

降雨流出成分の水質による分離 Separation of Run-off Components by Water Quality

国立公害研究所 水質土壤環境部 正員 ○ 海老瀬 潜 一
正員 村 岡 浩 爾
正員 大 坪 国 順

1. 緒 言

小河川流域では、降雨の分布が一様に近く、流域内各地点からの流出の時間遅れも小さいため、降雨入力に対する流域の応答が鋭敏であり、流域特性や流下距離の差違のため流出に時間遅れの見られる多くの支川で構成される大河川流域とは異なり、降雨流出現象が比較的単純な形で把握しやすい。とくに、水質の流出解析では、小河川流域の場合、地形・地質・植生のほか土地利用形態など詳細な流域特性を知ることができ、土地利用形態と流出機構との対応関係を明らかにすることも可能である。この小河川流域において、降雨流出を流量変化だけでなく、水質の濃度変化および負荷量変化としても捉えることにより、これらの変化の対応関係に、水質の供給源あるいは負荷発生源の位置および形態との関係を加えて検討し、降雨流出成分の水質因子による分離の可能性を追求した。すなわち、降雨入力に対する水質の負荷発生源と流出機構の関係、その結果としての、流量変化に対する水質の流出負荷量変化の追従性による流出成分分離の試みである。

2. 流量変化と水質濃度変化および水質負荷量変化の関係

河川における降雨流出過程の変化を全体として見ると、流量上昇に対して水質濃度も流量に追隨して増加し、両者の積としての水質負荷量が著しい上昇を示す水質項目には、SSと各種水質の懸濁態成分の粒状物質があり、水質濃度は流量上昇に伴って減少するものの、水質負荷量としては流量上昇により増加する水質項目には、イオン物質を主とする無機溶存態成分の溶存物質がある。また、流量上昇に伴い水質濃度が減少し、水質負荷量としてはほとんど変化しないように見える水質項目もある。これらをさらに詳しく見ると、各種水質項目間の流出の時間的変化と流量変化との対応関係は、降雨の規模、降雨パターン、先行降雨条件などによって左右されるが、流量上昇に対して水質濃度が減少し、水質負荷量が一見変化しないように見える水質項目でも、その水質変化過程を細かに追跡すれば水質負荷量も若干の増加となっていることが多い¹⁾。

しかし、大河川では、一般に流量ピークが単一の単純な出水パターンの場合は、ほとんどの水質項目の負荷量ピークの出現時刻は流量ピークのそれに一致し、各種水質項目の濃度および負荷量変化は平滑化されて出現し、水質項目間の流出時間のズレや濃度・負荷量の微妙な増減の程度の差違を明瞭に識別することはむずかしい²⁾。これに対して、小河川では、降雨入力に対する流域の応答特性として、流量変化のみならず水質濃度および負荷量変化をも捉え、その流出過程での降雨水→流出水の流域内での水質変換を考えることができる。したがって、ここでは、流送過程で河道内や水みちなどに貯留・堆積され易い粒状物質ではなく、流域の負荷発生源から降雨の「洗い出し」作用によって流出する溶存物質を対象に検討を行うことにする。

3. 水質の流出機構と土壌の吸・脱着作用

降雨入力に対する水質の流出機構は、水質負荷の供給源の位置とその存在形態に基づいた降雨の「洗い出し」作用に支配される。粒状物質では、まず河道内や水路内に貯留・堆積したものの流出と、不浸透面をはじめとする流出率の高い地表面上に貯留・堆積したものの流出が生じ、次いで、降雨強度に従って裸地の浸食に伴う流出が起こることになる。溶存物質では、植生や凹地貯留などでトラップされるほかは、先行晴天期間中に地表面上に貯留・堆積するものはほとんどなく、降雨に含有されるもの、粒状物質に吸着あるいは保持されていて流送中に脱着したもののほかは、地表面下の表土層中に浸透した降雨水の「洗い出し」作用によって溶脱したものや土壌水中に保持されていたものが流出し、ベースとなっている地下水流出成分に加わる。

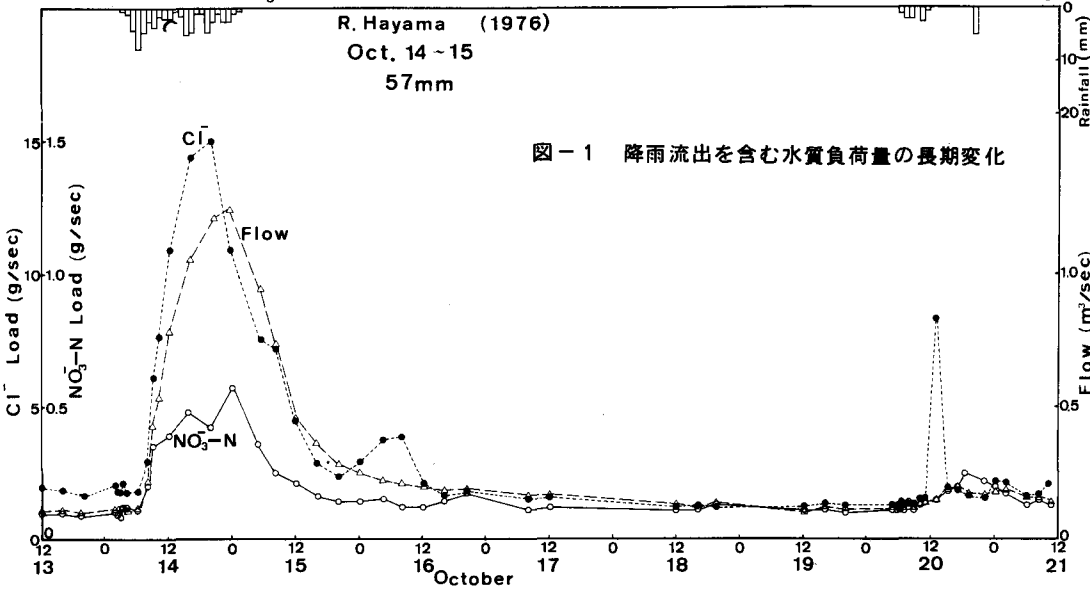
このうち、粒状物質に吸着あるいは保持された溶存物質は、粒状物質と流出挙動を共にすることになり、

表面流出成分が大きなウェイトを占める流量ピーク時付近に、その流出負荷量のピークに達する。もちろん、凹地貯留されていた溶存物質は、流量ピーク時までの早い時期から流出を始めている。これに対して、地表面下の表土層中では、土壌を構成する粘土鉱物や土壌有機物に吸着あるいは保持されていたり、間隙水中に溶存していたイオン性の物質は、浸透してきた雨水の鉛直および横方向への移動に伴ない、イオン交換あるいは脱着などによって土壌から脱離して、中間流出成分や地下水流出成分となる浸透水にのっかって流出すると考えられる^{3),4)}。したがって、この中間流出成分としての流出のウェイトが大きな水質項目では、表面流出成分としての流出のウェイトの大きな水質項目と比較して、その流出負荷量の増加の立ち上りが遅れ、流出負荷量のピーク出現時刻も、流量ピーク時刻より遅れることになる。

流出する粒状物質中でのウェイトが大きく、表土層中で無機イオンを吸着・保持する作用の強い粘土鉱物は、 PO_4^{3-} の特異的な吸着特性のほか、重金属や K^+ および NH_4^+ の吸着特性の著しいのが通常であるが、土壌によっては黒ボク土のように、 K^+ や NH_4^+ の吸着力がさほど大きくないと言われるものもある。一般に、粘土粒子は陽イオンの吸着能が大きく、陽イオンの中でもその選択性があり、吸着特性の違いによって陽イオン同志のイオン交換が行なわれる⁵⁾。陰イオンでは、 PO_4^{3-} を例外として、表土層中に存在する NO_3^- と Cl^- はとくに吸着され難い。また、表土層中では、硝酸化成作用によって土壌中の窒素が NO_3^- -Nに変化して行くことや、土壌を構成する有機物質にも陽イオン吸着特性が存在することが、土壌中での無機イオンの存在形態や存在量に係ってくる。ここでは、山林・原野や農耕地など雨水浸透に伴う面的な負荷発生源からの流出に注目するため、降雨流出成分への影響の大きい屋根・舗装道路等の不浸透性の地表面部分がかなりのウェイトで流域内に存在する場合は避けるとともに、点源として人為的な負荷の影響が加わることの多い NH_4^+ や Cl^- についてはその影響の程度をチェックして、対象流域を選んでいる。

4. 水質流出の短期変化と長期変化

小河川流域の水質流出現象の長期変化における短期変化の特性あるいは位置づけを明らかにするために、直接流出とその後の変化の観測例を図-1に示す。図-1は、上流部が山林、中・下流部で近江盆地の農耕地を流下して琵琶湖に流入する流域面積 6.4km^2 の葉山川の観測例である。直接流出による水質負荷量の増加期間は比較的短期間となっており、その後はほぼ一定レベルの負荷量を維持していることがわかる。これより、基底流量に対応する基底負荷量の概念を導入できる。10月14～15日の降雨は、降雨量が 57mm あったにもかかわらず、降雨強度が小さいため、中間流出成分の卓越している場合と考えられる。直接流出による負荷量と基底負荷量の差は、 Cl^- 、 NO_3^- -Nとも歴然としており、直接流出前後の負荷量変化から両者の分離は可能である。また、 Cl^- と NO_3^- -Nとは、その負荷量ピークの出現時刻やその後の減少の挙動が異っている。



5. 表面流出成分が卓越する流出

降雨強度が大きく、表面流出成分が大きなウェイトを占める豪雨流出の場合の水質流出現象の観測例を図-2～図-5に示す。図-2と図-3は、同一降雨による流出を小河川の中流部（流域面積 8.0km²）と下流部（同 17.6km²）の2地点で把えたものである。 Cl^- と NO_3^- -N負荷量の両地点での流出挙動は、 Cl^- 負荷量と流量負荷量のピーク出現時刻が NO_3^- -N負荷量のそれより先行するなどほぼ同様であり、流下距離の差による流出の時間遅れはほとんど認められず、流出成分の違いによる流出の時間遅れに基づいた水質負荷量変化とすることができる。この小河川は筑波山を上流部に、中・下流部の水田地帯を流下する小桜川で、降雨量62mm、時間最大降雨量40.5mmの豪雨の場合である。

図-4は、同一降雨による流出を8km隔てて平行に流下する2河川で把えた観測例である。この降雨は降雨量65mm、時間最大降雨量が29mmと、実質4時間に集中した豪雨であった。 NO_3^- -N負荷量のピーク出現時刻は、やはり流量ピークのそれより遅れていることがわかる。なお、真野川は、上流部が比良山系、中・下流部が水田地帯を流下する流域面積16.6km²の小河川であり、大宮川は、上流部が比叡山、下流部に水田および門前町の存在する流域面積6.3km²の急勾配の小河川である。

この表面流出成分の大きな場合の NO_3^- -N負荷量変化のように、流量変化に対して負荷量流出の時間遅れ現象が認められる場合、流量と水質負荷量の対応関係を図-5のように両対数紙上の経時変化としてプロットすれば、反時計回りのループを描く。

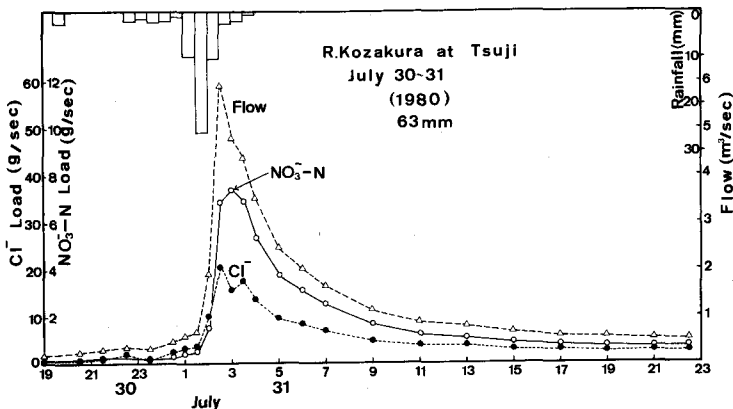


図-2 降雨流出に伴う陰イオン負荷量の変化（中流部）

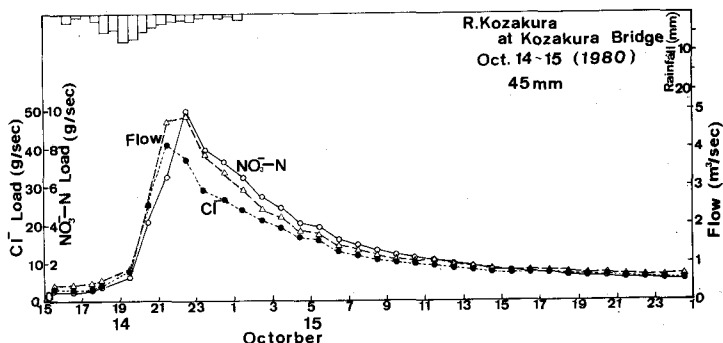


図-3 降雨流出に伴う陰イオン負荷量の変化（下流部）

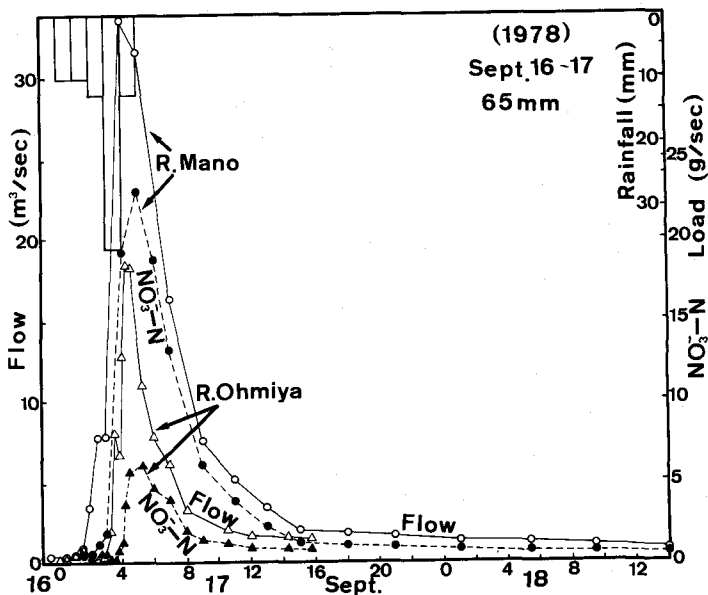


図-4 降雨流出に伴う NO_3^- -N負荷量の変化（2河川）

これに対して、負荷量ピークが流量ピークに先行したり、両者がほぼ同時に出現するような場合、その水質因子の両対数紙上での経時変化は時計回りのループを描くことになる⁶⁾。

6. 他の無機イオン負荷量の変化

前節では、負荷量ピークの出現時刻の異なる Cl^- と NO_3^- に注目したが、他の無機イオン物質の流出負荷量変化の観測例を示したのが図-6と図-7である。 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} および2価陽イオンの負荷量ピークの出現時刻は、図-7の表面流出成分のウェイトが大きな場合には、流量ピークのそれと一致し、図-6の降雨強度が小さくて中間流出成分が支配的な場合には、流量ピークの出現時刻より先行している。これら陽イオンの流出挙動は、SSをはじめとする粒状物質と同様であり、土壌粒子の吸着特性とも符合し、土壌から溶脱しやすい NO_3^- とは異なる挙動となる。

ちなみに、これら陽イオンの濃度変化は、流量増加に対応してあまり著しい増減はなく、表面流出成分と中間流出成分のウェイトの違いによって、若干の増加あるいは減少の傾向が見られた。

7. 降雨流出成分の水質による分離

直接流出水の流出経路を示すトレーサーとしての水質物質が存在すれば、各流出成分を特定することができ、流量のみの按分比による降雨流出成分の分離よりも裏付けのある正確な分離に一步近づくことになる。ここでは、この水質トレーサーとして満たすべき要件を明らかにして、 NO_3^- による中間流出成分の分離を試みることにする。

直接流出期間の基底流量 Q_0 に対応する基底負荷量 L_0 は、

降雨流出前後の観測値から決定でき、増加流量は表面流出成分 Q_1 と中間流出成分 Q_2 で構成されるとすれば、水質負荷量 L は次式で表現できる。

$$L = L_0 + C_1 \cdot Q_1 + C_2 \cdot Q_2$$
 ここで、 C_1, C_2 はそれぞれ Q_1, Q_2 の各流出成分に対応した濃度である。

もし、両流出成分に対する負荷発生源が特定か

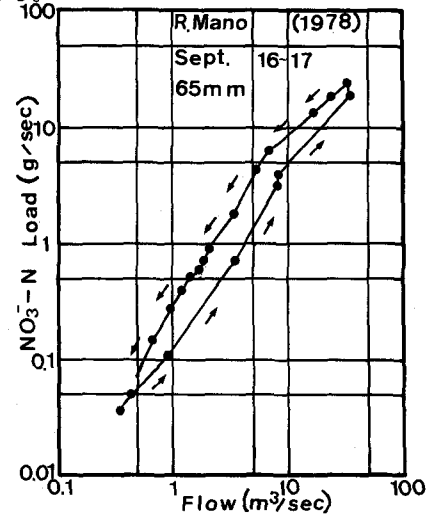


図-5 NO_3^- -N 負荷量の流出遅れ

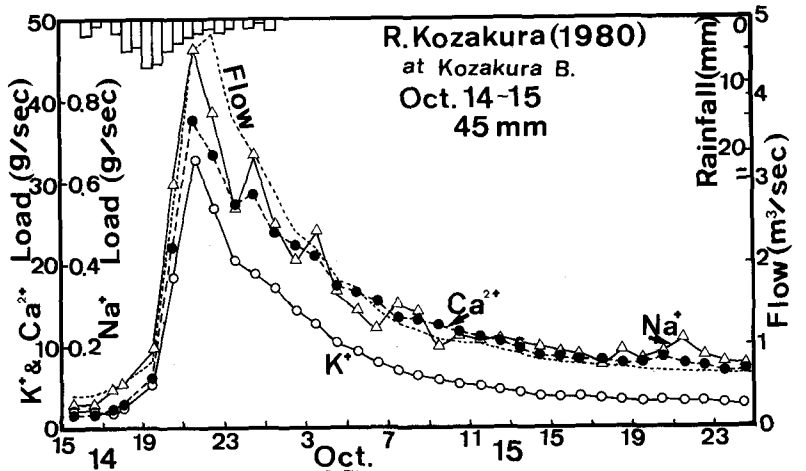


図-6 降雨流出に伴う陽イオン負荷量の変化

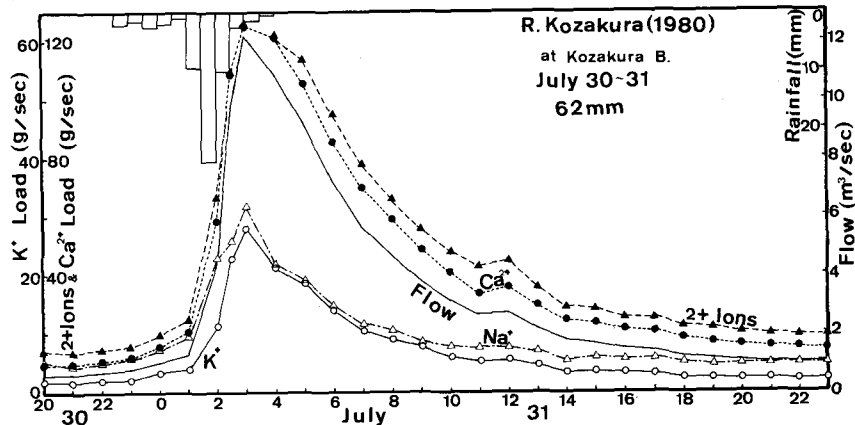


図-7 豪雨流出に伴う陽イオン負荷量の変化

つ分離でき、 C_1, C_2 が一定濃度を保持すれば、水質負荷量 L は両流出成分の分離に利用できるだけでなく、水質の流出機構の解明にもつながることになる。すなわち、直接流出における両流出成分のうち一方のみのウェイトが卓越していて、他方が無視できるようなstageにおいて、一定濃度を保持するような水質因子、したがって、負荷発生源が存在すればよい。そのような水質因子、あるいは、いくつかの水質因子の組み合わせが見出せれば、水質負荷量 L の変化にfitするように Q_1 と Q_2 を決定することが可能である。

図-8～図-9は、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の変化を示したものである。図-8は、降雨強度が小さくて中間流出成分が支配的な場合の小桜川の観測例で、流量ピークと負荷量ピークの出現時刻が一致し、流量ピーク後上昇した濃度はほぼ一定に保持されている。

図-9と図-10は、降雨強度が大きくて表面流出成分の大きな場合の観測例で、図-2～図-4の負荷量に対応している。

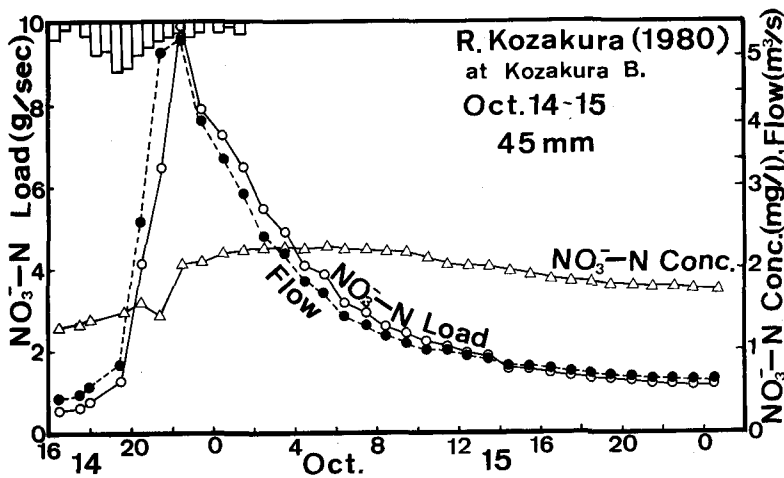


図-8 降雨流出に伴う $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の変化

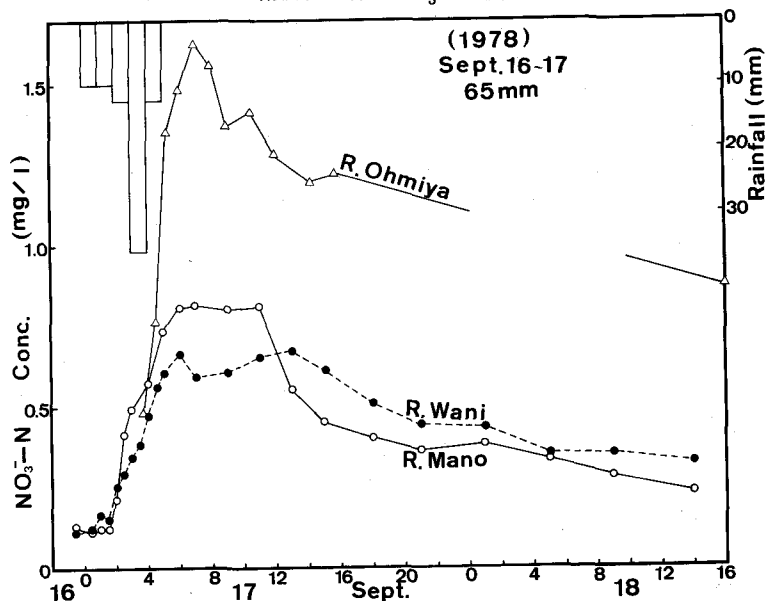


図-9 豪雨流出に伴う $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度変化 (3河川)

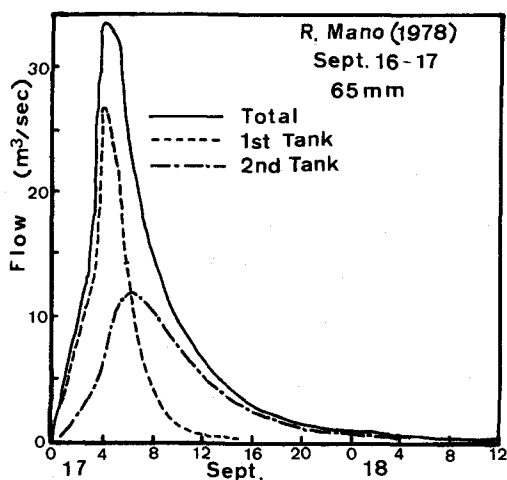


図-11 タンクモデルによる流出成分の分離

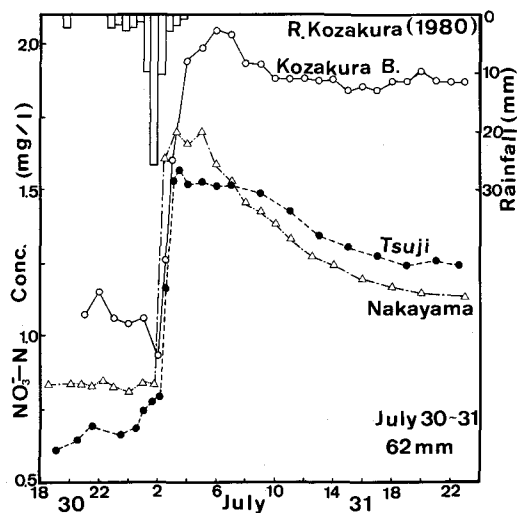


図-10 豪雨流出に伴う $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度変化 (3地点)

図-10は、図-8と同じ河川であるが、下流部では流量の通減状態の中間流出が支配的と考えられる stage ではば一定値を保持しており、 $L=L_0+C_2 \cdot Q_2$ より回帰法で算定した C_2 は、両者とも1.9前後の近い値となる。上・中流部では、ピーク後の濃度の漸減傾向が見られるが、中流部の地点について同様に算定した C_2 の値は、両者とも1.5前後の値となる。これらの値は、基底流量 Q_0 に対する基底負荷量 L_0 がベースとして存在しているため、実際の流出水濃度より高い値となっている。図-9は、同一豪雨を近接する3河川で観測した例であるが、図-10の上・中流部と同様の傾向が認められる。このようにして算定した C_2 は、河川あるいは地点により、また、降雨によって少しずつ異なっており、負荷発生源と降雨条件の検討が必要である。

図-9の真野川の場合に、タンクモデルを用いて流出成分の分離を行ない⁷⁾、その流出成分で $\text{NO}_3\text{-N}$ の負荷量変化に合致した C_1 と C_2 を求めて、前述の $L=L_0+C_2 \cdot (Q-Q_0)$ より回帰法で求めた C_2 との比較をした。タンクモデルは、小河川流域の短期流出を対象とするため、表面流出成分が上段タンク、早い中間流出成分が下段タンクに相当するとして直列2段のタンクを用い、図-11のような両成分の構成変化を得た⁸⁾。この両成分に対して、最小自乗法で決定した C_1, C_2 は、それぞれ、0.57, 0.80であり、水質負荷量と流量から求めた C_2 の0.78とよく一致している。表面流出成分は、中間流出成分ほど安定した stage を見出し難く、流出前半部に同様の手法を適用すれば一応 C_1 も決まるが、凹地貯留や多種の負荷発生源からのfirst flushの影響が大きい場合が多く、 C_1 の算定には誤差が大きくなることが予想される。

8. 結 語

これまでの降雨流出成分分離の研究は、流量変化と土湿条件からのアプローチが主流であり、流出水中に含まれ、流量とともに変化する水質量からのアプローチはほとんどなかった。本研究は、小河川の降雨流出過程において、水質をトレーサーと見立てて、その負荷の発生位置からの流出の時間遅れと流量変化との対応関係を水質の濃度および負荷量変化から捉えて、降雨流出成分の分離を試みたものである。数多い水質因子の中でも NO_3^- は、浅い表土層中に吸着あるいは保持されていて、雨水浸透に伴って溶脱し、中間流出成分および地下水流出成分によって流出する量が多く、土壤に吸着され易い無機陽イオンあるいは土壤に保持され難い Cl^- とも異なった流出挙動をとる。この NO_3^- の特異な流出機構を利用して、その水質負荷量と流量の変化から、中間流出成分の水質トレーサーとして用い得ることを示した。

水質負荷量 L は、降雨流出前後の負荷量変化から推定できる基底流量に対応した基底負荷量 L_0 が推定できるため、 $L=L_0+C_1 \cdot Q_1+C_2 \cdot Q_2$ のように両流出成分の Q_1 と Q_2 の線形形で表現できるとすれば、係数 C_1, C_2 は濃度の次元をもち、物理的に明解なモデル式となる。両係数を、表面流出成分が卓越する豪雨流出の場合の増水期と、豪雨の場合の流量通減期や表面流出成分の無視できる場合の直接流出に分けて算定した。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 負荷量より求めた C_2 は降雨条件や流域ごとに異なるため、多くの場合を加えた整理が必要である。

なお、小河川流域といえども、流域内の各地点から観測地点までの流水の到達時間には多少の差があるほか、降雨流出の初期条件として流域内の面的な負荷発生源において負荷の存在形態や存在量も変化することが考えられる。したがって、これらの影響の程度を把握しておくために、さらに観測データの蓄積が必要である。また、トレーサーとしての水質因子は NO_3^- だけではない。無機陽イオンには表面流出成分と流出挙動を共にするものが多い。その中でも、流域内の地表面や河道内などに貯留される量が無視でき、負荷発生源が推定できる水質因子を選び出し、 NO_3^- などとを組み合わせることによって、さらに精度の高い降雨流出成分の分離が可能であると思われる。終りに、琵琶湖流入河川での観測は、京都大学工学部衛生工学科水質工学研究室の当時の4回生・大学院生の協力を得たことを記して、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1)海老瀬ほか(1979):第7回環境問題シンポジウム,
- 2)荒巻 孚(1959):地学雑誌, No 711,
- 3)小川吉雄(1980):土壤の物理性, No 41,
- 4)井上・三輪(1980):土壤の物理性, No 41,
- 5)日本土壤肥科学会編(1981):土壤の吸着現象, 博友社,
- 6)海老瀬ほか(1981):第25回水理講演会,
- 7)下垣ほか(1979):第23回水理講演会,
- 8)海老瀬ほか(1979):用水と廃水, Vol. 21, No 12,