

出水時を含む水質成分負荷量と 流域土地利用との関係について

STUDY ON WATER QUALITY LOADS INCLUDING FLOOD EVENTS
RELATED TO LAND USE IN CATCHMENT AREA

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

¹正会員 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)

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 deals with the characteristics of water quality loads from the watershed in a snowy and cold region. Specifically, an attempt was made to estimate the water quality load factors from the Ishikari River watershed, where the land use consists of forests, farm land, urbanized area, etc. The water quality loads were supplied by non-point and point sources. The point loads were estimated on the basis of statistical data such as population, while the non-point loads were related into the land use and their characteristics were investigated.

As a result, the water quality load from each source could be monitored throughout the entire watershed, thus it was determined that it is of practical use to evaluate water environment related to land use.

Key Words: Non-point and point source, water quality load factor, land use

1. はじめに

高密度な経済活動及び快適性や利便性を追求する我が国の社会構造は、重要な資源である水環境に過度な負担を与え、各種の水質汚濁問題が起こった。このことから水についても多消費型から循環型への転換が望まれており、水循環の連続性に配慮した水環境の質的・量的な保全・管理が望まれている。質的には下水道、合併処理浄化層等の各種下水処理、工場においては、排水基準や各自治体による総量規制等といった技術的、法的な各種施策により、これらの点源汚濁源由来の水質成分負荷量は減少傾向にある。その一方で、森林、農地等の面源由来の汚濁負荷については、汚濁発生源が特定しにくいという特性から対策を施すことが難しいという問題がある。したがって、今後は汚濁負荷の発生源から着目した対策が必要となる。

本研究では、流域に森林、農地、都市域等、様々な土地利用が分布する石狩川流域を対象として、流域から流出する水質成分負荷量について、特に出水時の負荷も考慮して推定を行った。また、汚濁物質の排出ポイントが特定できる点源とそれが特定しにくい面源という水質成分負荷の発生源に着目して、発生源別の水質成分負荷量の

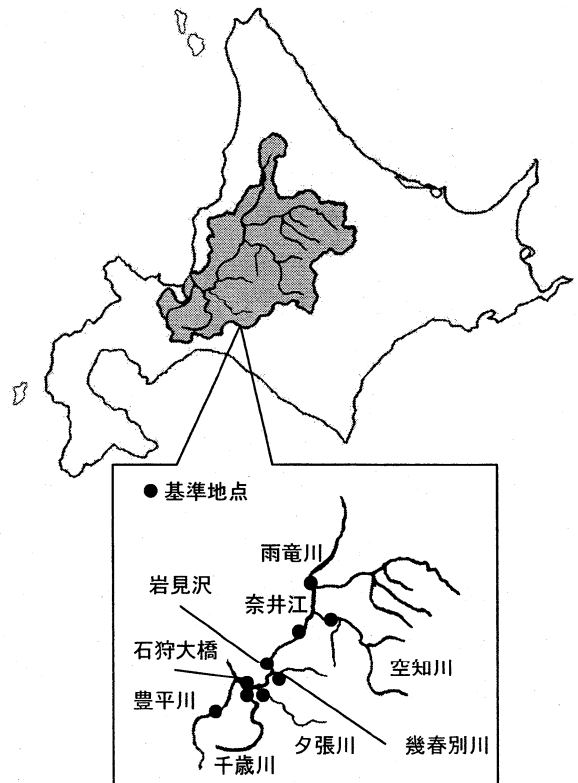


図-1 石狩川流域の概要

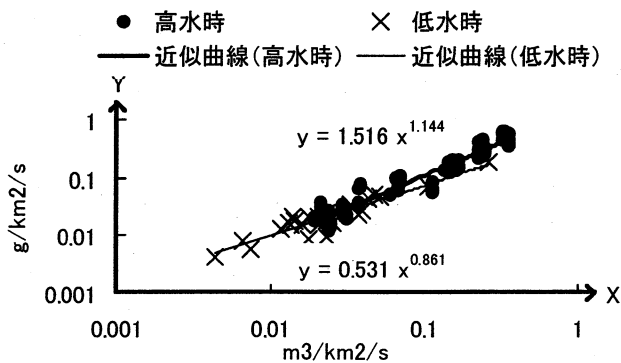


図-2 比流量と比負荷量の関係 (石狩大橋・T-N)

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 |

割合を算出し、面源負荷については土地利用に応じた原単位の算出を試み、その違いについて考察を行った。

2. 石狩川の概要

石狩川は幹川流路延長 268km, 流域面積 14,330km² を有する国内でも屈指の大川である。その流域は北海道面積の 18% を占め、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、文化の中核として、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

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 | 9.03 |
| 空知川 | 赤平橋 | 17.83 |
| 石狩川 | 奈井江大橋 | 10.04 |
| 石狩川 | 岩見沢大橋 | 5.53 |
| 幾春別川 | 西川向 | 19.31 |
| 夕張川 | 清幌橋 | 7.21 |
| 千歳川 | 裏の沢 | 16.43 |
| 石狩川 | 石狩大橋 | 13.77 |
| 豊平川 | 雁来 | 5.89 |

(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。

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

ここで、L:負荷量(g/s), A:流域面積(km²), Q:流量(m³/s), a, b: 定数とする。

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式を立てる。(以下、低水時L-Q式、高水時L-Q式とする。) 低水時L-Q式の作成には各地点で毎月1回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が平成12年4月から11月の出水時にかけて行った調査データを使用した。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。

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

$$q_g(t) = \alpha \sum w(\tau) q(t-\tau) \quad (3)$$

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

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), α は q_g 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。

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

$$c_1 = \delta^2 / T_c \quad (6)$$

ここで、 δ は減衰係数(=2.1), T_c は時定数(day)である。

各基準地点の時定数を表-2に示す。流出流量の成分分離に用いたデータは、雨竜川、岩見沢大橋は1994年、その他の地点は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

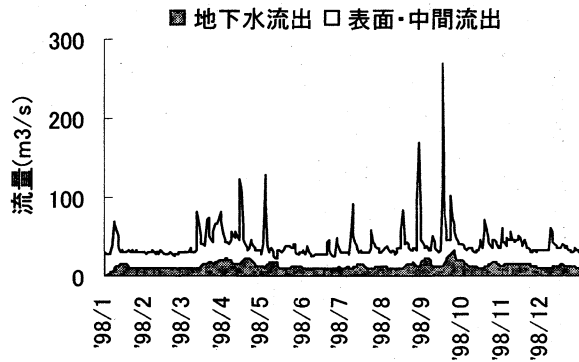


図-3 流量の成分分離 (千歳川)

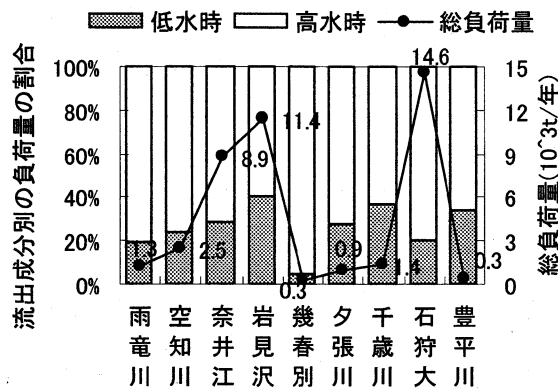


図-4 流域別の総負荷量と流出成分別の割合(T-N)
(数値は総負荷量を示す)

に示す。

(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し, 同様に高水時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。図4から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, 本研究で使用した方法の有効性を示している。

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。整理するにあたっては, 石狩

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⁾

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

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)及び行政界・海岸線(N03-11A)⁴⁾の3次メッシュデータを使用した。

(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⁾を用いて, 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たこと, 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タイプに分別した。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。

(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⁾, 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

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 |

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。

(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。

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

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)⁹⁾、 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) 各流域毎の点源負荷量

(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

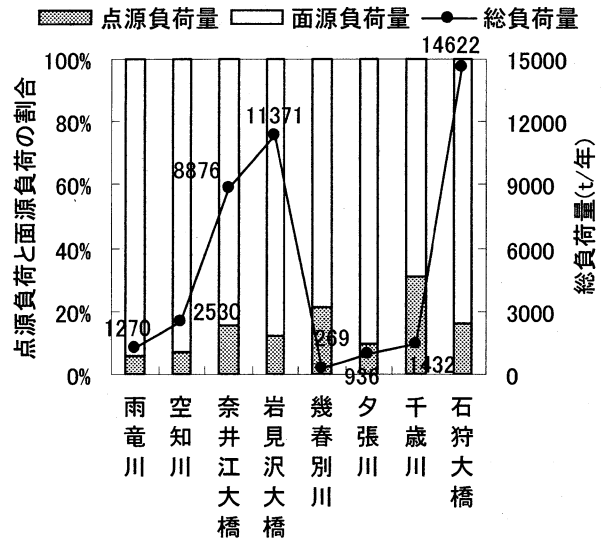


図-5 総負荷量と点源・面源の割合(T-N)

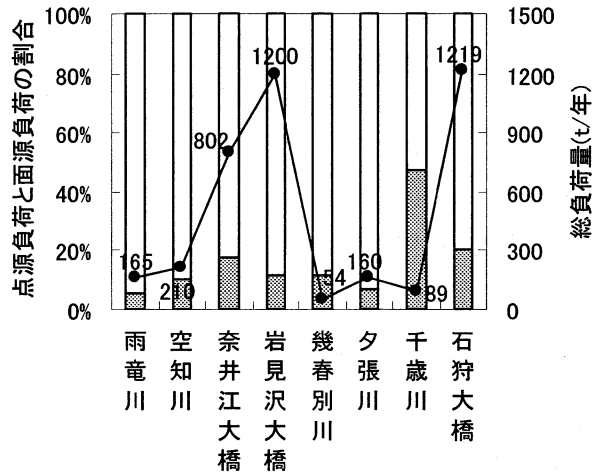


図-6 総負荷量と点源・面源の割合(T-P)

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分配した。

(6) 総負荷量に占める割合

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、面源負荷量=水質成分総負荷量-点源負荷量とした結果も合わせて示す。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、汚濁原単位の推定には下水処理区毎にデータの整理が必要となる。これについては、まだ整理・解析がなされていないことから、以降の作業に関しては、豊平川を対象から除外した。

5. 面源負荷の原単位の推定

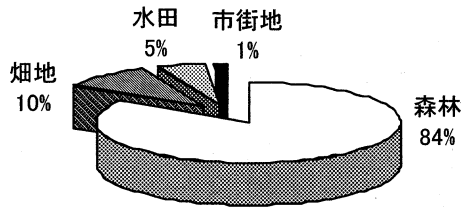


図-7 土地利用 (空知川)

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⁹⁾
(t/km²/年)

| | | SS | T-N | T-P |
|----|------|----------|------------|------------|
| 森林 | 推定結果 | 8 | 0.61 | 0.02 |
| | 文献値 | 0.31~410 | 0.05~0.69 | 0.002~0.18 |
| 畑 | 推定結果 | 640 | 3.90 | 0.20 |
| | 文献値 | 0.10~690 | 0.75~3.57 | 0.03~3.54 |
| 水田 | 推定結果 | 500 | 1.13 | 0.55 |
| | 文献値 | - | 0.004~8.84 | 0.03~0.44 |

(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今、面源の水質へのインパクトを把握することが今後の水循環の保全・管理に非常に重要であると考えられる。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の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、本研究の対象である石狩川流域は札幌市や旭川市等の都市域を含むが、図-7の空知川の土地利用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ことから市街地の原単位は推定対象から除外した。

(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は以下のような関係があると考えられる。

$$L = AX \quad (12)$$

$$L_n = \begin{pmatrix} L_{1n} \\ L_{2n} \\ L_{3n} \\ \vdots \end{pmatrix} A = \begin{pmatrix} A_{1w} & A_{1f} & A_{1r} \\ A_{2w} & A_{2f} & A_{2r} \\ A_{3w} & A_{3f} & A_{3r} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} X = \begin{pmatrix} X_w \\ X_f \\ X_r \end{pmatrix} \quad (13)$$

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)、 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。支川毎としたのは、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

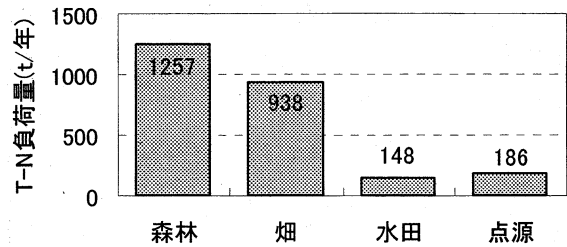


図-8 土地利用別の面源負荷量と点源負荷量との比較(空知川・T-N)

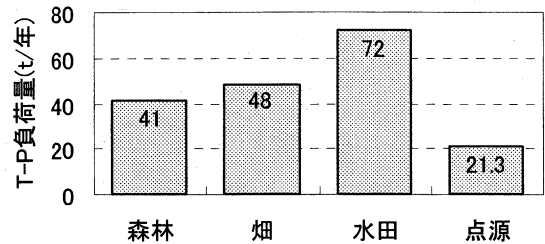


図-9 土地利用別の面源負荷量と点源負荷量との比較(空知川・T-P)

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、支川のひとつの豊平川については、上述したとおり、豊平川流域の点源負荷量の計算ができないため、原単位を求めるための式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支川について式を立て、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ため、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、最小自乗誤差及び相対誤差が最も小さい時の数値を原単位とした。表-7に結果を示す。この結果から、これまで水質に関する施策の対象としてあまり着目されなかった面源についても、その影響が大きいことが確認できた。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及び図-9である。T-Nは森林、T-Pは水田由来の負荷量が点源負荷と比較しても数倍多いことがわかる。表-7には文献による既存原単位も合わせて示した。推定した原単位と文献値を比較すると、推定した原単位は、ほぼ文献値の範囲に含まれるが、畑(T-N)や水田(T-P)の原単位は文献値より大きい結果となった。

(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、これらの原単位と「面源負荷量=総負荷量(L-Q式より求める)-点源負荷量」

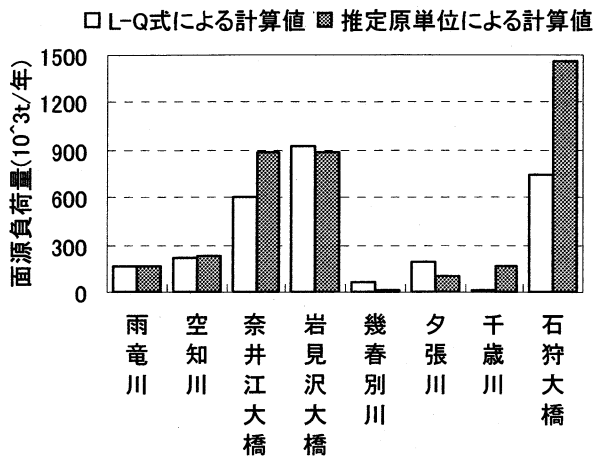


図-10 L-Q式を用いた方法と推定した原単位を用いた方法により計算した面源負荷量の比較(SS)

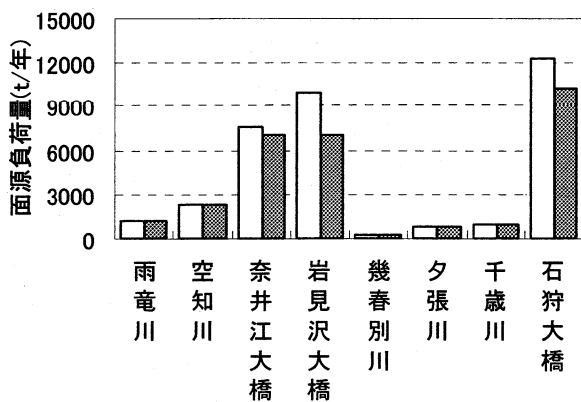


図-11 L-Q式を用いた方法と推定した原単位を用いた方法により計算した面源負荷量の比較(T-N)

として与えられる面源負荷量を各々計算して、比較を行った。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の地点についても計算を行った。SS は奈井江大橋と石狩大橋、千歳川を除けば概ね近い値を示しており、T-N, T-P についても本川の地点の再現性があまり良くないという同様の傾向が見られる。しかし、支川については、特に T-N について高い再現性を示しており、成果としては、支川と本川間の収支等の関係も考慮するなど、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研究としての今後の可能性を示唆するものであると考える。

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。さらに、汚濁源別の原単位法による積み上げによって点源負荷量を算出した。そして、点源負荷と面源負荷としての比較を行った。また、面源負荷量については、森林、畑、水田の土地利用に応じた単位面積当たりの発

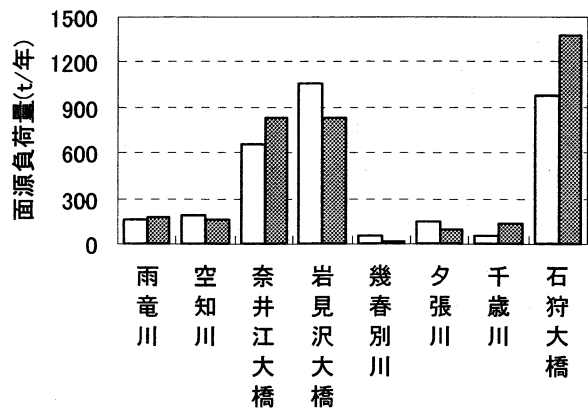


図-12 L-Q式を用いた方法と推定した原単位を用いた方法により計算した面源負荷量の比較(T-P)

生源単位の推定を試みた。その結果、面源による負荷量の占める割合が大きく、その影響は無視できないことがわかった。また、面源も土地利用によって流出する水質成分負荷量が大きく異なることがわかった。今後は、面源による水質成分負荷量について、沈殿、分解等の自浄作用の影響も考慮した浄化率の検討を行い、より汎用的な原単位の推定及び精度の向上を目指したい。

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, 長谷部正彦: 水流出解析, 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: HRDPRC L.S.I 1997 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
- 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: 土木研究所集報 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
- 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.

(2001.10.1受付)