

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

SUSPENDED-SEDIMENT TRANSPORTS FLOWING INTO TOKYO BAY WITH A SS MONITORING NETWORK

田中健太郎¹・二瓶泰雄²

Kentaro TANAKA and Yasuo NIHEI

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 sediments of inner bays, it is important to understand the suspended-sediment transports from the watershed through rivers flowing into inner bays. However the sediment transport have not been understood especially under flood-flow conditions due to few continuous monitoring data for suspended sediment transports. For this purpose, we have installed turbidity sensors in the influent rivers into Tokyo Bay to continuously monitor SS transports. The observed results indicate that the coefficient b in sediment rating curve ($L=aQ^b$) are closely related to land use of the watershed. Total SS transports flowing into Tokyo Bay were annually $0.6 - 2.5 \times 10^6$ ton. The SS transports in Edogawa, Arakawa and Tamagawa Rivers are 66 % of total SS transports.

Key Words : *suspended-solid transport, sediment rating curve, Tokyo Bay, turbidity, monitoring network*

1. 序論

内湾に対する水質総量規制では、CODの規制に始まり、第五次において全窒素 T-N や全リン T-P が対象項目として取り込まれている¹⁾。この取り組みを始めとした様々な陸域対策にも関わらず、東京湾や伊勢湾などの重要内湾では水質環境は横ばい傾向であり、貧酸素水塊の拡大傾向すら報告されている²⁾。そのため、今後の総量規制における新たな水質目標として透明度や底層 DO を取り込む検討も開始されている³⁾。

このような水質総量規制を推進し、かつ、陸域対策の効果を適切に評価するには、精度上や適用範囲に限界がある原単位法⁴⁾とは別に、高精度な陸域環境負荷モニタリングを行う必要がある。一般に、平常時の水質データは月一回の頻度で継続的に計測されており、そのデータベースも充実している。その一方、高負荷となる出水時の水質データは非常に限定されており⁵⁾、これが陸域環境負荷評価の精度向上のボトルネックとなっている。そのため、内湾環境評価を念頭においた陸域環境負荷モニタリングネットワークの構築が不可欠である。

その際に必要となるモニタリング項目としては、水質総量規制に取り上げられている COD や N, P のみならず、浮遊物質 (SS) も必要となる。河川を經由して内湾に流入する SS 輸送量は、前述した新たな水質目標となる透明

度の構成要素になることに加えて、沿岸部の浅場・干潟の形成プロセスに大きな影響を与える。さらに、SS は栄養塩や有機物、重金属のキャリア (運搬物質) の役割を担っており、陸域から内湾に供給される浮遊土砂供給量を把握することは極めて重要である。

内湾流域における土砂輸送量モニタリングに関しては、台風出水時において大量の土砂が輸送されることを考慮すると、光学式センサー等による連続観測を行う必要がある。しかしながら、このような連続モニタリングを流域全体にわたり実施した例は、筑後川流域における横山らの研究⁶⁾が挙げられる程度であり、内湾環境評価に耐え得る観測体制は取られていない。本研究で対象とする東京湾流域では、多摩川や江戸川の単発的な調査^{7)~9)}やダム堆砂データを用いた流域全体の土砂生産量の推定⁹⁾が行われている程度であり、結果として、東京湾に流入する浮遊土砂輸送量の実態すら不明である。

このような背景に基づいて、著者らは、東京湾を対象として、内湾環境評価に必要な SS モニタリングネットワークを構築している^{10)・11)}。具体的には、東京湾へ流入する主要 10 河川のうち 7 河川において、光学式濁度計等を用いた浮遊土砂輸送量の長期連続計測を早くて 2006 年度から実施し現在でも継続している。本研究では、さらに蓄積した多くの観測データを解析し、様々な流域土地利用条件と L - Q 関係 (L : 浮遊土砂輸送量, Q : 流量) の



図-1 観測地点

特徴を検討し、それらの結果に基づいて東京湾への浮遊土砂供給量の経年変化を推定することを試みる。

2. 現地観測の概要

(1) 東京湾流域の概要

本研究の観測フィールドは、神奈川県観音崎と千葉県富津岬を結ぶ線より以北とする東京湾の流域であり、その流域面積は 7000km² (江戸川については江戸川だけの流域面積を使用している) に及ぶ。東京湾に流入する河川は大小 36 あるが、公共用水域水質測定が行われている河川は 26 である。このうち主要流入河川としては、表-1 に示すように、江戸川、多摩川、荒川、隅田川、神田川、中川、小櫃川、養老川、小糸川、鶴見川の計 10 河川存在しており、これらの流域面積の総和は 6257km² であり全体の 89.3% を占めている。なお、神田川は隅田川の支川であり直接東京湾に流入しないが、隅田川本川とは水質特性が異なるため、ここでは別個に取り扱う。また、江戸川は利根川から分派し、その分派率が約 25% であるので¹²⁾、江戸川分派地点の流域データに 0.25 倍したものに江戸川のデータを加えた結果も表示している。

(2) SS モニタリングネットワークについて

本 SS モニタリングネットワークとしては、主要 10 河川のうち江戸川、多摩川、荒川、隅田川、神田川、中川、小櫃川の計 7 河川において浮遊土砂輸送量の常時・自動連続観測を長期間行っている。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ており、江戸川では野田橋 (河口より+39km) と市川橋 (+13km)、荒川では笹目橋 (+29km) と西新井橋 (+13km)、隅田川・白鬚橋 (+9km)、神田川では一休橋 (隅田川合流点より+6km) と和田見橋 (+12km)、中川・八条橋 (+27km)、小櫃川・富川橋 (+14km) であり、多摩川水系では本川・調布堰 (+13km) に加えて、支川の秋川・東秋留橋 (多摩川合流点から+3km)、浅川・高幡橋 (多摩川合流点から+2km) である。このうち、全域感潮河川である隅田川と感潮域

表-1 主要 10 河川における流域情報

(*1 江戸川のみデータ、*2 利根川 (流域面積 8764km²) に分派率 (=0.25) を掛けたものに*1 を加算したものである)

河川	流域面積 [km ²]	土地利用 [%]				
		山林	市街地	田	畑	その他
江戸川	200 ^{*1}	10.8	58.1	4.7	18.8	7.6
	2391 ^{*2}	57.7	19.5	7.7	9.8	5.2
多摩川	1240	50.9	35.2	0.7	5.9	7.2
荒川	2300	52.9	24.5	5.5	7.4	9.8
隅田川	535	1.0	46.0	35.0	11.0	7.0
神田川	105	0.9	97.5	0.5	0.6	0.5
中川	987	1.0	47.0	36.0	11.0	5.0
小櫃川	267	62.6	7.6	7.3	4.1	18.4
養老川	246	72.3	8.9	5.2	2.2	11.4
小糸川	142	47.7	19.3	5.5	2.6	25.0
鶴見川	235	14.0	71.0	2.0	10.0	3.0

表-2 各観測地点における機器設置状況と観測期間
(△はバケツ採水実施、×は採水無しを意味する)

河川	観測地点	濁度計	自動採水機	採水イベント数
江戸川	野田橋	2006-現在	2006-現在	11
	市川橋	2010-現在	×	-
多摩川	調布堰	2006-現在	2006-現在	10
浅川	高幡橋	2010-現在	×	-
秋川	東秋留橋	2010-現在	×	-
荒川	笹目橋	2006-2008	2006-2008	4
	西新井橋	2008-現在	2009-現在	1
隅田川	白鬚橋	2007-現在	2008-2009	4
神田川	一休橋	2009-現在	△	1
	和田見橋	×	2010-現在	3
中川	八条橋	2007-現在	2007-2009	3
小櫃川	富川橋	2008-現在	2008-2009	4

が長い荒川では観測地点は感潮区間に位置している。また、神田川・一休橋と中川・八条橋は塩分遡上はないが潮汐による水位変化が伝播する範囲に位置している。その他は順流域に存在する。

各地点の機器設置状況と観測期間を表-2 に示す。ここでは、浮遊土砂輸送量の連続観測を行うために、光学式濁度計 (Compact-CLW, JFEアドバンテック(株)製) による濁度観測 (時間間隔: 10~20 分間隔) と自動採水機 (6712 型ウォーターサンプラー, Teledyne ISCO 製) による出水時採水観測を実施している。現在は 7 河川 10 地点において光学式濁度計による濁度観測を実施している。

採水サンプルの分析項目とその方法としては、濁度には多項目水質計 (WQC-24, 東亜ディーケーケー(株)製) を用い、SS はガラス繊維ろ紙法により分析し、粒径分析にはレーザー回折式粒度分布測定装置 (SALD-3100, (株)島津製作所製) を用いる。なお、このモニタリングでは、他の水質項目 (強熱減量 IL や COD, T-N, T-P など) も

計測しているため⁵⁾、本ネットワークではSSのみならず陸域環境負荷に関連する項目もカバーしている。

(3) データ解析の概要

上記の観測結果に基づいて、①観測地点における浮遊土砂輸送量と流量の関係性の把握に加えて、②各河川の河口地点から東京湾への浮遊土砂供給量の推定、という二種類の解析を行う。まず、①に際して、浮遊土砂輸送量算出に必要な流量とSSの算定手順を述べる。まず、SSについては濁度から算定するが、それには河川毎に作成された濁度とSSの相関式を用いる。一方、流量データについては、隅田川を除いて、二瓶ら¹²⁾と同じである。すなわち、江戸川や中川、神田川、小櫃川は地点毎のH-Q式により、多摩川では堰測法により流量値を与える。また、荒川では順流域末端（秋ヶ瀬堰、34km）の流量に流入支川や下水処理場からの放流量を加算する。隅田川では、H-ADCP計測と数値解析による河川流量モニタリングシステム¹³⁾による直接流量計測結果を用いる。なお、本モニタリングは現在でも実施しているが、本論文におけるデータ解析対象期間は2009年までとする。また、荒川については2008年10月まで行われた笹目橋のみのデータをここでは採用する。

次に、②においては、後述する方法により、河川毎に浮遊土砂輸送量Lと流量Qの相関式(L-Q式)を作成する。河口地点における流量については、前述の二瓶ら¹²⁾に準じて算出し、得られたL-Q式を用いて河口地点から東京湾への浮遊土砂供給量の時系列変化を算出する。ここでは主要10河川を解析対象とし、各河川における河口地点は、図-1中の黄色印で示す位置である。

3. 浮遊土砂輸送量と流量の関係

(1) 生データと移動平均値の特徴

本モニタリングネットワークにより得られた観測結果の一例として、江戸川・野田橋と多摩川・調布堰における浮遊土砂輸送量Lと流量Qの相関図を図-2に示す。図中には、各河川の全観測期間における観測生データ（青印）とある流量範囲における移動平均値（赤印）が表示されている。それとともに、一般的にL-Q式で用いられるべき関数の近似直線¹⁴⁾ ($L = aQ^b$, a, b: 係数) も合わせて図示している。これより、両河川共に、同一流量でも浮遊土砂輸送量のバラツキが大きく、その様子は低流量時ほど顕著となっている。これは、L-Q間の様々なヒステリシス現象¹⁵⁾ やファーストフラッシュ現象¹⁶⁾ による影響が現れているものと考えられる。また、生データは、当然のことながら低水時の流量範囲に多く存在しており、出現頻度が少ない大規模出水の流量範囲ほどデータ数が少ない。そのため、生データに対してそのままL-Q式の近

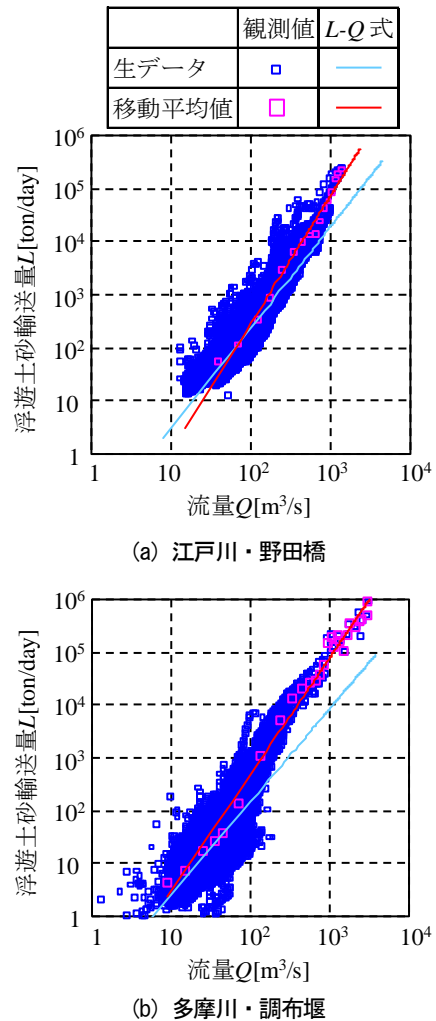


図-2 浮遊土砂輸送量Lと流量Qの相関関係 (生データと移動平均値を表示)

似式を求めると、図中の青線のように観測値とのずれが大きく、特に出水時の流量範囲で大きな差が生じていることが分かる。そのため、このままでは高流量時の浮遊土砂輸送量を過小評価する可能性があり、精度向上のためには流量範囲毎にL-Q式を分けるなどの工夫を要する¹⁷⁾。

それに対して、L-Q関係の移動平均値を見てみると、低水時から出水時までバランスよくデータが存在するため、得られるL-Q式は移動平均値に対して良好に近似されていることが分かる。なお、本論文では、全流量範囲に一つのL-Q式を作成しているが、図-2を詳細に見ると、流量によりL-Q式の傾きが異なっている。そのため、流量依存性を考慮したL-Q式¹⁸⁾の作成が必要となるが、今後の検討課題とする。

(2) L-Q式の推定精度

このように異なる方法で算出したL-Q式の推定精度を検証するために、浮遊土砂輸送量の観測値とL-Q式による推定値の相関図を図-3に示す。ここでは、前述したように、生データ及び移動平均値に対するL-Q式を採用しており、

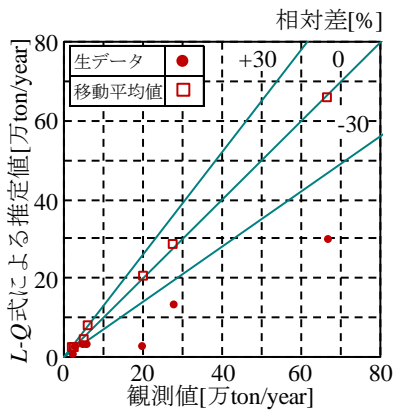


図-3 浮遊土砂輸送量に関する観測値とL-Q式による推定値の比較（推定値には生データ及び移動平均値に対するL-Q式を採用）

表-3 L-Q式中の係数a, b（下3つの河川は推定値、他の7河川は観測値）

河川名	生データ		移動平均	
	a	b	a	b
江戸川	0.036	1.90	0.005	2.40
荒川	0.084	1.78	0.055	1.95
多摩川	0.047	1.75	0.019	2.21
隅田川	0.918	1.09	0.132	1.72
中川	0.191	1.53	0.082	1.80
小櫃川	0.111	2.34	0.507	1.92
神田川	0.633	1.02	0.047	1.97
鶴見川	×	×	0.425	1.99
養老川	×	×	0.255	2.20
小糸川	×	×	0.441	2.03

そこで用いられたL-Q式中の係数a, bは表-3に示す通りである。また、観測値とは連続計測された濁度データをSSに変換して得られた結果であり、それと推定値の差を見やすくするために、相対差0%と±30%を実線で表示している。なお、各河川における観測期間は異なるので、ここでは、観測地点毎の全観測期間に関する浮遊土砂輸送量を年間値に換算した結果を採用している。これを見ると、生データに対するL-Q式の推定結果は、観測値よりもかなり小さくなっており、多くの河川では相対差が30%以上となっている。これは、図-2に示したように、L-Q式の傾きが小さいためであり、このことは表-3中の生データに対する係数bが小さいことから確認できる。

それに対して、移動平均値に対するL-Q式の推定結果は、生データに対する結果よりも観測値に近くなっており、移動平均値データを用いることによりL-Q式による浮遊土砂輸送量の推定精度が大幅に向上していることが分かる。このときの相対差は、隅田川を除き、概ね30%以内に入っており、一般的なL-Q式の誤差が20~30%程度存在することを考慮すると¹⁷⁾、この移動平均値に対するL-Q式の精度が概ね良好であることが分かる。なお、隅田川の観測地点は、感潮域に位置し、かつ、出水時の流量と比べ

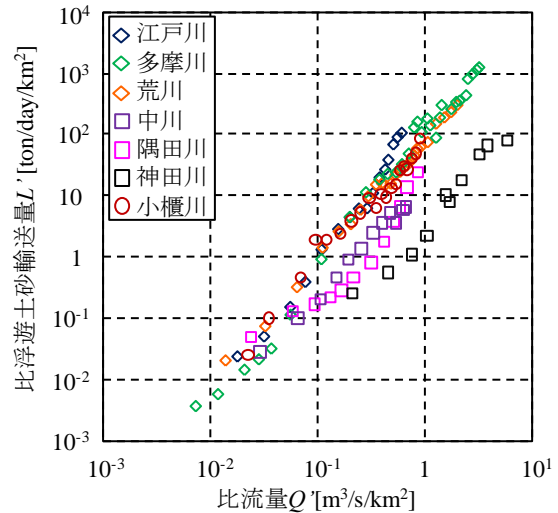


図-4 各河川におけるL'-Q'関係の比較（移動平均値を採用）

て潮汐による流量が同程度となることもあることを考慮すると、元々L-Q関係が一意的な関係に成り立ちにくいいため、L-Q式の推定精度が移動平均値を用いた場合でも低下したものと考えられる。

(3) 河川間のL-Q関係の比較

表-3に示すように、L-Q式中の係数bは概ね2となっており、一般的なウォッシュロードの結果¹⁹⁾と近いが、詳細に見ると河川毎に係数bは異っており、河川間にL-Q関係の差異が生じている。この要因を明らかにするべく河川間のL-Q関係を比較するために、浮遊土砂輸送量Lと流量Qをそれぞれ流域面積で除した比浮遊土砂輸送量L'と比流量Q'の相関図を図-4に示す。ここでは、浮遊土砂輸送量の推定精度が良好であった移動平均値データを採用している。これを見ると、同一の比流量における比浮遊土砂輸送量の大きさは、大河川（江戸川、多摩川、荒川）≒小櫃川>中川≒隅田川>神田川の順序となっている。このうち、比浮遊土砂輸送量が大きい大河川や小櫃川は、表-1に示すように、山林の割合が50%以上と高くなっている。一方、残りの3河川は山林率が低く、市街地率が高くなっており、神田川では市街地率が98%に達している。

このようなことから、各河川における流域の土地利用特性とL-Q式中の係数bを比べたものを図-5に示す。ここでは、流域の土地利用割合として山林、市街地、その他に分類して表示している。また、図中の係数bは移動平均値に対する結果である。これより、山林率が高いほど係数bは大きくなるように見受けられる。そこで、土地利用特性のうち山林率と市街地率と係数bとの間における重回帰分析を、以下の式を用いて実施する。

$$b = x_1 A_f + x_2 A_u + x_3 \quad (1)$$

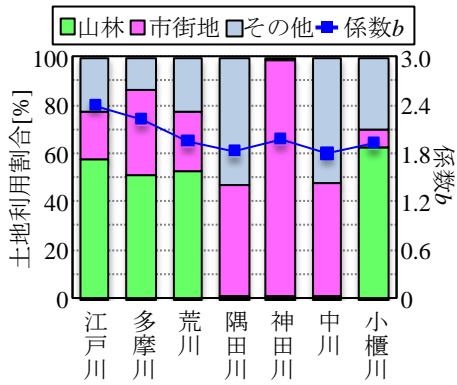


図-5 各河川における移動平均値に対する $L-Q$ 式中の係数 b と流域土地特性の関係(土地利用割合を山林率, 市街地率, その他に分類)

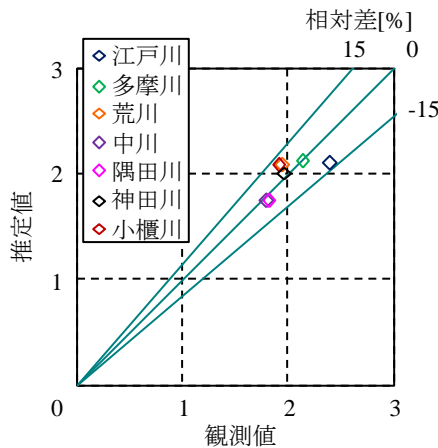


図-6 $L-Q$ 式の係数 b に関する観測値と推定値の比較(観測値には移動平均値に対する結果を採用)

ここで, A_f は山林率, A_u は市街地率をそれぞれ表す. 重回帰分析の結果, 係数 x_1, x_2, x_3 は各々0.0091, 0.0053, 1.4891という値が得られた. これより, 山林率の係数 x_1 は正であり, かつ, 市街地率の係数 x_2 よりも相対的に大きくなっており, 山林率が大きいほど土砂生産量が大いことを示している.

この係数 b の推定式の精度を検証するために, 係数 b に関する観測値と式(1)による推定結果を図-6に示す. これより, 7河川共に, 係数 b の推定値は概ね観測値と一致しており, 全7河川において相対差が $\pm 15\%$ 以内という良好な推定結果となっていることが分かる. このように, 浮遊土砂輸送量に関する $L-Q$ 式中の係数 b は, 著者らが別途行ったT-NやTP, CODと同様に²⁰⁾, 流域の土地利用特性と密接に関連し, それらから概ね良好に推定し得ることが明らかとなった.

4. 東京湾への浮遊土砂供給量の推定

前章の結果に基づいて, 各河川における浮遊土砂輸送量を算定し, 流域から東京湾への浮遊土砂供給量を算出する. ここでは, 各河川河口地点における浮遊土砂輸送

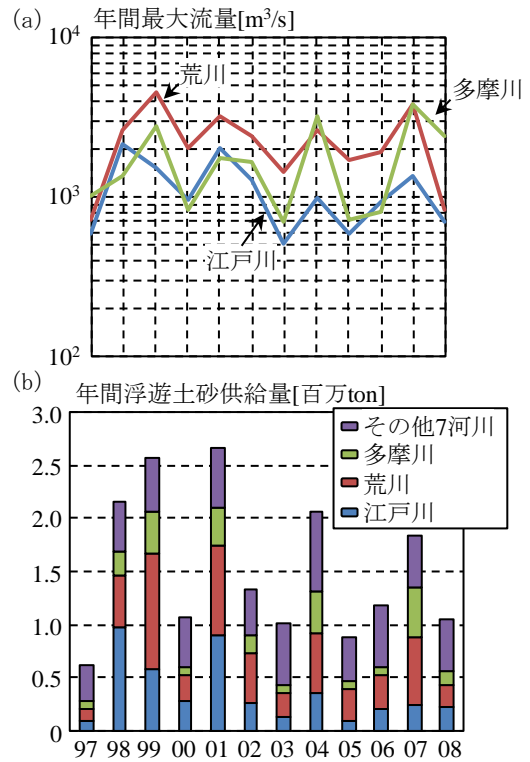


図-7 年間最大流量(a)と東京湾への年間浮遊土砂供給量(b)の経年変化(その他7河川は隅田川, 中川, 神田川, 小櫃川, 養老川, 小糸川, 鶴見川)

量を算出するために, 精度検証がなされている移動平均値に対する $L-Q$ 式を採用することとし, その係数は表-3に示す通りである. また, 主要10河川のうち観測を行っていない養老川, 小糸川, 鶴見川については式(1)と流域土地利用特性を用いて係数 b を推定している. 同じく $L-Q$ 式中の係数 a に関しては, 平常時に行われている公共用水域データの流量とSS, 上記で得られた係数 b を $L-Q$ 式中に代入し, 係数 a を求めている. これらの3河川における係数 a, b の推定結果は表-3に示す通りである.

このようにして得られた東京湾への年間浮遊土砂供給量の経年変化を図-7に示す. ここでは, 江戸川, 荒川, 多摩川とその他7河川に色分けし, 1997年から2008年までの結果を表示している. また, 大河川の年間最大流量の経年変化も図示している. これより, 年間浮遊土砂輸送量は61万ton~267万tonまで大きく変化しており, 大きな出水イベントが生じた1998, 1999, 2001, 2004, 2007年に関しては浮遊土砂供給量も大きい. また, この期間の年間平均値は154万tonとなっている. また, 全体に対する各河川の寄与を見てみると, 全般的には, 江戸川・荒川・多摩川の大河川の結果が大きくなっており, その様子は大出水が生じた年に顕著になっている. また, それらの大河川の浮遊土砂輸送量が全体に占める割合は42~80%であり, この期間での平均値は66%である. 図-4に示すように, $L-Q$ 関係では大きな比浮遊土砂輸送量を示した

小櫃川は、大河川に比べ相対的に流量が小さいため、年間浮遊土砂輸送量が小さくなっている。

なお、東京湾への浮遊土砂供給量を算定する上では、新たな水質指標である透明度の評価を考えると、粒径別浮遊土砂供給量を求めることは必須であり、その一部は既に報告している¹⁰⁾。著者らは、粒径別浮遊土砂輸送量の実測値を十分蓄積しつつあるので、今後は、これらのデータ解析を鋭意進め、粒径別の L - Q 関係の把握や東京湾への粒径別浮遊土砂供給量を算出する予定である。

5. 結論

本研究では、東京湾流域を対象として構築されたSSモニタリングネットワークに基づいて、浮遊土砂輸送量と流量の関係 (L - Q 関係) や東京湾への浮遊土砂供給量について検討した。得られた結論は以下の通りである。

(1) 浮遊土砂輸送量評価方法として、流量と浮遊土砂輸送量に関する移動平均データを作成し、それに L - Q 式を適用すると、生データを用いる場合よりも浮遊土砂輸送量の推定精度が大幅に向上することが示された。

(2) 東京湾流入河川間の L - Q 関係を比べたところ、流域の山林率が50%以上の江戸川、荒川、多摩川や小櫃川における比浮遊土砂輸送量が大きくなっている。

(3) 重回帰分析の結果、 L - Q 式の係数 b は流域の山林率と市街地率から推定することは可能であり、その推定式による係数 b の算定精度は±15%以内に収まる。このことから、流域情報から L - Q 式中の係数を良好に推定し得ることが示された。

(4) 東京湾への浮遊土砂供給量を算出したところ、年間供給量は61~267万tonと変化し、1997年~2008年の平均値は154万tonとなった。それには、大河川(江戸川、荒川、多摩川)の影響が大きく、これら的大河川における浮遊土砂供給量の全体に占める割合は42~80%、平均して66%と高いことが明らかとなった。

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、京浜河川事務所、水資源機構・利根導水総合管理所、東京都水道局、千葉県亀山・片倉ダム管理事務所には流量や水質データをご提供して頂いた。現地観測の実施や水質分析には、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) 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), pp.1-15, 2005.
- 2) 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.
- 3) 中央環境審議会: 第7次水質総量削減の在り方について(答申), pp.1-70, 2010.
- 4) 二瓶泰雄・大塚慧・影山英将・広瀬久也: 東京湾における流入負荷の経年変化, 海岸工学論文集, Vol.55, No.2, pp.1226-1230, 2008.
- 5) 坂井文子, 二瓶泰雄, 江原圭介, 臼田美穂, 重田京助, 大塚慧: 江戸川・荒川・多摩川・中川における出水時栄養塩・COD負荷特性, 水工学論文集, Vol.52, pp.1117-1122, 2008.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.B2-56, No.2, pp.1171-1175, 2009.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 武田育郎: 水と水質環境の基礎知識, オーム社, pp.119-166, 2001.
- 15) Williams, G. P.: Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers, *J. of Hydrology*, Vol.111, pp.89-106, 1989.
- 16) 海老瀬啓一: 汚濁物質の降雨時流出特性と流出負荷量, 水質汚濁研究, Vol.8, No.8, pp.31-36, 1985.
- 17) 二瓶泰雄, 木水啓, 植田雅康, 中岡亮, 望月健: 陸域環境負荷評価のための調査方法及び解析方法に関する検討~江戸川を例にして~, 海岸工学論文集, Vol.52, No.2, pp.1106-1110, 2005.
- 18) 滝岡健太郎, 二瓶泰雄, 坂井文子: 大河川の栄養塩・COD負荷に関する出水規模別 L - Q 関係の検討, 水工学論文集, Vol.54, pp.1381-1386, 2010.
- 19) 吉川秀夫: 流砂の水理学, 丸善, pp.141-144, 1985.
- 20) 二瓶泰雄, 田中辰弥, 滝岡健太郎: 出水時水質データが無い河川における L - Q 式推定法の一提案, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.66, pp.1176-1180, 2010.

(2010. 9. 30 受付)