

雄物川の水質の変動特性とそのモデル化

FLUCTUATION CHARACTERISTICS OF WATER QUALITIES
IN OMONO RIVER

羽 田 守 夫*

By Morio HANEDA

1. 結 言

河川の水質は、第一に流域の地質などの自然的条件によりその構成が決まり、第二にこの構成のうえに人為的汚濁源による流出物質がプラスされ、そして、第三に降雨などの気象条件によって水質変動の性格が特徴づけられると考えるのが妥当であろう。

しかるに、人口密度が高く経済的発展の著しく進んだわが国では、流域内の人口や工場などの人為的汚濁源の影響の少ないいわゆる自然河川は、地方にしか残っていないといっても過言ではない。しかも、この人為的汚濁源については、汚濁物質の質、量および時間的、空間的分布が把握しにくいために、水質の中でその影響を分離して考えることが非常に困難であり、このことが水質汚濁研究の大きな障害になっていると考えられる。

このことは、現在、わが国の河川の水質研究のうえで二つの方法が可能なることを示唆している。その一つは、人為的汚濁源による汚濁物質の発生量がかなり大きく、自然的汚濁源による発生量を無視できるような河川についてであり、このような河川における主要な水質問題は、有機物や特定の排出物質による汚濁であり、この解明のためには、発生する汚濁物質総量や河川の自浄作用などの研究が第一であろう。この例として、松本¹⁾の阿武隈川の研究や那須²⁾の石狩川の研究などが挙げられる。ほかの一つは、自然的汚濁源より発生する汚濁物質が、河川の水質の中で大きな割合を占められると思われる河川についてであり、このような河川では、発生する汚濁物質は降雨や地下水などの流出によってもたらされるもので、地質、地形や流量、降雨量などの変化による水質変動の解明が主要な問題と思われる。そして、この解明こそが前述の人為的汚濁の影響の大きい河川の水質の基礎としても大きな意味を持つものと思われる。この例とし

て、Ledbetter ら³⁾の Canadian River の研究、Gun-nerston⁴⁾の Columbia River の研究、Steele ら⁵⁾のテキサス州の諸河川の研究などが挙げられよう。

また、河川の水質測定は、これまで流量の比較的安定した時期に採水し、測定することを基本としてきた。これは、採水自体にかなりの労力を要することや採水時期により水質が大きく変化することを避けるため、もちろんそれなりの意味はあるが、河川の持つ汚濁物質の流送作用やその総量あるいは平均水質などを把握するには、必ずしも十分な方法とはいえない。特に、河川の流量増大時、すなわち降雨時には、汚濁物質によりふだんはオーダーの異なるほどの流出量を示す物質もあり、この期間の水質変動の把握は、公共用水域としての河川の水質評価や許容負荷量などの算定に、欠くべからざるものになっていると思われる。

このような観点から、著者は、これまで、比較的人為的汚濁源の少ない秋田県中部を流れる一級河川雄物川流域について、季節ごとにか月程度の連続水質測定を行い、どちらかといえば後者の河川に属する雄物川の水質と、流量、降雨量および気温などの水文因子との関係について検討を行ってきた^{6),7)}。本論文は、これらをまとめ、季節による水質の変化や流量と水質との関係および降雨時の水質変動特性等について基礎的考察を加え、雄物川のような低有機汚濁河川における水質変動の特性を評価するとともに、本河川に適した水質モデルを提案し、将来の水質予測のための礎とすることを目的としたものである。

2. 雄物川流域と調査方法

雄物川流域の概要を Fig. 1 に示した。雄物川流域は、流域面積約 46 万 ha、人口約 66 万人、人口密度約 143 人/km²、流域面積あたり工業出荷額約 5740 万円のわが国では比較的経済的発展の遅れた地域である。

* 正会員 工修 秋田工業高等専門学校講師 土木工学科

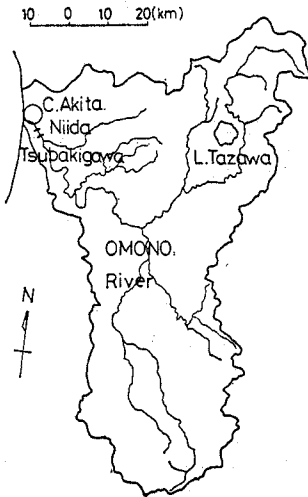


Fig. 1 OMONO River Basin.

く仁井田地点とした。採水は、秋期については、北原式採水器により流心から行ったが、ほかの時期は、秋田市仁井田浄水場の原水着水池から行った。採水時間は、ほぼ正午 ±1.5 時間内である。また、椿川地点の月別平均水質¹⁷⁾を Table 1 に示した。

水質測定項目は、季節により多少異なるが、気温、水温のほかに濁度、SS、総アルカリ度、総硬度、Ca イオン、Mg イオン、塩素イオン、COD、BOD、溶解性 COD および BOD、亜硝酸性窒素、硝酸性窒素および pH などである。測定方法は、おもに上水試験方法によった。COD については、全 COD および溶解性 COD とともに過マンガン酸カリウム法と重クロム酸カリウム法とを併用し、以下それぞれ COD-Mn および COD-Cr と表わす。また、SS は、ミリポアフィルターを用いて測定し、溶解性物質の項目は、この汙液について求めたものである。

雄物川流域には、秋田、横手など計 15 か所の気象観測所がある。河川の下流部の水質を考えると、これに影響すると考えられる降雨量は、各観測所からの流達時間も異なり一概に求めることはできない。が、本論文では簡単のために 15 か所の観測所の同日の降雨量の平均値を求め、これを流域の平均降雨量とした。流量について

水質調査は、1 日 1 回採水し測定する連続調査とし、採水期間は、昭和 49 年 10 月～昭和 51 年 2 月までの 1 年 5 か月の間に季節ごとに計 4 回、それぞれ 30～40 数日ずつ合計 135 日である。以下それぞれ春期、夏期、秋期および冬期と呼ぶ。採水地点は、秋期は雄物川下流部の椿川地点、そのほかの時期は同じ

Table 2 Rainfall and Water Flow in the Periods of Investigation.

Periods	Number of Investigation Day (day)	Number of Rain Day (day)	Rainfall (mm/day)		Water Flow (m ³ /sec)		
			max.	av.	max.	av.	min.
Spring	43	19	24.4	9.2	1 238	553	277
Summer	31	16	55.0	10.2	1 405	275	57
Autumn	30	18	33.3	9.3	303	171	107
Winter	31	27	23.4	7.3	539	259	101
Total	135	80	55.0	9.0	1 405	315	57

は、雄物川の椿川地点が建設省の流量観測点であり、この地点の水位-流量曲線式から求めた流量を使用した。水質調査期間内の降雨日数、降雨量および流量については、Table 2 にまとめて示した。

3. 水質と流量

河川などの表面水の水質が、流量によって変化することは古くから知られてきた。これは、河川の流量が表面流出、中間流出および地下水流出の三種に大別され、それぞれの機構による流出水の流量に占める割合や水質特性が異なることによるためと考えられる。が、水質が流量によって大きく影響されるという基本的事実には変わりはなく、多くの研究者が水質と流量との間の関係を検討し^{8)~10)}、さまざまな関係式を与えている。最も一般的に用いられる式は、水質と流量との間に指数関数式が成り立つとするもので、次の式で与えられる。

$$y(t) = a \cdot Q(t)^b \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $y(t)$: t 日の水質濃度 (mg/l)、 $Q(t)$: t 日の流量 (m³/sec)、 a, b : 係数

水質の中で、地質等の自然的汚濁源によりもたらされる項目、たとえば溶解性無機物質などは、基本的に流量のみによって規定されていると思われ、式 (1) によく合致すると考えられる。が、一般にさまざまな汚濁物質の流入が考えられる河川では、流量以外に水質を規定する要因が生じ、したがって、式 (1) により求められる水質は、第一近似値と考えるべきであろう。水質に影響を与えるほかの要因に、たとえば降雨があり、降雨強度、継続時間などの変数により同じ流量であっても水質は異なることが考えられよう。

Table 1 Water Qualities in OMONO River¹⁷⁾.

Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
pH	7.4	7.2	7.2	6.7	7.0	7.2	7.2	7.1	6.9	6.6	6.3	6.7
SS(ppm)	17.6	30.5	19.4	26.0	24.7	22.8	15.3	28.6	70.5	27.2	43.2	22.8
Cl(ppm)	15.9	19.7	15.3	—	23.6	26.1	17.4	—	14.5	13.4	14.1	15.4
NH ₃ -N(ppm)	0.10	0.40	0.28	—	0.37	0.20	0.47	—	0.58	0.76	0.94	0.82
COD(ppm)	1.24	2.92	1.85	—	0.65	1.86	0.76	—	0.63	0.52	0.44	0.12
BOD(ppm)	2.23	2.05	3.02	1.95	0.89	1.01	1.00	1.11	0.76	0.86	1.02	1.15
Q(m ³ /sec)	202	240	245	459	154	83.1	59.7	93.1	248	234	351	261

Ledbetter ら³⁾は、独立変数としては同じ流量を用いながら、式 (1) の係数 b を変数と考え次の式を導いた。

$$b = P \cdot Q^n \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 P, n : 係数

が、この式でも十分ではなく、流量と変数 b との間に欠けるものとして、流量の過去の経過を表わす指標を考慮し、これを先行流量と名づけて次の式を導いた。

$$b = f + g \cdot \log A_q + h \cdot Q^n \dots\dots\dots (3)$$

$$A_{qk} = \sum_{i=1}^{30} Q_i / i \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 A_q : 先行流量、 f, g, h : 回帰係数、 $i: k$ から先の日数

そして、式 (3) により変数 b がかなりよく整理できることを報告している。また、Hart ら⁴⁾は、溶解性物質負荷 L を次の形で表わす式を導いた。

$$L = a_1 \cdot Q_G + a_2 \cdot Q_I + a_3 \cdot Q_S \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 Q_G : 地下水流量、 Q_I : 中間流量、 Q_S : 表面流量、 a_1, a_2, a_3 : 係数

そして、Hopland の Russian River の水質研究で、式 (5) を用いてよく水質を表わせることを示した。

河川の水質変動に対する独立変数を数式化するうえで、流量以外の変数を取ることに、資料の入手や定量化の点から困難が多い。そこで、式 (2)~(5) のような基本的に流量のみを変数とする数式化が、おもに溶解性無機物質の流出機構の解明を第一に行われていると考えられる。これらは、溶解性や浮遊性などの汚濁物質の存在形態の違いにもよるが貴重な試みであり、特に式 (5) のような流量の分割は、溶解性のみでなく浮遊性物質の評価、予測にも適当な方法となる可能性がある。が、實際上、流量に占める各流出量の予測には限界があると思われ、この面での検討がさらに必要であろう。本論文では、まず流量と水質の変動のパターンを知ることとし、式 (1) を基本として検討を行った。

4. 水質の変動特性

(1) 溶解性無機物質

a) 総硬度

総硬度は、雄物川では主として地質に由来するものと思われ、自然による水質変動を見るには適した項目であろう。Fig. 2 に、総硬度と流量を式 (1) に基づいて両対数紙上にプロットして示した。これによると、総硬度と流量は、ほぼ式 (1) を満足して増減する傾向が認められる。全資料による回帰式は次のように求められた。

$$y = 102.2 \cdot Q^{-0.303} \quad (r = 0.866) \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 y : 総硬度 (ppm)、 r : 相関係数

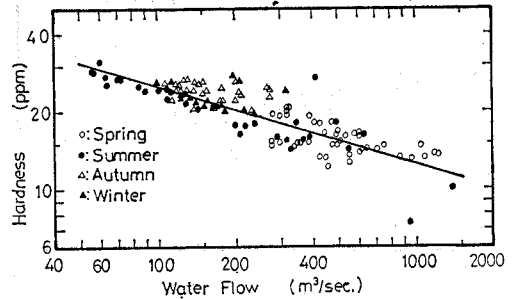


Fig. 2 Relation between Hardness and Water Flow.

が、この関係は、必ずしも一直線ではなく、資料は少ないが流量範囲を長軸とする楕円を描くと考える方が妥当と思われる。すなわち、総硬度は、融雪期を境に希釈されて濃度が低下し、この傾向が夏期ごろまで続く。夏期には大きなばらつきも見られるが、秋期になると濃度はいくぶん上昇し、冬期にもこの若干高い傾向をほぼ維持してまた春期に継続するというような一連の楕円形曲線を描いていると考えられよう。もちろん、これには、融雪や降雨による一連の流量の増減に伴って生じる濃度変化も含まれ、これらもより小さなサイクルの曲線を描いている。Fig. 2 はそれらの合成としての結果を表わし、それだけ複雑な曲線形を示している。が、Gunnerson⁴⁾が示したように、大陸とわが国の河川では、気象などの違いによりその表われ方は異なるが、流量と水質には、基本的に一年を周期とする楕円形曲線の関係があると思われ、雄物川についてもこれは十分に予想されよう。

b) 総アルカリ度

Fig. 3 に、総アルカリ度と流量との関係を示した。これによると、総アルカリ度も総硬度と同様に、一応式 (1) の関係を満足して増減するが、やはり一直線で表わすよりも楕円を描くと考える方が妥当である。楕円の形や季節的变化は総硬度とほぼ同じであるが、流量が大きい所での濃度のばらつきが総硬度と比べて少ないのが一つの特徴といえよう。総硬度同様、全資料による回帰式

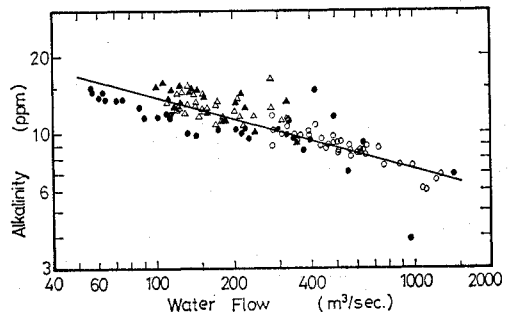


Fig. 3 Relation between Alkalinity and Water Flow.

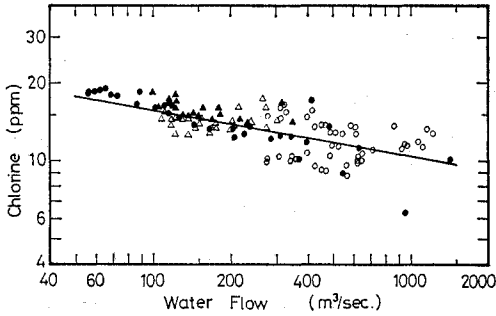


Fig. 4 Relation between Chlorine and Water Flow.

は、次のように求められた。

$$y = 49.7 \cdot Q^{-0.278} \quad (r = 0.814) \dots\dots\dots (7)$$

ここに、y: 総アルカリ度 (ppm)

c) 塩素イオン

Fig. 4 に、塩素イオンと流量との関係を示した。塩素イオンについても、式 (1) の関係をほぼ満足するが、これも総硬度同様楕円を描くと考えるのが妥当であろう。が、この楕円形は、総硬度などと異なり流量が少ないときは楕円軸が短く、流量が約 200 m³/sec を越えると急に大きくなり、濃度もかなりばらつく傾向を示している。日本海側の河川水には、風送塩が影響し、特に春の融雪時にピークを示すといわれるが¹⁹⁾、前述の塩素イオンの傾向には、この風送塩の影響が含まれていると思われる。式 (1) に基づく回帰式は、次のように求められた。

$$y = 36.6 \cdot Q^{-0.182} \quad (r = 0.697) \dots\dots\dots (8)$$

ここに、y: 塩素イオン (ppm)

d) 硝酸性窒素

河川の栄養源となる窒素は下水などのほかに自然界にも存在し¹¹⁾、その源をたどることは困難である。Fig. 5 に、流量と硝酸性窒素との関係を春期と夏期について示した。硝酸性窒素は、流量との関係はあまり見られず、流量が増したときに大きくなる傾向が認められる。硝酸性窒素も、総硬度と同様なかなり短軸の大きい楕円

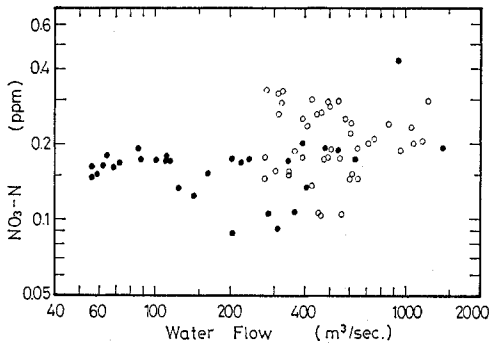


Fig. 5 Relation between Nitrate Nitrogen and Water Flow.

を描くと考えることもできるが、資料が少なく、流量との関係は明確に認められないとするのが妥当であろう。

硝酸性窒素を除けば、おもな流出源を地質などの自然的汚濁源によると思われる溶解性無機物質は、降雨や融雪による希釈、温度や長い滞留時間などによって高濃度を示す地下水およびその流量に占める割合の変化などの長期にわたる自然のサイクルにより大きな影響を受けていると思われ、以上はそれを示していると思われる。これを季節の差と考えれば、溶解性無機物質濃度は、日単位の水質で考えれば主として流量のみによって規定されると思われ、季節差をいかに評価、予測するかが主要な問題と考えられる。

(2) 浮遊性無機物質

a) 濁度

雄物川の濁度と流量との関係を Fig. 6 に示した。これによると、濁度は溶解性物質とは基本的に異なり、一般に流量の増加とともに急激に増大する。無降雨期の濁度は、一応、式 (1) の関係を満足すると思われるが、降雨時には同じ流量でも大きな違いがあり、Fig. 6 にはこれを区別して示した。また、融雪期は、降雨時とは逆に流量減少とともに濁度は大きく減じ、この時期特有の現象が認められる。これをまとめると、河川への濁質の流出は大きく三つの時期に分けて考えられる。第一は、濁度が急増する降雨時、第二は無降雨期および第三

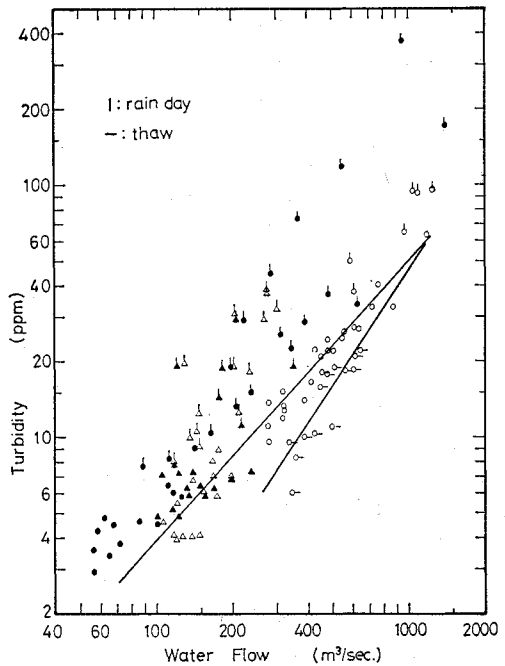


Fig. 6 Relation between Turbidity and Water Flow.

は急激な濁度減衰をもたらす融雪期である。この中で、第二および第三の場合の濁度は、式(1)の関係をほぼ満足して増減し、これが河川の濁度を考えるうえで基本となるものと考えられる。これらの回帰式は、次のように求められた。

$$\text{無降雨期 } y_1 = 0.0349 Q^{1.04} (r = 0.964) \dots\dots (9)$$

$$\text{融雪期 } y_2 = 0.00125 Q^{1.52} (r = 0.861) \dots\dots (10)$$

ここに、 y_1, y_2 : 濁度 (ppm)

これに対し降雨時は、降雨の量、強度、継続時間および降雨までの天候の履歴などが影響するためかなり濁度はばらつき、特に豪雨の場合に著しく認められる。

このように、河川の濁度を三つの時期に分類して考えれば、流量に対して大きなばらつきを示す濁度もかなりよく整理して考えることが可能であり、表面流出による影響の大きい水質を考えるうえで、このような分類の方法は非常に重要であると思われる。

b) 浮遊物質 (SS)

SS と流量との関係を Fig. 7 に示した。これによると両者の関係は、濁度の場合とよく類似していることが認められる。したがって、SS の場合も、融雪期は濁度の場合のような急激な濃度減少は示していないが、一応降雨時、無降雨期および融雪期の三つの時期に流出機構を分類して考えることができる。Fig. 7 の二つの直線は、それぞれ無降雨期と融雪期の回帰直線で、これがいわば SS 変動の基本であり、次のように求められた。

$$\text{無降雨期 } y_1 = 0.0139 Q^{1.27} (r = 0.959) \dots\dots (11)$$

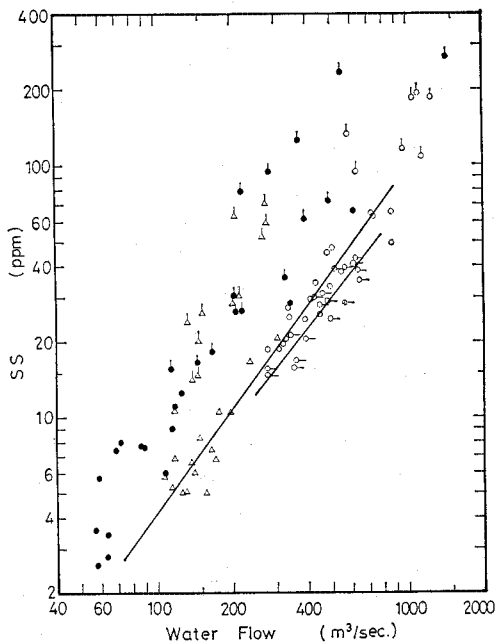


Fig. 7 Relation between Suspended Solids and Water Flow.

$$\text{融雪期 } y_2 = 0.0113 Q^{1.27} (r = 0.912) \dots\dots (12)$$

ここに、 y_1, y_2 : SS(ppm)

以上のような水質と流量との関係は、濁度や SS にほぼ共通しており、表面流出成分による影響の大きい水質を、降雨のない場合の濃度を基本とし、降雨のある場合にはこれに降雨による流出量がプラスされると考えることは、汚濁物質の流出機構についての物理的な意味もあり、妥当なものと考えられる。

(3) 有機物質

a) BOD

Fig. 8 に、BOD と流量との関係を示した。これによると、BOD は季節的変動は若干認められるが、流量とはほとんど無関係に変動している。これには、BOD が自然汚濁のみでなく、人為汚濁や自浄作用などを受けていることにも関係すると思われる。が、雄物川については、BOD と自然汚濁や流量との因果関係を求めるには資料の信頼性などから問題があり、その評価や予測は非常に困難と思われる。

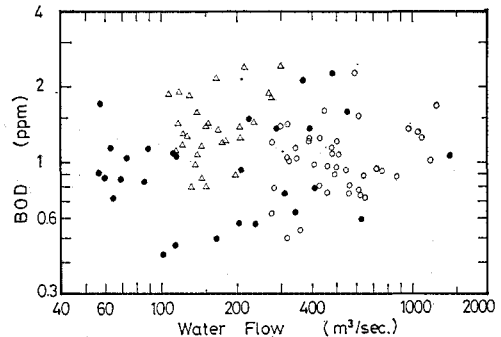


Fig. 8 Relation between Biochemical Oxygen Demand and Water Flow.

b) COD

Fig. 9 に、COD と流量との関係を示した。これによると、COD は一般に流量が増すと増大し、特に降雨のある場合に著しいなど濁度などと同様な傾向が認められる。が、冬期は、濁度などとは違った現象が見られ、融雪や気温のためかなり小さな値を示した。Fig. 9 によると、無降雨期、融雪期および冬期の COD と流量との間には、溶解性無機物と同様な楕円関係を仮定することも可能であるが、資料が少なくさらに検討が必要であろう。

このように複雑な変動を示す COD を、ここでは流量との関係から次のように分類して考えることにする。すなわち、濁度等と同様に、降雨時、無降雨期および融雪期の三時期と第四に COD の小さい冬期を加えた四時期である。したがって、雄物川の COD は、第二、第

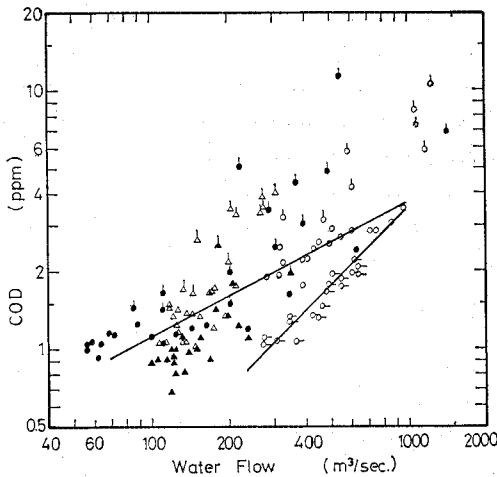


Fig. 9 Relation between Chemical Oxygen Demand and Water Flow.

三および第四の場合を基本とし、降雨時にはこれに降雨による流出物質がプラスされて形成されると考えるのが妥当であろう。無降雨期と融雪期の式(1)に基づく回帰式は、次のように求められた。

$$\text{無降雨期 } y_1 = 0.100Q^{0.523} \quad (r=0.914) \quad \dots\dots(13)$$

$$\text{融雪期 } y_2 = 0.00479Q^{0.946} \quad (r=0.945) \quad \dots\dots(14)$$

ここに、 y_1, y_2 : COD (ppm)

以上は、COD-Mn についてであるが、同様に COD-Cr についても検討を行った。COD-Cr は、流量との関係は基本的に COD-Mn の場合と同じと思われるが、変動の幅が大きく、明確な関係を見出すのは困難と思われた。そこで、ほぼ有機物全量を示すといわれる COD-Cr については、COD-Mn との関係から検討することを試み、Fig. 10 に両者の関係を示した。これによると、COD-Cr は、COD-Mn の約3倍強の値を示し、ほぼ直線回帰が可能であった。求められた回帰式は、次のとおりである。

$$y = 3.20x \quad (r=0.89) \quad \dots\dots\dots(15)$$

ここに、 y : COD-Cr (ppm), x : COD-Mn (ppm)

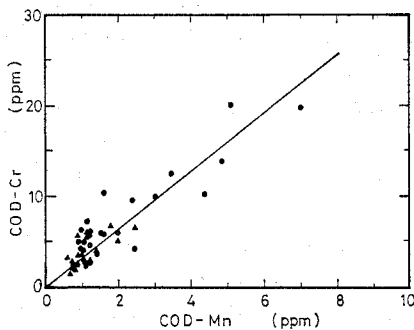


Fig. 10 Relation between COD-Mn and COD-Cr.

COD-Cr が全有機物量を表わすと考えれば、雄物川のような人為的汚濁源の少ない、低有機汚濁河川における有機物量を考えるうえで、一つの目安となるものと考えられる。

なお、河川の水質を考えるうえで、流量と水質の関係だけでなく流出量との関係も重要である。が、流出量は流量と水質の積であり、以上のような諸関係は流出量との間にもすべてあてはまり、かつより明確になるものと思われるので、ここでは省略した。

5. 水質モデル

(1) 溶解性無機物質

前述のように、河川の溶解性物質は、一般に流量が増せば濃度は減少する。したがって、水質変動は、水質と流量との間の基本式(1)を基にして直線回帰するには問題もあるが、季節変動を含めた楕円形を描くと考えるとよく説明できることが示された。

Gunnerson⁴⁾ は、アメリカ Columbia River 流域の Snake River の Wawawai 地点における総硬度と流量との関係について Fig. 11 のように示した。これは、総硬度と流量とが年間を通して楕円ドーナツ型を描くことを示すもので、河川水の溶存無機物が基本的にこのような関係にあることを報告している。この楕円ドーナツ型は、その形とドーナツの点が異なるとはいえ、雄物川の溶解性物質に関する水質と非常によく類似している。

溶解性物質と流量との楕円関係は、次のように説明できる。一般に最大水質濃度は流量が最小のとき生じる。融雪期には増えた流量により希釈されて濃度は減少し、また、この時期の高流量により流域の滞積物質はほとんど流出してしまう。したがって、夏期には濃度が減少する。低流量期には、流量に占める地下水の割合が大きく、秋から冬期にかけては比較的高い濃度が維持される。このように考えれば、河川の溶解性物質が一年を周期とする気象の影響を受けて増減することがある程度物理的にも説明できよう。したがって、溶解性物質の水質

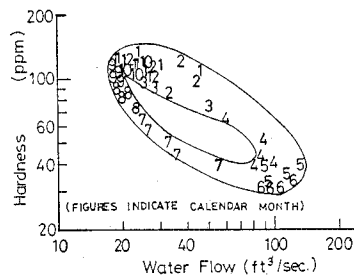


Fig. 11 Total Hardness and Water Flow⁴⁾.

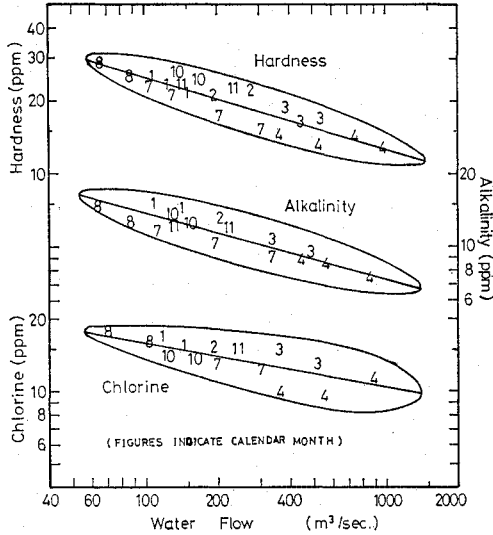


Fig. 12 Hardness, Alkalinity, Chlorine and Water Flow.

モデルは水質と流量との楕円関係を基に、季節ごとの式(1)に基づく回帰式の作成にあると思われる。Fig. 12には、雄物川の溶解性物質について、Fig. 11と同様な月別水質値を模式的に示した。

(2) 浮遊性無機物質と COD

4. における考察を基に、浮遊性物質による影響の大きい水質は、式(1)を基本とし降雨時にはこれに降雨による流出量がプラスされるものと考え、次の式を導いた。

$$y(t) = aQ(t)^b + f(R) \dots\dots\dots(16)$$

ただし、

$$\left\{ \begin{aligned} f_1(R) &= c\bar{R}(t) + d \dots\dots\dots(17) \\ f_2(R) &= c\bar{R}(t)^d \dots\dots\dots(18) \end{aligned} \right.$$

ここに、 $y(t)$: t 日の水質 (ppm), $f(R)$: 降雨による流出関数, $\bar{R}(t)$: t 日の影響降雨量 (mm/日), c, d : 回帰係数

雄物川流域のように広大な流域では、その日の水質に影響を与える降雨は、その何日か前にもわたって影響していると思われ、影響降雨量は、これを考慮した降雨量とし、次のように定義した。

$$\bar{R}(t) = \sum_{\tau=0}^{\alpha} w(\tau) \cdot R(t-\tau) \dots\dots\dots(19)$$

ここに、 $w(\tau)$: τ 日の降雨の重み (-), τ : 遅れ日数 (日), $R(t-\tau)$: τ 日目の降雨量 (mm/日), α : 影響日数 (日)

ある日の降雨の重みは、水質と降雨量との相互相関係数から合計して 1.0 になるよう比例配分して求めた。また、影響日数は、相互相関係数の比較的大きい期間の日数とし、ここでは、その形を検討したうえで 2 日間と

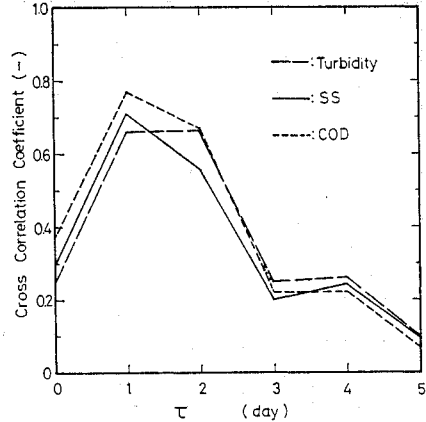


Fig. 13 Cross Correlation between Water Quality and Rainfall.

した。すなわち、

$$\phi_{yR}(\tau) = \frac{\sum_{t=0}^N y(t) \cdot R(t-\tau)}{\sqrt{\sum_{t=0}^N y(t)^2 \cdot \sum_{t=0}^N R(t)^2}} \dots\dots\dots(20)$$

$$w(\tau) = \phi_{yR}(\tau) / \sum_{\tau=0}^{\alpha} \phi_{yR}(\tau) \dots\dots\dots(21)$$

ここに、 $\phi_{yR}(\tau)$: 水質と降雨量との相互相関係数 (-), N : データ数, $y(t)$: t 日の水質 (ppm), $R(t)$: t 日の降雨量 (mm/日)。

$w(\tau)$ と α については、一例を Fig. 13 に示した。

式(16)の水質モデルにより水質の評価を行う場合、 $\bar{R}(t)$ が 1.0 mm 以下の場合には式中の右辺第二項は 0 とし、流量のみにより水質が規定されると考えた。また、 t 日の水質を評価するには、流量は当日のを用いて右辺第一項の値を求め、 $(t-1)$ 日までの過去の一定期間の資料から式(20), (21)により $w(\tau)$ を決めて t 日の $\bar{R}(t)$ を式(19)により計算し、式(17)または(18)から最小二乗法により最適な係数 c, d を求めて $f(R)$ を算出し、式(16)に代入して $y(t)$ を算定するという方法によった。すなわち、 t 日の水質評価には、なんらかの形で当日の流量と降雨量は求められているものと仮定した。市川ら¹²⁾によれば、水質予測にあたって、当日の流量や水質を用いる方がより正確な予測ができることが示されており、現実的な方法といえよう。

降雨による濁質の流出機構は、季節や降雨ごとに異なることも考えられる。そこで、降雨による水質の増分については式(17)と(18)の両式を用いて比較検討した。また、降雨ごとの水質の差についても、 $w(\tau)$ や係数 c, d の決定にあたって過去の資料を一定期間ずつ移動させる場合と過去の全資料を使って求める場合の二つを試み比較検討することにより考慮した。が、基本となる流量と水質の関係の季節的な変動については、資料不

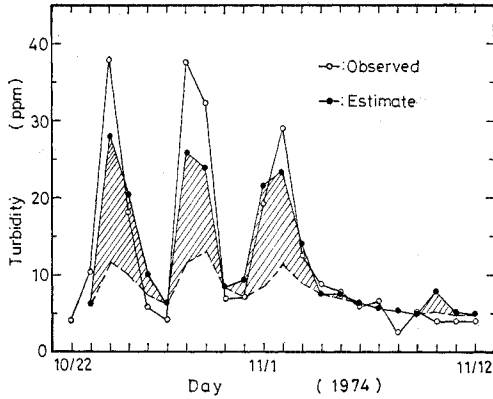


Fig. 14 Estimate of Turbidity.

足もありここでは一定なものと考えた。

結果の一例を濁度について Fig. 14 に示した。これは秋期の場合で、式 (16) の右辺第一項には式 (9) をあてはめ、第二項については式 (17) を用い過去 7 日間の資料を一定期間として移動させながらそのつど $w(\tau)$ や c, d を決定して、式 (16) により水質を評価したものである。図の斜線部分は、第二項の降雨による増分を示している。このときの測定値と評価値との残差の標準偏差 σ と重相関係数 r は、それぞれ 4.55 ppm および

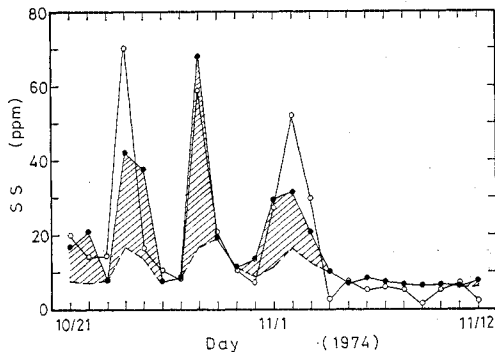


Fig. 15 Estimate of Suspended Solids.

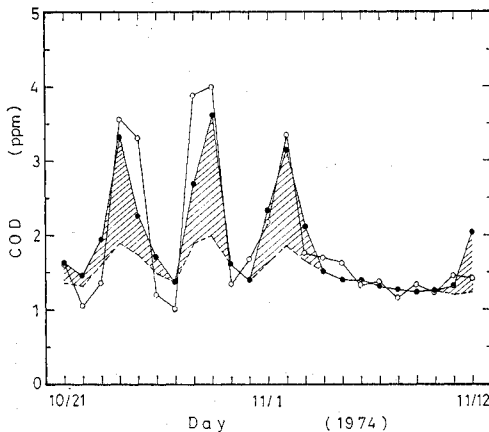


Fig. 16 Estimate of Chemical Oxygen Demand.

0.953 であった。これによると、式 (16) による濁度の評価は極大値や極小値への追従性は良好ではないが、降雨のある場合の水質変動を比較的良好に説明できており、基本的に濁度変動をよく表現していると考えられる。

Fig. 15 には、秋期の SS についての適用例を示した。これは、式 (11) と (17) を用い、過去 5 日間の資料を一定期間として移動させて諸係数を決め、水質を評価したものである。 σ と r は、それぞれ 9.59 ppm と 0.855 であった。これによると、評価値は、極値への追従性が良好でないが全体として SS 変動によく対応して増減しており、降雨による増分を考慮することの有効性を示していると思われる。

次に、Fig. 16 には、秋期の COD についての適用例を示した。これは、式 (13) と (17) を用い、過去の全資料を用いて水質を評価したものである。 σ と r は、それぞれ 0.433 ppm と 0.899 であった。これによると、評価値は、極大値前後ではあまりよく合致していないが、濁度などと同様に全体として水質変動によく追従しており、式 (17) による COD 評価が効果的なことを示している。

極大値前後で合致性がよくないことは以上の例に共通に認められるが、これは表面流出成分による水質は時間変動が大きく¹³⁾ 日本水質で水質を表わすことが難しいこと、降雨量に地域差があることや式の関数形や係数の決め方など、さらに検討が必要なことなどに関係すると思われる。特に以上の例は、いずれも 30 日間の資料から評価を行ったもので、実際の適用にあたってはもう少し長期間の資料を集めて検討する必要がある。が、逆にこの程度の短期間の資料でも、持っている情報を取り出しながら評価していけば、変動の激しい表面流出成分も特に降雨による流出量を考慮することによりかなりよく表現できるわけで、この意味でもよりいっそうの資料の蓄積と適用例の検討が重要と思われる。

(3) 考 察

流域の地質が河川の無機水質に与える影響については、Beston ら¹⁴⁾ が式 (1) を基に係数 a, b を地質の種類による変数と仮定し、重回帰分析により検討している。Haith¹⁵⁾ は、流域の土地利用と河川の窒素、リンおよび浮遊物との関係を同様な方法で分析し、窒素についてはかなりよく整理できることを報告している。これらは、おもに非点源から流出してくる汚濁物質を、統計的手法を用いて年間流出量や予測についての情報を得ようとするもので¹⁶⁾、今後の水質管理や水利用計画にとってより重要な意味を持つものと考えられる。

ここで提案した水質モデルは、水質の評価にあたって式 (1) に基づく水質と流量との基本的関係および当日

の流量や降雨量については、なんらかの形で求められていることを前提としており、汚濁物質の流出機構の評価を主眼とした方法である。また、雄物川は低有機汚濁河川とはいえ、なんらかの人為汚濁の含まれる河川であることや水質資料の数がまだ少ないことなどから、この応用は限定して考えなければならない。が、ここに示した方法は、低有機汚濁河川における水質変動をよく表わしていると思われ、同様な流域を持つ河川や有機汚濁河川の水質の基礎としても適用可能と思われる。

6. 結 言

雄物川の水質変動について、短期間ではあるが年間を通じた季節ごとの連続水質調査を基に、水質と流量や降雨量との関係について検討を行った。また、本河川に適した水質モデルを提案し、その応用例について考察した。結果を要約すると次のとおりである。

(1) 雄物川流域のような人為的汚濁源の少ない河川では、水質は、流量や降雨量などの水文学的因子と密接な関係を持ち、これらに対応して変動する傾向が認められる。

(2) 河川の水質の中で主として溶解性無機物は、日単位で考えればほぼ流量との関係のみで水質が決定されていると思われる。これは、両対数紙上で一年を周期とする楕円を描くと考えるのが妥当であり、季節差を考慮して時間スケールを短縮すれば、 $y=aQ^b$ の指数関数式で近似される。

(3) 表面流出成分の影響の大きい水質は、降雨時に大きく変動する傾向がある。これを考慮するには、無降雨期における水質と流量との指数関数を基に、降雨時にはこれに降雨による流出分がプラスされて水質が形成されると考えるのが妥当で、流量に関してかなりばらつく資料をかなりよく整理して考えることが可能となる。

(4) 融雪期の水質は、流量との関係は基本的に指数関数で表わされるが、融雪水に希釈されてほかの時期とは異なった傾向が認められる。

(5) 水質と流量および降雨量との関係についての考察を基にここで提案した水質モデルは、河川の水質変動をかなりよく表現できることが認められた。が、季節の差、モデルへの資料の入力の方法や関数形等については、さらに検討が必要であり、資料を蓄積して十分検討すべきであろう。

なお、今後の課題は、ここでは表面流出成分を降雨量を用いて表わす方法をとったが、この応用例を増やして検討するとともに、Hart ら⁴⁾ が示した流量の分割とこれに対応する水質を求める方法に基づいて、汚濁物質の流出機構を究明することと考えられる。

おわりに、本研究に関して終始適切なるご指導とご助言をいただいた東北大学の松本順一郎教授に対し、深甚なる謝意を表します。

調査上協力を惜しまなかった当時の本卒研究生に対し、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、秋田地方气象台および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) たとえば、松本順一郎・市川 新・大沼正郎・中村玄正：阿武隈川の自浄作用 (1)，下水道協会誌，Vol. 10, No. 107, pp. 2~12, 1973.
- 2) 那須義和：河川の水質汚濁解析と水質予知へのアプローチ，第8回水質汚濁研究に関するシンポジウム講演集，pp. 31~46, 1974.
- 3) Ledbetter, J.O. and E.F. Gloyna: Predictive Techniques for Water Quality Inorganics, Proc. of ASCE, Vol. 90, No. SA. 1, pp. 127~151, 1964.
- 4) Gunnerson, C.G.: Streamflow and Quality in the COLUMBIA River Basin, Proc. of ASCE, Vol. 93, No. SA 6, pp. 1~16, 1967.
- 5) Steele, T.D. and M.E. Jennings: Regional Analysis of Streamflow Chemical Quality in TEXAS, Water Resources Research, Vol. 8, No. 2, pp. 460~477, 1972.
- 6) 羽田守夫：雄物川の融雪期の汚濁流出量について，第30回土木学会年次学術講演会講演集第2部，pp. 606~607, 1975.
- 7) 羽田守夫：水文学的資料による河川水質の評価について，第13回下水道研究発表会講演集，pp. 473~475, 1976.
- 8) 加藤武雄・志田 勇：吾妻火山松川上流地域における酸性河川の溶存物質流送作用，東北地域災害科学研究，Vol. 10, pp. 15~21, 1973.
- 9) 寺島 泰・塚本勝典・金津 清：淀川水質変動の統計的諸性質について，第27回土木学会年次学術講演会講演集第2部，pp. 595~596, 1972.
- 10) 市川 新・横山道子：河川における水質と流量との関係について，第11回下水道研究発表会講演集，pp. 428~430, 1974.
- 11) McElroy, A.D., S.Y. Chiu, J.W. Nebgen, A. Aleti and A.E. Vandegrift: Water Pollution from Nonpoint Sources, Water Research, Vol. 9, pp. 675~681, 1975.
- 12) 市川 新・池田三郎：発見の自己組織化法による水質予測，土木学会論文報告集，No. 246, pp. 47~56, 1976.
- 13) 石黒政蔵・渡辺義公：自然河川における濁質粒子の挙動について，第29回土木学会年次学術講演会講演集第2部，pp. 633~634, 1974.
- 14) Beston, R.P. and W.M. McMaster: Nonpoint Source Mineral Water Quality Model, Journal WPCF, Vol. 47, No. 10, pp. 2461~2473, 1975.
- 15) Haith D.A.: Land Use and Water Quality in NEW YORK Rivers, Proc. of ASCE, Vol. 102, No. EE. 1, pp. 1~15, 1976.
- 16) 広崎昭太・諏訪隆之：河川・用水の水質汚濁と都市化との関係についての多変量解析，数理科学，No. 117, pp. 44~50, 1973.
- 17) 建設省河川局：水質年表，1973.
- 18) 小林 純：水健康診断，岩波新書，pp. 58~59, 1971.

(1976.7.12・受付)