

中小河川における期間総流出負荷量の変化とその評価

国立公害研究所 水質土壤環境部 ○海老瀬潜一

村岡 浩爾

相崎 守弘

大坪 国順

1. はじめに

河川の流出負荷量とその受水域水質に及ぼす影響を評価する場合、一定期間における降雨時流出をはじめとする各種の変化を含めた総流出負荷量の算定が必須のものとなる。とくに、受水域が閉鎖的な水域であれば、その滞留時間と算定期間の長さおよび算定精度のレベルとの対応関係の評価は重要な問題である。しかも、河川長が短く、流域規模が小さい中小河川においては、一般に、流出負荷量の変動の大きいのが特徴であり、晴天時と降雨時における流出負荷量の大きさと、その水質の構成内容の違いを、その評価に反映させる必要がある。しかし、河川の流出負荷量が、一般には、流量、降雨量、降雨強度、先行晴天日数など主として水文量の関数であることが認められながら、依然として晴天時に行なわれた調査結果に基づいて、各河川の流出負荷量あるいは流出率・流達率の評価がなされているのが現状である。したがって、今後は、流域規模や流域内の土地利用状態など流域特性や流出特性の異なる各種の河川について、晴天時と降雨時の別だけでなく、周日変化、週間変化、季節変化なども含めて、水量、水質の変動特性をふまえた期間流出負荷量の変化と位置づけの評価が課題となる。ここでは、2年間にわたる毎週1回の定期水質負荷量調査結果を中心に、その統計的諸特性について検討を行なうとともに、市街地河川の流出負荷量の周日変化の大きさと、晴天時と降雨時の流出負荷量の大きさと水質構成内容の相違を明らかにする。

2. 調査対象河川の概要

調査の対象とした河川は、図-1に示す霞ヶ浦（西浦）の高浜入に流入する恋瀬川、山王川および園部川の3河川である。期間は1978年6月から1980年5月までの2年間であり、観測地点はそれぞれの河川の霞ヶ浦への流入端付近の1点を選んだほか、山王川については、上流域の流出端付近のもう1地点での観測を行ない、後半の1年間には、さらに石岡市街地の上・下流端の2地点でも観測を行なっている。各河川の流域特性は、表-1に示すように、恋瀬川が上流に山林、中・下流に農耕地のある田園地河川で、霞ヶ浦では土浦入に流入する桜川に次いで大きな流域規模を有している。山王川は、上流域に非用水型の工場団地と樹園地、中流域に石岡市街地、下流域に農耕地を擁する市街地小河川である。園部川は、林地と農耕地に集落の散在する流域である。恋瀬川と園部川とは、恋瀬川の上流の山地部を除けば、降雨流出率がともに45%前後と似た流域特性を有している。山王川は、別水系あるいは地下水に依存する上水と工業用水の排水を受け、平均流量が押し上げられている。

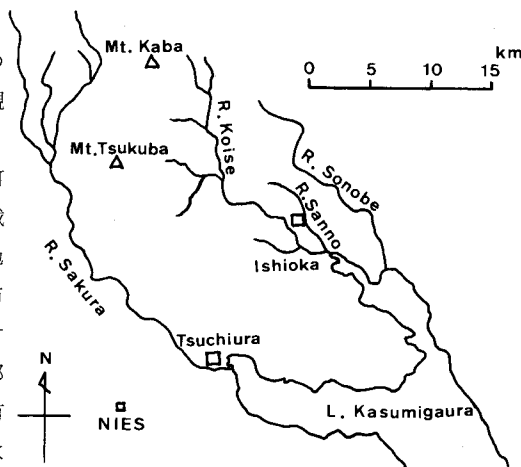


図-1 3河川の流域概要

表-1 3河川の流域特性

	流域面積 (km^2)	河川長 (km)	河川勾配 (%)	流出率 (%)	山林面積 (ha)	田面積 (ha)	畑面積 (ha)	その他面 積(ha)	流域人口 (人)	牛頭数 (頭)	豚頭数 (頭)
恋瀬川	2090	25	4.0	43.8	7059	3313	2003	8,525	51,674	3,764	52,029
山王川	128	8	2.9	11.3	146	405	309	370	19,659	356	5,264
園部川	818	22	2.7	45.5	2013	1,258	1,289	3,620	26,718	2,540	18,158

表-1からもわかるように、いずれの河川とも畜産、とくに養豚排水の影響を受けているのが特徴であり、それぞれの流域とも工場や事業所の排水も受けるほか、集落密集地からの生活排水の影響も大きい。

3. 年間流出負荷量の相違

一般には、時期が違えば、負荷発生源や負荷発生量が異なるけれども、この連続した2年間には、3河川流域とも大規模な開発もなく、その差違が無視し得る程度であると考えて、議論を進めることにする。

3河川の霞ヶ浦への流入端近くの観測地点における1978年6月から1979年5月までの1年間(52回)の各種水質負荷量の平均値を100としたとき、1979年6月から1980年5月までの1年間(52回)のそれぞれの対応する値の大きさを、降雨量と流量のそれと併せて示したものが図-2である。これより、恋瀬川では降雨量と流量が20%強と同程度の大きさであるのに対して、Inorg.-N、とくに NO_3^- -Nは50%増加し、 PO_4^{3-} -P、Org.-PおよびT-Pは2.0、1.8および1.8倍とさらに大きな値となった。これらの増加率に対して、Org.-N、Cl $^-$ およびSSはそれぞれ、19%増加、16%増加、7%増加と流量の増加率を下回っており、 NH_4^+ -Nは33%増加、T-Nは42%増加と流量の増加率を少し上回る値となった。園部川では、流量の増加が53%と大きく、Cl $^-$ 、Inorg.-NおよびT-Nは50%前後の増であるが、Org.-Nと NO_3^- -Nは75%増加と85%増加となり、Org.-PとSSはともに3.4倍もの大きな値となっている。増減量の小さかったものに6%減少の PO_4^{3-} -Pと8%増加の NH_4^+ -Nがあり、T-Pは37%の増加であった。山王川では、流量の20%の増加に対して、Inorg.-Nが45%増加、T-Nが53%増加、Org.-Nが66%増加、 NO_3^- -Nが71%増加と順に増加率が大きくなっており、Org.-Pが3.6倍もの値となっている。これに対して、Cl $^-$ は10%増加、 NH_4^+ -Nは18%増加と流量の増加率を下回り、 PO_4^{3-} -Pは11%減少となっている。T-PとSSはそれぞれ34%増加と46%増加と流量の増加率を上回った値となった。

3河川全体については、Cl $^-$ と NH_4^+ -Nが流量の増加率並かそれより下回る程度の増加にとどまり、Org.-Nが流量の増加率並みかそれを少し上回る程度しか増加しないのに対して、 NO_3^- -Nは流量の増加率をかなり上回るほか、Org.-Pの増加は1.8~3.6倍とはるかに大きな値となっている。栄養塩のNとPはいずれもその構成内容の変化が河川によって異なるけれども、Total量では流量の増加率に近い値となっている。全般的に、市街地河川と田園地河川との特徴的な差異は現われていないが、山王川と園部川では PO_4^{3-} -Pが前年よりわずかながら減少しているにもかかわらず、恋瀬川では逆に2倍に増加している。

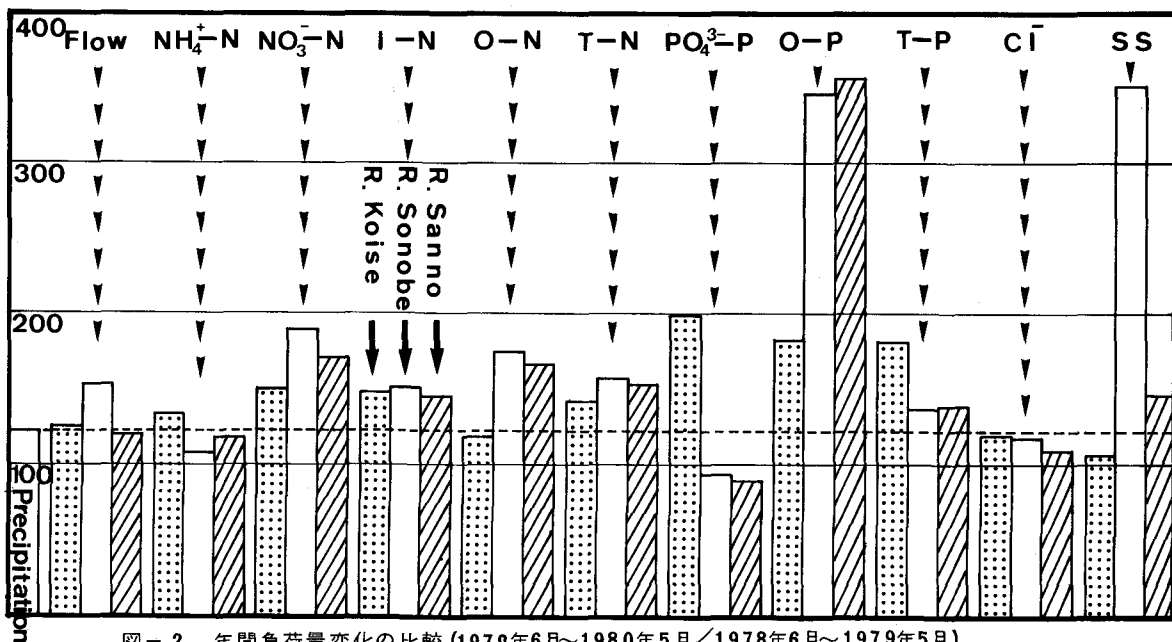
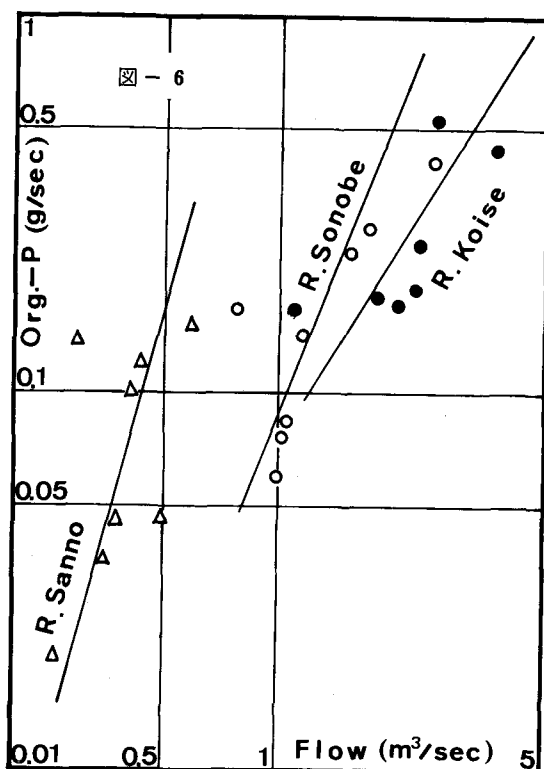
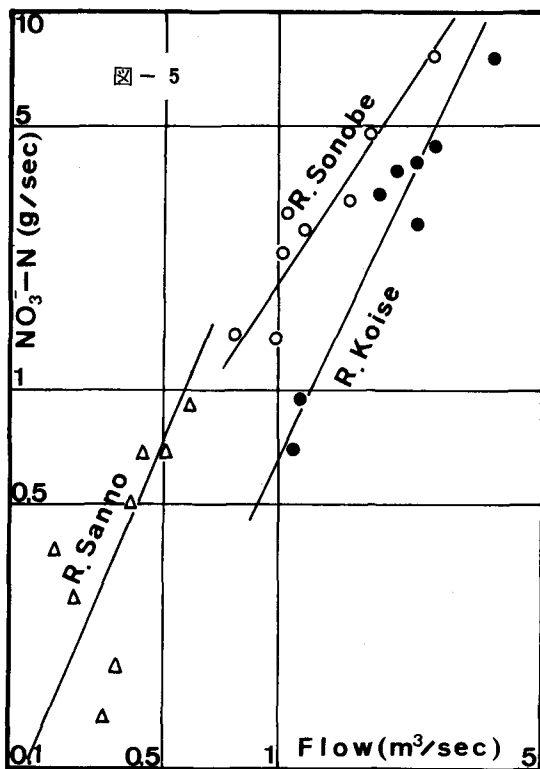
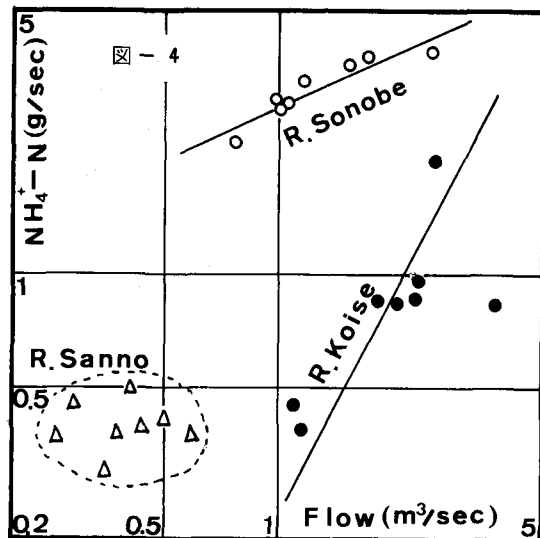
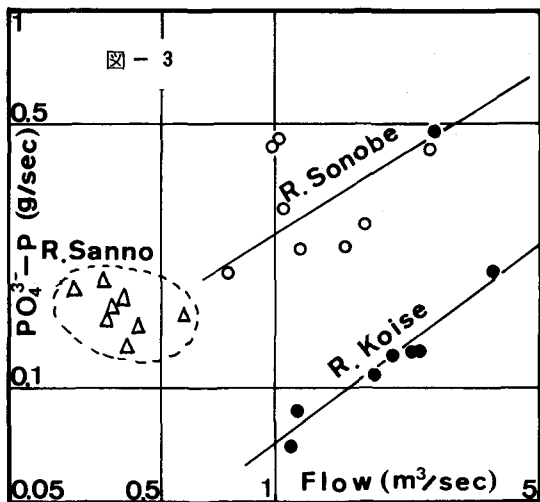


図-2 年間負荷量変化の比較 (1979年6月~1980年5月/1978年6月~1979年5月)

4. 季節流出負荷量の変化とその特性

1年間(52回)を4つの季節, 夏(6月~8月), 秋(9月~11月), 冬(12月~2月), 春(3月~5月)に分け, 各々13回ずつの観測値の平均値および変動係数によって, 各季節流出負荷量の変化とその特性を2年間の8個のデータとして検討を行なった。6月から8月にかけての夏季月間は, 灌漑期のため, 下流端での流量の低さが降水量の小ささ以上に目立ち, 多くの水質でその流出負荷量が最も小さい季節である点が3河川に共通した特徴である。その上, 降雨量は季節的に大きな偏りが見られるため, 流出負荷量の変動の大きい水質では, 季節間で大きな差異が見られる。例えば, NO_3^- -Nの最大の季節と最小の季節の差は恋瀬川で11倍, 山王川で5倍, 恋瀬川で5.5倍であり, さらにSSでは, 10倍から15倍と差が開いている。



これらの値は、流量の2倍から3倍の差を大きく上回るものであり、流量変化に加えて水質負荷の変化量がさらに大きいことを示している。図-3から図-6は、各種水質の流出負荷量と流量の関係を示したものである。流量変化に最も鋭敏な応答を示すSSのほか、図-5と図-6の $\text{NO}_3^- - \text{N}$ と Org.-P が流量変化に対してかなり明確な追従を見せる。むろん、 Cl^- の流量との線形性の相関の高さは言うまでもないが、その勾配が市街地河川の山王川で小さく、田園地河川の恋瀬川と園部川では大きく、両者はほぼ同じ勾配であった。また、人為的な汚濁の影響を強く反映する $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ およびCODは、図-3と図-4に見られるように、田園地河川の恋瀬川と園部川では流量増加に対して流出負荷量の増加の傾向が明らかであるが、市街地河川の山王川では、流量と流出負荷量の関係が定かでなく、一群の分布を示すのは注目に値する。これは、山王川が石岡市街地の生活排水を受け、その負荷量がかかなり安定した一定量に近いことを表わしており、市街地が負荷発生源として全流域の中で占めるウェイトの高さを如実に示すものである。

3河川全体については、降雨量もあまり多くなく、灌漑用水のため下流での流量レベルの低さが目立つ夏季と降雨量の少い冬季に、多くの水質で低い流出負荷量となり、降雨量と流量がともに多い秋季と春季に、ほとんどの水質が高い流出負荷量となる傾向が見られる。この傾向は、田園地河川の恋瀬川で最も強く現われ、市街地河川の山王川では明確に現われず、この傾向から外れる水質因子も多くなる。

5. 月別流出負荷量の変化とその特性

月別の流出負荷量は、観測回数が4回あるいは5回と月によって異なるほか、観測回数が少ないために、季節別流出負荷量より変動が大きい。例えば、恋瀬川では、1978年8月の渇水時に対する1979年5月の豊水時の比が流量で133倍になるほか、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ の93.8倍を最高に、 Org.-N や $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ が2.2倍から2.8倍の大きさにも達する。園部川では、1979年7月の渇水時に対する10月の豊水時の比が流量で11.1倍になるが、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ の1.5倍や Org.-N の2.2倍など流量を大きく上回る差ができる。しかし、山王川での流量変化は安定しており、1979年の9月と10月の間の流量の比が最大で、せいぜい3.1倍になる程度と小さいが、水質の流出負荷量は $\text{NO}_3^- - \text{N}$ が1978年の7月と10月の間で10.6倍と最も大きな差になっている。SSについては、3河川ともさらに大きな差を生じ、恋瀬川で362倍、園部川で4.7倍、山王川で2.6倍にも達する。

このように、月別流出負荷量は変動幅の大きいものとなり、期間の区切り方や観測頻度のとり方によっては、算定値に大きな差違をもたらすことも考えられる。とくに、期間内にかんがりの大きさの降雨時流出が何回含まれており、そのうちのどの程度を観測で押えているのかの判定が重要な問題となる。したがって、毎週1回の定時観測の頻度では、統計的に精度の高い月別負荷量を得にくく、その補正も簡単ではなくなる。

6. 変動係数と流域特性

期間流出負荷量の算定には、対象河川の流量や水質負荷量の変動特性と観測頻度などについての統計的な評価が必要である。ここでは、観測値の標準偏差を平均値で除した変動係数によって、年間および季節別の流量と流出負荷量の変動特性を、また、流出負荷量を流域面積で除した比流出負荷量によって河川の流域特性を把握することによって、両者の対応関係の検討を行なうことにする。表-2は、恋瀬、山王および園部の3河川流出端それぞれにおける2年間で104個の観測値から求めた変動係数と比流出負荷量の一覧である。

表-2 3河川の2年間の変動係数(上段)と比流出負荷量(下段)

	流 量	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	Inorg.-N	Org.-N	T - N	$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	Org.-P	T - P	Cl^-	SS
恋瀬川	0.886	1.600	1.265	1.172	1.493	1.160	2.386	1.923	1.880	0.823	2.617
	886	0.37	1.44	1.85	0.55	2.40	0.07	0.12	0.19	12.3	27.8
園部川	1.012	0.815	1.360	1.001	1.743	1.074	0.801	1.595	0.779	0.933	3.461
	1,438	3.20	3.47	7.39	1.66	9.05	0.36	0.20	0.56	30.2	28.0
山王川	0.505	0.431	1.127	0.659	1.075	0.668	0.342	1.453	0.565	0.383	1.711
	2,903	2.69	3.19	6.70	3.28	9.98	1.08	0.63	1.71	74.6	66.9

(ただし、比流量は $\text{m}^3/\text{Km}^2 \cdot \text{day}$, 比流出負荷量は $\text{Kg}/\text{Km}^2 \cdot \text{day}$)

これより2年間の変動係数は、恋瀬川>園部川>山王川、の順に並ぶ水質因子が多いが、流量の変動係数が2河川で最も大きい園部川では、流量との相関の高いSS、Cl⁻、NO₃⁻-NおよびOrg.-Nの流出負荷量の変動係数が恋瀬川のそれを上回り、園部川>恋瀬川>山王川の順となっている。むろん、変動係数は、晴天時には低くて降雨時などに大きな値をとる河川や水質因子で大きな数値となるため、山地および農耕地を流下する河川では大きく、市街地を流下し、常時高流出負荷量を維持する河川では小さくなる傾向は予測できる。また、年別、季節別の変動係数については、上記2つの序列パターンだけでなく、さらに多くの序列パターンが現われるが、その場合の季節や水質因子の数は少く、一定の傾向は見出し難い。

さらに、山王川の上流域、石岡市街地上流側、石岡市街地下流側および流出端と流下方向の4地点における1979年6月~1980年5月の1年間52個ずつの流出負荷量観測値の変動係数は、COD、SS、PO₄³⁻-Pの3水質因子が、上流>下流と流下方向に小さくなる序列となる。流量、Cl⁻、NH₄⁺-N、Org.-P、T-Pの変動係数は、1カ所で上下の逆転が見られるがほぼ上流>下流の序列パターンに近い形となり、NO₃⁻-N、Inorg.-N、Org.-N、T-Nと、ほとんどのNがこの序列を大幅に乱す結果となった。

また、水質因子別に見た流出負荷量の変動係数の特徴は、Cl⁻が3河川の年別、季節別の全てと、山王川の3地点の1季節を除いて、1.0以下となる。SSがほとんどの季節および地点で、最も大きな値となることが多いほか、Org.-Pがいずれの河川、地点および季節でも1.0を大きく超え、Org.-NとNO₃⁻-Nも1.0を超えることが多い。河川別では、市街地河川の山王川で、地点別では山王川の石岡市街地下流側と流出端で、NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P、Cl⁻およびCODなど人為的な汚濁の指標となる水質因子の変動係数が小さく、安定した流出負荷量変化を示していることがわかる。また、比流量や比流出負荷量の大きさからも、生活排水、畜産排水、工場排水など人為的負荷のウェイトの高い流域での変動係数の小ささがわかる。

このように、人為的な汚濁の指標となる水質因子の流出負荷量の変動特性としては、市街地化の程度をはじめ、流域の汚濁負荷の累加する方向に変動係数が小さくなり。山地や農耕地など自然的な土地利用のウェイトが高く、降雨時流出の影響の大きい流域では、晴天時と降雨時との間の変動幅が大きく、変動係数も大きくなる傾向が明らかとなった。

7. 降雨時流出の影響と期間流出負荷量の補正

対象とした3河川流域では、柿岡の降雨観測所を基準にすると、1979年6月から1980年5月までの1年間に1332mmの降雨量があり、内容的には前線性の長雨が多く、晴天も雨天も連続することが多かった。長期間継続の降雨でも、8時間近く降雨量0が続けば別個の降雨として数えることにすれば、1年間におよそ93回の降雨があったことになる。その降雨の降雨量による内訳は表-3のとおりで、ほぼ4日に1度、約14.3mmの降雨があったことになるが、93回のうちの半分が8mm以下の降雨に占められ、降雨強度が高く、先行晴天期間の短いものでなければ、山地河川や田園地河川には降雨による直接流出の影響がほとんど現われない降雨となる。流量や流出負荷量にかなり大きな影響をもたらす21mm以上の降雨は、年間降雨量の64%を占め、1カ月に2回程度の頻度であり、そのほとんどが2日間にわたる降雨となっている。40mmを超えるような豪雨でなければ、通常の中小河川では、流出負荷量への影響は3~4日間程度となり、短期間で降雨前の流出負荷量レベルに復帰することが多い。6)、7)、8)

とくに、流域は小規模ながら比流出負荷量の大きい市街地河川の山王川においては、毎週1回の定時流出負荷量観測のほか、1979年6月から1980年5月までの1年間に、流下方向に3地点で晴天時24時間流出負荷量変化観測を4回、降雨時流出負荷量変化観測を3回実施しており、晴天時の流出負荷量の周日変化パ

表-3 年間降雨の内訳(1979年6月~1980年5月)

降雨量範囲	42~105mm	31~36mm	21~29mm	16~19mm	11~15mm	6~10mm	1~5mm
降雨回数	7回	5回	11回	7回	12回	14回	37回
合計降雨量	416mm	163mm	272mm	128mm	158mm	112mm	83mm
降雨量比率	31%	12%	21%	10%	12%	8%	6%

ーンにおける毎週1回定時観測値の位置づけや、平均的な晴天時24時間流出負荷量に対する降雨時流出負荷量の相対的なウェイトの高さなどは、明らかとなっている。³⁾

山王川の流出端における降雨時流出負荷量変化観測では、降雨量が58mmで、降雨強度に大きなピークが見られた降雨時流出の約31時間の観測期間内に、また降雨量が36mmで、降雨強度に大きなピークのない降雨時流出の約36時間の観測期間内に、およそ晴天時の5日分の流量が流出し、流出負荷量ではさらにこの5日分をはるかに上回る水質因子が多く、SSの30日分以上に達するものまである。降雨量が7mmで冬季渇水期の降雨時流出では、16時間の観測期間に、前日観測された晴天時24時間流出負荷量の1~7日分の流出があった。このように市街地を流下する小河川では、降雨に対する流出応答が鋭敏で、先行晴天期間や降雨強度など降雨条件によっては、小降雨量でも流出負荷量にかなりの影響を及ぼすほど、山地河川や田園地河川とは異なる流出特性を有しており、降雨時流出負荷量のウェイトを加味した期間流出負荷量の算定は、毎週1回定時観測値の流出負荷量の周日変化パターンにおける位置づけとともに、重要な留意点となる。

ちなみに、山王川の流出端における流出負荷量の周日変化パターンから、毎週1回の定時観測時の流量が日平均値の7%増の値になるのに対して、流出負荷量ではほとんどの水質因子が流量の比率をかなり上回る値となっている。さらに、石岡市街地下流側地点においては、流量の定時観測値が日平均値の17%増の値に達し、流出負荷量のそれは流量の比率を上回る³⁾。したがって、市街地河川での定時観測による流出負荷量には、水質因子ごとの周日変化における位置づけのチェックが必須のものとなる。

8. 結 語

流域内の負荷発生源に大きな変化が見られないと考えられる連続した2年間の毎週1回の定時観測結果を中心に、期間流出負荷量の変化とその特性の評価の検討を行なった。1年毎の流出負荷量は、降雨量、したがって流量変化に応じた違いが見られ、水質因子や流域によって、それぞれの流出特性の違いによる変化の比率に差違が見られた。年間あるいは季節別の流出負荷量の流量変化との変動係数の対応関係、流域内の負荷の内容構成を反映する比流出負荷量の流域特性と変動係数との関係などが明らかとなった。また、市街地河川では小降雨量でも降雨時流出の影響がかなり大きく、流出負荷量の周日変化パターンにおける定時観測値の位置づけとともに、期間流出負荷量の算定や評価、観測頻度のとり方などで留意すべき重要な問題である。

ここで対象とした3河川が流入する霞ヶ浦高浜入は、富栄養化が深刻化しており、流入河川の栄養塩や汚濁物質の寄与分を明らかにし、かつ、高浜入湾形部における栄養塩の挙動や物質収支との関係から、季節別あるいは月別に流入河川の湖に与えるインパクトの大きさをも評価するために、期間流出負荷量の変化とその特性に注目した研究の一部である。^{1),2)}年間および季節別の流出負荷量には、降雨量や流出の変化がかなり反映されているが、月別流出負荷量は観測頻度との関係もあって、バラツキが大きく、精度の高い結果を得ることが難しく、降雨時流出負荷量の影響の程度のチェックが重要な課題として残る。

なお、栄養塩とCODの分析にはオートアナライザーを利用し、CODはアルカリ性Mn法によっている。また、1978年には当時国立公害研究所研究員、津野 洋氏（現在、環境庁）に共同研究者として、御協力を頂いていることを付記し、謝意を表わす次第です。

参 考 文 献

- 1) 津野・村岡・細見：山王川流出汚濁負荷量に関する研究，国立公害研究所報告，第6号（1979）
- 2) 津野・相崎・村岡他：高浜入水域への栄養塩の河川からの流入量について，国立公害研報告，第6号
- 3) 海老瀬・村岡・大坪：小河川における総流出負荷量の観測と評価，第24回水理溝渠論文集，（1980）
- 4) 荒井・佐藤：河川水質変動の一般的特徴，河川，*40*1，pp.20-37，（1979）
- 5) 山口・吉川・奥石：河川の水質・負荷量に関する水文学的研究，土木学会論文報告書，*293*，（1980）
- 6) 海老瀬他：市街地小河川の水質および負荷量の変動特性，第12回水質汚濁研究に関するシンポ，（1978）
- 7) 海老瀬他：市街地河川における降雨時流出負荷量の変化特性，水質汚濁研究，Vol.2，*1*，（1979）
- 8) 海老瀬潜一：小河川の降雨時流出負荷量の算定と評価，環境技術，Vol.9，*4*，pp.5-13，（1980）