

～汚濁物質の流出機構を中心として～

11 那須 義和

11

を併せて示した。BOD については、両地点に共通して昭和40～41年を境に、COD(Mn)については若干遅れて、年平均濃度の低下すなわち水質の改善が認められた。これは、昭和38～40年に水質基準が適用されたことと対応するものと考えられ、このことは、空知川ゾーンにおいて出炭量の減少をみないことから推測される。年平均濃度が低下してから、年間変動巾も小さくなる傾向にあり、人為汚濁の程度の少なくなっていることがわかる。赤平大橋におけるBOD/COD(Mn)が石狩川橋より低い値を示すが、近年幾分高くなり、その差が小さくなったことから推測できる。流量(掃流力)と相関の高いSSは、明瞭な傾向を示さなかった。図-5には、同一資料を用いて、石狩川橋におけるBODとCOD(Mn)の関係を示した。両者の間にはあまりよい相関が認められないが、特に昭和40年以前はその関係がうすい。廃水処理が不十分であることと、質的にもかなりの変動を与えることが推定される。納内橋(St.3)における著者の昭和44～46年の22試料については両者の関係を調べたところ、 $[BOD(O_2\text{mg/l}) = 0.19\text{COD(Mn)}(O_2\text{mg/l}) + 0.5, r = 0.89]$ と、図-5の昭和41年以降よりよりよい相関を認めたので、試料の処理等の分析法上の問題も無視できないと考えられる。図-6には、流量とBOD流出量の関係を示した。昭和40年以前は流出量が非常に多くまた変動も大きく、著しい人為汚濁のあったことが想像される。昭和41年以降は、大体本地点の環境基準BOD $3O_2\text{mg/l}$ 以下であるが、時にかかなりの高濃度になることもあるようである。本資料に基づいて考えると、石狩川は「排水基準」や「上乗せ基準」の改善されているものと考えられ、有機汚濁物質の流出パターンも、全体的には流量比例型という自然流出パターンに近くなりつつある。(註：自然(流出)汚濁物質は、特定汚濁源に由来しないで降雨など気象条件に左右されて流出しているものとする。)

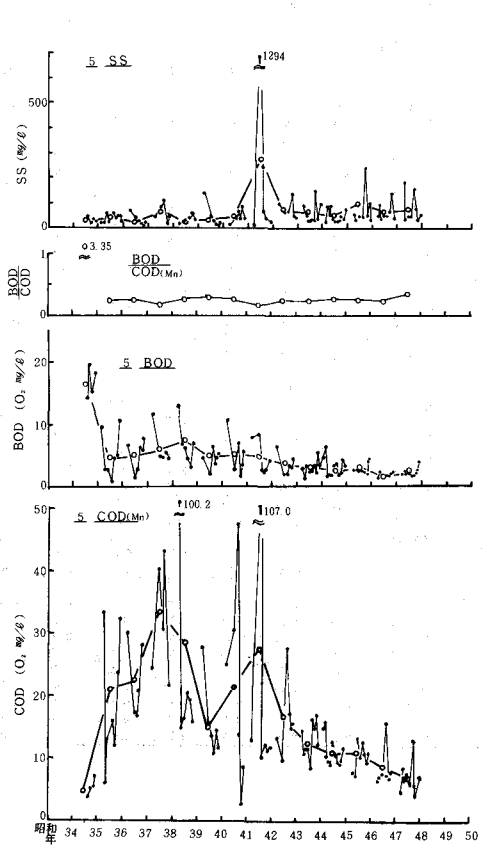


図-3 主要成分の経年変化(石狩川橋、St.5)

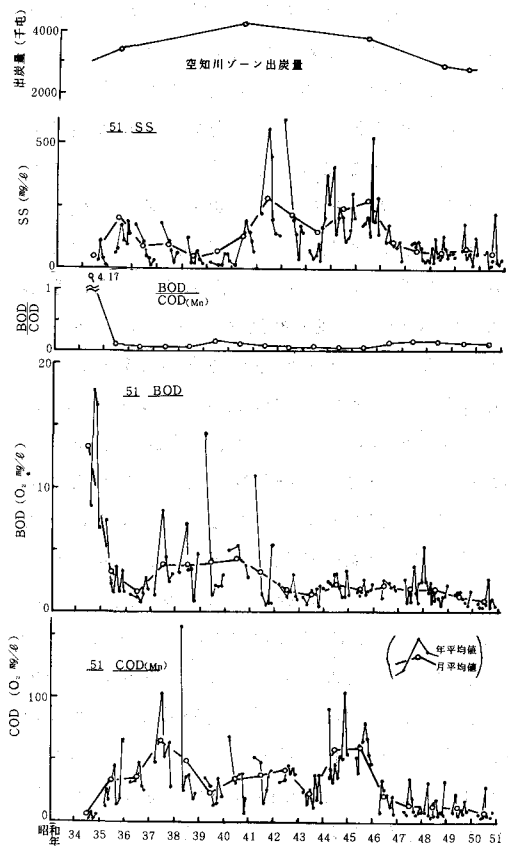


図-4 主要成分の経年変化(赤平大橋、St.51*)

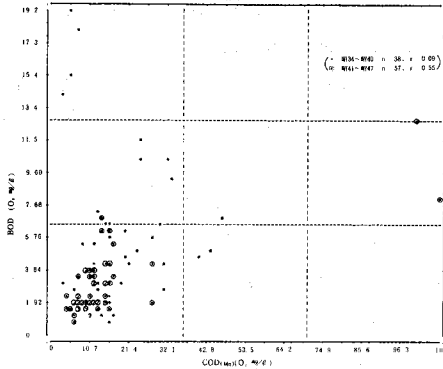


図-5 BODとCODの関係(石狩川橋、St.5)

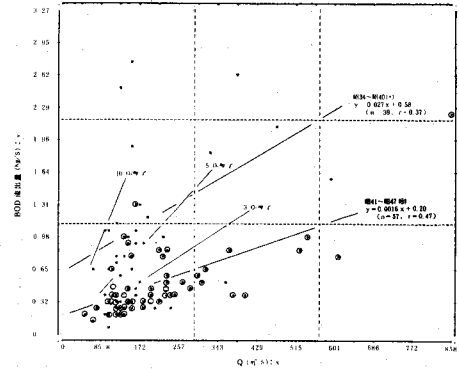


図-6 BOD流出量とQの関係(石狩川橋、St.5)

4 石狩川水質の一般的特性

石狩川流域内においても水質成分の挙動は汚濁源の性格と流域の状況や気象条件等の影響因子に支配されかなり異なったものになると思われる。したがって各地点の水質特性を把握し比較検討することは汚濁のメカニズムを考える場合重要なことであり、特性値そのものも一時代の河川の記録として残しておくために大切なことと考えられる。本節では、昭和44～46年の水質の特性を著者の行なった分析資料(通年調査資料=流量安定時、調査回数23、調査地点数17、分析項目数36)に基づいて整理した結果について報告する。一例として表-1に代表地点における主要成分についての統計上の特性値を示した。納内橋ではBOD、豊橋ではSS、CODss成分濃度が極めて高く、前節で述べた汚濁発生源との関連が明らかである。石狩川流域では、一般にCOD(Mn)F、COD(Cr)F、Cl⁻等の溶存成分は正規分布型に、COD(Mn)ss、COD(Cr)ss、SS等の懸濁性の表面流出物質は対数正規型に近似するようである。図-7には、尖度と平均値の関係をBODとSSについて示した。石狩川においては、両成分とも両者の間に一定の関係が認められ、BODでは平均濃度の一番高い納内橋(St.3)で尖度が最高となり、SSについては地点間の差が少なく、懸濁性物質による汚濁が著しい豊橋(St.51)で低くなることが認められた。CODFはBOD型、CODssはSt.51を除いてSS型に近い。NH₄⁺-Nについてははっきりした傾向

表-1 水質特性

(St. No.)		1	3	41	5	51	6	81
地 点		金 星 橋	納 内 橋	雨 竜 橋	石 狩 川 橋	豊 橋	大 井 橋	江 橋
BOD (O ₂ ㎎/L)	n	22	23	22	23	23	21	20
	平 均	2.1	5.8	2.4	3.7	2.3	3.2	2.2
	中央値	1.9	5.0	2.4	3.3	2.1	2.9	2.2
	標準偏差	0.8	2.6	0.7	1.6	0.7	1.1	0.6
	歪 度	-0.73	-0.17	-0.10	-0.70	-0.52	-0.26	0.48
	尖 度	0.32	1.05	-0.19	0.73	0.59	0.65	0.66
	最小値	0.8	2.4	0.8	1.7	1.2	1.6	1.3
SS (㎎/L)	n	22	23	22	23	23	21	20
	平 均	52	50	47	60	133	112	195
	中央値	16	26	29	30	90	62	167
	標準偏差	103	73	46	62	90	97	109
	歪 度	7.74	10.51	0.85	0.94	-0.69	1.04	0.55
	尖 度	2.94	3.30	1.53	1.61	0.96	1.39	1.14
	最小値	2	6	6	17	41	23	62
COD(Cr)ss (O ₂ ㎎/L)	n	20	22	21	22	22	21	19
	平 均	3.3	9.0	3.8	6.8	58.5	18.1	33.3
	中央値	1.8	7.7	3.9	5.4	36.3	11.9	31.3
	標準偏差	4.6	5.2	2.3	5.5	51.2	22.4	18.4
	歪 度	3.43	1.76	-0.54	3.72	1.15	10.08	0.71
	尖 度	2.14	1.49	0.31	1.72	1.50	3.19	0.91
	最小値	(-0.1)	2.0	0.3	(-0.7)	16.1	3.7	7.4
COD(Cr)F (O ₂ ㎎/L)	n	20	22	21	22	22	21	19
	平 均	3.7	18.7	8.2	12.1	7.3	10.3	7.6
	中央値	3.6	14.3	7.2	10.9	6.4	9.7	7.3
	標準偏差	1.5	11.1	3.1	4.9	3.2	4.0	2.3
	歪 度	0.89	1.18	-0.82	1.02	0.12	0.65	-0.71
	尖 度	0.60	1.35	0.45	0.96	0.93	0.95	0.30
	最小値	1.0	5.6	4.0	3.9	3.3	3.5	3.9
SiO ₂ (比 色)	n	22	23	22	23	23	21	20
	平 均	20.9	20.2	13.2	18.2	16.3	15.6	11.3
	標準偏差	3.7	5.7	3.0	4.3	3.0	5.4	2.0
	歪 度	-0.41	0.67	-0.83	-0.53	-0.92	-0.38	1.06
	尖 度	-0.35	-0.80	-0.31	-0.14	-0.33	-0.52	0.97
NH ₄ ⁺ -N	n	22	23	22	23	23	21	20
	平 均	0.05	0.32	0.17	0.16	0.16	0.39	0.18
	標準偏差	0.04	0.23	0.11	0.11	0.18	0.29	0.16
	歪 度	0.30	0.00	-1.07	0.52	5.68	2.94	0.25
	尖 度	1.01	1.01	0.45	1.00	2.37	1.55	1.14
NO ₃ ⁻ -N	n	22	23	22	23	23	21	20
	平 均	0.29	0.36	0.20	0.33	0.41	0.41	0.61
	標準偏差	0.09	0.17	0.10	0.16	0.23	0.22	0.29
	歪 度	0.41	6.00	3.84	2.89	4.01	0.70	-0.39
	尖 度	0.03	2.46	1.93	1.73	2.02	1.36	0.85

はないが、NO₃⁻-NはSS型に近く自然流出型に近いと考えられた。この種の統計値によっても汚濁源の状況はある程度把握できるようである。ここで水質基準項目の一つであるBODの発生源について、同一説明要因

(発生源の異なると思われる代表成分)で、問題は残るが流出量をベースに重回帰分析によって検討した。表-2にその結果の一例を示す。有機汚濁の著しい納内橋では、COD(Cr)SSや NH_4^+-N の寄与が高く人間生活と関連しており、豊橋では NO_3^--N や SiO_2 の寄与が高く、発生源のかかなりの割合が自然状態にあるものと考えられる。その他の地点では、自然汚濁に特徴的な NO_3^--N (St.1、St.81)や4.3Bx(St.41、St.81)がよくその挙動を説明している。4.3Bxの寄与は、土地利用を考えると田畑・水田からの流出の割合が高いと考えられる。以上のように、石狩川流域内においても各水質成分濃度の変動特性は、成分独自のパターンのなかで、それぞれの地点の特性を反映していることが認められた。

5 水質成分の流出機構

これまでの各成分の特性を基本に、主に流出量の変動から流出機構について考察する。

5-1 流出パターンによる分類

流出パターンは、流量と流出量の関係によって定まる。図-8に、これまでに区分した流出パターン

とその特徴を示した。各成分についての実例は文献1)を参照されたい。表-3には流量と流出量の関係の一例を示しておいた。しかし流出パターンだけでは水質予測が可能となっても、汚濁制御に対応するには不十分である。そこで流出パターンを、流量と流出係数(流出量/流域面積)との関係によって整理した。図-9に、SS、COD(Cr)SS、COD(Cr)F、BOD、 SiO_2 (比色)、無機態窒素について、両者の関係を示した。 SiO_2 は、奈井江大橋(St.6)を除いて両成分の比率は一定で流出解析の基本成分として利用できよう。奈井江大橋については、他と異なった勾配で、地域の特性よりも流域面積の資料に問題があると思われる。懸濁成分については、SSと有機汚濁成分COD(Cr)SSではかなり異なった傾向を示した。流量に対する流出係数の比がSSについては豊橋(St.51)で高いものの、全体としては同じようなパターンであるが、COD(Cr)SSでは豊橋で特に高く特異的である。このことは流出してくる地表

貯留物質として土砂等は豊富に存在するが、有機成分については地域状況に著しく支配されることを意味しており注意を要するところである。

BODとCOD(Cr)Fは、

表-2 回帰係数(流出量基準)

◇単位 kg/s 、 $^* \text{g/s}$ 、 $^{**} \text{eq/s}$

説明変数	納内橋 St. 3 (n = 20)		雨竜橋 St. 41 (n = 17)		豊橋 St. 51 (n = 19)	
	回帰係数	標準回帰係数	回帰係数	標準回帰係数	回帰係数	標準回帰係数
COD(Cr)F	-0.080	-0.338	0.084	0.454	-0.012	-0.061
COD(Cr)ss	0.425	0.812	0.023	0.093	-0.005	-0.360
SS	0.253	0.388	0.008	0.665	0.001	0.175
NH ₄ ⁺ -N	-0.418	-0.038	-0.385	-0.256	-0.262	-0.072
NO ₃ ⁻ -N	0.292	0.639	-0.238	-0.044	1.691	0.607
CL	-14.872	-0.521	-4.441	-0.778	0.092	0.225
4.3 Bx*	0.206	0.404	0.382	1.308	-1.788	-0.336
SiO ₂ (比色)	6.585	0.436	-2.585	-0.618	0.243	0.998
Lignin	-0.007	-0.208	0.236	1.219	0.544	0.241
(定数項)	-1.52		-2.438		-1.807	
重相関係数: 0.95 F 値: 9.95		重相関係数: 0.82 F 値: 1.55		重相関係数: 0.72 F 値: 1.09		

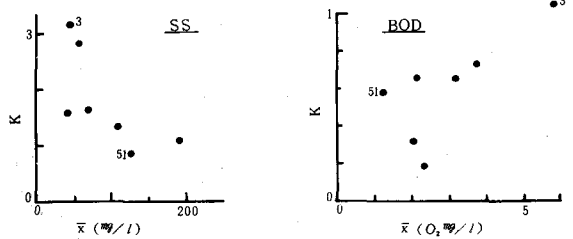


図-7 尖度と平均値の関係

型	流出パターン	代表成分	特徴
I		SS CODss	$L = KQ^a$ ($a > 1$) (高流量時の顕著な増大) 増大率に流しや経路長により変動する。
II		SiO_2	$L = KQ$ 移動量が、流量を増大させる水文因子により比例的に増大する。 (湖沼・湖沼・降雨増水時)
III		BOD COD(Cr)F CL	流出量が一定値に漸近する。 貯留量や、流出速度に依存するもの。
IV		無機態窒素	流出量が一定値に達した後、著しく減少する。 供給量・貯留量に大きく依存する。
V		リチウム	流出量が一定である。 特定流出源から一定の供給がある。

図-8 流出パターンの分類

表-3 流量と各成分流出量の関係

水質成分	n	回帰式(流出量: Q , $Q/\bar{Q}$)	相関係数	TとQの関係	CとQの関係
豊橋 St.1	18	$\log T = 1.02 \log Q - 2.27$	0.92	$T = 0.017 Q^{0.90}$	$C = 0.0017 Q^{0.90}$
	18	$\log T = 1.07 \log Q - 2.57$	0.95	$T = 0.027 Q^{0.94}$	$C = 0.0027 Q^{0.94}$
	18	$\log T = 1.28 \log Q - 2.96$	0.72	$T = 0.0011 Q^{1.28}$	$C = 0.0011 Q^{1.28}$
	20	$\log T = 1.85 \log Q - 3.07$	0.85	$T = 0.0009 Q^{1.85}$	$C = 0.0009 Q^{1.85}$
納内橋 St.3	20	$\log T = 0.37 \log Q - 0.39$	0.79	$T = 0.041 Q^{0.37}$	$C = 0.041 Q^{0.37}$
	22	$\log T = 0.38 \log Q - 0.52$	0.82	$T = 0.30 Q^{0.38}$	$C = 0.30 Q^{0.38}$
	22	$\log T = 1.16 \log Q - 2.43$	0.83	$T = 0.0037 Q^{1.16}$	$C = 0.0037 Q^{1.16}$
	23	$\log T = 1.85 \log Q - 3.25$	0.89	$T = 0.0006 Q^{1.85}$	$C = 0.0006 Q^{1.85}$
雨竜橋 St.41	22	$\log T = 0.98 \log Q - 2.61$	0.93	$T = 0.0025 Q^{0.98}$	$C = 0.0025 Q^{0.98}$
	21	$\log T = 0.72 \log Q - 1.65$	0.89	$T = 0.050 Q^{0.72}$	$C = 0.052 Q^{0.72}$
	21	$\log T = 1.18 \log Q - 2.56$	0.72	$T = 0.0022 Q^{1.18}$	$C = 0.0022 Q^{1.18}$
	22	$\log T = 1.59 \log Q - 2.46$	0.89	$T = 0.0035 Q^{1.59}$	$C = 0.0035 Q^{1.59}$
豊橋 St.51	22	$\log T = 0.88 \log Q - 2.44$	0.92	$T = 0.0096 Q^{0.88}$	$C = 0.0096 Q^{0.88}$
	21	$\log T = 0.88 \log Q - 1.96$	0.83	$T = 0.011 Q^{0.88}$	$C = 0.011 Q^{0.88}$
	21	$\log T = 0.68 \log Q - 0.74$	0.56	$T = 0.18 Q^{0.68}$	$C = 0.18 Q^{0.68}$
	22	$\log T = 1.45 \log Q - 1.82$	0.86	$T = 0.015 Q^{1.45}$	$C = 0.015 Q^{1.45}$
奈井江大橋 St.6	21	$\log T = 0.87 \log Q - 2.19$	0.94	$T = 0.0065 Q^{0.87}$	$C = 0.0065 Q^{0.87}$
	21	$\log T = 0.72 \log Q - 1.32$	0.93	$T = 0.048 Q^{0.72}$	$C = 0.048 Q^{0.72}$
	21	$\log T = 1.28 \log Q - 2.62$	0.85	$T = 0.0034 Q^{1.28}$	$C = 0.0034 Q^{1.28}$
	21	$\log T = 1.88 \log Q - 2.77$	0.97	$T = 0.0017 Q^{1.88}$	$C = 0.0017 Q^{1.88}$

ほぼ同様な流出傾向で、濃度の高い納内橋では流出係数が高く特定汚濁源のパターンに近いが、その他の地点は流量比例型で自然汚濁型のパターンを示す。4でBODについての汚濁源の相異について述べたが、流出する能力は大差ないものと考えられる。またBODについては、発生負荷量に対する流出量の比(流達率)を示したが、その変動が大きく、人為汚濁が優先する地域についても、いかに発生負荷量の変動を解析するかが今後の大きな課題である。COD(Cr)Fでは、BODより地点間の差が少なく、生物難分解性物質の地表面からの溶出が極めて容易に行なわれていることに気づく。無機態窒素については、流出係数が著しく変動するが、NO₃-NはCOD(Cr)Fのパターンに近く、自然流出的な特徴をもつ。流出係数と流量による流出パターンは、各成分、各地点の内容をより詳細に説明できることがわかったが、今後はさらに汚濁源における汚濁物質発生機構とこれらの特性を数量的に結びつける必要がある。自然汚濁物質については、流出係数/流量を用いることによって、水質予測はかなり容易になるであろう。

5-2 降雨・融雪増水時の流出

降雨・融雪増水時の水質成分の挙動は、平水時に比較し特異な流出を示す場合が多く、その流出特性の一般性や特異性を検討するのに都合がよい。昭和50年8月洪水における納内橋、奈井江大橋における流量と流出量の関係を表-4に、濃度との関係を図-10に示した。懸濁成分流出量は、流量に対し高次関数的な関係が認められ、濃度は流量比例型といってよい。増水初期には、懸濁性物質濃度の増加がみられ、大河川についても初期の洗い出し効果がみられる。豊橋のように、地表貯留量の豊富な点は、流量に対する濃度が著しく高く、初期の洗い出し効果が続くものと考えられる。BOD、COD(Cr)F、無機態窒素等の成分は、増水時においても一定濃度で流出し、常にある程度の供給能力のあることが認められる。SiO₂は、融雪期同様に、増水ピーク時付近で著しく濃度が低下し、洪水時の表面流出卓越の状況が認められた。融雪期における水質成分濃度の経時変化は既に報告したのでここでは省く。表-5には、年間総流出量(昭46)、融雪時・洪水時の流出量を比較して示した。対象地点は資料の整った奈井江大橋(St.6)とした。融雪期(約90日)に総流出量(昭46)の約50%以上、SSについては80%流出するが、昭和50年の洪水時は約5日で、SSについては総流出量(昭46)の約2倍、COD(Cr)SSでは同程度と大量の流

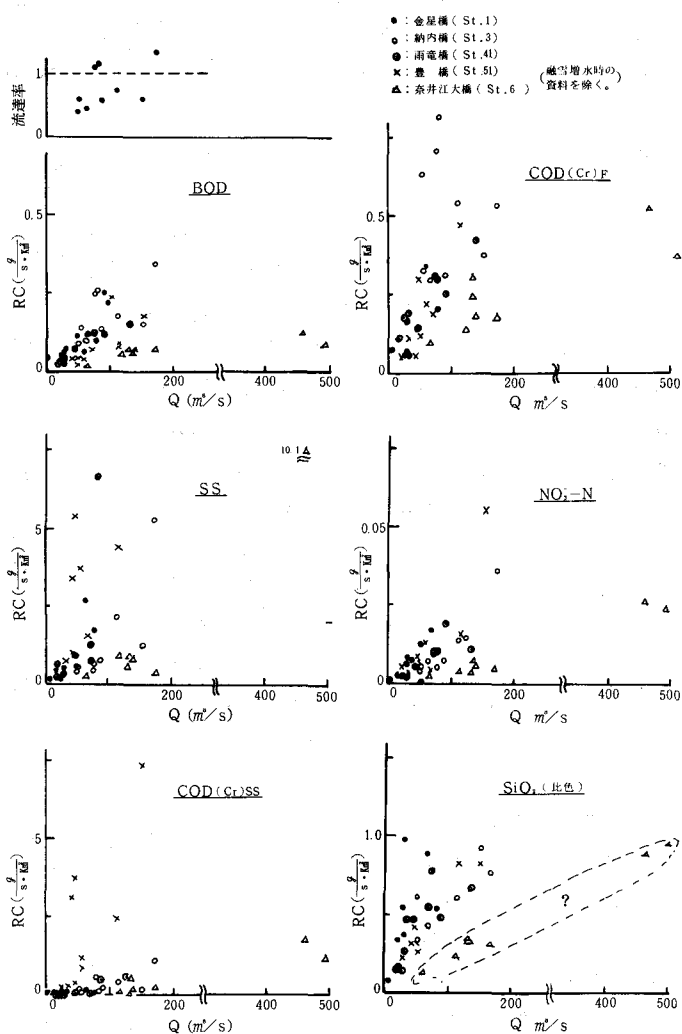


図-9 流量と流出係数(RC)の関係

出が認められる。流量と比べてみると、マクロ的にも懸濁性物質は供給量無制限型、COD(Cr)F、無機態窒素は流量濃度対応型といえる。環境基準項目であるBODは、洪水時の流出量が融雪時に比較してかなり多く、単位面積負荷としても123 Kg/日Km²に達し、降雨等による短期間の増水に対しては、供給量の豊富な自然流出汚濁物質と考えられる。

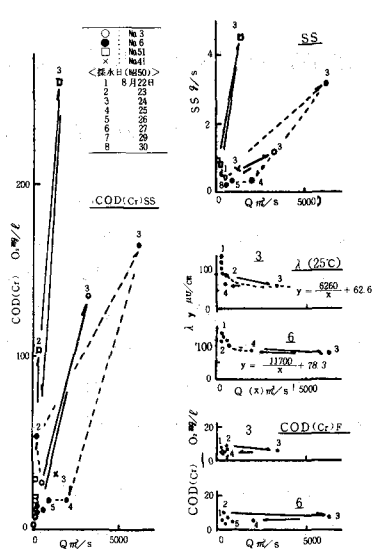


図-10 流量と各成分濃度の関係 (昭和50年8月洪水)

表-4 流量と流出量の関係 (昭和50年8月洪水)

成分	対象	流出量 (T)	
		3	6
SS	洪水時	0.175Q ^{2.18} (0.97)	0.673Q ^{1.91} (0.95)
	融雪時	16.8Q ^{1.09} (0.77)	9.25Q ^{1.42} (0.80)
COD(Cr)SS	洪水時	0.0168Q ^{2.13} (0.99)	0.734Q ^{1.62} (0.92)
	融雪時	12.5Q ^{0.842} (0.51)	10.0Q ^{1.00} (0.88)
COD(Cr)F	洪水時	4.78Q ^{1.04} (0.98)	5.92Q ^{1.04} (0.98)
	融雪時	527Q ^{0.238} (0.30)	26.0Q ^{0.840} (0.83)
BOD	洪水時	6.17Q ^{0.935} (0.95)	1.77Q ^{1.25} (0.98)
	融雪時	137Q ^{0.275} (0.35)	4.25Q ^{0.820} (0.88)
TIN	洪水時	0.600Q ^{1.01} (0.99)	0.566Q ^{1.01} (0.94)
	融雪時	3.92Q ^{1.40} (0.40)	0.100Q ^{1.40} (0.86)

洪水時: S50、8月(7試料)、融雪時: S46融雪(10試料)
安定時: S45~S46(13試料)、*9試料

表-5 年間総流出量との比較 (奈井江大橋、St.6)

	Q	SS	BOD	COD(Cr)SS	COD(Cr)F	TIN
(1) 年間総流出量 (S46.365日)	8.9 × 10 ⁸	10.5 × 10 ⁸	2.5 × 10 ⁸	10.0 × 10 ⁸	9.2 × 10 ⁸	7.4 × 10 ⁸
(2) 融雪期 (S45.90日)	4.8 × 10 ⁸ (0.53)	8.4 × 10 ⁸ (0.80)	1.3 × 10 ⁸ (0.52)	6.4 × 10 ⁸ (0.64)	3.8 × 10 ⁸ (0.42)	3.5 × 10 ⁸ (0.47)
(3) 洪水期 (S50.22~27, 4.9日)	8.6 × 10 ⁸ (0.10)	1.9 × 10 ⁸ (1.79)	5.5 × 10 ⁸ (0.22)	9.8 × 10 ⁸ (0.98)	6.4 × 10 ⁸ (0.07)	3.3 × 10 ⁸ (0.07)

6 結 論

本報告では、石狩川の水質成分特に汚濁物質の挙動を多面的にとらえ、その特徴を整理し、さらに水質管理に対し基礎となる流出機構の解析に重点を置いた。以下に結論を要約する。

- 1) 石狩川の水質について
 - (1) 経年的な水質変化から、排水規制によって近年の石狩川の汚濁が自然流出型の性格を持つようになってきた。しかし旭川市下流部や炭鉱地帯では、まだ人為汚濁負荷の割合が依然として高く水質改善が必要である。
 - (2) 降雨・融雪増水時には、年間総流出量の相当部分が流出する。特に懸濁成分の流出量が多く、昭和50年8月洪水では約5日間で年間総流出量(平年)の1~2倍が流出した。
 - (3) 石狩川の上乗せ排水基準は、その設定手法に流出率の変動を見込んでおらず、利水の面から水質を予測するには不十分である。
- 2) 汚濁物質の流出機構について
 - (1) 統計的な手法で各水質成分の流出特性をある程度分析可能であり、流出機構を解く手懸りとなる。
 - (2) 流出パターンは、流量と流出係数の関係によってより詳細に分解可能である。
 - (3) 降雨・融雪増水時の挙動の解明は、流出機構を解析するのに有効な手段であり、特に人為・自然流出汚濁物質の区分に役立つ。
 - (4) 汚濁物質流出の特徴を以下にまとめた。人為汚濁成分は発生源の特性に支配されることは当然であり、自然流出汚濁成分について、流出量を基本としてまとめた。

区 分	代表成分	流出パターン(n)	地域性	区 分	代表成分	流出パターン	地域性
懸濁物質	無機 SS	(I) 高次流出型 (1~2)	大	栄 養 塩	NH ₄ ⁺ -N	(IV) 貯留量制限型	大
	有機 CODSS	(II) " (1~2)	中~大		NO ₃ ⁻ -N	(III) 流量比例型	中
溶存有機物質	CODF	(II)~(III) 流量比例型 (≒1)	小	無 機 物 質	SiO ₂	(II) " (n=1)	小
生物易分解物質	BOD	(II)~(III) " (≒1)	中		Cl ⁻	(III) "	小~中