

# 安定同位体比 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) および硝酸イオン濃度 ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) による 流出分離とフィルター分離 AR 法による成分分離について

SEPARATION OF TOTAL DISCHARGE INTO RUNOFF COMPONENTS BY USING  
BIO-GEOCHEMICAL INDICATOR ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\text{NO}_3$ ) AND FILTER SEPARATION AR METHOD

長谷部正彦\*・日野幹雄\*\*

By Masahiko HASEBE and Mikio HINO

The purpose of this paper is to separate the total storm runoff into components by the following methods.

(1) The first method is to separate the total discharge, using bio-geochemical indicator ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\text{NO}_3$ ) into overland flow, inflow and groundwater flow by the mass balance equations describing the fluxes of water and the tracers in the stream.

(2) The second methods are to separate the total runoff into each components by Filter separation AR method and Tank model.

*Keywords*: storm runoff, bio-geochemical indicator, filter separation AR method, tank model

## 1. はしがき

一般に、河川流量は、3流出成分すなわち表面流出、中間流出および地下水流出成分に分離される。流出量を流出成分に分離する方法には、いくつかの手法が提案されている。本論文では、ハイドログラフの逓減部の流量の勾配から分離時定数を求めて、その分離時定数を用いた数値フィルターを実測流出量に汜波して長期流出成分（地下水流出）と短期流出成分（中間・表面流出）に流出分離する方法（フィルター分離 AR 法）<sup>1),2)</sup>を用いる。

一方、最近では、水質情報を用いて流出量を流出成分に流出分離することが行われてきている。本論文では、地球化学的資料として、水の酸素同位体比 ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  すなわち  $\delta^{18}\text{O}$ ) と環境化学的資料として、 $\text{NO}_3$  イオン濃度 ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) のそれぞれの情報から分離した流出成分と上記のフィルター分離 AR 法により分離した流出成分の結果を比較検討してみた。なお、対象流域は、Sklash, M. G. & Farvolden, R. N. (1979)<sup>3)</sup> によって Geochemical 資料および水文資料が整備されている

Ruisseau des Eaux volees の流出試験地と、竹内・坂本ら (1984)<sup>4)</sup> により測定および解析された笛吹川の支流の相川流域である。

## 2. 流出成分分離

### (1) 地球および環境化学的手法による流出分離

水質濃度による流出分離は、流量の連続と物質保存則を表わす次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} y(t) &= y^{(1)}(t) + y^{(2)}(t) \\ C(t)y(t) &= C^{(1)}(t)y^{(1)}(t) + C^{(2)}(t)y^{(2)}(t) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $y(t)$ :  $t$  時刻の総流出量、 $C(t)$ : 総流出量の濃度、 $y^{(1)}(t)$ : 地下水流出量、 $C^{(1)}(t)$ : 地下水流出量の濃度、 $y^{(2)}(t)$ : 中間・表面流出量、 $C^{(2)}(t)$ : 中間・表面流出量の濃度。式 (1) から、地下水流出量  $y^{(1)}(t)$  は、次式で求まる。

$$y^{(1)}(t) = \frac{C(t) - C^{(2)}(t)}{C^{(1)}(t) - C^{(2)}(t)} y(t) \dots\dots\dots (2)$$

### (2) フィルター分離 AR 法による<sup>1)</sup>流出分離

フィルター分離 AR 法による流出成分の分離の詳細は文献<sup>2)</sup>に譲り、ここでは簡単に手順を述べる。

- 流出ハイドログラフの逓減部から分離時定数  $T_c$  を決める。
- 減衰係数  $\delta$  ( $=2.1$ ) と a) で与えられた分離時

\* 正会員 工博 宇都宮大学助教授 工学部土木工学科  
(〒321 宇都宮市石井町 2753)

\*\* 正会員 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科  
(〒152 目黒区大岡山 2-12-1)

定数  $T_c$  から、数値フィルターの係数  $C_0, C_1$  を次式で求める。

$$\left. \begin{aligned} C_0 &= (\delta/T_c)^2 \\ C_1 &= \delta^2/T_c \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

c)  $C_0, C_1$  から数値フィルター  $w_r$  を次式により求め、

$$w_r \begin{cases} = C_0 \exp[-C_1(r\Delta t)/2] \cdot \sinh[(C_1^2/4 - C_0)^{1/2} \cdot (r\Delta t)] / (C_1^2/4 - C_0)^{1/2} & (r=0, 1, 2, \dots, N) \\ = 0 & (r=-1, -2, \dots) \end{cases} \dots\dots\dots (4)$$

この低周波数値フィルター  $w_r$  を実測流出量に通した河波後の出力として式 (5) より地下水流出量が求まる。

$$y^{(1)}(t) = \alpha \sum w_r \cdot y(t-r) \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $\alpha$  : 重み係数、 $y^{(1)}(t)$  : 地下水流出量、 $y(t)$  : 実測流出量。この流出分離法で注意することは、従来の解析<sup>1), 2)</sup>では、ハイドログラフの立上がり点の基底流量つまり初期流量を取り除いて解析をしたが、地球および環境化学的解析ではあらかじめ基底流量を除くことが不可能であるので、地球および環境化学的方法を併用して解析する場合には、フィルター分離 AR 法により基底流量をも流出分離して求める必要がある。

3. 対象流域

対象流域は、Sklash & Farvolden (1979)<sup>3)</sup> の論文に引用されている流出試験地 (Ruisseau des Eaux Volees) と山梨県の笛吹川流域の支川で、竹内・坂本ら<sup>4)</sup> の論文で解析されている相川流域である。Ruisseau des Eaux Volees の水質資料としては地球化学的資料の水の酸素安定同位体  $^{18}O, ^{16}O$  の比である  $\delta^{18}O$  を用いる (後に定義について述べるが)。一方、相川流域の水質資料としては環境化学的資料の硝酸イオン濃度  $NO_3^-N$  を用いる。図-1, 2 に Ruisseau des Eaux Volees の洪水例と相川流域の流量ハイドログラフと濃度時系列を示

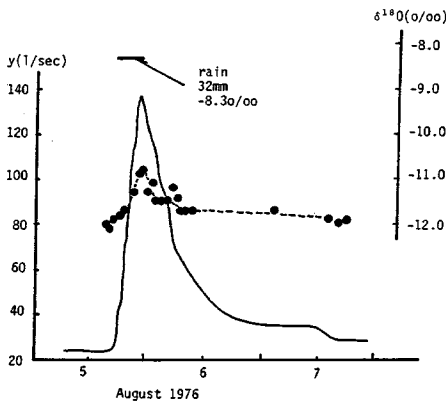


図-1 安定同位体比  $\delta^{18}O$  と流出量の時系列

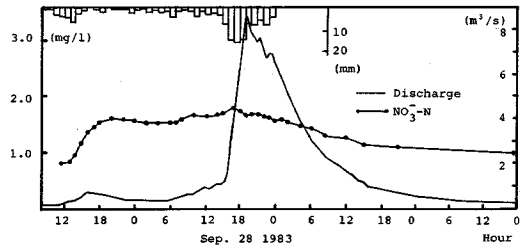


図-2  $NO_3^-N$  と流出量の時系列

している。

4. Ruisseau des Eaux Volees 流域への適用

(1) 安定同位体比 ( $\delta^{18}O$ ) を用いた地球化学的手法による流出分離

Ruisseau des Eaux Volees 流域の流出試験地の解析例は 4 洪水があるが、本論文ではそのうちの 2 洪水の例を解析する。地球化学的手法により流出分離する前に、水の酸素安定同位体  $^{18}O, ^{16}O$  の比である  $\delta^{18}O$  について述べる。天然水の酸素安定同位体比は  $^{18}O/^{16}O$  の比で示される。水のこの同位体比は自然界における蒸発や凝縮により同位体分別 (isotopic fractionation) を起こし変化<sup>5)</sup>。しかし、その変動は小さいものであり、 $^{18}O/^{16}O$  の絶対比の測定から詳細に検討することは、測定技術面から難しい。そこで、世界共通の標準試料の同位体比と試料水の同位体比の差を測定し、その測定結果は標準試料を基準とした千分偏差 (‰) で表示する。

$$\delta^{18}O(\text{‰}) = \frac{R(\text{試料}) - R(\text{標準})}{R(\text{標準})} \times 1000 \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $R$  (試料) : 試料水の  $^{18}O/^{16}O$ ,  $R$  (標準) : 標準海水の  $^{18}O/^{16}O$  (SMOW)。

地球化学的手法による流出分離成分を求める式 (2) を適用するにあたって、下記の仮定をする。

- a) 表面・中間流出成分の  $\delta^{18}O$  値は、降雨の  $\delta^{18}O$  値と等しくかつ、一定濃度とする。
- b) 地下水流出成分の  $\delta^{18}O$  値は、降雨がある前の流出の立上がり点の初期流量の濃度とし、一定濃度とする。

洪水 No.1 の水の酸素安定同位体比  $\delta^{18}O$  と流出量との関係を Sklash & Farvolden の論文<sup>3)</sup> から引用して図-3 に示している。洪水 No.1 の例では図-3 から、洪水のハイドログラフ上昇部では、地下水流出成分には地下水分に含まれる通気帯水分量 (すなわち通気帯の土壌や基岩中に存在する水分量) が存在しており、下降部では、流出成分には地下水と通気帯水分と中間・表面流出成分が含まれており、洪水の減水とともに中間・表面流出成分が減少して応答の遅い地下水流出成分となり、濃度は洪水前の地下水流出量の  $\delta^{18}O$  濃度に戻っている。文

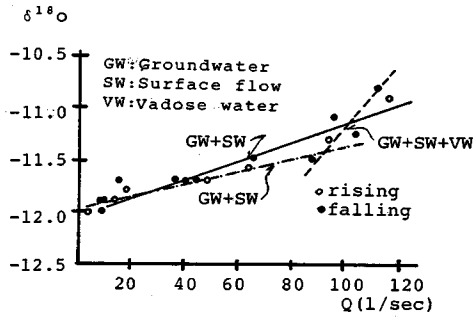


図-3  $\delta^{18}\text{O}$  と流出量の関係 (洪水 No.1)

献<sup>3)</sup>で指摘されているように、通気帯水分量を含む水の酸素安定同位体比は、地下水流出成分(遅い応答の特性をもつ成分)より重い、このことから通気帯水分量を含んでいる安定同位体比は重く、通気帯水分量が存在なくなると元の地下水流出成分の濃度に戻る。また安定同位体比は起源を異にする水の混入や蒸発が起こらない限り、地表近くの常温環境では変化しないという利点がある。以上のようにして、洪水 No.1 の成分濃度  $C^{(1)}$ 、 $C^{(2)}$  は、図-1 の  $\delta^{18}\text{O}$  の濃度時系列を参照して、地下水流出成分の  $\delta^{18}\text{O}$  濃度  $C^{(1)} = -12.0\text{‰}$ 、表面・中間流出成分の  $\delta^{18}\text{O}$  濃度  $C^{(2)} = -8.3\text{‰}$  となる。次に、洪水 No.2 については、文献<sup>6),7)</sup>に詳細に述べているので省略するが、 $C^{(1)} = -10.9\text{‰}$ 、 $C^{(2)} = -5.7\text{‰}$  となる。 $C^{(1)}$ 、 $C^{(2)}$  の  $\delta^{18}\text{O}$  値が求められたので、式 (2) により、洪水 No.1、No.2 の流出成分を地球化学的手法により流出分離して求めた結果を図-4、5 に示す。地球化学的手法による流出分離は、中間・表面流出成分と地下水流出成分の2成分の流出分離にとどまり、さらに地下水流出成分の早い応答をもつ成分と遅い応答をもつ成分への流出分離を行うには水質情報が不足して地下水流出成分をこれ以上に分離することは不可能である。

(2) フィルター分離 AR 法による流出分離

a) 基底流出量の分離 (遅い応答の地下水流出成分)

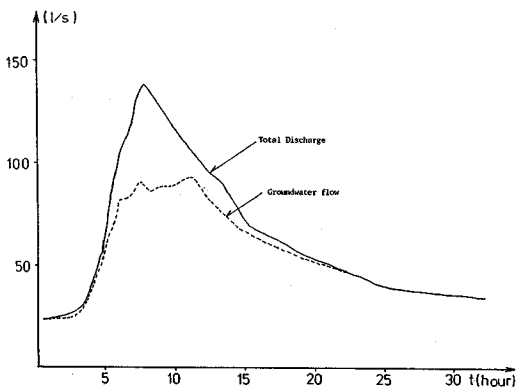


図-4 安定同位体比  $\delta^{18}\text{O}$  による流出分離 (洪水 No.1)

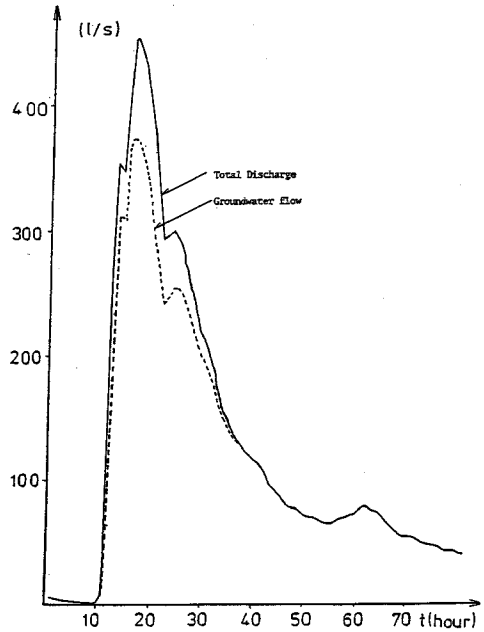


図-5 安定同位体比  $\delta^{18}\text{O}$  による流出分離 (洪水 No.2)

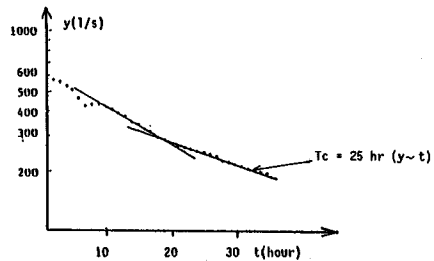


図-6 ハイドログラフの逓減部の流出量 (洪水 No.2)

先に述べたように、基底流量を除かない流出ハイドログラフの逓減部の流量から基底流量を分離するための分離時定数を求めるには、ハイドログラフの逓減部の流量を時間に対してプロットし、その勾配を求めればよい。たとえば、洪水 No.2 のハイドログラフの逓減部の流出量を図-6 に示している。この結果、遅い応答成分すなわち基底流出量を取り除くための分離時定数  $T_c = 25\text{ h}$  が求まる。同様に、洪水 No.1 の基底流出量を除く分離時定数は、 $T_c = 49\text{ h}$  と求まる。減衰係数  $\delta (=2.1)$  と分離時定数  $T_c$  より、式 (3)、式 (4) により数値フィルター  $w_r$  を求め、式 (5) により基底流出量の流出成分すなわち応答の遅い地下水流出成分が求まる (図-7、8)。図-7 には、従来の方法により基底流出量を分離する方法すなわち、洪水のハイドログラフの立上がり点の初期流量とハイドログラフの流量の逓減部の変曲点とを直線で結んで基底流出量を求める方法をも示してある。その結果、従来の基底流出分離法とフィルター分離 AR

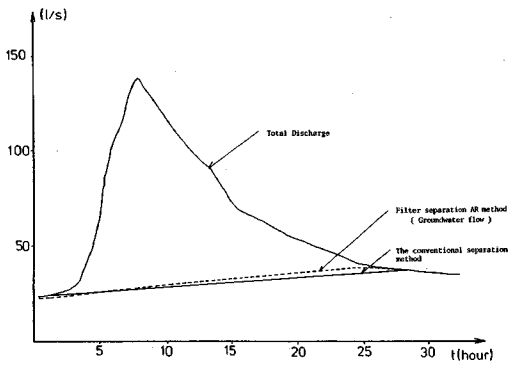


図-7 フィルター分離 AR 法による応答の遅い地下水流出成分の流出分離と従来の流出分離法との比較 (洪水 No. 1)

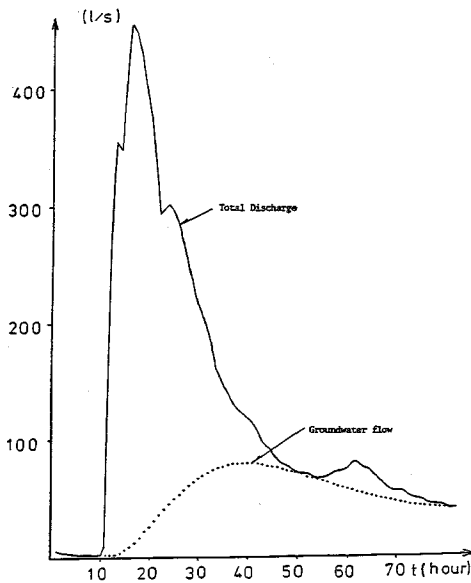


図-8 フィルター分離 AR 法による応答の遅い地下水流出成分の流出分離 (洪水 No. 2)

法により流出分離された基底流出量は、ほぼ一致していることがわかる。

地球化学的手法により流出分離された地下水流出成分からフィルター分離 AR 法により流出分離した基底流出成分を除いて斜線で示した部分の流出成分が応答の早い地下水流出成分となる (図-9, 10)。この流出成分は、Sklash & Farvolden<sup>9)</sup> が指摘しているように、河道近くの流出部分が飽和しているために以前に貯留されている旧水が押し出されて、いわゆる押し出し流として流出してくる成分と考えられる。すなわち capillary fringe effect によるためであると推察される (Gilham<sup>8)</sup>)。

b) 早い応答の地下水流出成分

図-11 に洪水 No. 1 の原時系列のハイドログラフの通減部の流出量を示す。また同時に、その図には、基底

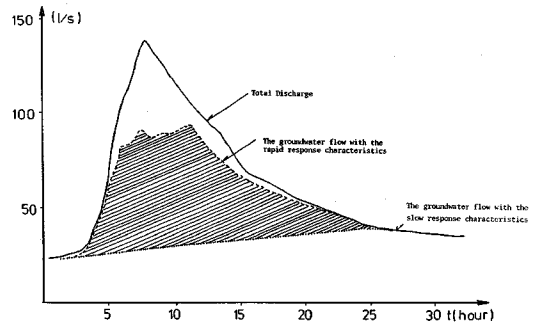


図-9 応答の早い地下水流出成分 (洪水 No. 1)

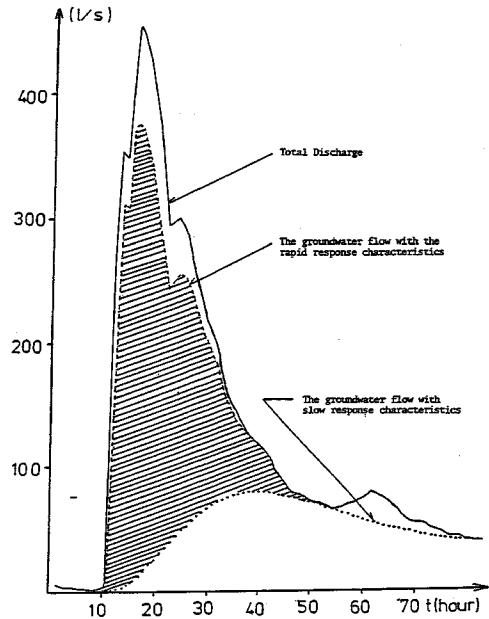


図-10 応答の早い地下水流出成分 (洪水 No. 2)

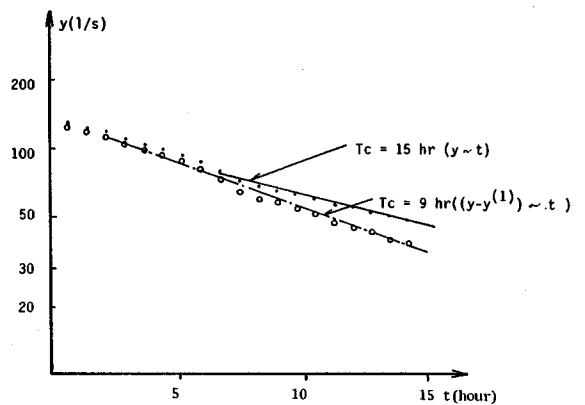


図-11 ハイドログラフの通減部の流出量 (洪水 No. 1)

流出量を除いた部分のハイドログラフ ( $y - y^{(1)}$ ) の通減部の流量を時間  $t$  に対してプロットした。この結果、図から応答の早い地下水流出成分の分離時定数は、洪水

No.1 では、 $T_c=9.0\text{ h}$ 、洪水 No.2 では、 $T_c=9.5\text{ h}$  となり、ほぼ一致している。それゆえ、分離時定数は、両洪水とも  $T_c=9.5\text{ h}$  とした ( $T_c=9.0\text{ h}$  としても流出分離後の結果はほぼ同じである)。分離時定数  $T_c$  が決定されたので基底流出量を流出分離した場合と同様に式 (3)、式 (4) および式 (5) を使って、応答の早い地下水流出成分を流出分離して、先の地球化学的手法により求めた早い応答の地下水流出成分とを比較した結果を図-12、13 に示す。これらの図から地球化学的手法の  $\delta^{18}\text{O}$  ( $\text{O}^{18}/\text{O}^{16}$ ) により流出分離した早い応答特性をもつ地下水流出成分とフィルター分離 AR 法で流出分離して推定した応答の早い地下水流出成分とがほぼ一致

している。このことから、フィルター分離 AR 法によりハイドログラフの逓減部の分離時定数を用いて流出分離した結果と安定同位体比  $\delta^{18}\text{O}$  を用いた地球化学的手法により流出分離した解析結果とが一致し、両者の解析法が妥当であることが示された。

### 5. 相川流域への適用

相川流域は笛吹川の支流である荒川の一派川で、流域面積は、 $A=8.4\text{ km}^2$  の山地小流域である。本解析で扱われる環境化学的手法による  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度およびタンクモデル法による解析は、山梨大学工学部の竹内・坂本らの文献<sup>4)</sup>を参考にしている。これらの解析結果(タンクモデルの1段階目からのタンクから流出してくる短期流出成分)とフィルター分離 AR 法による流出分離した短期流出成分とで比較検討する。

#### (1) フィルター分離 AR 法とタンクモデル法による流出成分の比較

図-14 に、竹内・坂本らによるタンクモデルの構造を示す。図-15 にはこのタンクモデルの1段階目のタンクから流出してくる短期流出成分(下段のタンクに浸透流出していく成分は除く)と考えられるハイドログラフ

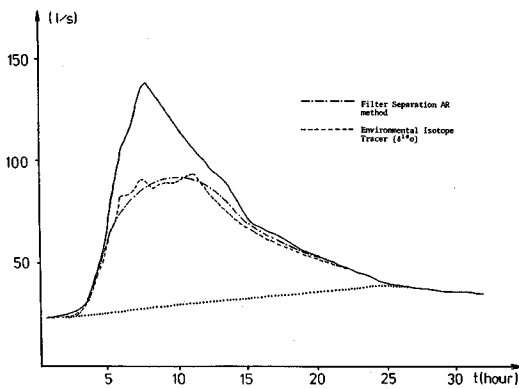


図-12 地球化学的手法とフィルター分離 AR 法による応答の早い地下水流出成分の比較 (洪水 No.1)

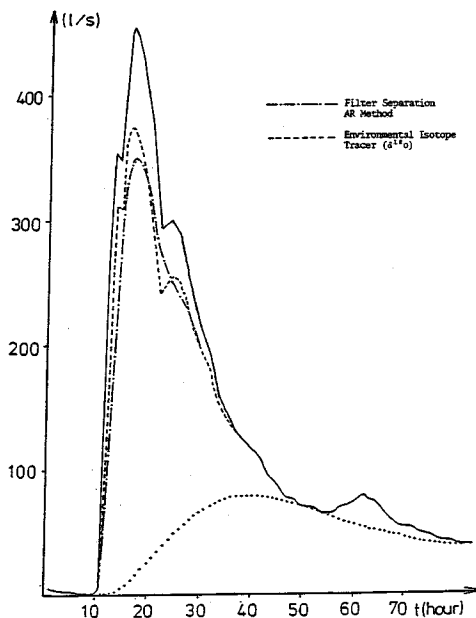


図-13 地球化学的手法とフィルター分離 AR 法による応答の早い地下水流出成分の比較 (洪水 No.2)

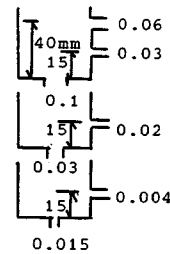


図-14 タンクモデルの構造 (文献<sup>4)</sup>)

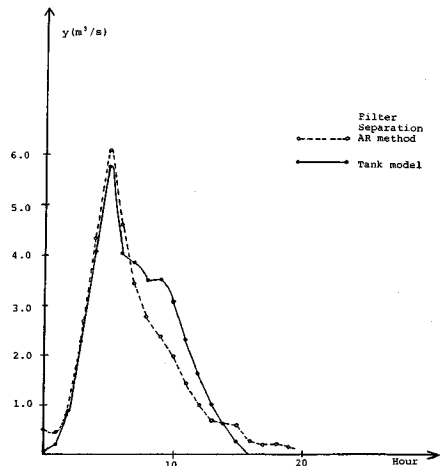
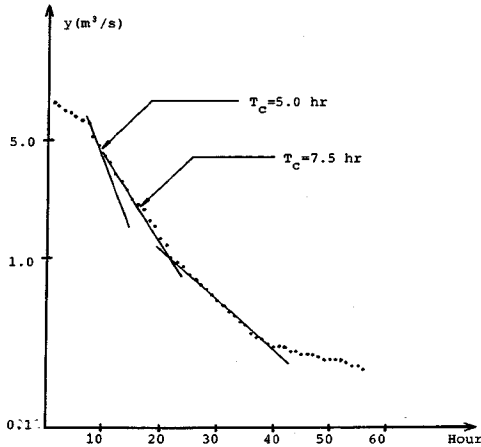
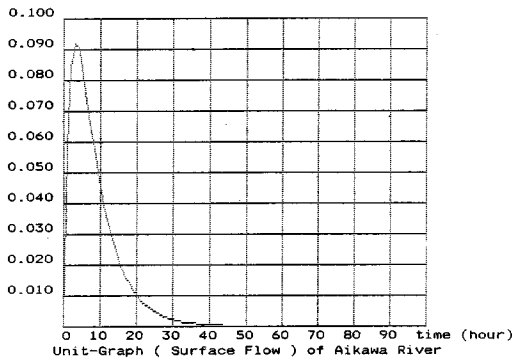


図-15 1段階目のタンクからの流出成分とフィルター分離 AR 法 ( $T_c=7.5\text{ h}$ ) による流出成分の比較



図一六 ハイドログラフの逓減部の流出量 (相川流域)

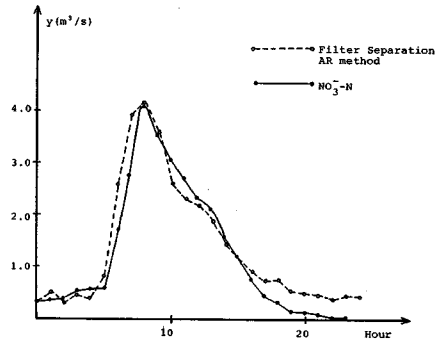


図一七 応答関数 (1段目のタンクから流出してくる成分)

を示す。次に、ハイドログラフの逓減部の流出量を図一16に示す。図から、短期流出成分に対応する分離時定数  $T_c (=7.5 \text{ h})$  を用いて、フィルター分離 AR 法により流出分離した短期流出成分のハイドログラフとの比較をも図一15に示す。両者の短期流出成分がほぼ一致して、両者の流出解析法による結果がほぼ同一であることが示された。なお、本論文で扱う短期流出成分とは、一応三段のタンクモデルの1段目のタンクから流出する成分とする。参考のためにこの流出成分の応答特性を表わす応答関数を図一17に示す。この応答関数をみるとピーク流量までの到達時間は約4時間くらいで、流出をしおえるのは約40時間くらいである。

## (2) $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度を用いた環境化学的手法とフィルター分離 AR 法による流出成分の比較

図一18に、文献<sup>4)</sup>による  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度を用いて流出分離した表面流出成分のハイドログラフを示す。その図に、フィルター分離 AR 法により流出分離した短期流出成分のハイドログラフをも示す。なお、フィルター分離 AR 法による短期流出成分の流出分離は、 $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度



図一八  $\text{NO}_3\text{-N}$  により分離した流出成分とフィルター分離 AR 法 ( $T_c=5 \text{ h}$ ) による流出成分

により分離された表面流出成分にフィットするような分離時定数を求めて解析した。このときの分離時定数は  $T_c=5.0 \text{ h}$  となり、ハイドログラフのピーク流量直後の勾配、すなわち前出の図一16の逓減部のきつい勾配の時定数とほぼ一致していたことが注目される。なお、中間流出成分については、タンクモデル法と  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度により流出分離した流出成分は、両者一致していることがさきの文献<sup>4)</sup>により報告されている。

## (3) 3つの流出分離法による比較

(1), (2) で示したように、タンクモデル法の1段目から流出した成分の時定数  $T_c=7.5 \text{ h}$  と硝酸イオン濃度により流出分離した流出成分にフィルター分離 AR 法を適用して求めた (ハイドログラフの流量逓減部のきつい勾配の時定数) 時定数  $T_c=5.0 \text{ h}$  とは異なっていた。このことから、環境化学的資料の  $\text{NO}_3$  イオン濃度で流出分離した短期流出成分 (図一18) とタンクモデル法 (図一15) による1段目のタンクから流出する短期流出成分とは、(両図からもわかるのだが) 一致しているとはいえない。つまり、 $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度を用いた環境化学的手法により流出分離された流出成分は、分離時定数から判断すると応答の早い部分であると考えられる。この違いとして、水質資料としての  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度による原因かあるいはタンクモデル法に原因があるかは、今後検討していく必要があると思われる。

## 6. 結 論

安定同位体比 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) および  $\text{NO}_3$  イオン濃度 ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) を用いた地球および環境化学的手法とフィルター分離 AR 法およびタンクモデル法により流出分離した流出成分について Ruisseau Eaux des Volees 流域と相川流域を例にして比較検討した。

その結果、両流域の水文特性としての主たる結論を以下に示す。

### a) Ruisseau des Eaux Volees 流域の場合

(1) Ruisseau des Eaux Voless 流域の流出試験地の流出分離は、洪水 No.1, No.2 とも中間・表面流出と地下水流出の 2 成分に、さらに地下水流出成分は応答の早い成分と遅い成分に分離された。

(2) 実測流出量のハイドログラフから基底流量 (応答の遅い流出成分) を流出分離する方法において、従来のハイドログラフの逓減部の変曲点と洪水の立上がり点とを直線で結ぶ方法とフィルター分離 AR 法による分離方法とが一致した。

(3) 地下水流出成分は、応答の早い地下水流出成分と応答の遅い地下水流出成分とに流出分離された。応答の早い特性をもつ地下水流出成分が存在する理由としては、Sklash & Farvolden (1979) や Gilham (1984) が指摘しているように河道近くの飽和領域での capillary fringe effect によるものと推察される。

(4) 地球化学的手法 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) により流出分離された早い応答の地下水流出成分とフィルター分離 AR 法により流出分離した早い応答の地下水流出成分とがほぼ一致していた。

#### b) 相川流域の場合

(5)  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度による環境化学的手法とタンクモデル法 (1 段目のタンクからの流出成分) およびフィルター分離 AR 法により流出分離された短期流出成分は、タンクモデルとフィルター分離 AR 法とで一致した結果が得られたが、 $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度により分離された流出成分とは、多少、異なっていた。

(6) ハイドログラフのピーク流量以降の逓減部の最急勾配部の時定数  $T_e=5.0\text{ h}$  としてフィルター分離 AR 法により分離した流出成分と  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度による分離した流出成分とがほぼ一致していた。このことから判断すると  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度を用いて分離した流出成分は、この例のみでは断定はできないが、早い応答をもつ流出成分であると考えられる。

以上、主たる結論を述べたが、フィルター分離 AR 法による解析結果と地球および環境化学的手法による流出分離の結果とがほぼ一致し、さらに、地球および環境

化学的手法のみでは分離が不可能な成分にフィルター分離 AR 法を適用すれば、流出分離が可能となり、このように両手法を併用することにより有効な流出分離の手段となることが明らかになった。また、相川流域については  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度による方法、タンクモデル法およびフィルター分離 AR 法とで多少、流出成分が異なる部分もあったが、この点を今後は解析例を増やしたり、水質濃度イオンの選択の問題などを検討して解析していく必要があると思われる。最後に、相川流域の資料・解析にご助言を頂いた山梨大学 竹内邦良教授および坂本康講師の両氏に心から感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 日野幹雄・長谷部正彦：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, pp. 83~94, 1982. 8.
- 2) 日野幹雄・長谷部正彦：水文流出解析, 森北出版, 1985.
- 3) Sklash, M.G. and Farvolden, R.N.: The role of groundwater in storm runoff. In: V. Back and D.A. Stephenson (Guest-Editions), Contemporary Hydrogeology—The George Burke Maxey Memorial Volume. J. Hydrol., 43: 45-65, 1979.
- 4) 竹内邦良・坂本 康・木郷善彦： $\text{NO}_3^-$  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, 第 28 回水理講演会論文集, pp. 557~566, 1984. 2.
- 5) 中井信之・清棲保弘・水谷義彦：安定同位体比による地下水及びチベット地域の水の供給源の研究, 科研報告書「比較河川学の研究」, pp. 69~81, 1986. 3.
- 6) 日野幹雄・長谷部正彦：地球化学的データとフィルター分離 AR 法による流出成分分離について, 第 28 回水理講演会論文集, pp. 567~570, 1984. 2.
- 7) Hino, M. and Hasebe, M.: Separation of a storm hydrograph into runoff components by both filter-separation AR method and environmental isotope tracees, Journal of Hydrology, 85, pp. 251~264, 1986.
- 8) Gilham, R.W.: The capillary fringe and its effect on water table response, Journal of Hydrology, 67, pp. 307~324, 1984.

(1987. 3. 23・受付)