

石狩川流域における水質成分負荷量の流出特性と推定について

Characteristics of Water Quality Loads and Its Estimation in the Ishikari River Watershed

北海道開発局 開発土木研究所 環境研究室 ○正 員 太田陽子 (Yoko Ota)

北海道開発局 開発土木研究所 環境研究室 正 員 中津川誠 (Makoto Nakatsugawa)

1. はじめに

河川流域から流出する様々な水質成分は、河川、湖沼、海域の水環境を支配する要因である。また、最近は特定汚染源から流出する水質成分負荷量は減少傾向にあるが、農地や畜産排水のような面源汚染源からの水質成分負荷量は相対的に増加傾向にあると考えられる¹⁾。したがって、健全な水循環のあり方を考え、水質の保全と改善を図るには、面源負荷を含む流域から流出する水質成分負荷量の総量を把握することが必要となる。

そこで、本研究では通常実施されている水質定期観測データを用いて、石狩川を対象に、流量からの水質負荷量推定式($L-Q$ 式)を作成し、総負荷量の推定を行い、流域別の負荷量を整理した。その結果、低水時に行われている水質定期観測の性格上、作成した $L-Q$ 式には融雪期や夏期の出水等の高水時の場合の水質成分負荷量が反映されず、推定した総負荷量は過小評価されることがわかった。この点を改善するために高水時における水質観測データを用い、さらに、成分分離手法を用いて流量を低水流量と高水流量に分離し、各々負荷量を算出することによって総負荷量推定値の精度向上を図った。

2. 水質定期観測データを用いた総負荷量の推定

2.1 推定方法



図1 石狩川流域の概要

図1に石狩川流域の概要を示す。本研究では、石狩川の本川7地点と各支川（牛朱別川、忠別川、美瑛川、雨竜川、空知川、幾春別川、夕張川、千歳川、豊平川、当別川）の代表地点10地点の合計17地点の総負荷量の推定を行った。また、対象項目は定期測定項目の中から、懸濁成分の指標としてのSS、有機汚濁成分の指標としてのBOD、COD、富栄養化成分の指標としてのT-N、T-P

とした。各地点、各項目について、 X 軸に単位面積当りの流量、 Y 軸に単位面積当りの負荷量をプロットして、指数関数型の相関式を立てた。これを $L-Q$ 式（負荷量-流量関係式）という。 $L-Q$ 式に流量を代入して、積算した値を一年間当りの総負荷量とした。

2.2 推定結果と考察

上記の方法により、17地点、5項目に関して総負荷量を推定した結果を表1に示し、各項目上位3つの値は白抜きで表した。また、5地点の土地利用を図2に示す。この結果をふまえて、本川におけるBODの上流から下流にわたる推移について、図3に表した。

表1 水質定期観測データによる推定年間総負荷量 (1959年～2000年)

河川	地点	流域面積 (km ²)	BOD	SS	T-N	T-P	COD
			(t/km ² /y)				
石狩川	永山橋	1423	0.81	19.88	0.63	0.03	4.11
牛朱別川	牛朱別橋	481	4.08	18.26	1.47	0.08	10.27
忠別川	東神楽橋	263	1.02	22.30	0.50	0.03	3.25
美瑛川	美瑛橋	411	0.16	8.48	—	—	8.48
石狩川	伊納大橋	3378	3.78	49.05	1.25	0.07	10.53
石狩川	納内橋	3558	2.37	51.71	1.37	0.09	7.78
雨竜川	雨竜橋	1661	0.95	123.77	0.98	0.11	9.88
空知川	赤平橋	2531	1.25	77.55	1.08	0.07	9.45
石狩川	奈井江大橋	8943	1.63	97.98	1.20	0.11	7.91
石狩川	岩見沢大橋	9405	1.41	118.87	1.17	0.12	7.87
幾春別川	西川向	325	0.70	134.02	0.88	0.10	8.31
夕張川	江別大橋	1430	0.94	104.35	0.76	0.09	6.24
千歳川	新江別橋	1224	1.81	45.21	1.63	0.14	6.71
石狩川	石狩大橋	12697	2.14	169.30	1.32	0.13	12.58
豊平川	雁来	651	0.98	28.87	0.45	0.02	4.30
当別川	19線橋	348	0.48	40.43	0.42	0.06	4.35
石狩川	石狩河口橋	14341	1.51	65.37	1.40	0.10	7.64

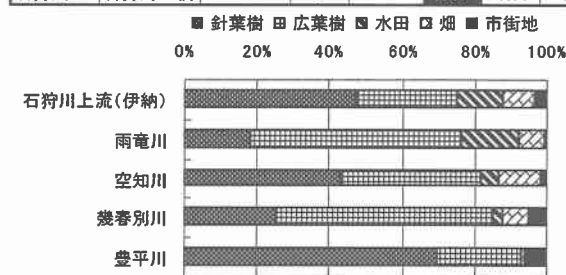


図2 各地点の土地利用

SSに関して、表1の単位面積当りの負荷量では、雨竜川、幾春別川および夕張川で特に大きい。ここで図2で示される土地利用との関係に注目すると、共に広葉樹の割合が大きいことがわかる。しかしながら、このような発生負荷量と土地利用との関係の他に、流下過程で、希釈・拡散・沈殿・吸着等の物理的作用や酸化反応等の化学的作用あるいは微生物による生物分解等の影響が考

えられる。図3に示すようにBODでは、このことを反映し、総負荷量の推移は増減が繰り返されている点に特徴がある。表1の単位面積当りの負荷量では、上流部での値が高いことに特徴がある。これは、上流部にある市街地からの負荷が多く影響していると考えられる。このほか、T-NやT-Pのような富栄養化成分は千歳川流域において、単位面積当りの負荷量が大きいくことも表1からわかる。

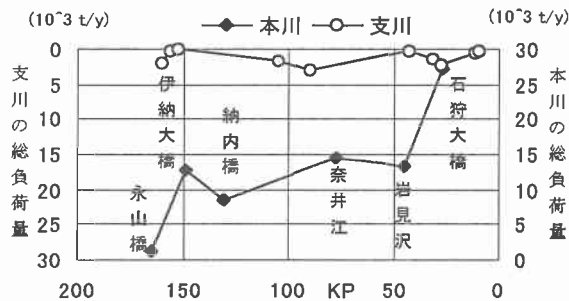


図3 上流から下流におけるBOD総負荷量の推移

2. 3 水質定期観測データからの総負荷量推定についての問題点

これまでの推定方法に用いた水質定期観測データは、河川砂防技術基準²⁾によると、その採水の日時が「降雨中および降雨後の増水期を避け、原則として流量の比較的安定している低水流量時を選んで行うものとする。」とされているため、低水流量時に行うのが一般的である。このため、高水流量時のデータが反映されないという問題点がある。図4と図5に、その例を示す。共に石狩大橋のCODの流量と負荷量の関係を表しているが、図4が水質定期観測のデータ、図5が自動監視装置のデータを整理したものである。これらから、流量と負荷量の関係において高水時と低水時で異なる傾向を示すことが読みとれる。

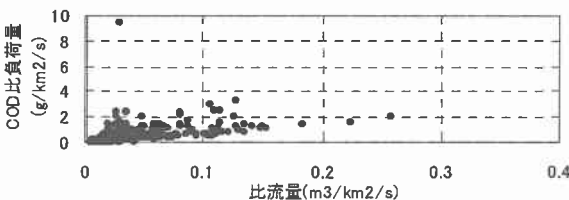


図4 比流量と比負荷量の関係 (石狩大橋、水質定期測定データ 1959年～2000年)

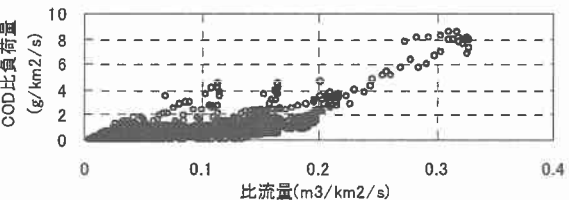


図5 比流量と比負荷量の関係 (石狩大橋、自動監視装置データ 1994年)

3. 高水時のデータを用いた総負荷量の推定

3. 1 概要

上記の問題点を改善するために、高水時のデータを用いて総負荷量の推定を試みた。石狩川開発建設部³⁾では、平成9年から平成11年にかけて融雪出水時及び夏期出水時に水質観測を行っている。そのデータから、SS、T-N、T-Pと流量の関係について、X軸に流量を、Y軸には負荷量をプロットする。次に、融雪出水時と夏期出水時のデータ毎にL-Q式を作成した。その結果を表2に示す。融雪出水時のL-Q式には1月～6月と12月の流量データを用いて負荷量を算出し、夏期出水時のL-Q式には7月～11月の流量データを用いて同様に計算を行い、合わせた値を年間総負荷量としている。結果については、第5章に示す。(図8～図10)

表2 高水時のデータから作成したL-Q式 (1997年～1999年)

地点	時期	項目	L-Q式	相関係数R ²
奈井江大橋	融雪期	SS	$L=4E-07Q^{2.8024}$	0.9097
		T-N	$L=0.0009Q^{1.0161}$	0.8224
		T-P	$L=8E-08Q^{2.0753}$	0.8098
	夏水期	SS	$L=6E-05Q^{2.2747}$	0.8467
		T-N	$L=0.0005Q^{1.1978}$	0.7554
		T-P	$L=5E-07Q^{1.9840}$	0.8331
石狩大橋	融雪期	SS	$L=2E-05Q^{2.2381}$	0.8845
		T-N	$L=0.0021Q^{0.8991}$	0.7193
		T-P	$L=3E-06Q^{1.5500}$	0.7518
	夏水期	SS	$L=0.0001Q^{2.0938}$	0.7794
		T-N	$L=0.232Q^{0.3819}$	0.0959
		T-P	$L=2E-05Q^{1.3908}$	0.6691

L:負荷量(kg/s)、Q:流量(m³/s)

4. 流量の成分分離に基づく総負荷量の推定

4. 1 概要

河川流域から流出する水質成分負荷量は、流量変化によって大きく変動する。すなわち、水質成分負荷の発生や排出は低水時と、雨天時や融雪時の高水時とでは大きく異なる。また、地下水流出のような遅い流出や、表面・中間流出のような早い流出といった流出形態の違いからも供給される負荷量の由来に違いが生じると考えられる。したがって、総負荷量を的確に推定するには、低水時と高水時を区別し、合わせた量を総負荷量とする方法が提案できる。これによって、L-Q式も、各々に適用できる式を立てる必要がある。

4. 2 流量の成分分離

流出現象は、降雨、融雪等の浸透や貯留等の作用により、早い成分(表面・中間流出)と遅い成分(地下水流出)に分離することができる。ここでは流出成分の分離方法として数値フィルターを利用する。日野ら⁴⁾によると、各成分は次のように表せる。

$$\begin{cases} q_s(t) = q(t) - q_g(t) & (q_s(t) \geq 0) \\ q_g(t) = \alpha \sum w(\tau) q(t - \tau) \end{cases}$$
$$w(\tau) = \begin{cases} c_0 \exp(-c_1 \tau / 2) \sinh(\sqrt{c_1^2 / 4 - c_0} \tau / \sqrt{c_1^2 / 4 - c_0}) & (\tau \geq 0) \\ 0 & (\tau < 0) \end{cases}$$

ここで、 q_s は表面・中間流出流量(m³/s)、 q_g は地下水流出流量(m³/s)、 q は実測流量(m³/s)、 α は q_s を負にしないための重み係数(≤1)である。また、係数 c_0 及び c_1 は次の

ように示される。

$$\begin{cases} c_0 = (\delta / T_c)^2 \\ c_1 = \delta^2 / T_c \end{cases}$$

ここで、 δ は減衰係数、 T_c は時定数(day)である。 δ は非振動条件を勘案して2.1とした。また、時定数 T_c はハイドログラフの逓減部の解析等から求める。各地点の時定数は、1994年から1999年の日流量データの逓減部から各年について求め、平均した値を使用した。この結果、奈井江大橋で $T_c=12.91\text{days}$ 、石狩大橋で $T_c=12.54\text{days}$ という値が得られている。数値フィルターによって分離された結果は図6通りである。なお、図6に用いたデータは1994年の日流量データである。

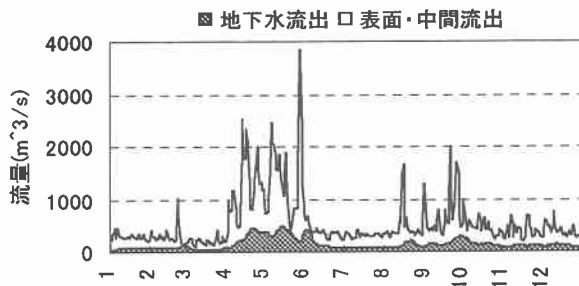


図6 数値フィルターによる流量の成分分離(石狩大橋、1994年)

4.3 L-Q式の作成

各地点について、平成9年から平成11年にかけての水質定期観測データに基づき低水時負荷量の推定式(低水時L-Q式)と第3章に示した石狩川開発建設部のデータに基づき高水時負荷量の推定式(高水時L-Q式)を求める。図7は奈井江大橋における単位面積当たりの流量と負荷量の関係である。その他のL-Q式は表3に示す。

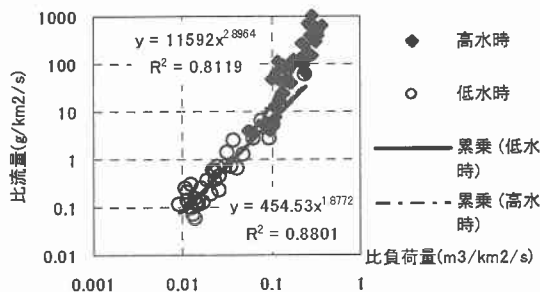


図7 比流量と比負荷量の関係(奈井江大橋、SS、1997~1999年)

表3 低水時と高水時のL-Q式(1997~1999年)

地点	項目	流量	L-Q式	相関係数 R ²
奈井江大橋	T-N	低水時	$L/A=0.5847(Q/A)^{0.9044}$	0.8872
		高水時	$L/A=3.2096(Q/A)^{1.3863}$	0.6875
	T-P	低水時	$L/A=0.1581(Q/A)^{1.3154}$	0.8891
		高水時	$L/A=4.7338(Q/A)^{2.3883}$	0.7631
石狩大橋	SS	低水時	$L/A=1290.28(Q/A)^{2.1603}$	0.926
		高水時	$L/A=4103.5(Q/A)^{2.4011}$	0.8082
	T-N	低水時	$L/A=0.5875(Q/A)^{0.8782}$	0.8716
		高水時	$L/A=1.1931(Q/A)^{0.8876}$	0.3598
	T-P	低水時	$L/A=0.2402(Q/A)^{1.3945}$	0.8814
		高水時	$L/A=1.2128(Q/A)^{1.7218}$	0.6834

4.4 総負荷量の算出

3.2、3.3でそれぞれ求めた流量とL-Q式について、低水時L-Q式には地下水流出成分を代入して、365日分を積算した値を低水時の総負荷量とし、高水時L-Q式に表面・中間流出成分を代入して、同様に高水時の総負荷量とする。そして、両方の値を合算した値を年間総負荷量とする。

5. 結果と考察

5.1 各方法による推定総負荷量

これまで、説明してきた各方法によって推定された総負荷量をSS、T-N、T-Pの3項目について図8~図10に示す。ここで各方法について整理する。

- ①水質定期観測データだけからL-Q式を作成し、流量を代入して総負荷量を推定する(第2章参照)
- ②融雪期と夏期の出水時のみのデータから、各出水時のL-Q式を作成し、1月~6月と12月の流量データは融雪期のL-Q式に、7月~11月の流量データは夏期の出水時のL-Q式に代入して、両者を合算した値を総負荷量とする。(第3章参照)
- ③平成9年から平成11年の水質定期観測データと出水時のデータから低水時と高水時のL-Q式を作成し、流量についても地下水流出と表面・中間流出に分離する。そして各々の流量とL-Q式から負荷量を算出し、合算した値を総負荷量とする。(第4章参照)

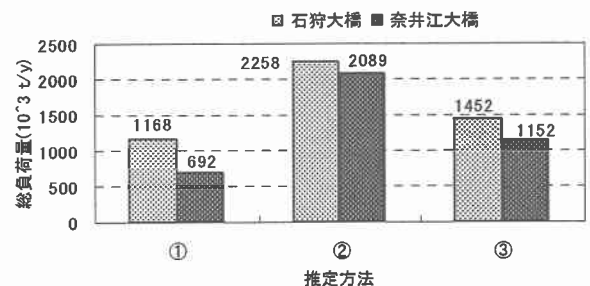


図8 年間SS総負荷量の比較(1994年)

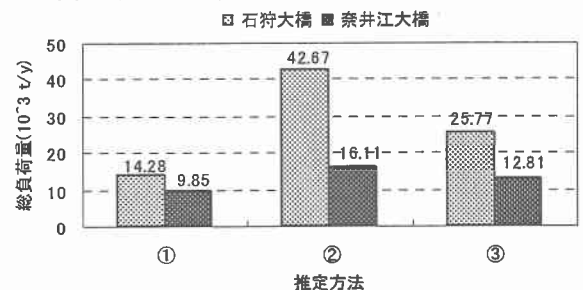


図9 年間T-N総負荷量の比較(1994年)

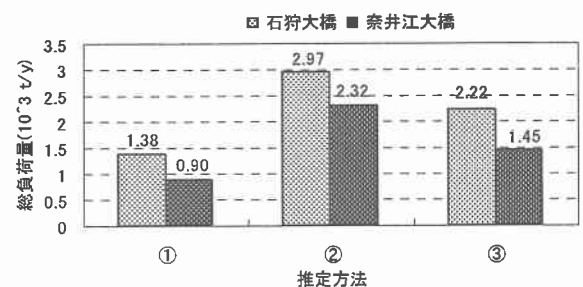


図10 年間T-P総負荷量の比較(1994年)

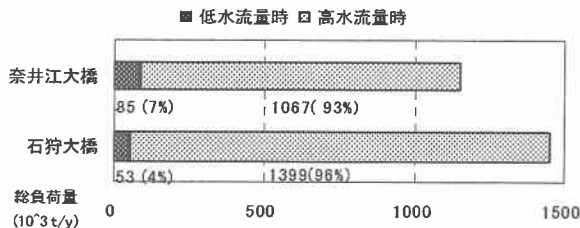


図11 推定方法③における
総負荷量の割合(SS、1994年)

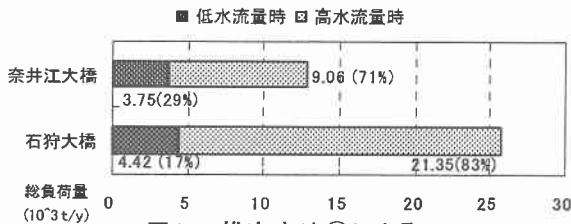


図12 推定方法③による
総負荷量の割合(T-N、1994年)

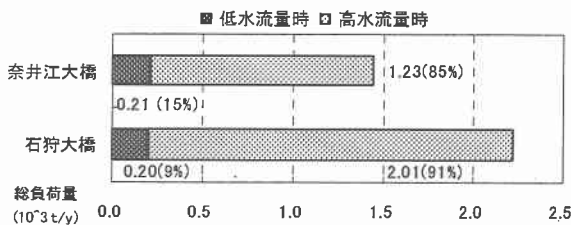


図13 推定方法③による
総負荷量の割合(T-P、1994年)

以上の結果より、各方法による推定総負荷量は、おおむね②石狩川開発建設部の高水時観測データを用いた推定方法、③本研究における推定方法、①水質定期観測データのみによる推定方法の順に値が大きいくことがわかった。また、総負荷量の低水時と高水時の占める割合は、高水時の影響が大きいことがわかった。①の方法では、データが低水時におけるデータのみであることから、総負荷量を過小に推定している傾向があり、②の推定方法では、使用したデータが高水時のデータのみであることから、総負荷量を過大に推定しているとも考えられる。しかしながら、各方法によって推定した総負荷量の相对比较のみでは不十分であるので、次節では各方法の精度を比較する。

5. 2 各推定方法の精度について

第2章～第4章で説明した3推定方法について、実測データを用いて、その精度を平均自乗誤差 RMSE 及び相対誤差 RE によって検証する。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (L_{est} - L_{obs})^2}$$

$$RE = \frac{1}{N} \sum \frac{|L_{est} - L_{obs}|}{L_{obs}}$$

ここで、N:データ数

L_{est} : 実測負荷量(g/km²/s)

L_{obs} : 推定負荷量(g/km²/s)

表4より、推定方法③の誤差が最も小さいことから、本研究で提案した方法は、よりの確に総負荷量を推定していると考えられる。

表 4 平均自乗誤差と相対誤差

		奈井江大橋		石狩大橋	
		平均自乗誤差	相対誤差	平均自乗誤差	相対誤差
SS	①	183.24	2.74	62.17	1.00
	②	139.28	2.07	49.78	0.59
	③	109.02	1.57	48.49	0.57
T-N	①	0.25	0.98	0.17	0.91
	②	0.21	0.57	0.15	0.65
	③	0.15	0.39	0.13	0.56
T-P	①	0.14	2.83	0.05	1.42
	②	0.11	1.42	0.04	0.75
	③	0.07	1.06	0.04	0.52

データ数 奈井江大橋:77(1997～1999 年)

石狩大橋:81(1997～1999 年)

(水質定期観測データ及び出水時観測データ)

7. おわりに

本研究では石狩川流域を対象に水質成分負荷量の流出状況を把握した。このなかで単位面積あたりの負荷量をみると、SS は雨竜川、幾春別川および夕張川で、T-N や T-P のような富栄養化成分は千歳川で大きかった。また、BOD や COD の有機汚濁成分については牛朱別川や本川上流部で全般的に高く、都市域からの排水の影響がうかがえる。このような知見に基づき、次の段階では流域の地被状態に基づく汚濁負荷発生量の推定を行ってきたい。

また、水質定期調査(低水時)データから流域からの総負荷量を推定すると全般的に過小評価することが明らかとなった。それを改善するため、高水時の水質調査結果を加味したが、その場合、低水時と高水時に流出成分を分離して負荷量を各々推定することが有効であることを示した。今後は、高水時調査の頻度を増やし、今回提案したような手法を適用することや河道部分での消長を考慮することで、フラックスとしての総負荷量の推定精度向上が図られると考える。

なお、本研究を進めるにあたり北海道開発局石狩川開発建設部で実施された調査の結果を使わせていただいた。ここに記して謝意を表す。

<参考文献>

- 1)和田安彦：ノンポイント汚染源のモデル解析、技報堂出版、1990.
- 2)建設省河川局：改訂新版建設省河川砂防技術基準(案)同解説・調査編、pp.344、1997.
- 3)(財)北海道河川防災研究センター：平成11年度第2回寒地河川学研究会「流域土砂管理計画検討会」検討会資料、pp.1-70-1-81、1999.
- 4)日野幹雄、長谷部正彦：水文流出解析、森北出版、pp.74-85、1985.