

濁度連続観測及び底質分析に基づく 多摩川流域のSS供給源の推定

EVALUATION OF SUSPENDED-SOLID SOURCE IN TAMAGAWA RIVER WATERSHED WITH TURBIDITY CONTINUOUS MONITORING AND BED-MATERIAL ANALYSIS

武川一樹¹・二瓶泰雄²・田中健太郎¹

Kazuki TAKEKAWA, Yasuo NIHEI and Kentaro TANAKA

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)

For comprehensive management of sediment of inner bays, we attempt to evaluate suspended-solid(SS) source in the watershed of Tamagawa River, one of large rivers flowing into Tokyo Bay. For this purpose, we conducted continuous monitoring of turbidity in four stations and X-ray fluorescence (XRF) analysis of riverbed material obtained at many stations. It is found that the coefficient b in sediment rating curve in low-flow condition is larger than that in high-flow condition in mountain rivers like Akikawa River. The results reveal that 67 % of total SS transports in Tamagawa River is transported from mountain rivers and other of SS is mainly supplied from riverbed materials which are picked up under high-flow conditions. These tendency are also confirmed through the XRF analysis of bed material.

Key Words : *suspended solid, sediment transport, sediment rating curve, Tamagawa River, X-ray fluorescence analysis*

1. はじめに

水系一貫土砂管理では、源流部から河川、沿岸にわたり土砂動態を把握・管理する必要があり、土砂総量だけでなく、粒径別に検討することが求められている¹⁾。様々な流砂形態のうち浮遊砂やウォッシュロードは、構成する土砂の粒径が相対的に小さいため、沈降せずに長距離輸送されやすく、流れの遅い河口域や沿岸部に沈降・堆積し、干潟や浅場の形成プロセスと密接に関連する。また、これらの浮遊土砂 (SS) の構成材料は、比表面積が大きいことから、栄養塩類や有機物のキャリア (運搬物質) となり得るため、陸域から海域への汚濁物質供給過程に大きな影響を及ぼしている。このように、流域圏におけるSSの動態を把握することは、土砂管理の面のみならず、富栄養化が問題となる内湾・湖沼での水質管理の面からも極めて重要となる²⁾。しかしながら、流域全体にわたるSS動態の調査事例は、涸沼川³⁾・⁴⁾や筑後川⁵⁾において行われている程度であり、水質問題がある内湾流域全体を対象としたものは皆無である。

このような現状を鑑みて、著者らは、富栄養化問題が長年解決しない東京湾流域⁶⁾を対象として、SSモニタリ

ングネットワークを構築し、河川から東京湾へのSS供給量を計測・推定している^{7)~9)}。そこでは、主要河川の江戸川や荒川、多摩川を含む7河川9地点において、光学式濁度計による連続観測を早い地点で2006年より行っている。これまでの研究では、陸域から東京湾へのSS流入量計測に重点を置いており、流域内の土砂動態マップ作成には取り組めておらず、流域圏にわたる土砂・水質管理に必須となる、流域のどの場所からどの程度のSSが発生・流出しているかは不明である。

本研究では、主要河川の中で多摩川流域に着目し、二種類の手法により、SS供給源を推定することを試みる。まず、一つ目の手法としては、本川2か所や支川(秋川と浅川)において光学式濁度計による濁度連続調査を行い、それから得られる LQ 式(L :SS輸送量, Q :流量)に基づいて、多摩川流域全体における土砂動態マップを作成する。また、二つ目の方法として、土砂起源推定に用いられる蛍光X線分析^{10)・11)}を本川と支川の河床堆積物について行う。その際には、多摩川の河床では軟岩が露出・侵食されやすく¹²⁾、それらがSSの起源となることが想定されるため、河床堆積物を細砂と礫に分けた形で蛍光X線分析を行う。この二種類の結果を合わせて、SS

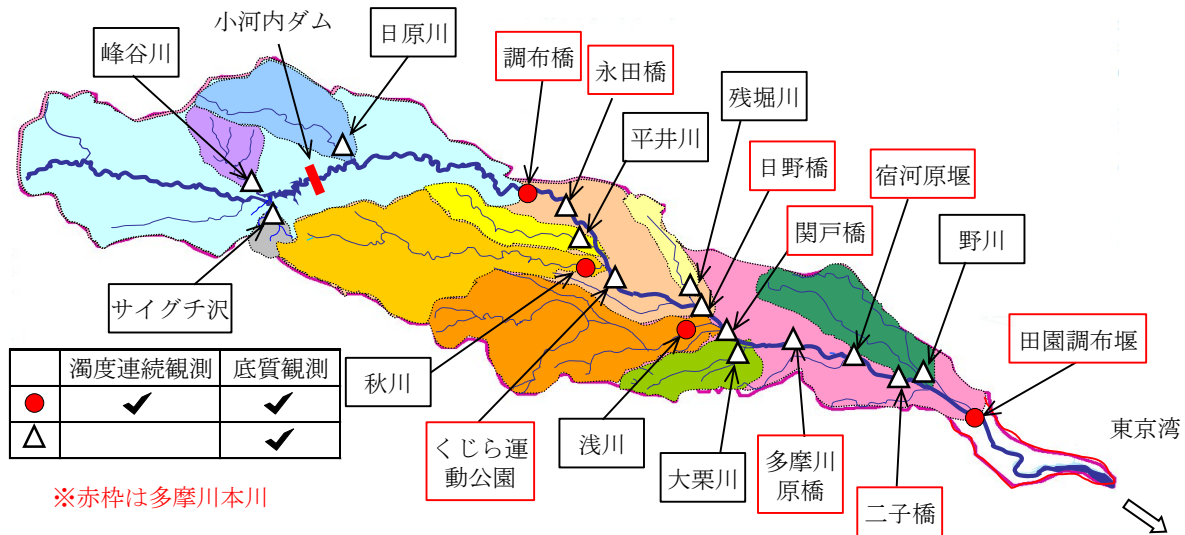


図-1 多摩川流域マップと観測点位置

の供給源を定量的に検討する。

2. 研究方法の概要

(1) 多摩川流域の概要

多摩川は、笠取山を源流域として、山梨県、東京都、神奈川県を流れ、東京湾湾奥部に流入し、全長は138km、流域面積は1240km²である。図-1は多摩川流域マップを示しており、上流部に小河内ダムがあり、主な支川としては、山地河川の秋川（流域面積169.6km²）や浅川（同154.6km²）、都市河川の大栗川（同41.8km²）や野川（同67.5km²）などがある。本川や支川の流域面積や土地利用状況は表-1に示すとおりである。この多摩川流域における土砂動態調査は、単発的に行われている程度であり¹³⁾~¹⁵⁾、その実態は不明な点が多い。

(2) 濁度連続観測

多摩川水系における濁度連続観測地点は、図-1中に示すように、本川上流部の調布橋（河口より+59.5km）と下流部で順流部末端・田園調布堰（同+13km）、代表的な支川である浅川・高幡橋（本川合流部から+3km）と秋川・東秋留橋（同+2km）である。これらの地点において、ワイパー付き光学式濁度計（Compact-CLWまたはInfinity-Turbi, JFEアドバンテック（株）製）を低水路内に設置し、濁度を自動連続的に計測した。観測期間は、本川・上流部（調布橋）では2011/7/7より現在（2011/9/30）、下流・田園調布堰では2006/7/31より現在（2011/9/30）、浅川では2010/9/3~11/4、秋川では2011/8/16~12/8となっており、計測機材の関係で全地点での同時観測はできていない。また、本川下流部では、自動採水機（ウォーターサンプラー-6712, Teledyne ISCO製）を設置し、出水時に採水している¹⁶⁾。その採水サンプルのSSの粒度分布を見ると、図-2中に示すように、ウォッシュロードと見なされる粒径100μm以

表-1 浮遊土砂供給量推定河川の流域情報

観測地点	流域面積	土地利用[%]				
		山林	田	畑	市街地	その他
大栗川	42	24	1	3	71	1
秋川	170	85	1	5	8	1
浅川	155	59	2	6	32	2
野川	68	3	0	7	88	1
平瀬川	13	10	1	5	84	1
平井川	38	66	1	7	25	1
残堀川	35	9	0	15	75	1
三沢川	16	26	4	5	65	0
二ヶ領本川	14	9	0	3	88	0
谷地川	19	32	2	12	52	1
残流域	239	8	1	5	75	11
本川上流部	465	96	0	1	2	1
本川下流部	1200	51	1	6	35	7

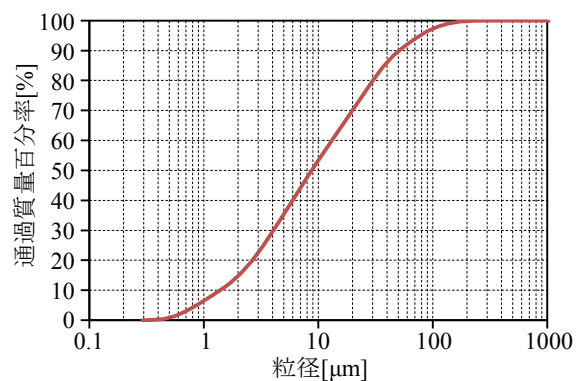


図-2 出水時多摩川における浮遊土砂の粒径分布（本川・田園調布堰、2007/9/6~2007/9/10の平均値）

下¹⁷⁾の割合がSS全体の97%であり、濁度計で計測するSSのうちほぼ全てウォッシュロードと見なすことができる。

計測された濁度からSSへの換算係数は田園調布堰での採水結果から得られた相関式(SS[mg/L]=1.79*濁度[FTU])⁹⁾を用いる。これらのデータより、浮遊土砂輸送量Lと

流量 Q の関係式 (L - Q 式) や、それぞれを流域面積で除した比浮遊土砂輸送量 L' と比流量 Q' の相関式 (L' - Q' 式) を作成する。この L' - Q' 式算出に当たり、田中・二瓶⁹⁾ に倣って、ある流量範囲を移動平均した“移動平均 L' - Q' 式”を用い、かつ、低流量と高流量で L' - Q' 式の傾きが変化していたので、これを分ける閾値(本川上流: $60\text{m}^3/\text{s}$, 下流: $50\text{m}^3/\text{s}$, 浅川: $13\text{m}^3/\text{s}$, 秋川: $10\text{m}^3/\text{s}$) を境に、各河川(地点) で2つの L' - Q' 式を求める。

上記の L' - Q' 式の結果に基づいて、多摩川水系の支川からの SS 供給量を推定し、SS 動態マップを作成する。本川・支川の SS 供給量推定方法としては、本研究で濁度観測を行った本川上流地点と下流地点、支川の浅川と秋川では、前述した L - Q 式に別途計測されている流量を代入し、各地点の輸送量とする。また、濁度データはないものの、流量観測データのみ存在する都市河川の大栗川では、別流域の都市河川(東京都神田川)において別途得られている L' - Q' 式を用いる。さらに、流量・濁度データの無いその他の河川では、土地利用特性の近い河川の土砂輸送量に流域面積比を掛けた結果を与える。ここでは、山地河川である平井川には浅川の結果、その他の河川では大栗川の結果、をそれぞれ用いる。

(3) 底質分析

濁度観測とは別の観点で SS 起源を推定するために、河川堆積物を採取し、蛍光 X 線分析を行って底質中に含まれる元素の割合を求める。観測地点は、図-1 の Δ もしくは \circ 印で示すように、本川では濁度観測地点を含む 9 地点、支川としては都市河川(野川, 大栗川, 残堀川)と山地河川(浅川, 秋川, 平井川), 本川調布橋上流の日原川, 峰谷川, サイグチ沢という 9 地点である。底質採取日は、本川 3 地点(調布橋, 日野橋, 田園調布堰)と全ての支川では 2010 年 10, 11 月, その他の本川地点では 2011 年 7, 9 月である。

採取された底質サンプルから細砂 ($250\mu\text{m}$ 以下) と礫 ($2\sim 50\text{mm}$) に分けて、それぞれをすり潰して $150\mu\text{m}$ 以下に微細化する。それらのサンプルを 5.0g 用意して、全自動蛍光 X 線分析装置 (Magix PRO, フィリップス社製) を用いて半定量分析により構成元素を求め、ファンダメンタルパラメータ法 (FP 法) により構成元素の含有率を算出している¹⁸⁾。これらの分析結果より、河床材料の構成元素の類似性を見出し、濁度観測結果と合わせて SS の起源を検討する。

3. 結果と考察

(1) 比浮遊土砂輸送量 L' と比流量 Q' の関係

本川と支川における土砂輸送特性を比較するため、多摩川本川上流(調布橋)と下流(田園調布堰), 支川の浅川及び秋川の比浮遊土砂輸送量 L' と比流量 Q' の相関関係を図-3 に示す。ここでは、観測データの特徴を適切に

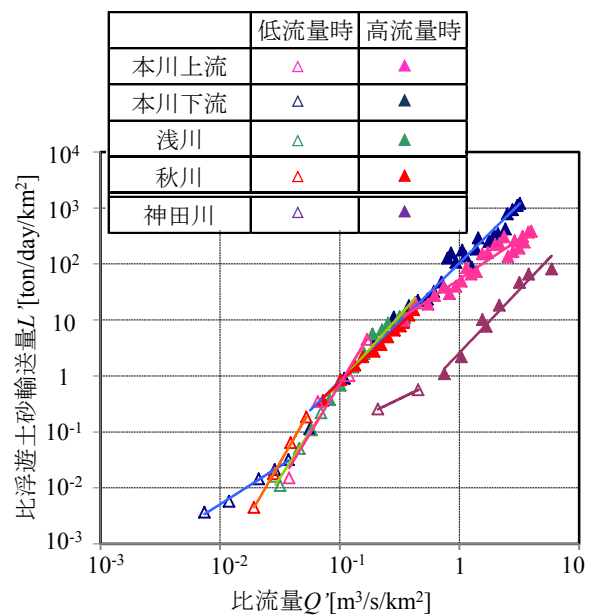


図-3 比浮遊土砂輸送量 L' と比流量 Q' の相関図

表-2 L' - Q' 式の係数 a, b

河川名	低流量時		高流量時	
	a	b	a	b
本川上流	2193.3	3.4	53.3	1.4
本川下流	2.7	1.4	103.9	2.1
浅川	1175.0	3.3	186.3	2.4
秋川	10259.0	3.7	84.1	2.0
神田川	1.3	1.0	2.6	2.2

抽出するために、 L' - Q' 関係の生データに対して移動平均操作したものを図中にプロットするとともに、その移動平均データに対する近似式 ($L'=aQ'^b$, a, b : 係数) も合わせて示す。得られた係数 a, b を表-2 に示す。また、典型的な都市河川の一つである神田川の結果⁹⁾ も表示している。これより、本川上流・下流及び支川の秋川, 浅川の L' - Q' 関係はおおむね類似していると共に、同一比流量の比浮遊土砂輸送量は市街地流域のみを抱える神田川よりも山地域を含む本川・支川の方が卓越していることが分かる。また、5つの L' - Q' 関係の傾き b に着目すると、低流量時と高流量時で異なっている。すなわち、本川下流や神田川では、高流量時の係数 b が低流量時を上回る一般的な結果となっているが、流域に山地域を多く含む本川上流, 支川浅川・秋川では、高流量時の係数 b が低流量時を下回るという逆の傾向となり、興味深い結果となっている。これは、低流量時に洪水初期の SS 増加現象 (ファーストフラッシュ現象) が反映されているためであると考えられる。

前述した方法にて作成した L' - Q' 式の精度を検証するために、浮遊土砂輸送量に関する濁度連続観測結果と L' - Q' 式より算出した推定結果の相関図を図-4 に示す。ここでは、本川上・下流と秋川, 浅川を対象とし、各地点の観測期間中における総浮遊土砂輸送量を年間値に換算したも

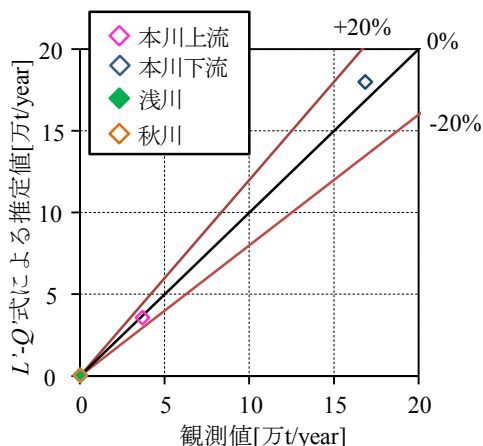


図-4 総浮遊土砂輸送量の観測値とL-Q式による推定値の比較
 のを表示している。また、図中には観測値と推定値の相対差が分かるようにするため、相対差0と±20%に相当する実線も表示している。これを見ると、全ての地点にて概ね20%以内に収まっており、L-Q式の推定精度が良好であり、これは著者らにより別の河川における結果⁹⁾と整合している。

(2)SS 動態マップの作成

上述した濁度連続観測結果より得られたL-Q式に基づいて、2006年～2009年における累積流量及び累積浮遊土砂輸送量を図-5に示す。図中には、濁度連続観測を行っている本川下流部(田園調布堰)における累積値と共に、その内訳として、本川上流部(調布橋)と秋川、浅川、「その他」の4つに分けた形で表示している。これを見ると、流量は概ね右肩上がりに増加しているのに対して、浮遊土砂輸送量はステップ的に増加している。これは、浮遊土砂輸送量が出水時に集中的に増加しているからであり、特に関東地方に大規模出水をもたらした台風0709号出水時¹⁰⁾では、どの地点においても浮遊土砂輸送量は著しく増加していることが分かる。また、本川下流部の浮遊土砂輸送量に対する内訳を見ると、本川上流・秋川・浅川の占める割合が大きくなっており、山地域を流域とする河川の浮遊土砂供給量が大きくなっていることが伺える。

そこで、多摩川水系全体におけるSS動態マップを図-6に示す。ここでは、2006年から2009年における年間平均値を表示しており、本川は濁度観測を行っている上流部(調布橋)と下流部(田園調布堰)のみとし、その間に流入する支川としては表-1に示されている河川を選定している。また、図中では、土地利用特性に基づいて、各支川を山地河川や都市河川に分類して表示している。なお、算出方法としては、2.2に記述した方法に基づいている。これより、本川下流部の浮遊土砂輸送量は18.3万t/yearとなるのに対して、本川上流部では7.22万t/year、山地河川(秋川、浅川、平井川)では5.09万t/year、上記以外の

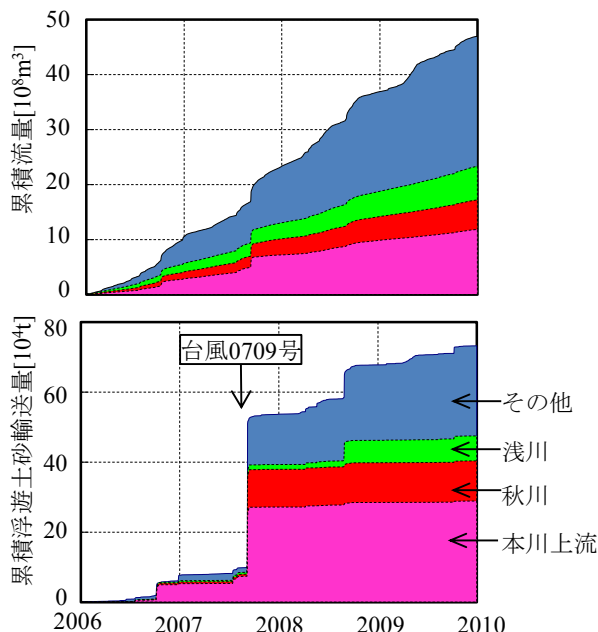


図-5 流量(上)と浮遊土砂輸送量(下)の累積値の経年変化

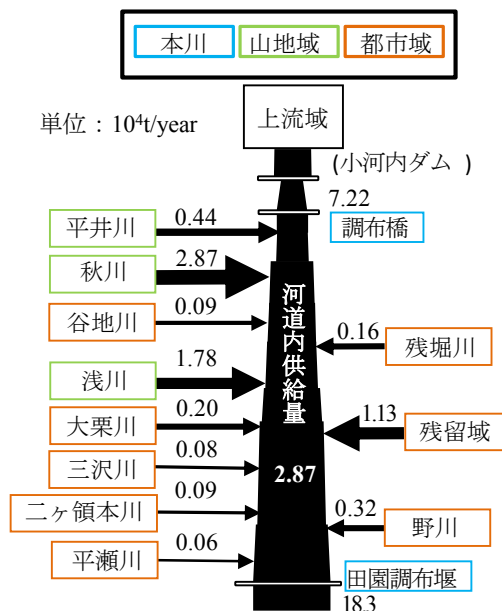


図-6 SS動態マップ(2006～2009年の平均値)

支川である都市河川では2.12万t/yearとなる。これらの総和は等しくならず、その残差3.87万t/yearは「河道内」からの供給と見なされ、河道内供給による影響が有意であることが分かる。このように、浮遊土砂供給量の大小関係としては、本川上流>山地河川>河道内>都市河川となっている。

本川下流部の浮遊土砂輸送量に対する本川上流・山地河川・都市河川からの寄与率をまとめたものを表-3に示す。ここでは、流域面積と浮遊土砂原単位(総浮遊土砂輸送量/流域面積)も合わせて示している。これより、寄与率は上流部において39%、山地河川において28%となっており、本川上流部の土地利用特性の96%が山林であることを考慮すると(表-1)、山地域を多く含む河川

表-3 各河川における浮遊土砂輸送量の寄与率と流域面積、SS原単位の比較

エリア	割合 [%]	流域面積 [km ²]	原単位 [t/year/km ²]
本川上流	39	465.0	155
山地河川	28	362.6	140
都市河川	12	444.4	48

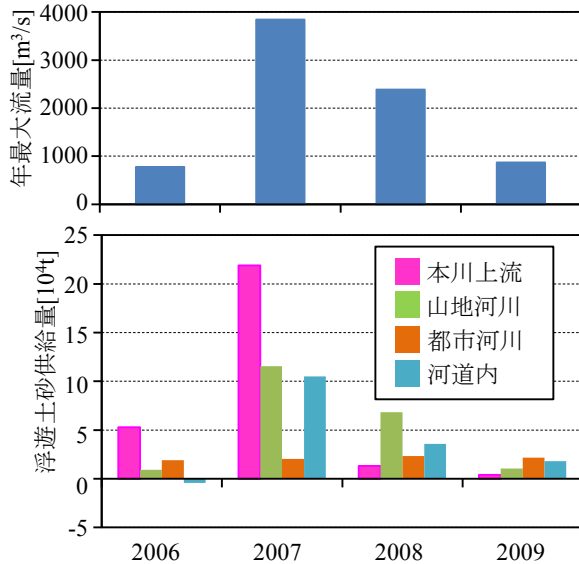


図-7 各年の浮遊土砂収支と年最大流量（本川下流）

からの土砂供給量が全体の2/3に達していることが分かる。また、浮遊土砂原単位としては、本川上流と山地河川はほぼ同程度であり、都市河川はこれらの1/3程度の値となっており、都市河川からの寄与は相対的に小さい。

また、図-6に示すSS動態マップより、有意である「河道内」供給分について詳細に検討するために、2006年から2009年における本川上流、山地河川、都市河川、河道内からの浮遊土砂供給量の経年変化を図-7に示す。このうち、「河道内」は土砂収支から算出するため、負となる場合があることに注意されたい。また、図中には年最大流量も合わせて表示する。これより、「河道内」は年により大きく変化し、出水規模が大きい2007、2008年では河道内供給も大きくなっている。これは、出水規模が大きくなると、低水路内の堆積物のみならず、河岸や中洲の堆積物が巻き上げられやすくなるためである。以上より、多摩川におけるSS供給源としては、基本的には山地域（本川上流や山地河川の流域）になるが、河道内堆積物も最大で25%程度の寄与を示しており、有意な供給源となっていることが示唆された。

(3) 底質分析による検討

濁度観測データとは別の観点からSS供給源を検討するために、河床堆積物の蛍光X線分析から得られたデータについて記述する。図-8は、本川におけるFe（鉄）含有率の縦断変化を示したものである。ここでは、本川で得

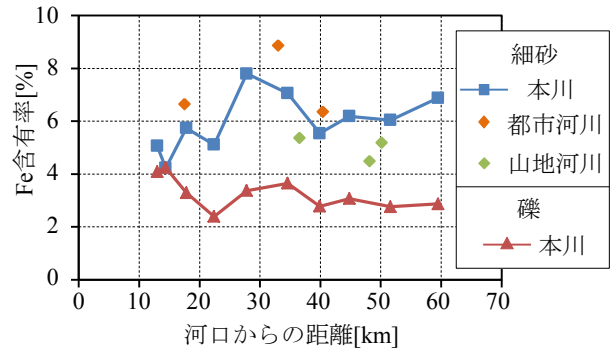


図-8 本川における細砂と礫のFe含有率の縦断変化

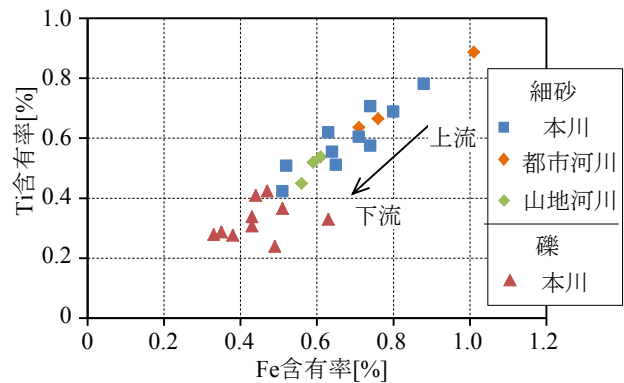


図-9 Fe含有率とTi含有率の相関図

られた細砂と礫に加えて、支川の細砂に関する結果を表示している。なお、支川（山地河川と都市河川）に関しては、横軸として、本川合流地点の距離を採用している。これより、山地河川の合流区間を含む河口から40~60km区間で下流に向けて減少し、その後の都市河川の合流区間の一部（28~40km）では逆に増加しているように見受けられる。計測範囲最下流部の細砂に関するFe含有率は、どの支川よりも小さく、支川からの影響のみならず、他の細砂供給源があることが示唆される。一方、本川の礫のFe含有率は全体的に流下方向に一様であり、その値は細砂より小さい。このことより、本川における細砂は、支川からの供給のみならず、本川における礫同士の衝突等により微細化した礫の一部が細砂として供給されたことが示唆される。

このように、含有率に支川からの影響が見られた元素に着目し、本川における細砂と礫、都市河川と山地河川の細砂を対象に、Fe（鉄）含有率とTi（チタン）含有率の相関関係を調べた結果を図-9に示す。これを見ると、本川の細砂は上流から下流方向に行くに連れて左下方向に変化している。また、本川下流部の値は、どの支川（山地・都市河川）よりも両含有率が低くなっており、支川の細砂との混合だけでは、本川における両含有率の縦断変化は説明できない。一方、本川下流部の細砂の含有率が本川の礫の値に近似していることから、本川の礫から細砂への移行が生じている可能性が高いことが確認される。

以上のことから、細砂成分である SS 供給源としては、基本的には山地域からの寄与が大きいものの、本川の礫からの供給が少なからず影響していることが示唆されており、濁度連続観測結果と定性的には一致する結果が得られた。

5. 結論

本研究では、SS の供給源を推定するために、多摩川水系にて濁度連続観測及び底質分析を実施した。得られた主な結果は以下の通りである。

- 1) 濁度連続観測から得られた $L-Q$ 関係の比較より、同比流量における比浮遊土砂輸送量は都市河川の神田川より山地河川の多摩川水系が卓越することが示された。また、 $L-Q$ 式を低流量時と高流量時の 2 つに分けた結果、本川下流部（田園調布堰）と神田川のケースとは異なり、山地域を流域に多く含む本川上流部（調布橋）と支川の秋川、浅川では低流量時の $L-Q$ 式の傾きが大きくなることが判明し、それがファーストフラッシュ現象の影響によることが示唆された。
- 2) 水系全体における SS 動態マップを作成したところ、本川下流部での輸送量のうち、本川上流部が 39.5%、山地河川が 27.8%、都市河川が 11.6%、河道内が 21.2% となり、山地河川及び河道内からの寄与が大きいことが明らかとなった。また、2006 年から 2009 年の各年の浮遊土砂供給量を比較した結果、寄与率が各年で大幅に変動しており、出水規模と共に河道内からの供給量が大きくなることが明らかとなった。
- 3) 河床堆積物に関する蛍光 X 線分析結果に基づいて、Fe（鉄）含有率と Ti（チタン）含有率の相関関係を調べた結果、本川の細砂の流下方向変化に対して、山地河川や都市河川の影響が見られると共に、本川の礫から細砂への移行が必要となることが明らかとなった。これより、細砂成分である SS 供給源としては、基本的には山地域からの寄与が大きいものの、本川の礫からの供給が少なからず影響していることが示唆されており、濁度連続観測結果と定性的には一致する結果が得られた。

謝辞：本研究では、京浜河川事務所、東京水道局には流量データをご提供して頂いたと共に、観測実施にご協力して頂いた。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) 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) 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) 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，李參熙，赤木泰雄：洪水時広域採水による濁沼川水系の土砂動態，水工学論文集，Vol.42, pp.1045-1050, 1998.
- 4) 二村貴幸，諏訪義雄，谷口丞，末次忠司，平館治：細粒土砂動態観測により明らかにされた濁沼川流域の細粒土砂供給特性，河川技術論文集，Vol.8, pp.213-218, 2002.
- 5) 横山勝英，藤塚慎太郎，中沢哲弘，高島創太郎：多点濁度観測による筑後川水系の SS 流出・輸送特性に関する研究，水工論文集，Vol.52, pp.553-558, 2008.
- 6) 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.
- 7) 重田京助，二瓶泰雄，坂井文子，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.
- 8) 二瓶泰雄・重田京助，伊藤雅人，星野彰成，福田昌洋，加藤靖之：東京湾流入河川における土砂輸送・底質環境特性，海岸工学論文集，Vol.56, No.2, pp.1171-1175, 2009.
- 9) 田中健太郎，二瓶泰雄：SS モニタリングネットワークに基づく東京湾への浮遊土砂供給特性の把握，水工学論文集，Vol.55, pp.S_1327-S_1332, 2011.
- 10) 飯田友章，加藤孝幸，上田和幸，水野直弥，小俣雅志：FP 法蛍光 X 線分析による堆砂供給源の迅速推定，日本応用地質学会北海道支部北海道応用地質研究会，Vol.30, pp.1-5, 2010.
- 11) 田代喬，登立公平，辻本哲郎：流域地質構造が河床材料特性の流下方向変化に及ぼす影響，河川技術論文集，Vol.14, pp.121-126, 2008.
- 12) (財)河川環境管理財団河川環境総合研究所：河道特性に及ぼす粘性土・軟岩の影響と河川技術，河川環境総合研究所資料，Vol.29, pp.71-111, 2010.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 東京湾河口干潟保全検討会：東京湾河口干潟保再生検討報告書，302p, 2004.
- 16) 二瓶泰雄・坂井文子・重田京助・灘岡和夫・八木宏・諸星一信・鈴木信昭・松坂省一・有路隆一・峯浩二：2007 年台風 9 号出水時における多摩川の土砂・栄養塩・有機物負荷特性，河川技術論文集，Vol.14, pp.473-478, 2008.
- 17) 江頭進治，芦田和男，金屋敷忠儀：微細土砂の流出解析法とその適用に関する研究，水理講演会論文集，Vol.25, pp.481-487, 1981.
- 18) 園田司，河合進，赤松信：ファンダメンタルパラメーター法によるスラグ・岩石の蛍光 X 線分析，分析化学，Vol.35, pp.T136-T140, 1986.

(2011. 9. 30 受付)