<論 文>

手賀沼流入河川における汚濁負荷量の流出特性 および年間負荷量の把握

高 島 英二郎*

田 中 宏 明*

中 村 栄 一**

Characteristics of Runoff Pollutant Loadings and Their Annual Estimation in the Rivers Flowing into Lake Teganuma

Eijiro TAKASHIMA*, Hiroaki TANAKA* and Eiichi NAKAMURA**

* Public Works Research Institute, Ministry of Construction, Asahi 1, Tsukuba-shi, Ibaraki 305 Japan

** Sewerage Planning Division, Shiga Prefectural Government, Kyomachi 4-1-1, Ohtsu-shi, Shiga 520 Japan

Abstract

The Ohhori and Ohtsu Rivers are the two major rivers flowing into Lake Teganuma. To gain an understanding of SS, BOD, COD, nitrogen and phosphorus loads flowing into the lake, pollutant loadings were observed at downstream points of the two rivers. According to the runoff characteristics of the observed pollutant loadings, pollutant load could be separated into "dry weather load" and "wet weather load". The wet weather load is caused by direct runoff of rainfall and could be represented by a regression equation using depth of runoff, antecedent precipitation factor and peak rainfall intensity as independent variables. As a result of annual pollutant load estimation, the ratio of annual wet weather load to annual total (dry+wet) was about 70 percent for SS, about 30 percent for BOD and COD, and 10-20 percent for T-N and T-P. Moreover, the ratios between dissolved and particulate constituents in dry and wet weather loads for COD, T-N and T-P were clarified. Furthermore, the runoff characteristics of constituents of T-N, i.e., nitrite, nitrate and so on, were investigated.

Key words: Lake Teganuma, pollutant load, dry weather, wet weather, runoff

1. はじめに

生活環境の保全に関する環境基準の達成状況は、河川については達成率が改善してきているが、湖沼については依然として低い達成率で推移している¹⁾。効果的な湖沼の水質改善対策を選択するためには、正確な汚濁解析が必要であり、このためには湖沼への流入汚濁負荷量を正確にとらえる必要がある²⁾。

汚濁負荷量の流出特性は、降雨時と無降雨時とで非常に異なり、降雨時には河道や流域での堆積や緑農地への施肥などにより残存していた汚濁物が洗い出され

るため、流出汚濁負荷量が大きくなる。また、土壌の侵食等により流出する汚濁負荷量もある。

このため、汚濁物が蓄積する湖沼等閉鎖性水域への流入負荷量については、降雨時も含めた長期間の累積流入負荷量を把握する必要がある³⁾。

本論文は、千葉県にある手賀沼の主要な流入河川である、大堀川と大津川の下流地点で実施された汚濁負荷量調査を基に、調査地点上流域からの浮遊物質質量(SS)、生物化学的酸素消費量(BOD)、過マンガン酸カリウムによる酸素消費量(COD)、窒素、リンの流出特性を明らかにするとともに、年間流出汚濁負荷量の

* 建設省土木研究所 〒305 茨城県つくば市大字旭1番地

** 滋賀県土木部下水道計画課 〒520 滋賀県大津市京町4-1-1

Table 1 Land use and population in the Ohhori and Ohtsu watersheds (1990)

	Area in watershed (km^2)					Population (persons)	Population density (persons $\cdot\text{km}^{-2}$)
	Residential, Business	Paddy field	Farming field	Forest, Other	Total		
Ohhori River	17.62 (56%)	0.80 (3%)	4.17 (13%)	8.87 (28%)	31.46 (100%)	172,660	5,488
Ohtsu River	17.62 (48%)	2.39 (6%)	8.40 (23%)	8.28 (23%)	36.69 (100%)	191,030	5,207

Fig. 1 Lake Teganuma, Ohhori River, Ohtsu River, their watersheds, and observation points

推定を行ったものである。また、溶解性と粒子性の別、窒素についてはアンモニウム態、硝酸態等の形態の違いにも注目して、汚濁物の流出特性を明らかにした。

2. 河川の特徴および調査方法

2.1 調査河川の特徴

1986年度から1990年度の5年間に、大堀川と大津川の下流地点（呼塚橋と中の橋）において流量観測と採水を実施した。大堀川と大津川の流域面積は31.46 km^2 と36.69 km^2 であり⁴⁾、手賀沼（下手賀沼、手賀川は含めない）の流域面積のそれぞれ34%と40%を占めている（Fig. 1）。ただし、大堀川の呼塚橋上流域は29.83 km^2 、大津川の中の橋上流域は31.64 km^2 である。大堀川の流域は柏市と流山市、大津川の流域は柏市、沼南町、松戸市、鎌ヶ谷市にまたがっており、いずれも東京近郊の人口増加地域である。両河川流域の土地利用状況および人口は、千葉県および関係市町の資料によるとTable 1の通りである。両河川流域ともに市街地の割合が半分程度と高く、農地の割合は大津川流域の方が高い状況である。

また、流域内の污水排出形態別の人口、家畜頭数な

Fig. 2 Total population and population using sewerage in the Ohhori River watershed

どの統計資料と、汚濁負荷量原単位の既存調査データ、特定事業場の排水データから総排出汚濁負荷量を計算した結果から、大堀川流域、大津川流域ともに1986年度から1990年度にかけて総排出汚濁負荷量はほぼ一定であり、その多くの部分は生活排水による汚濁負荷量であった⁵⁾。手賀沼流域では、流域内人口が著しく増加しているが、流域下水道を中心とする下水道整備が進められており、総排出汚濁負荷量は5年間ほぼ一定であった。Fig. 2に大堀川流域における人口と下水道による水洗化人口の推移を示すが、下水道未使用人口が変化していないことがわかる。この傾向は大津川についても同様であった。なお、手賀沼流域下水道は手賀沼流域の廃水を手賀沼下流の処理場まで運び、処理水を利根川に放流している。

2.2 調査方法

流量観測は、調査地点（Fig. 1参照）に自記式水位計を設置し15分間隔の記録をとるとともに、流量の実測を行うことにより作成した水位-流量曲線を用いて、継続的に流量データを得た。

採水は自動採水器を調査地点に設置し、降雨とその前後の期間について、負荷量の変化をとらえるべく連続的な採水を行った（連続調査）。採水の時間間隔は、降雨初期の水質変動が比較的激しい間は15分～30分間隔、降雨の中～後期は30分から2時間間隔とするなどの方法で設定した。5年間で、大堀川21降雨、大津川

17降雨を連続調査によってとらえた。これとは別に、主に無降雨時の日負荷量を求めるため、1時間間隔で採水し、1日のコンポジットサンプルとして水質分析を行う調査(コンポジット調査)も計70日について行った。

水質分析項目は、SS, BOD, COD, 溶解性COD(D-COD), ケルダール窒素(K-N), 溶解性ケルダール窒素(D-K-N), アンモニウム態窒素($\text{NH}_4\text{-N}$), 亜硝酸態窒素($\text{NO}_2\text{-N}$), 硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$), 全リン(T-P), 溶解性リン(D-P), 溶解性リン酸態リン(D- $\text{PO}_4\text{-P}$)である。分析方法は、SSについては昭和46年環境庁告示第59号, BODおよびCODについてはJIS K 0102の21および17によった。溶解性については、孔径1 μm のガラス繊維濾紙で濾過した試料を分析したものである。 $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, D- $\text{PO}_4\text{-P}$ については、濾過後の試料を standard methods の自動分析法により, K-N, T-P については、試料を流酸一過塩素酸分解後, standard methods の自動分析法により分析した。また, $\text{NO}_2\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ の和を $\text{NO}_x\text{-N}$ と表示することとし, 全窒素(T-N)はK-Nと $\text{NO}_x\text{-N}$ の和により, 溶解性窒素(D-N)はD-K-Nと $\text{NO}_x\text{-N}$ の和により求めた。

雨量は、柏市役所、千葉国道工事事務所柏出張所、藤ヶ谷地点の3カ所の観測地点(Fig. 1 参照)における1時間毎の観測データを用い、ティーセン法⁹⁾により地点ごとの雨量データの重み付けをして、流域内平均雨量を計算した。

3. 結果および考察

3.1 降雨時の汚濁負荷量の流出特性

Fig. 3 に連続調査結果の一例として、大堀川における1988年8月10日～21日における結果を示す。この期間には、3回に分けられる降雨が含まれている。このうち1回目の総降雨量は130mmであり、この降雨は調査を行ったすべての降雨の中でも最大のものであった。Fig. 3 には雨量($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)、流量($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)、および、SS, BOD, CODとD-COD, T-Nと $\text{NO}_x\text{-N}$, D-Nと $\text{NO}_x\text{-N}$, T-PとD-Pの負荷量($\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$)についての時間変化のグラフを示す。 $\text{NO}_2\text{-N}$ については $\text{NO}_3\text{-N}$ や $\text{NH}_4\text{-N}$ に比べてかなり小さかったため、 $\text{NO}_3\text{-N}$ と合わせて $\text{NO}_x\text{-N}$ として解析を行った。D- $\text{PO}_4\text{-P}$ は、多くの場合D-Pとかなり近い値をとっていた。

Fig. 3 から、降雨時の汚濁負荷量の特性について以下のことが分かる。

①降雨流出による流量の増加とともに、SS, BOD, COD, T-N, T-P 等の負荷量も増加を示し、降雨の流

Fig. 3 Observed rainfall, flow and loadings in the Ohhori River (Aug. 1988)

出期間とそれ以外の無降雨時では、明らかに汚濁負荷量の流出特性が異なる。

②雨量・流量のピークに汚濁負荷量も敏感に反応した。

③SSの降雨時負荷量について、対流量比としての大きさで見ると、2回目、3回目の降雨時にはその大きさが次第に小さくなっていく様子が見られる。これは、流域に流出しやすい形で残存する粒子状物質が降雨により流出し、その後しばらくの間少なくなるためと考えられる。

④SS, BOD, COD, T-Pの降雨時負荷量の流出に比べて、T-Nについては負荷量の増加している時間が長引く傾向がある。これは、 $\text{NO}_x\text{-N}$ がやや遅れて流出してきたためである。

⑤降雨流出時の溶解性成分の割合は、T-Nで大きく、T-Pでは極めて小さかった。

⑥T-Nの内訳は、降雨時の前半にはK-N(T-Nと $\text{NO}_x\text{-N}$ の差)が多く、後半では $\text{NO}_x\text{-N}$ が多くを占めた。

これらの特性は、大津川についても同様であった。

降雨流出は、地表を流れて河川に流出する表面流出、いったん地中に浸透し表面流出より遅れて河川に流出する中間流出、および地中に浸透して地下水となり徐々に河川に流出する地下水流出とがある^{7),8)}。また、表面流出と早い中間流出を合わせて直接流出という^{7),8)}。直接流出により汚濁負荷量も増加するのは、汚濁物のうち、河道・水路に堆積していたもの、道路・緑農地等の面源負荷として存在していたもの(以下、これらを「流域に残存していた汚濁物」と表現する)が洗い出され流出するためである。

K-Nは直接流出の前半に流出する分が多いことから、K-Nは表面流出で多くが流出するが、 $\text{NO}_x\text{-N}$ についてはやや遅れて流出する分が多いことから、 $\text{NO}_x\text{-N}$ は、流域の各地点からの流下時間の違いを考慮しても、中間流出によって多くが流出することが推測される。降雨流出時において、硝酸イオンが流量ピークより遅れて大きく流出すること、それが土壌層から中間流出によって硝酸イオンが高濃度で排出されることに起因することは、他の文献^{9),10)}においても指摘されている。

無降雨時の汚濁負荷量については幾分かの変動が見られるが、降雨時の変動と比べれば、平均にならして扱って差し支えないものと考えられる。

3.2 降雨時流出負荷量の分離方法

河川の流出汚濁負荷量はFig. 4のように2つに分離して扱うことが合理的である。1つは降雨時、無降雨時を問わず流れている、流域からの排水、および地

Fig. 4 Separation of wet weather load from dry weather load (T-N loading in the Ohtsu River)

下水流出を主とする間接流出による汚濁負荷量であり、これを「平常時負荷量」と定義する。もう1つは、降雨の直接流出により平常時負荷量に上乘せされる分であり、これを「降雨時流出負荷量」と定義する。

なお、降雨時と無降雨時の汚濁負荷量の分離方法については山口・吉川の文献¹¹⁾にも述べられており、もう1つの分離方法として降雨流出時とそれ以外の時に分ける方法がある。本論文においては、平常時負荷量に降雨時流出負荷量が上乘せされるという考え方をとっており、この方法は、後述する年間流出汚濁負荷量の算出時に、降雨時流出の流出時間を推定する手間がかからないという長所を持っている。

平常時負荷量は、流域からの排水量の変動の影響を受け、24時間周期の変動が大きいので、この影響をなくすため、1日当たりの量として扱うこととした。降雨による直接流出のない日の調査データを用い、連続調査結果による汚濁負荷量の1日分の累積、またはコンボジット調査結果の1日の平均水質と日流量から、平常時負荷量を求めた。

降雨時流出負荷量は、Fig. 4に示したように、降雨の直接流出を含んだ24時間の整数倍の期間の総負荷量から、その日数分の平常時負荷量を引くことによって求め、1降雨ごとの単位で取り扱った。この差し引くための平常時負荷量は、流域からの汚濁負荷排出状況の変化等に伴い、時期によって変化するため、対象とする降雨の前後の時期における1日当たり平常時負荷量の平均値として設定した。

3.3 平常時負荷量等について

大堀川と大津川の調査地点における平常時流量と平常時負荷量の平均、標準偏差、変動係数(標準偏差/平均)、データ数(5年間での調査日数)をTable 2に示す。なお、5年間の平常時負荷量データを時系列的に見た結果、時期による変動はあるがおおむね横ばいの

Table 2 Flows and pollutant loads on dry weather day at the Ohhori and Ohtsu River observation points (1986~1990)

(m ³ ・d ⁻¹)		L o a d (kg・d ⁻¹)													
	Flow	SS	BOD	COD	T-N	T-P	D-COD	D-N	NO _x N	NO ₂ N	NH ₄ N	K-N	DKN	D-P	DPO ₄ P
O h h o r i R i v e r															
Mean	93320	1277	857	1025	723	147	703	608	155	38	354	566	456	111	108
S. D.	30002	644	324	260	160	70	178	150	115	22	123	190	180	60	58
C. V.	0.32	0.50	0.38	0.25	0.22	0.47	0.25	0.25	0.74	0.58	0.35	0.34	0.40	0.54	0.54
n	76	70	76	76	65	68	61	58	61	56	58	51	53	61	60
O h t s u R i v e r															
Mean	96874	1552	1054	1150	725	81	705	606	211	39	310	494	397	54	53
S. D.	31583	1292	626	508	225	35	178	187	141	17	125	168	134	22	25
C. V.	0.33	0.83	0.59	0.44	0.31	0.43	0.25	0.31	0.67	0.44	0.40	0.34	0.34	0.40	0.47
n	66	66	66	66	63	66	56	55	56	54	55	52	55	56	54

S. D. : Standard deviation C. V. : Coefficient of variation n : Number of data
 NO_x=NO₂+NO₃

状況であった。

Table 2 から、平常時の流量と負荷量について以下のようなことを読みとることができる。

① COD, T-N, T-P に占める溶解性成分の割合は 6 割以上であった。特に T-N については溶解性成分の割合が高く、大堀川、大津川ともに 84% を占めた。

② T-N のうち、半分近くは NH₄-N であり、NO_x-N は 2~3 割であった。

③ 流量の変動係数が 0.32~0.33 であったのに比べて、負荷量の変動係数は T-N, D-N, D-COD については大堀川、大津川ともにこれより小さかった。つまり、溶解性の COD と窒素、および全窒素の負荷量の変動は、流量の変動より安定していた。D-N の構成成分である NO_x-N, NH₄-N 等の変動係数は流量の変動係数より大きかったが、窒素の溶解性成分全体としての D-N では変動は小さかった。一方、溶解性リンの負荷量についての変動係数は、流量の変動係数より大きかった。

3.4 降雨時流出負荷量についての解析

3.4.1 比流出負荷量と流出高の関係

5 年間の調査結果から求めた降雨時流出負荷量について解析を行った。1 降雨ごとの比流出負荷量と流出高の関係を、大堀川について Fig. 5 に、大津川について Fig. 6 に示す。

比流出負荷量は降雨時流出負荷量を流域面積で割ったものである。流出高は、降雨の直接流出量を降雨時流出負荷量と同様に、直接流出を含んだ期間の総流量から同期間の平常時流量を引くことにより求め、これを流域面積で割ったものである。すなわち、Fig. 5 および Fig. 6 は、降雨時流出負荷量と降雨の直接流出量の

関係を、両者とも流域面積で割って普遍化したものである。ここで用いた流域面積は調査地点の上流域分である。

これらから、COD, D-COD, T-N, D-N, NO_x-N, T-P についての比流出負荷量は流出高と正の相関を示すこと、COD のうち D-COD の割合は小さいことなどが分かる。また、SS, BOD についても同様に正の相関を示した。

また、3.1 で述べたように、窒素の降雨時流出負荷量の多くの部分は溶解性であり、さらにその多くの部分は NO_x-N であることが Fig. 5, Fig. 6 から確認される。

一方、NH₄-N および D-P の降雨時流出負荷量については、流出高との相関は見られず、0 の付近でばらついている。このため、NH₄-N と D-P の降雨時流出負荷量は平常時負荷量と比べると無視できる程度とみなせる。平常時負荷量は日によってかなり変動する場合があったが、短い調査期間でのデータから平常時負荷量を設定したことが、NH₄-N と D-P でマイナスの比流出負荷量となったものがあるなどの原因になっていると考えられる。また、一定にならした平常時負荷量に降雨時流出負荷量が上乗せになるという形だけではとらえることのできない汚濁負荷量の変動も細かく見た場合にはあるため、このこともばらつきの原因になっていると考えられる。

3.4.2 比流出負荷量の回帰分析

1 降雨当たりの比流出負荷量についての回帰分析を、流出高を説明変数とする回帰直線

$$L = a \cdot R_t + d \quad (1)$$

L : 比流出負荷量 (kg・km⁻²)

Fig. 5 Relationship between specific load and depth of runoff in the Ohhori River (Specific load is calculated based on a cumulative wet weather load during a single rainfall event)

R_f : 流出高 (mm)
を与えて行った結果とその決定係数(R^2)を Table 3 の左側に示す。D-P と $\text{NH}_4\text{-N}$ の降雨時流出負荷量は 3.4.1 で述べたように流出高にかかわらずほぼ 0 とみなせたことから、Table 3 には示していない。
1 降雨当たりの降雨時流出負荷量は、その降雨の直

Fig. 6 Relationship between specific load and depth of runoff in the Ohtsu River (Specific load is calculated based on a cumulative wet weather load during a single rainfall event)

接流出の総流量 (流域面積で割れば流出高) に左右されることはもちろんであるが、その降雨までに流域に残存していた汚濁物の量の条件 (残存条件) および洗い出し作用の強さにも影響されるはずである。
この残存条件を、次式で表す先行降雨係数 APF (Antecedent Precipitation Factor) を指標として簡便

Table 3 The coefficients of regression equations (1) and (3), and the coefficients of determination (R^2)

		(1) $L = a \cdot R_t + d$			(3) $L = a \cdot R_t + b \cdot APF + c \cdot R_p + d$				
		a	d	(R^2)	a	b	c	d	(R^2)
Ohhori River	SS	86.6	84.3	(0.91)	65.2	-11.8	39.4	56.5	(0.94)
	BOD	8.55	12.9	(0.79)	6.18	-2.32	3.99	28.0	(0.84)
	COD	13.0	17.8	(0.83)	9.03	-3.24	6.87	31.8	(0.89)
	T-N	3.88	-1.26	(0.94)		—			(0.94)
	T-P	0.597	1.12	(0.82)	0.454	-0.084	0.260	1.02	(0.85)
	D-COD	3.67	-0.39	(0.96)		—			(0.96)
	D-N	2.60	0.86	(0.91)		—			(0.92)
	NO _x -N	2.01	-0.96	(0.87)	2.38	0.38	-0.59	-4.11	(0.90)
	K-N	1.87	1.15	(0.86)		—			(0.87)
Ohtsu River	SS	122.9	-62.6	(0.73)	72.2	-24.0	64.8	18.8	(0.80)
	BOD	11.0	13.7	(0.74)	5.88	-3.95	5.76	48.8	(0.85)
	COD	15.1	24.9	(0.71)	5.89	-5.90	11.1	66.6	(0.87)
	T-N	3.28	9.20	(0.91)	2.42	-0.30	1.15	8.69	(0.95)
	T-P	0.442	1.21	(0.69)	0.114	-0.176	0.409	2.10	(0.92)
	D-COD	2.33	6.44	(0.87)		—			(0.88)
	D-N	2.31	0.97	(0.84)	2.86	0.43	-0.70	-2.70	(0.87)
	NO _x -N	1.61	3.85	(0.93)	1.74	0.33	-0.02	-1.52	(0.95)
	K-N	1.66	4.78	(0.76)	0.74	-0.56	1.10	8.85	(0.90)

L: Specific load ($\text{kg} \cdot \text{km}^{-2}$) R_t : Depth of runoff (mm)APF: Antecedent precipitation factor (mm) R_p : Peak rainfall intensity ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

に表現することとした¹²⁾。

$$APF = \sum_{t=1}^k (R_t/t) \quad (2)$$

R_t : t 日前の日雨量 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)

すなわち, APF が大きいほど対象とする降雨に先行して多くの降雨があり, 汚濁物の残存量が少なくなっていることになる。また, 降雨による汚濁物の流出の後は再び堆積が起こることを考慮して, 対象降雨から大きく先行する日の降雨の影響は小さくなるものとしてある。

次に, 洗い出し作用の強さを表す簡易な指標として, 降雨の強度を表す指標としてピーク降雨強度 (時間雨量のピーク) R_p ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) を用いた。

これら 2 つの指標を説明変数に加えて, 比流出負荷量の重回帰分析を次式により行った¹²⁾。

$$L = a \cdot R_t + b \cdot APF + c \cdot R_p + d \quad (3)$$

APF の k 値, すなわち何日前までの雨量を考慮するかは, 重回帰分析の結果, 大堀川で $k=9$, 大津川で $k=10$ で最も高い決定係数 (R^2) が得られたことから, それらの値を採用した。なお, 決定係数 (R^2) とは, 変量 (この場合は L) の全変化のうち回帰方程式によって説明される部分の割合を示す¹³⁾。

また, 洗い出し作用の強さの指標としてピーク降雨強度 R_p ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) を使ったが, その代わりに平均時間雨量 ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) を使った重回帰分析も行ってみた結

果, ピーク降雨強度を採用した方が高い R^2 が得られた。このことは, 平均的な降雨強度の効果より, 一時的にでも強い降雨をきっかけとして大きく汚濁負荷量が流出することを示唆している。

式(3)による重回帰分析の結果を Table 3 の右側に示す。ただし, 式(1)に比べて R^2 の上昇幅が小さかったものについては, 式(3)の係数を示していない。

Table 3 に示したように説明変数が R_t のみの場合でも高い R^2 が得られたが, 説明変数を R_t , APF, R_p の 3 つにした場合はほとんどの項目でさらに R^2 が高くなっている。ただし, T-N と溶解性成分については APF と R_p の効果が小さい。これは, 残存条件と洗い出し作用の強さが効くのは主に粒子性成分であり, 溶解性成分についてはこれらの効果が小さいこと, および, T-N は溶解性成分の割合が高いことによる。

ところで, APF が大きいほど流域に残存する汚濁物の量は少なくなっているため, 残存条件としての APF の係数 b はマイナスの値となるはずであるが, NO_x-N と D-N についてはプラスの値となっている。これは, NO_x-N については先行降雨により流域に残存する量が減る影響は小さく, むしろ先行降雨によって流出しやすい状況になることを示している。これについては, 面源負荷として存在する窒素の分解・硝化・溶脱が先行する降雨によって進められ, 中間流出によって流出

Fig. 7 Comparison of calculated data of specific load with observed data through equation (1) and (3) (COD in the Ohtsu River)
□ equation(1) + equation(3)

しやすくなること、また、硝酸態窒素については遅い中間流出成分による影響が比較的長期間持続することが、理由として考えられる^{14),15)}。

また、比流出負荷量の実測値と、回帰式による計算値との比較で、説明変数が R_f のみの場合 (式(1)) と、説明変数を R_f , APF, R_p の3つにした場合 (式(3)) とを比較した例が Fig. 7 である。Fig. 7 から、式(3)の方が計算値=実測値の線に近づいており、精度良く1降雨ごとの比流出負荷量を表現できていることが分かる。

3.4.3 大堀川と大津川の比較

Table 3 から分かるように、大堀川より大津川の方が、比流出負荷量に対する APF と R_p の効果が大きかった。(APF と R_p の係数 b , c が大きいとともに、これらを説明変数に加えたときの R^2 の上昇幅が大きかった。)すなわち、残存条件と洗い出し作用の強さの効果が大津川の方が大きかった。これは、大津川流域の方が大堀川流域に比べて市街地面積の割合が小さく、農地面積割合が大きかったことによるものと推測される。つまり大津川流域の方が、水路等への堆積量や農地への汚濁物の残存量が多いため、先行降雨によるその残存物の減少の効果が大きいとともに、洗い出し作用の強さの効果も大きかったと推測される。

3.5 年間流出汚濁負荷量等の算出

大堀川の呼塚橋、大津川の中の橋の上流域から流出する年間汚濁負荷量を次のように算出した。年間平常時負荷量は Table 2 の平均日負荷量を365倍して求めた。年間降雨時流出負荷量は1989年の雨量データ、雨量と流出高の相関式、および Table 3 の重回帰式を用

Fig. 8 Relationship between depth of runoff and rainfall

い、1回ずつの降雨から計算して1年分を合計して求めた。

雨量と流出高の相関関係は、5年間の調査結果から、Fig. 8 のようになった。大津川については1本の直線で表したが、大堀川については雨量が大きくなると降雨の浸透する割合が小さくなる傾向が見られたため、雨量38mmを境に勾配を変えて表現した。

年間流量については、平常時流量は Table 2 の平均日流量を365倍し、降雨の直接流出量は、1989年の雨量データと Fig. 8 の相関関係から求めた流出高に流域面積をかけて求めた流量を積算した。

なお、1989年の年間降水量は大堀川流域で1,751mm、大津川流域で1,576mmであった。年間負荷量の算出結果を Table 4 に示す。

Table 4 から、次のようなことが分かる。

①年間負荷量に占める平常時負荷量の割合は、SS では3割と低かったが、BOD, COD では7割、T-N, T-P では8~9割と高かった。これは、SSについては降雨時の土壌の流出が非常に大きいためであり、その他の項目で平常時分が大きいのは、大堀川、大津川においては生活排水による汚濁負荷量が非常に大きいためであると考えられる。このため、現状では平常時負荷量に対応した汚濁削減対策が重要である。

② COD, T-N, T-P に占める溶解性成分の割合は、

Table 4 Estimated annual flows and pollutant loads at the Ohhori and Ohtsu River observation points (1989)

	($\times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{y}^{-1}$)	L o a d ($\text{t} \cdot \text{y}^{-1}$)														
	Flow	SS	BOD	COD	DCOD	D-ratio	T-N	D-N	D-ratio	NO _x -N	K-N	DKN	NH ₄ -N	T-P	D-P	D-ratio
O h h o r i R i v e r																
Dry weather	34062 (76)	466 (31)	313 (72)	374 (68)	257 (87)	(69)	264 (87)	222 (88)	(84)	56.7 (74)	207 (90)	167 (94)	129	53.6 (87)	40.7	(76)
Wet weather	10841 (24)	1042 (69)	122 (28)	176 (32)	39 (13)	(22)	40 (13)	30 (12)	(75)	20.0 (26)	22 (10)	10 (6)	0	8.2 (13)	0	(0)
T o t a l	44903	1508	435	550	296	(54)	304	252	(83)	76.7	229	177	129	61.8	40.7	(66)
O h t s u R i v e r																
Dry weather	35359 (76)	566 (32)	385 (71)	420 (66)	258 (87)	(61)	265 (84)	221 (89)	(83)	76.9 (75)	180 (87)	145 (98)	113	29.7 (81)	19.7	(66)
Wet weather	11267 (24)	1225 (68)	158 (29)	220 (34)	38 (13)	(17)	51 (16)	28 (11)	(54)	25.4 (25)	28 (13)	3 (2)	0	6.9 (19)	0	(0)
T o t a l	46626	1791	543	640	296	(46)	316	249	(79)	102.3	208	148	113	36.6	19.7	(54)

() : each ratio (%)

NO_x=NO₂+NO₃

平常時ではそれぞれ6～7割、8割強、約7割と溶解性成分が多かった。降雨時流出分については、CODで溶解性成分が約2割、T-Nで溶解性成分が6～7割程度であったが、T-Pではほぼすべて粒子性であり、項目により溶解性成分と粒子性成分の比率が大きく異なった。

窒素の降雨時流出分について溶解性成分が多いのは、流域に残存している窒素は分解・硝化により最終的にNO₃-Nになるが、硝酸イオンは土壤に吸着されにくいことである^{14),16)}。リンについては流域に残存している有機態のものがリン酸に分解されたとしても、土壤粒子に吸着され易いため^{14),16)}、降雨時流出分がほぼすべて粒子性となるものと考えられる。

③ T-Nの内訳について、平常時分についてはK-Nは7～8割、NH₄-Nは半分近くを占めた。一方、降雨時流出分については、K-Nは半分強を占めたがNH₄-Nは無視できる程度であった。降雨時流出分のNH₄-Nが無視できる程度であったのは、流域内で有機態窒素の分解によりNH₄-Nが生成してもすみやかに硝化されたか、または、NH₄-Nが土壤に吸着¹⁴⁾されていたことが、理由として考えられる。

④ T-Nの内訳のNO_x-Nについては、平常時分では2～3割であったが、降雨時流出分では5割を占めた。このことと、3.1で述べた、降雨時流出分のNO_x-Nは中間流出で多くが流出した事実、および3.4.2で述べた、先行降雨がNO_x-Nの流出を促進する方向に働いた事実を合わせて考えると、降雨時流出分のNO_x-Nについては、緑農地の窒素肥料などの面源負荷として存在する窒素が硝化して地中に溶脱したものが多くを

占めることが推測される。

4. ま と め

1) 河川の流出汚濁負荷量を、流域からの排水、および地下水流出等の間接流出による汚濁負荷量である「平常時負荷量」と、降雨の直接流出に伴って増加する負荷量である「降雨時流出負荷量」の2つに区分してとらえた。降雨時流出負荷量は雨量の規模等により大きく変化したため、1降雨ごとの量として取り扱うことにした。これに比べれば平常時負荷量の変動は小さかったため、日量の平均値によって平常時負荷量を表現した。

本論文で調査対象とした大堀川、大津川は、流域面積が小規模で、流域内の市街地の割合が高い都市河川であった。流域面積が大規模であるなど、今回の調査河川と特性が異なる河川について、本論文で述べた解析方法が適用できるかどうかについては別途検討が必要であろう。

2) 1降雨当たりの降雨時流出負荷量(流域面積で割って比流出負荷量として扱った)について回帰分析を行った結果、説明変数が流出高のみの場合でも高い決定係数が得られたが、説明変数として流出高、先行降雨係数APF、ピーク降雨強度R_pの3つを用いて重回帰分析を行った場合にさらに高い決定係数が得られた。流出高は1降雨当たりの直接流出の総流量であり、APFは流域における汚濁物の残存条件、R_pは流域の汚濁物を洗い出す作用の強さを表す指標として用いた。また、APFとR_pの効果は、粒子性成分について大きかった。

3) 年間の平常時負荷量と降雨時流出負荷量を算出した。その結果から、SS については年間(平常時+降雨時)負荷量のうち降雨時流出負荷量が約7割と大きかったが、BOD, COD, T-N, T-P については平常時負荷量が7~9割と大きいことが分かった。

また、COD, T-N, T-P の平常時負荷量については、いずれも溶解性成分の割合が高かった。一方、降雨時流出負荷量に占める溶解性成分の割合は COD で約2割、T-N で6~7割程度であったが、T-P の降雨時流出負荷量はほぼすべて粒子性であった。

T-N については形態別の内訳を調べ、平常時負荷量については $\text{NH}_4\text{-N}$ が5割弱、 $\text{NO}_x\text{-N}$ が2~3割を占めたが、降雨時流出負荷量については $\text{NH}_4\text{-N}$ は無視できる程度であり、 $\text{NO}_x\text{-N}$ は5割を占めた。 $\text{NO}_x\text{-N}$ の降雨時流出については、面源負荷として存在する窒素が硝化され地中に溶脱し、中間流出により流出するものが多くを占めることが推測された。

4) 平常時負荷量の多くは生活排水および事業場排水等のポイントソースによるものであり、これは下水道整備によって今後大幅に削減されることになる。一方、降雨時流出負荷量は、ポイントソースからの汚濁物が河道等に一時堆積していたもの、および面源(ノンポイントソース)負荷として存在していたものに由来する。汚濁負荷量の発生源別の内訳について、本論文では明らかにしていないが、特に、下水道整備が完了した後も流出すると予想される、さまざまなノンポイントソースからの汚濁負荷量の把握について、今後詳細な調査が望まれるところである。

謝 辞

流域内人口・土地利用状況等については、千葉県水質保全課、千葉県下水道計画課、および、柏市、流山市、沼南町、鎌ヶ谷市、松戸市の環境・下水道担当課から、また、雨量データについては、柏市環境保全課

および建設省利根川下流工事事務所から提供していただきました。ここに記して、感謝の意を表します。

(原稿受付 1994年7月16日)

(原稿受理 1994年11月21日)

参 考 文 献

- 1) 環境庁 (1993) 環境白書総説, 35pp., 大蔵省印刷局.
- 2) (株)日本下水道協会 (1984) 富栄養化防止下水道整備基本調査の手引, 82pp., (株)日本下水道協会, 東京.
- 3) (株)日本下水道協会 (1993) 流域別下水道整備総合計画調査指針と解説, 62pp., (株)日本下水道協会, 東京.
- 4) 千葉県環境部 (1980) 手賀沼水質総合診断結果 (第1部 手賀沼流域の水質環境).
- 5) 中村栄一, 田中宏明, 高島英二郎 (1991) 閉鎖性水域における栄養塩負荷削減の効果評価に関する調査, 土木研究所資料第3030号, 109-116.
- 6) 建設省河川局 (1976) 建設省河川砂防技術基準(案), 115pp., 山海堂, 東京.
- 7) 吉川秀夫 (1976) 河川工学, 36pp., 朝倉書店, 東京.
- 8) 海老瀬潜一 (1983) 水質汚濁現象の数理モデル(3), 水質汚濁研究, 6, 125-133.
- 9) 海老瀬潜一 (1986) 陰イオン物質流出動態の土地利用形態による相違, 第30回水理講演会論文集, 37-42, (株)土木学会.
- 10) Muraoka, K. and Hirata, T. (1993) Water quality and chemistry of hydrological process, Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering, NO. SI-3, 155-159.
- 11) 山口高志, 吉川勝秀 (1978) 河川の水質・汚濁負荷量に関する研究(I), 土木研究所報告第151号, p.29.
- 12) 安藤茂, 中村栄一 (1978) 合流式下水道の改良に関する調査, 土木研究所資料第1421号, 71-82.
- 13) 森田優三 (1974) 新統計概論, 88pp., 日本評論社, 東京.
- 14) (株)土木学会 (1972) 琵琶湖の将来水質に関する調査報告書昭和46年度, 4-11.
- 15) 海老瀬潜一 (1985) 降雨による土壌層から河川への NO_3^- の排出, 土木学会衛生工学論文集, 21, 57-68.
- 16) 安中徳二, 長谷川清 (1986) 下水二次処理水の土壌処理, 土木研究所資料第2321号.