

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

Evaluation of a Rating Curve for Pollutant loads in Rivers without Measured Water Quality under Flood Conditions

二瓶泰雄¹・田中辰弥²・滝岡健太郎³

Yasuo NIHEI, Tatsuya TANAKA and Kentaro TAKIOKA

To accurately evaluate pollutant load in high-flow conditions in rivers without measured water quality, we present a new rating curve for pollutant loads ($L = aQ^b$, b : coefficient) in which non-dimensional discharge Q and pollutant load L are introduced. The present method adopts correlation between the coefficient b in the rating curve and land use in watersheds. We apply the present method to evaluate the coefficient b and pollutant loads in several types of rivers. The results indicate that the pollutant load evaluated by the present method are acceptable agreements with observed data, showing the fundamental performance of the present method to evaluate pollutant load in flooding conditions in rivers without measured data of water quality.

1. はじめに

適正な内湾環境管理を実施する上では、陸域から河川を経由する汚濁物質の流入量の現状をモニタリングすることや将来的な予測・評価を行うことは必要不可欠である(中央環境審議会, 2005). 現状の計測技術レベルでは、河川における時々刻々のCODや栄養塩濃度の変化を計測することは原理的には可能であるものの、計測機器が相対的に高価であるため、自動モニタリング項目としてCODが含まれている地点がわずかにある程度で、栄養塩濃度まで対象としているものは皆無である。そのため、何らかの別の方法で、汚濁負荷量を算出・推定する必要がある。一般的な汚濁負荷量の推定方法としては原単位法が挙げられるが、原単位法には、その結果が原単位自体に大きく依存しているにも関わらず設定方法が曖昧であることや出水時や季節的な時間変化を正確に考慮できないなどの多くの問題点が指摘されている(国松・村岡, 1989; 武田, 2001; 坂井ら, 2008; 二瓶ら, 2008a).

原単位法以外の方法としては、一般的には、時々刻々計測される流量 Q と各河川固有の L - Q 式($L=aQ^b$, L :汚濁負荷量, a , b :係数)を用いて、流量から汚濁負荷量の時系列データを取得する方法が採用されている(例えば山口ら, 1980; 高橋ら, 2000; 二瓶ら, 2005). この L - Q 式を作成する際には、平常時から出水時までの広範囲の流量に対する負荷量(水質)データの実測値が必要とな

る。平常時における水質データは、観測頻度が月一回程度の公共用水域データが充実しており、それらの一部はデータベース化されている。一方、出水時の水質データは、観測に多くの労力と経費を必要とするため、一般的には実測データは少ない(坂井ら, 2008). 汚濁負荷評価を考えると高負荷となり内湾環境へ大きな環境インパクトを与える出水時負荷を正確に評価することは必須であり(海老瀬, 1985; 高田, 1997; 二瓶ら, 2008b), 出水時データが皆無の河川における出水時 L - Q 式推定法の開発が強く望まれている。

このような要請に応えるために、本研究では、一般に充実している平常時水質データと流域情報のみに基づいて、出水時栄養塩・COD輸送量に関する L - Q 式推定法を提案することを試みる。具体的には、平常時水質や河川流量、流域情報のデータベースを活用し、負荷量 L と流量 Q を平常時と出水時の閾値 L_0 と Q_0 でそれぞれ除した形の「無次元 L - Q モデル」を考案する。この無次元 L - Q モデルの構築及び精度検証に用いる出水時負荷量観測データとしては、著者らが多くの観測データを蓄積・収集している東京湾流入河川(坂井ら, 2008; 滝岡ら, 2010)や手賀沼流入河川(今野ら, 2005)に加えて、千葉県がデータ収集を行っている印旛沼流入河川を対象とする。

2. 無次元 L - Q モデルの概要

まず、本研究で提案する無次元 L - Q モデルの基本的な考え方について記述する。一般的には、河川における平常時水質データは公共用水域水質測定により概ね月1回の頻度で計測されており、国立環境研究所のデータベースからダウンロードできるようになっている。また、河川流量に関しても、一般的に H - Q カーブを用いて水位観

1 正会員 博(工) 東京理科大学准教授理工学部土木工学科
2 大和鋼管工業(株)(元東京理科大学学部生)
3 学生会員 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

表-1 解析対象河川の流域情報

水域	河川名	流域面積[km ²]	河川延長[km]	土地利用割合[%]				
				山林	水田	畑	市街地	その他
東京湾	荒川	2300	173	52.9	5.5	7.4	24.5	9.7
	江戸川	2391	223	57.7	7.7	9.8	19.5	5.2
	多摩川	1240	138	50.9	0.7	5.9	35.2	7.3
	隅田川	640	24	1.0	35.0	11.0	46.0	7.0
	中川	987	81	1.0	36.0	11.0	47.0	5.0
	小櫃川	267	88	62.6	7.3	4.1	7.6	18.4
	神田川	105	24.6	0.9	0.0	1.1	97.5	0.5
手賀沼	大堀川	31	13	0.0	1.2	10.6	80.1	8.1
印旛沼	桑納川	25	9.5	14.4	7.0	23.2	54.5	0.9
	手操川	31	12.9	21.7	8.2	13.4	55.8	0.9
	神崎川	57	7.3	20.0	6.2	24.0	48.3	1.5
	師戸川	14	8.1	36.3	13.0	17.5	31.4	1.7

うち、以下では、観測データが豊富な東京湾流入河川（神田川を除く）のデータを用いて、土地利用特性と無次元 $L-Q$ 式の係数 b の関係式を求める。残りの河川に対して、本論文で提案する無次元 $L-Q$ モデルを適用し、実測値との比較により、本モデルの精度を検証する。

なお、本モデルにおいてキーとなる平常時と出水時を分ける流量閾値としては、坂井ら (2008) や滝岡ら (2010) に倣って、比流量として $0.01 \sim 0.20 [\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2]$ 程度となるように河川毎に設定している。

4. 結果と考察

(1) 無次元 $L-Q$ モデルの算出結果

$L-Q$ 関係の基本的特徴を確認するために、多摩川における COD フラックス L と流量 Q の相関図を図-3(a) に示す。ここでは流量閾値 $Q_0=50\text{m}^3/\text{s}$ と設定し、出水時と平常時（低水時）の範囲を図中に表示する。これより、それぞれの観測データに対する近似式 ($L-Q$ 式、図中実線) の傾きを見ると、出水時の方が平常時よりも大きくなっており、出水時と平常時では $L-Q$ 関係が異なるというよく知られた結果が得られている。この $L-Q$ 関係の変化点は、概ね流量閾値付近となっていることも伺える。

この $L-Q$ 関係を負荷量と流量の閾値 L_0, Q_0 で無次元化した結果を図-3(b) に図示している。このように近似式の傾きは平常時と出水時ともに変わらない。また、両者の近似式は $(\bar{L}, \bar{Q}) = (1, 1)$ を通るため、平常時・出水時ともに、無次元 $L-Q$ 式では $a=1$ となる。

(2) 係数 b と流域情報の関係性

このような無次元 $L-Q$ 式を算出し、得られた出水時 $L-Q$ 式中の係数 b と流域情報を比較・検討するために、COD フラックスを例として、係数 b と流域の山林率 A_f 及び市街地率 A_u の単回帰分析結果を図-4 に示す。図中には、観測値に加えて、得られた近似直線も表示している。ここでは、神田川を除く東京湾流入河川を対象に得られた結

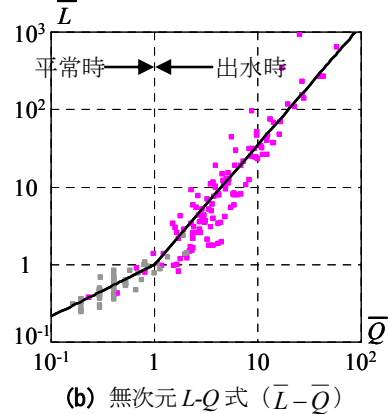
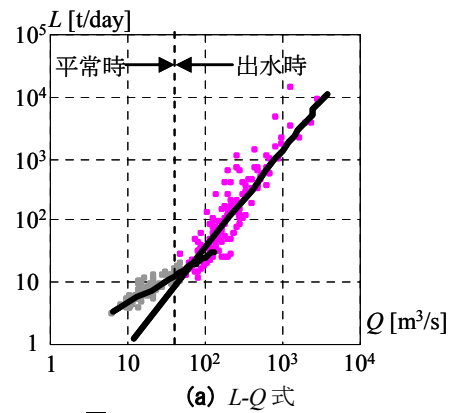
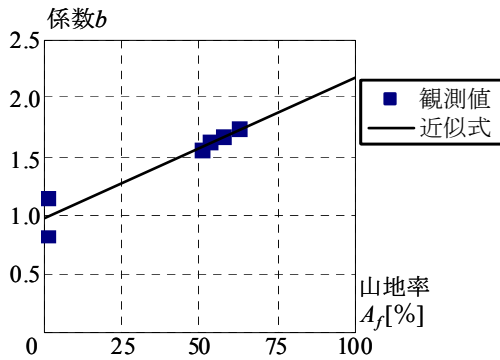


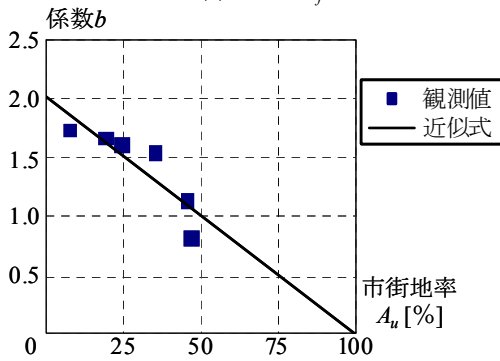
図-3 多摩川における COD フラックスの $L-Q$ 関係

果である。これより、山林率が大きいほど、また、市街地率が小さいほど係数 b は大きくなる。面源負荷のソースとなる地表上の堆積物は、一般に、山林では“半無限”にあるが、市街地では限定されており、結果として出水時における係数 b は山林の方が市街地の値よりも大きくなるものと考えられる。ここで示した各々の単回帰分析結果よりも汎用性を持たせるために、この二つの土地利用割合を用いて次式に示す重回帰分析を行った。

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



(a) 山地率 A_f



(b) 市街地率 A_u

図-4 係数 b と土地利用割合に関する単回帰分析結果 (COD フラックス, 神田川以外の東京湾流入河川)

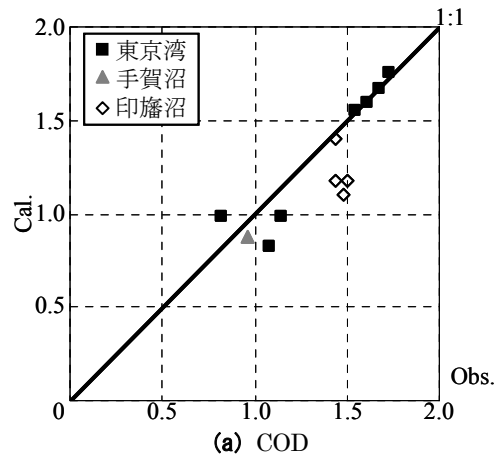
表-2 重回帰分析結果 (神田川を除く東京湾流入河川を対象)

	x_1	x_2	x_3	R
COD	0.011	-0.003	1.105	0.961
T-N	0.003	-0.008	0.993	0.527
T-P	0.011	0.001	1.011	0.716

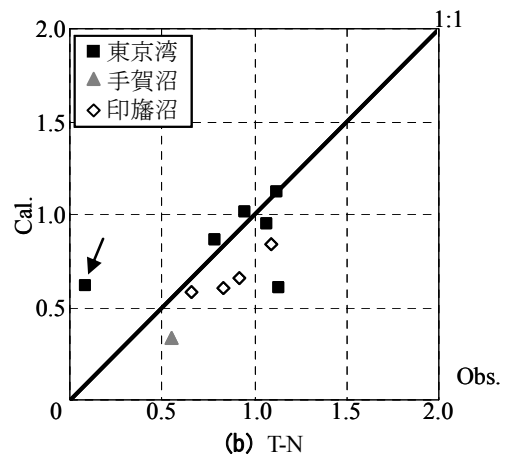
ここで得られた x_1 , x_2 , x_3 の係数値及び重相関係数 R を表-2 に示す. これより x_1 は正, x_2 は負 (T-P を除く) であり, 切片 x_3 は概ね 1.0~1.1 である. 重相関係数は COD や T-P では概ね良好である. また, T-N の相関係数が低いのは, 隅田川や荒川等の感潮域における平常時の T-N 負荷に関する $L-Q$ 関係のバラつきが顕著であったためである.

(3) 本モデルの推定精度

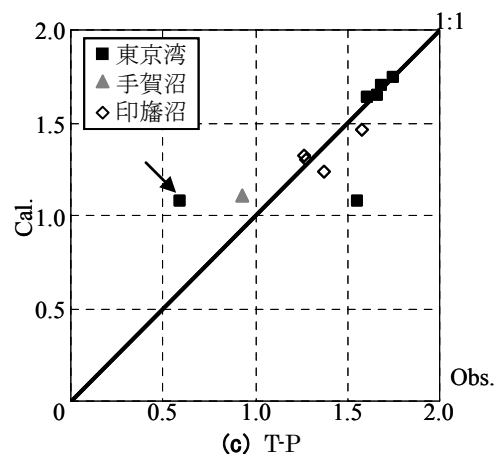
本論文で提案する無次元 $L-Q$ モデルの推定精度を検証するために, 全河川において得られた COD・T-N・T-P に対する係数 b の観測値及び本モデルによる推定値の相関図を図-5 に示す. ここでは, 式 (1) で表される重回帰分析に使われていない手賀沼・印旛沼流入河川, 神田川の結果も表示している. これより, 一部のデータを除いて, 全体的には, 係数 b の推定値は概ね観測値と一致しており, 式 (1) 作成に使用した東京湾流入河川では誤差は 20% 以内, 用いてない他の河川では誤差は 30% 以内に収まっ



(a) COD



(b) T-N



(c) T-P

図-5 係数 b の推定値と観測値の比較 (b) と (c) の矢印の結果は隅田川データである)

ている. このように, 流域情報から $L-Q$ 式のべき指数 b を概ね良好に推定し得ることが分かる. なお, 推定値が観測値から大きくずれる場合も存在しており, 特に図中に矢印で示された隅田川の T-N や T-P については誤差が大きい. これは, 隅田川では, 平常時における T-N や T-P の濃度レベルが高いことに加えて, 相対的に潮汐の影響が強く出水時といえども潮汐による往復流が顕著となり, $L-Q$ 関係の相関性自体が低いためである.

さらに, 本モデルに基づいて, 出水イベント毎に総負

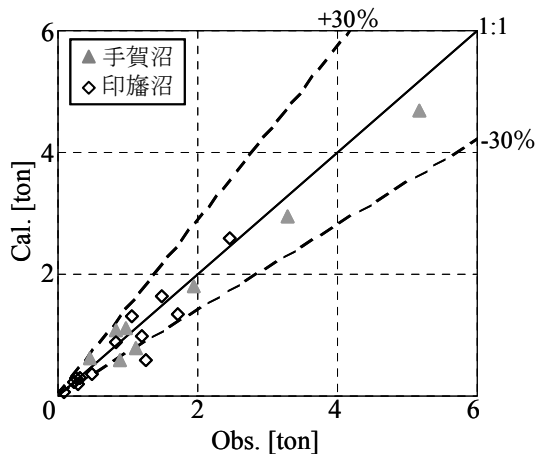


図6 出水イベント毎の総負荷量に関する観測値と本モデルの推定値の比較（手賀沼・印旛沼流入河川，T-N フラックス）

荷量を算出し、実測値と比較したものを図-6に示す。ここでは、手賀沼流入河川と印旛沼流入河川の計5つの河川における結果について、流域情報からべき指数 b を推定するときに相関係数が最も小さかった T-N を対象としている。これを見ると、両者は、概ね一致しており、本モデルによる推定結果は、誤差はほぼ±30%以内に入っている。これは、一般的な $L-Q$ 式の誤差と同程度である（二瓶ら，2005）。以上より、流域情報や平常時水質データのみに基づく無次元 $L-Q$ モデルが出水時データの無い河川における $L-Q$ 式作成に極めて有用であることが示された。

4. まとめ

本研究では、一般に充実している平常時水質データと流域情報のみに基づいて、出水時データの無い河川における栄養塩・COD 輸送量に関する $L-Q$ 式推定法を提案することを試みた。得られた主な結論は、以下の通りである。

- 1) 平常時水質や河川流量、流域情報のデータベースを活用し、負荷量 L と流量 Q を平常時と出水時の閾値 L_0 と Q_0 で除した「無次元 $L-Q$ モデル」を考案した。本モデルの利点は、両変数を無次元化することにより流域面積依存性を排除したことと、係数 a が1となるため未定係数の数を一つ (b のみ) に減らせたことである。
- 2) 無次元 $L-Q$ 式中の係数 b と流域情報の関連性を検討し、流域の市街地率や山林率と係数 b の間に重回帰分析を行ったところ、概ね良好な相関関係が得られた。これより、流域情報から $L-Q$ 式のべき指数 b を概ね良好に推定し得ることが示された。
- 3) 本モデルに基づいて作成された無次元 $L-Q$ 式により出水時の総負荷量を算出した結果、本モデルの推定誤差は概ね±30%以内であり、既存の $L-Q$ 式と同程度で小さい。以上より、流域情報や平常時水質データのみに基づく無

次元 $L-Q$ モデルが出水時データの無い河川における $L-Q$ 式作成に極めて有用であることが示された。

謝辞：公共用水域水質データは国立環境研究所「環境数値データベース」より収集した。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、千葉県には流量や水質データをご提供して頂くと共に、現地調査にご協力いただいた。多摩川調査結果の一部は、国交省関東地方整備局「羽田周辺水域環境調査研究委員会」として行われた。東京大学・古米弘明教授と東京都土木技術支援・人材育成センター・高崎忠勝氏には、隅田川での現地観測実施に際してご協力頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 海老瀬潜一（1985）：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.
- 国松孝男・村岡浩爾（1989）：河川汚濁のモデル解析，技報堂出版，pp.1-266.
- 今野篤・二瓶泰雄・大竹野歩・水口陽介（2005）：複数の都市河川における降雨時水質環境の比較解析，土木学会水工学論文集，Vol.49，No.2，pp.1501-1506.
- 坂井文子・二瓶泰雄・江原圭介・白田美穂・重田京助・大塚慧（2008）：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.
- 高田秀重（1997）：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.
- 高橋順二，長谷部均，白谷栄作，吉永育生（2000）：河川流域における降雨時流出負荷量の算定に及ぼす影響要因，水文・水資源学会誌，Vol.13，No.3，pp.216-226.
- 岡岡健太郎・二瓶泰雄・坂井文子（2010）：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.
- 武田育郎（2001）：水と水質環境の基礎知識，オーム社，pp. 119-166.
- 中央環境審議会（2005）：第6次水質総量規制の在り方について（答申），21p.
- 二瓶泰雄・木水啓・植田雅康・中岡亮・望月健（2005）：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.
- 二瓶泰雄・大塚慧・影山英将・広瀬久也（2008a）：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.
- 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（2008b）：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.
- 山口高志，吉川勝秀，興石洋（1980）：河川の水質・負荷量に関する水文学的研究，土木学会論文集，No.293，pp.49-63.