室蘭工業大学
学術資源アーカイブ
Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive

流域土地利用と負荷発生源に着目した水質成分負荷量の流出特性

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 土木学会 公開日: 2012-08-24 キーワード (Ja): キーワード (En): Non-point and point sources, water quality components load, land use, pollutant load factor 作成者: 太田, 陽子, 中津川, 誠 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/1549

室蘭工業大学
学術資源アーカイブ
Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive

流域土地利用と負荷発生源に着目した水質成分負荷量の流出特性

その他（別言語等）のタイトル	RUNOFF CHARACTERISTICS OF LOADS OF WATER QIALITY COMPONENTS BASED ON RELATIONSHIP BETWEEN LAND USE AND POLLUTANT SOURCES IN A BASIN
著者	太田　陽子，中津川　誠
雑誌名	河川技術論文集
巻	8
ページ	527-532
発行年	2002-06
URL	http://hdl.handle.net/10258/1549

河川技術論文集，第8巻，2002年6月

流域土地利用と負荷発生源に着目した水質成分負荷量の流出特性

RUNOFF CHARACTERISTICS OF LOADS OF WATER QIALITY COMPONENTS BASED ON RELATIONSHIP BETWEEN LAND USE AND POLLUTANT SOURCES IN A BASIN

太田　陽子[1]・中津川　誠[2]
Yoko OTA, Makoto NAKATSUGAWA

[1]正会員　国土交通省　北海道開発局　江別河川事務所（〒067-0074　江別市高砂町5番地）
[2]正会員 博士(工学) 独立行政法人 北海道開発土木研究所（〒062-8602　北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34）

This paper discusses the characteristics of loads of water quality components in a basin in a cold, snowy region. The total load of water quality components was estimated for the Ishikari River basin, which includes forests, farmland and urban land. The load from non-point sources was estimated by subtracting the load from point sources, which was estimated on the basis of population and industrial activities, from the total estimated loads of the basin. Because the ratio of non-point source origin load to total load is high, it is useful to evaluate the water quality based on the land use. The contribution ratio of the water quality component load from each source (i.e., each land use) was estimated for the entire basin.

Key Words: *Non-point and point sources, water quality components load, land use, pollutant load factor*

1. はじめに

河川管理は流域ごとに異なるものであり，流域特性が反映されたものが望まれている．1994年に策定された環境基本計画においても，流域単位の水循環系の現状把握と，それに基づく水管理の必要性が明記されている．したがって，対象となる流域において河川環境にとって重要な要因を抽出して，現状把握，管理，対策を行うことが重要である．その一環として，積雪寒冷地流域における水質成分負荷量の合理的な推定，および流域の土地利用との関係把握を行うことは，流域の水管理に資すると考えられる．

そこで，本研究では，図-1 に示す石狩川流域の本川，支川を対象として，水質成分負荷量の総量を推定した．この際，流出負荷量に占める割合が大きい出水時負荷も考慮し，推定精度の向上を図った．また，点源（ポイントソース）と面源（ノンポイントソース）といった水質成分負荷の由来を考慮し，点源負荷量は人口や産業活動に関連する原単位に応じて推定した．一方，推定された総負荷量から点源負荷量を差し引いた値を面源負荷量とした．以上により，この面源からの負荷量を，集水域の土地利用別（森林，畑地，水田）面積に応じて，原単位(t/km^2/year)の形で推定・整理した．

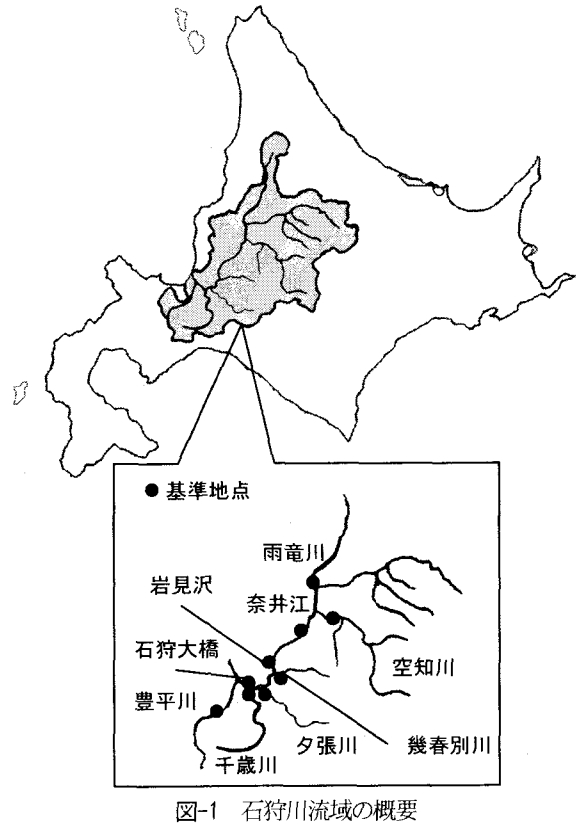

図-1　石狩川流域の概要

2. 石狩川の概要

石狩川は幹川流路延長 268km，流域面積 14,330km^{2}を有する国内でも屈指の大河川である．その流域は北海道の 18%の面積を占めている．流域内には札幌市，旭川市をはじめ 48 市町村を包含し，人口は北海道の約 50%を抱え，北海道における社会，経済，文化の中枢となっている．したがって，石狩川の治水・利水・環境機能の意義は大きい．本研究では，本川の 3 地点（奈井江大橋，岩見沢大橋，石狩大橋）と 6 支川（雨竜川，空知川，幾春別川，夕張川，千歳川，豊平川）の代表地点の計 9 地点を解析の対象とした．(図-1 参照)

3. 水質成分総負荷量の推定

(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，水質成分負荷量の発生や流出は低水時と，雨天時や融雪時の高水時とでは大きく異なる．したがって，水質成分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有効であることがこれまでの研究[1)]から明らかになっている．よって，水質成分総負荷量の推定には，以下の方法を取ることとした．

(2) *L-Q* 式(流量-負荷量関係式)の作成

各項目・各地点について，*X* 軸に単位面積当たりの流量（比流量），*Y* 軸に単位面積当たりの負荷量（比負荷量）をプロットして式(1)のような指数関数型の式を立てる．

$$L / A = a \times (Q / A)^b \qquad (1)$$

ここで，*L*: 負荷量(g/s)，*A*: 流域面積(km^2)，*Q*: 流量(m^3/s)，*a*，*b*: 定数とする．

ここで，低水時と高水時では，*L-Q* 式の傾向が大きく異なるため 2 本の *L-Q* 式（以下，低水時 *L-Q* 式，高水時 *L-Q* 式とする.）を考える．低水時 *L-Q* 式の作成には，平水時以下の流況を対象に各地点で毎月 1 回程度行われている水質定期観測のデータを，高水時 *L-Q* 式の作成には国土交通省北海道開発局石狩川開発建設部による出水時調査（平成 12 年 4 月から 11 月）で得られたデータを使用した．*L-Q* 式の一例を表-1 及び図-2 に示す．

(3) 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，流出の早い成分（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，数値フィルター法を利用する．日野ら[2)]によると，各成分は次のように表せる．

$$\begin{cases} q_s(t) = q(t) - q_g(t) & (q_s(t) \geq 0) \quad (2) \\ q_g(t) = \alpha \sum w(\tau) q(t-\tau) & \quad (3) \end{cases}$$

$$w(\tau) \begin{cases} = c_0 \exp(-c_1 \tau / 2) \sinh(\sqrt{c_1^2/4 - c_0}\,\tau / \sqrt{c_1^2/4 - c_0}) & (\tau \geq 0) \quad (4) \\ = 0 & (\tau < 0) \end{cases}$$

ここで，q_sは表面・中間流出流量(m^3/s)，q_gは地下水流出流量(m^3/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 は次のように表される．

$$\begin{cases} c_0 = (\delta / T_c)^2 & (5) \\ c_1 = \delta^2 / T_c & (6) \end{cases}$$

ここで，δは減衰係数(=2.1)，T_cは時定数(day)である．

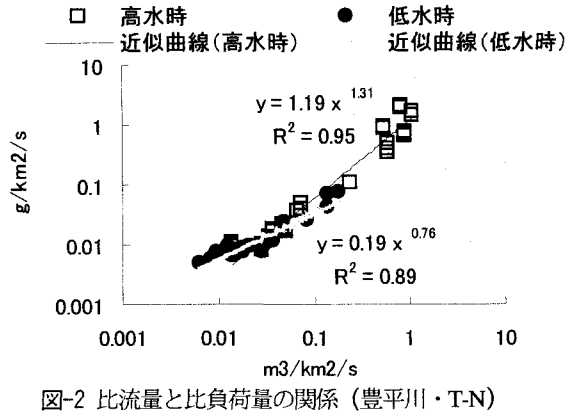

図-2 比流量と比負荷量の関係（豊平川・T-N）

表-1 *L-Q* 式の一例（雨竜橋）

$L/A = a \times (Q/A)^b$, L (g/s), A (km^2), Q (m^3/s), R(相関係数)

	高水時			低水時		
	a	*b*	R	*a*	*b*	R
SS	613.88	1.99	0.98	138.59	1.50	0.92
T-N	1.02	1.23	0.97	0.43	0.96	0.95
T-P	0.24	1.50	0.95	0.10	1.21	0.92

各基準地点の時定数を表-2 に示す．時定数は 1996 年から 2000 年の日流量データの逓減部解析により，各年について求めた値を平均化して使用した．流量の成分分離に用いたデータは，1998 年の日流量データである．数値フィルターによって流量の成分分離を行った結果の一例を図-3 に示す．

表-2 各基準地点の時定数

河川	基準地点	時定数(day)
雨竜川	雨竜橋	23.56
空知川	赤平橋	17.19
石狩川	奈井江大橋	16.42
石狩川	岩見沢大橋	15.22
幾春別川	西川向	17.19
夕張川	清幌橋	22.44
千歳川	裏の沢	32.12
石狩川	石狩大橋	15.81
豊平川	雁来	19.25

(4) 総負荷量の算出

(2), (3)で求めた2本のL-Q式（低水時L-Q式，高水時L-Q式）と2流量成分（表面・中間流出成分，地下水流出成分）について，低水時のL-Q式には地下水流出成分流量を代入して，365日分を積算した値を低水時負荷量とする．一方，高水時L-Q式に表面・中間流出成分を代入して高水時負荷量を求める．そして両方の値を合わせた値を年間総負荷量とする．以上の方法により算出した結果を図-4に示す．この結果，高水時における負荷量の割合が総負荷量の約60～80%と大きいことから，総負荷量を算出する場合には出水時の影響も考慮することが必要であり，本研究で適用した方法の有効性を示している．

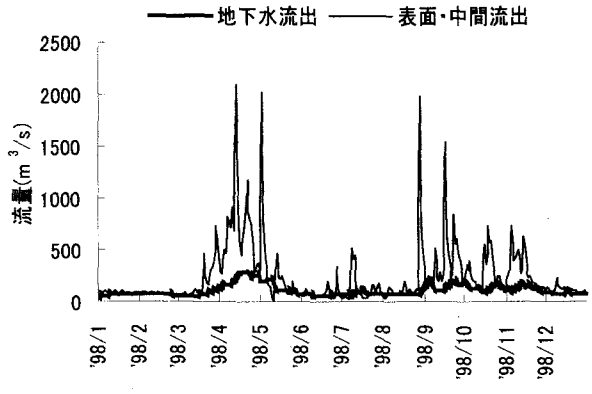

図-3 流量の成分分離（奈井江大橋）

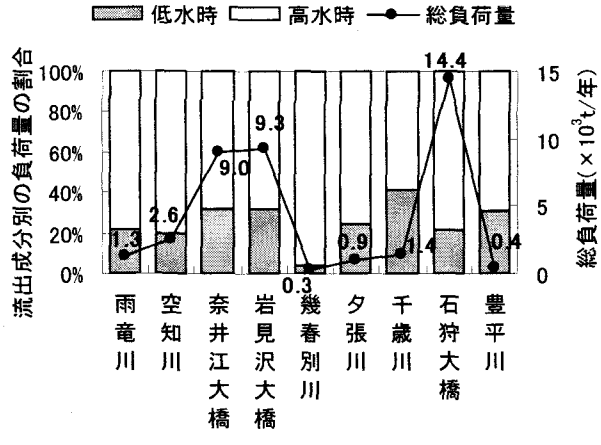

図-4 流域別の総負荷量と流出成分別の割合(T-N)
（数値は総負荷量を示す）

4．点源負荷量の推定

(1) 概要

点源負荷については，生活排水，工場排水，事業所排水による負荷量を対象とした．これらの負荷量は原単位と下水処理人口，下水未処理人口，業種別製造品出荷額，従業員数等から求めることができる．本研究では，流域別の点源負荷量を求めるために，これらのデータを流域別に整理することにした．整理にあたっては，石狩川流域ランドスケープ情報[3]と，国土数値情報の昭和62年土地利用メッシュ（L03-M62），および行政界・海岸線(N03-11A)[4]の3次メッシュデータを基盤データとして使用した．

(2) 生活排水による負荷量

生活排水は，処理方式によって負荷の流出量が大きく異なる．本研究では市町村別生活排水普及率（平成12年度末）[5]を用い，各市町村別に下水処理水による負荷量，下水未処理水による負荷量及び合併処理浄化槽水による負荷量に分けて算出した．以下に推定式を示す．

$$M_g = \beta_g \times G_s \times P_g / 1000 \quad (7)$$

$$M_m = \beta_m \times G_s \times P_m / 1000 \quad (8)$$

$$M_t = \beta_t \times G_s \times P_t / 1000 \quad (9)$$

ここで，Mは処理方法別による負荷量(kg/日)で，添字g, m, tは各々下水処理水，下水未処理水，合併処理浄化槽水を表す．βは処理方式別排出率[6]，G_sは生活排水に関わる原単位[6]で表-3，表-4のとおりである．Pは処理方式別人口（人）である．処理方式には，この他にし尿処理場，雑排水集中処理場，戸別合併処理浄化槽，し尿単独処理浄化槽，戸別雑排水処理等に分類できる．しかしながら，下水処理場によるし尿・生活雑排水の処理が中心となってきていること，合併処理浄化槽については，そのコストの問題点から戸別にまでは普及していない現状を踏まえて，上記の3タイプに分類した．なお，農業集落排水施設については，各家庭からのし尿と生活雑排水を集めて浄化し，処理水は農業用水として，汚泥は農地還元するという特性から下水処理人口に含めた．

表-3 処理方式別排出率[6]　(%)

	SS	T-N	T-P
β_g:下水処理	7	61	39
β_m:下水未処理	100	100	100
β_t:合併処理浄化槽	11	49	64

表-4 生活排水と事業所排水の原単位[6]
(g/人・日)

	SS	T-N	T-P
G_s:生活排水	34.00	8.60	1.22
G_j:事業所排水	20.00	6.30	0.71

(3) 工場排水

工場排水による負荷量は次式によって表される．

$$M_f = \sum (G_f \times F) / 1000 \quad (10)$$

ここで，M_fは工場排水による負荷量(kg/日)，G_fは業種別工場排水の原単位(g/百万円・日)[7,8]，Fは業種別製造品出荷額（百万円）である．

表-5より工場排水に関する原単位は，T-N，T-Pについては産業中分類に従い，SSについてはさらに細かく産

業小分類毎に原単位[8]が示されているので，製造品出荷額も考慮して産業中分類毎に整理した．業種別製造品出荷額は平成11年工業統計調査結果[9]を引用した．

表-5 産業中分類別の工場排水の原単位[6]

(g/百万円・日)

業種	SS	T-N	T-P
食料品	486.1	13.50	3.81
飲料・たばこ・飼料	215.3	13.50	3.81
繊維工業	122.2	4.11	4.84
衣服・その他の繊維製品	0.6	0.04	0.01
木材・木製品（家具を除く）	76.3	0.04	0.01
家具・装備品	1.3	0.05	0.01
パルプ・紙・紙加工品	585.6	27.52	4.73
出版・印刷・同関連産業	2.5	0.08	0.01
化学工業	849.2	11.90	0.71
石油製品・石炭製品	107.3	1.66	0.29
プラスチック製品	49.1	1.66	0.29
ゴム製品	31.1	3.00	0.52
なめし革・同製品・毛皮	76.5	7.60	1.30
窯業・土石製品	1227.4	1.84	0.20
鉄鋼業	864.2	0.83	0.49
非鉄金属	93124.5	1.06	0.10
金属製品	12.7	1.69	0.09
一般機械器具	9.9	0.46	0.13
電気機械器具	14.0	0.08	0.01
輸送用機械器具	44.1	0.04	0.01
精密機械器具	8.0	13.01	0.16
その他	13.8	3.29	0.39

表-6 石狩川流域市町村別の点源負荷量（一部分）

市町村名	点源負荷量(t/年)		
	SS	T-N	T-P
石狩市	96.2	116.1	11.2
当別町	66.7	44.8	4.9
札幌市	1771.0	3552.6	323.6
江別市	147.7	242.5	22.5
新篠津村	12.4	7.8	1.1
北村	34.0	10.6	1.5
月形町	16.8	9.6	1.2
美唄市	169.0	75.8	8.9
浦臼町	32.5	8.7	1.2
奈井江町	16.5	16.2	1.6

(4) 事業所排水

事業所排水による負荷量は次式によって表される．

$$M_j = \beta_g \times G_j \times P_j / 1000 \qquad (11)$$

ここで，M_jは業務下水発生負荷原単位(kg/日)，β_gは処理方式別排出率（下水処理）[6]，G_jは業務下水発生負荷原単位(g/人・日)[6]，P_jは従業員数（人）である．従業員数は工場排水と同様に平成11年工業統計調査結果[9]を引用した．

(5) 各流域の点源負荷量

(2)から(4)の方法で求めた生活排水，工場排水，事業所排水について石狩川流域の市町村について，負荷量を合わせて点源負荷量とする．T-N，T-Pも同様とする．結果の一部を表-6に示す．次に，この結果から流域毎の点源負荷量を割り出すが，1市町村が複数の流域に含まれる場合は，その市町村全体の面積と各流域にかかる面積との比によって負荷量を按分した．

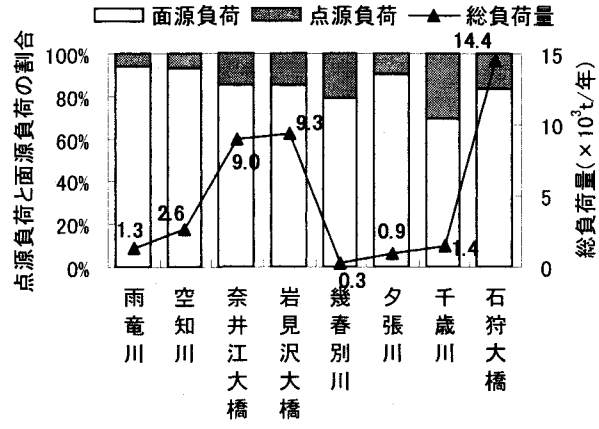

図-5 総負荷量と点源・面源の割合(T-N)

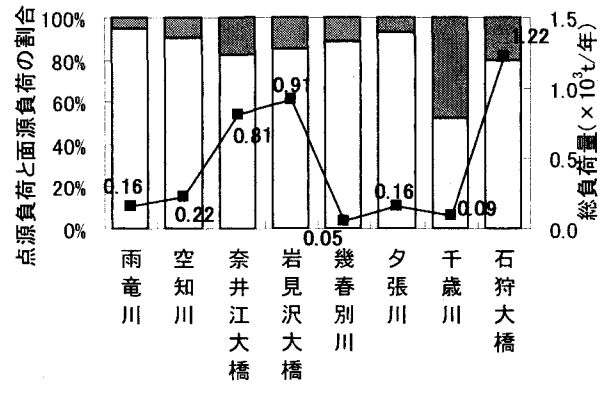

図-6 総負荷量と点源・面源の割合(T-P)

(6) 総負荷量に占める点源・面源の割合

以上の方法によって算出した点源負荷量を，図-5，図-6に示す．また，総負荷量から点源負荷量を差し引いて求めた面源負荷量，および点源負荷量の構成比も合わせて示す．なお，札幌市からの点源負荷を受容する豊平川については，汚濁原単位の推定のために下水処理区毎にデータ整理が必要となる．これについては，現時点で整理・解析がなされていないことから，以降の作業に関しては，豊平川を解析の対象から除外した．

5. 面源負荷の原単位の推定

(1) 概要

面源とされる森林，畑，水田，市街地のような土地利用は汚濁発生源の特定が難しいために，水質への影響の程度が明らかにされていない．しかし，点源への各種施策がなされてきた昨今，面源負荷の水質へのインパクトを把握することが，健全な水循環の保全・管理に重要であると考える．そこで，面源とされる土地利用の森林，畑，水田について，単位面積当たりの負荷発生量(t/km²/年)という形で原単位を求めることを試みる．この原単

位を求めることによって，流域土地利用の河川水質への影響を把握することができる．ただし，石狩川流域には札幌市や旭川市等の都市域を含むが，図-7 の土地利用割合からもわかるように，流域全体の面積に占める割合が小さい．そこで，市街地起源の面源負荷は，今回の推定対象から除外している．

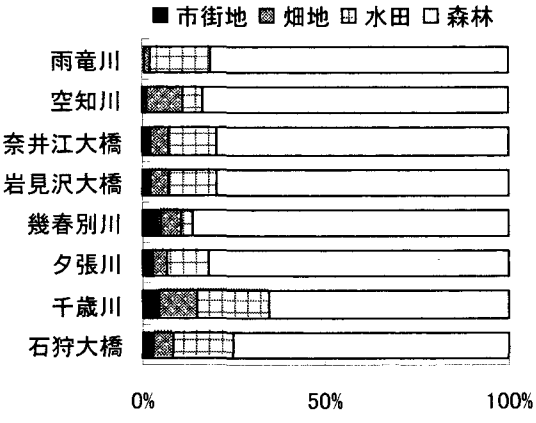

図-7 石狩川流域の土地利用割合

表-7 面源負荷の原単位推定結果と文献による既存原単位[10]

(t/km²/年)

		SS	T-N	T-P
森林	推定結果	71	0.63	0.09
	文献値	0.31～410	0.05～0.69	0.002～0.18
畑	推定結果	190	4.04	0.10
	文献値	0.10～690	0.75～3.57	0.03～3.54
水田	推定結果	160	1.61	0.12
	文献値	-	0.004～8.84	0.03～0.44

(2) 土地利用と面源の関係-原単位の推定

面源とされる土地利用と面源負荷量の間に以下のような関係をあてはめる．

$$\mathbf{L}_n = \mathbf{AX} \tag{12}$$

$$\mathbf{L}_n = \begin{pmatrix} L_{1n} \\ L_{2n} \\ L_{3n} \\ \vdots \end{pmatrix},\ \mathbf{A} = \begin{pmatrix} A_{1w} & A_{1f} & A_{1r} \\ A_{2w} & A_{2f} & A_{2r} \\ A_{3w} & A_{3f} & A_{3r} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix},\ \mathbf{X} = \begin{pmatrix} X_w \\ X_f \\ X_r \end{pmatrix} \tag{13}$$

ここで，**A** は各土地利用別の面積(km²)，添字の数字は流域，w, f, r は森林，畑，水田である．**X** は土地利用別の原単位ベクトル(t/km²/年)，$\mathbf{L}_n$は面源負荷量である．サフィックスの数字は流域の番号を表す．つまり，総負荷量から点源負荷量を差し引いた面源負荷量 $\mathbf{L}_n$，および面積 **A** を上式に与え，原単位 **X** を求めることになる．

なお，支川毎に推定をおこなったのは，本川の地点を選定した場合，その面源負荷量には支川の負荷量も含まれる場合があり，各式が独立した関係ではないことから，正しい原単位の推定ができない恐れがあるためである．また，豊平川流域については，既述したとおり，点源負荷量の推定がなされていないため，上記の推定からは除外している．

よって，雨竜川，空知川，幾春別川，夕張川，千歳川の5支川について考え，各原単位がマイナス値にならないように考慮しながら連立方程式を解いた．T-N については各原単位が正の値を示したが，SS と T-P についてはマイナスの値が出た．そこで，この2項目に関しては，既存の文献値より得た森林，畑，水田の原単位の各範囲を参考にして，値を少しずつ変えながら繰り返し計算を行い，最小自乗誤差もしくは相対誤差が最も小さい時の数値を原単位として採用した．

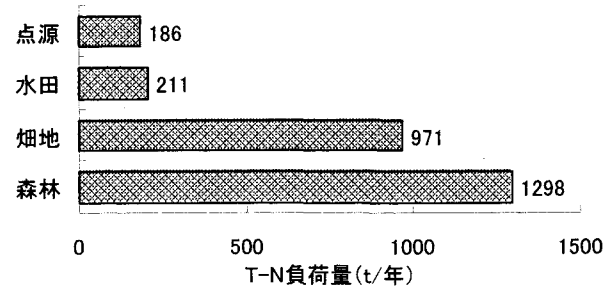

図-8 土地利用別の面源負荷量と点源負荷量との比較(空知川・T-N)

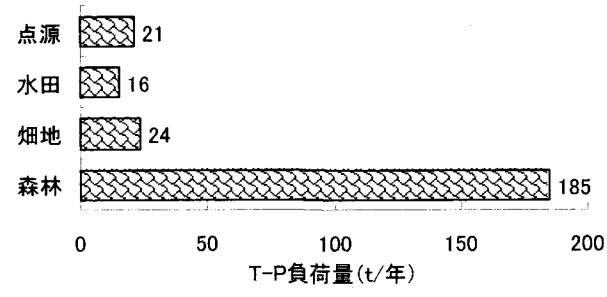

図-9 土地利用別の面源負荷量と点源負荷量との比較(空知川・T-P)

表-7 に結果と文献による既存原単位[10]を示す．推定した原単位と文献値を比較すると，推定結果は，ほぼ文献値の範囲に含まれるが，畑(T-N)の原単位は文献値より大きい結果となった．土地利用別に見てみると，SS, T-N, T-P 共に，森林<畑，水田の傾向が表れており，同じ面源でも，人為的汚濁源である農地による河川水質への影響が森林よりも大きいことがわかる．

これらの原単位から計算した空知川の土地利用別の面源負荷量と点源負荷量の比較を行った結果が，図-8 および図-9 である．図-7 の土地利用割合から，森林由来の負荷量が大きいことは推測できるが，とくに T-N は，土地利用割合から考えると，畑地由来の負荷量がかなり大きいことがわかる（表-7 参照）．

(3) 推定した原単位の精度

(2)のような方法で推定した面源の原単位（森林，畑，水田）の妥当性を検証するために，これらの原単位を用いて求めた負荷量と「面源負荷量＝総負荷量（*L-Q* 式より求める）－点源負荷量」として与えられる負荷量を各々計算し，比較した．その結果が図-10, 11, 12 である．こ

の比較には，原単位を推定する際に含まなかった本川地点についても計算を行った．

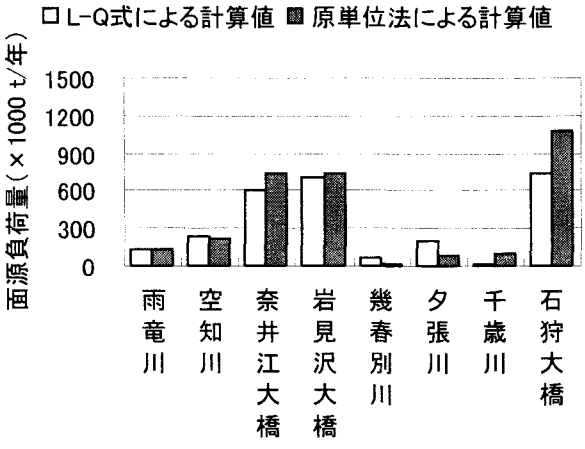

図-10 L-Q式を用いた方法と推定した原単位を用いた方法により計算した面源負荷量の比較(SS)

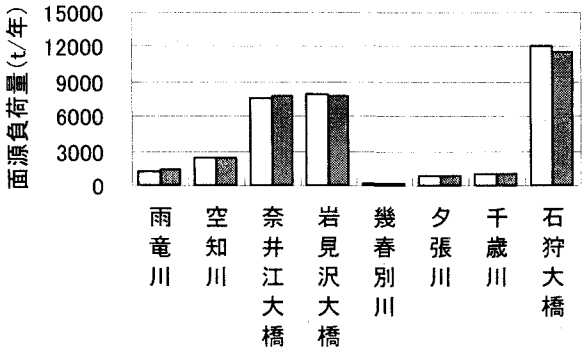

図-11 L-Q式を用いた方法と推定した原単位を用いた方法により計算した面源負荷量の比較(T-N)

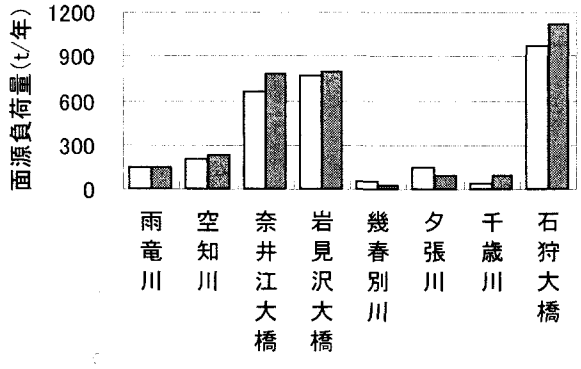

図-12 L-Q式を用いた方法と推定した原単位を用いた方法により計算した面源負荷量の比較(T-P)

以上の検証の結果，SSは上流側の4地点ではよい再現性が得られたが，下流側の4地点ではばらつきがみられた．また，T-Nは全地点で良い再現性を示しており，T-Pも下流側の地点で多少のばらつきが見られるものの，概ね良い再現性を示している．成果としては，本支川間の収支の整合性や浄化率などについて，検討の余地はあるものの，面源に着目した水質成分負荷量の推定結果について，ひとつの根拠が与えられたと考える．

6. おわりに

本研究では，石狩川流域を対象として，本川・支川の計9地点でSS，T-N，T-Pについて水質成分の総負荷量を推定した．また，原単位法に基づく負荷量の積み上げによって点源負荷量を算出した．さらに，点源と面源に汚濁負荷の由来を整理し，両者の比較を行った．

このなかで，面源負荷量については，森林，畑，水田といった土地利用に応じた単位面積当たり原単位の推定を試みた．その結果，点源に比べ，面源による負荷量の占める割合が大きく，その影響の大きさは無視できないことがわかった．したがって，今後一層の水質改善には，これまで実態がよくわからなかった面源対策に目を向けることが必要といえる．

また，面源負荷も土地利用によって流出量が大きく異なることから，流域の土地利用及び負荷の発生源までを視野に入れた広域的な影響把握と対策が必要であると考える．このことは，湖沼等の閉鎖水域，さらには海域まで包括した水環境のあり方を考えるために重要と考える．今後は，河道での沈殿，分解等の浄化プロセスも考慮し，より汎用的な原単位の推定を目指したい．

謝辞: 本研究の一部は，平成13年度北海道開発局受託研究費の補助を受けた．また，北海道開発局石狩川開発建設部及び北海道農政部農業振興課より提供されたデータ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)太田陽子，中津川誠，齋藤大作：出水時を含む水質成分負荷量の推定と流域の被覆状況との関係について，土木学会水理委員会河川部会，Vol.7，pp.193-196，2001.6．
2)日野幹雄ほか：水文流出解析，森北出版，pp.74-85，1985．
3)北海道開発局石狩川開発建設部計画課，（財）北海道河川防災研究センター：石狩川ランドスケープ情報，1997.12．
4)国土交通省ホームページ，http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/.
5)北海道農政部農業振興課：市町村別生活排水普及率（平成12年度末）．
6)國松孝男，村岡治爾：河川汚濁のモデル解析，技報堂出版，pp.11-21，1984．
7)建設省土木研究所：土木研究所彙報，第53号，河川の総合負荷量調査実施マニュアル（案），pp.29，1989．
8)建設省都市局下水道部：流域別下水道整備総合計画調査指針と解説，（社）日本下水道協会，pp.119-141，1983．
9)北海道庁ホームページ，http://www.pref.hokkaido.jp/skikaku/sk-kctki/deta/tokusu/kougiyo11/ko.htm．
10)山崎晃裕，中津川誠：積雪寒冷地流域の土地利用と水質成分負荷量について，開発土木研究所月報，No.529，1997.6．

（2002. 4. 15 受付）