

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

NUTRIENT AND COD LOADS IN THE EDO, ARA, TAMA AND NAKA RIVERS UNDER FLOOD FLOW CONDITIONS

坂井文子¹・二瓶泰雄²・江原圭介³・臼田美穂⁴・重田京助¹・大塚慧⁵
Ayako SAKAI, Yasuo NIHEI, Keisuke EHARA, Miho USUDA, Kyosuke SHIGETA
and Satoshi OOTSUKA

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)

³非会員 学 (工) 埼玉県 (元東京理科大学学部生)

⁴非会員 学 (工) 東京都文京区 (元東京理科大学学部生)

⁵非会員 東京理科大学 理工学部土木工学科

Previous evaluation of pollutant loads for the basin of Tokyo Bay are not accurately treated with the influence of flood-flow conditions. In the present study, we attempt to clarify the nutrients and COD loads in the main influent rivers under hydrologic events. For this purpose, we mounted automatic water samplers at the Edo, Ara, Tama and Naka Rivers. The observed results indicate that specific relations between river discharge Q and water quality are found in each river. The pollutant loads in the Ara and Naka Rivers are dominant in flood and low flow conditions, respectively. The large amount of the nutrients and COD loads were transported under flood flow conditions in all rivers.

Key Words : Tokyo Bay, pollutant load, L-Q relation, flood flow, nutrient, COD

1. はじめに

大都市圏を背後地に抱える東京湾では、長年の間、水質汚濁化・富栄養化が問題視されている。この状況を改善するべく、水質総量規制¹⁾により、陸域から東京湾へ流入する汚濁負荷量を抑制する対策が数多く実施されている。この結果、河川の水質環境は一定の改善傾向が見られ、環境基準の達成率は増加している。それに対して、海域における水質環境は明確には改善されておらず、現在でも、毎年赤潮や青潮は頻発している²⁾。

水質総量規制を行う上では陸域からの汚濁負荷量を定量化する必要があり、それには原単位法³⁾が一般に用いられる。原単位法の精度検証用には、主に平常時に計測される公共用水域水質データが用いられるが、高汚濁負荷となる出水時における水質データは使われることは少ない。その要因としては、出水時調査はいくつか行われているものの⁴⁾、東京湾主要流入河川では出水時の実測データが限定されているためであり⁵⁾、結果として、これまでの水質負荷算定結果の精度には大きな疑問が残る。以上のことから、東京湾へ流入する主要河川における出水時の栄養塩・COD負荷特性を把握すると共に、それらの

影響を反映させた形で汚濁負荷量を再評価することは急務であり、著者ら⁶⁾はその検討を一部に開始している。

本研究では、東京湾湾奥部に流入する主要河川である江戸川・荒川・多摩川・中川に着目し、出水時の栄養塩・COD環境特性を明らかにするとともに、年間汚濁負荷量を算定することを試みる。ここでは、出水時において自動採水機などによる採水観測を行い、窒素・リン・CODやその負荷量を河川毎に算出する。これらの観測結果に基づいて、出水時における窒素・リン・CODの時間変動特性を示すと同時に、流量 Q と水質濃度 C の関係 ($C-Q$ 関係) や負荷量 L との相関関係 ($L-Q$ 関係) を算出する。さらに、 $L-Q$ 式等に基づいて、年間汚濁負荷量を算定し、その負荷量に対する出水時の寄与を算出する。

2. 現地観測の概要

本研究で対象とする江戸川、荒川、多摩川、中川の位置と観測点を図-1に示す。採水観測を行う地点としては、江戸川・野田橋 (河口より+39km)、荒川・新荒川大橋 (+21km) もしくは笹目橋 (+29km)、多摩川・田園調布堰 (+13km)、中川・八条橋 (+27km) である。表-1は細

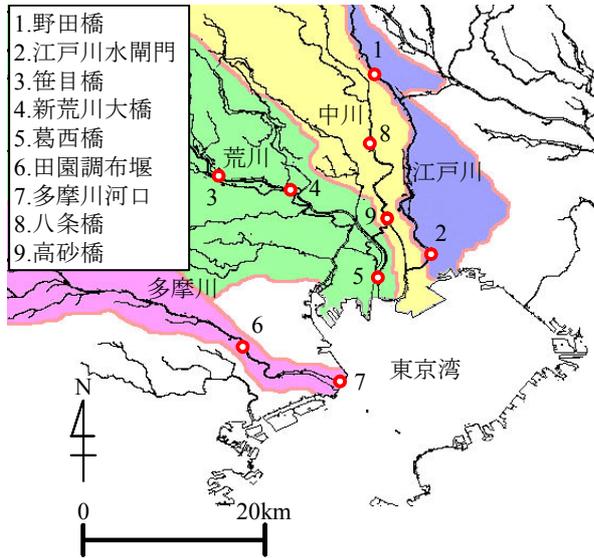


図-1 各河川における観測点位置

密度値情報等により得られた各河川における流域面積や土地利用特性を示す。江戸川は、利根川より分派するので、利根川分派点におけるデータも同表に示す。

この主要流入河川において出水時の影響を考慮した汚濁負荷量を算出するために、出水時に採水観測を行った。採水には自動採水機（6712型ポータブルウォーターサンプラー、Teledyne ISCO社製）カビケツを使用した。各河川における観測状況は表-2に示すとおりであり、採水間隔は主に1~2時間とする。このうち台風0704号接近時（イベント⑨）では、4河川で同時採水観測が実現できた。なお、荒川では、2006年では新荒川大橋、2007年では笹目橋で、それぞれ観測を行っている。採取したサンプル水については、濁度、pH、電気伝導度（以上、WQC-24、東亜ディーケーケー（株）製）、浮遊土砂粒径分布（レーザー回折式粒径分布測定装置SALD-3100、（株）島津製作所製）を計測すると共に、SS及びCOD、窒素、リンの全成分（T-）、懸濁態成分（P-）、溶存態成分（D-）を分析している。窒素・リンの分析にはオートアナライザー（swAAI、ビーエルテック（株）製）を用いた⁷⁾。SSにはガラス繊維ろ紙法（Whatman GF/B、孔径1 μ m）を、CODには過マンガン酸カリウム法を、各々用いた。

また、 $L-Q$ 関係や $C-Q$ 関係を求めるのに必要となる流量 Q については、江戸川、中川では、水位観測値と $H-Q$ 式から与える。多摩川では田園調布堰での越流水深等より算出された堰流量を用いる。感潮域である荒川の観測点では、順流部末端の秋ヶ瀬堰（+34km）と流入支川、下水処理水の流量の総和を与える⁸⁾。

3. 出水時における水質環境の特徴

(1) 時間変動特性

各河川における出水時水質濃度の時間変動特性を把握するために、4河川同時に観測が行われた台風0704号に

表-1 各河川の流域面積と土地利用特性

河川名	流域面積 [km ²]	割合[%]				
		山地	市街地	水田	畑地	その他
江戸川	200	15	63	3	10	9
利根川	8764	62	16	8	9	5
荒川	2940	43	28	7	11	11
多摩川	1240	62	28	1	5	4
中川	987	1	47	36	11	5

表-2 各河川における採水観測状況

No	観測期間	江戸川	荒川	多摩川	中川	備考
①	2006/6/16~19	○				
②	2006/7/18~23	○		○		
③	2006/8/8~10			○		台風0607号
④	2006/9/13~17	○		○		
⑤	2006/9/26~27			○		台風0614号
⑥	2006/10/5~9	○	○	○		
⑦	2006/10/24~25	○				
⑧	2006/12/27~30	○				
⑨	2007/7/13~18	○	○	○	○	台風0704号

よる出水イベント⑨における水質濃度の時間変化を図-2に示す。ここでは、流量と濁度、T-P、T-N、T-CODに関して表示している。なお、江戸川を除く3河川では、出水が生じる前から採水を開始している。一方、江戸川では採水作業の設定の関係により、ある程度水位上昇が生じてからしか採水できておらず、出水前のサンプル水を採取できていないことに注意する必要がある。

この出水イベントでは、各河川流域にて80~150mmの総雨量が観測された。それに伴い生じた洪水の最大流量は江戸川では450m³/s、荒川では1400m³/s、多摩川では500m³/s、中川では330m³/sとなり、荒川の最大流量が他の河川よりも顕著に大きい。この流量と対応して、濁度に関しても河川間の大小関係は同じとなる。荒川に関しては、最大800NTUの濁度が観測されており、中川や多摩川の最大濁度の4倍程度となっている。また、濁度と流量の時間変化を比べると、荒川や江戸川では、濁度ピークの方が流量ピークよりも先に現われている。また、中川に関しては、増水期よりも減水期の濁度の方が全般的に大きい。このように、濁度と流量が一意的関係となっておらず、何らかの履歴効果（ヒステリシス）⁹⁾を有していること、それが河川毎に異なっていることが分かる。

次に、T-PやT-Nに着目すると、荒川、江戸川、中川では、流量とともに、T-PやT-Nは増減している。それに対して、多摩川に関しては、流量増加とともに、T-Pは一旦減少しその後上昇しており、また、T-Nは減少し、一定となっている。また、T-PやT-Nともに、4河川の中では荒川の値が最も大きいものの、その違いは流量や濁度よりも小さい。また、流量ピーク時には、T-Pは中川、T-Nは

江戸川の値が荒川に次いで大きい。このようなT-PやT-Nの時間変動特性の要因を探るために、同じ出水イベントにおける溶存態濃度 (D-P, D-N) の時間変化を図-3 (a), (b) に示す。これを見ると、多摩川のD-PやD-N, 荒川のD-Nは流量増加とともに減少している。このような溶存態濃度 (D-P, D-N) の減少傾向は、降雨による希釈効果の

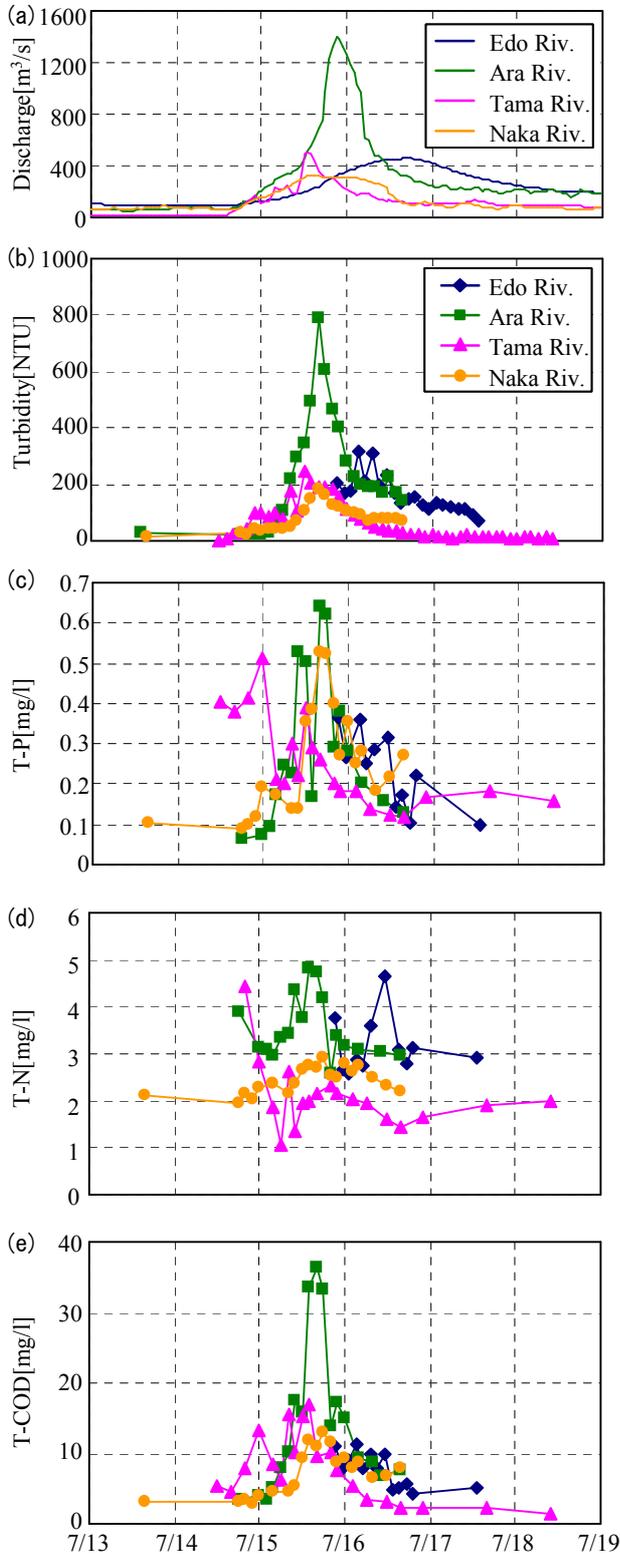


図-2 イベント⑨ (台風0704号) における流量 (a), 濁度 (b), T-P (c), T-N (d), T-COD (e) の時間変化

ためである。これより、多摩川におけるT-PやT-Nの時間変動特性は、溶存態濃度 (D-P, D-N) の時間変動特性の影響を強く受けており、降雨による希釈効果により流量と逆相関関係になったものと考えられる。

また、T-CODに関しては、濁度と同様に、荒川の観測値が顕著になっており、最大で35mg/lまで達している。また、流量や濁度の大小関係と異なり、多摩川の値が江戸川の値を上回っている。また、多摩川では、出水初期に鋭い濃度ピークが発生する、というファーストフラッシュ現象が生じている。また、図-3(c)に示されているD-CODを見ると、全河川ともに多少の増減は見られるが、T-CODの変化量と比べると小さく、T-CODの変化にはP-CODの寄与が大きいことが分かる。

(2) C-Q関係

詳細に出水時の水質環境を見るために、水質濃度Cと流量Qの相関図を作成する。ここでは増水期と減水期に十分なデータ数がある出水イベントのみを抽出し、江戸川ではイベント②, ⑧, 多摩川では③, ⑥, ⑨, 荒川と中川では⑨のみとする。一例として、江戸川におけるT-P, T-Nに関するCとQの相関図を図-4に示す。図中では増水

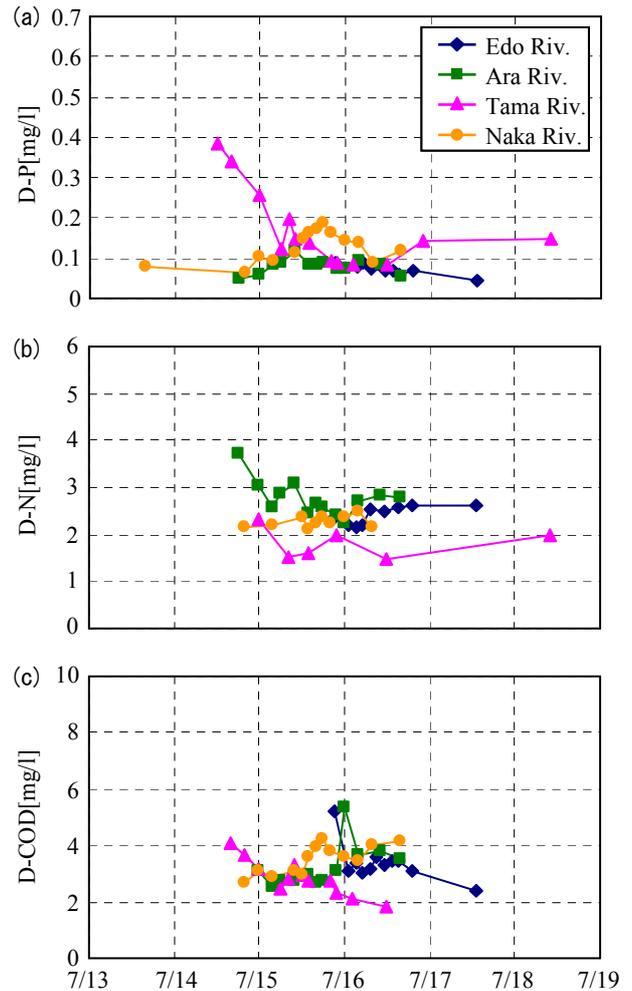


図-3 イベント⑨ (台風0704号) におけるD-P (a), D-N (b), D-COD (c) の時間変化

期と減水期を分けて表示する。これより、T-Pは流量とともに増減し、減水期より増水期の水質濃度が高く、右回りのループを描く。T-CODについても、T-Pと同じ挙動が確認された。T-Nについては、イベント⑧（冬季）ではT-Pと逆の左回りのループとなるが、出水規模が大きいイベント②（夏季）ではT-Nは一定となりループは見られず、同一河川でも出水イベントによりC-Q関係が異なる。公共用水域データより、平常時江戸川では冬季のT-Nの方が夏季よりも大きい。これより降雨による希釈効果としては、T-Nが高い冬季の方が夏季よりも顕著となり、C-Q関係が出水イベントにより異なるものと推察される。

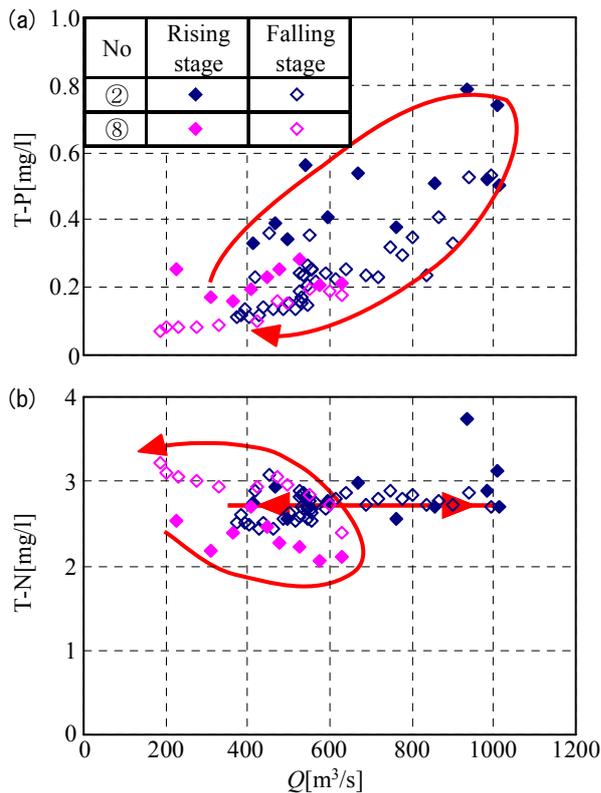


図4 江戸川におけるTP (a), TN (b) と流量の相関関係 (C-Q関係, イベント②, ⑧)

この検討を全河川のP, N, CODに関して行い、得られたC-Q関係を模式的にまとめたものを図-5に示す。ここでは、出水イベント間においてC-Q関係が異なる場合には、流量規模の大きいものを選択して表示する。T-P, T-CODのループ関係に関しては、江戸川と荒川、多摩川に関しては右回りのループとなり、それには懸濁態成分の影響が大きい。一方、中川に関しては、T-PやT-CODは流量と共に増減するものの、減水期の水質濃度の方が増水期よりも大きいという左回りのループとなる。中川の観測点は潮汐の影響が大きい感潮域に位置するため、水位ピーク前までに上流域で滞留・蓄積されたものが水位ピーク後に流送されたため、左回りのループが形成されたものと推察される。また、T-Nに関するC-Q関係については、河川毎に大きく異なっており、それにはP-Nが大きい荒川を除いて、D-Nの影響が強く反映されていることが分かる。

4. 各河川における水質負荷量の算定

(1) L-Q式の算出

汚濁負荷量を算出するために、汚濁負荷量Lと流量Qの関係式 ($L-Q$ 式, $L=aQ^b$) を求める。ここでa, bは係数である。L-Q式を算出するために、図-6のような汚濁負荷量Lと流量Qの相関図を作成する。ここでは、多摩川・T-N負荷量に関する6つの出水イベントの結果を示す。LとQの関係には、前述したC-Q関係のループの存在により多少のばらつきは見られるものの、6つの出水イベント間では顕著な差はない。両者に対して算出された相関式 (L-Q式) はプロットされている実測値と概ね一致する。そこで全4河川、全項目に関するL-Q式を算出し、得られた係数a, bをまとめたものを表-3に示す。これらのL-Q式のR²は概ね0.8以上である。このように、T-PやT-CODではb>1となるのに対して、T-Nに関しては江戸川を除いてb<1となる。これは出水時において流量増加に対する水質濃度の増減傾向と対応する。

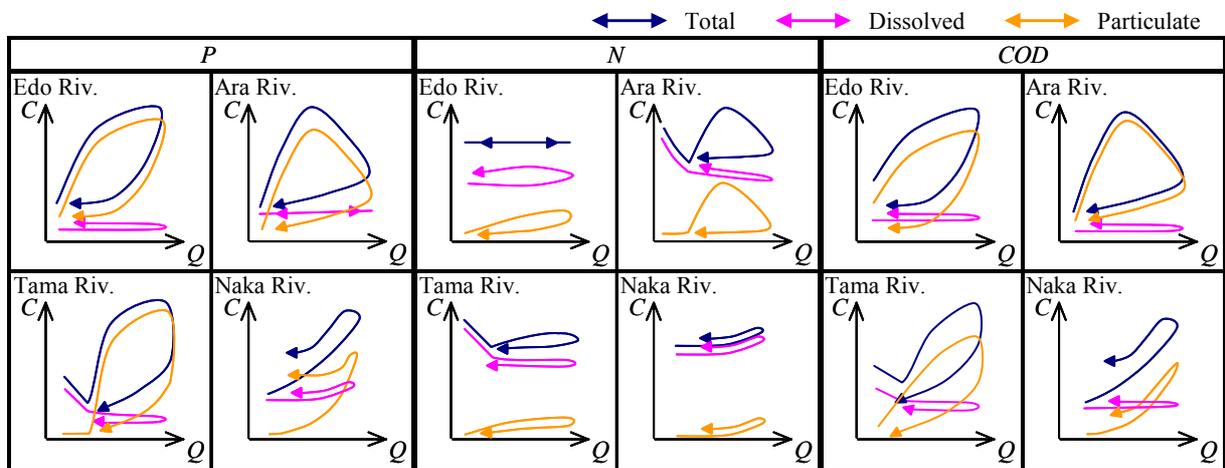


図-5 各河川におけるC-Q関係のまとめ (P, N, COD)

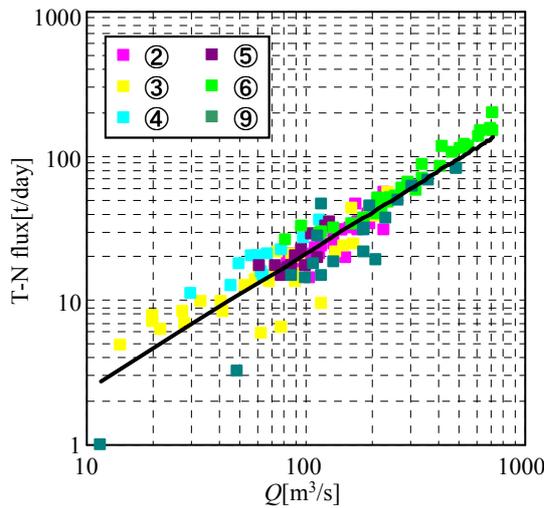


図-6 T-N fluxと流量の相関関係（多摩川，図中の数字は出水イベント番号，実線はL-Q式を各々示す）

表-3 算出されたL-Q式の係数a, b (aの単位: t/day)

		Edo Riv.	Ara Riv.	Tama Riv.	Naka Riv.
T-P	a	1.35×10^{-4}	4.67×10^{-3}	5.69×10^{-3}	1.17×10^{-2}
	b	1.79	1.30	1.26	1.10
T-N	a	8.42×10^{-2}	3.58×10^{-1}	2.80×10^{-1}	5.52×10^{-1}
	b	1.16	0.95	0.94	0.82
T-COD	a	6.63×10^{-2}	1.58×10^{-1}	6.98×10^{-2}	3.14×10^{-1}
	b	1.35	1.24	1.35	1.12

(2) 算出手順

このL-Q式を用いて水質負荷量を算出する。基本的な算出手順は二瓶ら⁶⁾と同じとし，平常時と出水時に分けて行う。平常時では，公共用水域データと流量の積を負荷量とする。出水時では，L-Q式と流量観測値から負荷量を求める。ハイドログラフより，平常時と出水時を分ける流量の閾値を江戸川では150m³/s，荒川では100m³/s，多摩川では50m³/s，中川では90 m³/sと設定した。負荷量算出地点は，各河川河口地点とし，L-Q式は上流側の観測点と河口地点では変わらないものと仮定する。負荷量算出に必要な河口流量の算出方法は，二瓶ら⁸⁾と同じとする。解析対象期間は2001～2005年である。また，出水時の取り扱いの重要性を検証するために，出水時においてL-Q式を用いず，公共用水域データのみを用いる方法により水質負荷量を算出する。そこでは，平常時の算出法を平常時・出水時と分けずに適用することで，区間代表法¹⁰⁾と見なせる。なお，L-Q式の解析結果には，C-Q関係が一意でないことによりある程度誤差が含まれ，年間値では約2割の誤差がある¹¹⁾。

(3) 負荷量算定結果

2001年～2005年における汚濁負荷量の平均値を図-7に示す。ここでは出水時と平常時の寄与を色分けして表示し，平均値に対する出水時の寄与率も表示している。流量に関しては，荒川が最も大きく，江戸川，中川，多摩川の

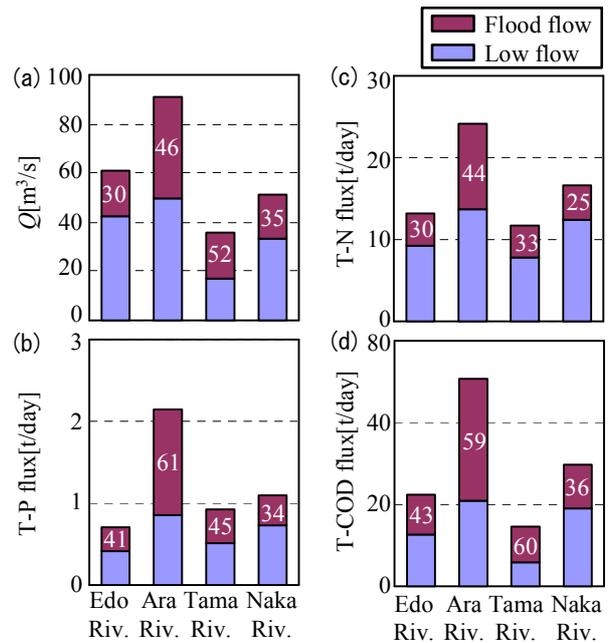
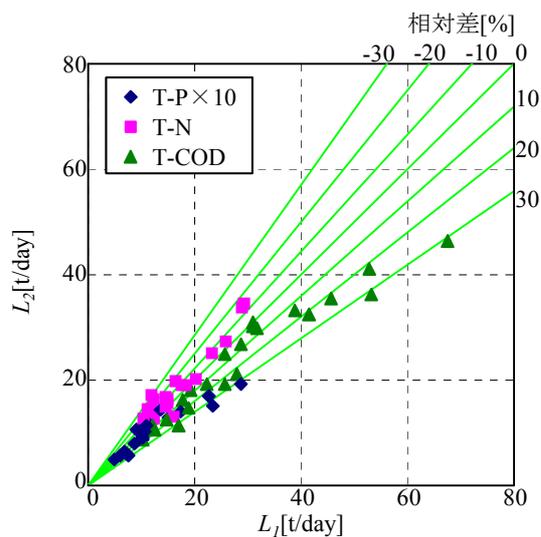


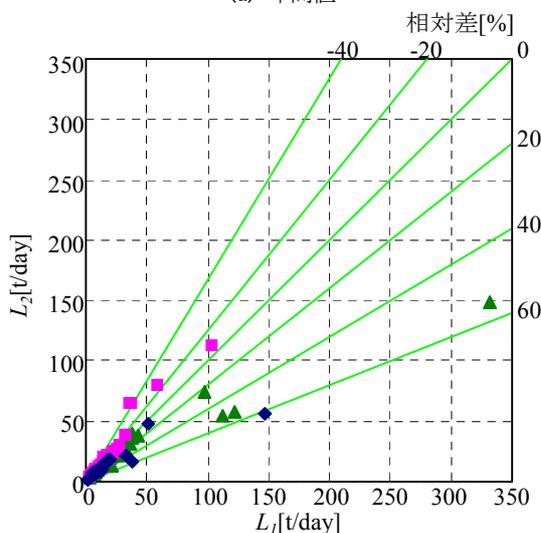
図-7 流量 (a)，T-P flux (b)，T-N flux (c)，T-COD flux (d) の年間値 (2001～2005年における平均値)

順となる。表-1より4河川の中で中川が最も流域面積が小さいが（江戸川に利根川の影響を考慮），中川の流量は多摩川よりも大きく，江戸川と同程度である。これは，江戸川や多摩川では大量に取水されるが，中川では農用水などを流域外の河川から取水するためである⁸⁾。次に汚濁負荷量としては，流量と対応して，荒川の負荷量が3項目とも最も大きい。荒川と他の河川を比較すると，平常時よりも出水時の負荷量の差が全体的に大きい。荒川における出水時負荷量に対して，懸濁態成分の寄与が大きい。その他3河川の負荷量としては，流量が江戸川よりも小さい中川の負荷量が多い。中川に関しては，出水時より平常時の寄与が大きく，平常時の水質環境の違いが負荷量の違いとなる。また，多摩川と江戸川の結果を比べると，T-CODでは江戸川，T-Pでは多摩川が各々相対的に大きく，T-Nでは両者は同程度である。この理由としては，下水道整備率が90%を超える多摩川では有機汚濁の削減が進んでいるが，NやPまでは十分削減されていないためである⁶⁾。一方，全河川，全項目において，全負荷量に対する出水時の寄与率は高い。項目別には，T-Pは34～61%，T-Nは25～44%，T-CODは36～60%である。このようにT-PやT-CODにおいて出水時の寄与率がT-Nよりも相対的に大きいのは，図-2で論じた出水時の水質変動特性や，L-Q中の係数bの大きさと対応している。

図-8は，L-Q式を用いて出水時負荷量を評価する場合（本論文採用）と，用いないで平常時の公共用水域データのみで評価する場合（区間代表法）の結果を比較している。ここでは，汚濁負荷量の年間値（2001年から2005年まで）と月間値（2004年のみ対象）について，全河川・全項目の結果を合わせて図示している。また図中には，相対差を表す実線を表示している。これより，L-Q式を用



(a) 年間値



(b) 月間値

図-8 $L-Q$ 式を用いる時の汚濁負荷量 L_1 (本論文) と $L-Q$ 式を用いない場合 (区間代表法) の負荷量 L_2 の比較

いない区間代表法の場合には、全般的に、T-P、T-COD負荷量に関しては過小評価、T-Nに関しては過大評価をする傾向が見られる。相対差は、全般的には負荷量が増える傾向があり、最大で年間値では30%、月間値で75%となっている。このように、全負荷量に対する寄与率の高い出水時負荷量について $L-Q$ 式を用いずに平常時水質データのみで表すと、負荷量算定誤差は大きく、その傾向は月間負荷量に顕著である。

5. おわりに

本研究では、多くの観測結果から江戸川、荒川、多摩川、中川の汚濁負荷量に関する以下の知見が得られた。

1) 出水時の流量と水質濃度にはヒステリシスが存在し、そのヒステリシスが河川間、水質項目間で異なる。T-PやT-CODに関しては中川と他の河川で逆向きのループとな

り、T-Nに関しては河川毎にばらつく傾向が見られた。

2) $L-Q$ 式を算出した結果、懸濁態成分の影響が強いT-PやT-CODに関しては係数 b が1以上、溶存態成分の寄与が大きいT-Nに関しては b は1以下となる傾向がある。

3) 汚濁負荷量を算定したところ、4河川の中では荒川が最も大きく、次いで中川の負荷量が多い。これには、荒川では出水時、中川では平常時の寄与が大きい。

4) 全負荷量への出水寄与はT-Pは34~61%、T-Nは25~44%、T-CODは36~60%となり出水時の寄与率は高い。

5) $L-Q$ 式を用いない方法による負荷量算定結果は、 $L-Q$ 式を用いた時と比べて、最大で年間値では30%、月間値では75%の相対差が生じ、出水時負荷量評価に平常時水質データをそのまま用いることには大きな問題がある。

今後は河口観測点を設けて類似の観測を行い、東京湾へ流入する汚濁負荷量をより正確に算出する必要がある。

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、水資源機構・利根導水総合管理所、東京都水道局には流量をご提供して頂くと共に、現地観測実施にご協力頂いた。多摩川調査の一部は、国土交通省関東地方整備局「羽田周辺水域環境調査研究委員会」として行われた。公共用水域データとしては、国立環境研究所「環境数値データベース」より収集した。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) 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) 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.
- 4) 海老瀬啓一:汚濁物質の降雨流出負荷量, 水質汚濁研究, Vol8, No.8, pp.499-504, 1985.
- 5) 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, Vol34, No.2, pp.111-117, 1997.
- 6) 二瓶泰雄, 江原圭介, 白田美穂, 坂井文子, 重田京助:江戸川・荒川・多摩川における水質環境と流入負荷特性, 海岸工学論文集, Vol54, pp.1226-1230, 2007.
- 7) 日本工業標準調査会:工場排水試験方法 JIS K0102, 日本規格協会, pp.163-174, 1998.
- 8) 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, Vol54, pp.1221-1225, 2007.
- 9) 恩田裕一, 奥西一夫, 飯田智之, 辻村真貴(編):水文地形学—山地の水循環と地形変化の相互作用—, 古今書院, pp.132-142, 1996.
- 10) 武田育郎:水と水質環境の基礎知識, オーム社, pp.163-164, 2001.
- 11) 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法に関する検討—江戸川を例にして—, 海岸工学論文集, Vol.52, pp.1106-1110, 2005.

(2007. 9. 30 受付)