

小河川におけるN, P流達率に関する研究

山口大学 工学部 正員 澤田正夫
正員 中西 弘

1 はじめに 流域内で発生した汚濁物質がどの程度海域等に流達するかを知ることは水質管理上、非常に重要である。著者は地方都市近郊の小河川について、降雨時を主体とした一年間の調査を行ない、この点につき若干の知見をえたので報告する。

2 研究方法 ① 対象地区 対象として選んだ塩田川は瀬戸内海地方の都市近郊の展型的な小河川と思われる。また、実験室が流域のほぼ中央に位するなど、好都合な条件を備えている。(図1) 一方、流域の一部が分流式下水道処理区域になっており、昭和48年10月から翌年10月の調査期間中にも下水道整備が進行しつつあり、発生負荷の算定がやや困難であった。また、採水点は真綿川感潮部への合流点から約700m上流であり、満潮時と降雨が重なると、水門の影響で水位が上昇して滞留する場合があります。流量の算定にも困難が予想された。

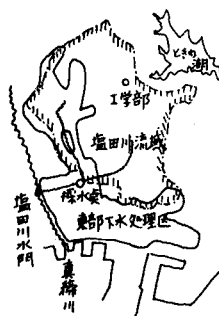


図-1 塩田川調査地域の概要

② 発生負荷の算定 従来の原単位計算による方法で行ったが、流達率の精度には直接効いてくるので、できるだけ詳細に調査して、精度を上げることにつとめた。

i) 集水面積 流域内の下水処理区は分流式であるので、集水面積は地形図、現地調査から求めた流域面積そのままを考えることができる。結果は508haとなった。なお分水線の最大標高は35mである。

ii) 流域人口 508ha中の全はりつき人口を求めるために、市住民課資料から、行政区ごとに流域に係る人口を抜き出した。境界域については、住宅地図による戸数のわりぶり、現地調査によって人口をふりわけた。集計すると7,711世帯、25,447人となった。したがって人口密度は50人/haである。

iii) 雑排水未処理人口 公営防止計画で市下水課が計算している塩田川への排水区域人口は13,020人である。したがって流域内の549年における下水道排水区域人口は25,450-13,020=12,430人となる。一方、環境衛生連合会の549.6の水洗化区域内汲取便所調査集計表によれば、関係行政区について集計してみると、2,571戸のうち2,111戸が水洗化して560戸がくみとりのままである。また後述する浄化槽の調査によると、下水道排水区域内において浄化槽のまよつけ替え工事をしていないものが、20戸程度あるので、水洗化して下水道に入っている人口は12,430×(2,011-20)/2,571=9,630人となる。さらに下水道料金の集金伝票から、当流域に係る地区について排水設備済戸数と水洗化戸数の比率を求めると、1,228/1,136であったので、当流域内雑排水処理人口は9,630×1,228/1,136=10,410人となる。したがって雑排水未処理人口は25,450-10,410=15,000人である。

雑排水の原単位としては、N3.0g/人・日、P1.0g/人・日を用いた。

iv) 浄化槽人口 保健所の浄化槽設置届出帳のカード約1,400枚のなかから、流域に係る小字に属するものを抜きだした。このうち、すでに下水道に切り替っているもの、まだカードによってきていないもの、無届けの

表1 流域内浄化槽の放流水の水質

	調査数 台	平均濃度 ppm	
		N	P
個人住宅	41	15.1	15.9
集合住宅	29	72	11.5
事務所	13	70	7.4
学校病院			

表2 浄化槽放流水によるN, P負荷

	台帳 台数	稼働台数	使用人数 人	原単位 など	放流負荷 kg/日	
					N	P
個人住宅	93	86	45人/台 370	水量35L/人・日 N150, P16mg/L	6.1	0.65
集合住宅	28	19	集計 800			
事務所 病院	34	18	500	N2.1, P0.9 2人/日	1.1	0.09
学校	10	7	転入及び生徒数 3,630	休日の補正 0.64 除去率 N, P 0.7	5.0	0.50
合計					12.2	1.24

ものがあつたり、突如に合っていないところもある。そこで慎重を期するため、約150台につき電話での聞きとりを行なった。なお新しい集合住宅などで台帳になかったものについても数台追加した。家庭用については、聞きとりできた平均使用人数が4.5人/台 ($n=55$)であつたので、この値を用いて使用人口を計算した。

原単位としては当流域で実態調査してえられた平均濃度(表1)に標準的な水使用量35ℓ/人・日をも乗じたものを使用した。事務所については、取負数を電話でさきとり、これに建設省流域下水道に関する指針と解説の原単位を使用した。学校は水量の把握が困難なため、それぞれの使用実態を考慮して(L ; N 1.5, P 0.4g/人・日尿; N 8.5, P 0.7g/人・日), 浄化槽へのインプットを計算し、これに休日の補正(0.64), 除去率(0.7)を乗じて計算した。(表2)

V) 農地面積及び肥料流亡量 地区ごとの収穫面積を記述した農業センサスの最新は545のものであるので、このときの、ほぼ流域面積に近い地域における作付状況(休耕率、作物別作付率など)を548~49にも適用することにした。一方、統計関係資料として、田畑の経営面積は毎年把握されているので、流域に係る小字分を抜きだし、計、田 9,511a, 畑 4,472a がえられた。センサスによると、流域に係る大字の545年の田経営面積 12,860aに対し、作付された田 12,052a, そのうち裏作した田 1,602aとなっている。同様に畑経営面積 4,374aに対し、作物別の収穫面積が示されている。これらの関係から推定した548年の作物別収穫面積、施肥量、流亡量を表3にまとめた。施肥強度は宇都地区農業改良普及所、市農林課へのききとりなどにより、実情に近い値を用いた。流亡率は N 30% P 畑3% 田5%で計算した。年間の施肥量は N で25.8t, P 7.9tであり、流亡量は日量にして N 21.2kg P 0.87kgとなる。

VI) 家畜 豚飼養頭数は悪臭防止法に規制地域の指定のための調査資料より、養鶏については電話番号簿の業者にききとりを行なって飼養羽数を求めた。当流域は548年末改定の用途地域でほとんど第2種住居専用地区にあたり、ここ三、四年の間に郊外に移った業者も多く、家畜による負荷はほとんど無視しうる程度である。

VII) 工場排水 流域内には、 N, P 発生源となる大きな工場はあまり存在しない。公害防止計画の事業所資料や、電話番号簿から主なものを拾ってみると、食品工場10, クリーニング業5程度でいずれも10m³/日の小工場がほとんどである。この中の5工場について負荷量調査を行ない、その他については、これらのデータより類推して、計 N , 3.1kg/日 P 0.7kg/日を算出した。この他流域内には理容美容室40, 食堂40店が存在するが、これら小口のは家庭雑排水の原単位の中に入るものとして考慮に入れなかった。一般にこれらの発生源については精度は十分であるとはいえない。

VIII) デポジット 当流域は臨海の肥料工業からのはいじんによる N, P の供給が無視しえないので、実験室横において、雨をロートに受け、約1mの導管を通して採水した水の負荷量を測定した。結果は表4に示すとおりであり、かなり月別に変化があるが、年平均して N 11.3kg/日 P 0.95kg/日を考える必要がある。

③ 流達負荷の測定

表4 デポジットによる負荷

	供給負荷 kg/日			
	NH ₄ -N	NO ₃ -N	N計	PO ₄ -P
48.9	8.1	5.4	13.5	1.07
10	4.3	1.6	5.9	0.31
11	2.7	2.2	4.9	0.68
12	6.7	0.9	7.6	1.74
49.1	0.5	0.4	0.9	0.31
2	5.8	2.8	8.6	1.03
3	5.6	4.9	10.5	0.77
4	6.1	2.7	8.8	1.20
5	5.1	1.7	6.8	0.46
6	3.0	2.9	5.9	0.83
7	26.2	7.4	33.6	1.38
8	2.3	1.3	3.6	0.54
9	19.3	6.1	25.4	1.10
平均				11.3 0.95

表3 肥料流出による負荷

	5.48 収穫面積 a	施肥強度 kg/a		施肥量 kg	
		N	P	N	P
稲	8,911	105	45	9357	4010
麦	1,213	80	39	970	473
いも	531	110	55	584	292
おめ	502	35	35	176	176
おね	58	200	80	116	46
野菜	5,137	280	55	14380	2825
花き	40	200	80	80	32
種苗	59	150	70	86	40
飼料用	41	150	35	60	14
施肥量計				25,800	7,910
流亡量				7,740	318

548.10より1年間ほとんど全降雨を採水調査するよう努めた。何らかの理由で採水できなかった降雨は、ほとんどが5mm以下の小雨であるが、69回の雨のうち13回ある。晴天時のデータはこれに比してやや不十分であるが、9回程度の実測を行なった。

i) 採水方法 主として1時間あるいは2時間ごとに、横断1点からアンドリュウスの自働採水器により採水した。採水口には浮子をつけ、水面下10 cm程度から採水できるように調節した。

ii) 分析方法 分析はそのままの試料につきTN, TP, NO₅Cを過試料につきNH₄-N, NO_{2,3}-N, PO₄-Pを分析した。分析は原則として24時間以内に行なった。TNはケールダール分解滴定法で行ない、NO_{2,3}-Nを含まない。TPは過硫酸カリ分解法、NH₄-Nはインドフェノール法、NO_{2,3}-Nはヒドラジン法によった。

iii) 流量の測定 採水点に手製の浮子型水位計を設置し、水位流量曲線を求めて水位を流量に換算した。5497月16日の豪雨で一旦水位計が倒れ、8月に入って再設置した。干潮時の20回前後のQ, Hの測定から、 $\sqrt{Q} = a(H + b)$ の関係を用い、a, bを最小自乗法により決定した。548.12.18 ~ 549.7.16までは $\sqrt{Q} = 3.44(H - 0.203)$; 549.8.24からは $\sqrt{Q} = 3.00(H - 0.057)$ である。

先述したように満潮時に降雨が重なった場合、水位が上昇して滞流することがあるが、水位曲線をみれば、このピークは直線的で自然のピークとは区別がつく。また時によっては、東綿川との合流点で雨水ポンプが稼働することがある。この場合も採水点のやや下流で急勾配となっているために、測定点の水位はポンプの稼働によって、潮位の影響を受けない自然流下のときの水位よりも低くなることはない。このような水位変化の例を図2に示した。流量は実線の水位について換算して求めることとした。

iv) 雨量と流出量 雨量は工務部での0.5 mm毎の転倒式自記雨量計による測定値を用いた。降雨時あるいは洪水期間の定義としては、原則として水位上昇開始から、減衰曲線の二つめの変曲点までの間をあげた。基底流量は予想される晴天時の流量とした。今、洪水期間中の全流出量をQ, 基底流出量をQ₀とし、雨量をR, 流域面積をAで表わすと、正味の流出量Q_Eは $Q_E = Q - Q_0$ ……(1) $Q_R = R \cdot A$ ……(2) だから、流出率cは $c = Q_E / Q_R$ 。この流出率cをデータのそろった降雨について求めて整理し、水位のデータのない降雨時については、これらのデータより諸条件を照会して推定したcを用いて、Q_Eを算出し、それに適当なQ₀を加算して全流出量Qを推定した。

v) 降雨時流達負荷の算定は次のいずれかの方法によった。イ. 流量水質ともに時間変化のデータがあるとき……負荷-時間変化を描き、洪水期間の面積を求める。(A法), 同じ方法であるが表からSimpson法で計算する。(B法), ロ. 水質の時間変化データが不十分な場合……数点の水質測定値の平均値に全流出量Qを乗じて流達負荷を求める。(C法), ハ. 流量水質のどちらかあるいは両方欠けている場合……流量は先述した方法でQを推定し、これに平均濃度を乗じて負荷を求める。(D_q法), 水質がないときは類似した降雨時の水質データから平均濃度を類推し、Qの実測値に乘じる。(D_c法), 両者とも推定によるときはD法とした。

このようにして、一降雨ごとの降雨時流達負荷を算出し、半月ごとに集計した。また晴天時流達負荷は季節ごとに設定した晴天時日負荷量に、洪水期間以外の日数を乗じて求め、両者を合計してその半月の流達負荷とした。

④ 流達率 前項までに計算した流達負荷の発生負荷に対する割合を流達率とし、この値を半月ごとに求めた。その際、肥料流出、デボジットによる発生負荷には季節変動があるし、また初めに述べたように下水道整備の進行により少しは発生負荷が減少しているはずであるが、ここではこれらの要素は無視し、ここでは表5の発生負荷を固定して流達率を計算した。

3 結果 ① 発生負荷 発生負荷の計算結果を一覧表にすると表5のごとくになる。日量にしてN 94.8 kg, P 18.8 kgとなった。

② 流達負荷 晴天時負荷の実測値を表6にまとめた。平均的な負荷として、N 43 kg/日, P 5.8 kg/日を考へる。降雨時の平均濃度、計算方法、流達負荷を表7-aにまとめた。またD_c, C, B, A法により算出された52個のデータにつき、洪水期間の流達負荷Lとこれに対応した同一時間の晴天時流達負荷L₀とを比L/L₀と同様に流量の比Q/Q₀の値などを表7-bにまとめた。(表7-a, bは紙面の都合で割愛) 半月ごとの流達負荷を整理すると表8のようになり、晴天時と降雨時に分けて年間の総流達負荷を整理すると表9のようになる。

表5 N,Pの発生負荷

	発生負荷 kg/日	
	N	P
家庭雑排水	45	15
浄化槽	12.2	1.24
肥料流出	21.2	0.87
家畜汚水	1.2	0.09
工場排水	3.9	0.7
デモジット	11.3	0.95
計	94.8	18.8

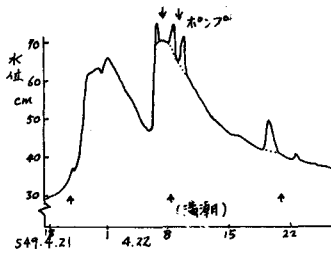


図2 降雨時水位変化

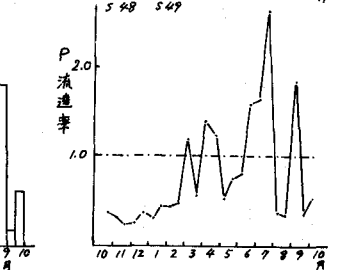
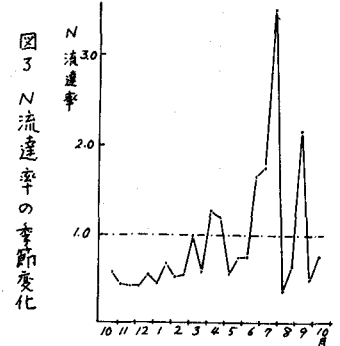


図4 P流達率の季節変化

年月日	流達負荷 kg/日				
	NH ₄ -N	NO _{2,3} -N	TN	TP	
47.11.15~16	8.9	5.1		3.9	間隔排水
48.12		3.0	43.5	5.5	干潮時
49.2.12~13	21.0	2.6	31.8	6.5	間隔排水
49.3~49.6	28.0	2.6	40.2	8.8	降雨時デ
49.6~49.7	17.9	9.5	31.5	6.9	ーダリ使用
49.7~49.9	20.0	8.4	33.0	6.6	ホンプ抽出
49.10.15	19.1	3.9	35.6	4.7	間隔排水
49.10後	15.8	4.3	30.1	2.4	コンクリートサン
49.12.19	26.4	5.4	63.3	6.7	プーラ回りの排水
平均		5.0	38.6	5.8	間隔排水

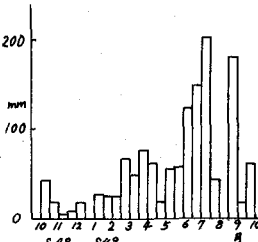


図5 降雨量の月別変化

表8 塩田川 N,P流達負荷・流達率

年月	降雨量 mm	流達負荷 kg				流達率	
		NH ₄ -N	NO _{2,3} -N	TN	TP	N	P
S 48	10	42.5	395	97	708	0.57	0.37
	11	17.5	255	83	532	0.44	0.32
		4	224	68	528	0.42	0.24
	12	8	230	69	503	0.41	0.26
S 49		18	372	87	731	0.54	0.37
	1	0	375	47	570	0.44	0.31
		26.5	323	103	864	0.64	0.44
	2	24.5	397	68	634	0.51	0.44
		24.5	399	51	648	0.53	0.47
	3	17	508	258	970	0.86	1.19
		48.5	430	105	732	0.56	0.56
	4	76.5	686	271	1,443	1.24	1.40
		61.5	568	466	1,245	1.17	1.23
	5	18.5	433	72	682	0.53	0.52
		56	570	142	937	0.71	0.75
	6	57.5	468	179	850	0.72	0.80
		103	600	848	1,451	1.62	1.18
	7	148.5	651	784	1,657	1.72	1.64
		202	1,035	2,378	2,870	3.47	2.62
	8	0	285	14	480	0.35	0.36
		43	364	198	747	0.62	0.34
	9	181.5	751	1,225	1,775	2.13	1.84
		18	331	95	584	0.48	0.35
	10	61.5	461	865	784	0.73	0.54
統計	1228.5	11,068	7,953	22,789	5,422	0.89	0.79

③ 流達率 流達率の季節変化を表8と図3図4に示した。降雨時をならした奥の流達率はN, 0.89; P, 0.79となり、一方晴天時流達率はかなり変動があると思われるが、0.46, 0.31の程度である。なお6月20日から9月27日の計100日間に日量約10,000 m³の農業用水を常盤湖より通水しているが、水質は平均的にみて、N 0.5 ppm, P 0.1 ppmの程度であるので、通水期間でN 5 kg/日 P 1 kg/日、年間ならして、N 1.4 kg/日、P 0.27 kg/日とそう大きな値ではない。この分を補正すると、流達率はN 0.87, P 0.78となる。

流達率は冬場に低く、夏場に高い。そしてその変動は図5の降雨量の変動と非常によく対応していることがわかる。流達率の変動中はかなり大きく、Nで0.35~3.47, Pで0.24~

表9 塩田川年間総流達負荷(kg)

	晴天時	降雨時	雨/晴	合計
NH ₄ -N	6637	4431	0.67	11068
NO _{2,3} -N	1,626	6,327	3.89	7,953
TN	10,963	12,026	1.10	22,789
TP	2,017	3,305	1.64	5,422

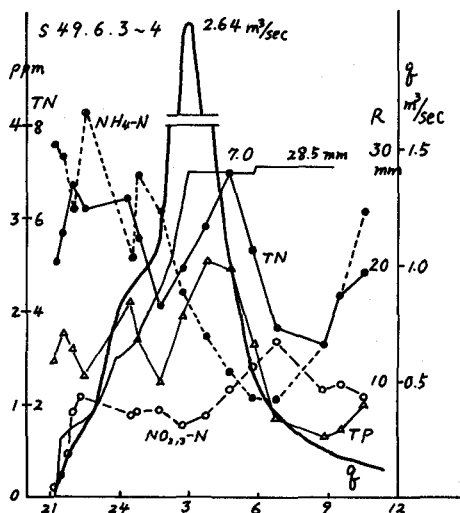
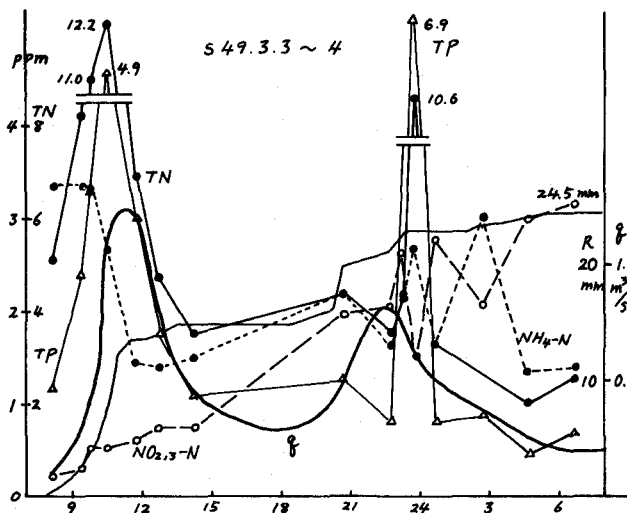


図6-a, b, c 降雨時の流量水質の変動

- a S 49.3.3 ~ 4
b S 49.6.3 ~ 4
c S 49.7.13 ~ 14

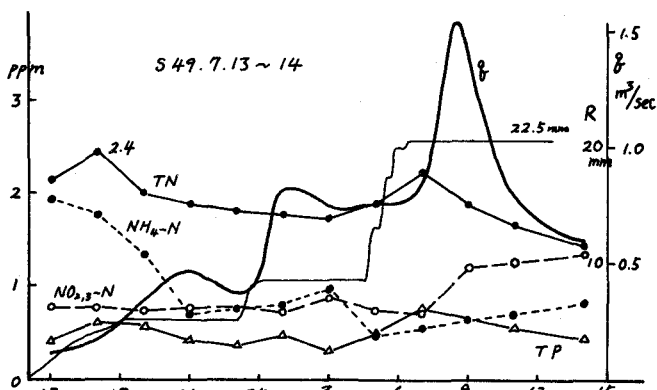


表10 L/L_0 と Q/Q_0 , R の関係

		$\log(L/L_0)$			
		NH_4-N	$NO_{2,3}-N$	TN	TP
$\log(Q/Q_0)$	r	0.82	0.77	0.87	0.86
	x	0.75	1.24	0.95	1.10
$\log R$	r	0.75	0.83	0.84	0.84
	x				

$n=54$, r : 相関係数, $x: L/L_0 = (Q/Q_0)^x$

↓ 図8 L/L_0 と Q/Q_0 の関係

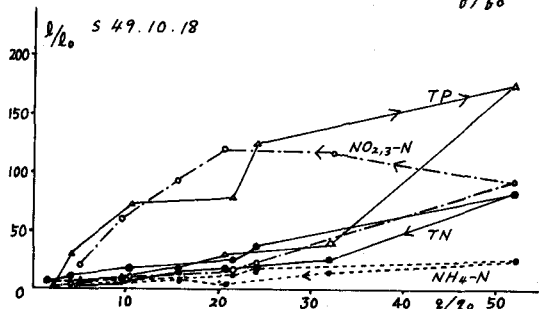
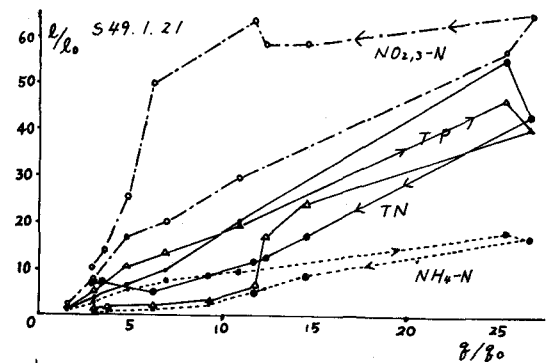
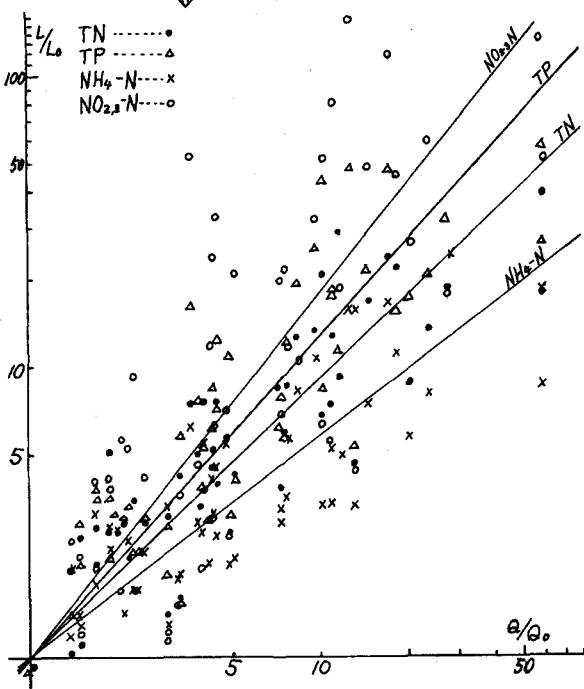


図7-a, b L/L_0 と Q/Q_0 の関係



2.62と最小値と最大値の間には10倍の違いがある。

④ PO_4-P/TP 晴天時の PO_4-P と TP の比率は54個のデータで9~39%, 平均15.4%(標準偏差7.8%)であった。一方降雨時の比率は一降雨時の平均濃度45個につき、雨量について加重平均を求める14.6%となり、晴天時、降雨時とも PO_4-P は TP の約15%を占めるものと考えてよい。

4 議論 ① 各項目間の相関 降雨時の一降雨ごとの平均水質各項目間の相関係数を求めたが、 $n=44\sim56$ で、 NH_4-N と TN の相関が最も高く、 $r=0.88$ であり、 PO_4-P と TP の相関は $r=0.50$ とあまり高くない。 PO_4-P と NH_4-N は $r=0.61$, TN と TP は $r=0.66$ といずれも有意な正相関を示すが、 $NO_{2,3}-N$ と NH_4-N は $r=-0.24$ と負の相関を示した。

② 降雨時の流量水質変化 一例を挙げると図6-a, b, cのようである。一般的傾向としては i) TN, TP, NH_4-N, PO_4-P はほぼ似かよった出方をする。後二者の方が若干出方が早いことが多い。またこれら四者の濃度ピークは流量のピークに若干先行するのが一般である。 TN, TP の降雨時流出の主要なものは、おそらく川床にヘドロやワタなどの形で蓄積していたものが掃流されるものや農地土壌の表面流出などであろう。なお本調査ではとらえることはできなかったが、時期によっては、大型水生植物の形で流出も無視できないものと思われる。 ii) $NO_{2,3}-N$ は減衰期に入ってから濃度が増加し、洪水期間の終り近くまで増加しつづける。この原因については色々要素が考えられるが、おそらくもっとも妥当なものは、土壌の浅層に一旦浸透した雨水が土壌中にゆるく保持されていた $NO_{2,3}-N$ を連行して流出してくるものと考えらるであろう。そしてその大部分は肥料の溶脱に由来するものであろう。降雨時の $NO_{2,3}-N$ 負荷(年間)を日量に換算すると17.3 kg/日となり、肥料流出の N 発生負荷21 kg/日と対応させるとオーダー的一よく一致する。 iii) 濃度レベルとくにピークの濃度は前期無降雨日数が多いとき大きく、降雨が連続したのちの梅雨後期などにおいては小さくなる。これは図6-a, b, cの3月3日、6月3日、7月13日のほぼ同程度の雨量に対する TN のピーク濃度を比較してみると、12.2, 10.6; 6.7, 7.0; 2.4, 2.2とかなりの差があることからみても明らかであり、日常的にもよく経験するところである。

③ L/L_0 と Q/Q_0 の関係 採水時ごとの降雨時負荷 q_{rec} を同じ時刻の晴天時負荷 l_0 との比 L/L_0 と、同様に流量 q_{rec} と Q_0 の比、 Q/Q_0 とを対応させる。1月21日と10月18日の降雨時につき、それぞれ、2月12日と10月15日の晴天時を対応させて図7-a, bに示した。これで見ると、 $TN, TP, NO_{2,3}-N, PO_4-P$ は降雨時の方が濃度が増加し、 NH_4-N だけ低下している。そして時間経過を追うと $NO_{2,3}-N$ のみ左まわり、すなわち初期より後期において濃度が高くなる、の傾向を示している。しかしa, b 2つの降雨時と比較してわかるように各項目の流出の仕方は季節のちがひ、降雨のタイプ(bの方が降雨強度大)などによって違っている。

④ L/L_0 と Q/Q_0 の関係 一降雨ごとの $L/L_0, Q/Q_0$ を両対数紙にプロットすると図8のようになる。またそれぞれの L/L_0 と Q/Q_0 の対数の相関係数と(1, 1)を通る直線回帰式を求めた結果を表10にまとめた。傾き α から判断すると、 $NO_{2,3}-N, TP, TN, NH_4-N$ の順に降雨時流出の影響が大きくなり、濃度でいうと、 $NO_{2,3}-N, TP$ では降雨時の方が平均濃度は高くなり、 TN でやや低くなり、 NH_4-N ではかなり低くなる傾向がある。これは表9の降雨時/晴天時の負荷量比の順序とも一致した傾向である。

⑤ L_e/Q_eVE と貯留量の関係 ($L_e=L-L_0, Q_e=Q-Q_0$) 前項の関係は L と Q がみかけ上、比例関係にあることを示しているが、実際には降雨時の負荷は流路における N, P の貯留量と掃流力に関連している。また一般に(貯留量+十分なとき)は、汚流量は Q の2乗に比例するといわれている。貯留量の比例量として、 $L_e/Q_e, L_e/Q_e^2, L_e/Q_e^3, L_e/Q_eVE, L_e/Q_eV$ (V は平均降雨強度)などを対応させてみたが、 L_e/Q_eVE が貯留量にもっともよく対応しているように思われた。

5 おわりに おわりにのそめ、本研究を援助して下さいた研究室の関係諸氏、環境庁に厚く感謝いたします。

参考文献 土木学会「水質管理に関する研究小委」水質汚濁予測基本調査報告書 S 50.3