

千曲川上流域における流域特性と河川水質の関係性評価

天野邦彦*

1. はじめに

河川の水質は、流域特性を反映しているということは疑いのないところである。日本の河川水質の変化に着目すると、都市部を流れる河川水質は1970～1980年代に悪化した後、下水道整備の進展に伴い、BODで評価した環境基準達成率が大幅に向上するなど、改善が見られる反面、農地からの栄養塩類の流出など面源負荷の問題や、医薬品由来など種々の微量化学物質の問題など、まだ解決されない問題が多い。

河川水質の問題は流域における負荷発生状況を反映しているが、流域における負荷削減が進んでいるとされる湖沼において、湖沼水質の改善が進まないという状況が多く見られる。このような湖沼においては、流域のどのような場所からどれほどの負荷が流出するのか定量的に正確な評価ができていない可能性が高い。

この理由としては、流域からの発生負荷量を評価するために用いる原単位が正確に評価されていない可能性が挙げられる。さらに発生した負荷が流下の過程で変化する割合についても評価することは、難しい。

流域の土地利用を区分して、それぞれ区分した単位から流出する面積あたりの発生負荷量が正確に推定できれば、新しい原単位として採用することができると考えられるし、さらに流下過程での変化量が把握できれば、より正確な河川水質と流域特性との関連が理解できると考えられる。

本稿では、千曲川上流域における河川水質の縦断的变化を、集水域特性の縦断的变化と関連づけて、発生負荷量と流下過程での変化を評価することを試みた。地理情報システム(GIS)を用いて、河川を縦断的に分割して、それぞれの分割地点における集水域の土地利用変化を集計し、水質変化との関係性を評価するとともに、窒素に着目して、その濃度と安定同位体比を現地採水により求めた。

このような解析を行うことで、河川水質変化に与える流域の影響度合いを評価することが可能となると考えられ、水質保全のための流域対策策定に資するものと考えられる。

2. 千曲川上流部の概要

千曲川は甲信・秩父の境にある甲武信岳（標高2,475m）を源流として、佐久、小諸、上田、長野の各盆地を貫流し、新潟県境からは信濃川と名称が変わる。本研究では源流から千曲市（旧更埴市）の千曲橋付近までの流域を対象としており、対象流域面積は2,468 km²である。この流域での土地利用の現況は水田8.8%、畑5.7%で、市街地の割合は3.5%、森林の占める割合は71.5%である。また、この流域の特徴的な土地利用として、上流の川上村、南牧村の大規模レタス畑がある。この大規模レタス畑で研究対象流域における畑の面積の19.5%を占めており、この流域を西川と呼ばれる支川が貫いており、千曲川本川に水質影響を及ぼしていると思われる(図-1参照)。

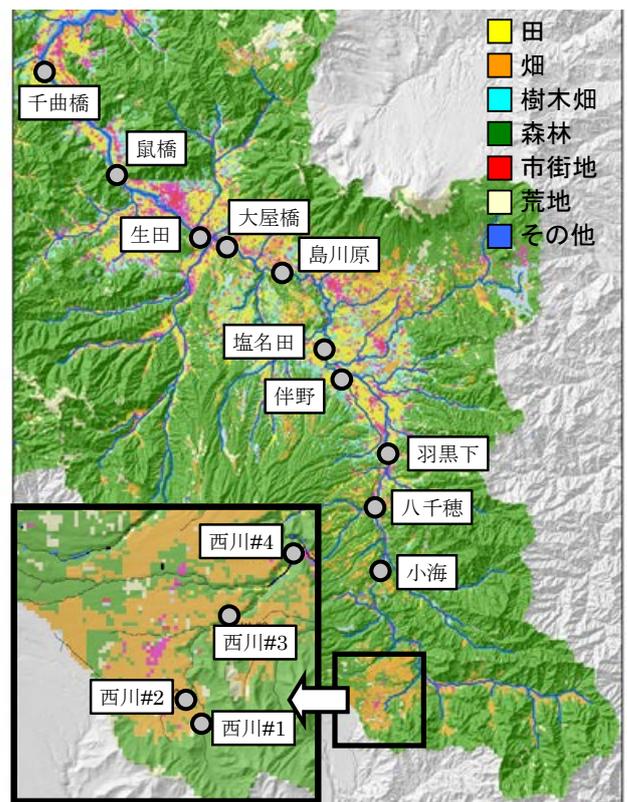


図-1 検討対象とした流域

Water quality of Upper Chikuma River and its dependency on watershed character

3. 研究方法

3.1 集水域の切り出しと流域情報の定量化

流域を格子分割し、それぞれに標高値をあてはめたGISファイルに、落水線解析とよばれる機能を適用することで、河川の集水域を切り出すことができる。また、GISは地理情報を介して各種情報を重ね合わせることが出来るため、河川の任意の地点に対応する集水域を切り出した後に、その集水域の土地利用等の属性データを集計することが可能である。

河川上に縦断的に配置した地点に対して、この手順を適用することで、河川の流下に伴う集水域特性の変化を定量的に評価した。なお、GIS解析は、「国土地理院発行の「数値地図50mメッシュ(標高)」と「1/10細密土地利用メッシュ」を用いて行った。

3.2 水質観測調査

図-1に示す14地点において7回採水を行い、全窒素(T-N)、硝酸態窒素(NO₃-N)、亜硝酸態窒素(NO₂-N)、アンモニア態窒素(NH₄-N)について濃度測定を行った。また、同じサンプルを用いて窒素安定同位体比($\delta^{15}\text{N}$)の分析を行った。

3.3 河川任意地点における負荷流出解析

図-1に示す14地点で採取されたサンプルのNO₃-N濃度、NO₃-Nの安定同位体比($\delta^{15}\text{N}$)及び各採水地点において集水域解析により算出された土地利用状況(田、畑、市街地、森林等の流域面積に対する割合)とを利用して土地利用由来毎の負荷流出解析を行った¹⁾。

上記で示した土地利用状況を田畑(田+畑)、市街地(市街地)、森林等(樹木畑、荒地、森林、その他)の3種類に分類すると採水地点における硝酸態窒素流出負荷量L_Tは次式で与えられる。

$$L_T = L_p + L_c + L_f \quad \text{式(1)}$$

ここで、L_Tの単位は時間あたりの質量(g/s)であり、L_p、L_c、L_fはそれぞれ採水地点における田畑、市街地、森林等からの硝酸態窒素流出負荷量である。また、L_Tは採水地点のNO₃-N濃度Nと流量Qの積で表せることから、式(1)は

$$L_T = NQ = N_p Q_p + N_c Q_c + N_f Q_f \quad \text{式(2)}$$

$$Q = Q_p + Q_c + Q_f \quad \text{式(3)}$$

と表せる。ここで、NとQの単位はそれぞれmg/L、m³/sであり、N_p、N_c、N_fはそれぞれ採

水場所における田畑、市街地、森林等由来のNO₃-N濃度であり、Q_p、Q_c、Q_fはそれぞれ田畑、市街地、森林等からの流出量である。ここで注意点として、それぞれのNは発生場所での値ではなく、採水地点での値であり、流下に伴う変化を内包したものである。採水地点の流量Qは「生田」における比流量に集水域面積を乗じることで全採水地点における各採水日の流量として算出している。さらに、Q_pとQ_fを次式で定義した。

$$Q_p = Q (A_p / A) \quad \text{式(4)}$$

$$Q_f = Q (A_f / A) \quad \text{式(5)}$$

ここで、A、A_p、A_fはそれぞれ集水域における総面積、田畑、森林等の面積(ha)である。

また、各採水地点における窒素安定同位体比Iは次式で示されると考えられる。

$$I = (I_p L_p + I_c L_c + I_f L_f) / L_T \quad \text{式(6)}$$

ここで、Iの単位は‰であり²⁾、I_p、I_c、I_fはそれぞれ田畑、市街地、森林等からの流出における窒素安定同位体比である。

流域各下水処理場からの放流水の平均溶存態窒素濃度³⁾から、N_cは10.96(mg/L)とし、N_fは後に示す流域のほとんどが森林で占められている「西川#1」の平均NO₃-N濃度から0.2(mg/L)とした。また、I_pは文献の値⁴⁾西川#2の値から5.0(‰)とし、I_cは下水処理場からの放流水の窒素安定同位体比⁵⁾から19.5(‰)とし、I_fは文献の値⁴⁾西川#1の窒素安定同位体比の値から2.0(‰)とした。

(1)~(6)式を用いて図-1に示す14地点のうち、「西川#2」、「西川#3」、「羽黒下」、「塩名田」、「島川原」、「生田」、「鼠橋」の7地点において窒素安定同位体比のデータが存在する1月~4月のN_pを算出した。今回の検討では、田畑からの流出窒素は化学肥料由来であることから、その安定同位体比は同じ値としたが、田畑では流出濃度が異なるため、別途以下の式を用いてN_p変化についてさらに考察した。

$$N_p' = (aN_{田} + bN_{畑}) / (a + b) \quad \text{式(7)}$$

ここで、a、bはそれぞれ流域に占める水田と畑の面積割合であり、N_田、N_畑はそれぞれ水田と畑由来の採水場所におけるNO₃-N濃度である。ここで、1月~4月の時期は水田においては非灌漑期であり、水田の浸透水中の窒素濃度は0.02mg/L程度であることが知られている。また、後に示すように「西川#2」のN_pはほぼ畑から流

出したそのままのNO₃-N濃度であると考えられる。よって、N_田は、0.02mg/Lの一定値、N_畑はそれぞれの月における「西川#2」のN_pを用いることとした。

4. 結果

4.1 流下に伴う土地利用の変化

図-1に示す14地点の集水域における土地利用の割合を算出したものを図-2に示す（森林の占める割合が全地点で60%以上のため、50%以上の部分は示していない。）。流域面積の30%~40%を畑が占める西川流域を経て本川が合流して畑の面積割合が10%程度にまで減少し、その後流下に伴い「大屋橋」まで水田と市街地の面積割合が増加し、その後は流下に伴う土地利用割合の変化が小さくなっていく様子が見て取れる。

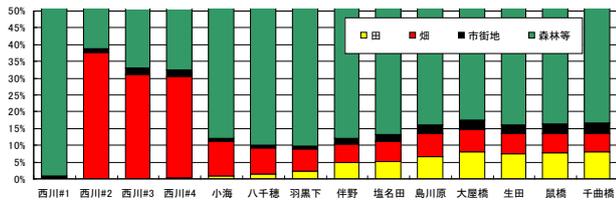


図-2 各採水地点における土地利用の割合

4.2 NO₃-N濃度の経月変化

「西川#2」～「鼠橋」におけるNO₃-N濃度の値を図-3に示す。「西川#2」の変動が大きく、他の地点と異なる傾向を示すが、他の地点における11月～6月の変化は地点間で若干の相違はあるものの、11月から2月にかけて微増し、2月において一度ピークを迎えた後、2月から4月にかけて減少し、5月の時点で急増し、この期間における最大値を示した後、6月には再び下降する。

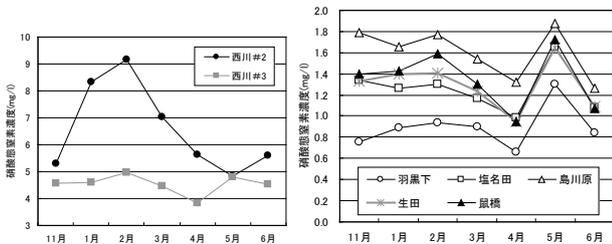


図-3 各採水地点における硝酸態窒素 (NO₃-N) 濃度経月変化

4.3 河川任意地点における負荷流出解析

算出されたN_pの値の変化を図-4に示す。「西川#3」において1月のN_pが異なる傾向を示すもの

の、「西川#2」で15~25mg/Lであったものが流下に伴い減少する傾向を示し、2月→3月→4月とほぼ相似形のままN_pが減少している。また、比較のため、図-5に図-4と同条件におけるN_p'の値の変化を示す。N_p'の値はN_pと同じく流下に伴い減少する傾向を示し、2月→3月→4月とほぼ相似形のまま減少する傾向を示す。

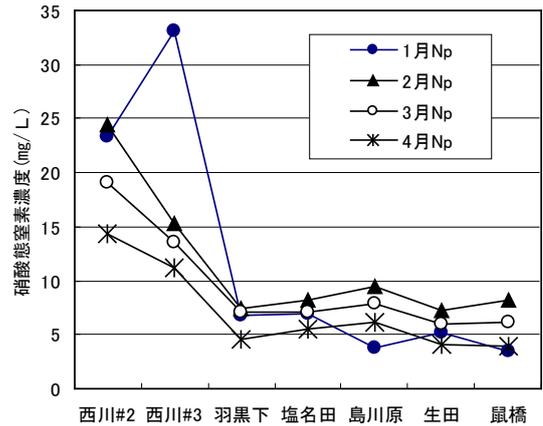


図-4 1月～4月にかけてのN_pの変化

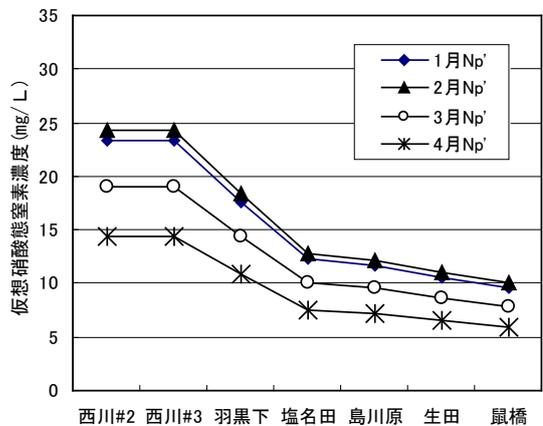


図-5 1月～4月にかけてのN_p'の変化

5. 考察

図-3に示した結果は、田畑、市街地の面積割合が多い地点ほどNO₃-N濃度が高くなる傾向を示している。また、「西川#2」の変動が他の地点より大きい理由として、この流域がほぼ森林と畑のみで構成されていることが考えられる。つまり、単一の負荷源としての畑の割合が多いため、畑からの流出負荷量の変化の影響を強く受けてしまい、他の地点と異なる変動傾向、変動量を示すと考えられる。また、11月から2月にかけては千曲川流域においては降雪のため雨はほとんど降らず、雨

による希釈効果が小さく、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が高くなったと考えられる。しかし、この間には季節的に畑に施肥がなされておらず、新たな窒素負荷の供給がないため、雪解け流出によって土壌の窒素が徐々に流出し、2月から4月にかけては $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が減少したものと考えられる。

N_p は採水地点における畑由来の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の推定値である。実際、4月採水時に「西川#2」の河岸における湧水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度を分析したところ18.42(mg/L)であり、図-4に示した N_p の値とほぼ同様であり、解析の妥当性を示す結果であった。また、「西川#2」の集水域の約40%が畑であり、残りが森林であることから、 N_p の約40%が「西川#2」の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度とほぼ同じと考えられるが、図-4に示した N_p の値の約40%と、図-3に示した実測値とは、ほぼ同値の季節変動を示しており、畑由来の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の推定値として妥当と考えられる。

N_p は、上流から下流にかけて減少するが、この理由として、流下に伴う水田面積の増加が考えられる。元々水田は畑よりも施肥量が少ない上に、季節的に元肥の前であることから水田からの負荷流出量は少ない。このため、流下に伴って N_p が減少すると考えられ、これは別途検討した図-4の N_p' の値からも分かる。しかし、下流において N_p' の値より N_p の値が小さくなる結果が得られている(図-4, 5)。これは負荷源から供給された $\text{NO}_3\text{-N}$ が採水地点に到達するまでに付着藻類等に取り込まれることなどで減少していることによると考えられる。つまり、 N_p' を算出する際には全ての地点において「西川#2」の N_p を使用しており、流下に伴う $\text{NO}_3\text{-N}$ の減少を考慮しておらず、 N_p に比べて過大に見積もっているためである。さらに、2月→3月→4月と N_p が減少していることも図-3に示した $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の同期間における季節変動と矛盾しない。また、1月については積雪のため田畑からの流出量は小さく、負荷量としても他の時期よりも小さかったと考えられる。このため、2月、3月、4月と異なった傾向を示したと考えられる。

6. まとめ

流域からの負荷発生、流出の過程について、流域の土地利用ごとに由来を区分して、それぞれの

土地利用の水質影響についての評価を試みた。評価に際しては、流域GISを利用することで、河川を縦断的にみたときの集水域の土地利用変化を定量的に把握するとともに、発生源ごとに窒素安定同位体比が異なることを利用して、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度と窒素安定同位体比を同時に利用することで、田畑由来の変化を算出した。今回の算定では、限られたデータ数での評価にとどまっているため、流下に伴う変化については、明確に評価できていないが、畑由来の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度を推定することができた。同時にこの値は、季節や降雨量によっても変化することが示唆された。今後、流域GISを利用した流域特性解析、水質測定における安定同位体比解析を実施するとともに、流出モデルなどと組み合わせることで、流域からの水質負荷評価に起源別の影響を加味することが可能になると考えられる。このような評価を実施することで、流域からの流出負荷解析の高度化、ひいては流域管理の効率化が可能になるとと思われる。

参考文献

- 1) 時岡利和、天野邦彦、傳田正利、対馬孝治：GISと窒素安定同位体比を用いた千曲川流域における負荷流出特性解析、水工学論文集、Vol.49、pp.1597～1602、2005.
- 2) 永田俊、宮島利宏：流域環境評価と安定同位体、京都大学学術出版会、京都、2008.
- 3) 戸田任重、上村由加里：流域の窒素負荷源と河床付着物の窒素安定同位体比、千曲川の総合研究－鼠橋地区を中心として－、pp.62～70、2001.
- 4) Heaton, T. H. E.: Isotopic studies of nitrogen pollution in the hydrosphere and atmosphere: A review, Chemical Geology (Isotopic Geoscience Section), pp. 87-102, 1986.
- 5) 戸田任重、中佐錦、沖野外輝夫、川島博之：窒素負荷発生量の変遷、千曲川の総合研究－鼠橋地区を中心として－、pp.56～61、2001.

天野邦彦*



国土交通省国土技術政策総合研究所
環境研究部河川環境研究室長、博
(工)

Dr. Kunihiko AMANO