

# 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

STUDY OF L-Q RELATION UNDER VARIOUS FLOOD CONDITIONS  
ON NUTRIENT AND COD LOADS IN LARGE RIVERS

滝岡健太郎<sup>1</sup>・二瓶泰雄<sup>2</sup>・坂井文子<sup>3</sup>

Kentaro TAKIOKA, Yasuo NIHEI and Ayako SAKAI

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>非会員 修(工) TOTOインフォム(株)(元東京理科大学大学院生)

To clarify  $L$ - $Q$  relations of nutrient and organic loads in large rivers under various flood conditions, we evaluated the  $L$ - $Q$  curves under small and large flood conditions using measured pollutant loads obtained in Edogawa, Arakawa and Tamagawa Rivers. The results indicate that significant differences of  $L$ - $Q$  relations between small and large flood conditions were found in Edogawa and Arakawa Rivers. We also calculated the pollutant loads using  $L$ - $Q$  relations for small and large flood conditions. The results show the high performance of the  $L$ - $Q$  relations for small and large flood conditions for accurate evaluation of pollutant load under large flood conditions.

**Key Words :** pollutant load,  $L$ - $Q$  curve, flood flow, nutrient, non-point source

## 1. はじめに

東京湾や伊勢湾, 瀬戸内海などの重要内湾では, 5年毎に水質総量規制を見直し・策定している<sup>1)</sup>。この水質総量規制の基礎となる陸域から海域へ流入する汚濁負荷量は, 主として原単位法により算出されている。しかしながら, この原単位法には, 採用されている原単位が曖昧であることや高負荷となる出水時影響を正確に考慮できていないこと, 負荷量の季節変化が取り扱えないことなどという問題点が指摘されており, 原単位法による負荷量評価結果には疑問が残る<sup>2)~5)</sup>。

一方, 原単位法の精度検証に用いられ, 一般的な汚濁負荷算出法として流量 $Q$ と汚濁負荷量 $L$ の関係式である $L$ - $Q$ 式( $L=aQ^b$ ,  $a, b$ : 係数)が挙げられる<sup>6)</sup>。これは, 汚濁負荷量 $L$ と流量 $Q$ に関する観測を行い, それより $L$ と $Q$ の相関式( $L$ - $Q$ 式)を対象地点毎, 水質項目毎に作成し, この $L$ - $Q$ 式と流量観測データから時々刻々の汚濁負荷量を算出している。このように,  $L$ - $Q$ 式は比較的簡便に汚濁負荷量を算出できる手法であることから, いくつかの河川における汚濁負荷量の算定に適用されている<sup>6)~10)</sup>。

しかしながら, この $L$ - $Q$ 式においても, 汚濁負荷量の算定精度上の問題が多く指摘されている。その要因として

は, 同一流量条件下でも増水期と減水期の負荷量が異なるヒステリシスが存在し, また, 降雨状況等により $L$ - $Q$ 関係が出水イベント毎に異なるため, 負荷量 $L$ と流量 $Q$ は一意的関係にならない<sup>11), 12)</sup>。さらに, 出水時における観測データそのものが少なく, 特に, 出現頻度が少ない大規模出水では観測値は皆無であり,  $L$ - $Q$ 式自体を作成することが困難な河川も多い。その結果, 出水規模による $L$ - $Q$ 関係の変化については未解明のままである。大河川を抱える上記の内湾では, の問題が顕在化しており, 大規模出水を含む長期間にわたる汚濁負荷量を精度よく算定することが困難である。

一方, 著者らは, 東京湾へ流入する大河川を対象として, 出水時汚濁負荷調査を2006年から継続して実施しており, これまで多くの出水イベントにおける観測データを蓄積している<sup>4)</sup>。その出水イベントの中には, 関東地方に大洪水をもたらした台風0709号出水も含まれている<sup>13)</sup>。本研究では, これらの観測データを用いて, 大河川である江戸川・荒川・多摩川における出水規模別(大規模と中小規模)の $L$ - $Q$ 関係を明らかにすることを試みる。また, 中小規模のみの $L$ - $Q$ 式と出水規模別の $L$ - $Q$ 式を用いて汚濁負荷量を算定し, 両者の算定精度を検証する。なお, 対象とする水質項目は窒素・リン, CODとする。

## 2. 現地観測の概要

### (1) 観測サイト

観測サイトは、**図-1**に示すように、江戸川・野田橋（河口より+39km）、荒川・笹目橋（+29km）もしくは新荒川大橋（+20km）、多摩川・田園調布堰（+13km）である。荒川と多摩川の土地利用特性としては、山林が約半分を占め、市街地率は30%程度となっている<sup>4)</sup>。また、江戸川の土地利用特性の場合には、関宿地点で江戸川へ分流する利根川の影響を考慮すると、荒川や多摩川と同様に山林が半分以上を占めている<sup>4)</sup>。

### (2) 観測及びデータ解析の概要

出水時汚濁負荷調査では、河川水を採取するために、自動採水機（6712型ポータブルウォーターサンプラー、Teledyne ISCO社製）を用い、出水イベント時に1～数時間間隔で自動・連続的に採水を行った。採水位置は低水路側岸付近である。なお、低水路側岸部の水質データのみから算出された断面全体の輸送量の推定結果は、出水時では誤差が最大で20%程度であり<sup>10)</sup>、今回の測定点における水質データは概ね代表性があると見なせる。

観測を行った出水イベントは、**表-1**に示すように、江戸川では9回、荒川では4回、多摩川では8回である。これらの中には、近年関東地方に久々の大規模出水をもたらした台風0709号時（イベント10）も含まれており、この時の最大流量は、観測した他の出水イベント時を大きく上回っている。この出水時では、関東山地を中心に山間部で大きな降雨が記録されており、例えば、多摩川流域の小河内では、2日間雨量が670mmに達した。また、前線性豪雨により生じたイベント11では、都市部を中心に集中豪雨が発生し、3河川の中では多摩川のみ大きな流量が観測されている。

採取したサンプル水に関して、COD、窒素、リンの全成分（T-）を分析した。水質分析方法は、オートアナライザー（swAAt、ピーエルテック（株）製）を用いて、窒素は紫外吸光度法、リンはペルオキシ二硫酸カリウム分解法により分析を行った。CODには過マンガン酸カリウム法により分析を行った<sup>14)</sup>。ここで得られる出水時データは、後述するように、平常時に測定された公共用水域水質データと比べると、上記の観測地点や分析方法は公共用水域水質データと対応したものである。

$L$ - $Q$ 関係を求めるのに必要となる流量 $Q$ については、二瓶法<sup>15)</sup>と同様とする。具体的には、江戸川・野田橋では、水位観測値とその地点の $H$ - $Q$ 式から与えている。多摩川・田園調布堰では、そこでの越流水深等より算出された堰流量を用いている。さらに、感潮域である荒川・笹目橋及び新荒川大橋では、順流部末端の秋ヶ瀬堰（+34km）の流量に流入支川、下水処理水の流量の和としている。



図-1 各河川における観測点位置

表-1 観測対象となる出水イベントとその最大流量（表中の×は未計測の出水イベントである）

No	観測期間	江戸川	荒川	多摩川
1	2006/6/16～19	510m <sup>3</sup> /s	×	×
2	2006/7/18～23	1008m <sup>3</sup> /s	×	228m <sup>3</sup> /s
3	2006/8/8～10	×	×	238m <sup>3</sup> /s
4	2006/9/13～17	351m <sup>3</sup> /s	×	117m <sup>3</sup> /s
5	2006/9/26～27	×	×	132m <sup>3</sup> /s
6	2006/10/5～9	582m <sup>3</sup> /s	2426m <sup>3</sup> /s	722m <sup>3</sup> /s
7	2006/10/24～25	343m <sup>3</sup> /s	×	×
8	2006/12/27～30	631m <sup>3</sup> /s	×	×
9	2007/7/13～18	456m <sup>3</sup> /s	1396m <sup>3</sup> /s	502m <sup>3</sup> /s
10	2007/9/6～10	1399m <sup>3</sup> /s	4448m <sup>3</sup> /s	3842m <sup>3</sup> /s
11	2008/8/29～9/2	734m <sup>3</sup> /s	1671m <sup>3</sup> /s	2386m <sup>3</sup> /s

## 3. 出水時における $L$ - $Q$ 関係

### (1) 各項目における $L$ - $Q$ 関係の基本的特徴

汚濁負荷量 $L$ と流量 $Q$ の相関関係に関する基本的な特徴を抽出するために、荒川、江戸川、多摩川におけるT-COD、T-N、T-Pに関する負荷量と流量の相関図を**図-2**に示す。ここでは、各河川に得られた全出水イベント時の計測データを記載するとともに、公共用水域水質測定結果に基づく平常時の汚濁負荷データも合わせて図示している。また、負荷量の流量依存性を見やすくするために、観測データを適当な流量範囲に区分けし、各範囲の流量と負荷量データの平均操作を行い、その平均値（ここでは移動平均値と称す）を**図-2**に表示している。

これらを見ると、まず荒川では、流量に対する負荷量 $L$

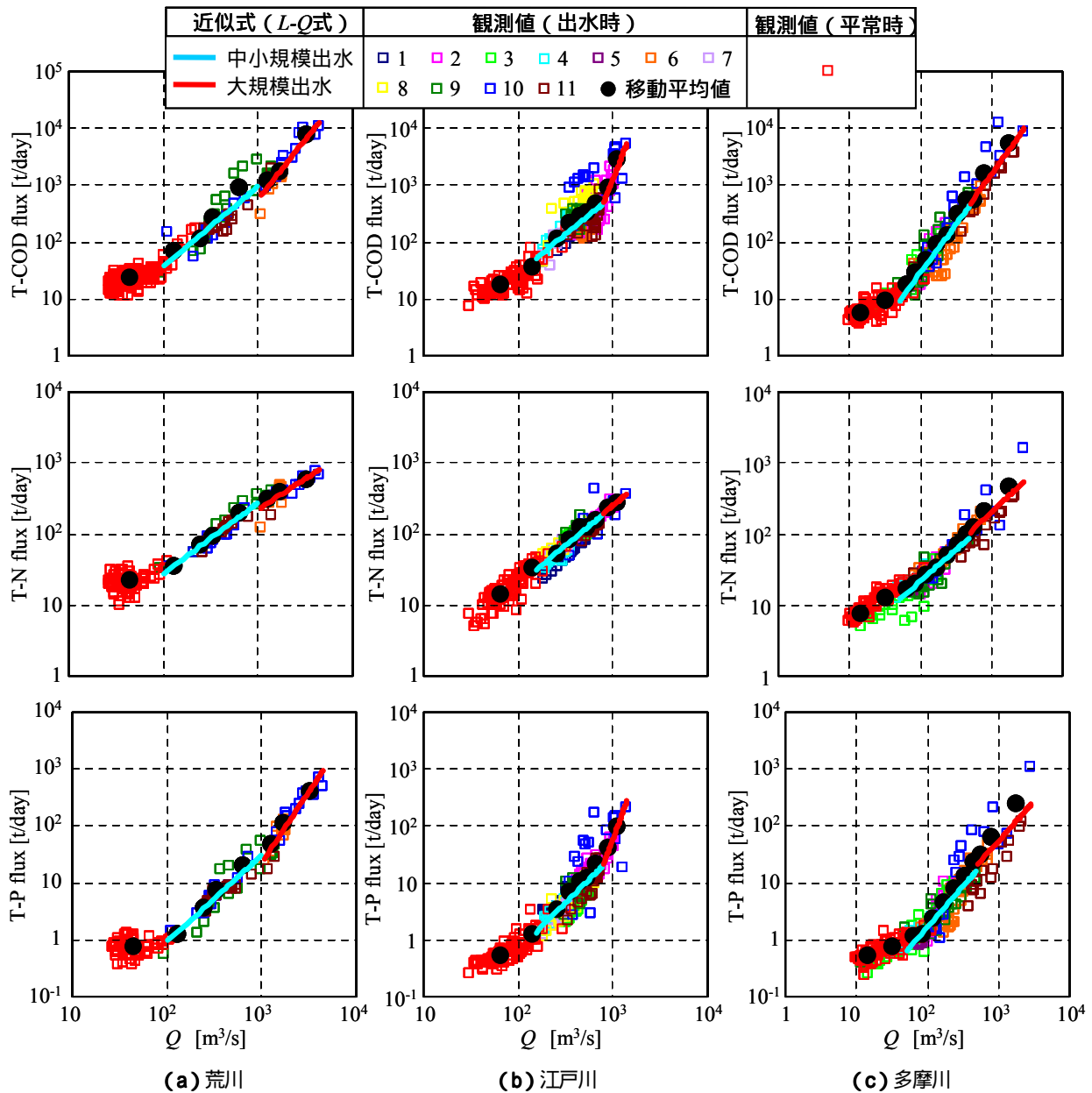


図-2 様々な出水イベント時及び平常時における負荷量  $L$  と流量  $Q$  の相関関係 (上から T-COD, T-N, T-P を対象とする)

の増加率が流量規模により変化しており、その傾向は移動平均値において明確に読み取れる。すなわち、平常時では負荷量増加率は相対的に小さいものの、流量が大きくなり中小規模出水時になるとその増加率は平常時よりも大きくなるのが全項目において確認できる。さらに流量が大きい大規模出水時では、T-CODやT-Pにおける負荷量増加率は中小規模出水時よりも増加しているのに対して、T-Nに関しては逆に小さくなっている。一般に、低水時(平常時)と出水時では $L$ - $Q$ 関係が異なることが指摘されているが、図-2(a)では、さらに出水規模別に $L$ - $Q$ 関係が異なることが示され、その様子が水質項目により違うことが明らかとなった。

次に、江戸川においても、流量に対する負荷量の増加

率に関する傾向は、荒川の場合と概ね類似していることが分かる。

さらに、多摩川の $L$ - $Q$ 関係を見ると、大規模出水が生じたイベント11の負荷量は、同一流量条件下では、概ねイベント10の結果よりも小さくなっており、大規模出水時の観測データのばらつきは相対的に他の河川よりも大きい。その結果、大規模出水時の流量範囲では、各負荷量の移動平均値はイベント10と11の平均的な結果となっている。また、流量に対する負荷量増加率は、低水時から中小規模出水時では増えているが、中小規模及び大規模出水時には大きな差は見られない。このことは全ての項目において共通していることが分かる。

表-2 各河川における平常時と中小規模出水時，大規模出水時の流量範囲（流量の単位：m<sup>3</sup>/s）

流量規模	江戸川	荒川	多摩川
平常時	$Q < 150$	$Q < 100$	$Q < 50$
中小規模出水	$150 < Q < 800$	$100 < Q < 1000$	$50 < Q < 500$
大規模出水	$800 < Q$	$1000 < Q$	$500 < Q$

表-3 出水規模別  $L-Q$  式における係数  $a, b$

		T-COD		T-N		T-P	
		$a$	$b$	$a$	$b$	$a$	$b$
江戸川	大規模出水	$2.0 \times 10^{-10}$	4.26	0.13	1.10	$1.0 \times 10^{-12}$	4.57
	中小規模出水	$5.4 \times 10^{-2}$	1.36	0.12	1.11	$3.0 \times 10^{-4}$	1.66
荒川	大規模出水	$3.0 \times 10^{-4}$	2.09	0.59	0.86	$7.0 \times 10^{-7}$	2.50
	中小規模出水	$5.9 \times 10^{-2}$	1.40	0.28	1.00	$8.0 \times 10^{-4}$	1.53
多摩川	大規模出水	$9.0 \times 10^{-3}$	1.75	0.30	0.94	$3.3 \times 10^{-3}$	1.40
	中小規模出水	$1.2 \times 10^{-2}$	1.70	0.37	0.88	$2.4 \times 10^{-3}$	1.42

## (2) 出水規模別 $L-Q$ 式の算定

出水規模により異なる  $L-Q$  関係を定量的に評価するために，出水規模別に  $L-Q$  式を算出する．ここでは，表-2に示すように，各河川において，平常時と中小規模出水時，大規模出水時の流量範囲を与え，観測データを分けられた流量毎に  $L-Q$  式を求めると共に，その流量の閾値は，既存の研究<sup>4)</sup>を参考にして便宜的に与えている．この閾値を比流量に換算すると，平常時と中小規模出水間の閾値の場合には  $0.042 \sim 0.067 [\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2]$ ，中小規模出水と大規模出水間の閾値の場合には  $0.36 \sim 0.45 [\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2]$  となっている．得られた中小規模及び大規模出水時における  $L-Q$  式を図-2中の実線で表示すると共に，その係数  $a, b$  を表-3にまとめている．なお，同表における係数  $a, b$  を求める際には，負荷量  $L$  と流量  $Q$  の単位はそれぞれ  $\text{t}/\text{day}$ ， $\text{m}^3/\text{s}$  としている．

これらの図表を見ると，まず，江戸川や荒川における T-COD や T-P に関しては，大規模出水時における  $L-Q$  式のべき指数  $b$  は，中小規模出水時よりも明確に大きくなっている．このため，江戸川や荒川では，中小規模出水時の  $L-Q$  式を大規模出水時の流量範囲までそのまま外挿して用いると，負荷量は著しい過小評価となってしまう可能性がある．一方，多摩川では，大規模出水時と中小規模出水時における  $L-Q$  式の係数  $a, b$  は，どの項目に関してもほぼ同一であり，江戸川や荒川とは大きく異なる結果となっている．この場合には，中小規模出水時の  $L-Q$  式を大規模出水相当の流量まで外挿しても負荷量算定には問題ない

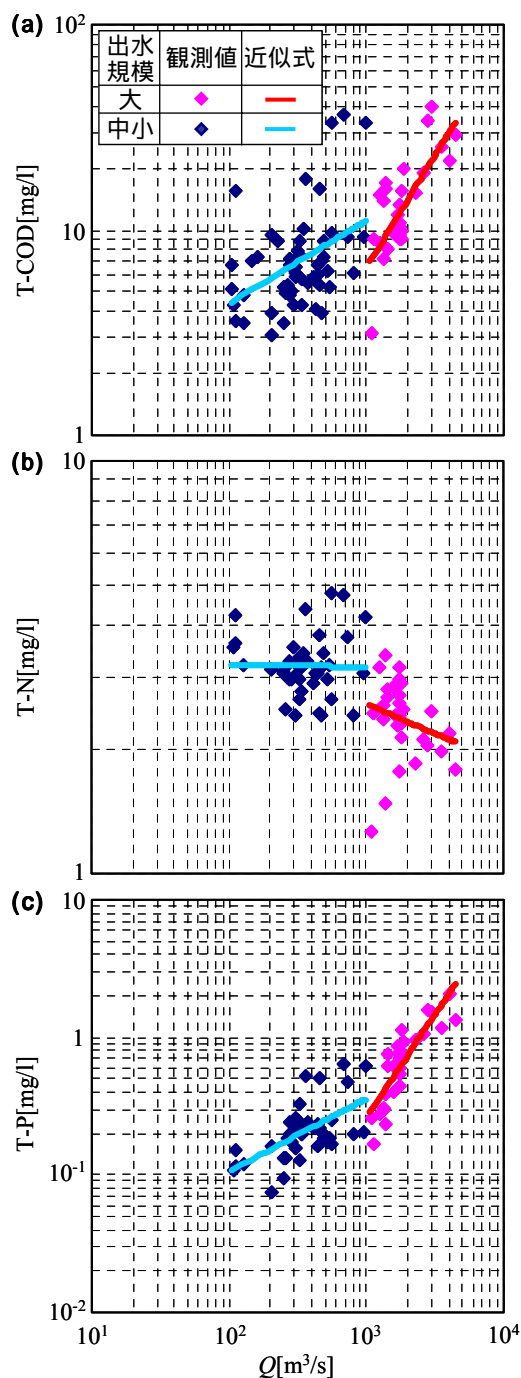


図-3 出水規模別の水質濃度  $C$  と流量  $Q$  の相関関係（荒川，上から T-COD (a)，T-N (b)，T-P (c)）

ものと思われるが，イベント10と11では，同一流量でも負荷量が異なるので，両イベントの結果を精緻に表記できるかどうかについては4.で検討する．

## (3) $C-Q$ 関係

$L-Q$  関係が水質項目毎や出水規模別に变化する様子を確認するために，水質濃度  $C$  と流量  $Q$  の相関関係を図-3に示す．ここでは，荒川における観測結果を例として，中小規模出水時と大規模出水時に色分けして表示している．また，各出水時に対応する近似式も合わせて表示してい

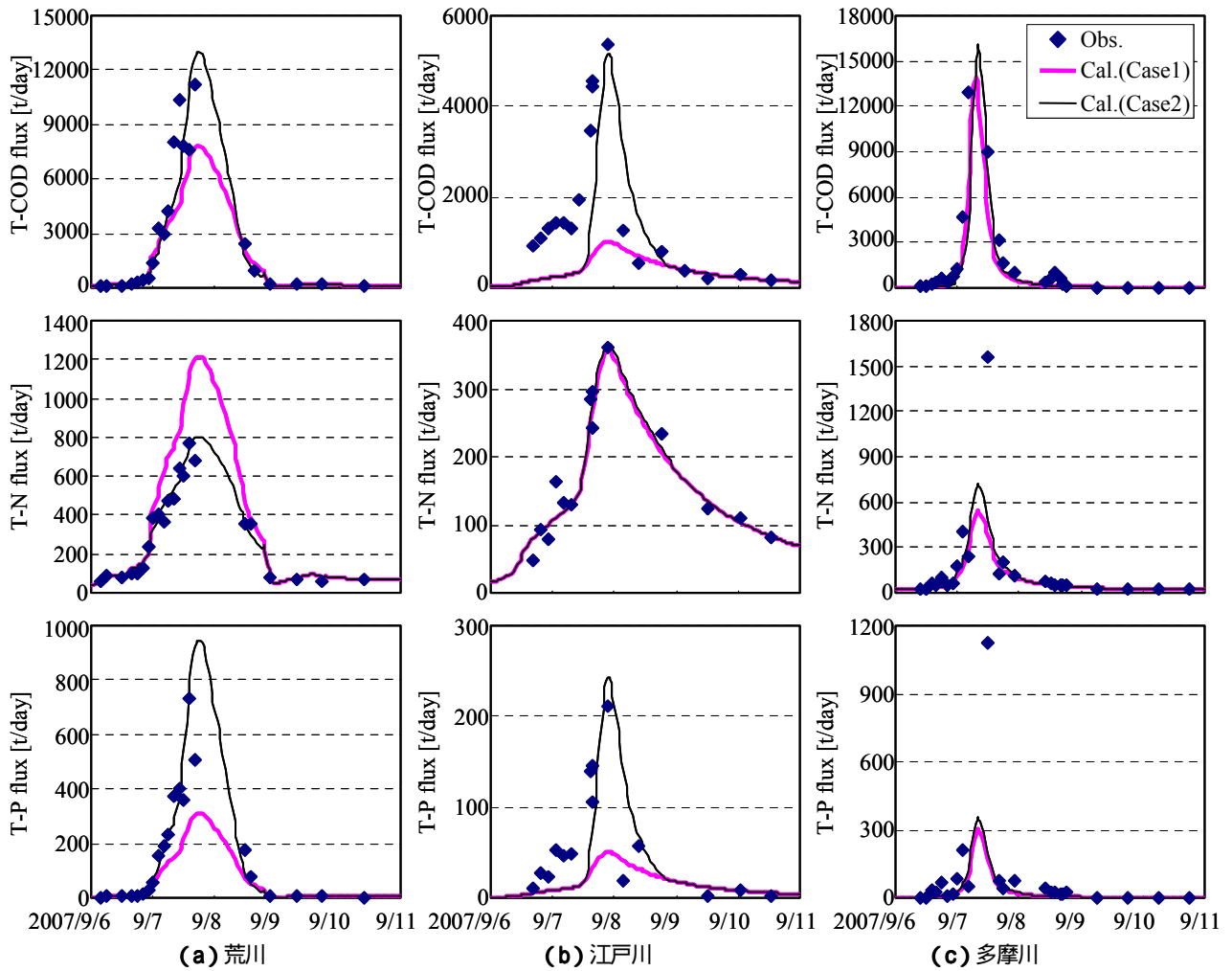


図-4 汚濁負荷量の時間変化に関する観測値とL-Q式による推定値の比較（イベント10，上からT-COD，T-N，T-P負荷量）

る。これより、T-CODやT-Pは流量とともに増加し、その傾きは大規模出水時の方が中小規模出水時よりも大きい。このような大規模出水時ではSSが非常に大きく増加するため<sup>13)</sup>、懸濁態成分の寄与が大きいT-CODやT-Pは、SSと連動して大規模な出水ほど増加するものと考えられる。一方、T-Nは、流量と共に減少し、その減少量は大規模出水時で大きい。T-Nに関してはT-CODやT-Pと比べて懸濁態成分の寄与が小さく、かつ、大量の降雨による希釈効果により、T-Nが流量と共に減少しているものと考えられる。

このように、流量に対する水質濃度依存性は、中小規模出水と大規模出水では明確に変化しており、その結果、L-Q関係におけるべき指数 $b$ が出水規模により変化していることが示唆された。

#### 4. 異なるL-Q式による汚濁負荷算定精度

##### (1) 算定方法の概要

本章では、汚濁負荷評価に用いるL-Q式の選択が汚濁負荷量の推定精度に及ぼす影響を調べることを試みる。こ

こでは中小規模出水時のみのL-Q式を用いる場合（Case1）と出水規模別に中小規模出水時と大規模出水時におけるL-Q式を用いる場合（Case2）の2ケースにより、出水時の汚濁負荷量を算定する。L-Q式の係数は表-3の結果を採用する。また、出水規模の流量範囲は表-2に従うものとして、Case2の場合には、流量により中小規模出水か大規模出水のどちらかのL-Q式を選択する。Case1では、流量に関係なく一つのL-Q式を用いる。

##### (2) 算定結果

全河川において大規模出水が記録されたイベント10（台風0709号出水）におけるT-COD、T-N、T-P負荷量の時間変化を図-4に示す。ここでは、各負荷量の観測値とCase1と2のL-Q式による推定値を図示する。荒川や江戸川のT-COD・T-P負荷量に関しては、中小規模出水時のみのL-Q式を用いるCase1では、ピーク付近の負荷量を過小評価しているが、出水規模別の2つのL-Q式を用いるCase2では概ね観測値と一致している。一方、多摩川に関しては、出水規模別のL-Q式に差がないので、両ケースの推定結果は概ね一致しているが、ピーク付近では観測値よりも過小



表-4 イベント 10 における総汚濁負荷量の推定値と観測値の比（推定値として、Case1 と 2 の結果を示す）

		江戸川	荒川	多摩川
T-COD	Case1/Obs.	36%	78%	49%
	Case2/Obs.	80%	106%	55%
T-N	Case1/Obs.	99%	144%	53%
	Case2/Obs.	101%	105%	63%
T-P	Case1/Obs.	35%	56%	32%
	Case2/Obs.	80%	130%	37%

評価している。

このイベント10における総汚濁負荷量を算出し、推定結果と観測値の比を表-4に示す。観測値算定にあたり、水質濃度データの時間間隔が流量（1時間間隔）よりも長いので、適宜、時間的に線形内挿して与えている。これより、荒川や江戸川では、Case1の算定結果は観測値の35～144%と全体的に過小評価であり誤差も大きい。Case2では80～130%となっており、出水規模別のL-Q式により汚濁負荷推定精度が向上している。ただし、多摩川に関しては、両ケース共に32～63%と過小評価となっている。これは、図-2(c)に示すように、大規模出水の流量範囲では山地型豪雨が生じたイベント10と都市型豪雨が生じたイベント11においてL-Q関係が異なり、高精度のL-Q式を算出できなかったためである。

## 5. おわりに

本研究で得られた結論は、以下の通りである。

- 1) 大河川において出水規模別にL-Q関係を検討した結果、荒川や江戸川では、中小規模出水時と大規模出水時ではL-Q関係が変化すること、その様子が水質項目により異なることが明らかとなった。
- 2) 流量に対する水質濃度依存性は、中小規模出水と大規模出水では変化し、その結果を反映してL-Q関係におけるべき指数bが出水規模により変化することが示された。
- 3) 中小規模出水時のみで得られるL-Q式(Case1)では出水時汚濁負荷量を過小評価する傾向となるが、出水規模別の2本のL-Q式(Case2)を用いると、汚濁負荷量の推定精度は向上することが示された。

なお、多摩川における出水イベント10と11のように、流域内の降雨エリアが異なる出水イベント間にもL-Q関係に大きな差が見られる。今後、より多くの観測データを収集し、大規模出水時における出水イベント間のL-Q関係の変化について検討していく予定である。

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、東京都水道局には流量や水質データをご提供して頂くと共に、現地観測実施に際して様々なご協力を頂いた。多摩川調査の一部は、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。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)，21p，2005。
- 2) 国松孝男，村岡浩爾：河川汚濁のモデル解析，技報堂出版，pp.1-266，1989。
- 3) 武田育郎：水と水質環境の基礎知識，オーム社，pp.119-166，2001。
- 4) 坂井文子・二瓶泰雄・江原圭介・白田美穂・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。
- 5) 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。
- 6) 山口高志，吉川勝秀，輿石洋：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.49-63，1980。
- 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) 高橋順二，長谷部均，白谷栄作，吉永育生：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.216-226，2000。
- 9) 高野芳隆，井伊博行，石塚正秀，平田健正，平井秀輝：和歌山県紀ノ川の水質特性から算定したCOD及びCOD負荷量，水工学論文集，Vol.48，pp.1477-1482，2004。
- 10) 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。
- 11) Williams, G. P.: Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers, *J. of Hydrology*, Vol.111, pp.89-106, 1989.
- 12) 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。
- 13) 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。
- 14) (社)日本下水道協会：下水試験方法上巻 - 1997年版 - ，297p，1997。
- 15) 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。

(2009.9.30 受付)