最上川水系高瀬川の水質と溶存物質流送作用について*

加 藤 武 雄

1 緒 言

高瀬川は最上川の第3次支川で、山形市を流れる須川水系馬見ガ崎川の有力な1支流である。この川の水質については筆者(1961)が一応報告したが、その溶存化学成分の相互の量的関係や流送作用については詳細な検討を行なわなかった。これらに関する知見を得る目的で、1964年12月～1966年10月の期間にこの水系の水質・流量についての定点観測を実施した。なお、この定点の上流水域はほとんど人為的な水質汚染を受けていないので、観測結果は自然の状態のままを伝える点で、とくに意味がある。本報ではこれらの結果を推計学的に検討して陸水学的立場から論述する。

2 河川の概況

この水系は奥羽山系に水源を発し、馬見ガ崎川に合流するまでの流程が約16km、流域面積が45km²の小河川で、上流部は高沢・中沢・戸沢の3水系よりなる。これら3支流は山形市平石水のほぼ同一地点で合流していわゆる高瀬川となる。上流部は大い安山岩によって構成されるが、戸沢の上流部には花崗岩が露出し、

その下流部には石英粗面岩が分布する。高沢の流域は、源流地帯を除けばおもに凝灰岩からなり、中沢の流域にはこれより下部層に当る硬質頁岩や凝灰岩が発達する(山形県 1960)、なお高瀬川下流部には立谷川(加藤 1966)との複合扇状地が発達する。いま、これら上流部の3水系について、5万分の1地形図「山形」から筆者が計測した河川学的諸元を第1表にまとめておく。

第1表 上流部3水系の河川学的特性

	高沢	中沢	戸沢
本流の長さ(km)	6.1	4.1	6.2
流域面積(km ²)	7.91	7.94	9.75
平均幅(km)	1.30	1.94	1.57
形状係数	0.21	0.47	0.25
密集度	0.71	0.73	0.62
河川密度	0.95	0.52	0.64

3 水 質

まず1964年12月より1965年11月までの1水年間に週1回の割で本流に関する水質・流量の定点観測を行なった。定点としては平石水の砂防堰堤を選んだ。また、この他に前記3水系についても1966年5月～10月の期間に、不定期ではあるが本流とおなじく定点観測を実施した。これらの観測要領は前報(加藤 1966)とおなじである。

本流の水質から説明をはじめが、まず1水年における水質の統計値を第2表にまとめておく。年間を通じて溶存酸素量と水温との関係を見ると、筆者の研究した多くの河川とおなじようにこれら2計量値間に逆相関が成立する(加藤 1967)。両者間の相関係数は-0.955で危険率0.1%において有意である。そこで水温Tw(°C)に対する溶存酸素量DO(mg/l)の回帰方程式を求めると次式が得られる。

$$DO = 13.97 - 0.290 Tw$$

この式は分水嶺の反対側にある芦沢(立谷川水系)

第1図 高瀬川上流水系図

* 東北地理学会 1967 年秋季学術大会(仙台)にて講演。

第2表 高瀬川本流の水質 (1964.12~1965.11)

推 計 値	Tw (°C)	DO (mg/l)	Re (mg/l)	PH4.3 Bx (me/l)	Na+ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)	COD (O ₂ mg/l)
変動範囲	0.8 ~19.2	7.9 ~13.69	31~65	0.15 ~0.43	2.7 ~4.9	3.92 ~7.96	3.7 ~7.0	16.0 ~25.7	0.36 ~1.10
平均値	8.96	11.25	51.0	0.28	3.44	6.05	4.90	20.3	0.64
不偏分散	34.38	2.83	0.65	0.004	0.08	1.09	0.663	6.38	0.02
標準偏差	5.86	1.52	0.81	0.06	0.28	1.05	0.81	2.52	0.14
変動係数	0.65	0.14	0.02	0.21	0.08	0.17	0.16	0.13	0.18

不偏分散は上欄表示の単位の自乗, 変動係数は無名数であらわされる。

第2図 溶存酸素量と水温との関係

の式: $DO = 13.3 - 0.296 Tw$ に類似する (加藤 1966)。芦沢の流域面積は 5.4 km^2 で、この観測定点上流部の集水面積 25.6 km^2 よりあきらかに少ないのに $|d[DO]/d Tw|$ が両者においてはほぼ等しい。これは筆者の説 (加藤 1966・1967) に矛盾するようであるが、第1表・第1図からわかるように、定点の直上流においてはほぼ等面積の3河川が合流しているためである。すなわち、これら各河川の面積は芦沢に近く、そのためこれらが合流した直後の地点の $|d[DO]/d Tw|$ も芦沢の値に近いことは当然のことと考えられる。

つぎに1水年における溶存化学成分の含有量間の関係をいろいろ検討したが、 Ca^{2+} 濃度・pH4.3 アルカリ度 (Bx) 間以外には相関関係を見出し得なかった。この場合に両者の単位を me/l で表現すると、回帰方程式は次式にて与えられる。

$$(\text{Ca}^{2+}) = 0.67 \text{ Bx} + 0.11$$

ここに相関係数は0.755で危険率0.1%において有意である。

さらに主要溶存成分をアニオン・カチオンに分けて、それぞれの当量百分率を1水年間の観

第3図 Ca^{2+} 濃度と pH4.3 アルカリ度との関係

測値全部について計算し、これらをキイダイアグラムに表現する (第4図)。ここでは HCO_3^- の当量は pH4.3 アルカリ度をそのまま用いた。この議論においてはそれほどの違いはないからである。すなわち溶存成分について、 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$ および $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ の当量関係が年間を通じてほぼ成立する。第3図にてすでに見たとおり、 Ca^{2+} の当量濃度と pH4.3 アルカリ度とはほぼ等しいと言えるほどに両者の差は小さく、しかも第4図の菱形座標においても点の90%が第III象限に密集する。したがって1水年を通じて、この河川の溶存主成分は $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ であると言い得る。

また水温 Tw (°C) と流量 Q (m^3/sec) との関係を1水年にわたって検討したが、融雪期においてだけつぎのような関係式の成立が見出された。

$$\log_{10} Q = 0.139 Tw - 0.475$$

ここに $\log_{10} Q$, Tw 間の相関係数は +0.869 で危険率0.1%において有意である。ただし、2月20日~5月1日の期間をこの地方の融雪期と考えた。べつに検討したが、この時期には気

第 4 図 主要イオンについてのキダイアグラム

第 5 図 融雪期における水温と流量との関係

温と水温との間には直線関係が見られるので、上式よりさらに気温の上昇が流量の増加を来たすものと言ってよい。要するに気温の上昇が融雪を促進し（荒川 1958）同時に水温の上昇に寄与していることを示す。融雪の機構（Wilson 1941）は複雑なので、さらに今後検討を加えたいと思う。

つぎに上流部の前記 3 水系についての水質観測結果を第 3 表にまとめておく。この時期は融雪・降雪に無関係な積雪地方のいわゆる降雨期に相当する。第 3 表を用いて各溶存成分の平均濃度を 3 河川について比較検討を試みる。各群において標本の大きさが 7 で等しいので Snedecor (1956) にしたがって、任意 2 群につい

て各成分の平均値の差の検定を行う。t 分布を用いて検定すると危険率 5% にて平均値間に差が認められるのはつぎのような諸成分である。

- { Ca²⁺ : 中沢 < 戸沢
- { SiO₂ : 中沢 < 戸沢
- { pH 4.3 アルカリ度 : 高沢 > 戸沢
- { SiO₂ : 高沢 > 戸沢
- { Ca²⁺ : 高沢 > 中沢
- { Na⁺ : 高沢 > 中沢
- { SiO₂ : 高沢 > 中沢

とくに SiO₂ については 高沢 > 中沢 > 戸沢 の順になる。流域の地質は前述のように、高沢には凝灰岩の露出が著しく、中沢には硬質頁岩・凝灰岩が分布し、戸沢は石英粗面岩や花崗岩で構成されている。一般に凝灰岩などの堆積岩は SiO₂ を水系に溶出しやすいことがすでに指摘されている（加藤 1956・1962）。ここでもその溶出しやすい順に一致して、SiO₂ 含有量が 高沢 > 中沢 > 戸沢 となっている。また Ca²⁺ については中沢が最低になっているが、これはその形状係数が最大であることと関係がありそうである。

4 溶存物質の流送作用

はじめに高瀬川本流平石水地点における観測

第3表 上流3水系の水質 (1966.5~10)

支流	推計値	Tw (°C)	DO (mg/l)	Re (mg/l)	pH4.3 Bx (me/l)	Na ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)	COD (O ₂ mg/l)
高 沢	変動範囲	12.1 ~18.4	8.92 ~10.58	55~63	0.36 ~0.44	3.9 ~5.5	4.99 ~8.54	4.8 ~7.0	19.6 ~33.5	0.38 ~1.06
	平均値	14.6	9.67	57.9	0.41	5.54	6.81	5.54	25.5	0.68
	不偏分散	5.49	0.33	16.8	0.0001	0.32	1.55	0.55	21.8	0.07
	標準偏差	2.34	0.57	4.1	0.03	0.56	1.25	0.74	4.66	0.26
	変動係数	0.16	0.06	0.07	0.08	0.13	0.18	0.13	0.18	0.39
中 沢	変動範囲	11.6 ~17.4	9.22 ~10.24	41~47	0.24 ~0.48	4.1 ~5.5	4.43 ~6.61	4.1 ~5.5	18.5 ~22.8	0.33 ~0.73
	平均値	13.9	9.58	46.5	0.35	4.97	5.22	4.97	20.7	0.57
	不偏分散	4.40	0.12	23.3	0.01	0.58	0.56	0.58	4.75	0.02
	標準偏差	2.10	0.34	4.8	0.09	0.76	0.75	0.76	2.18	0.14
	変動係数	0.15	0.04	0.10	0.25	0.15	0.14	0.15	0.11	0.25
戸 沢	変動範囲	11.8 ~19.4	8.75 ~10.54	43~64	0.25 ~0.37	3.3 ~4.6	5.00 ~8.58	4.2 ~6.9	11.3 ~21.8	0.38 ~1.48
	平均値	14.8	9.57	53.6	0.31	3.93	7.06	5.18	13.1	0.69
	不偏分散	6.80	0.37	96.3	0.002	0.22	1.92	1.04	11.5	0.14
	標準偏差	2.61	0.61	9.8	0.04	0.47	1.39	1.02	3.39	0.37
	変動係数	0.18	0.064	0.18	0.16	0.12	0.20	0.20	0.26	0.54

不偏分散は上欄表示の単位の自乗，変動係数は無名数であらわされる。

結果から説明する。まず代表的な各種溶存成分の流送量と流量との関係を第6~9図に示す。

う。ただし第6図は溶浮流物質全体の流送量と流量との関係であり，図の Q_{ds} は Re (全蒸発残

第6図 総流送量と流量との関係

第7図 SiO₂ 流送量と流量との関係 第8図 Ca²⁺ 流送量と流量との関係 第9図 Na⁺ 流送量と流量との関係

留物) $\times Q$ (流量) で、いまこれを総流送量と呼ぶことにする。この値は溶浮流物質全体の流送量に相当するものと考えても大きい誤りはないからである。 $\log_{10} Q_{ds}$, $\log_{10} Q$ 間の相関係数は 0.839 で、自由度 47・危険率 0.1% にて有意である。回帰方程式： $\log_{10} Q_{ds} = 0.793 \log_{10} Q + 1.68$ を得るが、これを变形すると $Q_{ds} = 47.4 Q^{0.793}$ となる。ここに Q_{ds} は g/sec, Q は m^3/sec にて表現してある。さらに $Na^+ \cdot K^+ \cdot Ca^{2+} \cdot Cl^- \cdot HCO_3^- \cdot SiO_2 \cdot COD$ に対しても上と同様な推計学的処理を行なって第 4 表のような結果を得た。表中の Q_d は各溶存成分の流送量で g/sec で表現してある。COD についての Q_d は前報 (加藤 1966) にて定義したものとおなじである。これら 7 成分についても総流送量のとおりおなじようにそれぞれ $\log_{10} Q_d$, $\log_{10} Q$ 間に順相関の成立が認められ、相関係数もそれぞれ自由度 47, 危険率 0.1% において有意である。いずれの場合にも総流送量のとおり同形式の関係： $Q_d = aQ^n$ が成立する。ここに $a \cdot n$ は各成分に特有な定数である。全体的に n の値は 1 より小さく、0.6~1.0 の範囲にある。筆者の観測した河川では $SiO_2 \cdot COD$ の各流送量や総流送量に関しては $1 < n < 2$ を示した (加藤 1965・1966) が、ここでは n はつねに 1 より小さい。したがって、この河川では各溶存成分の流送量は流量の増加とともにそれぞれ増加を来たすが、濃度はむしろ減少する。なぜならば $Q_d = aQ^n$, $Q_d = CQ$ したがって $C = aQ^{n-1}$ 。また

$n-1 < 0$ であるからである。ここに C は各成分の濃度である。ここでも Durum, H. (1953) が指摘した $CQ = \text{const.}$ のような関係は見当たらない。この河川では流送作用の方程式から考えて各溶存成分の流送機構がたがいに類似するものと見てよい。あらゆる成分において $n > 1$ にならないことは、平水時において浮流物質の少ないことを意味する。なお、堆積岩が広く露出する地方の河川では Q_{ds} , $Q_d (SiO_2)$, $Q_d (COD)$ の式において $2 > n > 1$ を示すことの多い事実はすでに報告されているとおりである (加藤 1965)。なお、この河川総流送量の平均値は 47.2g/sec したがって日量 4.08 トン、年間の総流送量は 1,490 トンとなる。平石水上流の流域面積は 25.6km² であるから 1km² 当り 57.6 トン/年となる。

つぎに 1966 年 5~10 月のいわゆる降雨期に観測した高沢・中沢・戸沢についての結果をまとめておこう。

いま、これら 3 河川の観測結果にもとづいて年間における各河川の総流送量を推算すると第 5 表のようになる。これによると、上流部 3 水系の年間における総流送量の和は 1,551 トンで、さきに計算した平石水地点の年間総流送量の 1,490 トンとはほぼ等しいから、第 5 表にあげた各数値は降雨期の値から年間の値を推定したものではあるが、妥当な値とみてよからう。第 5 表に示した年間の総流送量の大部分は流域から溶出する成分の量によって占められるものと考

第 4 表 高瀬川本流における溶存物質の流送作用

溶存成分	回帰直線の方程式	相関係数	流送量と流量との関係
Ré	$\log_{10} Q_{ds} = 0.793 \log_{10} Q + 1.676$	0.839	$Q_{ds} = 47.4 Q^{0.793}$
HCO_3^-	$\log_{10} Q_d = 0.767 \log_{10} Q + 1.190$	0.986	$Q_d = 15.5 Q^{0.767}$
Cl^-	$\log_{10} Q_d = 0.927 \log_{10} Q + 0.668$	0.838	$Q_d = 4.66 Q^{0.927}$
SiO_2	$\log_{10} Q_d = 0.858 \log_{10} Q + 1.297$	0.959	$Q_d = 19.8 Q^{0.858}$
COD	$\log_{10} Q_d = 0.819 \log_{10} Q - 0.209$	0.799	$Q_d = 0.618 Q^{0.819}$
Ca^{2+}	$\log_{10} Q_d = 0.692 \log_{10} Q + 0.740$	0.836	$Q_d = 5.50 Q^{0.692}$
Na^+	$\log_{10} Q_d = 0.846 \log_{10} Q + 0.512$	0.936	$Q_d = 3.25 Q^{0.846}$
K^+	$\log_{10} Q_d = 0.790 \log_{10} Q - 0.965$	0.877	$Q_d = 0.106 Q^{0.790}$

第 5 表 上流部 3 水系の総流送量

水	系	総流送量 (g/sec)	総流送日量 (トン)	年間の総流送量 (トン)	流域 1 km ² 当りの 溶出量 (トン/年)
高	沢	16.8	1.45	529	66.9
中	沢	15.2	1.31	478	60.2
戸	沢	17.3	1.49	544	55.8

えられるから、 1km^2 当りに計算した総流送量を溶出量と呼ぶことにする。これらの水系の溶浮流物質が風送塩のみによるとしたら、3水系とも流域の地質とは関係なく 1km^2 当りの年間の溶出量はほぼ等しいはずである。この値が高沢>中沢>戸沢の順になっているのは流域の地質のちがいに由来するものと考えてよい。さきに見たように、上記の順に流域は凝灰岩地帯、凝灰岩・頁岩地帯、花崗岩・石英粗面岩地帯であり、凝灰岩質の地帯が溶出されやすいことを示す。もちろん、これら3水系の流域には鉱泉の湧出は認められないので以上の議論は成り立つであろう。

5 結 言

高瀬川の水質と溶存物質流送作用について論じて来たことをまとめるとつぎの結論に達する。

1) 高瀬川本流の水温 T_w ($^{\circ}\text{C}$) は溶存酸素量 $\text{DO}(\text{mg/l})$ と $\text{DO}=13.97-0.290 T_w$ なる関係を保つ。また、融雪期には水温の上昇は流量 Q (m^3/sec) の増大を来すこと次式のとおりである。
 $\log_{10} Q = 0.139 T_w - 0.475$

2) 本流の溶存成分間の当量関係は1水年を通じつぎのとおりである。

$\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^{+} > \text{Mg}^{2+}$, $\text{HCO}_3^{-} > \text{Cl}^{-} > \text{SO}_4^{2-}$
 また、 Ca^{2+} 含有量と $\text{pH} 4.3$ フルカリ度 Bx との間には $(\text{Ca}^{2+}) = 0.67 \text{Bx} + 0.11$ が成り立つ。ただし、ともに me/l にて表現してある。

3) 上流3水系の水質を比べると、 SiO_2 含有量の大小関係は、高沢>中沢>戸沢の順になり、凝灰岩質の流域の河川ほど大きい。

4) 本流における各溶存成分の流送量 Q_d と流量 Q との間には、いずれの場合にも $Q_d = aQ^n$ なる関係が成り立つ。 $a \cdot n$ は各成分に固有な定数で、しかも $0 < n < 1$ であった。総流送量 Q_{ds} (g/sec) と流量 Q (m^3/sec) との間にも、

同様な関係： $Q_{ds} = 47.4 Q^{0.793}$ が成立する。

5) 本流における1水年間の溶浮流物質の総流送量は約1,500トンで、上流の3水系では流域 1km^2 当りの年間総流送量は高沢が大きくて約70トンとなる。この値は凝灰岩質の流域をもつ河川で大きい。

この研究を行なうに当たり、山形大学教育学部化学教室の石山光昭君は現地調査・実験に献身的な協力をした。また流量観測には山形市農地課に便宜を与えていただいた。ともに深謝の意を表する。

(1967.9.28 受理)

文 献

- 荒川秀俊 (1958) : 冬の気温と河川の流量 科学 28 530~531
 Durum, H. (1953) : Relation of the mineral contents in solution to stream flow of Saline River near Russel, Kansas. Trans. Amer. Geophys. Un. 34 435~442
 加藤武雄 (1956) : 烏川(銅山川)の陸水学的研究 地理評 29 273~280
 加藤武雄 (1961) : 須川水系に関する地球化学的研究 山形大学紀要(自然科学) 5 307~348
 加藤武雄 (1962) : 角川水系(山形県)の地球化学的研究 陸水雑 23 15~54
 加藤武雄 (1965) : 朝日川(最上川水系)の地球化学的研究 陸水雑 26 41~51
 加藤武雄 (1966) : 立谷川(最上川水系)の融雪期における水質変動について 陸水雑 27 142~154
 加藤武雄 (1967) : 陸水の溶存酸素量と水温との関係について 地下水と井戸とポンプ 9 3271~3279
 Snedecor, G. (1956) : Statistical Methods (5th Edition), The Iowa State Univ. Press
 Wilson, T. (1941) : An outline of the thermodynamics of snow-melt Trans. Amer. Geophys. Un. 22 182~195
 山形県 (1960) : 20万分の1山形県地図図および同説明書 山形県

Hydrological Investigations of the Takase River, Yamagata City

Takeo KATO

The determination of mineral discharge from the catchment area of a river is fundamentally a matter of hydrology. The purpose of the paper is to discuss the mechanism of the transportation of the dissolved minerals that applies to the erosion by dissolution and at the same time to describe the quality-of-water under hydro-

logical considerations. Data presented herein were collected once a week from the Takase River at Hiraishimizu, Yamagata City during the period 1964-1966.

The observation of the water temperature during the period 1964-1965, reveals the linear relationship of this and the dissolved oxygen. This can be represented by

$$DO = 13.97 - 0.290T_w$$

where DO = dissolved oxygen in ppm

T_w = water temperature in $^{\circ}C$.

Moreover, during spring months the days of high temperatures and thaws may be reflected by increase in stream flow and by elevation in water temperature as expressed by the equation:

$$\log_{10} Q = 0.93 T_w - 0.475,$$

where Q = stream flow in m^3/sec

T_w = water temperature in $^{\circ}C$.

The amounts of dissolved minerals are in the order: $Ca^{2+} > Na^{+} > Mg^{2+}$ and $HCO_3^{-} > Cl^{-} > SO_4^{2-}$. A linear relationship is found to exist between Ca^{2+} concentration and pH 4.3 alkalinity (Bx). This can be readily computed as follows:

$$(Ca^{2+}) = 0.67 Bx + 0.11$$

where each quantity is expressed in meq/l.

The transportation of various dissolved minerals was examined for the 1965 water year. A simple relation is found in each of dissolved minerals in a manner analogous to the transportation of suspension

$$Q_d = aQ^n$$

where Q_d is each mineral discharge and a and n are constants characteristic of each constituent. The same is the case with the total mineral discharge and the following equation is obtained:

$$Q_{ds} = 47.4 Q^{0.793}$$

where Q_{ds} = total mineral discharge in g/sec

Q = flow rate in m^3/sec .

The total mineral discharge for the present water year is estimated to be fifteen hundred tons per year.