や隅田川の値よりも大きい。また、多摩川と江戸川の L - Q 関係はほぼ一致するが、荒川とは異なる。この差は、粒径が相対的に大きな「ウォッシュロード大」や「浮遊砂」成分の違いによること、それが山林率の違いと定性的に対応していることが示された。
- 3) 長期間の浮遊土砂輸送量を江戸川・荒川・多摩川で比較した結果、「ウォッシュロード小」では荒川が最も大きいのに対して、「ウォッシュロード大・浮遊砂」では江戸川と荒川が同程度であり、流域内における土砂生産・輸送特性が粒径による異なることが示された。

謝辞: 国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所・荒川下流河川事務所、水資源機構・利根導水総合管理所、東京都水道局・第五建設局には流量データをご提供して頂くと共に、観測実施にご協力して頂いた。多摩川調査の一部は、国土交通省関東地方整備局「羽田周辺水域環境調査研究委員会」として行われたものである。現地観測の実施には、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室学生諸氏に大変お世話になった。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 安藤晴夫, 柏木宣久, 二宮勝幸, 小倉久子, 川井利雄: 1980年以降の東京湾の水質汚濁状況の変遷について —公共用水域水質測定データによる東京湾水質の長期変動解析—, 東京都環境科学研究所年報, pp.141-150, 2005.
- 2) 例えば, 中央環境審議会: 第6次水質総量規制の在り方について (答申), 21p, 2005.
- 3) 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.
- 4) 高田秀重: 陸域から沿岸海域への物質フラックス, 沿岸海洋研究, Vol.34, No.2, pp.111-117, 1997.
- 5) 横山勝英, 藤田光一: 多摩川感潮域の土砂動態に関する研究, 水工学論文集, Vol.45, pp.937-942, 2001.
- 6) 二瓶泰雄, 江原圭介, 臼田美穂, 坂井文子, 重田京助: 江戸川・荒川・多摩川における水質環境と流入負荷特性, 海岸工学論文集, Vol.54, pp.1226-1230, 2007.
- 7) 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, pp.1221-1225, 2007.
- 8) 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.
- 9) 恩田裕一, 奥西一夫, 飯田智之, 辻村真貴 (編): 水地形学 —山地の水循環と地形変化の相互作用—, 古今書院, pp.132-142, 1996.

(2007. 9. 30 受付)