

# 全国主要河川の負荷量の流出特性について

羽 田 守 夫

## Runoff Characteristics of Pollutant Load in Major Rivers of Japan

Morio HANEDA

(昭和 62 年 10 月 31 日受理)

27 rivers are selected to estimate runoff characteristics of pollutant load, by use of the equation  $L = m (Q/A)^n$ . Coefficient  $m$  is influenced by the area of the river basin and the value of slope  $n$  changes depending on the area as well the average width of the basin. When the width increases, the value  $n$  decreases gradually and the rate of decrease is larger in small basin than in large one. In this way, the runoff characteristics of pollutant load depends on the geological characteristics, the area, the width and so on, of the river basin.

### 1. はじめに

我国の水質汚濁問題は、昭和 40 年ごろの危機的状況は脱したものの、下水道整備の遅れに象徴される社会資本投資の絶対額不足により依然として改善されないまま残されている。

河川や湖沼の水質改善の遅れ又は水質悪化が最近の特徴と言え、下水道の整備がどの程度このような水域の水質改善に効果があるかを予測するためにも、家庭や工場あるいは流域全体からの流出負荷量を正確に把握し、対策を立てることが急務となっている。特に、いわゆる雑排水対策が、公共用水域の汚濁対策にとって重要であり、排出負荷を削減する方法と共に発生負荷量と流出負荷量を知る必要がある。

河川の流出負荷量は、様々な汚濁源からの負荷量の総量を示すだけで、それ以上の分類は困難であるが、負荷量の値を直接知ることのできる重要な指標でもある<sup>1)</sup>。また、流域の降水量や地形、地質、開発の状況、人口分布及び農業の形態等にも影響を受けて変動すると考えられる。

本稿では、全国の代表的な河川を選び、流出負荷量の実態を調べる。次に、主要な水質項目について、流出負荷量の流量や比流量に対する依存性を比較検討する。続いて各河川の流出負荷量が流域の面積や形状にどのように関係するかを検討し、各水質項目毎に流出負荷量を求める推定式を定める。これを基

に各河川の流出負荷量を推定し、資料の少ない河川への適用性とこのような推定方法の可能性について検討を行った。

### 2. 調査方法

河川は、日本全国を九地区(北海道、東北、関東、信越、中部、近畿、中国、四国及び九州)に分け、一つの地区から代表的な三河川を選んで、計二七河川とした。選択の基準は、流域面積が中位以上のものとし、約 1,000 km<sup>2</sup>以上の河川とした。水質基準点は、流域の全ての影響の出る最下流地点を考えたが、海水の影響も考慮してこの影響の出ない最下流地点を選んだ。

負荷量を求めるための流量及び水質については、前者は建設省河川局編の「流量年表」<sup>2)</sup>を、後者は同「水質年表」<sup>3)</sup>をそれぞれ参照した。年度は、1973 年～1984 年の 12 年間とした。水質データは月 1 回が主で、従って一河川につき一つの水質項目毎に 144 個であり、合計 42,768 個を使用した。なお水質項目は、流量、気温、水温、pH、DO、Cl イオン、SS、COD、BOD、TN、TP の 11 項目を調べたが、負荷量計算にはこの中の Cl イオン、SS、COD、BOD、TN 及び TP の 6 項目を選んで行なった。全国の河川の区分及び位置については図-1 に、採水地点、流域面積等については表-1 に示した。 111

### 3. 河川の流出負荷量

流域には様々な汚濁源が存在する。大別すれば人為的汚濁源と自然汚濁源であり、前者は人間、家畜、工場等、後者は森林、田畑等が含まれる。これまで河川の流出負荷量には人為的汚濁源の影響が大きいと考えられて来たが、様々な調査の結果自然汚濁源の占める割合の大きいことが認識されて来ている。即ち自然汚濁源による流出負荷量は、流域に降る降水を介して、流量増大に伴って流集してくるもので一般に次の関係がある。

$$L \propto Q^n \quad (1)$$

ここに  $L$  : 流出負荷量,  $Q$  : 流量,  $n$  : 指数

式(1)が河川の流出負荷量を求める基礎式であり、これを基に様々なモデルが考えられている。それが流送能力型と流送能力・供給関数型モデルでそれぞれ次のように表わされる<sup>4)</sup>。

$$L = mQ^n \quad (2)$$

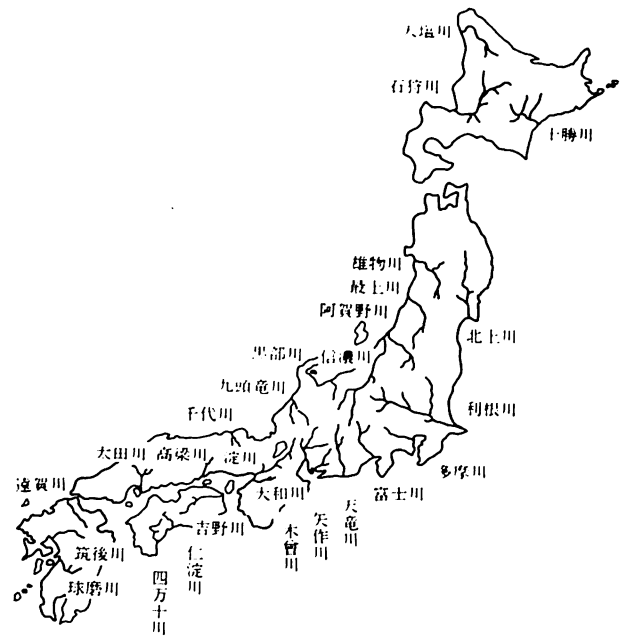


図1 全国主要河川の位置

表1 全国27河川の諸特性

(理科年表による)

地区	河川名	番号	採水地点名	流域面積 $A$ (km <sup>2</sup> )	幹川延長 $Lr$ (km)	平均幅 $W$ (km)	人口密度* (人/km <sup>2</sup> )	工業出荷額* (億円)
北海道	石狩川	11	石狩大橋	14,330	268	53.5	156	3,875
	十勝川	12	茂岩	9,010	156	57.8	36.7	730
	天塩川	13	円山	5,590	256	21.8	25.2	250
東北	北上川	21	和淵	10,150	249	40.8	124	1,700
	最上川	22	砂越	7,040	229	30.7	148	2,906
	雄物川	23	椿川	4,710	133	35.4	100	975
関東	利根川	31	布川	16,840	322	52.3	4,250	40,000
	富士川	32	北松野	3,990	128	31.1	171	3,170
	多摩川	33	田園調布堰	1,240	138	8.99	2,024	30,000
信越	信濃川	41	立ヶ花橋	11,900	367	32.4	146	9,600
	阿賀野川	42	馬下橋	7,710	210	36.7	80.4	1,392
	黒部川	43	愛本	682*	85*	8.02	—	—
中部	木曾川	51	濃尾大橋	9,100	227	40.1	84.7	2,930
	天竜川	52	鹿島	5,090	213	23.9	104	3,874
	矢作川	53	米津	1,830	117	15.6	—	—
近畿	淀川	61	牧方大橋	8,240	75	110	1,083	—
	九頭竜川	62	深谷	2,930	116	25.3	201	—
	大和川	63	国豊橋	1,070*	—	—	1,308	—
中国	太田川	71	玖村	1,700	103	16.5	—	5,523
	千代川	72	行徳	1,192*	56.8*	21.0	154	643
	高梁川	73	霞橋	2,670	111	24.1	112	5,370
四国	吉野川	81	高瀬橋	3,750	194	19.3	143	724
	四方十川	82	高瀬橋	2,270	196	11.6	55.5	3,164
	仁淀川	83	伊野	1,560	124	12.6	56.9	238
九州	球磨川	91	横石	1,880	115	16.3	137	410
	筑後川	92	瀬ヶ下	2,860	143	20.0	350	—
	遠賀川	93	伊佐座	1,032*	60.7*	17.0	266	313

\* : 日本河川水質年鑑による

$$L = mS^l Q^n (Q - Q_c)^n \quad (3)$$

ここに  $m, n, n', l$  : 係数,

$S$  : 滞積量又は貯留量,

$Q_c$  : 限界流量

式(2)は、式(1)に降水量の影響を加味したものもある。式(3)はこの他に流域又は河川への貯留量を加えたものである。実態には式(3)の流送能力、供給関数型モデルが一番合致するが、 $S$  の評価が困難で実用的でない面もある。

従って本稿では、流送能力型モデルを基本とし、式(2)の係数  $m, n$  が、地区毎、河川毎にどのように変化するかを検討を行なった。

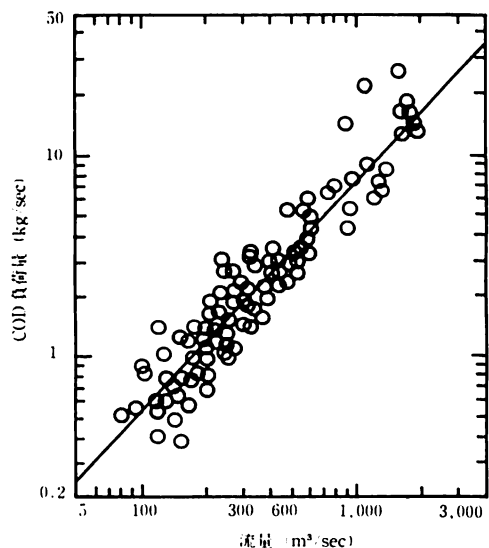


図2 COD 負荷量と流量との関係 (石狩川)

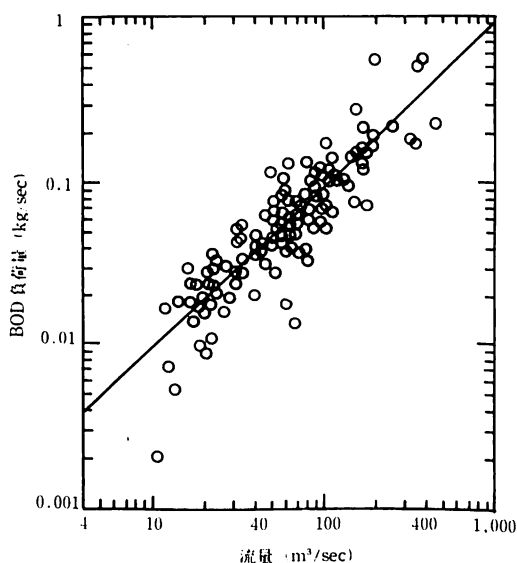


図3 BOD 負荷量と流量との関係 (太田川)

#### 4. 結果及び考察

##### 4.1 各河川の流出負荷量

初めに、各河川の流出負荷量が式(2)にどの程度合致して変動するか、水質項目による差はないかの検討を行った。例として図-2に石狩川のCODについて、図-3に太田川のBODについてそれぞれ示した。

これによると、流出負荷量は多少のばらつきは認められるもののほぼ式(2)に沿って増減すること及びCODの0.936に比べBODの方が0.871とやや相関係数が低く、分散も大きいことが認められる。この他SS、TN及びTPについても同様の結果が得られ、式(2)で十分に河川の流出負荷量の変動を表現できることが認められた。

次に、異なる河川の流出負荷量を比較する場合、流量で行う場合と比流量を用いる場合との比較を行なった。一般に、流域面積の異なる河川間の比較研究には比流量が用いられる。一方、流出負荷量は河川の流に動的に支配され、式(2)は一種の運動方程式であることを考えれば、比流量よりも流量そのものを用いる方が良いとも考えられる。そこで両者の比較検討を行った結果、基本的な相異はないが、流量を用いた方が回帰式の係数  $m$  の値の差が少なくなることが認められた。しかしながら、後述するように個々の河川でなく全河川を比較するには比流量を用いる方が適切であり、又係数  $m$  の意味についても比流量での値の方がより良い説明が可能であったので、ここでは比流量に対する流出負荷量として検討を行なった。即ち次の式を用いた。

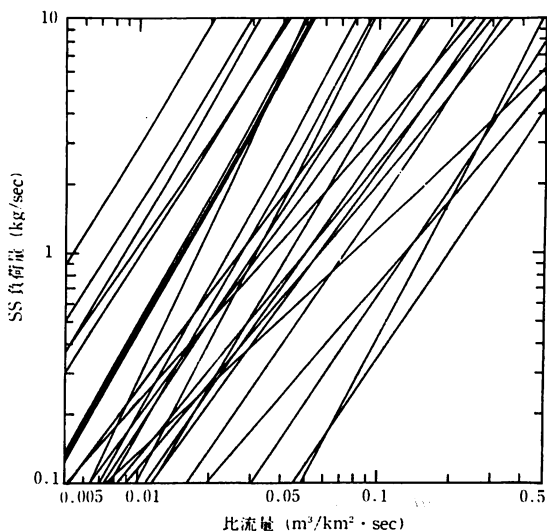


図4 27河川のSS 負荷量の回帰直線

$$L = m (Q/A)^n \quad (4)$$

ここに  $A$  : 流域面積 (km<sup>2</sup>)

例として図-4にSS流出負荷量の回帰式を、全27河川について示した。これによると、まず式(4)の係数  $m$  について、河川毎に数十倍にも達する程の大きな差があることが認められる。又、勾配  $n$  については、大多数の河川についてはほぼ同じ位の値であるが、中にはかなり小さな勾配を持つ河川もいくつかあることも認められる。このように、河川のSS流出負荷量は、基本的には式(4)で表わすことができるが、係数  $m$ 、 $n$  についてはかなりばらつきもあり、これらを支配している別の要因のあることも予想される。他の水質項目であるCOD、BOD、Clイオン、TN及びTPについても同じような傾向が認められた。

#### 4・2 係数 $m$ と流域面積

全27河川の流出負荷量に、式(4)を当てはめた場合の係数  $m$ 、勾配  $n$  及び相関係数  $r$  の値を、各水質項目毎に表2~6にまとめて示した。

前節の考察から、係数  $m$  の値には河川によって数

十倍もの差のあることが認められたが、これは式(2)を用いた時の  $m$  の値に、式(4)を用いた時程の差が認められなかったこと等から、河川の流域面積の大きさに関係していることが予想された。そこで、係数  $m$  と流域面積  $A$  との関係を検討し、一例としてSSの場合について図-5に示した。これによると両対数紙上で係数  $m$  の値は流域面積  $A$  が増すと増加すること、同じ流域面積でも10倍程度の差の出る可能性のあること等が認められるが、全体として良い相関 ( $r = 0.85$ ) が見られる。この関係は式(4)と同様に次の関係式で表わされる。

$$m = m_0 (A)^{n_0} \quad (5)$$

ここに、 $m_0$  : 係数、 $n_0$  : 勾配

他の水質項目、COD、BOD、Clイオン、TN及びTPについても同様の良い関係が認められ、これらの係数の値をまとめて表-7に示した。これによると、SS以外の水質項目についても相関係数が0.80~0.91と高く、係数  $m$  の値が流域の面積の大きさに依存していることが示された。しかしながら、流域面積が同じでも係数  $m$  の値には数倍~10倍程度の

表2 各河川の本帰式と相関係数 (SS)

河川番号	係数 $m$	勾配 $n$	相関係数 $r$
11	7,880	1.72	0.888
12	4,800	1.79	0.702
13	2,670	1.86	0.835
21	1,290	1.53	0.654
22	2,220	1.84	0.881
23	1,380	1.92	0.789
31	3,560	1.66	0.889
32	2,320	1.84	0.891
33	96.8	1.52	0.848
41	9,000	2.26	0.820
42	866	1.86	0.816
43	43.9	2.02	0.772
51	323	1.80	0.861
52	1,230	2.04	0.784
53	142	1.43	0.851
61	1,210	1.55	0.799
62	48.5	1.29	0.896
63	53.9	1.19	0.827
71	58.4	1.54	0.819
72	12.7	1.23	0.729
73	12.5	0.985	0.733
81	287	1.78	0.868
82	12.7	1.57	0.738
83	24.5	1.58	0.760
91	66.4	1.45	0.868
92	136	1.37	0.825
93	37.9	1.26	0.915
平均	—	1.63	0.817

表3 各河川の本帰式と相関係数 (Clイオン)

河川番号	係数 $m$	勾配 $n$	相関係数 $r$
11	66.4	0.734	0.839
12	18.8	0.694	0.711
13	43.1	1.02	0.849
21	29.0	0.650	0.679
22	62.1	0.844	0.971
23	43.3	0.830	0.903
31	96.3	0.813	0.961
32	—	—	—
33	5.51	0.604	0.879
41	—	—	—
42	—	—	—
43	2.30	0.823	0.858
51	5.75	0.584	0.803
52	14.8	0.831	0.706
53	3.22	0.701	0.707
61	—	—	—
62	8.43	0.742	0.681
63	3.54	0.541	0.524
71	—	—	—
72	5.38	0.808	0.891
73	7.31	0.805	0.830
81	4.29	0.643	0.611
82	2.12	0.798	0.621
83	—	—	—
91	—	—	—
92	—	—	—
93	—	—	—
平均	—	0.748	0.779

表4 各河川の本帰式と相関係数 (COD)

河川番号	係数 $m$	勾配 $n$	相関係数 $r$
11	131.0	1.13	0.936
12	61.3	1.13	0.812
13	34.8	1.12	0.955
21	49.3	1.16	0.769
22	22.0	1.12	0.874
23	7.05	1.09	0.691
31	53.2	1.06	0.912
32	13.5	1.16	0.956
33	2.32	0.730	0.845
41	47.7	1.29	0.830
42	—	—	—
43	1.69	1.29	0.859
51	9.13	0.997	0.928
52	12.4	1.17	0.888
53	4.55	0.966	0.940
61	16.3	0.764	0.835
62	2.82	0.801	0.864
63	2.60	0.703	0.846
71	5.06	1.16	0.910
72	1.38	0.914	0.848
73	2.94	0.909	0.837
81	7.86	1.21	0.853
82	—	—	—
83	1.24	1.10	0.754
91	2.97	0.797	0.759
92	8.77	0.989	0.820
93	2.89	0.970	0.946
平均	—	1.03	0.859

全国主要河川の負荷量の流出特性について

差も認められ、流域面積以外の要因の影響も十分に考えられる。従って適用に当っては十分な考慮を要すると考えられる。

式(5)の  $m_0$  の値については、大ききの順に並べると次のようになった。

表5 各河川の回帰式と相関係数 (BOD)

河川番号	係数 $m$	勾配 $n$	相関係数 $r$
11	15.6	0.987	0.867
12	5.15	0.767	0.491
13	3.21	0.953	0.856
21	5.31	0.798	0.604
22	7.31	1.02	0.818
23	5.84	1.08	0.719
31	4.61	0.659	0.722
32	1.53	0.869	0.871
33	1.35	0.642	0.738
41	11.6	0.954	0.672
42	2.64	0.668	0.738
43	0.264	1.13	0.817
51	1.34	0.701	0.788
52	1.91	0.836	0.648
53	0.463	0.684	0.771
61	6.80	0.630	0.716
62	1.47	0.830	0.866
63	1.88	0.657	0.674
71	1.31	0.985	0.871
72	0.944	1.00	0.814
73	2.06	0.952	0.765
81	0.712	0.745	0.545
82	1.12	1.06	0.780
83	1.01	0.947	0.660
91	0.894	0.690	0.698
92	2.24	0.758	0.608
93	0.729	0.794	0.843
平均	—	0.844	0.739

SS > COD > TP > Cl イオン > 1.0 > BOD > TN

この順序は、流域面積が大きい時流出負荷量の増大する傾向が大きい順序に相当し、SS~TP がかなり増大する傾向にあることを示している。これらの項目は浮遊性の物質が増えるに従って増加する水質項目であり、流域面積の大きさが流集してくる物質に大きく影響すると考えられることから十分に予想される。一方、塩素イオンについてはほぼ1.0に近く、流域面積にそのまま比例することがわかる。逆にBODとTNについては1.0以下であり、流域面積が増えても流出負荷量はそれ程増加しないことを示している。これは流出源が限られていることを示唆しており、流出の機構を考える上で興味深い。

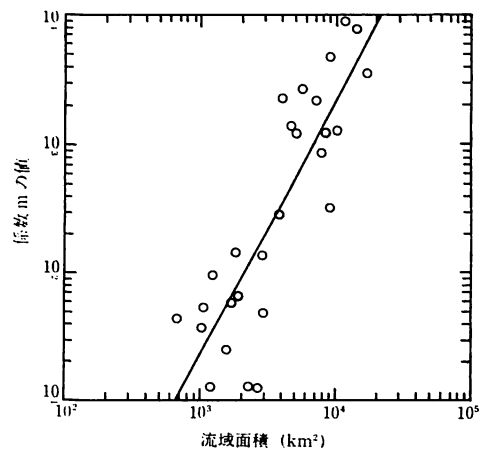


図5 係数  $m$  と流域面積との関係 (SS)

表6 各河川の回帰式と相関係数 (TN, TP)

項目	河川番号	係数 $m$	勾配 $n$	相関係数 $r$
TN	11	9.72	0.977	0.872
	12	10.2	0.919	0.793
	13	2.49	1.06	0.776
	33	2.09	0.729	0.833
	53	1.08	0.908	0.905
	81	2.17	0.968	0.879
	平均	—	—	0.927
TP	11	1.61	1.11	0.826
	12	0.868	0.998	0.460
	13	0.511	1.28	0.876
	53	0.231	1.01	0.806
	71	0.106	1.22	0.887
	73	0.0429	0.889	0.625
平均	—	—	1.08	0.747

表7 係数  $m$  と流域面積  $A$  との回帰式

負荷量	係数 $m_0$	勾配 $n_0$	相関係数 $r$	データ数 $N$
SS	$2.63 \times 10^{-5}$	1.98	0.85	27
COD	$1.97 \times 10^{-4}$	1.31	0.91	25
BOD	$1.44 \times 10^{-3}$	0.887	0.81	27
Cl イオン	$1.90 \times 10^{-3}$	1.06	0.80	18
TN	$2.99 \times 10^{-3}$	0.836	0.86	6
TP	$5.62 \times 10^{-6}$	1.30	0.85	6

4・3 勾配  $n$  と流域平均幅

勾配  $n$  の分布状態を、水質項目毎に図-6 に示した。式(4)の勾配  $n$  の値は、流量が増減する時の流出負荷量の流量依存性を表わし、 $n$  の値が1.0より大きい場合を汚濁型、1.0以下の場合を希釈型の項目とそれぞれ呼ぶこともできる。この判別に従えば、SSは汚濁型、塩素イオンは希釈型とそれぞれ考えることができる。しかしながら、COD、BOD、TN、TP

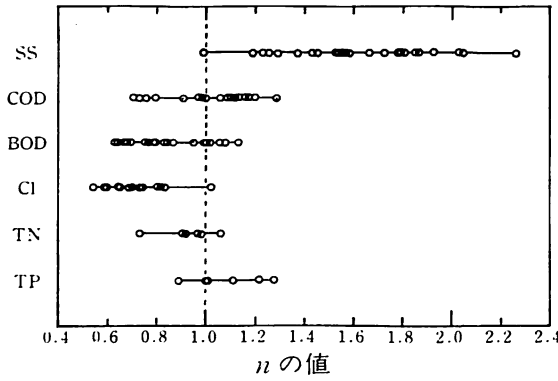


図 6 勾配 n の分布

については 1.0 の前後に分布しており、いずれかへの強弱はあっても両者が混在しており、河川によって汚濁型になったり希釈型になったりしている。また、汚濁型である SS についても n 値の分布幅が大きいことが特徴と言え、約 1.6 を境に大きく 2 つのグループに分割することも可能と思われる。

このように、勾配 n についてもこれを支配している要因が存在すると考えられる。

河川流域を特徴付けるのは、流域の大きさ、傾き及び形の 3 つと考えられる。この中で物質の流出特性に大きく影響するのは河川の傾きと考えられるが、これに関する資料は少なく、利用が困難な現状である。又傾きは、我国のような急峻な地域では流域の大きさにも関係している可能性もある。そこでここでは流域の大きさと形の 2 点から勾配 n に対する影響を検討することにした。流域の形について

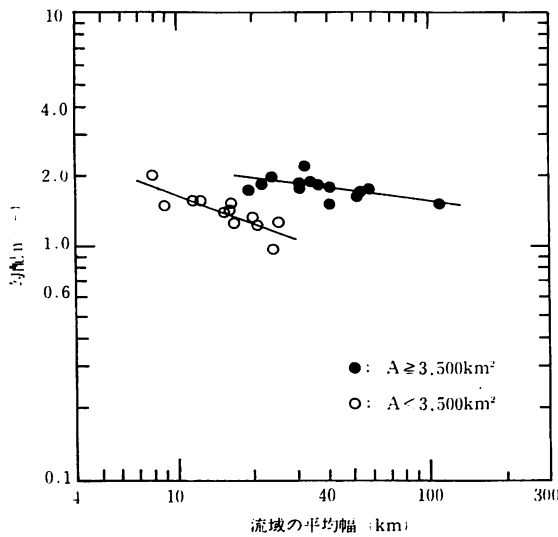


図 7 勾配 n と流域の平均幅との関係 (SS)

は、細長い流域と幅広い流域とでは、物質の流出が異なってくることは十分に考えられる。そこで流域面積を幹川延長で除した流域の平均幅で考察した。即ち、

$$W = A/Lr \quad (6)$$

ここに、W : 平均幅 (km), Lr : 幹川延長 (km)

図一七に、SS の勾配 n を平均幅 W に対して両対数紙上にプロットして示した。これによると、n 値は W に対して一見無関係のように見えるが、流域面積で 2 つのグループに分けるとそれぞれが W に応じて変化することが読み取れる。2 つのグループは、流域面積が約 3,500 km<sup>2</sup> で分けられ、それぞれ W が大きくなると n の値は小さくなること及び流域面積の小さいグループの方がその小さくなる割合がより大きいことが認められる。このことは、同じ面積でも幅広い流域よりも細長い流域の方が浮遊物質の流出がより大きくなること、及び流域面積の小さい河川では、平均の幅が大きくなると浮遊物質の流出が急激に低下することを意味し、流域の形が SS の流出形態に密接に関係することを示している。このような傾向には、前述したように流域の傾きも関係していると思われるが、全体として水の流出機構から予想される傾向と一致している。両者の回帰式は、相関係数はそう高くはなかったもののそれぞれ次のように求められた。

$$n = 2.87 W^{-0.127} ; A \geq 3,500 \text{ km}^2, \quad (r = -0.57) \quad (7)$$

$$n = 4.22 W^{-0.399} ; A < 3,500 \text{ km}^2, \quad (r = -0.83) \quad (8)$$

式(8)の傾配が式(7)よりも大きいことには、流域面

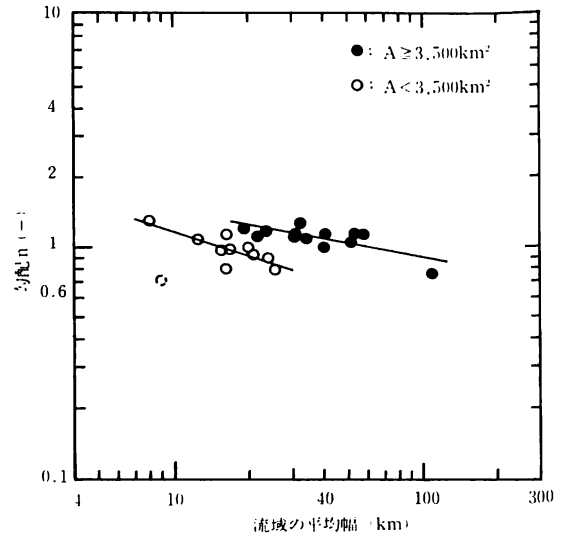


図 8 勾配 n と流域の平均幅との関係 (COD)

## 全国主要河川の負荷量の流出特性について

積の小さい河川では人為的汚濁源の影響が相対的に大きくなることも関係していると思われる。

図-8には、同じく  $n$  対  $W$  の関係を COD について示した。これによると、COD についても SS 同様、基本的な傾向は同じであり、SS について言えることは COD についても認められた。2つのグループは、SS の場合よりもややばらつきが大きいように思えるが、回帰式はそれぞれ次のように得られた。

$$n = 2.25 W^{-0.197}; A \geq 3,500 (r = -0.73) \quad (9)$$

$$n = 2.65 W^{-0.353}; A < 3,500 (r = -0.77) \quad (10)$$

なお、式(10)のデータには、人為汚染の大きかった多摩川のデータは省いてある。

塩素イオンと BOD についても同様の検討を行ったが、 $W$  が増えると  $n$  値はやや小さくなる傾向は見られるものの、SS 程ではなくまた2つのグループへの分割も認められなかった。これは水質特性の違いであり、浮遊性物質に関係する水質項目について特に流域の形の影響が大きいことを示していると考えられる。

これまで各河川の流出負荷量には、自然汚濁源からの影響がかなり大きいことが知られてきたが、以上の結果は多数の河川の比較検討から初めてそれを裏付けた結果と考えられ、河川の流出負荷量のメカニズムを考える上で重要と思われる。

## 5. ま と め

全国の主要な 27 河川を対称とし、流出負荷量の特長について SS、COD、BOD、Cl イオン、TN 及び TP の 6 項目を基に比較検討を行なった。その結果次の結論が得られた。

- (1) 各河川の流出負荷量は、流送能力型の関数式(4)で表わすことができる。これは水質項目によらず比較的高い相関係数で表現できる。
- (2) 式(4)のように比流量を用いて負荷量を表わす時、係数  $m$  は流域面積と強い正の相関を持ち、こ

の時面積の増加と共に負荷量が増加する割合は浮遊性の水質項目程大きく、溶解性の項目は小さい。

- (3) 浮遊性水質項目の場合、勾配  $n$  の値は流域の平均幅との関係で、流域面積約 3,500 km<sup>2</sup> を境に2つのグループに分けることができ、それぞれのグループが平均幅と負の相関を持つと認められる。即ち、平均幅が大きくなると勾配  $n$  が小さくなり、この割合は流域面積の小さな河川グループ程大きくなる。

以上のように、河川の流出負荷量には流域の大きさや形といった自然条件が大きく影響を与えており、また影響の度合は水質項目や流域の大きさによって異なるなど興味ある知見を得ることができた。これは、流出負荷量に占める自然汚濁源の影響の大きさを表わしており、これまでの知見を裏付けてもいると考えられる。今後は対称とする河川を増やして更に検討を続けたい。

## 謝 辞

本研究を行うに当たり、当時卒研究生であった嵯峨正己君には多大の御協力を頂いた。また建設省秋田工事事務所の関係各位には資料の一部を貸して頂いた。ここの記して厚く御礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) 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, No. 340, pp. 107~116, 1983
- 2) 建設省河川局編「流量年表」昭和 48 年~昭和 59 年
- 3) 建設省河川局編「水質年表」昭和 48 年~昭和 59 年
- 4) 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