最上川水系実淵川の水質と溶存物質の流送作用*

加藤 武雄・佐藤 五郎

1 緒言

実淵川は朝日山系小実淵山に源流を発し、山形県白鷹町荒砥付近において、最上川に合流する小河川である。その流域には、集落が少なく、河川水は、ほとんど人為的な水質汚染を受けないので、この河川はほぼ自然状態の水質を保持するものと考えられる。したがって、このような河川の水質や流量を観測することは、その浸食・流送などの基本的な作用を知るうえに、きわめて重要なことである。なお、この河川に関する水文学的な調査・研究は、これまで全然報告されていないので、われわれは1966年12月～1967年11月の1水年間に、その3地点において、水質・流量の定点観測を実施した。本報においては、その結果をまとめて論述する。

第1図 実淵川水系略図

2 河川の状況

この河川は、本流の長さ14.1 km、流域面積36.8 km²の小河川で、最上川と協和合流する。本報で対象にする支流の黒沢川は最上川合流点から4.2 kmさかのぼった西向地点において、約1.5 mの落差で本流に不協和合流する。ところで実淵川の河川学的諸元を全水系、西向上流部および黒沢川に分けて、5万分の1地形図「荒砥」から計測すると、第1表のようになる。

柳沢山と頭殿山とを結ぶ線から上流部では、実淵川の流域は花崗岩で構成され、それより下流の河岸には金山層に相当する凝灰岩が一部に露出するが、黒沢川の全流域や本流の中・下流部、とくにその左岸には草薙層に相当する地層が見られる。

第1表 実淵川の河川学的特性

	黒沢川	実 淵 川	
		西 向 上流部	全水系
本流の長さ (km)	4.0	9.9	14.1
流域面積 (km ²)	8.24	25.68	36.76
平均幅 (km)	2.06	2.59	2.61
形状係数 (km ⁻¹)	0.52	0.26	0.18
河川密度 (km ⁻¹)	0.57	0.65	0.69
密集度	0.55	0.72	0.59

3 水 質

前記の1水年間に、実淵川本流筋の西向橋・深山橋および黒沢川筋の黒沢橋において、1カ月1回を原則にして、水質・流量の定点観測を実施した。ただし融雪期に当る1967年3月だけは3回調査を行なっている。これらの観測の方法は前報(加藤・志田 1970)とおなじであって、この期間の水質統計は第2表に示されるとおりである。

はじめに、上記3観測点における主要溶存成分濃度の平均値(第2表)について、キイダイヤグラム(第2図)を描く。ここにアニオンとしてはCl⁻、HCO₃⁻、SO₄²⁻、カチオンとしてはCa²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺を代表に選び、各イオン群に分けてそれぞれの当量百分率を示してある。これによると、カチオンでは実淵川本流の2地点において、ともにCa²⁺>Na⁺>Mg²⁺、黒沢川ではこれと異なりCa²⁺>Mg²⁺>Na⁺が成り立つ。いっぽうアニオンについては、黒沢川がSO₄²⁻型(HCO₃⁻>Cl⁻)を示すのに対して、実淵川はともにHCO₃⁻型を示す。ただし西向では

* 東北地理学会 1971 年春季学術大会にて発表

$\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ であるが、 SO_4^{2-} 型の黒沢川を合流した後の深山では $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ となる。これらを総合すると、溶存主成分は黒沢川では CaSO_4 、実淵川本流では $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ であることが明らかとなる。

さらに、1 水年における Ca^{2+} 、 HCO_3^- の観測値全部について、各観測点ごとに両イオンの相関関係を検討してみる。西向の場合を第 3 図に示すが、これと同様に他の 2 観測点についても正相関が成り立つ。相関係数 r は、いずれも危険率 0.1% において有意で、 Ca^{2+} (me/l) に対する HCO_3^- (me/l) の回帰直線の方程式はつぎのとおりである。

黒沢川： $[\text{HCO}_3^-] = 0.593[\text{Ca}^{2+}] + 0.12$,

$$r = 0.896$$

$$\text{実淵川} \begin{cases} \text{西向} : [\text{HCO}_3^-] = 0.854[\text{Ca}^{2+}] \\ \quad \quad \quad + 0.10, \quad r = 0.952 \\ \text{深山} : [\text{HCO}_3^-] = 0.857[\text{Ca}^{2+}] \\ \quad \quad \quad + 0.06, \quad r = 0.945 \end{cases}$$

前述のように、実淵川の溶存主成分が $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ であるため、回帰係数は 0.85 前後で、黒沢川の値 (0.593) に比して大きい。

これまでの考察からも、実淵川 (西向) と黒沢川の水質に差異のあることが認められたが、さらにこまかに溶存各成分について、両河川間の統計的な対比を行なってみる。第 2 表を用いて、この両河川における各成分含有量の年平均値について差異の有無を検定すると、危険率 5% で有意差が認められるのは、 SO_4^{2-} 、pH 4.3 アルカリ度、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、硬度・全蒸発残留物の諸元であり、いずれも黒沢川のほうが大きい値を示す。 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 SiO_2 については、同じ危険率で両河川の平均値に有意差が認められない。地質的にみて、西向上流の実淵川と黒沢川の水質にこのような差異を生ずる原因は、黒沢川流域に鉱泉の湧出を考えなければ説明できない。黒沢川の河谷を源流までさかのぼることは不可能であり、流域に鉱泉の存在を確認することはできなかったが、山形県においては草薙層からしばしば硫化水素泉 (冷鉱泉) が湧出し、この流域に発達する硬質頁岩は草薙層に相当するので、そこ硫化水素泉が湧出することはあり得ることである (加藤 1966)。この種の鉱泉の混入によって、黒沢川は CaSO_4 を主成分とし、しかも全蒸発残留物が大きくなるものと推定され

る。このような考えは、つぎの溶存物質の流送作用についての議論からも支持される。なお、黒沢川に隣接する流域には SO_4^{2-} 濃度の高い栃窪鉱泉が同地層から湧出することも参考になる (加藤 1966)。

つぎに、上記 1 水年間における溶存酸素量と水温との関係をみると、実淵川深山の例 (第 4 回) のように、両者間に逆相関が成り立つ。実淵川西向、黒沢川の場合も同様で、これら 3 観測点において、いずれも相関係数 r は危険率 1% で有意である。水温 T_w ($^{\circ}\text{C}$) に対する溶存酸素量 DO (mg/l) の回帰直線の方程式はつぎのとおりになる。

黒沢川： $\text{DO} = 14.33 - 0.343T_w$,

$$r = -0.979$$

$$\text{実淵川} \begin{cases} \text{西向} : \text{DO} = 13.65 - 0.262T_w, \\ \quad \quad \quad r = -0.961 \\ \text{深山} : \text{DO} = 13.87 - 0.284T_w, \\ \quad \quad \quad r = -0.987 \end{cases}$$

すでに報告 (加藤 1971) されているように、この水系においても溶存酸素量の多少に関係するものは水温が支配的で、しかも回帰係数の絶対値 $|d\text{DO}/dT_w|$ は、流域面積の小さい黒沢川 (0.343) のほうが、それよりも大きい実淵川 (西向) (0.262) よりも大きい値を示す。黒沢川合流直後の深山においては、この値は両者の中間値を示す。

4 溶存物質の流送作用

上記 3 観測点において、各溶存成分ごとにその流送量 Q_d と流量 Q との関係を検討したが、第 5～7 図の代表的な例のように、いずれの場合にも $\log_{10}Q_d$ と $\log_{10}Q$ との間に正相関が見出された。すなわち、つぎの式が成り立つ。

$$\log_{10}Q_d = n \log_{10}Q + a$$

ここに n 、 a はともに定数で、各溶存成分や河川に依存するものと考えられる。いま上式を変形すると、つぎのように Q_d は Q の指数関数で表現される。 $Q_d = aQ^n$ ただし、 $a = 10^a$ である。いま、1 水年の観測値から計算した各成分についての a 、 n の値を第 3 表に示す。この表の中で COD の流送量というのは、単位時間に観測点の河床断面を流過する河川水全体についての COD 値である。第 3 表によると、他の河川にみられるのと同じように、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} などの溶存イオンについて

第2表 水質に関する統計値 (実)

河 川	統計値	Tw (°C)	DO (O ₂ mg/l)	t-Re (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Hd (CaCO ₃ mg/l)
黒沢川	平均値	10.1	10.87	85.86	4.27	0.27	14.51	3.59	51.15
	標準偏差	5.25	1.84	16.75	0.92	0.092	2.78	0.76	9.88
	変動係数	0.52	0.17	0.20	0.22	0.31	0.19	0.21	0.19
	不偏分散	27.52	3.38	280.77	0.84	0.0085	7.73	0.57	97.62
	変動範囲	3.0~ 22.0	6.32~ 13.28	61~ 120	1.85~ 5.51	0.17~ 0.54	8.50~ 18.64	2.14~ 4.69	30.17~ 65.90
実淵川 (西向)	平均値	9.8	11.10	57.14	4.38	0.24	8.61	1.42	27.40
	標準偏差	6.72	1.83	19.83	0.90	0.062	1.46	0.44	6.00
	変動係数	0.69	0.16	0.35	0.21	0.26	0.17	0.31	0.22
	不偏分散	45.13	3.35	395.05	0.81	0.0038	2.12	0.19	35.56
	変動範囲	0.7~ 23.2	6.59~ 12.73	30~ 108	1.95~ 5.35	0.16~ 0.36	5.06~ 11.14	0.56~ 2.23	14.96~ 37.02
実淵川 (深山)	平均値	10.6	10.89	67.36	4.35	0.27	9.85	1.98	32.74
	標準偏差	6.73	2.03	13.49	0.95	0.070	2.04	0.52	6.89
	変動係数	0.64	0.19	0.20	0.22	0.26	0.21	0.26	0.21
	不偏分散	47.33	4.13	182.09	0.90	0.0046	4.18	0.27	47.46
	変動範囲	1.9~ 26.8	6.15~ 13.77	43~ 91	1.93~ 5.49	0.17~ 0.46	4.83~ 12.78	1.26~ 2.70	18.36~ 42.38

第2図 主要イオンのキイダイアグラム (実淵川水系)

第3図 Ca²⁺-HCO₃⁻ 相関図 (西向)

第4図 溶存酸素量と水温との関係 (深山)

第5図 Ca²⁺ 流量と流量との関係 (黒沢川)

は、一般に $1 > n > 0.6$ が成り立つ。黒沢川の主成分は CaSO_4 で、しかもこれは流域に湧出する鉱泉から供給されるものと推定したが、黒沢川の Ca^{2+} , SO_4^{2-} 両イオンに関する流送式中の

淵川水系)

Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	4.3Bx (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)	pH
5.24	30.00	0.54	16.03	7.1
0.83	12.11	0.11	5.41	0.17
0.16	0.40	0.20	0.34	0.024
0.69	146.56	0.013	29.30	0.029
3.62~	6.17~	0.28~	10.50~	6.9~
6.34	47.88	0.68	28.38	7.4
6.26	7.64	0.47	14.14	7.25
0.56	5.76	0.20	4.86	0.17
0.089	0.75	0.43	0.34	0.024
0.31	33.20	0.042	23.60	0.029
5.43~	1.85~	0.26~	8.08~	6.9~
7.06	20.16	0.77	23.25	7.5
6.58	11.90	0.47	14.25	7.1
0.86	8.79	0.11	4.17	0.092
0.13	0.74	0.23	0.29	0.013
0.75	77.30	0.013	17.35	0.0084
5.08~	1.65~	0.27~	10.48~	6.9~
8.17	31.50	0.64	22.50	7.3

第7図 Cl⁻ 流送量と流量との関係 (西向)

立って n 値の小さいのは、蔵王山系酢川の Cl⁻, SO₄²⁻ に関するもので、それぞれ 0.68, 0.67 であった (加藤 1968)。酢川において、とくにこれらのイオンの n 値が小であるのは、その主供

第3表 溶存物質の流送作用: $Qd=aQ^n$

	黒 沢 川		実淵川 (西向)		実淵川 (深山)	
	a	n	a	n	a	n
Na ⁺	3.61	0.839	4.48	0.900	4.67	0.851
K ⁺	0.20	0.758	0.24	0.871	0.27	0.851
Ca ²⁺	9.08	0.707	7.40	0.755	10.2	0.720
Mg ²⁺	2.54	0.751	1.31	0.651	2.04	0.744
Cl ⁻	4.79	0.913	5.61	0.952	6.59	0.921
SO ₄ ²⁻	17.1	0.599	6.26	1.04	10.8	0.744
Fe ²⁺ + Fe ³⁺	0.54	1.35	0.43	1.06	0.36	1.36
SiO ₂	17.3	1.05	12.5	1.02	13.9	1.03
COD	0.23	0.706	0.67	1.23	0.57	1.15

(注) Qd は g/sec, Q は m³/sec にて表現してある。

第6図 Na⁺ 流送量と流量との関係 (西向)

n の値が、とくに小さくてそれぞれ 0.71, 0.60 である。これまで取り扱った河川のうちに、目

給源が蔵王温泉であることに関係するが、黒沢川においても、Ca²⁺, SO₄²⁻ の n 値が小であるのは、それらの供給源が CaSO₄ を主成分とする鉱泉にあるためと考えられる。

実淵川西向における Na⁺, Cl⁻ の流送量と流量との関係は、それぞれ第6図、第7図に示されているが、両回帰直線の方程式から得られる指数関係の流送式中の Qd を、グラム当量単位 (eq/l) に換算して表現するとつぎのようになる。 $Qd(\text{Na}^+) = 0.16Q^{0.84}$, $Qd(\text{Cl}^-) = 0.14Q^{0.91}$ すなわち両イオンの流送式が同一に近いほどの類似した式になる。同じように黒沢川の Na⁺, Cl⁻ の流送式についても、上と同じ操作を施すとつぎの2式が得られて、西向の場合と同じことがいわれる。

$Qd(Na^+) = 0.19Q^{0.80}$, $Qd(Cl^-) = 0.16Q^{0.95}$
すなわち、実淵川・黒沢川のそれぞれの河川において、 Na^+ と Cl^- の流送機構がきわめて類似していることがわかる。いいかえるならば、この両河川の Na^+ や Cl^- の供給源は同一であって、しかもこれまでの研究 (たとえば、加藤 1968b) によれば、それらは降水によってもたらされる風送塩にあるように推定される。

要するに、これまで挙げた上記のイオンについては、河川水による希釈作用のほうが流域からの溶出 (供給) 作用に優位することになる。

なお、 SiO_2 の流送式においては、3 観測点に共通して $n \approx 1$ であり、いいかえればその流送量は近似的には流量に正比例することになる。これも中性河川には一般に通用する現象である。酸可溶性鉄分 ($Fe^{2+} + Fe^{3+}$) の場合には、 $2 > n > 1$ の関係がみられ、これはすでに検討されている (加藤 1970) ように、鉄分はイオンだけでなく、コロイド粒子としても流送されるためと考えられる。

第 8 図 溶浮流物質の総流送量と流量との関係 (黒沢川)

以上述べた多くの場合に、一般に共通していることは、各種溶存物質に関する流送式中の n の値が、黒沢川よりも実淵川西向のほうが大きく、実淵川深山はこれらのほぼ中間の値をとることである。

つぎに溶浮流物質の総流送量 Qds と流量 Q との関係をみると、黒沢川 (第 8 図) の例にみられるように、さきの溶存物質の場合と同様な関数関係が 3 観測点に成り立つ。指数関係に表現した流送式をつぎにまとめておく。

黒沢川 : $Qds = 63.5Q^{0.756}$
実淵川 { 西向 : $Qds = 51.5Q^{0.782}$
深山 : $Qds = 67.8Q^{0.895}$

第 4 表には調査水年における溶存物質流送量の平均値とそれから計算した年流送量とが載せられている。いうまでもなく深山の数値は、それに対応する黒沢川と西向の値の和にほぼ等しくなるはずである。西向上流部の実淵川と黒沢川の流域面積は、第 1 表から知られるように、それぞれ $25.68km^2$, $8.24km^2$ で、その比はほぼ 3:1 である。第 4 表をみると、 Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} 以外の溶存物質に関する年流送量は、西向と黒沢において約 3:1 で、前記流域面積の比にほぼ等しい。しかし Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} の年流送量にいたっては、流域面積に比して黒沢川の占める割合が大きく、とくに黒沢川の SO_4^{2-} 年流送量が西向のそれを上まわるほどである。

西向上流の実淵川と黒沢川の流域の構成岩石の相違は両河川の水質に著しい差異を生ずるほどのものではない。もし流域に鉱泉の湧出がないときには、両河川の溶存物質は流域の岩石・土壌から溶出してきたものや風送塩に由来する

第 4 表 溶存物質の流送量 (1966 XII~1967 XI)

	黒 沢 川		実淵川 (西向)		実淵川 (深山)	
	平均 値 (g/sec)	年流送量 (トン)	平均 値 (g/sec)	年流送量 (トン)	平均 値 (g/sec)	年流送量 (トン)
Na^+	1.54	49	5.63	178	7.27	229
K^+	0.091	2.9	0.29	9.2	0.43	14
Ca^{2+}	4.37	138	9.20	290	14.3	449
Mg^{2+}	1.15	36	1.45	46	3.04	96
Cl^-	1.99	63	7.76	245	11.1	349
SO_4^{2-}	9.61	303	8.54	269	17.4	547
$Fe^{2+} + Fe^{3+}$	0.22	6.9	0.64	20	1.03	33
SiO_2	7.43	234	19.8	623	26.4	833
t-Re	28.8	909	63.3	1,990	115.	3,610
Q^*	0.39	1.2×10^7	1.30	4.1×10^7	1.65	5.2×10^7

(注) Q^* は流量で平均値は m^3/sec , 年間の量は m^3 で表わしてある。

はずである。したがって各種溶存物質の年流送量は両河川の流域面積に正比例することになる。黒沢川においてこのような比例関係の成り立たない溶存成分すなわち Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} などについては、別の供給源をつけ加えて考えなければならない。この河川の流域には金属鉱床がなく、ここでは地質的にもっとも妥当なものとして CaSO_4 を主成分とする鉱泉の存在が考えられるわけである。

さて、流域面積 1 km^2 当りの溶浮流物質の年流送量を計算すると、実淵川（西向）では 77 トン、黒沢川では 110 トンになり、その差 30 トンが鉱泉から供給されたものと推定される。したがって、鉱泉から黒沢川に供給される溶浮流物質の年間の総量は 270 トンになる。なお、実淵川の単位流域面積当りの年流送量 77 トン/km^2 という値は、鉱泉・鉱床に影響されない高瀬川（加藤 1968a）や馬見ガ崎川水系滑川（加藤 1968b）などに比較して約 10 トン/km^2 ほど大である。最後に実淵川水系を通じて最上川本流に供給される溶浮流物質の年間の総量は約 4,000 トンになり、1 日平均約 10 トンの割合になる。

5 結 言

1966 年 12 月～1967 年 11 年の 1 水年間に実淵川本流 2 カ所と支流黒沢川の計 3 観測点において定点観測を行ない得られた結果をまとめるつつぎのとおりである。

- 1) 実淵川の溶存主成分は $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 、黒沢川のそれは CaSO_4 である。
- 2) 溶存諸成分含有量の年平均値のうち Na^+ , K^+ , Cl^- , SiO_2 などに関しては実淵川と黒沢川において有意差が認められないが、 Ca^{2+} ,

Mg^{2+} , SO_4^{2-} , pH, 4.3 アルカリ度・硬度・全蒸発残留物に関しては、いずれも黒沢川のほうが大きい値を示す。

3) 各種溶存成分の単位時間における流送量 Q_d は、3 観測点とも、流量 Q の指数関数で表わされる： $Q_d = aQ^n$ a, n は定数であるが、両河川に共通して SiO_2 に関しては $n \approx 1$ 、その他の成分に関しては、一般に $1 > n > 0.6$ である。

4) Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} 以外の溶存成分の年流送量は、実淵川と黒沢川との比が 3:1 で、両河川の流域面積の比に等しい。黒沢川流域には CaSO_4 を主成分とする鉱泉の湧出が考えられ、 $\text{Ca}^{2+} \cdot \text{SO}_4^{2-}$ 等の年流送量は流域面積の割合に比して多い。

5) 単位面積当りの溶浮流物質の年流送量は実淵川（西向）が 77 トン/km^2 、黒沢川が 110 トン/km^2 である。年間を通じて実淵川が最上川に供給する溶浮流物質の総量は約 4000 トンになる。
(1971.5.10 受理)

文 献

- 加藤武雄(1966)：山形県白鷹火山地域の鉱泉に関する地球化学的研究 温泉科学 17 1～8
 加藤武雄(1968a)：最上川水系高瀬川の水質と溶存物質流送作用について 東北地理 20 27～33
 加藤武雄(1968b)：馬見ガ崎川（最上川水系）の水質と溶浮流物質の流送作用に関する陸水学的研究 陸水学雑誌 29 37～51
 加藤武雄(1998c)：最上川水系酢川の水質と溶存物質流送作用についての二、三の知見 陸水学雑誌 29 75～82
 加藤武雄・志田 勇(1970)：蔵王川（最上川水系）の水質と溶存物質の流送作用について 東北地域災害科学研究（昭和 44 年度） 54～63
 加藤武雄(1971)：最上川水系の水質 地理 16 81～88

Some Hydrological Remarks on Sanebuchi River, Yamagata Prefecture

Takeo KATÔ and Goro SATÔ

The present paper is principally concerned with the hydrological problem of dissolved minerals transported by the Sanebuchi River and its tributary, the Kurosawa River.

The observation on the water quality during the period from 1966 to 1967 reveals that the main constituent of the Sanebuchi River is calcium bicarbonate, and that of the Kurosawa River calcium sulfate derived from the mineral spring in the drainage basin.

Between the dissolved oxygen and the water temperature, a linear relationship is found to be of the rivers in question, which can be expressed by the following equation:

$$\text{DO} = aT_w + b,$$

where a (<0) and b (>0) are constants dependent on the river.

The transportation of dissolved minerals has been examined during the same water year. As a result, a simple functional relation is obtained:

$$Q_d = aQ^n,$$

where Q_d is each mineral discharge, Q flow rate and a and n are constants. n equals to 0.6 to 0.9 for Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} and 1.0 for dissolved silica.

The total amount of the dissolved materials transported to the Mogami River through the channel is about four thousand tons per year.