

東北・関東地方太平洋沿岸への淡水・ 浮遊土砂供給量の推定

EVALUATION OF FRESHWATER DISCHARGE AND SUSPENDED SEDIMENT TRANSPORT INTO PACIFIC OCEAN FROM TOHOKU AND KANTO DISTRICTS

梶純也¹・二瓶泰雄²

Jyunya KAJI 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)

We evaluated freshwater discharge and suspended sediment(SS) transport into Pacific Ocean from Tohoku and Kanto districts. Measured discharge for class A rivers were collected while discharge for class B rivers was evaluated by using a runoff model (MIKE11). SS transport was calculated using the river discharge obtained here and a sediment rating curve($L=aQ^b$) in which the coefficients were estimated with a new approach presented by the authors. The results indicate that 71 and 29 % of the total freshwater discharge were flowed from the class A and B rivers, respectively, showing the significant sources of the class B rivers for freshwater discharge. 95 % of the total SS transport was on the whole outflowed from the class A rivers, while in the Tohoku district, 18 % of the total SS transport was flowed from the class B rivers.

Key Words : *sediment transport, discharge, sediment rating curve, runoff analysis, Pacific Ocean*

1. 序論

河川や海岸を含めた水管理・国土保全を進めるため、様々なモニタリングが管理者により日々実施されている。重要な項目として、河川流量や土砂輸送量が挙げられる。河川流量は、河川管理や河川整備計画を考える上で必要であることは論を待たないが、常時モニタリングされているのは国が管理している一級河川のみである。県管理の二級河川やその他の準用河川・普通河川¹⁾では、流量データを単発的に調査することはあっても、多くの河川では常時・連続的な流量観測は行っておらず、水位観測のみとなっている。そのため、一級河川の流量に関しては、インターネット上にデータベースが過去からのものを含めて構築されているが²⁾、二級河川ではデータすら存在しないのが現状であり、大きな課題である。

一方、土砂輸送形態である浮遊砂と掃流砂は沿岸海域の水環境や海岸部の地形形成に影響を与える等重要である。掃流砂に関しては汎用的な観測方法は確立されていないため³⁾、土砂管理用のモニタリングには浮遊砂が行われることが多い^{4)・5)}。しかしながら、浮遊土砂輸送量を常時モニタリングしている河川は一級河川ですら皆無に近く、散発的な調査が行われているに過ぎない。そのため、簡便に浮遊土砂輸送量 L の時系列データを取得するために、簡易的な統計手法である浮遊土砂輸送量 L と

流量 Q の相関式 (L - Q 式, $L=aQ^b$, a, b : 係数) が一般に用いられる⁶⁾。しかしながら、 L - Q 式の作成には平常時から出水時にわたる L と Q のデータセットが必要であり、出水時を含むデータを取得していることは限定されていることや、 L - Q 式の係数推定法も存在しないことから、流量と共に浮遊土砂輸送量に関しても十分なデータベースは存在しない。

また、沿岸海域や外洋スケールの海洋環境シミュレーションを行う上では、沿岸部での陸域条件を適切に与える必要がある。しかしながら、前述のように、河川流量(淡水供給量)に関しては一級河川しか実測値が無く、浮遊土砂輸送量に関しては実測データすら無いため、適切な淡水・浮遊土砂供給条件を考慮することが困難である。さらに、微細粒子に吸着し易い放射性セシウム^{7)・8)}に関する海洋環境解析を行う際にも、陸域からの供給条件の設定がボトルネックの一つとなっている。

それに対して、著者らは、これまで主に東京湾流入河川を対象として浮遊土砂の連続モニタリングを行っている^{9)・10)}。また、それらの実測データと他機関のデータを統合した浮遊土砂輸送量 L と流量 Q のデータベースを構築すると共に、ニューラルネットワークを用いた L - Q 式推定法を提案した(武川・二瓶¹¹⁾, 前報)。本研究は、前報の成果を生かして、我が国の多くの一級・二級河川における河川流量と浮遊土砂輸送量のデータベースを構築

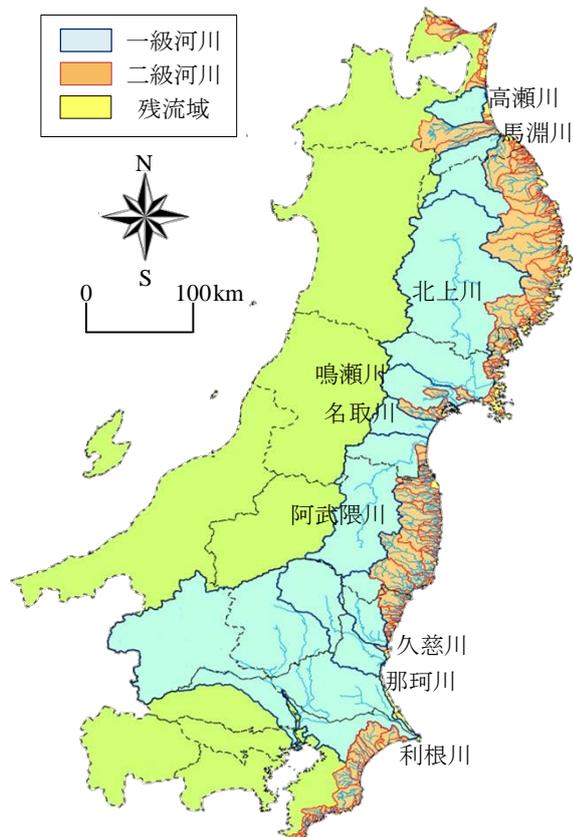


図-1 研究対象範囲と流入河川の種類 (点線：県境)

し、太平洋沿岸への淡水・浮遊土砂供給量を推定することを試みる。ここでは、青森県から千葉県にいたる太平洋に注ぐ河川を対象として、まず、流量に関しては、一級河川では実測データを収集し、二級河川では汎用数値モデル (MIKE11) を用いて流出解析を行って流量を推定する。浮遊土砂輸送量については、得られた流量と流域情報、前報の $L-Q$ 式推定法を用いて算出している。

2. 研究方法

(1) 研究対象サイトの概要

本研究における解析対象は、図-1 に示す青森県大間岬から千葉県房総半島南部にわたる太平洋沿岸の六県を対象とする。図中には、流入する河川の流域として、一級河川と二級河川、その他の残流域として色分けして表示している。この範囲において太平洋に注ぐ一級河川として、北から高瀬川、馬淵川、北上川、鳴瀬川、名取川、阿武隈川、久慈川、那珂川、利根川の9河川がある。また、表-1 に示すように、二級河川の数202であり、岩手県や福島県では二級河川のみが流出している。対象範囲における流域面積は全体で $57,357\text{km}^2$ であり、一級河川は $42,099\text{km}^2$ (全体の73.4%)、二級河川 $13,471\text{km}^2$ (同23.5%)、残流域は $1,786\text{km}^2$ (同3.1%) である。このように、全体の中で二級河川の寄与は大きく、二級河川からの淡水・土砂供給量を無視できないものと予想される。

表-1 流入河川概要 (括弧内：公共用データがある河川の情報)

	一級河川		二級河川		残流域面積 [km ²]
	河川名	流域面積 [km ²]	河川数	流域面積 [km ²]	
青森県	高瀬川	853	31 (5)	2,255 (1,077)	345
	馬淵川	2,043			
岩手県	-	-	56 (1)	4,733 (182)	539
宮城県	北上川	10,270	28 (6)	1,114 (656)	400
	鳴瀬川	1,208			
	名取川	918			
	阿武隈川	5,386			
福島県	-	-	39 (17)	3,144 (2,459)	139
茨城県	久慈川	1,494	20 (7)	529 (363)	209
	那珂川	3,270			
千葉県	利根川	16,656	28 (13)	1,696 (1,459)	154
合計	9	42,099	202 (49)	13,471 (6,197)	1,786

(2) 流量・浮遊土砂輸送量算出方法

本研究における流量 (淡水供給量) と浮遊土砂供給量の算定手順を取りまとめたものを図-2 に示す。まず、流量に関しては、一級河川については、多くの場合、国土交通省が複数の地点で流量 Q のデータベースをインターネット上に公開している。そのため、河口域に近く、浮遊土砂輸送量推定に用いる後述の公共用水域データがあるかどうかを基準に対象地点を選定する。その後、水文水質データベースから流量データを収集する。一方、二級河川については、平常時に実施される公共用水域データが存在する地点では、平常時の流量を与えることはできるが、浮遊土砂輸送量が増大する出水時のデータは無い。そこで、汎用水理水文モデル・MIKE11 (デンマーク水理研究所) を用いて流出計算を行った。ここでは、MIKE11 の降雨流出モデルの中から、時間面積曲線法に基づく Urban model(A)¹²⁾ を採用した。この時間面積曲線法では、次式を基礎式とする。

$$Q(j) = \sum_{i=1}^j A(j-i)R_e(i) \quad (1)$$

ここで、 Q : 河川流量、 A : 流域面積、 R_e : 表面流出量とする。本モデルによる流出解析では、流域データとして対象河川の流域面積や不浸透領域の割合、河川延長、最低流量を設定する。また、時々刻々の時間雨量データとして、流域内の重心位置に最も近い気象観測所のデータを入力する。表面流出を開始するのに必要な降水量 (初期損失) を 0.6mm としている。なお、モデル上の最低流量は平常時の流量に相当しているため、ここでは、各河川にて平常時に観測される公共用水域データから流量デ

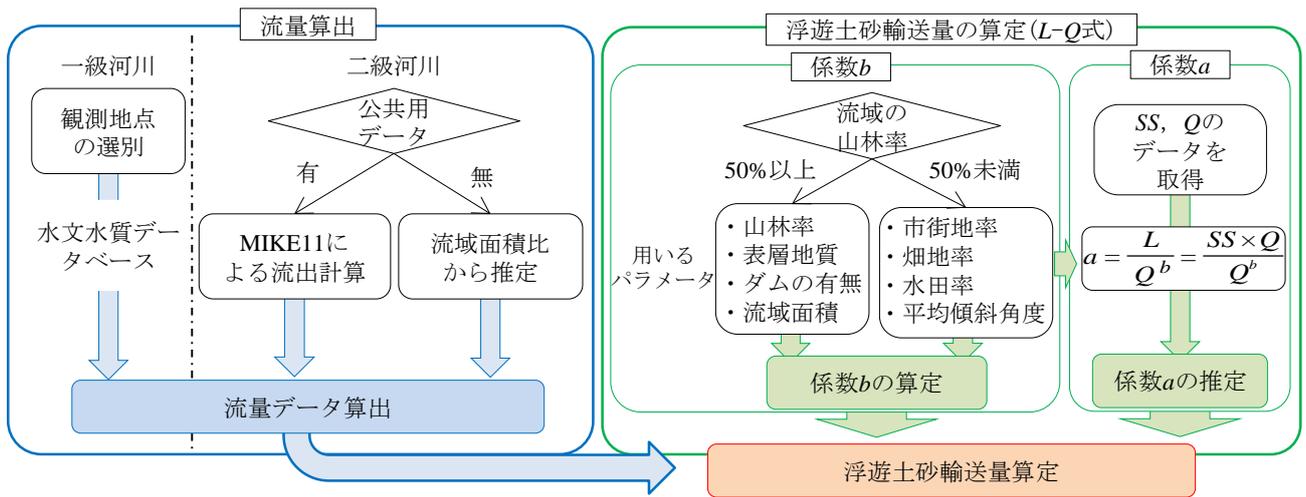


図-2 流量と浮遊土砂輸送量の推定手順

ータを抽出する（対象河川の最下流部の観測地点，2000年～2009年まで平均値を採用）．また，蒸発散や浸透等による水の損失も考慮している．

また，公共用水域データの無い二級河川や残流域では，近隣の公共用水域データのある二級河川において得られた流量データに流域面積の比を掛けた形で与える．なお，地下水経由の海域への淡水供給量に関しては実態が不明確であるため，ここでは取り扱わない．

次に，浮遊土砂輸送量を求める際には， LQ 式を用いることとし， LQ 式中の係数 a ， b の与え方は，前報に倣って，対象河川の流域情報から算出する．様々な流域情報の整理・収集には，ArcGIS Ver.10.0 (Esri社製)を用いた．係数 b に関しては，流域情報との関連性を重回帰分析によって調べたところ，流域の山林率が50%以上の場合には山林率，表層地質，ダムの有無，流域面積を，山林率が50%未満の場合には市街地・畑地・水田率と平均傾斜角度とそれぞれ相関性が高い結果が得られた．そこで，これらのパラメータをそれぞれ用いて，ニューラルネットワークモデルにより，係数 b を求めた．次に，係数 a に関しては，平常時に取られる公共用水域データ（流量 Q と浮遊土砂濃度 SS ）と前述の手順で推定された係数 b を用いて算出する．最終的には，時々刻々の流量を LQ 式に代入し，浮遊土砂輸送量 L の時系列データを算出する．なお，前報の手法による係数 b の推定誤差としては，山林河川では0.07，その他河川では0.11となっており，この程度の推定誤差が含まれていることに注意されたい．

MIKE11による流出解析は2008年1月1日から2年間分を行ったが，用いたモデルには積雪の効果を考慮できないため，本論文におけるデータ解析としては2008年6月から4ヶ月間の出水期のみとする．

3. 淡水供給量の検討

(1) 流出解析モデルの精度検証

表-2 流出解析モデル精度検証用の河川条件

河川名	神田川	小櫃川	栗山川	
期間	2010/1/1～ 2010/12/31	2011/1/1～ 2011/12/31	2011/9/1～ 2012/1/10	
流域面積[km ²]	35	214	160	
河川延長[km]	11	63	18	
土地利用 率	山林	2.2	74.0	
	市街地	97.5	7.5	
	水田	0.0	14.2	
	畑地	0.2	3.0	
[%]	その他	0.1	1.4	0.3
最低流量[m ³ /s]	8.4	4.7	11.2	

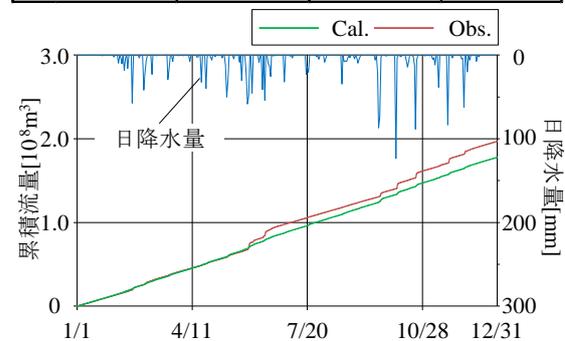


図-3 累積流量の観測値と計算値の時間変化（小櫃川）

二級河川の流量算定に用いる流出解析モデル (MIKE11のUrban model(A)) の計算精度を検証するために，著者が流量実測値を有している二級河川（東京都神田川，千葉県小櫃川，栗山川）に本流出解析モデルを適用する．計算対象河川の概要や用いた流域の土地利用データを表-2に示す．表中の土地利用割合より，神田川は都市河川，小櫃川は山地河川であり，栗山川はどの土地利用も混在しているのが特徴である．なお，ここでの計算対象流域は，河川全体ではなく，流量観測地点の流域となっていることに注意されたい．

まず，小櫃川を例に，累積流量の観測値と計算値の時間変化を図-3に示す．ここでは，2011年1年分を対象とし，計算に用いた日降水量も合わせて示す．これより，

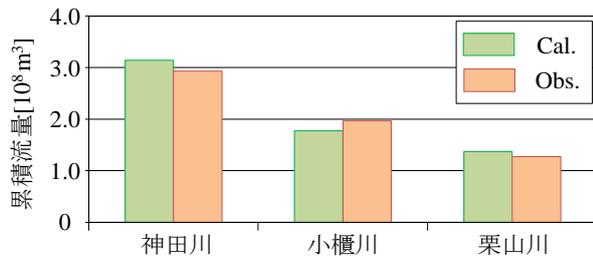


図-4 三河川における累積流量の計算値と観測値の比較

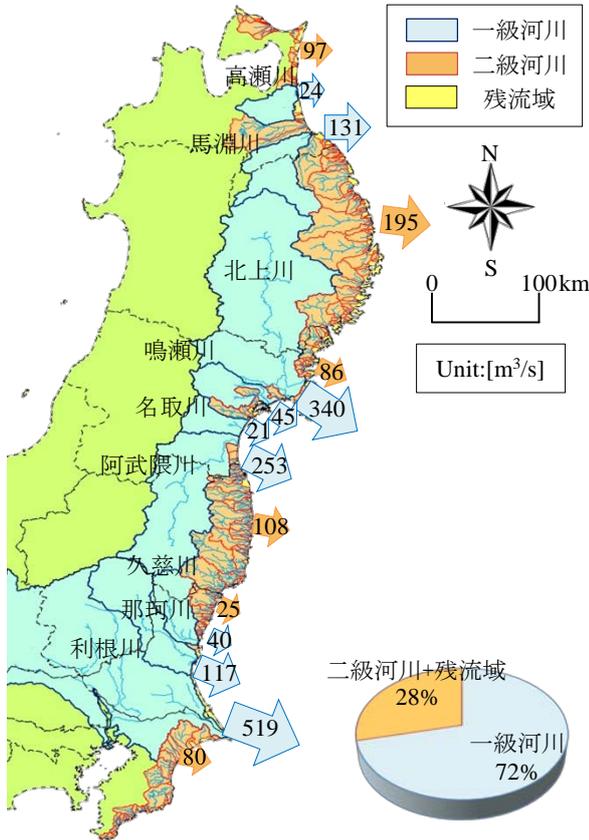


図-5 解析対象期間の平均流量（各一級河川の流量と各県の二級河川と残留域の流量和を表示）

規模の大きな出水時における再現性が不十分であるため、計算結果は観測結果よりも小さめとなっているが、平常時や小規模出水に関しては概ね再現できている。また、計算を行った三河川における対象期間の累積流量を比較した結果を図-4に示す。計算流量は、小櫃川では過小評価、神田川と栗山川では過大評価しているが、計算結果と観測結果の相対差が±10%以下に入っており、本論文で用いている流出解析モデルの一定の有効性が確認された。以後では、このモデルによる計算結果を用いて、データ整理・解析を行う。

(2) 一級河川・二級河川・残留域間の流量の比較

本手法により得られた流量算出結果を地図上にプロットしたものを図-5に示す。ここでは、解析対象期間中の平均流量について、9つの一級河川の流量及び各県の二級河川と残留域の流量和を色分けして図示している。こ

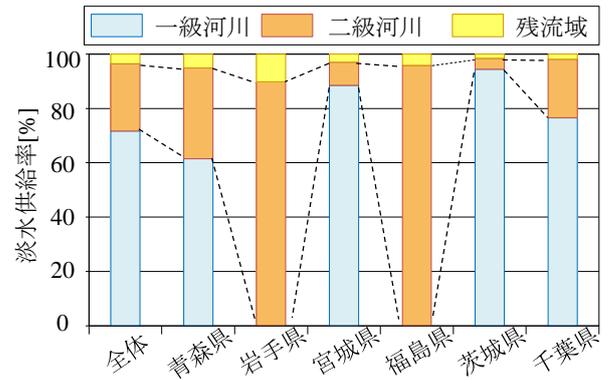


図-6 淡水供給量に対する県毎の一級河川・二級河川・残留域の寄与率

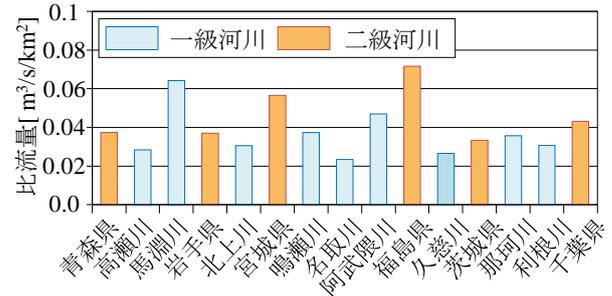


図-7 比流量の比較（県毎のデータは二級河川と残留域の流量和に対する結果を示す）

れより、平均流量の最大値は利根川であり、以下、北上川、阿武隈川、馬淵川、那珂川の順となっている。その他の4つの一級河川はいずれも50m³/s以下となっている。一方、二級河川と残留域の流量和は、岩手県(195m³/s)、福島県(108m³/s)、青森県(97m³/s)の順となっており、流域面積の大小と関係している。また、これらの流量和は一級河川と同オーダーとなっており、二級河川や残留域からの淡水供給量が大きいたことが分かる。例えば、福島県と茨城県における二級河川と残留域の合計値(133m³/s)は、その北側を流れる阿武隈川(253m³/s)の約半分、南側の久慈川と那珂川の和(157m³/s)とほぼ同程度となっている。また、対象エリア全体における総流量の割合は、一級河川が71.6%、二級河川と残留域の和は28.4%となった。後者は、二級河川と残留域の流域面積の割合(全体の26.6%)よりもやや大きくなっている。

より詳細に河川間の比較を行うために、総流量に対する一級河川、二級河川、残留域の寄与率を県毎に算出した結果を図-6に示す。ここでは、河口域のある県で分類しているため、福島県や岩手県では一級河川がないことになる。また、県境を流れる利根川の流量は、便宜的に、千葉県と茨城県に半分ずつ配分している。これより、二級河川の割合としては、茨城県4.0%、宮城県8.5%と少ないものから千葉県21.6%、青森33.4%と多い県も有り、また、岩手県や福島県は90%を越えている。残留域についても1.6~10.2%となり、無視できない県(例えば岩手県)も存在している。このように、場所により、二級河

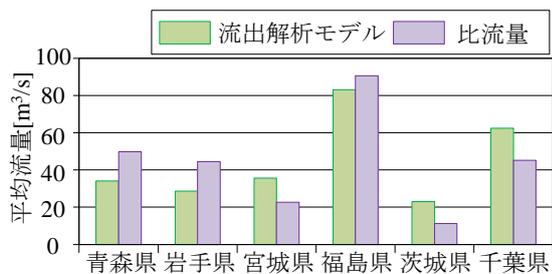


図-8 二級河川における比流量を用いた流量算定結果と流出モデルによる計算結果の比較（解析対象期間の平均流量を対象）

川や残流域が相対的に重要な淡水供給源となっていることが明らかとなった。

(3) 比流量の比較

得られた河川流量データを比較するために、比流量を算出した結果を図-7に示す。ここでは、図-5に示されている9つの一級河川の流量及び県毎の二級河川・残流域の流量和に対して比流量を求めた結果を表示している。これを見ると、一級河川の比流量は馬淵川を除いて近隣の二級河川と残流域に関する値よりも小さい。また、阿武隈川の比流量は、福島県の二級河川と残流域の値と同程度である。一級河川では取水後、広い範囲に農業用水・工業用水等として配分され、最終的に別流域に排水されるものも多い。そのため、一級河川の比流量は二級河川よりも小さくなるものと推察される。

この比流量は流量データが無い河川における流量算定に用いられるケースがある。二級河川の流量実測値が無い場合には、一例として、近くの一級河川の比流量とデータの無い二級河川の流域面積を掛けて、二級河川の流量データを算定する。この方法で算定された二級河川の流量と流出解析モデルで算定された計算結果を図-8に示す。ここでは、解析対象期間における平均流量を図示する。これより、比流量を用いて算出した結果は流出解析モデルの計算結果よりも小さい（宮城県、茨城県、千葉県）。これは、前述したように一級河川と二級河川の比流量の違いによるものである。また、逆の大小関係になる県（青森県、岩手県、福島県）もあり、これは、馬淵川や阿武隈川の値を用いた県である。このように、流域面積が大きく異なる一級河川と二級河川間では、比流量を用いた流量の推定は不適切であることが示唆された。なお、本研究では、公共用水域データの無い二級河川や残流域に対して、近隣の二級河川の比流量が用いられているが、その適用性については今後検討する必要がある。

4. 浮遊土砂輸送量の検討

(1) L-Q式の係数推定結果

浮遊土砂輸送量の算定に用いられるL-Q式の係数bの推定結果を図-9に示す。ここでは、係数bの頻度分布を

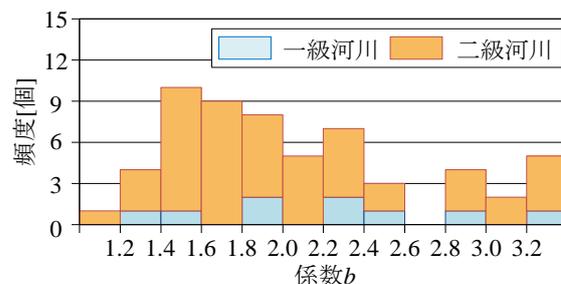


図-9 本研究で推定された係数bの頻度分布

表-3 一級河川において採用された係数a、bと解析期間中の最小・最大流量（*前報のSSデータベースの結果を使用河川、L: ton/day, Q: m³/s）

	a	b	最低流量 [m³/s]	最高流量 [m³/s]
高瀬川	2.8×10^{-1}	1.92	9.5	216.2
馬淵川	2.0×10^{-3}	2.48	66.5	247.5
北上川	1.4×10^{-5}	2.93	148.4	637.7
鳴瀬川*	5.5×10^{-1}	1.54	6.2	1154.8
名取川	1.0×10^{-1}	1.88	1.6	369.2
阿武隈川*	1.2×10^0	1.25	36.8	1902.8
久慈川	9.0×10^{-3}	2.40	4.8	766.3
那珂川	3.8×10^{-5}	3.20	32.6	1473.3
利根川*	2.0×10^{-3}	2.40	102.1	3468.5

表示している。なお、前報で作成したデータベースに存在する阿武隈川と鳴瀬川、栗山川については過去の実測値から得られた係数を採用し、利根川については支川の江戸川の結果を採用した。その他はニューラルネットワークモデルによる推定値になる。合わせて、一級河川で採用された係数aとbの値を表-3に示す。これより、係数bが幅広く分布しつつ、比較的1.4~2.0に集中している。また、全体の平均値は2.08となり、一般的な係数bが2とされていることと類似した結果¹³⁾となっている。また、表-3より一級河川の係数bは2以上が多く、一級河川のみにおける係数bの平均値(=2.22)は二級河川の平均値(=2.06)を上回る。

(2) 一級河川と二級河川の浮遊土砂供給量の比較

対象期間全体における総浮遊土砂供給量を算出し、一級河川及び二級河川と残流域の和に分けて示したものを図-10に示す。ここでは、残流域の寄与率が小さいため、二級河川との和の形で表示している。これより、この期間の総浮遊土砂供給量422万tonとなり、それに対して一級河川の寄与が94.6%、二級河川と残流域の和が5.4%となった。それぞれの寄与率は、図-5に示す流量の場合と比べて大きく異なっている。この要因として、浮遊土砂輸送量算定結果はL-Q式の係数に大きく依存し、特に流量の大きかった一級河川の係数bは2.4~3.2となり、二級河川の係数bの平均値と大きな差がある。しかしなが

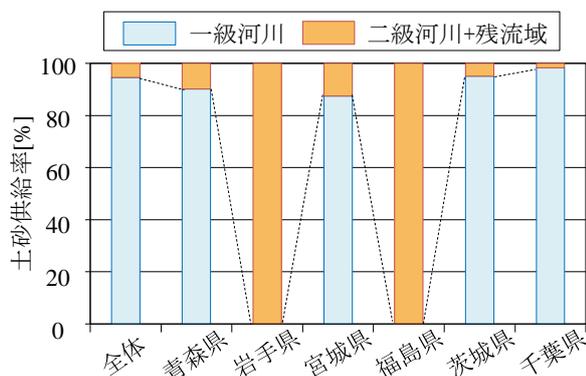


図-10 浮遊土砂供給量に関する県毎の一級河川・二級河川・残流域の寄与率

ら、二級河川と残流域は全体では5.4%の寄与率であるが、一級河川の無い福島県や岩手県のみならず、宮城県や青森県でも約10%以上の寄与率となっている。また、利根川が含まれる千葉県や茨城県では、二級河川の寄与率は非常に小さい。本解析期間では、利根川の影響が大きく出ており（全体の75%）、全体における二級河川の寄与率は小さくなったが、福島県以北で見れば二級河川からの浮遊土砂供給量の寄与率は18%となり、有意であると考えられる。

前述したように、本手法で採用したL-Q式の係数推定法に関しては、一定の誤差を有する。その誤差が浮遊土砂輸送量推定結果に及ぼす影響を調べるために、試行的に、河川毎に推定された係数 $b \pm \sigma$ (σ を山林河川では0.07、その他河川では0.11と設定)として、浮遊土砂輸送量を算出した。その結果、元の総浮遊土砂輸送量(=422万ton)を基準とすると、約3%程度の誤差となった。一方、観測・計算結果に基づく流量に含まれる誤差を±5、10%として、同様に総浮遊土砂輸送量を算出したところ、約12%、24%の誤差となった。以上より、本手法による係数 b の推定誤差の影響は、流量値に含まれる誤差からの影響と比べると相対的には小さく、本L-Q式推定法を用いても問題ないものと判断される。

5. 結論

本研究では、東北・関東地方太平洋沿岸に注ぐ一級・二級河川の河川流量・浮遊土砂輸送量を推定した。得られた主な結論は以下の通りである。

1) MIKE11の流出解析モデル(Urban model(A))を用いて、流量観測データの無い二級河川における流量データを算出し、これと一級河川データを合わせて、一級・二級河川流量データベースを構築した。その結果、対象期間における総流量に対して、一級河川の割合は72%、二級河川と残流域の割合は28%となった。また、県別に比べると、福島県や岩手県、青森県等では、淡水供給源と

しての二級河川や残流域の重要性がより一層増していることが明らかとなった。

2) 得られた流量と流域情報、著者ら¹¹⁾のL-Q式推定法に基づいて、対象エリアにおける浮遊土砂供給量を算定した。その結果、対象期間の総浮遊土砂輸送量に対する一級河川の寄与率は94.6%、二級河川と残流域の寄与は残りの5.4%となった。今回の解析では、利根川の影響が大きいと、福島県以北の地域では二級河川からの浮遊土砂供給量は18%と有意であることが示された。

本論文における流出解析モデルでは、積雪を考慮できず、解析期間に限られた。今後は流出解析モデルの検証を行って、解析期間を広げる予定である。

謝辞：SSデータベース作成・使用にあたり東京都・武川一樹氏（東京理科大学大学院卒業生）に多大なご協力を頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 玉井信行編：河川工学，オーム社，pp.21-26，1999.
- 2) 国土交通省 水文水質データベース：<http://www.river.go.jp/>。（閲覧日：2013年9月24日）
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 武田育郎：水と水質環境の基礎知識，オーム社，pp.158-164，2001.
- 7) J. C. Ritchie and J. R. Mchenry: Application of radioactive fallout Cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: a review, *J. Environ. Qual.*, Vol.19, pp.215-233, 1990.
- 8) T. Matsunaga, H. Amano and N. Yanase: Discharge of dissolved and particulate 137Cs in the Kuji River, Japan, *Applied Geochemistry*, Vol. 6, pp.159-167, 1991.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 武川一樹，二瓶泰雄：日本の河川における浮遊土砂供給量と流量の相関関係，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.69，No.2，pp.I_1221-I_1225，2013.
- 12) 土屋修一，土肥学，海野修司，山田正：管路網水理解析による都市洪水流出特性に関する研究，水工学論文集，Vol.46，pp.259-264，2002.
- 13) 吉川秀夫：流砂の水理学，丸善出版，pp.1-541，1985.

(2013. 9. 30 受付)