

小 河 川 に お け る 総 流 出 負 荷 量 の 観 測 と 評 価

Field Survey and Evaluation of Total Pollutant Load in Small River.

国立公害研究所 水質土壌環境部 正員 ○ 海老瀬 潜一
村岡 浩爾
大坪 国順

1. 緒 言

小河川は、大河川と比べると、一般に流量・水質の監視体制の整備が遅れており、その数の多さにもかかわらず、晴天時と降雨時の両者の流出を併せた観測資料はほとんどない。ことに、降雨時の表面流出と早い中間流出から成る直接流出分の流出全体に占めるウェイトは、流量・水質とも非常に大きいにもかかわらず、晴天時と比較しうるに足るほどのデータの蓄積は皆無に等しい。その晴天時のデータでさえ、1日の1時点の測定値にしか過ぎず、周日変化の中での位置づけもなされていないのが現状である。とくに市街地を流下する小河川の流量・水質の変化の幅は、降雨時はむしろのこと、晴天時においても人為的な影響を受けるために大きく、きめ細かな観測が必要となる^{1),2)}。小河川流域では、雨の降り方の一樣さや降雨に対する流出応答の鋭敏さによって、降雨時流出負荷量変化の現象を比較的単純な形で捉え易い。したがって、小河川の流出負荷量の変化特性の検討や、晴天時と降雨時を併せた総流出負荷量の算定とその構成内容の評価には、流域の地形や土地利用状態などの流域特性と流出特性を含めた広い意味での水文特性や、河川の流出先水域への影響との関連から、どのような調査がどの程度必要であるかが、その精度も含めて重要な問題となる。ここでは、茨城県石岡市の市街地を流下し、霞ヶ浦高浜入に流入する小河川で、汚濁負荷量の高い山王川における各種の観測結果を対象に、有機汚濁物質や栄養塩について総流出負荷量の検討を行うことにする。

2. 山王川流域と各種観測の概要

山王川は、流域面積約 12.8Km²、流路延長約 7.8Km、河床勾配 28 %。で、上流部に非用水型の工業団地と田畑、中流部に石岡市の市街地と工場群、下流部に田畑を擁する流域である。石岡市街地は、下水道の幹線建設が始まった段階で、市街地の生活排水や路面排水、中小規模の各種工場・事業所の排水、および養豚による畜産排水などが山王川に排出されている。流域内水田の灌漑用水の大部分は、ポンプによる地下水の汲み上げに頼っており、その排水は受け入れているが、本川からの直接取水はない。このように山王川流域は、市街地部と田園地部を含み、汚濁発生源としては、家庭雑排水と工場排水など点源(特定)汚濁負荷と、田畑や路面など面源(非特定)汚濁負荷で構成され、晴天時には前者のウェイトがかなり高く、降雨時には後者のウェイトも高い。

定期観測は、流域内の土地利用状態を考慮して、流下方向の 4 地点での毎週 1 回の流量・水質観測、中・下流部 3 地点の河床に

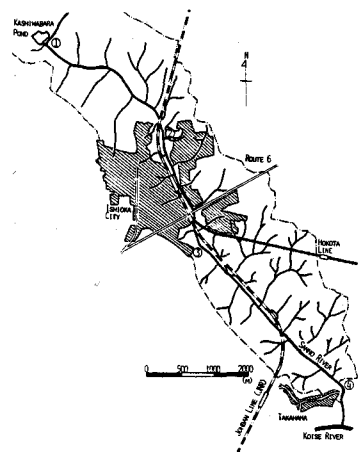


Fig.1 Basin of R.Sanno

敷設したブロック上の沈澱堆積物量および付着生物量の 2 週間毎の観測と同じ量の毎月 1 回の 1 週間量の観測、および下流 2 地点での 2 週間毎の底泥の採取・分析調査から成っている。これに、上記 4 地点のうち、上・中・下流部各流出端付近の 3 地点において、晴天時 24 時間流量・水質の周日変化観測と降雨時流出の流量・水質変化観測の不定期観測が加わる。山王川の上流および下流の 2 地点については、流量・水質の毎週 1 回の定期観測を 1978 年 6 月以降、晴天時 24 時間周日変化観測を 1977 年度中に 3 回実施している^{3),4)}。本研究では、観測の地点および種類を追加した 1979 年 5 月末からの観測結果をもとに、解析を進めることにする。

3. 山王川の水文特性

霞ヶ浦周辺地域の年平均降水量は1,300~1,400mmと、茨城県内でも最も雨量の少ない地域である。山王川の年間流出量は、昭和47年の建設省の調査資料によると $205 \times 10^6 m^3$ 、1年間の流出率は111.3%と非常に高い。これは、流域内に不浸透性地表面積率の高い市街地が存在し、降雨による流出率が高いだけでなく、都市生活用水としての上水道や工業用水の地下水取水を通じての排水量が、大きなウエイトを占めているからである。石岡市の1日平均給水量 $10,600 m^3$ の水道水の全てが、損失なしに山王川に排出されるとすると、山王川の年間流出量の約19%に達することになる。石岡市内の排水は、東西の市域境界付近を流下する2河川にも一部は流出するが、この値が工場や水田灌漑用の地下水揚水による排水量を含まぬことや、年間流出量が降雨時流出量も含んだものであることを考慮すると、下水道が未整備の都市における生活排水の市街地小河川の晴天時流量に占めるウエイトの大きさが理解できよう。

4. 晴天時の流量・水質周日変化の特性

山王川の晴天時における流量・水質の周日変化は、流域内中流部の市街地の生活および生産活動を中心とする人為的な影響を強く反映した典型的な市街地河川の変化パターンを呈し、長期的で安定した変化が主体である田園地河川とは性格を異にする。とくに市街地直下流の地点③では、Fig.2に示すように、流量と水質濃度とも昼間高く、夜間に低い特徴ある変化パターンが顕著に認められる。Fig.2は、7月30~31日の晴天時の24時間観測結果から、各時刻の日平均値からの変動量として示したものである。これより、流量と水質濃度の積である流出負荷量の周日変化パターンは、さらに大きな凹凸の変化となることは自明である。この市街地直下流の流出負荷量変化は、Fig.3に示す一般的な都市水道の給水量の周日変化パターンとよく以ており、その排水の流出までの時間遅れも考慮すると、山王川では都市用水の排出パターンに支配されていることは明らかである。ただし、流量については、変動がほとんど安定している市街地上流分の平均値を差し引いている。

このほか6月27~28日、10月22~23日に実施した24時間観測の結果では、流量・水質濃度とも、先行降雨条件や季節変化などによる日平均値の差違は認められるけれども、その周日変化パターンはほぼ同じであった。

水質項目ごとに検討すると、そのベースとなる値の大きさに対する人為的な影響度の強弱や流出負荷量発生源（あるいは排出源）の差異によって、最大値、最小値、標準偏差などで表わされる変動の大小や変化パターンの時間のズレがかなり存在することがわかる。変動量の小さいものには、塩素イオンと溶解性COD、大きいものにはSS、リン酸態リン、アンモニア態および硝酸態窒素が挙げられる。

最下流の地点④では、地点③の変化がいくらか平滑化された形で伝達される。しかし、SSや浮遊性CODなど浮遊性物質の流出負荷量は、地点③より地点④の方が小さく、晴天時の流量の大きさと変動程度ではその流送過程で $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$ と大量の沈澱堆積物量が生じていることになる。

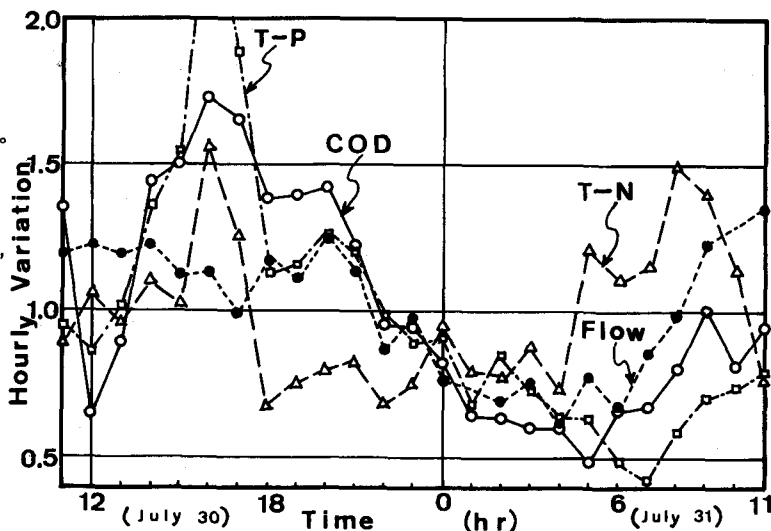


Fig.2 Diurnal Variation of Water Quality.

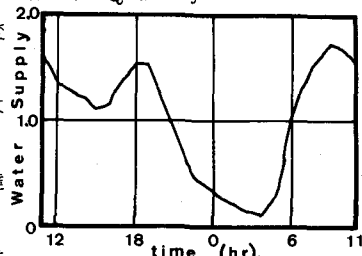


Fig.3 Diurnal Variation of Water Supply

5. 定期観測結果の検討

山王川の上流部、石岡市街地の直前・直後および下流部流出端の流下方向4地点において、毎週1回の流量・水質濃度の定期観測を実施した。観測結果の例として、最下流の地点④について示したものがFig.4である。6～9月は降雨量が少く、全般的に低流量で、変動が小さくて少く安定した状態が続いた。9月下旬と10月中は降雨量も多く、高流量で変動が激しく、変動幅も大きい。11月は比較的安定した状態を呈した。

一般に、市街地小河川では、有効降雨による直接流出の影響は、比較的短期間で消えるため、降雨の頻度や1降雨の降雨量の大きさを考慮すると、1週間という間隔では降雨による高水時も十分把握しているとはいえず、毎日定時観測のような頻度の高い調査ほど精度は高くない。もちろん、流量変化は降雨データによって比較的精度の高い推定も可能であるが、水質変化の追跡が問題となる。山王川の場合、塩素イオンと溶解性CODなどの溶解性成分は比較的分動が小さいので、変動の多いSSや浮遊性CODなど浮遊性成分の変化を追跡すればよい。したがって、毎週1回の観測間隔の間を埋める手段として、晴天時24時間調査の頻度を高めるほかに、流量・水質変化の履歴をとどめる河床沈澱堆積物質の定期調査も有力な手段となる。

石岡市街地下流の地点③と④の間および最下流の地点④の2カ所の河床底泥の分析を2週間間隔で実施したほか、10cm×20cm×5cmのコンクリートブロックを人工付着板として河床に敷設して、ブロック上の沈澱堆積物質量および付着性生物量の分析を上流部以外の3地点で2週間間隔で、およびその1週間調査を毎月1回実施した。

この底泥および沈澱堆積物質量の調査から、行先晴天期間や降雨時流出の流量減少期に沈澱堆積して、後の流量変化による掃流・剝離あるいは沈澱堆積の有無や程度を積分量として得ることができる。Fig.5は、ブロック上の沈澱堆積物質の乾量と強熱減量を地

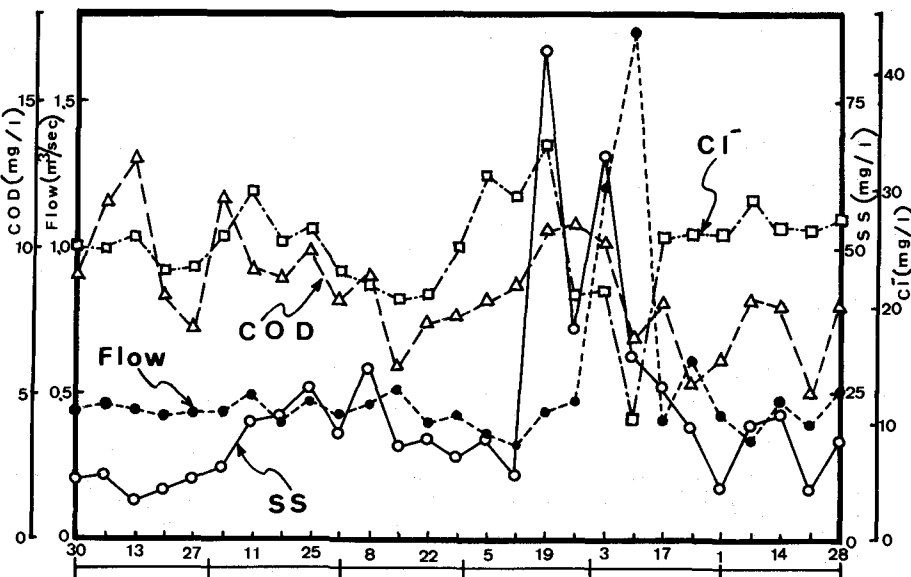


Fig.4 Variation of Water Quality by Weekly Observation

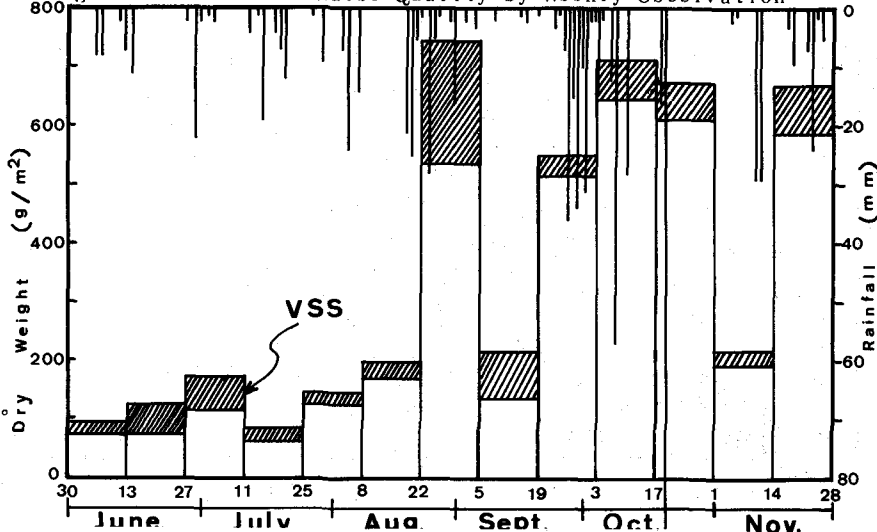


Fig. 5 Variation of Deposit on Block by Biweekly Observation.

点③について示したものである。これより、降雨流出の影響の大きさも明らかとなる。強熱減量は乾量中に占める有機物質量を示す指標であり、乾量との差は砂や土など無機物質量となる。乾量に対する強熱減量の比の大きな変動の原因は、砂や土粒子の無機物質の変動であり、これにも降雨流出の影響が現われている。

また、底泥の分析結果から、その表層を占める浮泥層の厚さが0～1.0 cm程度と大きく変動するが、その下の砂層(約8 cm程度)、砂・粘土混合層(約5 cm程度)および粘土層の厚さには大きな変化が見られなかった。底泥の比重は、0～3 cmの層は2.1～2.7と変動が大きく、2.4～2.6の範囲に多い。底泥中の強熱減量は、0～3 cmの層ではそれ以下の層より数多大きいことが多い。粒度分析より、0～3 cmの表層では、0.1～0.5 mmの粒径のものが中心であり、1～2 mmの粒径の多い3～8 cmの層とはその構成が異なる。したがって、表層の変化に注目することによって、流水と河床間の物質の挙動を追跡できる。

6. 降雨時流出変化の観測

降雨時流出の流量・水質観測は、晴天時24時間観測と同じ流下方向の3地点で行った。最下流地点④の流量・水質変化の観測例をFig. 6に示す。これは、11月10～11日の降雨で、総降雨量58 mm、時間最大降雨量4 mm降雨継続時間24時間、先行晴天日数6日(有効降雨では21日、台風20号以来の降雨)であった。降雨パターンおよび流量変化から、水質変化にも4つのピークが見られるが、変化の波の高低は、流量と水質とは異なり、流出物質の構成内容の違いが明らかとなる。すなわち、11:30～12:30の降雨による流出はfirst flushにあたり、流量増加に比べて水質濃度の上昇がはるかに大きく、とくにSSや浮遊性CODなど浮遊性成分の増加が顕著であり、降雨流出前の値とは流量の2.7倍に対して1オーダー高い濃度となっている。このfirst flushにおいては、人為的な発生源に由来するアンモニア態窒素、塩素イオン、リン酸態リンおよび溶解性CODの溶解性物質も、一時的に増加し、その後減少する。浮遊性物質の場合は、側溝・河床および流域内地表面に貯留されていた堆積物質の流出がfirst flushの大半を占めるが、溶解性物質の場合は、浮遊性物質の周辺や凹地での貯留が考えられ、市街地河川でとくに目立った傾向である。

流出負荷量としては、河道内や流域内での貯留物質および負荷発生源での排出可能な物質の減少に伴い、流量の最大ピークより一つ前のピーク時に負荷量の最大値に達した。しかし、降雨強度によっては、流域内斜面や裸地からの土壌の侵食流出が大きく、流量の最大ピーク時にSSも最大ピークになることがある。

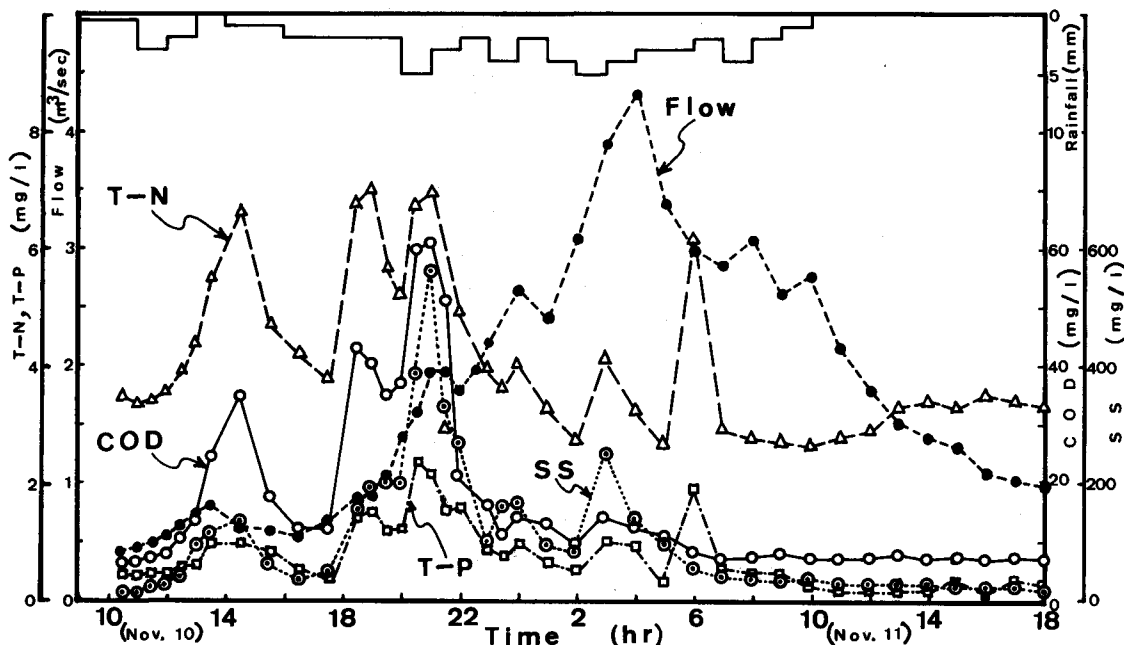


Fig. 6 Variation of Water Quality under Rain Event.

さらに降雨時流出の流量と水質濃度との相対的な変化を詳しく検討するために、流量対SS、流量対全CODの経時変化として示したものがFig.7および8である。この両者の関係から、浮遊性物質や浮遊性成分が大きなウェイトを占める水質因子については、水質濃度あるいは水質濃度と流量の積である負荷量が、単に流量のみの簡単な関係として表現し得ないことが明らかである。しかし、溶解性物質や溶解性成分の大きな水質因子については、その流量変動幅に対する変化があまりに小さく、水質負荷量は流量の関数として十分近似できると考えられる。

この11月10～11日の降雨は、6日前に2mmの降雨があったものの、10月18～19日の台風20号による105mm以来の本格的な降雨流出となっている。観測を打ち切った時点では、水質濃度はほぼ降雨以前の状態に復帰しつつあるが、流量は依然として降雨以前の2倍程度を維持し、長い減衰状態が続くことになる。この観測終了時までの最下流地点④における総流出負荷量は、7月30～31日の晴天時1日流出負荷に対して、SSで2.9倍、全CODで9倍、全窒素で7倍、全リンで4倍、塩素イオンで2.4倍となり、総流出負荷量に占める降雨時流出のウェイトの大きさがわかる。ちなみに観測終了時の総流出流量は45倍で、流出率は0.38であり、大きな流出量となることの多い25mm以上の降雨は、1979年6月以来12回を数えている。

7. 総流出負荷量の算定と評価

流域面積の31.5%が市街地、40.0%が畑地・水田8.0%樹林地11.5%と、面源の汚濁負荷が目立つ流域内の土地利用構成であるが、これらは降雨時流出において大きなウェイトを占め、晴天時には家庭の雑排水と工場・事業所の工場排水のような点源負荷のウェイトが大きいことは24時間周日変化観測から明らかとなっている。また、晴天時における浮遊性物質の側溝や河道内での沈澱堆積量の多さも考慮すると、晴天時と降雨時の両者を併せた取扱いが総流出負荷量の算定や評価には必須のものとなる。とくに、水質項目ごとに、晴天時と降雨時のそれぞれにおいて、どのような挙動をとるか、その流出特性を十分把握しておくこと

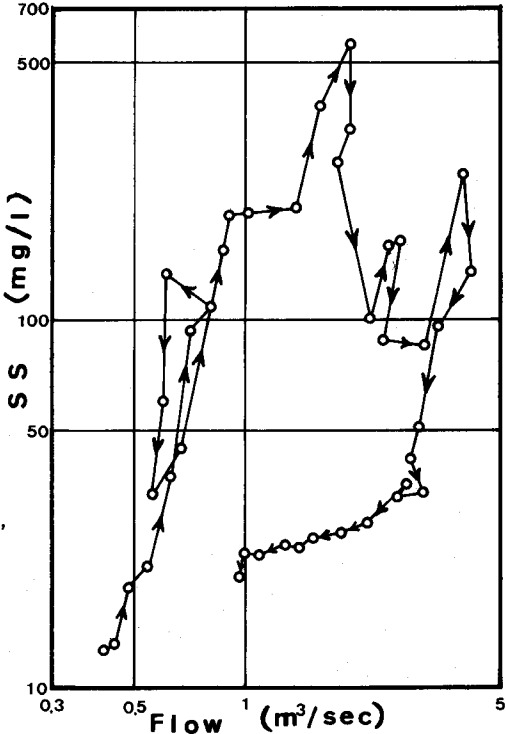


Fig.7 Relationship between Flow and SS.

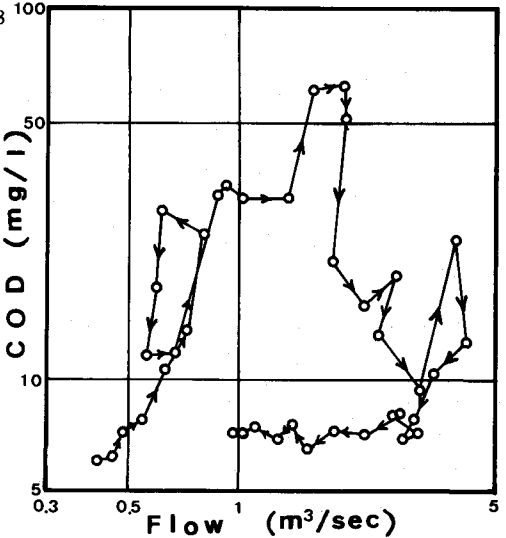


Fig.8 Relationship between Flow and COD.

が重要である。Table 1は、7月30～31日の晴天時24時間観測と毎週1回の定期観測の各水質項目と流量の統計的な特性値を、最下流の地点④について比較したものである。塩素イオンは、両者の観測の場合とも同程度の値をとり、変動の少ない水質因子であることがわかる。また、通常の前晴天時には、全COD中に占める溶解性CODの比率が50%に近いため、変動の小さい溶解性CODを反映して、全CODも両観測で大きな差は見られない。しかし、SS、全窒素、全リンについては、周日、週間・季節変化とも大きい。

したがって、毎週1回の定期観測値も、24時間周日変化の中での位置づけを確定して、週間変化の補正を施し、季節変化を追う必要があり、とくに流量レベルについては年間を通じての平均値とのチェックがいる。

5), 6), 7)

降雨時流出負荷量については、総降雨量、降雨強度、先行晴天期間など降雨条件によって大きく異なるため、各種の降雨パターンの観測例を積み重ねた上での検討が必要である。この山王川では、6月27～28日の晴天時24時間観測中に、総降雨量4mm、時間最大降雨量2mmのにわか雨が有り、24時間流出負荷量に一時的な影響が現われた。これまでの他の河川

Table 1. 水質変動の統計量比較 (単位: mg/ℓ , $\text{m}^3/\text{秒}$)

	特性値	SS	全SOD	Cl^-	全窒素	全リン	流量
24時間観測	平均値	16.7	7.5	24.8	2.51	0.79	0.53
	標準偏差	2.35	0.89	2.63	0.75	0.22	0.05
	変動係数	0.14	0.12	0.11	0.30	0.28	0.10
毎週観測	平均値	21.9	8.6	25.0	3.94	0.68	0.51
	標準偏差	17.1	1.89	4.30	1.85	0.33	0.29
	変動係数	0.78	0.22	0.17	0.47	0.49	0.56

での観測経験も含めると、市街地河川の場合、約4mm程度の連続降雨から影響が出現している。

したがって、降雨時流出に関しては、降雨量データから有効降雨による表面流出と早い中間流出とから成る直接流出分の流量を推定し、先行降雨期間内の流域表面や河道内の貯留物質量を考慮した流出負荷量解析を行う必要がある。⁹⁾ とくに、山王川の年間流出流量(昭和47年実測値)から求めた平均流量 $0.65\text{m}^3/\text{秒}$ と、毎週1回の定期観測による半年間の平均値 $0.51\text{m}^3/\text{秒}$ との差の $0.14\text{m}^3/\text{秒}$ が、ほぼ降雨時流出分と考えられる。この降雨による平均流量の22%の流量の上乗せ分に対して、流出負荷量では何%の上乗せに相当するかの推定が問題となる。この降雨時流出流量は、石岡市の水道の1日給水量の河川流量相当分と同程度であり、この人為的な排水量と、残り60%弱の晴天時の自然流出流量分との、負荷量での比較検討を進めている。

8. 結 論

山王川のように、上水や工業用水を通じて別水系から導水され、排出される人為的な影響による流出負荷量のウェイトの高い市街地河川では、晴天時に側溝や河道内に流入した浮遊性物質は、その流下過程で沈殿堆積し、降雨時に掃流・浮流の形で流出し、その量は無視し得ないほど大きいものである。また、河道内では、ミズワタや藻類など河床上で増殖し、剝離流出する付着性生物群とそのトラップ効果による抑留作用も手伝って貯留される浮遊性物質も含めて、先行晴天期間中に大量の貯留・堆積物質が存在する。さらに、市街地の路面上などの流域地表面上に貯留される負荷量も考慮すると、自然的な負荷のウェイトが高い田園地河川や、長期的で安定した変化を呈する大河川と同じように、単に流量(Q)のみの関数として負荷量(L)を $L = aQ^n$ のような経験式で表現することには無理がある。とくに河道内での生物による栄養塩の摂取、有機物質の分解に伴う水質変化や、それ自体浮遊性物質としての挙動をとる付着性生物群の河川水質との関係も無視し得ないことが多い。また、晴天時でも変動することの多いSSや浮遊性CODの他、窒素やリンの浮遊性成分の降雨による流量増加時のウェイトは、溶解性成分の多い晴天時のそれとは逆転する。

したがって、晴天時と降雨時の両者における水質因子それぞれの流出特性を十分に把えた上で、両者を併せた総流出負荷量の算定と評価を行うことが肝要と考えられる。

終りに、定期水質分析では相崎守弘氏(国立公害研究所)の御協力を得たことを記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 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)
- 2) 海老瀬他：市街地河川流達負荷量変化と河床付着性生物群(1)，(2)，用水と廃水，Vol.20，(12)，21，(2)
- 3) 津野・村岡・細見：山王川流出汚濁負荷量に関する研究，国立公害研究所研究報告，第6号，(1979)
- 4) 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
- 5) 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)
- 6) 海老瀬他：降雨時流出過程における流出物質の挙動，第7回環境問題シンポジウム，(1979)
- 7) 海老瀬他：小河川における晴天時流出負荷量と降雨時流出負荷量，第34回土木学会年講，第Ⅱ部，(1979)
- 8) 海老瀬他：タンクモデルを用いた降雨時流出負荷量解析，用水と廃水，Vol.21，№12，(1979)