

雄物川における流出負荷量の推定と その特性について

POLLUTANT LOAD ESTIMATION AND ITS CHARACTERISTICS IN THE OMONO RIVER

羽田 守夫*・松本 順一郎**

By Morio HANEDA and Jun-ichiro MATSUMOTO

1. 緒 言

近年わが国では、河川によって運ばれてきた汚濁物質が、停滞水域において沈降し、長期間にわたって堆積して水域の水質悪化を招く一因ともなっている傾向がみられる。この河川により運ばれる汚濁物質量は、流域の地質、地形、汚濁源の数や種類のほかに水文・気象因子による影響が大きい。特に近年、河川の流出負荷量には、人為汚濁源のみでなく降水に伴う流量の増減に直接左右される自然汚濁源——非点源または面源による負荷量が大きな割合を占めることが認識され、広く調査研究が行われるようになってきた。このように、河川のもつ汚濁物質の流送能力を評価することは、水域の水質汚濁の機構の解明や環境影響評価を進めるうえで重要な意義もっていると思われる。

しかるに、河川の流出負荷量を正確に評価するためには、長期間にわたる水質調査を行う必要があり、その労力も多大であることなどから、結局少ない資料を統計的に処理して行わなければならない。これまでこの種の研究例は必ずしも多くはない¹⁾。また未解明の点も数多く残されていると思われる。特に、季節や流量の増減に伴って水質濃度や負荷量がどのように変化するか、水質項目によってそれらの特性の相違がどう現われるか、洪水時や渇水時などの水質濃度や負荷量の挙動はどうかなどの点が明らかにならないと、流出負荷量を正確に評価することは困難であると思われる。

このような観点から、著者らは秋田県中央部を流れる一級河川雄物川の河口部付近で水質調査を続けてきた²⁾。雄物川流域は、わが国では比較的人為的汚濁源の影響の少ない地域であり、したがって流量や降雨量などの水文因子が流出負荷量に大きな影響を与えており、1

年間の季節のサイクルが水質濃度や負荷量の変化にも明瞭に認められる河川の一つである。本論文は、これまでに検討してきた雄物川における水質濃度と流量との関係から、季節ごとに流量やその増水率などを変数として負荷量と流量との関係を検討し、これをもとに流出負荷量を統計的に推定することを試みた。次にこの負荷量をもとに、月間および年間負荷量の推定を過去20年間にわたって行った。また月間負荷量の時系列解析や年間負荷量の確率分布等の検討も行った。これらを通して、雄物川における流出負荷量を評価する方法を検討し、流出負荷量が流域の水文因子に大きく依存している特性を明らかにし、今後の水域の水質管理を行ううえでの基礎的知識を得ることを目的とした。

2. 従来の研究

近年非点源からの汚濁負荷量の大きいことが知られ³⁾、水域の水質汚濁にとってこの流出負荷量を把握することの重要性が認識されてきている。Haithら⁴⁾は、農地からの流出水はNやPが多く富栄養化に関係していることを指摘し、土壌と作物の種類ごとに流出負荷量の推定を行っている。田淵ら⁵⁾やSchepersら⁷⁾も同様の検討を行っている。Wanielistaら⁶⁾やGriffinら⁹⁾は、非点源負荷が土地利用の影響を受けているとの認識からそれらと年間負荷量との関係を検討した。Whippleら¹⁰⁾は、一雨ごとの観測が重要なことを指摘し、またBOD負荷量と流量との関係に季節差があり、夏>冬>春>秋の順であることを報告した。またBedientら^{11)~13)}は、特に洪水時の流出負荷量の特性を調べ、ピーク負荷量とピーク流量および総負荷量と総流量との間には高い相関があることや、NとPは低流量時にSSは洪水時にそれぞれ負荷量が大きいことなどを示した。

流出負荷量の推定方法については、Zemanら¹⁴⁾は河川の断面を分割して要素ごとに負荷量を求める方法を提

* 正会員 工修 秋田工業高等専門学校助教授 土木工学科

** 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

案し、Verhoff ら¹⁵⁾は負荷量と流量との関係をもとに4方法で T-P の年間負荷量の推定を行った。米国環境保護庁でも河川や成分ごとにこれらの間に一定の関係がある¹⁶⁾ことを検討し、Smith ら¹⁶⁾も同じ関係に放物線やベキ曲線など7通りの方法を適用し、増水時、減水時の区別も行って検討した。Johnson¹⁷⁾も同様の関係から、重み付け平均濃度を用いて年間負荷量の推定を行っている。Walling¹⁸⁾は、河川の浮遊 Sediment をレーティングカーブを用いて評価し、季節や増水時、減水時に区分して行うことの重要性を指摘した。また Muskens ら¹⁹⁾はライン川のアンモニアの濃度と負荷量について周期成分の検討を行っている。

わが国では、自然災害の面から浮遊流砂量に関する研究が古くから行われている^{20)~22)}。河川の各水質や負荷量に関する研究には、多摩川に関する新田の研究²¹⁾があり、最近では市街地河川の降雨流出時の水質挙動に関する海老瀬らの研究^{23)~28)}や水質や負荷量の変動特性に関する山口らの研究^{29)~33)}などが挙げられる。特に山口らは、年間負荷量を正しく推定するためのサンプリング回数等についても検討しているが、現時点では水質データの数が少なく、十分に解明されるまでには至っていない。河口部や湖沼における水質汚濁を解明するためには、長期的見通しをもった水質調査や負荷量の推定が重要であり、本研究はそのための一つの具体例として流出負荷量を検討し、参考にするものである。

3. 流出負荷量の推定

(1) 使用した資料

使用した資料は、雄物川下流部の秋田市仁井田浄水場で1日1回正午±1時間以内に採水し測定する約1か月間の連続調査で得られたもので、1974年10月～1981年11月の7年間に季節ごとに計15回行った結果である。内訳は、春が3回、夏が5回、秋が6回そして冬が1回で、合計日数は474日である。水質は、濁度、SS、DS、TS、全COD (COD-T)、溶解性COD (COD-F)、浮遊性COD (COD-P)、BOD、総アルカリ度、総硬度、塩素イオンおよび硝酸性窒素の12項目とした。

(2) 負荷量と流量との関係

一般に、河川の水質濃度と流量との間には密接な関係が存在し、雄物川の場合

にも明瞭に認められた²⁾。流出負荷量は水質濃度と流量との積で求められるので、流出負荷量と流量との間にもそれ以上の明瞭な関係が予想され、この関係は一般に次の式で与えられる。

$$L = a \cdot Q^n \dots\dots\dots (1)$$

ここに、L：流出負荷量 (kg/s)、Q：流量 (m³/s)、
a, n：係数

まず $n > 1$ の掃流型の水質項目の例として、濁度の負荷量と流量との関係を季節別に図-1に示した。これには、実測データをもとに季節別に求めた回帰直線も示してある。これによると、負荷量と流量との間には基本的な式(1)の関係が存在し、係数は季節ごとにやや異なることが認められる。nの値は2.1~2.7で春が最大で秋、夏の順であった。流量範囲ごとにみると、300 m³/s以下では夏の負荷量が一番大きい、400 m³/s以上では秋が大きくなり、1000 m³/s以下では春が最小になるというように季節ごとの特徴が認められた。同じような傾向は、SSやCOD-Pなどの浮遊性水質の負荷量にも共通して認められた。

次に $n \approx 1$ の水質項目の例として NO₃-N 負荷量と流量との間の関係を図-2に季節別に示した。nの値は0.86~1.03で、秋が最大で夏、春の順であった。夏と秋は秋の方がやや大きいもののほぼ同じ傾向を示し、春は流量が大きくなると負荷量はやや小さくなる傾向がみられる。BODもこれに含まれるが、夏は他の時期よりかなり負荷量が小さい。図-3には、 $n < 1$ の水質項目の例として総アルカリ度負荷量と流量との間の関係を季節別に示したが、全範囲にわたって秋が大きいことと融雪期には負荷量が小さくなるのが特徴的である。

DS、総硬度、塩素イオンの各負荷量についても秋が一番大きく夏が小さい傾向は共通である。春は塩素イオンについては秋と同様に大きいほかは、夏と同じく負荷量は小さい。これら

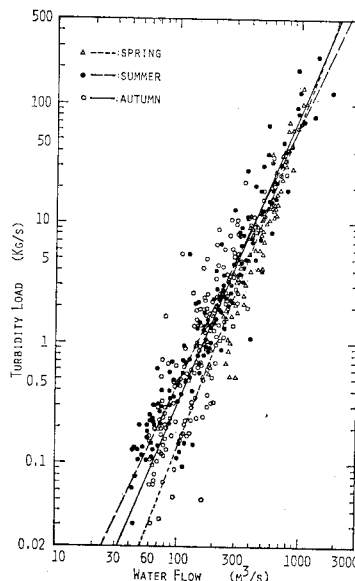


図-1 濁度の負荷量と流量との関係

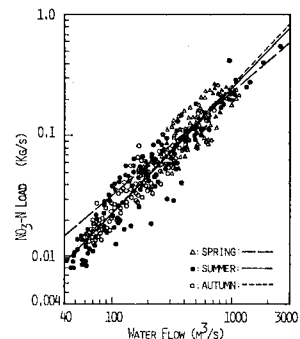


図-2 NO₃-N の負荷量と流量との関係

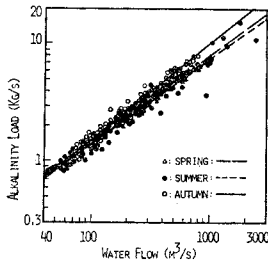


図-3 総アルカリ度の負荷量と流量との関係

は、夏の洪水、春の融雪などの水文現象が負荷量にも大きな影響を与えていることを示している。したがって、河川の流出負荷量を評価するには、Walling¹⁸⁾も指摘しているように季節による負荷量の相違も考慮して行う必要があると思われる。

(3) 負荷量のシミュレーション

浮遊性水質の負荷量の推定には、季節の相違のほかに増水、減水の相違も考慮する必要があり、これを行わないと過小または過大評価をする危険性が大きい。COD-T、COD-P や SS などの負荷量がこれにあたり、一例として夏期の COD-T 負荷量と流量との関係を 図-4 に示した。これによると、負荷量は流量の範囲や増水、減水などの流量の変化によって異なる挙動を示すことが認められる。すなわち負荷量の挙動は、流量が約 100 m³/s 以下と以上の範囲では明らかに異なること、500 m³/s までの範囲では流量の増減にあまり影響されないことそして流量がこれ以上になると少しの増水でも急激に増加することなどの傾向が一般的に認められる。この傾向は、季節によっても異なり、結局 COD-T のような浮遊性物質に影響される水質については、季節および流量範囲ごとに増水時、減水時の相違を考慮して負荷量の評価を行う必要があると思われる。ここでは、流量範囲と増水時、減水時を表わすのに区分流量 Q_d と増水率 r_θ の2つの指標をそれぞれ用い、これによってデータを分類し負荷量のシミュレーションを行うことを試みた。なお、 r_θ は次のように前日の流量に対する比率と定義した。

$$r_\theta = Q(t)/Q(t-1) \dots\dots\dots(2)$$

一例として夏期の COD-T 負荷量については、Try and Error で Q_d は 106 と 500 m³/s の2つ、 r_θ は 1.0 をそれぞれ選

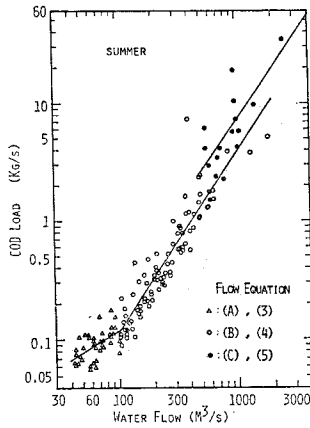


図-4 流量を区分したときの COD 負荷量と流量との関係およびそれぞれの回帰式

択し、それぞれのデータから最も誤差の少ない回帰式を最適とし、この場合以下のように (A)、(B)、(C) の3つの流量に区分してシミュレーションを行った。

- (A) $Q < 106 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下の場合
 $L = 7.38 \times 10^{-3} Q^{0.604} \dots\dots\dots(3)$
- (B) $106 \leq Q < 500 \text{ m}^3/\text{s}$ および
 $500 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q$ では $r_\theta \leq 1.0$ } の場合
 $L = 9.46 \times 10^{-5} Q^{1.54} \dots\dots\dots(4)$
- (C) $500 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q$ でかつ $r_\theta > 1.0$ の場合
 $L = 3.23 \times 10^{-4} Q^{1.45} \dots\dots\dots(5)$

一方溶解性水質の負荷量については、一般に増水時と減水時との相違は無視できるほど小さいが、流量範囲によっては異なった挙動を示す水質も認められる。この一例として夏期の Cl 負荷量と流量との関係を 図-5 に示した。これによると、流量 300 m³/s 前後を境に傾向が異なり、これは表面流出水に含まれる成分や人為汚濁源の影響が加わったり、河川の流路形態が変化することなどが増水時に影響してくるためと思われる。

シミュレーションを行う場合、 Q_d や r_θ についてはさまざまな数値やその組合せが考えられる。そこで最適な回帰式を決定するにあたって、 Q_d と r_θ をさまざまに組合せて用いる場合、 Q_d のみを用いる場合、両方用いない場合などさまざまなケースについて検討した。そして実測負荷量と推定負荷量との月間ごとの誤差の平均値、全体としての誤差、相関係数、変動係数を季節ごとに比較検討し、総合的に最適な回帰式の選択を行った。この結果の一例を、夏期の COD-T 負荷量について 図-6 に示した。これによると、推定負荷量は個々の値を比較すると誤差の大きいものもあり、負荷量の小さい範囲ではやや過大評価に、大きい範囲ではやや過小評価になる傾向が認められる。が全体としてみると、月間誤差は -34% から +5.3% の間で、絶対値の平均が 13%、全体としての誤差は -8.8%、相関係数は 0.97 で比較的よい結果であった。これは、 Q_d と r_θ を用いない場

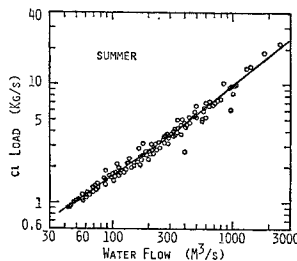


図-5 流量を区分したときの Cl 負荷量と流量との関係およびそれぞれの回帰式

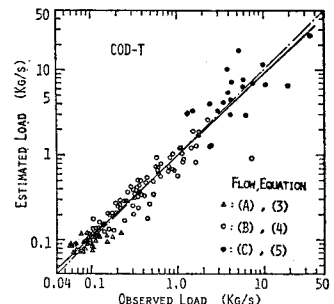


図-6 流量を区分した場合の負荷量の推定値と実測値との関係

表-1 負荷量のシミュレーション結果の例

負荷量	季節	流 量		月 間 誤 差		全資料 による誤差 (%)	相関係数 (-)	変動係数 (%)
		区分流量 $Q_d(m^3/s)$	増水率 $r_\theta(-)$	範囲 (%)	平均 (%)			
SS	春 期	—	—	-33.0 ~ -3.26	19.7	-17.4	0.953	88.4
		619 700	— 1.50, 1.15	-26.5 ~ +18.4 -13.6 ~ +7.68	20.5 11.0	-5.48 -4.84	0.958 0.965	69.8 54.6
	夏 期	—	—	-49.5 ~ +10.3	18.8	-19.5	0.973	183
		707 700	— 1.40, 1.00	-54.3 ~ +1.96 -30.6 ~ +23.7	19.7 19.5	-28.1 +3.81	0.973 0.977	207 111
	秋 期	—	—	-52.2 ~ +35.6	31.2	-5.10	0.906	92.9
		86.7 82.1, 300	— 1.30, 0.90	-53.5 ~ +19.4 -38.3 ~ +9.72	29.8 20.8	-13.6 -12.0	0.915 0.933	85.0 76.8
COD-T	春 期	—	—	-37.9 ~ -5.25	18.5	-16.1	0.921	86.9
		524 700	— 1.57, 1.00	-53.5 ~ +1.12 -13.9 ~ +3.09	11.3 7.60	-7.51 -4.60	0.940 0.957	66.3 49.6
	夏 期	—	—	-48.7 ~ -8.81	25.9	-26.8	0.950	169
		104, 300 106, 500	1.00 1.00	-32.1 ~ +9.59 -33.6 ~ +5.29	15.2 13.4	-9.41 -8.80	0.975 0.969	105 115
	秋 期	—	—	-33.0 ~ +23.6	24.0	-4.76	0.924	66.7
		90.4, 300 90.6, 300	1.20, 0.95 1.30, 0.95	-30.2 ~ +19.8 -24.5 ~ +16.6	18.4 15.3	-4.36 -5.28	0.948 0.949	50.8 51.3
Cl	春 期	—	—	-7.42 ~ +10.2	7.67	-0.93	0.942	17.7
	夏 期	—	—	-7.20 ~ +4.64	4.54	-2.00	0.989	20.2
	315	—	—	-5.44 ~ +3.49	3.43	-0.88	0.990	15.1
秋 期	—	—	-10.4 ~ +8.32	4.84	-1.91	0.984	20.9	
	180	—	—	-7.54 ~ +8.12	3.17	-0.58	0.989	16.3
BOD	春 期	—	—	-27.8 ~ +15.3	16.5	-10.3	0.815	76.9
	夏 期	—	—	-33.3 ~ +7.99	21.3	-18.5	0.859	106
	112	—	—	-29.2 ~ +12.3	16.8	-11.8	0.878	103
秋 期	—	—	-32.6 ~ +23.9	19.7	-11.5	0.806	54.7	

表-2 負荷量の推定に用いた回帰式の例

負荷量	春 期			夏 期			秋 期					
	流量範囲 (m^3/s)	増水率 $r_\theta(-)$	式の係数	流量範囲 (m^3/s)	増水率 $r_\theta(-)$	式の係数	流量範囲 (m^3/s)	増水率 $r_\theta(-)$	式の係数			
SS	—	—	—	<115	—	a n	$5.08 \cdot 10^{-5}$ 2.08	<82	—	a n	$5.18 \cdot 10^{-12}$ 5.68	
	<700 ≥ 700	≤ 1.50 ≤ 1.15	a n	$3.36 \cdot 10^{-6}$ 2.49	<700 ≥ 700	≤ 1.40 ≤ 1.00	a n	$5.08 \cdot 10^{-5}$ 2.08	<300 ≥ 300	≤ 1.30 ≤ 0.90	a n	$6.46 \cdot 10^{-3}$ 1.98
	<700 ≥ 700	>1.50 >1.15	a n	$8.02 \cdot 10^{-10}$ 2.47	<700 ≥ 700	>1.40 >1.00	a n	$9.53 \cdot 10^{-6}$ 2.43	<300 ≥ 300	>1.30 >0.90	a n	$2.15 \cdot 10^{-3}$ 1.50
COD-T	<134	—	a n	$7.51 \cdot 10^{-3}$ 1.53	<106	—	a n	$7.38 \cdot 10^{-3}$ 0.601	<90	—	a n	$1.10 \cdot 10^{-7}$ 3.06
	<700 ≥ 700	≤ 1.57 ≤ 1.00	a n	$7.51 \cdot 10^{-3}$ 1.53	<500 ≥ 500	— ≤ 1.00	a n	$9.46 \cdot 10^{-5}$ 1.54	<300 ≥ 300	≤ 1.20 ≤ 0.95	a n	$2.89 \cdot 10^{-4}$ 1.31
	<700 ≥ 700	>1.57 >1.00	a n	$6.49 \cdot 10^{-6}$ 2.03	≥ 500	>1.00	a n	$3.23 \cdot 10^{-4}$ 1.45	<300 ≥ 300	>1.02 >0.95	a n	$5.05 \cdot 10^{-4}$ 1.31
Cl	—	—	a n	$3.11 \cdot 10^{-2}$ 0.864	<315	—	a n	$6.81 \cdot 10^{-2}$ 0.694	<180	—	a n	$4.54 \cdot 10^{-2}$ 0.769
	—	—	—	—	≥ 315	—	a n	$3.03 \cdot 10^{-2}$ 0.835	≥ 180	—	a n	$1.01 \cdot 10^{-2}$ 1.06
BOD	—	—	a n	$8.16 \cdot 10^{-4}$ 1.07	<112	—	a n	$3.28 \cdot 10^{-2}$ 0.229	—	—	a n	$9.39 \cdot 10^{-4}$ 1.06
	—	—	—	—	≥ 112	—	a n	$3.86 \cdot 10^{-4}$ 1.17	—	—	—	—

合の絶対値の平均 26%, 全体誤差 -27% と比べてかなり誤差が小さくなっており, Q_d と r_θ を用いて推定することの有効性が認められる. 表-1 には, 各負荷量のシミュレーションの結果をまとめて示した. 推定負荷量が実測値と比べてやや小さい傾向はほとんどの負荷量に共通して認められる. これは実際の負荷量が増水時に急増する傾向をもつため, 結局この傾向をいかに正確に評価するかが重要な点と思われる. また月間誤差の平均は, 溶解性無機水質が約 8% 以下, $\text{NO}_3\text{-N}$ が約 14% 以下, BOD が約 21% 以下に対し COD-T が約 18% 以下, SS が約 20% 以下であり, Q_d や r_θ を用いることによって負荷量の誤差がかなり改善されていることが認められる.

以上から, 全季節を通して Q_d と r_θ を用いなかったのは濁度, DS, 総アルカリ度と $\text{NO}_3\text{-N}$ の 4 項目, 一部の季節については春と秋が BOD と COD-F, 春と夏が総硬度, 春のみが塩素イオンであった. これら以外の項目と季節については Q_d や r_θ を用いて負荷量を推定した方がよい結果を与えた. 表-2 に, 推定に用いた各項目の回帰式を, Q_d と r_θ も併せて季節別にまとめて示した.

(4) 月間負荷量の推定

月間負荷量の推定にあたっては, 前述の回帰式を用いてまず日負荷量を求めこれを総和して月間負荷量とする方法と, 月間総流量と総負荷量の実測値をもとに回帰式を求めこれから推定する方法の 2 つの方法を行い比較検討した. 前者については, やや季節のずれはあるが冬期の資料が少ないこともあり 1~4 月を春期と冬期, 5~8 月を夏期, 9~12 月を秋期とし 4 か月ごとに 3 つに区分して推定を行った. 後者については, 一例として Cl の月間総流量と総負荷量との関係を 図-7 に示した. これより両者の間にはほぼ直線関係のあることが認められるが, 融雪や洪水の時期にはこの関係からやや外れることもあり, この方法は平均的な月間負荷量を表わす簡易法と考えられる. 月間負荷量の推定は, 流量データをもとに

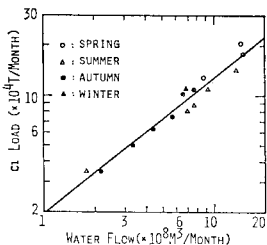


図-7 月間流量と月間 Cl 負荷量との関係

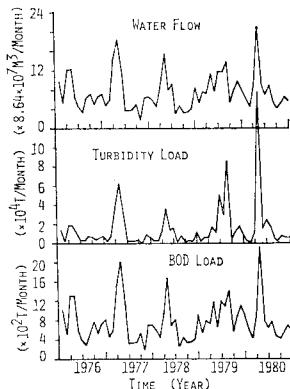


図-8 月間流量と推定月間負荷量の変動特性

1961~80 年の 20 年間について行ったが, 図-8 にはその例として濁度, BOD 負荷量の月変化を流量とともに最近 5 年間について示した. これによると, BOD 負荷量は流量にほぼ比例して増減するが, 濁度負荷量は流量が増す融雪や洪水時には, 極端に負荷量が增大する傾向が認められる.

山口ら^{29)~33)} は河川の汚濁負荷量の推定にあたって, 流送能力型モデルと流送能力供給関数型モデルを用いている. 前者は式 (1) を用いて負荷量を推定する方法で, 本研究と同じ方法である. また後者は, これに流域の汚濁物質の供給を組み込んだ方法で増, 減水時の負荷量の相違を説明する方法でもある. 河川に対する汚濁物質の供給量や貯留量を正確に把握できれば後者の方がより優れた方法といえるが, 流出負荷量は出水ごとの変動が大きくこれらを把握することには現時点では困難が多い. 彼らも負荷量の推定には前者の方法がかなり安定した値を与え, 式 (1) の係数 a や n に平均的な値を与えるか長期間でかつ広い流量範囲をカバーするデータを用いて係数を決定するかすれば誤差も少なくよい結果を与えると言っている. 本研究で用いた方法は, 式 (1) を基本としているが, 季節ごとに区分流量, 増水率を用いて負荷量の相違を考慮しており, より正確な推定値を与える一方法と思われる.

が, 本方法はあくまで数少ない資料から年間負荷量を推定したもので, 含まれる誤差については十分考慮する必要があると思われる. 月間および年間負荷量の変動特性についてはこれまであまり検討されておらず, ここではその傾向を把握することを目的として以下 4.~6. の検討を行った.

4. 月間負荷量の時系列解析

月間負荷量時系列 $x(t)$ は, 傾向成分 $x_T(t)$ と周期成分 $x_F(t)$ およびランダム成分 $x_R(t)$ の和で表わされると考え, 傾向成分には一次式を, 周期成分にはフーリエ級数をそれぞれ当てはめた. 周期成分は, 次のように表わされる.

$$x_F(t) = \sum_{k=1}^m \left\{ A_k \sin\left(\frac{2\pi}{T}kt\right) + B_k \cos\left(\frac{2\pi}{T}kt\right) \right\} \dots\dots\dots (6)$$

$$\left. \begin{aligned} A_k &= \frac{2}{N} \sum_{l=1}^N \left\{ x(t) \sin\left(\frac{2\pi}{T}kl\right) \right\} \\ B_k &= \frac{2}{N} \sum_{l=1}^N \left\{ x(t) \cos\left(\frac{2\pi}{T}kl\right) \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

ここに, T : 周期, N : データ数, k : 周期成分の数

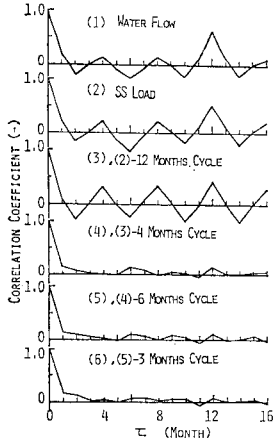


図-9 月間流量と推定月間SS負荷量の自己相関係数および周期成分の除去に伴うその変化

まず傾向成分が負荷量時系列の中に含まれるかどうかを検討した。この判定は、20年間の年間負荷量時系列を用い分散に有意な差があるかどうかをF検定することによって行った。この結果、負荷量は年々減少していくようにみえたが、これは標本に偶然現われた見かけ上の性質と結論され、すべてについて傾向成分は認められなかった。

次に、周期成分の判定はコレログラムを検討することにより行った。

負荷量は流量の影響を強く受けるので、まず月間流量時系列のコレログラムから検討し、これを図-9(1)に示した。これによると、流量時系列には明瞭な1年と4か月の2つの周期が認められ、負荷量の季節変化にも影響を与えていると思われる。次に一例としてSSの月間負荷量のコレログラムを同図の(2)に示した。まず原系列の自己相関は、流量時系列と同様に1年と4か月の明瞭な2つの周期が認められる。そこで原系列から1年の周期成分を除き残った系列の自己相関を調べた。これが同図の(3)で、1年周期がほぼ除かれ強い4か月周期が残っているのがわかる。同様にして4か月、6か月、3か月の各周期成分をそれぞれ除き、残った系列の自己相関を示したのが(4)、(5)と(6)で、最後に残った系列はほぼランダムな成分とみなすことができる。したがってSSの月間負荷量には、1年と4か月の強い2つの周期のほかに6か月と3か月の弱い2つの周期の計4つの周期成分が含まれていることがわかった。これは、四季とも関連のある周期で、他の負荷量にも大小の差はあれ同様にこれら4つの周期成分が含まれていた。

次にこれら4つの周期成分の合成で負荷量の変動をどの程度表わすことができるかを検討した。この例として、Cl負荷量とSS負荷量について1976~80年の5

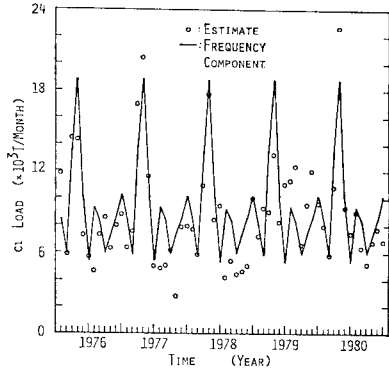


図-10 推定月間Cl負荷量とその周期成分

年間の結果を図-10と11にそれぞれ示した。まずCl負荷量をみると、流量の増減に対応して変化し、融雪と洪水および12月の3つのピークが認められ、洪水時よりも12月のピークの方が大きいのが特徴である。溶解性無機物は、一般に水質濃度と流量との間に逆相関が存在するので負荷量の変動は流量ほど大きくないのが普通であり、総硬度、総アルカリ度のほかにBOD、COD-FやNO₃-Nなどもこれに含まれる。合成波による周期成分は、20年間の平均的な季節変化を表わしているので、年ごとの水文・気象因子の変動に伴う負荷量の変動に対しては必ずしも一致した挙動を示しているわけではない。次にSSの月間負荷量は、流量変化の数倍にもわた

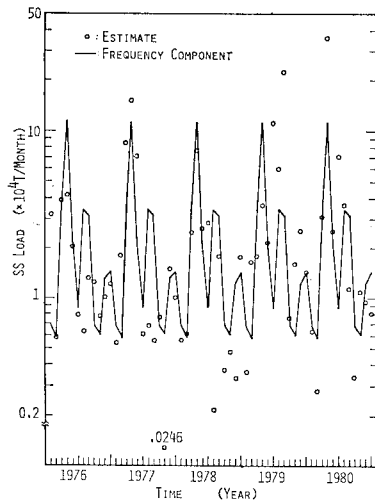


図-11 推定月間SS負荷量とその周期成分

表-3 全体の分散に対する各周期成分の分散の割合

周 期	Turbidity	SS	DS	TS	COD-T	COD-P	COD-F	Alkalinity	Hardness	Cl	BOD	NO ₃ -N
12 か 月	10.7	14.4	13.4	13.4	10.8	15.4	8.3	7.1	12.6	16.6	11.8	20.9
6 か 月	4.4	2.2	9.3	6.4	4.0	1.9	2.9	10.9	10.6	10.5	9.9	7.5
4 か 月	29.3	27.4	27.2	26.8	29.7	26.9	23.7	28.4	27.2	25.6	25.5	23.1
3 か 月	0.9	1.8	5.0	4.3	2.2	2.5	3.7	3.8	5.0	6.6	7.5	7.7
合 計	45.3	45.8	54.9	51.0	46.7	46.7	38.6	50.2	55.5	59.3	54.8	59.2

(%)

って変化が大きいのが特徴である。同様の負荷量として濁度、TS、COD-T や COD-P などがあり、月間負荷量の最小値と最大値の比率は数十倍にも達した。したがってこの時系列をそのまま用いることは困難であり、対数変換して周期成分の検討を行った。周期成分には C1 負荷量と同様に 4 月の融雪、7~8 月の洪水および 11~12 月の 3 つのピークが存在し、その大きさは春、夏、秋の順であり洪水期の負荷量が融雪期の約 1/3 ほどの大きさなの特徴である。

表-3 には、各負荷量時系列の全体の分散に対する周期成分の平均値のまわりの分散の割合を示した。これによると、この割合は全体として 39~59% の範囲にあり、周期成分のみで説明できる部分が必ずしも大きくはないことを示している。これは、負荷量はその時々水文因子の影響を強く受け、融雪期や洪水期には極端に大きくなるなど負荷量の変動が大きいことに関係していると思われる。各周期成分のウエイトは、4 か月周期が 23~30% と一番大きく、これは負荷量推定の際季節を 4 か月ごとに区分したことも関係するが、流量そのものにも強い 4 か月周期が含まれているためと思われる。次いで 1 年周期の 8~21% が大きく、6 か月 2~11%、3 か月 1~8% と続く。また負荷量によってはこのウエイトの順序が異なり、各水質の特徴も認められる。

5. 融雪期の負荷量

20 年間の月間負荷量の月別平均値のデータから、融雪期の負荷量の年間負荷量に占める割合を検討した。本流域での融雪期は、4 月を中心に 3 月末~5 月上旬の範囲であるが、流量データからここでは 4 月の 1 か月間と考えた。図-12 に、負荷量の月変化を流量とともに SS、

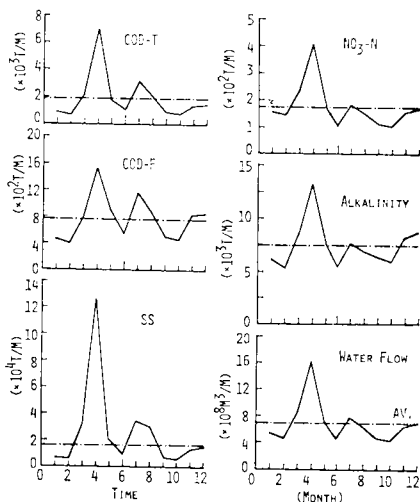


図-12 負荷量と流量の平均的な月変化

COD、NO₃-N、総アルカリ度について示した。4 月 1 か月の流量の年間に占める割合は 19.3% で、1/12=8.3% の約 2.3 倍の大きさである。4 月 1 か月間の負荷量の占める割合を大きさの順に並べると次のようになる。

SS(66.2) > 濁度 (36.4) > COD-T(29.4) > BOD(20.4) > NO₃-N(19.4) > 流量 (19.3) > Cl(18.3) > COD-F(16.4) > DS(16.2) > 総硬度 (15.6) > 総アルカリ度 (14.8) ……(8)

ここに () 内の数字は % を表わす。

これによると、浮遊性水質の負荷量については 4 月の 1 か月間で年間の、SS で約 2/3、濁度で約 1/3 強、COD で約 30% と圧倒的に大きな負荷量が流出しており、この期間の水質変動に大きな影響を与えていることが認められる。一方溶解性無機物や COD-F については、この期間の負荷量の割合は流量よりも小さく、全体として希釈されていることが認められる。特に総アルカリ度については、最小の値を示した。これらについては、雪の成分や融雪水の流れ、水温等にも関係していると思われ、更に詳細な検討が必要と思われる。

6. 年間負荷量の特性

(1) 流域の変遷

初めに、1961 年~80 年の 20 年間の流域の降水量、総流量、人口や工業出荷額などの変遷を検討しよう。図-13 には、年降水量と年間総流量の変化を示した。これによるとまず年降水量は、1401~2288 mm の範囲で、特に 61 年から 66 年までの 6 年間は毎年 2000 mm を越す大きさであった。年間総流量もこれに応じて初めの 6 年間がかなり高い値を示しているのが特徴といえる。一方汚濁源については、まず人口は二次、三次産業が増加するなどの人口構成の変化はみられるものの、総人口は 65~69 万人でほぼ一定しており、顕著な変化が認められたのは家畜頭数と製造業の年間出荷額であった。前者は約 3.9 倍、後者は約 14 倍にそれぞれ増加してい

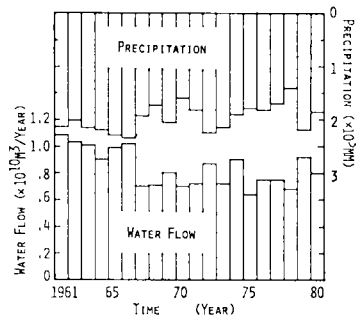
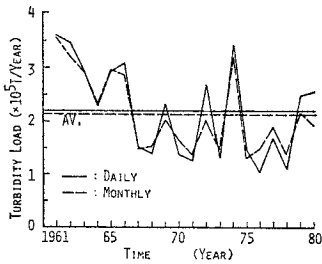


図-13 降水量と流量の 20 年間の変遷

る。が、これらの変化もこの間に経済的発展の著しく進んだわが国にあっては比較的小さく、水文、汚染の両因子からみて全体として大きな変化の少ない地域であったといえよう。

(2) 年間負荷量の推定

年間負荷量の推定は、前述のように日負荷量から求める方法と月間負荷量から求める方法を併用して比較検討した。



図一四 日間および月間の2つの推定法による年間負荷量の比較

この結果の一例を濁度の負荷量について図一四に示した。20年間の負荷量の平均値のみみると、両方法の差が5%以内であったものが多く、年間負荷量であれば後者の方法でもかなりよい推定ができることが認められた。が、SS, TS, COD-F および BOD については6~20%の相違が認められた。これは、SS などについては特に洪水時等の負荷量の推定の相違によるもので、BOD などについては、月ごとに負荷量がかかりばらつくため後者の方法では平均的な推定値を与えると思われる。また同図によると、濁度負荷量には2つの方法による推定値が交互に大小を繰り返すのが示されているが、DS 等の負荷量は後者の方法による推定値が常に大きく、この方法では季節変化などが考慮されない可能性があることが認められる。したがって、前者の日負荷量をベースに年負荷量を求める方法がより正確な推定値を与えるところでは考えた。

表一四に、20年間の年平均負荷量と単位面積当たり負荷量を示した。後者について、たとえば BOD, COD, NO₃-N はそれぞれ 2.01, 4.79, 0.420(t/km²・年) であり、Osborne ら³⁴⁾ が各地の河川について示した NO₃-N の 1.0~3.36 (t/km²・年) と比べかなり小さく、本河川の特性が伺われた。

(3) 確率年負荷量

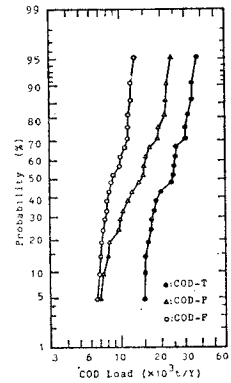
河川の年間総流量は、その年の降水量に応じて年ごと

に変化するので、河川のもつ物質の流送能力を評価するためにはこの年間負荷量の変動特性を把握する必要がある。そこでここでは、20年間の推定年負荷量データをもとに、確率年負荷量について検討を行った。

一般に流量は対数正規分布を示すことが知られており、年間総流量についても同じ分布が予想される。Sickle³⁵⁾ は、sediment の年間負荷量が対数正規分布することを示しており、ここでも主として浮遊性水質の負荷量については対数正規分布を、溶解性水質の負荷量については正規分布をそれぞれ当てはめて検討した。

図一五に、年間負荷量の対数正規分布の例として COD (全、浮遊性および溶解性) 負荷量について示した。これによると、負荷量の分布はやや逆 S 字形を描き、多少のばらつきはあるもののほぼ直線近似も可能であった。また、負荷量が大きくなるにつれ浮遊性負荷量の占める割合が大きくなる傾向も認められる。他の負荷量についても同様であったが、特に SS については、1961~66 年間の総流量が大きかったためこの6年間の年負荷量が極端に大きく、他の時期とは別に全体として2つの直線で表わされる傾向が認められた。

このような分布特性から5年、10年および20年確率の年負荷量をそれぞれ求め、前述の表一四にまとめて示してある。データ数の少ない欠点はあるが、これらにより年負荷量の変動特性がある程度明らかになり、流域の土地利用等に急激な変化がなければ河川の水質管理を考えるうえで一つの目安になるものと思われる。



図一五 推定年間 COD 負荷量の確率分布

7. 結 言

雄物川における流出負荷量の推定について、流量との関係を基本に季節の相違や区分流量、増水率等を考慮することにより検討を行った。推定した日負荷量から月間および年間負荷量を求め、周期成分や確率分布について考察した。より正しい負荷量を求めるには、もっと長期

表一四 平均負荷量、単位負荷量および確率負荷量の推定値

各 負 荷 量	Turbidity	SS	DS	TS	COD-T	COD-P	COD-F	Alkalinity	Hardness	Cl	BOD	NO ₃ -N
平均負荷量 (×10 ⁵ t/Year)	221	475	546	1 020	23.7	14.4	9.32	89.2	162	112	9.96	2.08
単位負荷量 (t/km ² ・Year)	44.6	95.9	110	206	4.79	2.91	1.88	18.0	32.7	22.6	2.01	0.420
確率負荷量 (×10 ⁵ t/Year)	5 年	298	660	617	1 270	30.6	19.2	101	182	128	11.7	2.40
	10 年	362	730	650	1 380	34.6	22.1	106	191	137	12.5	2.56
	20 年	427	800	678	1 480	38.2	24.8	111	199	144	13.1	2.68

の調査を行う必要があるが、本研究で得られた結果を要約すると次のとおりである。

(1) 流出負荷量と流量との間には、基本的に $L = a \cdot Q^n$ の関係が存在し、係数 a , n の値は季節や流量により異なる。一般に、溶解性水質の負荷量は流量に支配される傾向が強いが、浮遊性水質の負荷量はこのほかに流量範囲や増水率によっても大きく変動する性質をもっている。

(2) 実測データに当てはめて最良と思われる帰帰式を用い、流出負荷量のシミュレーションを行った。その結果、本方法での推定負荷量はやや小さめに出る傾向があり、また月間負荷量の誤差の平均として約 8~21% 以下の値が得られた。

(3) 月間および年間負荷量の推定は、月間総負荷量と総流量との関係からも求められるが、まず日負荷量を推定しこれを総和することにより求める方がより正確な値が得られ、特に浮遊性水質の負荷量について著しい。

(4) 雄物川流域では、4月1か月間の融雪期に大量の負荷量が流出する傾向が大きい。年間負荷量に占める割合は、各負荷量について 15~66% に及び、特に浮遊性水質の負荷量が大きな値を示すことが推定できた。

(5) 月間負荷量時系列には、12, 6, 4 および 3 か月の 4 つの周期成分が含まれ、この中で 4 か月周期のウェイトが一番大きい。これらの成分は全体の分散の 40~60% を説明するが、融雪や出水時の負荷量が大きく、説明し切れない分も小さくはない。

(6) 20 年間の年平均負荷量をもとに単位面積当たり負荷量を求めた。また年負荷量の分布特性から確率年負荷量を求め、年負荷量の変動特性に関する一つの知見を得た。

おわりに、本研究に関し多大なご協力をいただいた卒業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、秋田地方気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) 新田 正：河川の水質の変動に関する研究，東京工業大学学報，No. 20, pp. 1~96, 1961.
- 2) 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，No. 265, pp. 73~81, 1977.
- 3) Pisano, M.A. : Nonpoint Sources of Pollution : A Federal Perspective, Proc. of ASCE, Vol. 102, No. EE 3, pp. 555~565, June, 1976.
- 4) Haith, D.A. and J.V. Dougherty : Nonpoint Source Pollution from Agricultural Runoff, Proc. of ASCE, Vol. 102, No. EE 5, pp. 1055~1069, October, 1976.
- 5) Haith, D.A. and L.J. Tubbs : Watershed Loading Functions for Nonpoint Sources, Proc. of ASCE, Vol. 107, No. EE 1, pp. 121~137, February, 1981.
- 6) 田淵俊雄・高村義親・久保田治夫・鈴木誠治：霞ヶ浦へ流入する 栄養塩類の負荷と濃度，農業土木学会論文集，No. 66, pp. 10~20, 1976.
- 7) Schepers, J.S., E.J. Vavricka, D.R. Anderson, H.D. Wittmus and G.E. Schuman : Agricultural Runoff during A Drought Period, Journal of WPCF, Vol. 52, No. 4, pp. 711~719, 1980.
- 8) Wanielista, M.P., Y.A. Yousef and W.M. McLellon : Nonpoint Source Effects on Water Quality, Journal of WPCF, pp. 441~451, March, 1977.
- 9) Griffin, D.M. Jr., T.J. Grizzard, C.W. Randall, D.R. Helsel and J.P. Hartigan : Analysis of Non-point Pollution Export from Small Catchments, Journal of WPCF, Vol. 52, No. 4, pp. 780~790, 1980.
- 10) Whipple, W.Jr. and J.V. Hunter : Nonpoint Sources and Planning for Water Pollution Control, Journal of WPCF, pp. 15~23, January, 1977.
- 11) Bedient, P.B., J.L. Lambert and P. Machado : Low Flow and Stormwater Quality in Urban Channels, Proc. of ASCE, Vol. 106, No. EE 2, pp. 421~436, April, 1980.
- 12) Bedient, P.B., D.A. Harned and W.G. Characklis : Stormwater Analysis and Prediction in Houston, Proc. of ASCE, Vol. 104, No. EE 6, pp. 1087~1100, December, 1978.
- 13) Bedient, P.B., J.L. Lambert and N.K. Springer : Stormwater Pollutant Load-Runoff Relationships, Journal of WPCF, Vol. 52, No. 9, pp. 2396~2404, 1980.
- 14) Zeman, L.J. and O. Slaymaker : Nutrient flux Estimate by Partial Load Method, Proc. of ASCE, Vol. 107, No. EE 2, pp. 425~428, April, 1981.
- 15) Verhoff, F.H., S.M. Yaksich and D.A. Melfi : River Nutrient and Chemical Transport Estimation, Proc. of ASCE, Vol. 106, No. EE 3, pp. 591~608, June, 1980.
- 16) Smith, R.V. and D.A. Stewart : Statistical Models of River Loadings of Nitrogen and Phosphorus in the Lough Neagh System, Water Research, Vol. 11, pp. 631~636, 1977.
- 17) Johnson, A.H. : Estimating Solute Transport in Streams from Grab Samples, Water Resources Research, Vol. 15, No. 5, pp. 1224~1228, 1979.
- 18) Walling, D.E. : Assessing the Accuracy of Suspended Sediment Rating Curves for A Small Basin, Water Resources Research, Vol. 13, No. 3, pp. 531~538, 1977.
- 19) Muskens, P.J.W.M. and W.G. J. Hensgens : Time Series Analysis on Ammonia Concentration and Load Values of the River Rhine, Water Research, Vol. 11, pp. 509~515, 1977.
- 20) 建設省土木研究所：混合粒径特性を考慮した河川の浮遊流砂，土木研究所資料，第 612 号，1970.
- 21) 吉川秀夫：浮遊流砂量に関する二、三の考察，土木研究所報告，第 83 号の 2, 1952.
- 22) 須賀亮三：浮遊流砂に関する雑考(その 2)，第 25 回土木学会年次学術講演会講演概要集 II, pp. 243~246, 1970.
- 23) 海老瀬潜一・村岡浩爾・大坪国順：小河川における豪雨による浮遊物質流出量の定量化，第 25 回水理講演会論文集，pp. 473~479, 1981.
- 24) 海老瀬潜一・村岡浩爾・大坪国順：小河川における総流出負荷量の観測と評価，第 24 回水理講演会論文集，pp. 161~166, 1980.
- 25) 海老瀬潜一・相崎守弘・福島武彦・村岡浩爾：流入河川の降雨時流出物質による湖沼河口部への影響，第 18 回衛

- 生工学研究討論会講演論文集, pp. 263~270, 1982.
- 26) 海老瀬潜一・村岡浩爾・相崎守弘・大坪国順：中小河川における期間総流出負荷量の変化とその評価, 第8回環境問題シンポジウム講演論文集, pp. 118~123, 1980.
- 27) 海老瀬潜一・宗宮 功・大塚尚史：市街地河川における降雨時流出負荷量の変化特性, 水質汚濁研究, Vol. 2, No. 1, pp. 33~44, 1979.
- 28) 海老瀬潜一・宗宮 功・平野良雄・安達伸光：降雨流出過程における流出物質の挙動, 第7回環境問題シンポジウム講演論文集, pp. 124~131, 1979.
- 29) 山口高志・吉川勝秀：河川の水質・汚濁負荷量に関する研究 (I), 土木研究所報告, 第 151 号, pp. 89~141, 1978.
- 30) 山口高志・吉川勝秀：河川の水質・汚濁負荷量に関する研究 (II), 土木研究所報告, 第 154 号, pp. 1~43, 1980.
- 31) 山口高志・吉川勝秀・興石 洋：河川の水質・負荷量に関する水文学的研究, 土木学会論文報告集, No. 293, pp. 49~63, 1980.
- 32) 山口高志・吉川勝秀・浅野富夫：河川水質・負荷量の変動特性とそのシミュレーション, 土木技術資料, Vol. 22, No. 9, pp. 445~450, 1980.
- 33) 山口高志・吉川勝秀・浅野富夫：限られた水質観測データによる年間総負荷量の推定, 土木技術資料, Vol. 23, No. 1, pp. 3~8, 1981.
- 34) Osborne, A.C., M.P. Brooker and R.W. Edwards : The Chemistry of the River Wye, Journal of Hydrology, Vol. 45, pp. 233~252, 1980.
- 35) Sickie, J.V. : Long-Term Distributions of Annual Sediment Yields from Small Watersheds, Water Resources Research, Vol. 17, No. 3, pp. 659~663, 1981.

(1983.4.19・受付)