広域にわたる陸から海への土砂・栄養塩・有機物供給量の推定

杉村 歩¹・武田 彬², 二瓶泰雄³, 大槻順朗⁴

¹正会員 東日本旅客鉄道(株) (〒151-0053 東京都渋谷区代々木2-2-2)

²非会員 山形市役所 (〒990-8540 山形市旅籠町2-3-25)

³正会員 東京理科大学教授 理工学部土木工学科
(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

E-mail: nihei@rs.noda.tus.ac.jp

⁴正会員 東京理科大学助教 理工学部土木工学科 (同上)

E-mail: ohtsuki@rs.tus.ac.jp

陸から海への土砂・栄養塩・有機物供給量は、海域の地形・水質環境に大きな影響を与えるにも関わらず、連続的かつ広範囲なモニタリングは限定的である。本研究では、陸から海への土砂・栄養塩・有機物供給量を広範囲にわたり推定可能な簡易手法を確立すると共に、東北・関東地方太平洋沿岸への物質供給量を推定することを目的とする。栄養塩・有機物輸送量の算定法に関しては、著者ら独自の出水時水質データベースと無次元 $L-Q$ 式を組み合わせた手法であり、様々な実測値との比較より、本手法の有効性が示された。また、東北・関東地方太平洋沿岸への物質供給量を算定した結果、土砂に関しては浮遊砂量が掃流砂量の約6倍に相当することや、総掃流砂量に対する寄与の大部分(99%)が一級河川経由であることが示された。

Key Words : *sediment, nutrient, pollutant load, organic matter, bed load, suspended load*

1. 序論

陸から海に運ばれる栄養塩・有機物は、富栄養化を増長する“汚濁物質”となる一方、豊かな海域生態系を育む“栄養源”になる、という両面を有している。また、掃流砂や浮遊砂という形態で移動する土砂は、栄養塩や有機物のキャリア(運搬物質)になると共に、海岸の地形形成に大きく寄与している。そのため、陸域から海域への土砂・栄養塩・有機物供給量を把握することは、水質汚濁を抱える閉鎖性海域のみならず、豊かな漁場となる開放性海域においても重要である。

しかしながら、陸域から海域への土砂・栄養塩・有機物供給量のモニタリングはほとんどなされていない。具体的には、まず、土砂輸送量に関しては、掃流砂量は汎用性の高い調査法の開発が検討中であり^{1)・2)}、光学式濁度計等による計測法^{3)・4)}が確立している浮遊砂量ですら広域的・長期的なモニタリングネットワークはなく、個別的な観測に留まる。栄養塩や有機物輸送量に関しては、常時モニタリングは行われておらず、多くの河川では平常時のみ定期調査(月一回)が行われている程度であり⁵⁾、水質濃度が大きく増加する出水時データは非常に少ない。さらに、淡水供給量に相当する河川流量で

すら、常時モニタリングされているのは一級河川のみであり、多くの二級河川では流量データが存在しない⁶⁾。このため、河川経由の淡水・土砂・栄養塩・有機物輸送量の観測網整備やデータベース化は喫緊の課題である。

一方、著者らは日本全国における陸から海への物質供給量推定を目標として、まず、東北・関東地方太平洋沿岸の一級・二級河川の流量と浮遊土砂供給量を算定した(梶・二瓶⁶⁾、以下、前報と呼ぶ)。本研究では、前報を大きく発展させ陸から海への土砂・栄養塩・有機物供給量を広範囲にわたり推定可能な簡易手法を確立し、東北・関東地方太平洋沿岸への物質供給量を推定する。前報で対象となっていない掃流砂量に関しては、一つの横断面データのみで算定可能な簡易掃流砂量算定法⁷⁾を用いる。また、栄養塩・有機物としては、全窒素 T-N、全リン T-P、COD を対象として、出水時水質データベース⁸⁾と流域情報、無次元 $L-Q$ 式⁹⁾に基づく窒素・リン・COD 供給量推定法(以下、本手法)を提案する。

2. 流量・物質供給量算定方法の概要

淡水(流量)、土砂(浮遊砂、掃流砂)、全窒素 T-N、全リン T-P、COD を対象とし、著者らがこれまで蓄積し

表-1 物質輸送量算定方法の概要

項目	方法	入力データ	備考
流量	一級河川：実測値 二級河川：降雨流出解析 (梶・二瓶, 2014)	二級河川：雨量, 流域 面積等	流出解析：MIKE11 Urban model
浮遊砂	L - Q 式 (武川・二瓶, 2012)	平常時水質, 流域情報 (土地利用, 流域面 積, ダム, 地質)	出水時データベースを 作成
掃流砂	簡易掃流砂量算定法 (杉村 ら, 2015)	水位, 横断面形, 底質 粒径	掃流砂量：芦田・道 上式
窒素・リン・COD	無次元 L - Q 式 (二瓶ら, 2010)	平常時水質, 流域情報 (土地利用, 流域面積)	出水時データベースを 作成

てきた算定法や新たに開発する評価法を組み合わせで解析する。その概要を表-1 に示し、詳細を以下に述べる。

(1) 淡水供給量 (流量) ⁶⁾

淡水供給量に相当する河川流量に関しては、前報に倣って、一級河川と二級河川等に分けて扱う。一級河川については国土交通省が流量観測値を収集しており、インターネット上でデータベースを公開している。そのため、河口域に近く、かつ、物質輸送量算定と合わせるために、後述の公共用水域データがある地点を対象に選定する。

一方、二級河川については、月一回程度の頻度で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、出水時を含む連続データは皆無である。そこで、汎用水理水文モデル・MIKE11 (デンマーク水理研究所) の降雨流出モデル (Urban model(A) ¹¹⁾) を用いて、流出計算を行う。この流出解析では、河川毎の流域面積や不浸透面積率 (=不浸透領域の面積/全流域面積)、河川長、最低流量を流域情報として入力する。また、時々刻々の時間雨量データとして、流域内の図心に最も近い気象観測所のデータを用いる。

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の流量データに流域面積の比を掛けて与える。なお、下水処理場からの排水や地下水流入量は流量や後述の物質輸送量データを揃えることは困難であるため、ここでは対象外とする。

(2) 土砂供給量

a) 浮遊砂量 ⁶⁾

土砂輸送量のうち浮遊砂量の算定方法としては、前報と同様に、浮遊砂量 L と流量 Q の相関式である L - Q 式 ($L=aQ^b$, a , b : 係数) を用いる。この L - Q 式中の係数 a , b については、武川・二瓶 ¹²⁾ と同じく、対象河川の流域データ (土地利用、流域面積、表層地質、平均傾斜等) を用いて算出する。具体的には、係数 b については、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率と畑地率、水田率、平均傾斜角度、をそれぞれパラメータとして選定し、ニューラルネットワークモデルにより係数 b を求める。次に、係数 a に関しては、得られた b を用いて、次式より算出する。

$$a = \frac{L_l}{Q_l^b} \quad (1)$$

ここで、 Q_l , L_l は平常時の流量、浮遊土砂輸送量 (= 流量 $\times$ SS) であり、これらの値を算出するには、平常時に取られる公共用水域データを与える。また、 L - Q 式に必要な時々刻々の流量は、前節で求めた結果を用いる。

b) 掃流砂量 ⁷⁾

掃流砂量に関しては、まず、一級河川では、杉村ら ⁷⁾ により提案された簡易的な掃流砂量算定法を用いる。ここでは、一つの横断面における横断面形状や底質の粒径 d と密度 σ 、水位 H や流量 Q の時系列データを取得し、それらを用いて代表的な掃流砂量式の一つである芦田・道上式 ¹³⁾ に代入する。

$$q_B = 17\tau_{*e}^{1.5} \sqrt{\left(1 - \frac{\sigma}{\rho}\right)gd^3} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_{*e}}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_{*e}}}\right) \quad (2)$$

ここで、 q_B は単位幅掃流砂量、 τ_{*} , τ_{*e} , τ_{*c} はそれぞれ無次元掃流力と無次元有効掃流力、無次元限界掃流力、 ρ は水の密度である。得られた q_B を横断方向に積分して、横断面全体の掃流砂輸送量 Q_B を算出する。なお、底質の移動限界の判定には、岩垣式 ¹⁴⁾ を用いる。

一方、二級河川や残流域に関しては、掃流砂量算定に必要な入力データを全て揃えることは困難である。そこで、一級河川において得られた掃流砂量データに基づいて、流量 Q と掃流砂量 Q_B の相関式 (Q - Q_B 式) を作成し、各河川の流量と Q - Q_B 式から掃流砂量を算定する。

(3) T-N, T-P, COD 輸送量算定法の開発

図-1 L - Q 式 (左) と無次元 L - Q 式 (右)

a) 無次元 L - Q 式⁹⁾について

T-N・T-P・COD 輸送量算出の核となる無次元 L - Q 式の概略を図-1に示す. 一般的な L - Q 式では, 負荷量 L と流量 Q のデータを収集し, 作成された相関図に対して指数関数の近似式を適用し, 係数 a , b を得る. 一方, 無次元 L - Q 式は, L と Q を平常時と出水時を分ける閾値 L_0 , Q_0 で除して得られる無次元負荷量 $\bar{L}$ と無次元流量 $\bar{Q}$ の相関式($\bar{L} = \bar{Q}^b$)である. 無次元 L - Q 式のメリットは, 比較的充実した平常時水質データを活かして L_0 , Q_0 を求め, L - Q 式の係数を2つから1つに減らしたことである. また, 係数 b は, 出水時水質データベースと流域情報から算出する. これにより出水時水質データの無い河川の係数 b を推定することが可能となる.

この時に用いる出水時水質データベース⁸⁾は, 図-2に示すように, 著者らによる過去の観測データ(東京湾・手賀沼流入河川及び相模川)や様々な研究・行政機関が行った観測結果(図中赤印)を収集し, 全国74河川・出水イベント数237に及ぶ出水時水質データベースを構築した. ただし, 流域面積 1000km^2 以下の中小河川が大多数であることに注意されたい.

b) 物質供給量の推定手順

本手法によるT-N・T-P・COD供給量の推定手順は, 図-3に示すように, ①関係データの収集, ②無次元 L - Q 式の作成, ③平常時・出水時別の物質供給量の算定, である. ①のデータとしては, 対象地点の流量時系列データと平常時の公共用水域水質データ(水質濃度と流量), および流域の土地利用状況等である. ②では, 基本的に二瓶ら⁹⁾に準じて行う. ③では, 季節的・経年的な平常時水質濃度の変化を取り込むため, 物質供給量の算定には, 平常時には月一回の公共用水質データによる水質濃度と流量の積, 出水時には無次元 L - Q 式を用いる.

3. 対象サイトの概要

本研究の解析対象は, 前報と同じく, 青森県大間岬から千葉県房総半島南部における区間において太平洋流入する河川である. ここでの一級河川としては, 高瀬川, 馬渕川, 北上川, 鳴瀬川, 名取川, 阿武隈川,

図-2 出水時水質データベースの対象河川⁸⁾

図-3 T-N・T-P・COD供給量の算定手順

久慈川, 那珂川, 利根川の9河川がある. また, 二級河川の数 は 202 であり, 岩手県や福島県では二級河川しかない. 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. データ解析の対象期間は2008, 2009年の2年間とする. なお, 流量・土砂輸送量に関しては, 全河川を対象に解析したが, N・P・COD輸送量に関しては, データ整理が膨大な量となったため, ここでは一級河川のみの結果を示す.

4. T-N・T-P・COD供給量の算定結果と考察

(1) L - Q 式の係数 b の特徴

まず, 水質データベースから得られた, 対象全河川における L - Q 式中の係数 b の頻度分布を図-4に示す. ここでは, COD, T-N, T-Pの結果を表示している. これより, 係数 b の平均値と標準偏差は, CODでは1.37と0.35, T-N

図-4 COD・T-N・T-Pにおける係数 b の頻度分布

では1.16と0.36, T-Pでは1.47と0.50となっている。このように、一種の“全国平均”の係数 b については、CODとT-Pの値がT-Nよりも大きい。これは、各項目への懸濁態成分の寄与率の違いが反映しているものと考えられる。また、T-Pにおける係数 b の分布幅がCODやT-Nよりも広いことが明らかとなった。

(2) 流域情報と係数 b の推定式

無次元 $L-Q$ 式の係数 b を求めるべく、出水時水質データベースを用い係数 b と流域情報の関係を検討する。ここでは、流域の土地利用状況を山林、市街地、畑地、水田、その他(水面など)に分け、その他を除く4項目の割合[%]と流域面積[km²]の計5項目を流域情報として用いる。これらを用いて、係数 b との単回帰分析及び重回帰分析の結果をまとめたものを表-2に示す。ここでは、単回帰分析として最も相関係数 R^2 が高かった市街地率の結果を、重回帰分析としては上記の5項目全てを説明変数として用いる場合(重回帰①)、流域面積を除く4項目のみの場合(重回帰②)、の3ケースの結果を示す。これより、単回帰よりも重回帰①、②の方が各ケースの相関係数 R^2 は相対的に高く、また、重回帰では①の方が相対的に高精度である。これらの結果は、T-N、T-Pでも同様である。また、一般の $L-Q$ 式における係数 b の推定を同じ流域情報から行った結果、重回帰①で $R^2=0.39$ となり、係数が一つ少なくなった無次元 $L-Q$ 式の係数推定精度が向上していることが示唆された。

(3) 本手法の推定精度

表-2 係数 b と流域情報に対する単・重回帰分析結果 (COD)

	単回帰	重回帰①	重回帰②
山林 a_1		-0.00296	0.00733
市街地 a_2	-0.00430	-0.00920	0.00230
畑地 a_3		-0.00780	0.00448
水田 a_4		-0.00688	0.00542
流域面積 a_5		-0.0000862	
切片 b	1.45	1.97	0.85
相関 R^2	0.339	0.686	0.411

図-5 係数 b の推定値と実測値の比較 (COD)

図-6 洪水イベント別のCOD総負荷量の推定値と実測値の相関図

CODを対象に上記の3つの方法による係数 b の推定結果を観測結果と比較したものを図-5に示す。ここでは、両者の差を見やすくするために誤差±30%の線も表示する。これより、重回帰①、②の結果はほとんど誤差30%以内に入り、相対誤差は単回帰、重回帰①、②で各々13.9%、8.6%、11.9%といずれも小さい。次に、洪水イベント別のCOD総負荷量に関する推定値と実測値の相関図を図-6に示す。これより、3つともほぼ誤差±30%以内であり、特に重回帰①の精度が高い。同じ結果はT-N、T-Pでも確認され、本手法、特に重回帰①の負荷量推定精度が良好であることが示された。

図-7 対象一級河川における年間流量及び年間 T-N・T-P・COD 供給量の推定値 (2008, 2009 年の平均値)

(4) 陸から海への総供給量

本手法を用いて、東北・関東地方の太平洋沿岸に注ぐ 9 つの一級河川における T-N, T-P, COD 供給量を図-7 に示す。ここでは 2008, 2009 年の年間総供給量の平均値を表示する。図中の結果のうち、流域面積が出水時データベース中の最大値 (8500km²) を越える利根川と北上川のみ重回帰②、他は重回帰①の方法を用いている。また流量も合わせて示す。これより、各物質供給量は流量の大小関係に依存する傾向が見られ、利根川や阿武隈川、北上川、馬淵川の寄与が大きい。特に、T-N・COD 供給量に関しては流量の大小関係と完全に一致する。しかしながら、T-P に関しては流量の大きさとは逆になっている河川がある (馬淵川と那珂川、久慈川と鳴瀬川)。その要因としては、平常時の T-P や $L-Q$ 式の係数 b の大小関係が、流量とは逆転していたことが挙げられる。

5. 土砂供給量の推定結果

まず、二級河川における掃流砂量算定に必要となる比流量 Q' (=流量 Q /流域面積 A) と比掃流砂量 Q_B' (=掃流砂量 Q_B /A) の相関図を図-8 に示す。ここでは一級河川の結果を対象とし、河川間の結果を比較するために、流量 Q や掃流砂量 Q_B を流域面積で除した比流量 Q' と比掃流砂量 Q_B' を採用している。なお、同一河川においても $Q-Q_B$ 関係のばらつきが見られたため、移動平均操作⁴⁾を施したものを表示している。これより、河川間にはデータのばらつきが見られるものの、一部の河川を除いて $Q'-Q_B'$ 関係の傾きは概ね 2 に近くなっている。全データに対する近似式は図中に示すとおりであり、相関係数 R^2 も 0.83 と概ね良好な精度となっている。

解析期間における年平均土砂供給量を算出した結果を図-9 に示す。ここでは、浮遊砂量と掃流砂量について、一級河川と二級河川に分けて図示している。これより、全河川の合計としては、掃流砂量は 105 万 ton/year、浮遊砂量は 674 万 ton/year となり、掃流砂量は浮遊砂量の 15% 程度となった。また、掃流砂量の内訳としては一級

 図-8 一級河川の比流量 Q' と比掃流砂量 Q_B' の相関関係

河川が 104 万 ton/year、二級河川が 1 万 ton/year となり、二級河川の寄与率 (=0.9%) が極めて小さいことが明らかとなった。

また、一級河川のみに関して、2000 年～2013 年にわたり掃流砂量を算出した。その結果、大部分が砂浜海岸からなる仙台以南から千葉県犬吠埼までの範囲 (総延長 448km) に供給される掃流砂量は 38 万 ton/year となった。これは海底勾配 1/20 とした時の海岸線を年間 1.4m 前進する土砂量に相当することが明らかとなった。

6. 結論

広域にわたる陸から海への淡水・土砂 (浮遊砂、掃流砂) ・N・P・COD 供給量を簡便に算定し得る手法を確立し、実測値との比較より本手法の有効性を示した。また、東北・関東地方太平洋沿岸への物質供給量を算定し、土砂に関しては浮遊砂量が掃流砂量の約 6 倍に相当することや、総掃流砂量に対する寄与の大部分 (99%) が一級河川経由であることが示された。

謝辞: 本研究を進めるにあたり、国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所、常陸河川国道事務所、利根川上流河川事務所、及び東北地方整備局高瀬川河川事務所、東北河川国道事務所、北上川下流河川事務所、仙台河川

図-9 解析対象期間の年平均土砂供給量 (単位: ton/year)

国道事務所には流量や水質データをご提供して頂いた。
ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 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) 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.
- 5) (独) 国立環境研究所：環境数値データベース，<https://www.nies.go.jp/igreen/> (閲覧日：2014年9月26日)。
- 6) 梶純也，二瓶泰雄：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，土木学会論文集 B1 (水工学)，Vol.70, No.4, pp.I_979-I_984, 2014.
- 7) 杉村歩，二瓶泰雄，大槻順朗：簡易的な掃流砂輸送量算定法の適用性の検証，土木学会論文集 B1 (水工学)，Vol.71, No.4, pp.I_1219-I_1224, 2015.
- 8) 二瓶泰雄，滝岡健太郎：出水時水質データベースに基づく $L-Q$ 式推定法の検討，第 14 回日本水環境学会シンポジウム講演集，pp.235-236, 2011.
- 9) 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.57, No.2, pp.1176-1180, 2010.
- 10) 国土交通省 水文水質データベース：<http://www.river.go.jp/> (閲覧日：2014年9月26日)。
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 岩垣雄一：限界掃流力に関する基礎的研究 (I) 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.

(2015.3.18 受付)

EVALUATION OF SEDIMENT, NUTRIENT AND ORGANIC MATTER TRANSPORT FROM A WIDE RANGE OF LAND TO COASTAL OCEAN

Ayumu SUGIMURA, Akira TAKEDA, Yasuo NIHEI and Kazuaki OHTSUKI

Although the supply of sediment, nutrient and organic matter from inland has a significant role on morphology and water quality in coasts, there is little monitoring data for the material transport. In this study, we present a simplified approach for evaluating material transport from a wide range of land to coastal ocean and apply it to evaluate the material transport into Pacific Ocean from Tohoku and Kanto districts. The results indicate that the present approach with water-quality database under high-flow conditions and non-dimensional $L-Q$ relation can give a good agreement with the observed data, showing the fundamental validity of the present approach. The evaluated bed load indicates that the suspended load was about 6 times bed load transport, of which 99 % were occupied in class A rivers.