

数値フィルターによる河川水質の成分分離とその特性について

STUDY ON WATER QUALITY OF RUN-OFF COMPONENTS AND ITS CHARACTERISTICS BY FILTER SEPARATION METHOD

佐藤 悟*・羽田守夫**・松本順一郎***・佐藤敦久****

By Satoru SATO, Morio HANEDA, Jun-ichiro MATSUMOTO and Atsuhisa SATO

Many numerical, hydrological and chemical techniques have been developed to separate each run-off component from discharge. In this study, filter separation method is applied to separate the concentration of water quality of surface and ground-water flow.

The concentration of ground-water flow (C_g), estimated by this method, seems to be constant during a short period of one or two months. During a long term, however, the value of C_g varies seasonally. As the concentration of surface flow (C_s) is influenced by many factors, such as season, water quality, discharge and so on, the value of C_s varies a great deal. And C_s can be expressed as various functions of the value of surface flow (Q_s).

We propose here a new method to separate graphically each quality by using the relationship between the water quality (C) and the ratio of discharge (Q_s/Q) based on the chemical mass-balance equation. It enables us to separate the quality of C_g and C_s , and to estimate its fluctuation characteristics.

1. 序 論

従来、河川の水質変化に関する研究は、水質や負荷量と流量やその履歴との関係から行われ^{1),2)}、それなりの成果をあげてきていると思われる。しかし、本来河川の流量は表面流出、中間流出および地下水流出量等に分離することができ、これらがさまざまな割合で混じり合い形成されていると考えれば、従来からの河川水質変化を1つの分離し得ない量として扱った水質変動特性の検討は、必ずしも十分とはいえないことも事実である。したがって、河川水質を流量の各成分に対応した水質にそれぞれ分離し、その変動特性を検討できれば、河川の水質変化を理解するうえで大きな意義があると思われる³⁾。

このためには、初めに流量を各成分に分離する必要があるが、これには⁴⁾、

- a) 種々の経験式や Linsley らの示した式を用いるもの

- b) ^{82}Br , ^{24}Na , ^3H , ^{131}I といった放射性同位元素をトレーサーとして用いるもの

- c) ある特定の水質変化から分離するもの

- d) 数値フィルター等の周波数領域で分離するものなどがある。これらの中でよく使われる方法は a) であり、水質から論じた c) の方法も $\text{NO}_3\text{-N}$ を用いた海老瀬⁵⁾⁻⁷⁾、竹内⁸⁾ らの研究、および無機イオン^{9),10)} や電気伝導率^{11),12)} を用いたものなどが報告されている。d) については、日野・長谷部¹³⁾⁻¹⁵⁾ により提案されたもので、数理的なフィルターを用い、流量時系列を直接分離するものである。このように流量を分離するに確固とした方法はないが、ここでは d) の数値フィルターによる方法を用いた。

流量分離後の河川水質の成分分離には、負荷量時系列に同様な数値フィルターを用いる方法、分離された地下水の水質を仮定して求める方法、物質収支式で表現される河川水質変化をあてはめて行う方法などが考えられる。ここではこれらすべての方法について河川水質の成分分離を試み、比較検討を行った。

この種の研究は、溶解性物質と流量との関係から表面、中間および地下水流出量等を検討した O'Conner¹⁶⁾、数値フィルターを用い、各成分の溶出則の推定を行った日野・長谷部¹⁷⁾ など数例にすぎず、特に流量の分離をも

* 正会員 秋田工業高等専門学校助手 土木工学科

(〒011 秋田市飯島文京町1-1)

** 正会員 工博 秋田工業高等専門学校助教授 土木工学科 (同上)

*** 正会員 工博 日本大学教授 (研究所)

(〒963 郡山市田村町徳定字中河原1)

**** 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科
(〒980 仙台市荒巻字青葉)

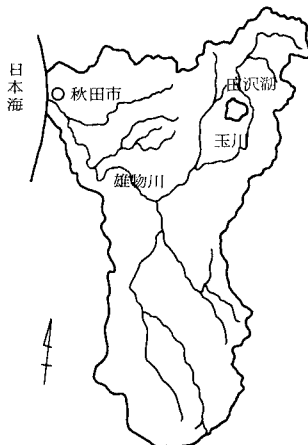
とにした水質の成分分離例はほとんどない。

本研究は、流量の成分分離が可能であるとの仮定のもとに、これを水質の成分分離に応用し、これまでに得られた雄物川の長年による水質データを用い、水質の成分分離の可能性および分離された水質の特性等を詳細に検討したもので、これらをもとに河川の水質変化をより深く理解することを目的とした。

2. 雄物川流域および調査方法

雄物川流域の概要を図一に示した。ここは流域面積約49万ha、人口約69万と、わが国では比較的経済発展の遅れた地域である。雄物川は流路延長約133kmの一級河川であり、主要産業が臨海部の秋田市に集中した人為的汚濁の少ない河川である。また、山間部には冬期間著しい積雪があり、この融雪による出水が年間の大きな比率を占める河川でもある。

水質調査は1日1回採水し分析する連続調査である。今回の解析の対象は、1974年から1983年までの春期5回、夏期7回、秋期7回および冬期2回の延べ678日間の各水質調査結果である。年度により若干の変動はあるが、春期は3月中旬から4月下旬まで、夏期は7月中旬、秋期は10月中旬、冬期は1月中旬からのそれぞれ約1か月間を対象としている。採水は時刻を定め、河口より約4km上流に位置する仁井田浄水場の原水着水池にて行った。また流量の算定には、採水点のやや上流の建設省橋川水位観測所での水位データを用いた。測定水質項目は、各調査期間で若干異なるが、濁度、SS、COD (KMnO₄)、クロロフィルa、溶解性COD、総アルカリ度、総硬度、Ca硬度、Mg硬度、塩素イオン、総リン化合物、リン酸態リン、アンモニア・亜硝酸・硝酸態窒素、溶解性物質、硫酸イオン、電気伝導率、pHとした。また、これらの試験方法は、主として上水試験法に準拠



図一 雄物川流域

した。

3. 数値フィルターの利用

フィルターは、数多くの情報から必要とされるものを、ある特定の基準をもって選択する働きをもつ。この概念は、一般に電気信号から雑音を除くといった電氣的な分野で活用される場合が多い。しかし、自然現象で得られる種々の時系列も、これとTime-Scaleが異なる点を除けば何らその性格に違いはなく、同様なフィルターの概念を導入できるものと思われる。

数値フィルターを用い、各流量成分を分離する方法が日野・長谷部により提案されている。この中では、流量時系列を降雨に対し応答の早い高周波系列(表面流出量)と、逆に応答の遅い低周波系列(地下水流出量)とに分離を行っている。以下にその概略を述べる¹³⁾。

全流量 $y(t)$ と地下水流出量 $y_d(t)$ の関係を次の2階

$$\frac{d^2 y_d(t)}{dt^2} + C_1 \frac{dy_d(t)}{dt} + C_0 y_d(t) = C_0 y(t) \quad \dots\dots (1)$$

常微分方程式で表わすとき、この系の応答関数 $h(\tau)$ は非振動系で

$$h(\tau) = C_0 \cdot \exp(-C_1 \tau / 2) \cdot \sinh(\sqrt{C_1^2 / 4 - C_0} \cdot \tau) / \sqrt{C_1^2 / 4 - C_0} \quad (\tau \geq 0) \quad \dots\dots (2)$$

$$h(\tau) = 0 \quad (\tau < 0) \quad \dots\dots (3)$$

と示される。ここで時定数 C_0 、 C_1 をそれぞれ

$$C_0 = (\delta / T_c)^2 \quad \dots\dots (4)$$

$$C_1 = \delta^2 / T_c \quad \dots\dots (5)$$

ただし、 δ : 減衰係数、 T_c : 分離日数

とし、高周波成分を除いた地下水流出量 $y_d(t)$ を式(6)により分離する。

$$y_d(t) = \int_0^\infty h(\tau) \cdot y(t - \tau) d\tau \quad \dots\dots (6)$$

各流量成分を推定するに際し、あらかじめ分離日数ならびに減衰係数を決定する必要がある。分離日数の決定方法には種々のものがあるが、今回は資料の入手の点から、流量時系列の自己回帰係数ならびに自己相関係数の変化から判断するものとした。

表一に、1975年から1980年までの流量時系列を、年度ごとに自己回帰式で表現した場合の回帰係数を、図一2には1年間を60日単位に分けた場合のそれぞれの

表一 流量時系列の自己回帰係数

	1975	1976	1977	1978	1979	1980
A1	-0.898	-0.954	-0.826	-0.937	-0.952	-0.803
A2	0.306	0.297	0.151	0.285	0.366	0.258
A3	-0.197	-0.296	-0.158	-0.017	-0.203	-0.153
A4	0.051	0.179	0.094	-0.111	0.186	0.018
A5	0.027	-0.036	-0.083	0.030	-0.220	-0.067
A6	-0.102	0.028	0.024	0.039	0.184	-0.048
A7	0.049	-0.122	-0.033	-0.077	-0.145	-0.089
A8	-0.059	0.068	0.004	-0.022	-0.048	-0.043
A9	-0.009	-0.020	0.006	-0.004	0.018	0.071

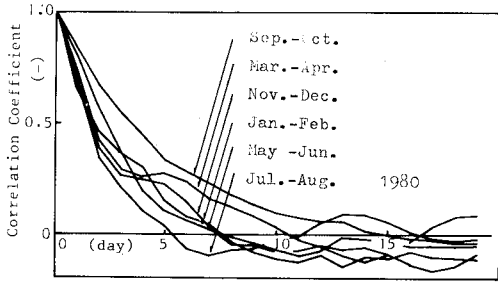


図-2 流量時系列の自己相関係数

自己相関係数の変化を示した。年度により、回帰係数に若干の変化が生じ、また同年度であっても対象とする期間により、自己相関係数の挙動に差異が認められた。しかし当日の流量に与える以前の影響は、およそ7~8日程度までに十分小さくなると判断される例が多くみられた。厳密にはそれぞれに異なる分離日数を与えるものと思われたが、今回の分離の対象が1~2か月程度と比較的短く、そのため生じる相関係数等の信頼度の問題や、数値を変えた場合の分離結果への影響が大きいことなどから、今回は分離日数をすべて7日と仮定し、検討を進めた。

減衰係数の決定には、周波数応答曲線から滑らかでかつ目的とする高周波成分を十分に除去できるものを選ぶが、今回は非振動系の領域で減衰係数を種々変化させ、特に流量減衰部での地下水流出量の変化を検討し、決定の際の参考とした。本法によれば、減衰係数の地下水流出量に与える影響は分離日数よりも小さく、その決定に際し比較的选择の幅があると思われたこと、またいずれの値が実際の地下水の量的、質的挙動を説明できるか現時点では十分な解釈はできないことから、今回は同流域を扱った日野・長谷部の文献を参考にその値を3と仮定し、分離を進めた。

この方法で得られる地下水流出量は、特に流量減衰部において河川流量より大きな値を示す場合が多く、何らかの補正が必要となる。この便宜的な方法が日野・長谷部により示されており、その手順を式(7)、(8)に示した。これは地下水流出量に定数 α を乗じ、全体の値

を圧縮し常に $y_a(t) \leq y(t)$ とするもので、 α はフィルターの重みといった性格をもつ。

$$M_{min} |y(t) - \alpha y_a(t)| \geq 0 \dots\dots\dots (7)$$

$$y'_a(t) = \alpha \cdot y_a(t) \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $y'_a(t)$: 補正後の地下水流出量

図-3に各流量成分に分離した結果を示した。

4. 河川における水質成分分離法の利用と応用

(1) 河川水質成分の分離

河川水はさまざまな経路を経た水の集合体であり、下流で観測される水質濃度は、流出にいたるまでの諸条件および水質項目ごとの溶出則等が、複雑に影響を及ぼしあった最終的な結果と考えられる。そのため、水質にも同様な成分分離の概念を導入できるなら、より詳細に河川水質の変化機構を検討することが可能と思われる。

水質成分を推定するため、流量成分を用いた次の物質収支式を考える。

$$C_s \cdot Q_s + C_g \cdot Q_g = C \cdot Q$$

$$Q_s + Q_g = Q \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 Q_s, C_s : 表面流出量, 表面流出濃度

Q_g, C_g : 地下水流出量, 地下水流出濃度

Q, C : 河川流量, 河川水質濃度

式(9)から水質成分を推定する方法として

- a) C_s, C_g の一方を実測等から仮定するもの
- b) 水質負荷量時系列に数値フィルターを利用するもの

が挙げられる。a)はそのような実測例が少ないため、今回は Q_g が卓越する渇水時に得られた水質濃度を C_g と仮定し、 C_s 変化を求めた。しかし、この方法は C_g の仮定に問題があり、時として C_s が負となる場合があった。b)は河川水質時系列を負荷量時系列に変換し、同様な数値フィルターで分離するものである。この場合、水質項目ごとに最も適な分離条件を与えるべきと思われたが、われわれのもつ水質時系列も流量時系列と同様比較的短く、そのため設定した分離条件が必ずしも最適ではない場合もあり、すべて流量時系列を分離した際と同じ条件で分離するものとした。この方法の概略を図-4に示した。b)の方法は、a)にみられた不合理な結果や主観が入り込む要素も少なく、水質成分分離法としてはa)よりも優れたものと思われる。以下の解析ではす

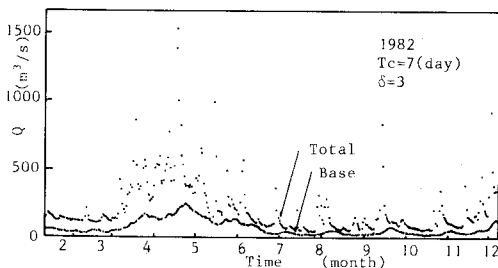


図-3 流量成分分離結果

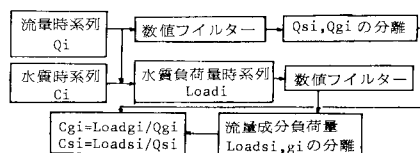


図-4 水質成分濃度推定の概要

べてb)の方法を用いた。

(2) 地下水流出系の水質変化

水質成分変化には、それぞれの流出系の特徴を反映した何らかの傾向が現われるものと思われる。総アルカリ度、総硬度などの溶解性物質は、一般に地下水流出系に主な供給源をもつと考えられる。地下水流出系は、その流出過程や土壌粒子との接触時間といった面での大きな変動は比較的少ないと思われ、1~2か月程度の連続採水調査において、 C_g が大きく変化するとは考えにくい。

図-5に実際の分離結果を示した。若干変動するものもみられたが、一般に C_g は Q_g に対し一定と判断される例が多く、濃度変化の小さな成分と思われた。しかし、 C_g はその流出過程からさまざまな要因の影響を受けるものと考えられ、年間を通した場合何らかの変化を示すものと思われる。 C_g 変化の詳細な検討には、地下水流出系に関する十分な考察¹⁸⁾が必要と思われるが、今回は1つの簡単な指標として水温との関係を検討した。本来ならば、より直接的な地下水温について行うべきと思われるが、資料の入手の点から間接的ではあるが、季節の影響を受け大きく変化する河川水温との関係について考察を加えた。図-6は、数値フィルターにより分離された C_g の平均値と、河川水温の平均値を両対数上に示したものである。表-2は回帰係数であるが、両者はほぼ良好な直線関係にあり、特に総アルカリ度、総硬度およ

表-2 C_g と河川水温との回帰係数

	$C_g=A \cdot \text{Temp}^B$		
	A	B	R
DS	16.1	0.348	0.391
Hard.	11.8	0.271	0.707
Alk.	6.14	0.303	0.686
Cl	8.92	0.194	0.676
COD-F	0.426	0.178	0.334
NO ₃ -N	0.528	-0.365	-0.744

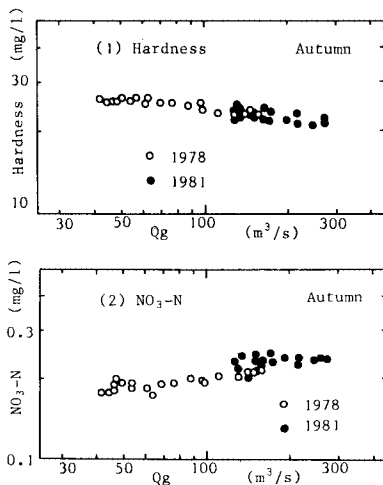


図-5 Q_g と C_g との関係

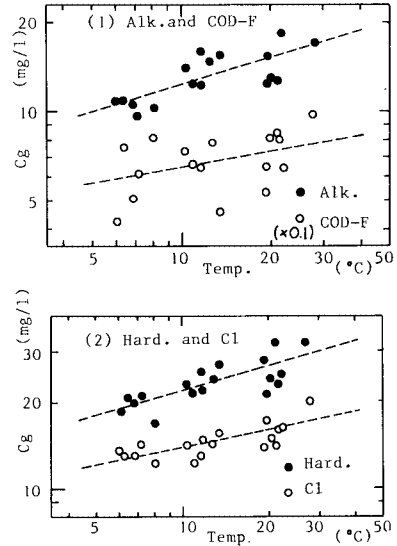


図-6 C_g と河川水温との関係

び塩素イオンといった溶解性物質に顕著であった。 C_g 変化が河川水温でもある程度説明され、また水質項目によりその回帰係数も異なることも推察された。

(3) 表面流出系の水質変化

表面流出系を考える場合、SS、濁度およびCOD等が Q_s に由来するものとして挙げられる。これらは、流出に際し河床からの巻き上げ等の影響も考慮されるが、今回はこのような現象も C_s の構成要因の1つとして考察を進めた。 C_s は、降雨強度、地表面の変化等非常に

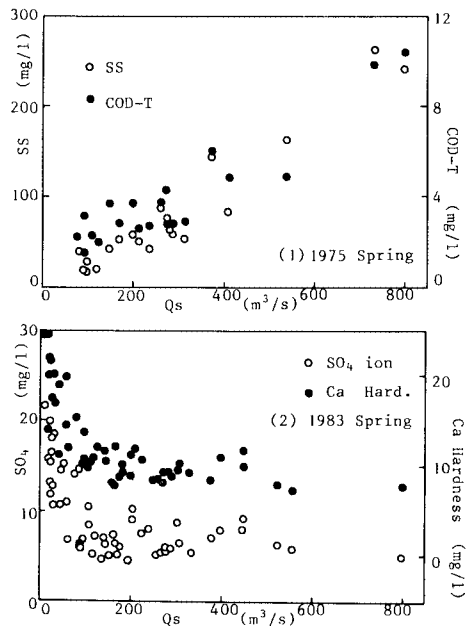


図-7 Q_s と C_s との関係

複雑な影響を受けるものと思われる、その流出パターンは水質項目、季節ごとに大きく変化すると考えられる。図一は、分離された C_s と Q_s の関係を示すが、地下水流出系と比べ変化の幅が著しく大きく、また水質項目によっても異なるパターンとなる様子がわかる。

これまでに報告された河川水質と流量の関係に関する数多くの研究の中で、水質の流出パターンは数種の関数形で表現されている¹⁹⁾。今回 C_s の流出パターンを検討するにあたり、初めにその関数形の推定を行った。これには種々のものが考えられるが、ここでは河川水質と流量との関係について、FairとGeyerが与えたものを基本とし、次の7種の式について比較検討した。

$$C_s = A \cdot Q_s^B \dots\dots\dots (10)$$

$$C_s = A + B \cdot Q_s \dots\dots\dots (11)$$

$$C_s = A \cdot \exp(B \cdot Q_s) \dots\dots\dots (12)$$

$$C_s = A + B / Q_s \dots\dots\dots (13)$$

$$C_s = 1 / (A + B \cdot Q_s) \dots\dots\dots (14)$$

$$C_s = C' + A \cdot Q_s^B \dots\dots\dots (15)$$

$$C_s = C' + A \cdot \exp(B \cdot Q_s) \dots\dots\dots (16)$$

なお、各係数の算定には最小二乗法を用い、結果については残差の分散、標準偏差ならびに変動係数で評価を行った。これらをそれぞれ次式で表わす。

$$\text{残差の分散 } V = \sum(C_{si} - \hat{C}_{si})^2 / N \dots\dots\dots (17)$$

$$\text{標準偏差 } \sigma = \sqrt{V} \dots\dots\dots (18)$$

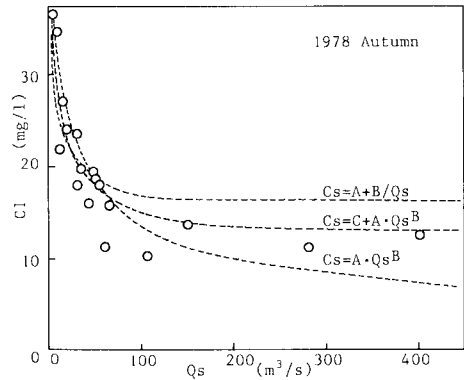
$$\text{変動係数 } CV = \sigma / \bar{C}_{si} \times 100(\%) \dots\dots\dots (19)$$

ここで、 C_{si} : 数値フィルターにより分離された C_s

\hat{C}_{si} : 式 (10)~(16) より計算された C_s

\bar{C}_{si} : C_{si} の平均値

表一に、総アルカリ度における関数形ごとの変動係数を示した。ここで式 (10), (13), (15) は変動係数が小さく、その流出パターンをよく表現できた。この傾向は他の水質項目にも共通していたが、大きくわけ浮遊性物質と溶解性物質とにそれぞれ最適な関数形を与えることができた。式 (13) は、両者ともほぼ同じ精度の結果



図一 関数による表面流出系の推定

を得たが、式 (10) に定数項の加わった式 (15) は主に総硬度などの溶解性物質に対し、また式 (10) はSSなどの浮遊性物質に対し精度よく表現し得る例が多かった。この理由の1つに、水質項目ごとの流出に至るまでの過程および機構の相違が挙げられる。表一は、21回の調査の14の水質項目につき、変動係数の小さなものから3番目までの出現率を、精度の悪い式 (11) を除いた各関数形ごとに、それぞれパーセントで表わしたものである。すべての水質 (14項目) を含めた最終的な出現率では、式 (13) が28.1(%)、式 (10) が25.7(%)、式 (15) が22.6(%) となった。この3種の関数で表現される流出パターンを、分離された値にあてはめると、図一にみるようにいずれも比較的良好一致を示す。表面流出系は非常に複雑であり、そのため今回検討を加えた7種の関数形のほかに、さらに精度のよいものも考えられるが、以下この3種の関数形に限り考察を進めるものとした。

(4) 河川水質変化の流量構成比率からの考察

現在、雄物川の流量は年度や季節により大きく変化し、単に1か月平均値の比較でもオーダーの異なる例さえみられる。そのため、 Q_s の変化も調査期間ごとに大きく

表一 総アルカリ度における関数形の推定

Year	変動係数 (%)																			
	1974		1975		1976		1977		1978			1979			1980		1981		1982	
Season	Aut.	Spr.	Sum.	Win.	Aut.	Spr.	Sum.	Aut.	Spr.	Sum.	Aut.	Spr.	Sum.	Aut.	Sum.	Aut.	Sum.	Aut.	Spr.	Sum.
$C_s = A \cdot Q_s^B$	59.2	15.8	20.3	12.4	23.1	16.9	24.5	64.5	60.1	31.8	21.7	48.2	45.4	114.8	25.7	19.3	18.8			
$C_s = A + B \cdot Q_s$	3969	26420	3531	24921	761	15664	288	7207	14997	27825	5853	9356	11991	5011	18406	18239	4328			
$C_s = A \cdot e^{B \cdot Q_s}$	89.7	14.2	18.8	13.2	22.4	18.3	25.7	99.1	72.0	30.5	22.5	52.8	64.3	125.6	26.7	26.5	18.5			
$C_s = A + B / Q_s$	47.0	16.7	21.2	9.4	22.9	15.6	26.8	34.7	37.4	29.2	19.7	49.1	33.7	45.4	25.8	17.2	16.7			
$C_s = 1 / (A + B \cdot Q_s)$	97.7	14.7	19.7	13.3	23.1	18.4	27.5	102.6	73.1	32.3	23.3	55.5	67.8	128.0	29.5	26.9	18.9			
$C_s = C + A \cdot Q_s^B$	55.9	31.4	21.6	11.2	22.9	16.6	30.0	31.8	53.4	46.4	25.0	47.2	42.3	107.7	26.2	19.1	26.7			
$C_s = C + A \cdot e^{B \cdot Q_s}$	80.2	22.6	25.2	13.8	22.3	18.4	24.9	99.5	72.1	31.8	24.6	51.9	65.2	125.3	27.4	26.5	83.6			

表一 水質項目別関数出現率

	(%)															
	SS	Tur.	COD-T	Hard.	Alk.	Cl	COD-F	DS	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	T-P	PO ₄ -P	Fe	Total	
$C_s = A \cdot Q_s^B$	25.4	21.3	23.8	28.3	30.7	28.1	30.6	26.3	23.8	23.8	25.5	15.7	16.6	27.7	25.7	
$C_s = A + B \cdot Q_s$	21.3	13.1	19.0	10.4	12.3	11.2	8.1	5.3	0.0	4.7	5.9	0.0	5.5	22.2	11.4	
$C_s = A + B / Q_s$	21.3	26.2	25.4	31.3	26.2	26.7	29.0	26.3	33.3	33.3	31.5	33.3	33.3	33.3	28.4	
$C_s = 1 / (A + B \cdot Q_s)$	4.1	1.6	12.7	3.0	3.1	5.6	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.9	
$C_s = C + A \cdot Q_s^B$	14.7	21.3	14.3	22.3	21.5	22.5	24.2	31.6	28.5	28.5	27.4	31.5	22.2	11.1	22.6	
$C_s = C + A \cdot e^{B \cdot Q_s}$	13.1	16.4	4.7	4.5	6.1	5.6	6.4	10.5	14.3	9.5	7.8	21.0	22.2	5.5	8.3	

異なり、流出パターンを関数の係数値で論ずる際の大きな支障となる。そこで、今回は Q_s を河川流量 Q で無次元化し、この影響を除く試みを行った。

一般に、 Q_s は全流量 Q と同時にピークを迎え、その後は Q_g の増加と降雨等からの供給の停止に伴い、急速にその量を減ずる。そのため、 Q_s と Q とは1つの流出につき、ループを描いて変化することが多い。図-9に Q_s と流量構成比率 Q_s/Q との関係を示したが、このループによると思われるばらつきが若干認められるものの、 Q_s は Q_s/Q の何らかの関数として表現されることがわかる。いまこれを $Q_s = a(Q_s/Q)^b$ と仮定すれば、先の式 (10)、(13)、(15) はそれぞれ次式となる。

$$\text{式 (10)} \quad C_s = A \cdot (Q_s/Q)^B \dots\dots\dots (20)$$

$$\text{式 (13), (15)} \quad C_s = C' + A(Q_s/Q)^B \dots\dots\dots (21)$$

式 (13) は、変形の過程で式(15)と同じ形に帰着し、最終的にこの2式で表面流出系が代表される。式 (20)、(21) をそれぞれ式 (9) へ代入し、 Q_s/Q で表現する物質収支式を求めると次のようになる。

$$C = A(Q_s/Q)^{1+B} - C_g(Q_s/Q) + C_g \dots\dots\dots (22)$$

$$C = A(Q_s/Q)^{1+B} - (C_g - C')(Q_s/Q) + C_g \dots\dots\dots (23)$$

この式で表現される水質変化のパターンは、条件により種々変化する。式 (22) における水質変化の概念を図-10に示したが、水質濃度 C と Q_s/Q の関係は、 $B=0$ のとき大きく分け3本の直線に分類される。 $A > C_g$ で

は右上り、逆に $A < C_g$ では右下りの直線となるほか、 $A = C_g$ では Q_s/Q の値とは無関係に C は一定値を示す。また、 $B > 0$ のときには下に凸の曲線が、 $-1 < B < 0$ では逆に上に凸の曲線となる。 $B \leq -1$ の流出は、 Q_s がないときに水質濃度 C が無限大となるもので、現実にはあり得ないものである。なお、式 (23) で表現される流出パターンは、式 (22) によるものと基本的には変わらないものとなる。この収支式は、短期間であれば流量の分離のみにより、河川水質の成分分離や、さらには流出機構の推定ができる可能性をもつ。この検討には、数値フィルターで直接分離された各水質成分や、流量成分を用いて行う方法もあるが、これはそのような複雑な操作を加えず推定できる1つの簡便な手法である。なお、図-11は式 (22) において表現される水質変化のパターンを、条件を変えシミュレートしたものである。実際の C と Q_s/Q との関係を図-12に示した。表面流出系に関与の深い水質項目は、右上りのかつ $B > 0$ の傾向が強く、ほぼすべての季節において、その程度の差はあれ類似な変化を示した。一方、地下水流出系に関与の深い水質項目では、逆に右下りの傾向が強かった。 B 値の正負については、水質項目により判断の困難な例もあったが、一般に $-1 < B < 0$ の傾向が多かった。また、1つの流出パターンと判断するより、複数の集合体と理解す

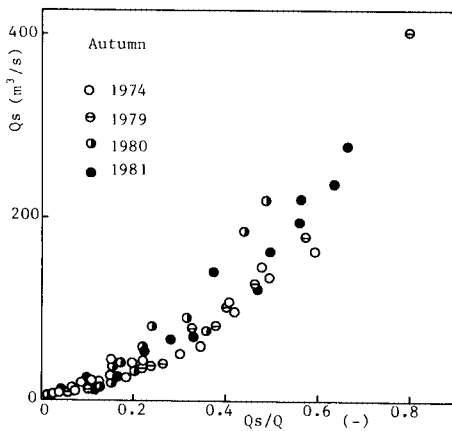


図-9 Q_s と Q_s/Q との関係

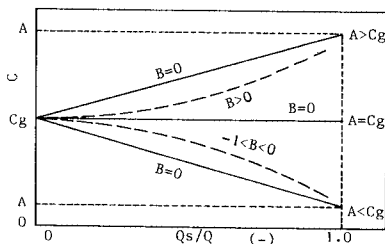


図-10 河川水質変化の概略

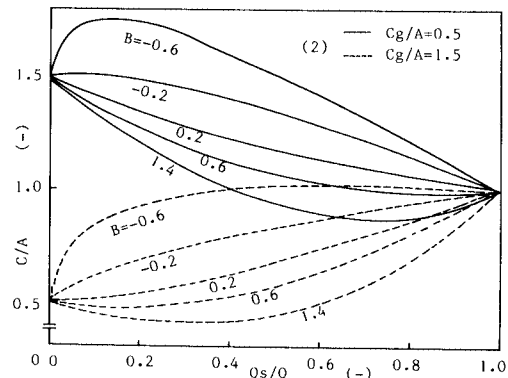
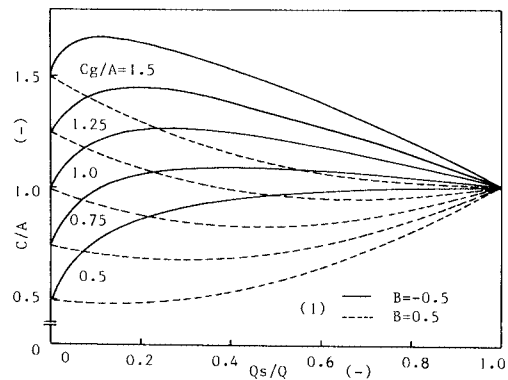


図-11 河川水質変化のシミュレーション

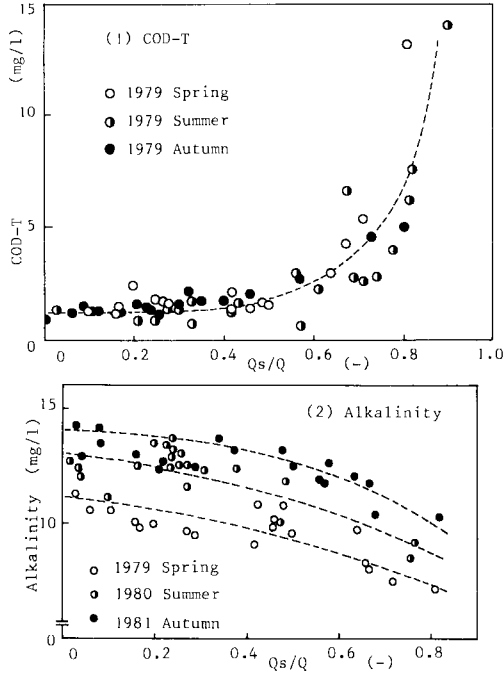


図-12 C と Q_s/Q との関係

べき例もみられ、すべてが単純な1つの流出系では代表されない場合も見受けられた。雄物川流域が、きわめて広大であることがこのような結果をもたらした1つの理由と考えられる。また、塩素イオンでは、秋期において明らかに右上りの $A > C_g$ である例が頻出したが、これはこの季節特有の風送塩等が、何らかの形で表面流出系に影響を及ぼした結果と考えられる²⁰⁾。

次に、数値フィルターにより分離された C_s と Q_s/Q とを用い、表面流出系における各係数値を直接最小二乗法で算出した。今回対象とした関数形は極力単純なものとし、式(20)について検討を加えた。表-5, 6は、代表的水質項目について推定された結果を示したものである。A値は、河川流量がすべて Q_s で構成された場合

表-6 表面流出系の相関係数 Summer

Year	1978	1979	1980	1981	1982
SS	-0.859	0.690	0.689	-0.247	0.727
TUR _i	-0.761	0.702	0.220	-0.811	0.796
COD-T	-0.555	0.622	-0.475	-0.359	-0.533
HARD _i	-0.784	-0.748	-0.727	-0.529	0.611
ALK _i	-0.589	0.235	-0.693	-0.613	0.521
CL	-0.860	-0.758	-0.862	-0.574	0.442
NO ₃ -N	-0.892	-0.492	-0.293	-0.662	-0.788
COD-F	-0.725	0.333	-0.727	-0.681	0.321

の水質濃度 C として理解される。特に溶解性物質については、表面流出系そのものの水質濃度と解釈される。図-13(1)に溶解性物質のA値を示したが、NO₃-Nを除き融雪水の卓越する春期に大部分が C_g を下回る低い値を示すほか、その様子も他の時期と比べ比較的安定するのがわかる。春期の表面流出系が、積雪その他の影響を受けた結果と思われる。また、他の時期は一部 C_g を上回る高濃度を示し、値の変動もきわめて大きなものとなった。春期に比べ、流出に至るまでの機構の複雑なことおよび降雨強度、地域特性等の影響が現われたためと思われる。以上、A値はその時々諸条件に大きく左右される場合が多く、そのため春期を除いては明瞭な変化は認められなかった。なお、A値は C_g と関連し、図-10の Q_s/Q と水質濃度 C のなす傾きを決定するが、現実には C_g も同時に変化し、A値にみられるほどのグラフ上での変化は生じなかった。B値については図-13(2)に示したが、今回の計算によると溶解性物質は大部分が負の値を示し、各水質ごとに変動する幅が若干異なったほかは、特に季節変化と思われる様子は認められなかった。一方、浮遊性物質においてもB値はきわめて大きな幅で変化し、溶解性物質と同様、季節変化は明瞭とはならなかった。この物質が、単に表面流出の現象だけでは説明されないことも原因の1つと考えられる。

表面流出系は、種々の要因が複雑にからみあい、構成されるものと思われる。今回は、きわめて大きな変化を

表-5 表面流出系における帰帰係数

Year	Cs=A(Qs/Q) ^B 上段:A 下段:B										
	1978		1979			1980		1981		1982	
Season	Summer	Autumn	Spring	Summer	Autumn	Summer	Autumn	Summer	Autumn	Spring	Summer
SS	2.99	29.8	77.3	147.9	61.6	94.9	47.3	20.4	63.7	71.0	68.8
	-0.868	0.249	0.281	1.674	0.359	1.161	-0.107	-0.170	0.442	0.215	2.424
TUR _i	3.43	29.4	20.2	103.7	69.3	23.8	52.4	6.88	34.6	-	22.8
	-0.734	1.380	-0.386	2.170	0.981	0.587	0.562	-0.694	-0.019	-	3.412
COD-T	0.988	4.45	4.96	6.55	4.12	2.13	2.96	2.22	3.42	2.26	2.40
	-0.512	0.515	0.329	1.138	0.010	-0.279	-0.364	-0.249	0.352	-0.094	-0.266
HARD _i	26.5	18.3	14.1	10.6	14.6	15.3	16.4	12.6	14.1	9.12	32.3
	0.043	-0.280	-0.066	-0.459	-0.120	-0.282	-0.389	-0.161	-0.113	-0.213	0.411
ALK _i	14.3	9.76	5.73	7.44	9.93	7.88	7.24	6.29	9.88	5.94	12.8
	-0.180	-0.403	-0.318	-0.024	0.001	-0.294	-0.412	-0.301	-0.110	-0.242	0.211
CL	11.8	11.3	13.7	8.47	8.34	8.98	11.4	12.5	15.2	11.5	17.3
	-0.313	-0.452	-0.109	-0.316	-0.180	-0.336	-0.592	-0.218	0.111	0.161	0.198
NO ₃ -N	0.109	0.282	0.221	0.169	0.086	0.245	0.135	0.096	0.204	-	0.115
	-0.915	0.103	-0.369	-0.496	-0.455	-0.096	-0.528	-0.747	-0.311	-	-0.987
COD-F	0.849	1.690	1.581	1.572	1.784	1.267	1.220	1.174	0.895	0.717	2.196
	-0.634	-0.159	0.029	0.299	-0.057	-0.363	-0.682	-0.432	-0.500	-0.502	0.088

また表面流出系の A , B 値については表-4 の最小二乗法による計算結果を与えた。結果を図-14 に示したが、比較的多くの例でよく合致した結果が得られ、収支式を用いた水質分離と流出機構の推定の可能性が確認された。全体の傾向を大きくはずれる例も認められたが、これは C_s と Q_s/Q との関係が1本の流出パターンで代表されないものに多くみられ、表面流出系の回帰係数の決定が不確実になったためと思われる。また、BOD, クロロフィル a などの単に表面、地下水流出系からは説明されない水質項目については、当然ながらよい結果は得られなかった。今回は、このような物質の流下過程における変化機構を無視して解析を行ったが、いずれ何らかの考慮を要するものと考えられる。以上より、 Q_s/Q と水質濃度 C が得られた場合、両者の関係から地下水および表面流出系の機構をある程度まで推定できることが考察された。

本研究は、河川の流量の分離が比較的容易に行えることを仮定し、この1手法として数値フィルターを用いた。しかし、流量分離は現時点でも容易ではなく、不確実な面も残されている。また、 Q_s と Q_s/Q との関係についても、長期的にみれば、あるいは増水期と減水期とは異なってくることも考えられる。ここでは、水質に与える影響は少ないと考えて適用したが、このように未解決の点も残されている。また、水質の成分分離についても、2つの成分の分離にすぎないなど、さまざまな検討すべき点も残されている。しかし、これらについては今後の研究の発展により解決されていくものと考えている。

5. 結 論

本論文では、河川水質変化のより詳細な理解を目的とし、数値フィルターを用いた流量および水質成分の分離を行った。また、水質成分の流出パターンの検討を、季節および水質項目ごとに行うとともに、各成分で表現される物質収支式について考察を加えた。

本研究で得られた主な結果を要約すると以下のようなになる。

(1) 河川の水質は、流量成分の分離後、表面流出および地下水流出濃度の両成分に分離することが可能である。本論文では、実測データをもとに、数値フィルターを用いて詳細に検討を行い、これを示した。

(2) 地下水流出濃度 C_g は、本研究で用いた1~2か月程度の短期間であれば、ほぼ一定の水質濃度をもつと考えられる。しかし、1年といった長期間では季節の影響を受けて変化すると考えられ、本研究ではこれを河川水温との関係から検討し、水質の季節変化についての考察を行った。

(3) 表面流出濃度 C_s は、水質項目、季節および表

面流出量 Q_s によって大きく変化するほか、1回ごとの変化も大きい。また、表面流出濃度 C_s は、表面流出量 Q_s を変数とした数種の関数形で表現することができ、水質項目ごとに最適な関数形を与えることもできた。

(4) 表面流出量 Q_s を流量構成比率 Q_s/Q の関数として表わすことができれば、河川水質濃度 C は Q_s/Q のみの関数として与えることができる。これは、流量の分離のみによって河川水質の成分分離や、流出機構の推定が可能であることを示している。本研究では、シミュレーションにより、河川水質濃度 C と Q_s/Q の関係にさまざまな流出パターンを与えたほか、短期間であればこの方法が水質成分分離の1つの簡便法として使えることを示した。

(5) 河川水質を2つの成分に分離することにより、水質物質の流出機構について、これまで以上に深い理解が可能になると考えられる。

最後に、調査を進めるうえで多くの協力を惜しまなかった本校卒業研究生に心から感謝の意を表します。また、資料を提供していただいた建設省秋田工事事務所、ならびに採水でお世話いただいた秋田市仁井田浄水場の関係各位に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 羽田守夫：雄物川の水質の変動特性とそのモデル化、土木学会論文報告集、第265号、pp.73~81、1977年9月。
- 2) 羽田守夫・松本順一郎：雄物川における流出負荷量の推定とその特性について、土木学会論文報告集、第340号、pp.107~116、1983年12月。
- 3) 佐藤 悟・羽田守夫：数値フィルターの河川水質時系列への応用について、第39回年次学術講演会講演概要集、pp.707~708、1984年10月。
- 4) 竹内邦良・坂本 康・本郷善彦： 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.557~565、1984年2月。
- 5) 海老瀬潜一・村岡浩爾・大坪国順：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、pp.279~284、1982年2月。
- 6) 海老瀬潜一・村岡浩爾・佐藤達也：降雨流出解析における水質水文学的アプローチ、第28回水理講演会論文集、pp.547~552、1984年2月。
- 7) 海老瀬潜一・宗宮 功・平野良雄：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.2, No.12, pp.46~56、1979年。
- 8) 竹内邦良・坂本 康・本郷善彦： 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、pp.405~413、1983年2月。
- 9) Kheorvenromne, I. and Gardner, L. R. : Dissolved Iron- An Indicator of the Groundwater Component of Small Streams Draining a Granite Terrain, South Carolina, Water Resources Research, Vol.15, No.1, pp.15~20, 1979.

- 10) Pinder F. George and Jones F. John : Determination of the Ground-Water Component of Peak Discharge from the Chemistry of Total Runoff, Water Resources Research, Vol. 15, No. 2, pp. 438~445, 1969.
- 11) Pilgrim H. David, Huff D. Dale and Steele D. Timothy : Use of Specific Conductance and Contact Time Relations for Separating Flow Components in Storm Runoff, Water Resources Research, Vol. 15, No. 2, pp. 329~339, 1979.
- 12) Nakamura Riota : Runoff Analysis by Electrical Conductance of Water, Journal of Hydrology, Vol. 14, pp. 197~212, 1971.
- 13) 日野幹雄・長谷部正彦：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，第 300 号，pp. 43~56，1980 年 8 月。
- 14) 長谷部正彦・日野幹雄：流量時系列のみによる降雨時系列，流域の流出特性および流出分離の推定について，第 23 回水理講演会論文集，pp. 193~198，1979 年 2 月。
- 15) 日野幹雄・長谷部正彦・原 輝彦：流量時系列のみによる降雨時系列，流域の流出特性および流出分離の推定その (2)，第 24 回水理講演会論文集，pp. 405~410，1980 年 2 月。
- 16) O'connor J. Donald : The Concentration of Dissolved Solid and River Flow, Water Resources Research, Vol. 12, No. 2, pp. 279~294, 1976.
- 17) 日野幹雄・長谷部正彦：地球化学的手法と逆探法を併用した流出系の成分溶出法則の推定について，土木学会論文報告集，第 319 号，pp. 87~96，1982 年 3 月。
- 18) 新井 正・西沢利栄：水温論，共立出版，pp. 48~90.
- 19) Mańczak, H. and Florczyk, H. : Interpretation of Results from the Studies of Pollution of Surface Flowing Waters, Water Research, Vol. 5, pp. 575~584, 1971.
- 20) 羽田守夫・松本順一郎：秋田市における降水の水質と負荷量の季節変化について，土木学会論文報告集，第 340 号，pp. 117~126，1983 年 12 月。

(1984.11.21・受付)