

NO₃⁻を用いた流出成分分離と他の方法による分離結果の比較

Hydrological Separation of Runoff Components Using NO₃⁻
as Compared with Other Separation Methods

山梨大学工学部 正 員 竹内 邦 良
山梨大学工学部 正 員 坂 本 康
山梨大学大学院 学生員 本 郷 善 彦

1 はじめに

水文学の基礎概念のうち、有効降雨、初期損失、基底流出というような、降雨・流出解析のすべてのモデルに使われているにもかかわらず、その内容が未だに明らかにされていないものがある。これは地上に達した降雨の、河川に流出する割合とそれまでの経路を特定できない限り、原理的には解明できない問題とすることができる。しかしながらその実用上の必要性故に、これまで数種の便宜的方法・試案等が提案・利用されている。ここではそれ等のうち、流出成分をその経路に従って分離する方法を比較検討する。

流出成分分離には、基本的に3つの方法が提案されている。1つは水質要素をトレーサとして用いて流出経路を判別しようとするもので、これには筆者らの用いているNO₃⁻、電気伝導度などの他、トリチウムのような放射性同位元素に着目した研究もある。第2は流域の物理機構を表現した流出モデルを用いて、どの流域要素に達して流出してくるかによって、流出成分に分ける方法で、タンク・モデルを用いた例がある。第3は水質も流域の物理特性も利用せず、各流出成分の減衰時定数に応じて、周波数領域で分離する、数値フィルターによる方法である。

NO₃⁻を用いる方法は、海老瀬ら¹⁾、筆者ら^{2,3,4)}の研究があり、とくに筆者らは河川水のNO₃⁻の長期変動、洪水時の変動特性、NO₃⁻の表層土壌からの供給状況等に関して多くの観測結果を蓄積している。タンク・モデルによる方法は海老瀬ら⁵⁾により提案されている。また数値フィルターによる方法は日野・長谷部^{6,7)}によって提案されているが、これ等を総合的に比較検討した例はこれまでにない。本論文の目的は各手法の比較により、各手法が分離したとする成分の具体的内容について、より明確な理解を得ようとするものである。したがって必ずしもその長短を論ずるのが本旨ではない。

2 降雨・流量・水質観測結果

まず本年度新たに観測した降雨・流量・水質の観測結果について述べる。観測地点はFig.1に示す、相川流域(笛吹川の支流である荒川の一派川で流域面積約8.4 km²の山地小流域)の上井川橋地点である。次に観測対象とした降雨流出をTable 1に示す。前報²⁾で示したNo.1～3の降雨流出に、新たにNo.4～8の観測例を加えたものである。このうちNo.5、6は雷雨によるもの、No.7、8は台風に伴う降雨である。Fig.2は、a) No.7、b) No.8の降雨に伴う流出時の河川水中のNO₃⁻-N濃度、電気伝導度の時間変化を、降雨量・流量と共に示したものである。またFig.2.bにおいては、新たな水質項目としてSS濃度、COD_{Mn}濃度、アルカリ度の時間変化をも同時に示している。これらの観測結果より得られた新たな知見を以下にまとめる。

- 1) 従来NO₃⁻-N濃度のピークは、流量ピークよりもおくれで現われると言われており、前報²⁾で示したように筆者らの観測結果もそのような傾向を示したが、No.7、8の台風時の観測結果はこれと全く逆で、NO₃⁻-N濃度のピークは、ともに流量ピークよりも早く現れた。
- 2) NO₃⁻-N濃度は、流量のピーク付近で急激に減少し、2時間後位にはその濃度が少し回復するというパターンが、どの流量ピークにも見られる。このことは流量のピーク付近では、NO₃⁻-N濃度の薄い表面流出成分が卓越している為と考えられる。

Table 1 Rainfall and runoff data

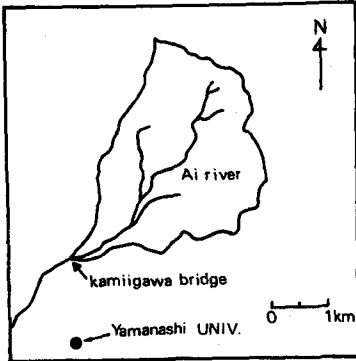


Fig.1 Ai river basin.

No.	Date	Duration hrs	Total rain mm	Maximum intensity mm/hr	Maximum flow m ³ /sec	Total runoff mm	Runoff coeff. -
1	82.6.20	4	40.0	33.0	0.86	2.8	0.07
2	82.6.21	6	17.5	14.5	0.63	3.2	0.18
3	82.7.8	6	33.5	16.5	0.43	1.5	0.05
4	83.8.2	2	16.0	13.0	0.35	0.7	0.04
5	83.8.9	1	41.5	41.5	1.42	1.7	0.04
6	83.8.10	1	16.0	16.0	0.34	0.7	0.04
7	83.8.15	62	319.5	38.5	23.63	141	0.44
8	83.9.27	39	149.5	17.5	8.38	51	0.34

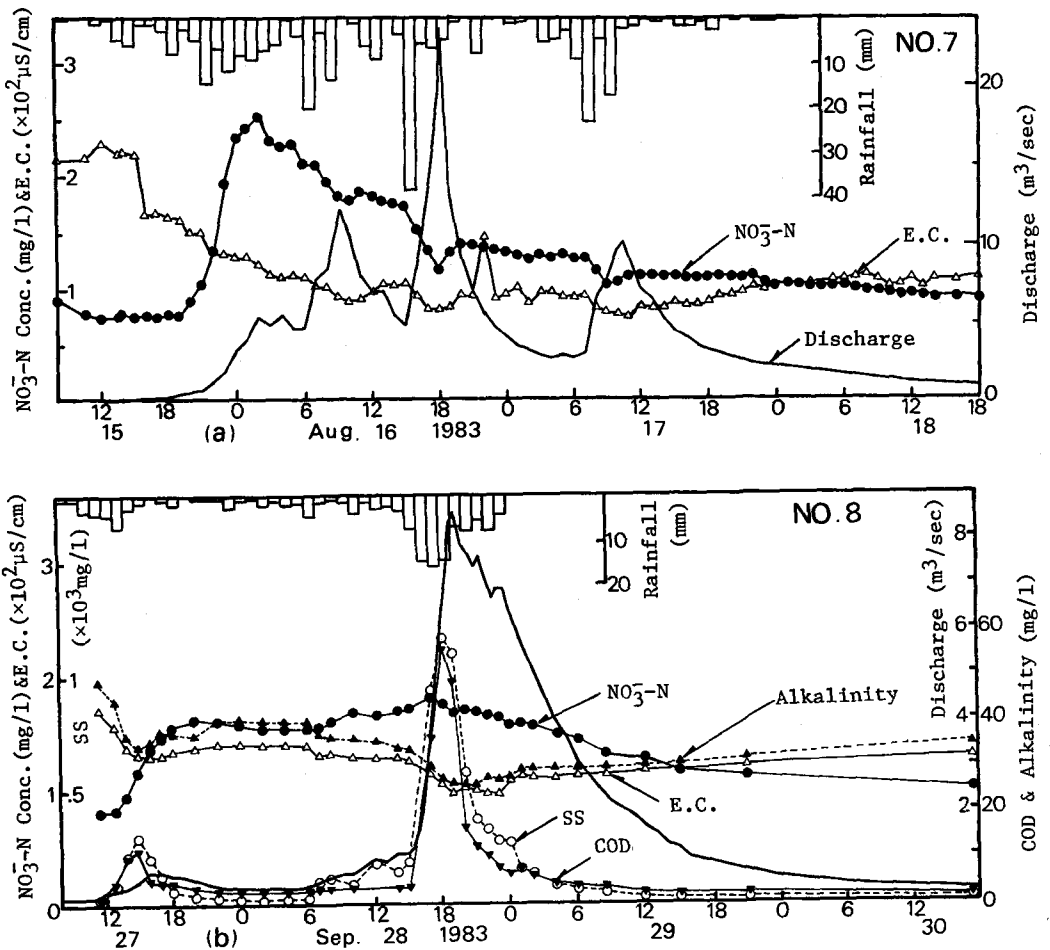


Fig.2 Hyetograph, hydrograph and corresponding changes of water quality at Kamiigawa Bridge.

- 3) SS濃度とCOD_{Mn}濃度は、非常に相関が高い。これらは表面流出に伴って流出する水質要素と考えられる。
- 4) アルカリ度と電気伝導度もよく似た濃度変化を示す。これ等は地下に一旦浸透した上で流出する成分に多い水質要素と考えられる。

3 流出成分の各種分離法

(1) 水質による分離方法

流出成分として、表面流出、中間流出、地下水流出の3成分を考える。それぞれの添字として、S、I、Gを用いる。3成分の合成である河川水には、添字Tを用いる。流出負荷および流量の連続式から、

$$C_T(t) \cdot Q_T(t) = C_G(t) \cdot Q_G(t) + C_S(t) \cdot Q_S(t) + C_I(t) \cdot Q_I(t) \quad (1)$$

$$Q_T(t) = Q_G(t) + Q_S(t) + Q_I(t) \quad (2)$$

ここに、 $C(t)$ は時刻 t における NO_3^- -N濃度(mg/ℓ)、 $Q(t)$ は流出量(m^3/sec)である。

各変数のうち観測可能なものは、 $C_T(t)$ 、 $Q_T(t)$ のみである。また、これまでの現地観測²⁾と、室内実験³⁾の知見をもとに、

$$C_S(t) = C_R \quad (3)$$

$$C_I(t) = C_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot \int_0^t Q_I(\tau) d\tau) \quad (4)$$

とおく。ここに C_R は降雨水の NO_3^- -N濃度、 C_0 、 α は定数である。ここに独立な未知数は $Q_S(t)$ 、 $Q_I(t)$ 、 $Q_G(t)$ 、 $C_G(t)$ の4つであり、これだけでは成分分離解を得ることはできない。そこで $Q_G(t)$ =一定(降雨前の河川水流量)、 $C_G(t)$ =一定(降雨前の河川水の濃度)とし、降雨に伴う河川の増加流量を2成分 $Q_S(t)$ 、 $Q_I(t)$ に分離する。定数 α は、 $Q_T(t)$ と $Q_I(t)$ が等しくなったと考えられる時刻 t_b を決め、 t_b 以後の $\ln C_T(t)$ と $\int_{t_b}^t Q_T(\tau) d\tau$ の勾配より決める。また、 C_0 は $C_I(t)$ 、 $Q_I(t)$ を逐次計算し、時刻 t_b で、 $C_T(t_b) = C_I(t_b)$ となるように決める。このようにして C_0 、 α を決定すれば、(1)~(4)より流出成分を分離することができる。分離に用いた定数の値は流出ケース毎に異なるが、 $\alpha = 0.01 \sim 0.7$ 、 $C_0 = 1.5 \sim 2.8$ の値を用いた。

(2) タンク・モデルによる分離方法

タンク・モデルの各段から流出する成分をそれぞれ異なった流出成分と考え、流出成分の分離を行なう。小流域であるから降雨-流出の応答も早いと考えられるので、3段のタンク・モデルを用い、時間ステップも20分とした。また、本来同一流域の流出量の推定には、タンクの係数は等しくなければならないが、観測データが洪水時に限られており、対象とした降雨の総降雨量やピーク雨量、流出率などが非常に異なっているため、同一タンクではうまく実測値と合わない。そこで、各洪水毎に最も合うようにして決めた別々のタンクを用いた。ここでの主眼は流量の推定にあるのではなく、実測の流量をタンク・モデルを用いて各成分に分離することにあるので、これで良いと判断した。一例として、No.4とNo.8のタンク係数をFig.3に示す。

(3) 数値フィルターを用いた分離方法

2階の常微分方程式から片側作用低周波低波数値フィルターを設計し、このフィルターで汙波することにより、全流量から地下水流出成分を分離する方法が、日野・長谷部^{6),7)}によって提案されている。その手順の概略を述べる。

- ① 洪水ハイドログラフの通減部分の片対数紙上での勾配 α より、分離時定数 T_C を決める。

$$T_C = -1/\alpha \quad (5)$$

- ② 全流量 y と地下水流出量 y_G の関係を、

$$d^2 y_G / dt^2 + C_1 \cdot dy_G / dt + C_0 \cdot y_G = C_0 \cdot y \quad (6)$$

と表わすと、このシステムの応答関数は、非振動系で、

$$h(\tau) = \begin{cases} C_0 \cdot \exp(-C_1/2 \cdot \tau) \cdot \sinh(\sqrt{C_1^2/4 - C_0} \cdot \tau) / \sqrt{C_1^2/4 - C_0} & (\tau \geq 0) \\ 0 & (\tau < 0) \end{cases} \quad (7)$$

で示される。ここに時定数 T_C と係数 C_0 、 C_1 の関係は、

$$T_C = C_1 / C_0 \quad (8)$$

である。 C_0 、 C_1 を決めるには、まず減衰係数

$$\delta = C_1 / \sqrt{C_0} \quad (9)$$

を、周波数応答曲線を参考に滑らかでかつよく高周波成分をカットする汨波特性をもつように決める。 δ が決まれば、(8)、(9)式により C_0 、 C_1 が決まる。以上で(7)式が決定され、これを用いて汨波後の出力(地下水流成分) $y_G(t)$ は、(10)式ようになる。

$$y_G(t) = \int_0^\infty h(\tau) \cdot y(t-\tau) d\tau \quad (10)$$

計算は表 1 に掲げた観測資料に対して、上記要領の手順で行なった。入力 $y(t)$ としては増水開始直前のベース流量を取り除いたものを用い、 $\Delta t=1$ 時間とした。また $\delta=2.001$ 、 T_C は片対数グラフにプロットしたハイドログラフの、通減部の勾配(指数通減率)から(5)式により求めた。この結果どの場合も、分離成分がもとの観測ハイドログラフより大きくなる部分をもつという結果になった。このような場合の補正方法として日野・長谷部は、汨波後の出力に一定の定数をかけ、つねに $y_G(t) \leq y(t)$ となるようにするとの方法を示しているが、筆者らの場合同様な操作を行なうと、係数があまりに小さく、事実上成分と言えない程度になってしまった。そこで本報では、 T_C の決定に通減部の指数減衰率を用いず、分離結果の通減部が観測ハイドログラフの通減部と一致するという条件、すなわち

$$0 < (y(t) - y_G(t)) / y(t) < 0.03 \quad (11)$$

となった時刻 t_b 以降の平均自乗誤差 S_{t_b} が最小という条件から、 δ および T_C を決定することとした。

№ 8 の流出に対する結果としては、表面流出終了時刻とみられる $t_b=43$ 時に対し、 $\delta=2.7$ 、 $T_C=1.5$ 時間の成分のみが分離された。これは上記のハイドログラフの通減部から求めた $T_C=9$ 時間、14 時間、74 時間のいずれとも、大巾に異なる結果であった。

4 分離結果の比較・検討

(1) 分離結果

各方法を用いて分離した結果を、三成分の流量変化図として Fig. 4 a~d に示す。図は水質分析項目が最も多く、流量も多い、1983 年 9 月 28 日の降雨 (Table 1, № 8) の流出分離例のみを示した。他の雨による流出についても、後に述べる傾向は同様であった。

分離は方法上の制約により、各時点の流量から増水開始直前の流量(以下ベースと呼ぶ)をひいたものについて行った。そのため、前述の分離方法のちがいの他に、このベースも含めて三成分をどのように定義するかというちがいが考え、以下の四つの方法を用いた。

方法 A: ベースを Q_G と考え、残りを NO_3^- -N 濃度により Q_S と Q_I にわけ。

方法 B: ベースをひいたものを三段のタンク・モデルでわけ、一段目からの流出を Q_S 、二段目からの流出を Q_I 、三段目からの流出にベースを足したものを Q_G とする。

方法 C: ベースをひいたものを三段のタンク・モデルでわけ、一段目からの流出を Q_S 、二段目と三段目からの流出を Q_I 、ベースを Q_G とする。

方法 D: ベースをひいたものから、 $T_C=1.5$ 時間の成分をひいたものを Q_S 、 $T_C=1.5$ 時間の成分を Q_I 、ベースを Q_G とする。

各方法で用いた各定数の値は図中に記してある。これらの結果から得られる主な知見は以下の通りである。

Fig.3 Examples of parameters identified for tanks.

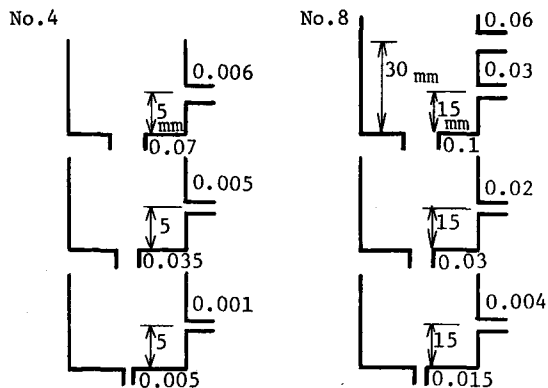


Fig.4.a
Separated discharges
using
 NO_3^- .

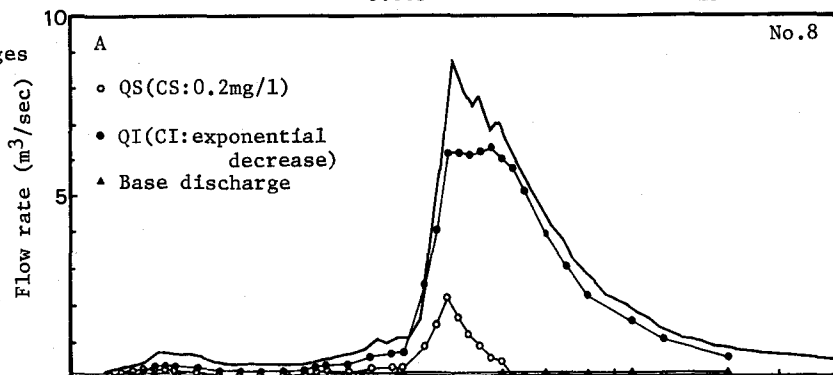


Fig.4.b
Separated discharges
using
tank-model.

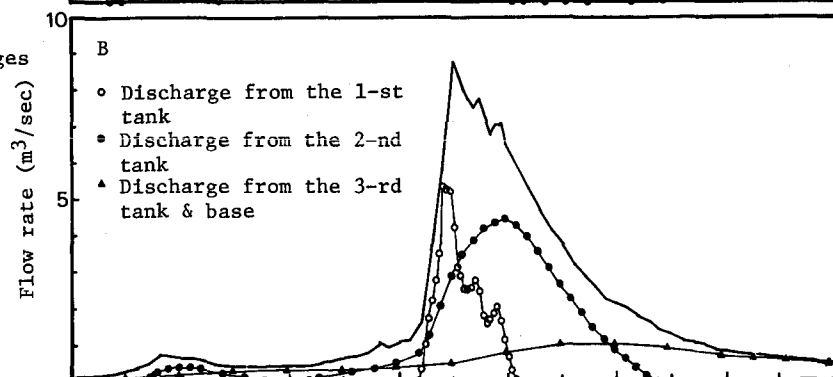
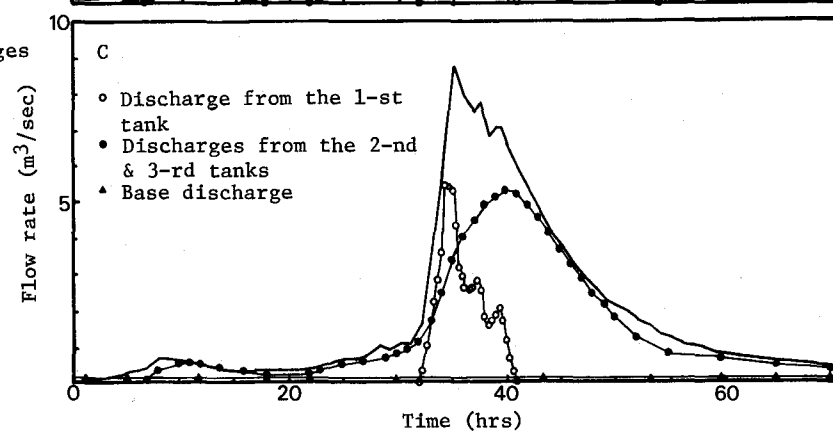


Fig.4.c
Separated discharges
using
tank-model.



1) NO_3^- で分離したもの (Fig. 4. a) とタンク・モデルによるもの (Fig. 4. b, c) とでは、 $Q_S = 0$ となる時刻 t_b がほぼ一致する。この傾向は他の降雨例でもみられた。 NO_3^- による分離法では t_b は、それ以後の濃度と累加流量とに式 (4) より導かれる次の関係がある時刻として定められる。

$$\ln C_T(t) = -\alpha \int_{t_b}^t Q_T(\tau) d\tau + (\ln C_0 - \alpha \int_0^{t_b} Q_T(\tau) d\tau) \quad (12)$$

ここに、左辺と右辺第一項以外は定数項である。上式で回帰係数が最も大きくなる ($R^2 = 0.977$) t_b を求めると、この例では $t_b = 41$ 時となり、

$$\ln C_T(t) = -0.00902 \int_{41}^t Q_T(\tau) d\tau + 0.502 \quad (13)$$

となる。この t_b がタンク・モデルで $Q_S = 0$ となる時刻に等しいということは、流量減少時の二段目、三段目からの流出について、濃度と累加流量との間に式 (13) の関係があるということである。このようにタンク・モデルを用いて分離した成分と水質要素を用いて分離した成分に共通の特性がみられるということはそのタンクが何か特定の物理的要素を代表していることを意味していると考えられる。

2) NO_3^- で分離して Q_S と考えた量はタンク・モデルで Q_S と考えた量に比べかなり少ない。 NO_3^- による分離法で C_S を 0 から C_G の範囲で変えても、この傾向は同様にみられた。このことより、 NO_3^- による分離で Q_S としたものとタンク・モデルの一段目からの流出として求めた Q_S とは本質的に異なるといえる。 NO_3^- による Q_S はタンク・モデルの Q_S のうちの比較的低濃度のものの寄与を示しているものであり、またタンク・モデルによる Q_S には表層土壌との交換を経たものが多いとも言うことができる。

3) 数値フィルターにより分離した結果 (Fig. 4. d) は、タンク・モデルによる結果と非常に似通ったものとなった。これは 2 段のタンクと 2 階の微分方程式のもつ、数学的類似性を反映しているものと思われるが、タンク・モデルでは入力降雨であり、数値フィルターでは総流出量が入力であるにもかかわらず、類似の結果になるという事実は注目に値する。しかしながら、ここに示した分離結果は、ハイドログラフの通減部から求めた指数通減率 α を、全く反映しないものとなっているため、今のところカット周波数の物理的意味については不明である。今後本報の数値フィルターと物理特性との対応が明らかになれば、最小自乗法という作業なしに、分離を行ない得ることになる。

(2) 分離結果と水質との関係

流出成分を分離した結果が妥当なものかどうかは、分離した各成分がそれぞれの物理的意味を反映した何らかの不変・妥当な性質を持っているかどうかで判断される。各成分の持つ性質としては、水文学的特性と水質的特性とが考えられる。本研究でも分離結果の水文学的検討をまず試みたが、流出率が小さいためか、各成分の明確な性質を抽出することはできなかった。そこで以下では、各成分の水質特性が各分離法による分離結果にどのようにあらわれているかを検討する。

成分分離の結果が妥当で各成分の水質についての情報があれば、分離結果を用いて種々の水質成分の時間変化をある程度説明できると考えられる。ここでは、対象水質成分の濃度が時間によらず一定であると仮定し、この仮定のもとで、各方法による分離結果により対象水質の変化をどの程度説明できるかを検討する。

流出を三成分に分けたとき、任意の水質項目について前述の式 (1)、(2) より

$$C_T(t) = (C_S - C_G) \frac{Q_S(t)}{Q_T(t)} + (C_I - C_G) \frac{Q_I(t)}{Q_T(t)} + C_G \quad (14)$$

となる。このとき、観測値 C_T 以外の濃度 C_S 、 C_I 、 C_G が一定なら、この式は各成分の流量比 Q_S/Q_T 、 Q_I/Q_T を説明変数とする二変数の重回帰式と考えられる。すべての観測値について残差平方和が最小となるように最小二乗法で係数を決めれば、重回帰式が定まり各成分の濃度が決まる。もし分離が妥当でなければ、重相関係数が低くなるか濃度の値が不自然なものになるはずである。濃度が一定という仮定がなりたたないときも重相関係数は低くなるが、その場合も重回帰分析の結果で各方法を比較し、特徴を知ること

Fig.4.d
Separated discharges
using
lowpass filter.

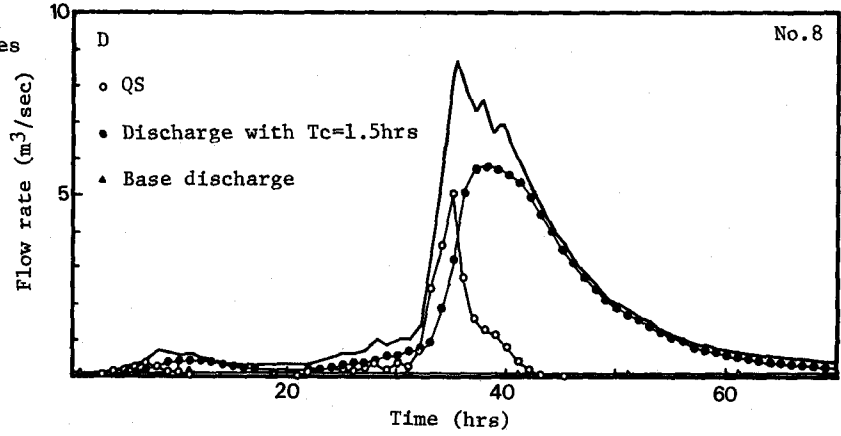


Table 2 Results of multiple regression analyses
between water quality and separated discharges

Case	R	E.C.(μ S/cm)			R	C O D (mg/l)		
		CG	CI	CS		CG	CI	CS
A	0.890	217	105	109	0.664	-79.0	8.7	81.1
B	0.830	132	108	93	0.900	3.5	-0.3	67.2
C	0.926	214	109	92	0.900	11.0	0.7	66.4
D	0.909	234	105	106	0.815	-46.0	3.0	53.1
E	0.947	$C=124 \cdot Q^{-0.0969}$			0.717	$C=3.37 \cdot Q^{0.659}$		

できる。

前述の方法 A～D で分離した結果を用い、濃度との関係を重回帰分析で求めた結果を、Table 2 に示す。用いた水質項目は、その変化の様子から主に中間・地下水流出によると考えられる電気伝導度と、主に表面流出によると考えられる COD_{Mn} である。濃度と流量との関係については便宜的に

$$C_T(t) = \alpha Q_T(t)^\beta \quad (15)$$

の式が使われることが多いが、この式による相関係数も方法 E として Table 2 に示した。Table 2 からえられる主な知見は、次の通りである。

1) タンク・モデルによる分離結果では、地下水流出 Q_G としてベースの値を使う方法 C の方がベースと三段目からの流出の和を使う方法 D よりも重相関係数が大きい。これより、 Q_G の増加分はもとの Q_G とは水質的に異なるとも考えられる。また、重回帰式 (15) の係数として推定した C_G は時刻 0 での値とは異なり、時刻 0 での Q_1 の存在、または重回帰式への濃度以外の要素の寄与が可能性として示唆される。

2) 電気伝導度では、成分分離した流量を用いるより全量との相関式 (15) を用いる方 (方法 E) が、回帰係数は大きくなった。電気伝導度は水に含まれる種々の成分の総合的指標であるため、流出成分に分離して検討するメリットは小さいと考えられる。

3) COD_{Mn} では、全流量との相関よりもタンク・モデル、数値フィルターにより分離した流量との相関の方が高い。COD_{Mn} はその変化の様子が SS の変化の様子と似ている。SS は明らかに表面流出のみに依存するから、COD_{Mn} も表面流出によると考えられる。このようにある特定の流出成分の寄与が大きい水質項目では、成分分離が有効といえる。NO₃⁻ により分離したときの重相関係数が小さいのは、前述したようにこのときの Q_S が表層土壌との交換を経たものを含んでいないためと考えられる。そのため表層土壌からの寄与の大きい COD_{Mn} で、特に重相関係数が小さくなったといえる。

5 結論

降雨流出水の流量・水質の経時変化を調べ、その結果をもとに種々の流出成分分離法による分離結果を比較検討し、以下の結論を得た。

- (1) 降雨流出による水質変化には水質項目毎に独特のパターンがあり、各流出成分の水質・流量比の影響がうかがわれる。特に NO₃⁻ については、従来報告されている濃度ピークが流量ピークよりおくれる例だけでなく、逆の例もみられ、成分流量比の違いを敏感に反映していると考えられる。
- (2) NO₃⁻ とタンク・モデルによる成分分離結果では、 $Q_S = 0$ となる時刻が一致し、これ以降は両者の Q_1 は同じになった。しかし、 Q_S の量については両者の差は大きく、その内容は本質的に異なると考えられる。
- (3) 各成分に含まれる各種の水質濃度が一定であるという仮定のもとで、各成分で分離した成分流量により全流出水中の当該水質成分の濃度変化をどの程度説明できるかを、重回帰分析により検討した。その結果、電気伝導度については、成分分離はそれほど有効ではなかった。COD_{Mn} については、タンク・モデル、数値フィルターによる分離流量が水質変化の説明に有効であった。このことより、特定の流出成分に強く影響される水質項目については、分離により水質がうまく説明できると考えられる。
- (4) 数値フィルターのパラメータ δ 、 T_C の選択には、物理的対応関係の明らかでない便宜的方法を用いたが、分離結果はタンク・モデルの結果と類似したものになった。

謝辞

相川、上井川橋地点の流量観測施設は、複断面四角堰に自記水位計を取り付けたものであるが、山梨県土木部甲府工事事務所の援助により 1988 年 7 月完成したものである。また、数値フィルターによる分離方法については、宇都宮大学土木工学科長谷部正彦助教授に、細部についての御指導を賜った。また、水質調

査に当っては、山梨大学環境整備工学科の筆者らの研究室の大学院生・卒論生に大いに協力をいただいた。財政的には、昭和58年度文部省科学研究費補助金、奨励研究(A)、課題番号 58750460の援助を得た。以上記して深甚なる謝意を表わす。

参考文献

- 1) 海老瀬・村岡・大坪：降雨流出成分の水質による分離、第26回水理講演会論文集、1982年2月、pp. 297～284
- 2) 竹内・坂本・本郷： NO_3^- をトレーサーに用いた流出成分分離の可能性について、第27回水理講演会論文集、1983年2月、pp. 405～414
- 3) 本郷・竹内・坂本： NO_3^- を用いた流出成分の分離に関する研究(1)－表層土壌から浸透水への NO_3^- の供給状況－、第38回年講、1983年9月、講演概要集Ⅱ、pp. 57～58
- 4) 坂本・竹内・本郷： NO_3^- を用いた流出成分の分離に関する研究(2)－分離例の検討と水質タンクモデルの試み－、第38回年講、1983年9月、講演概要集Ⅱ、pp. 59～60
- 5) 海老瀬・宗宮・平野：タンクモデルを用いた降雨流出負荷量解析、用水と廃水、Vol. 21、No. 12、1979、pp. 46～56
- 6) 日野・長谷部：流量時系列のみによる流出解析について、土木学会論文報告集、No. 300、1980年8月、pp. 43～56
- 7) 日野・長谷部：フィルター分離AR法による非線形流出系の同定と予測(時間単位)、土木学会論文報告集、No. 324、1982年8月、pp. 83～94