

降雨流出過程における流出物質の挙動

国立公害研究所 正員 ○ 海老瀬 潜一
 京都大学工学部 正員 宗 宮 功
 労働省 安全課 平 野 良雄
 大阪府 土木部 安 達 伸光

1. 緒 言

河川の流出負荷量の解析では、晴天時と降雨時における流出物質の挙動の相違を考慮した取扱いが必要なのは言うまでもない。降雨時流出には、晴天時と比べて流量変化が大きく、流出物質の構成と流出量に大きな差異が見られる。それも、溶解性物質と浮遊性物質とに分けた場合、その流出挙動の違いは浮遊性物質の方が著しい。これは、河道内や流域内において、各降雨の先行晴天期間に貯留・堆積される物質量との関係が強く、この流出に伴い、降雨時の流出過程における流出負荷量の経時変化の原因として、降雨パターンや流量変化に次いで貯留・堆積量が大きなものとして考えられる。また、降雨流出過程における流量および水質の流出特性は、各河川の流域特性、とくに、流域内の土地利用状態によって大きく異なることは明らかである^{1~5)}。したがって、流出物質の負荷量変化は、負荷発生源の平面的および深さ方向の位置関係と存在形態に左右されることがわかる。

2. 調査河川の概要

調査・解析の対象とした河川は、流域内での雨の降り方が一様で、降雨流出特性を比較的単純な形で捉え易いと考えられる大きな支川を持たない小河川で、琵琶湖西岸部の琵琶湖に流入する一級河川の大宮川、真野川および和邇川である。大宮川は上流部が山林、下流部が市街地の急勾配河川である。真野川と和邇川は、互いの流域を接した規模も同程度の河川で、両者とも上流部に山林、中・下流部に農耕地と散在した集落を有する流域である。この3河川の調査は、琵琶湖に流入する小河川群の流出負荷量調査の一環として、1976年の葉山川（上流部は山林、中・下流部は農耕地）と中ノ井川（上流部は農耕地、中・下流部は集落と工場）、1977年の相模川（上流部は山林、下流部は市街地）の調査に続いて、1978年に実施したものである。これら6河川の観測地点はいずれも琵琶湖へ

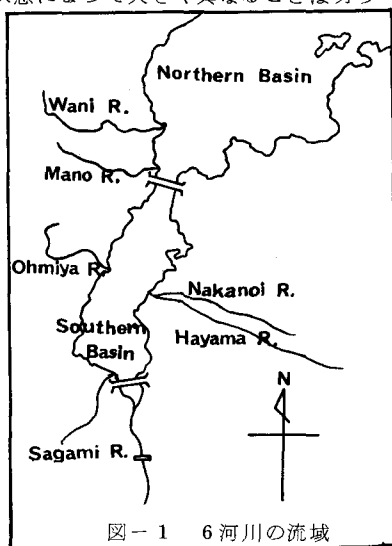


図-1 6河川の流域

表-1 3河川の流域特性

の流入端付近に設置した他、大宮川では土地利用状態の大きく変化する上・下流部の境界にもう1つの観測地点を追加した。なお、上記6河川とも晴天時に24時間周日負荷量変化観測を数回行なっており、晴天時の流出挙動をおさえた上で、総流出負荷量に大きなウェイトを占める降雨時流出に焦点を絞り、流出物質の挙動を検討することとする。議論は今回の3河川を中心に展開し、前回までの3河川との比較検討をまじえることにする。図-1は6河川の位置関係を、表-1は各河川の流域特性を示したものである。

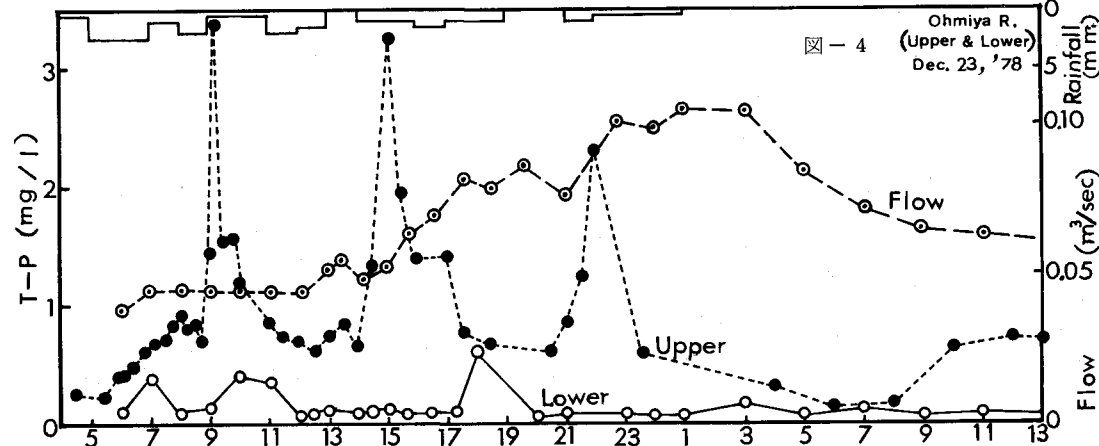
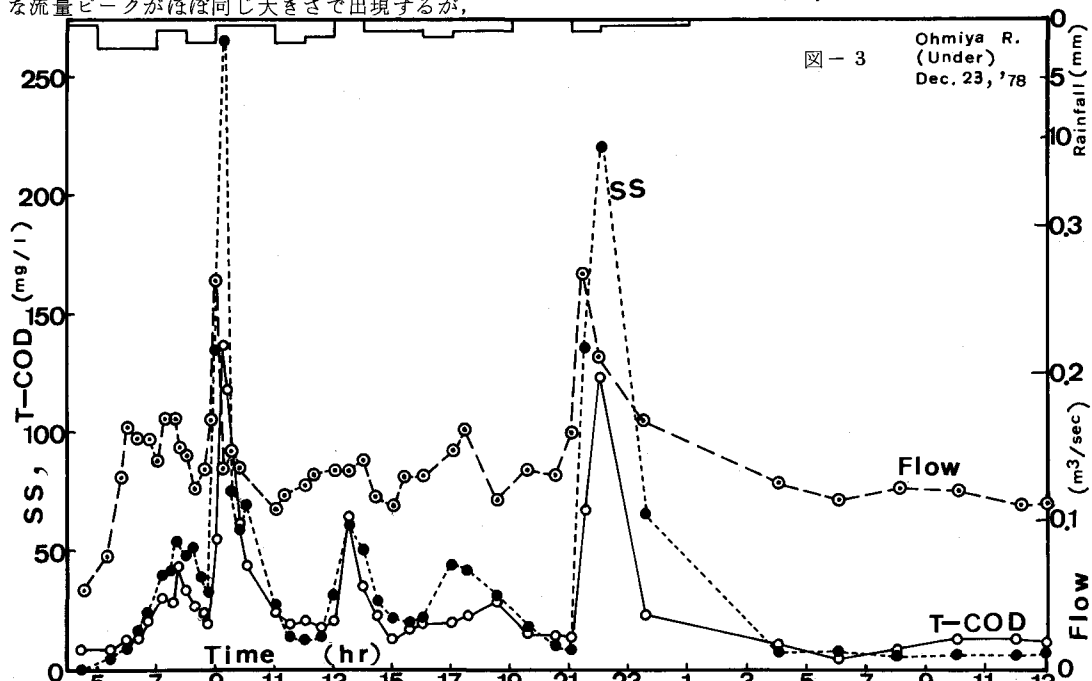
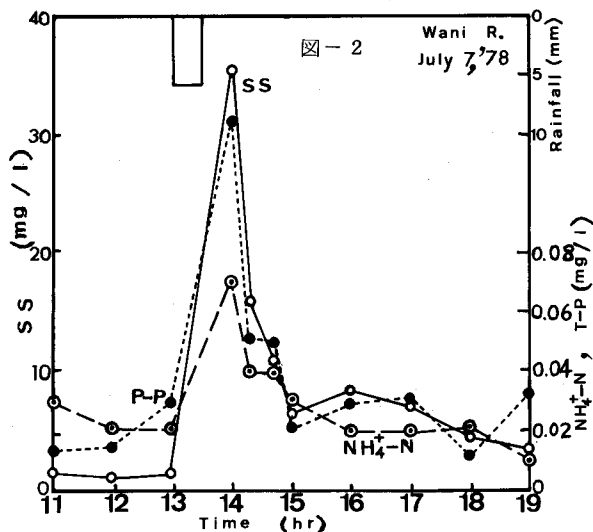
	流域面積 (Km ²)	河川長 (Km)	流域人口 (人)	耕地面積 (Km ²)	山地面積 (Km ²)	平地面積 (Km ²)
大宮川	6.3	8.0	3773	0.42	5.7	0.6
真野川	16.6	22.0	3483	6.68	11.3	5.3
和邇川	17.0	11.3	1450	1.73	16.9	0.1

3. first flushと貯留・堆積量

降雨時流出の初期の段階には、first flushと呼ばれる高濃度負荷の現象が見られ、先行晴天期間における河道や側溝および流域地表面の貯留・堆積物質の流出のウェイトが高い。浮遊性物質においてその傾向が著しいが、溶解性物質でも人為的な汚濁源の寄与の大きい市街地河川では、 Cl^- 、 NH_4^+-N 、 PO_4^{3-} 、

S-CODなどにこの傾向が見られる。図-2は和邇川における7月7日の降雨量6mmの夕立の場合の観測例である。SSとP-Pはむろんのこと、 NH_4^+-N の濃度上昇も顕著である。ちなみに、この降雨の先行晴天日数は6日である。

また降雨パターンによっては、最初の流量ピークの後に同程度の流量ピークが出現しても、後の流量ピーク時の濃度は最初のそれよりも小さい水質が多い。これは、流域内での貯留・堆積物質の量的変化の影響が大きいほか、負荷発生源の位置と存在形態の変化も関与していると考えられる。図-3は、大宮川下流地点における12月23日の降雨の観測例である。2つの大きな流量ピークがほぼ同じ大きさで出現するが、



両ピーク時のSSとT-COD，およびT-COD中の95%以上を占めるP-CODの濃度のピークは，いずれも最初の流量ピーク時の方が大きいことがわかるほか，各ピークごとに負荷発生源の構成が少しずつ異なり，上流部の山林からの流出の時間遅れも反映した流出物質量の経時変化を追跡することもできる。

4. 流出特性および降雨量と流出パターン

対象とした3河川はいずれも，山林，農耕地，市街地の流域に占める比率が高いため，面源あるいは非点源汚濁のウェイトが高く，それぞれの土地利用状態に左右される保水能や地下浸透能の差違や，地表面の植生や勾配の関与した凹地貯留やトラップ現象など各流域の流出特性を反映した降雨流出現象が見られる。とくに，大宮川の上・下流部では，下流部の市街地の流出の早さと，上流部の山林からの流出の時間遅れのほか，人為的な汚濁源の有無や程度によって流出濃度や負荷量の大きさがはるかに違ってくるということがわかる。図-4の大宮川の上・下流両地点におけるT-P濃度の変化は，両者の変化の度合が比較的小さい例である。図-3，4から上・下流の流量変化も併せて考慮すると，負荷量変化としてはさらにその差違が倍加され，上流部の小さな変化は，下流部の大きな変化とは同一スケールでは取り扱えないほど小さなものとなる。

また，流域面積がほぼ同じで，隣接する流域の真野川と和邇川の同一降雨に対する流出特性の比較を行なってみる。和邇川は，真野川と比べて，河川勾配が急で，河川長も短いほか，流域内の農耕地が少なくて山林のウェイトが高く，流域人口も少ない。したがって降雨に対する流出応答が鋭く現われるほか，山林からの流出のウェイトの高さを反映して，大きな降雨量の場合，流出後半のtailing現象が長く続くことになる。図-5は総降雨量6mmと小降雨の夕立の場合，図-6は総降雨量65mmの大降雨の台風の場合の観測例である。6mm程度の小降雨では，流域内表面，とくに河道内の貯留・堆積物質の流出が顕著である。両降雨とも降雨強度の大きい雨であったが，9月16日の台風の場合は，いずれの水質とも鋭いピーク濃度を有したほぼ同様の流出パターンを呈した。図-6は，測定項目中でも最も鈍いピークの NO_3^- -Nの例である。

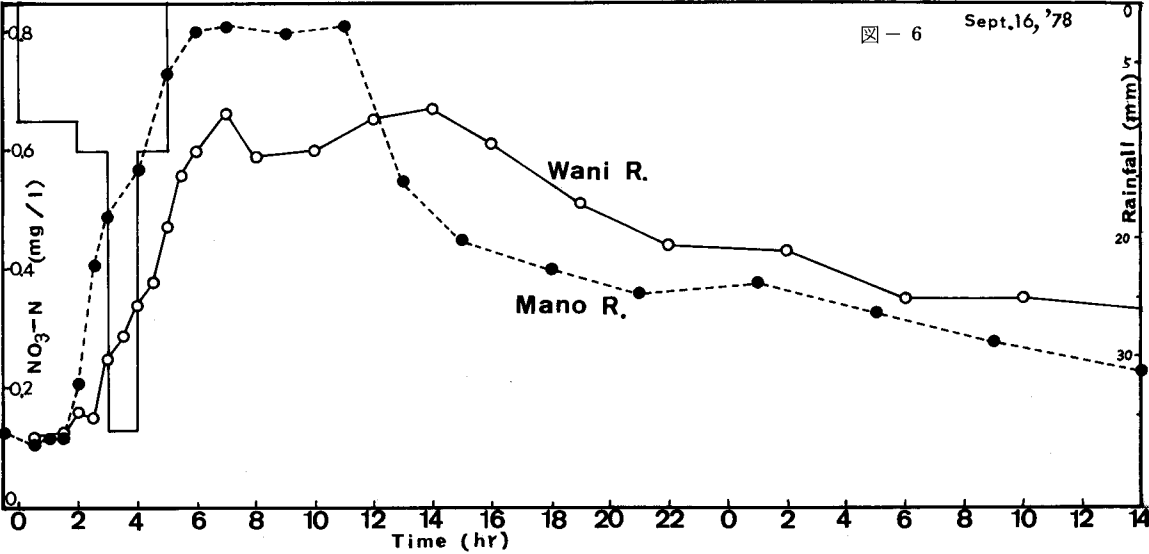
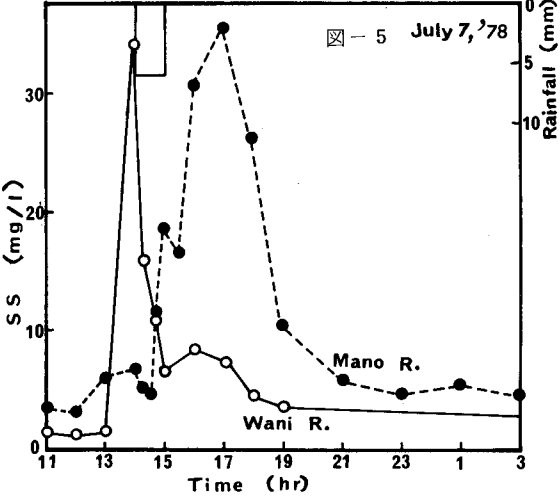
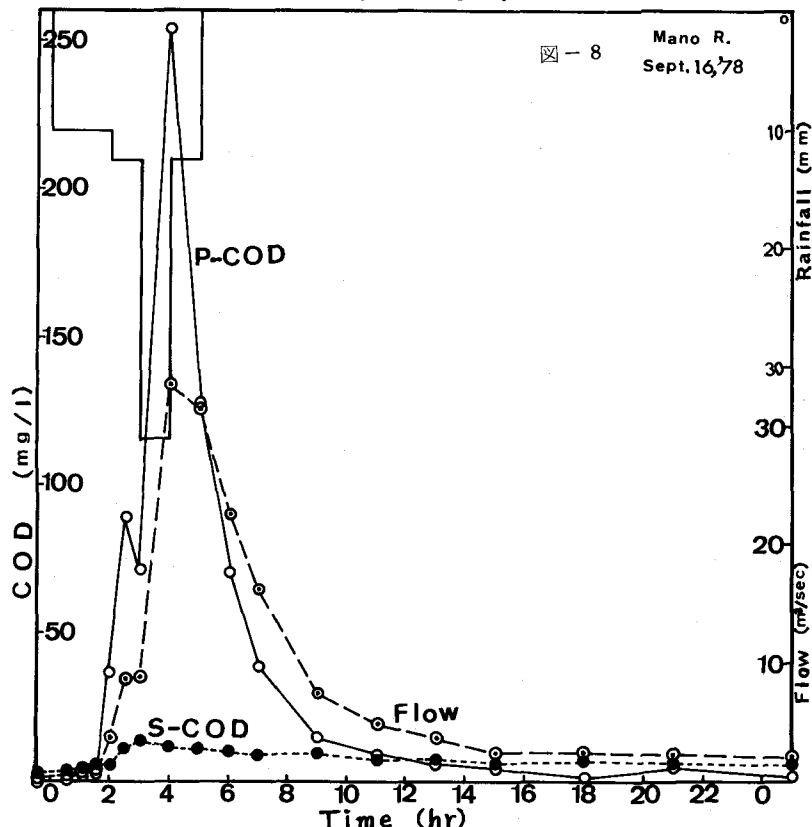
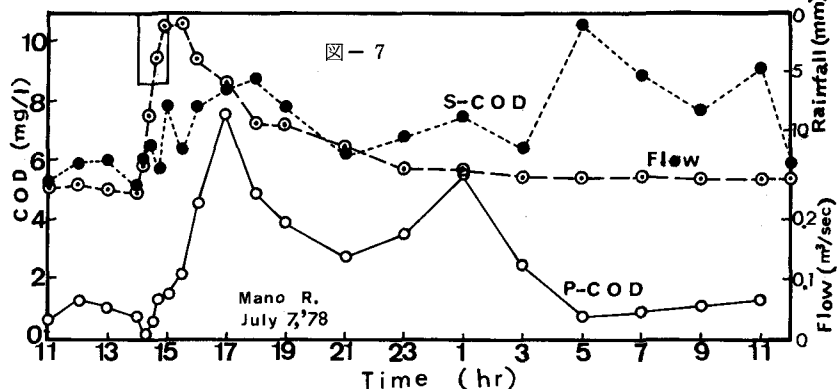


図-5のタ立の場合は、河道内の貯留・堆積物質量と降雨に対する河川流出の応答の速さをチェックすることができるが、図-6の台風の場合は、短時間に集中した大降雨量のため、河道内や流域地表面上の貯留・堆積物質だけでなく、平常の降雨時には流出しないような、包蔵された形の負荷発生源を掘り起した、潜在負荷量の顕在化現象が見られた。これは、当然のことながら、浮遊性物質において顕著な現象であるが、溶解性物質の $\text{NO}_3\text{-N}$ のように、山林などの浸透能の大きい地表面で、降雨が一旦、地表面下に浸透した後、流出する成分に依存する性質の強い水質でも、降雨強度と降雨量がともに大きい降雨には速い応答を示す。

したがって、降雨強度や降雨量の差違による流出物質の量と内容構成の違いの検討もまた重要な問題である。これには、流出物質の負荷発生源の存在位置と存在形態が重要な因子となる。降雨時流出を対象とする場合、有効降雨による直接流出の内容と量にも注目する必要がある。すなわち、降雨量の大小や降雨強度の強弱は、降雨の地表面下への浸透量とその比率に影響を及ぼすため、地表面流出と中間流出のウェイトの変化や各流出成分の流出の時間遅れを左右することになるほか、流域内の斜面の浸食や表土の流去、河床の洗掘など流出物質の量をも支配することになる。

図-7、8は真野川における小降雨と大降雨の流出CODの量と内容構成の違いを示したものである。小降雨の場合、晴天時のようにS-CODがP-CODより高い濃度を示しているが、大降雨の場合、流出CODのほとんどがP-CODで占められることがわかる。

降雨量や降雨強度の違いは、負荷発生源の内容や発生量に変化をもたらすだけでなく、流域内の斜面や河道内の流れの流速および流水断面積をも大きく変化させ、流出物質には流送段階での変化も加わることになる。とくに、降雨流出時における負荷発生源としての河床の流水面積の増加と、次の降雨流出の初期条件への影響の大きい、降雨流出後半の流量・流速減少に伴う流出物質の河道内や流域内での積み残しも重要な問題となる。



5. 河床附着性生物群の現存量変化

各降雨流出の初期条件を規定する因子としては、前述の以前の降雨による流出物質の積み残し量と、先行晴天期間の貯留・堆積物質量、および河床や水路内において溶解性物質を浮遊性かつ有機態物質に変換して増殖する河床附着性生物群の現存量などが考えられる。対象とした3河川においても7月下旬から8月中旬にかけて、相模川の場合と同様の方法によって、河床附着性生物群量の現存量変化の観測を行なった。すなわち、10cm四方のアスベスト板4枚を同様の環境条件になるように河床に沈め、1週間間隔で1枚ずつ回収して附着物質と表流水のCOD、N、P、Chl.-aおよび乾量、強熱減量、SSの測定を行なった。この時期は渇水期のうえ、農業用水の取水量が多く、流量の少ない時期であった。図-9、10に大宮川と真野川の各種成分の現存量変化の一部を示したものである。真野川では、8月8～9日の降雨による剝離流出に伴い、現存量の減少が認められるほか、8月1～7日までに現存量の上限あるいは平衡状態に達していることがわかる。附着性生物群の構成成分間の関係のうち、相模川の高かった真野川の例と、前回の相模川の例との比較を行なったのが表-2である。真野川は全般的に無機性のSSが多いのに対して、相模川では生物起因の成分の比率が高い。これにも、市街地河川と田園地河川の流域特性の影響が現われていると考えられる。

6. 流出物質の粒度構成の変化

降雨時流出過程における流出物質の内容構成の経時変化から流出挙動の特性を把握するために、流出物質の粒度構成の検討を行なった。観測は、大宮川下流地点で、10月27日と12月23日の2回の降雨についてであり、粒度別のSSとCODの分析を行なった。試料としては、分析精度の点から大量でかつ高濃度が望ましいため、各降雨のいくつかの流量ピークに近い時点のものとした。粒度の分割は、粗い粒径にはふるいを、細かい粒径にはコールターカウンターを用いたが、ここでは大きな分類によって

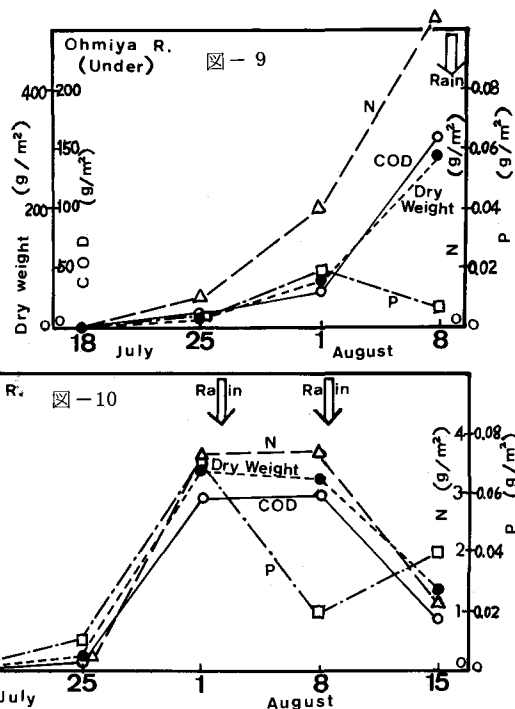
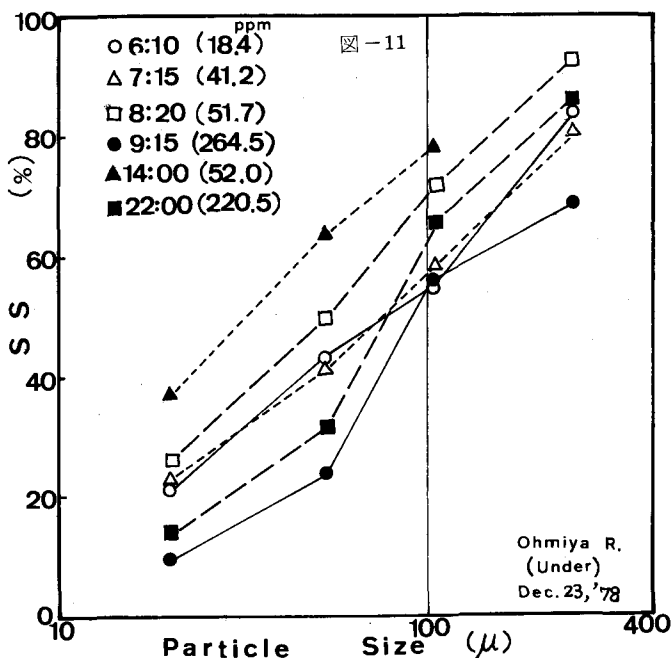


表-2 附着性生物群の構成成分間の関係(単位: g/m^2)

	真 野 川	相 模 川
乾 量	$DW = 46.5 + 2.1 \cdot COD$	$DW = 9.96 + 2.2 \cdot COD$
強熱減量	$I.R. = 7.38 + 0.56 \cdot COD$	$I.R. = 0.72 \cdot COD$
窒 素	$N = 0.38 + 0.024 \cdot COD$	$N = 0.053 \cdot COD$
SS	$SS = 25.3 + 2.7 \cdot COD$	—

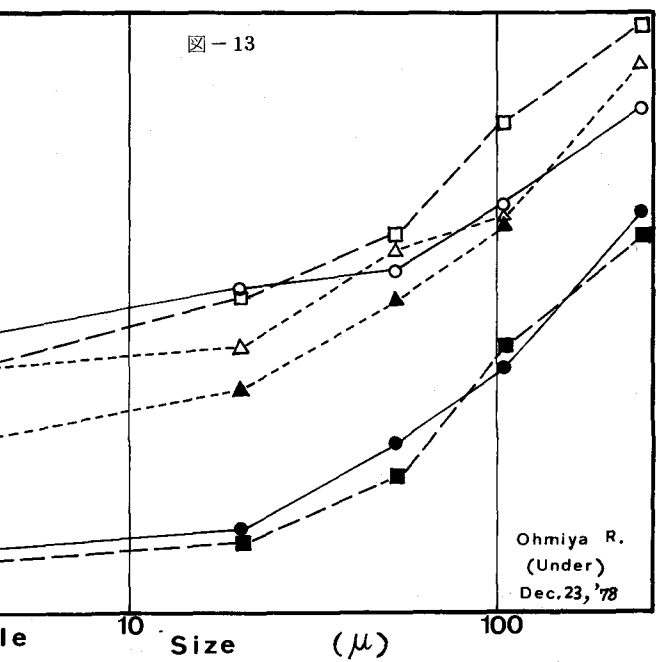
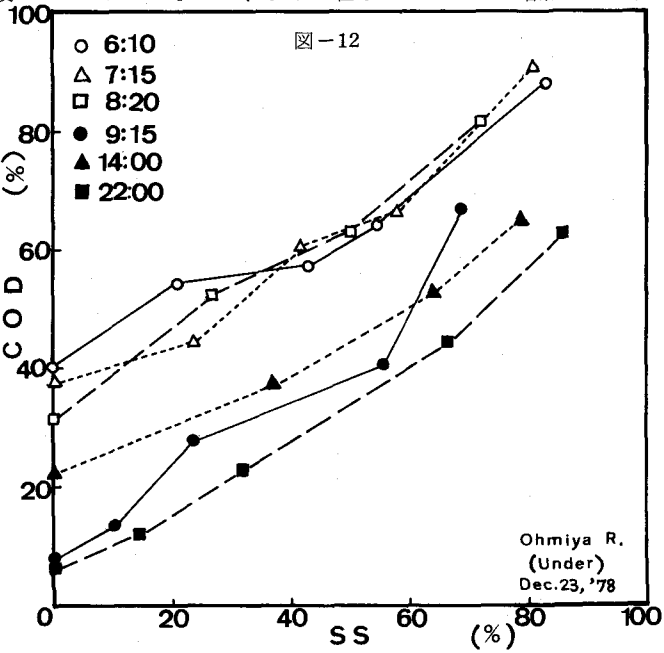


粒度構成の経時変化の追跡を行なうことにする。図-11と13は、ふるい通過のSSとCOD値を総SSと総COD値に対する割合で示したものである。この降雨時流出の流量変化は図-4に示されており、図中の採水時刻の右側の()内の値はその時点の総SSあるいは総CODの値である。図-4の流量の経時変化では6時前より流量は上昇し、増減をくり返しながら9時過ぎと22時前の2回に大きなピークが出現している。

SSは、9時過ぎの流量ピーク時には250 μ 以上の粒子の占める割合が31%と高く、22時前のほとんど同じ大きさの流量ピーク時には250 μ 以上の粒子のウェイトは15%と半減している。また、この大きな2つの流量ピーク時には、53~105 μ の粒子が30%以上と多くを占めていることがわかるほか、9時過ぎの大きな流量ピークまでは20 μ 以下の粒子が25%前後であるが、その後は20 μ 以下の粒子のウェイトが増加して37%にも達する。250 μ 以上の粒子は最初の大きな流量ピーク時に流出する割合が高く、その後、流出しやすい河道内貯留物質の流出が時間経過に伴って減少し、次の大きな流量ピーク時には、最初の流量ピークより大きな流量であっても、大きな粒子のウェイトや総SS値は減少すると考えられる。

CODは、SSとは異なり、大きな2つの流量ピーク時とも250 μ 以上の粒径の物質のCOD値が35%と高いレベルにある。また、9時過ぎの流量ピーク後は、1 μ 以下すなわちS-CODのウェイトが高くなるほか、SSでその比率の高かった53~105 μ の粒径の物質のCOD値は、両ピーク時にそれぞれ12.6%、21.6%と、SSの分布とCODの分布は異なる傾向を示している。

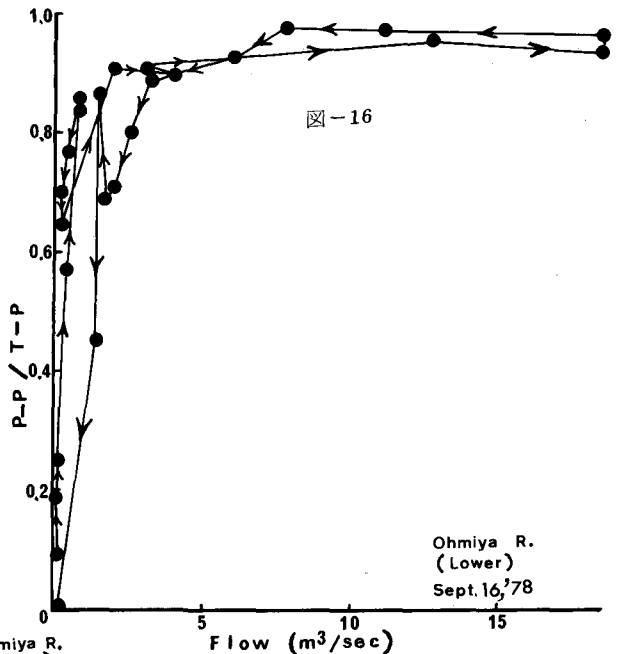
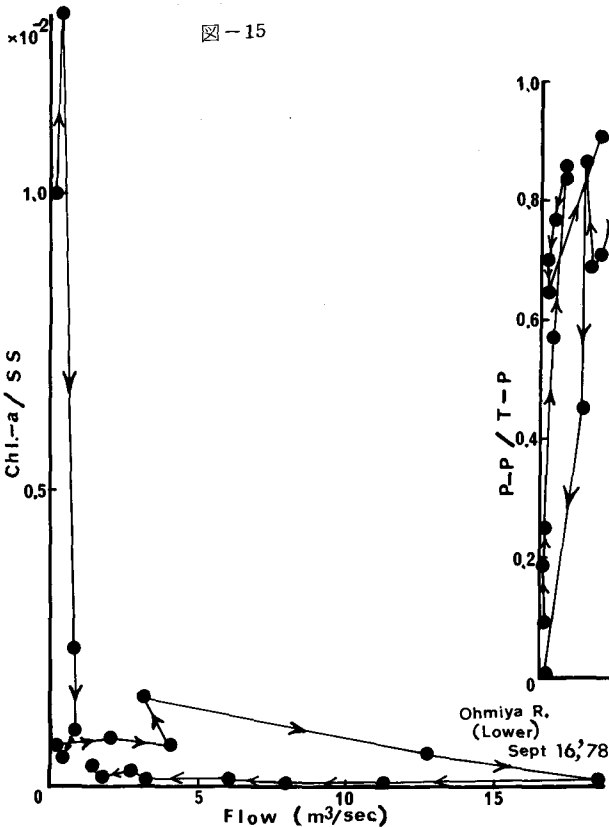
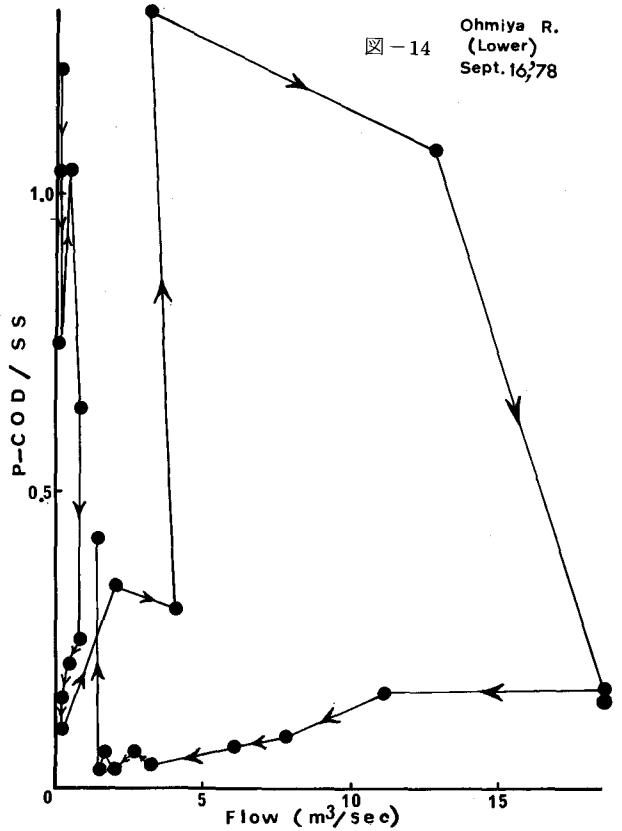
図-12は、各時点におけるSSの分布とCODの分布の対応関係を示したものである。9時過ぎのピークの前とピーク以降とは、粒度別の組成の変化が明らかであり、小さな粒径の物質のCOD値が流出初期に大きなウェイトを占めるが、後半減少するのがわかる。

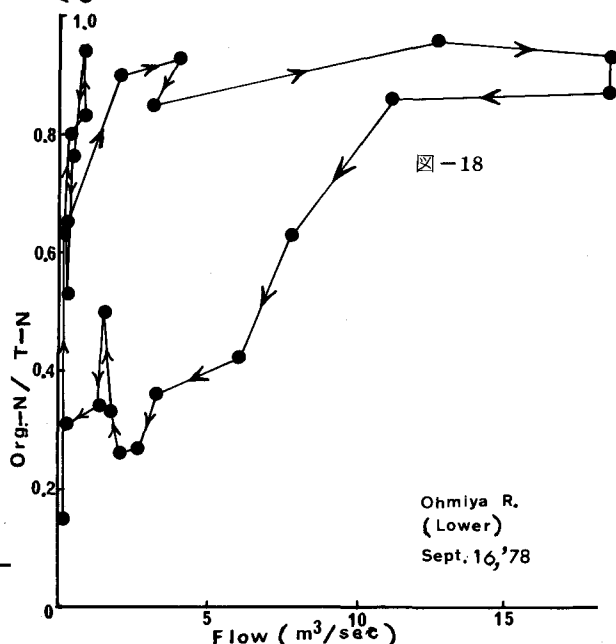
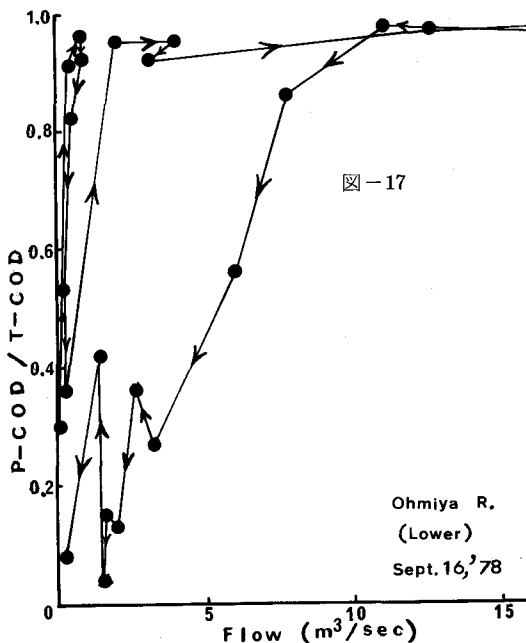


7. 各種の流出物質の挙動特性の関係

降雨時流出過程における各流出物質の挙動の相対的な変化の関係から、負荷発生源の異同の推定、構成内容の変化の指摘を行なうことができる。各流出物質のピーク濃度の出現時刻の差違や濃度変化の流量変化への追従性の相違が重要であるほか、Total 表示の水質についてはその構成内容の経時変化あるいは流量変化との対応関係に注目する必要がある。

例えば浮遊性有機物質の流出では、図-14のように、流出初期の段階におけるP-COD/SS値の急激な変化と、流量上昇期の大きな変化などの流量変化に対する応答から、流出初期、流量上昇期と減少期のP-CODとSSの負荷の比率と構成内容が明らかに異なることがわかる。図-15はChl-a/SS値の流量変化に対するプロットであるが、河道内貯留堆積物質としての河床付着性生物群の流出をSSとの対比から把握することができる。流出初期のfirst flushによって、付着藻類や河





道内に貯留・堆積したSSの同時流出が見られるが、Chl-aの高濃度流出の顕著なことが指摘できる。

また、Total表示の水質の浮遊性成分と溶解性成分および有機態成分と無機態成分の比率の変化によっても、流出物質の構成変化を追跡することができる。図-16のP-P/T-P、図-17のP-COD/T-CODの両者とも、流出初期と高流量時の高い値や、高流量時の高い比率の維持、流量減少期の比率の急激な減少が特徴である。P-PとP-CODのよく似た流出パターンから、両者はほぼ重複した負荷発生源を持つと考える。図-18のOrg-N/T-Nは、P-COD/T-CODの変化に近いパターンを呈しており、Org-Nの負荷発生源もP-CODのそれとほとんど共通していると推定できるほか、このOrg-Nのほとんどは浮遊性であることもわかる。このように、流出物質の挙動特性に基いて負荷の構成内容、したがって、発生源の推定ができる。

8. 結論

降雨時流出過程における流出物質の挙動には、流域内の土地利用状態や地形に基く流域特性、降雨量や降雨強度による降雨パターンによって大きく影響される。とくに、流域特性に支配される流量の降雨流出特性は、下流地点への到達時間の差違、すなわち、流出の時間遅れを左右するため、流域から河道へ、河道中での流出物質の流送過程の挙動を支配することになる。流出物質の負荷発生源の存在位置と存在形態および存在量もまた、降雨時流出過程の流出物質の構成内容の変化をもたらす大きな要因であり、流域内あるいは河道における先行晴天期間の貯留・堆積量と、降雨量や降雨強度によって流域内の無限に大きい潜在負荷量の顕在化の定量化も大きな重要な問題である。以上の点を考慮し、降雨 → 流出水量 → 流出負荷量のフローに、流域内における負荷発生源の存在位置と存在形態および流量の流出特性を組み込んだ流出負荷量解析モデルの構築が必要となる。ここでの研究は、この総合的な流出負荷量モデルの根拠を与えるものとする。

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) 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，No.1，(1979)
- 4) 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，(投稿中)
- 5) 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，土木学会第34回年講Ⅱ部，(1979)
- 6) 盛岡他：現存特性から見た汚泥環境に関する基礎的研究，水処理技術，Vol.16，No.9，(1975)