

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

NITROGEN RUN-OFF ANALYSIS IN CHIKUMA RIVER BASIN USING GIS AND N-STABLE ISOTOPE

時岡利和¹・天野邦彦²・傳田正利³・対馬孝治⁴

Toshikazu TOKIOKA, Kunihiko AMANO, Masatoshi DENDA and Kouzi THUSHIMA

¹正会員 独立行政法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²正会員 工博 独立行政法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

³正会員 独立行政法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

⁴農博 独立行政法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

To conduct the water quality improvement properly, it is necessary to estimate the dynamics of pollutant loads at watershed scales. We have attempted to quantify the watershed information by GIS to estimate the relation between water quality and watershed information, and carried out the field observation and sample collection, and then we have analyzed the run-off of NO₃-N in Chikuma Basin. As a result, it became clear that the land use of watershed had significant influence on NO₃-N dynamics in the river. Since, the amount of NO₃-N from the vegetable field changes, NO₃-N in the river water changed seasonally. Also, nitrogen stable isotope ratio increased in downstream of the river, where N discharge from city area increase.

Key Words : GIS, land use, nitrate, stable isotope ratio, Chikuma Basin

1. はじめに

流域を流れる河川は降雨として流域に供給された水が様々な経路を経て集まり、やがて地表面に流れとして出現し、流路となっているものである。その際、流域に存在する様々な物質を取り込み、河川として流下する頃には多種多様な水質を形成しており、当然、河川の水質は場所によって異なり、また同一の場所でも時期によって異なっている。

近年、問題となっている水質悪化の主要因と考えられている窒素やリン等の負荷物質も、主には人為的に流域に供給され、それが雨水や水道水に取り込まれて河川に流出し、水質を形成している。

このため、流域スケールで水質改善・管理を適切に行っていくためには、様々な場所における河川の水質とその形成要因となっている物質の供給源としての流域の空間的、時間的状況との関係を適切に評価することが必要不可欠である。

しかし、流域を記述する情報の量は膨大であり、また

様々な種類の情報を含んでいる。このため、これら膨大な情報を統合的に扱うことがこれまで困難であり、流域情報の記述はこれまで定性的に行われることが多かった。このことが水質と流域状況との関係の適切な評価を妨げてきた要因の一つであるが、最近劇的に処理速度が向上しているコンピューターとGIS（地理情報システム）を利用し、膨大な情報を統合的に扱うことによって流域情報を容易に、定量的に記述できるようになってきた¹⁾。

また、河川水質の季節変動に関してはこれまで流量と水質の単純な回帰式（L-Q式）を用いたもので評価されることが多かったが、水質の形成要因である流域の社会状況が季節的に変動している以上、より精度の高い評価のためには、流量変動だけでなく流域情報をも加えた解析を行っていく必要がある。

このようなことを背景として、本研究では長野県千曲川を対象として、GISを用いた流域情報の定量化と現地での採水に基づく水質結果との比較検証を行い、流域から流出する窒素負荷量の場所的な変化、季節的な変化について評価する。また、窒素安定同位体比を併せて用いることにより、田畑からの流出負荷量の変化について定

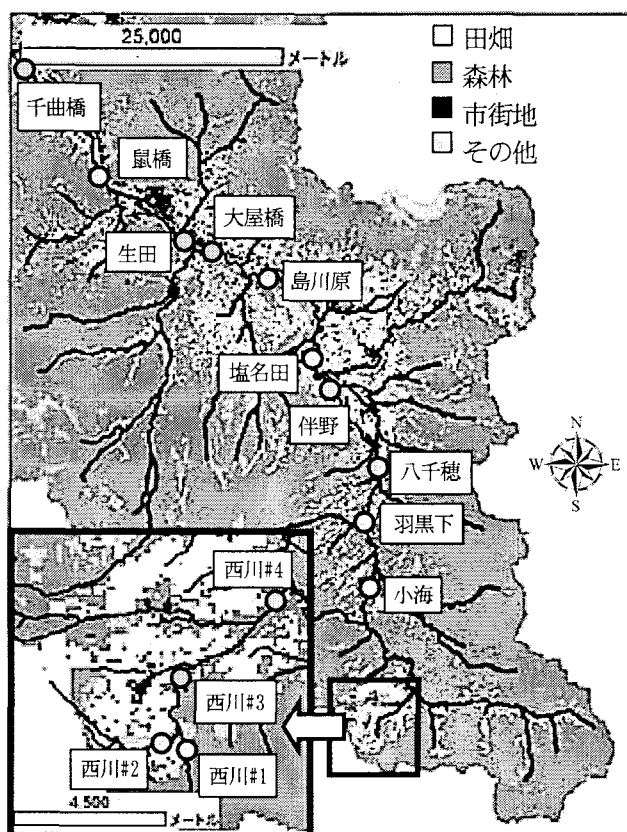


図-1 千曲川上流域と採水地点

量的に評価する。

2. 研究方法

(1) 千曲川流域の概要

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。流域面積は7,163 km²であり、含まれる市町村は11市、24町、39村。流域人口は約150万人である。

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研究対象としており、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、千曲川本川に大規模レタス畑の負荷を供給している（図-1参照）

(2) 現地調査

図-1に示す14地点において2003年11月19日、2004年1月19日、2月25日、3月23日、4月23日、5月24日、6月30日の7回に渡り採水を行い、T-N、NO₃-N、NO₂-N、NH₄-Nについて分析を行った。また、同じサンプルを

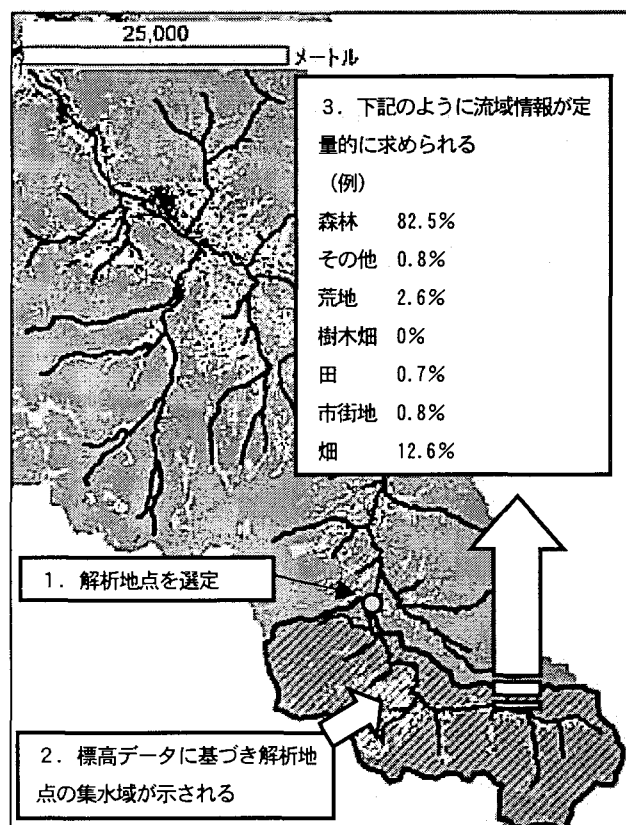


図-2 集水域解析の概要

用いて窒素安定同位体比($\delta^{15}\text{N}$)の分析を行った。なお、分析は T-N 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ についてはBran Luebee社のAACS-Ⅲを用いて行い、 $\delta^{15}\text{N}$ についてはAMCO社のFlash EAを前処理装置として接続した、Thermo Eelectoron社のDelta Plus XLを用いて行った。

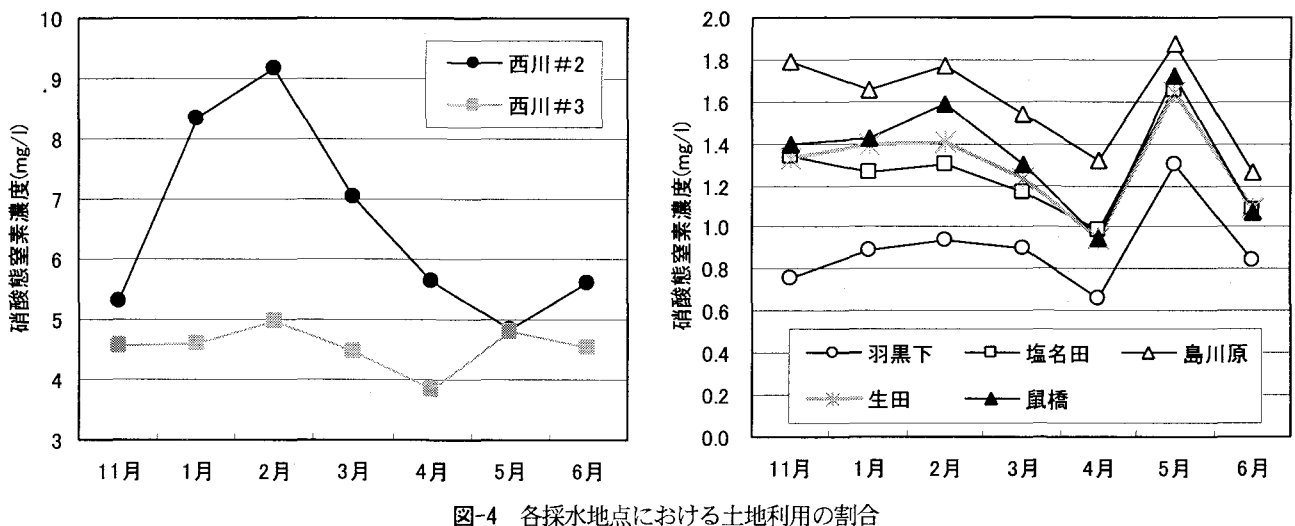
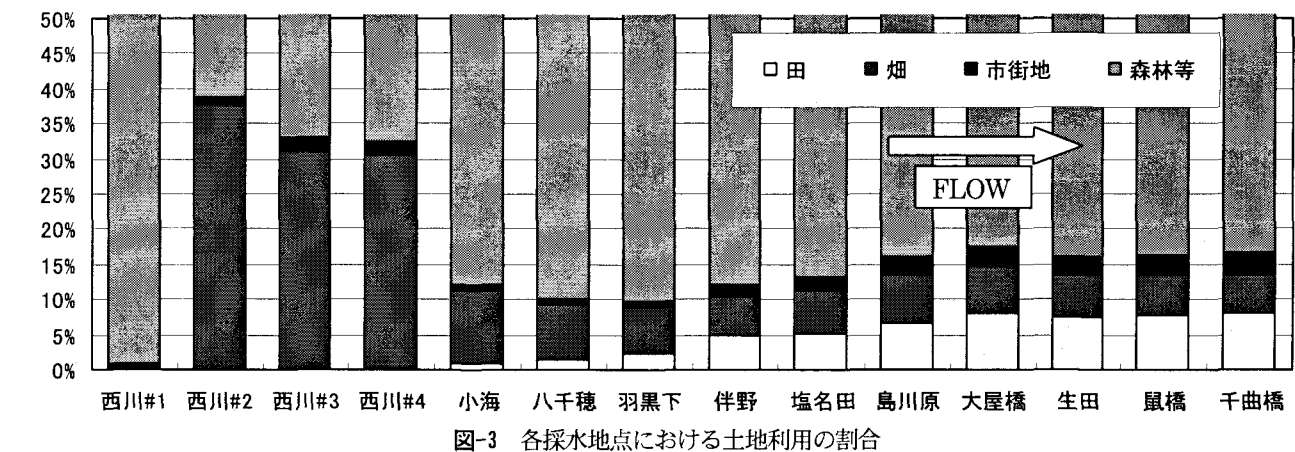
なお、本研究対象流域においては、畑等の面源負荷が大部分を占めていると考えられるため、現地採水にあたっては降雨による直接的影響を避け、河川の流量が安定している日に採水を行い、月の代表値として取り扱っている。

(3) 集水域解析による流域情報の定量化

標高データを用いたGISの優れた解析手法の1つに河川の集水域の切り出し機能がある。図-2にこの機能を用いた集水域解析の概要を示す。この機能を利用して、河川の任意の地点における集水域を標高データを基に切り出し、その領域内における土地利用等の属性データを集計することによって、その集水域の特性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。

(4) 河川任意地点における負荷流出解析

千曲川は全体的に濁度が低く、T-Nに占めるNO₃-Nの割合が高い(約90%)。また、下水処理水は懸濁態の窒素をほぼ取り除いた状態で排出されること、平水時における畑等面源においてはNO₃-Nの流出が問題になりやす



いこと②から、本研究では図-1に示す14地点で採取されたサンプルの分析結果の中から、 $\text{NO}_3\text{-N}$ に注目し、その値と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）とを利用して負荷流出解析を行う。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種類にまとめると採水地点における硝酸態窒素流出負荷量 L は次式で与えられる。

$$L = L_p + L_c + L_f \quad (1)$$

ここで、 L の単位は(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 は採水地点の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度 N と流量 Q の積で表せることから、(1)式は

$$L = NQ = N_p Q_p + N_c Q_c + N_f Q_f \quad (2)$$

$$Q = Q_p + Q_c + Q_f \quad (3)$$

と表せる。ここで、 N と Q の単位はそれぞれmg/l、 m^3/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 $\text{NO}_3\text{-N}$ 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

流量を千曲川河川事務所提供の平成15年版H-Q式(暫定式)より予測し、流域面積と予測流量 Q との関係から全ての採水地点における各採水日の流量を算出している。さらに、 Q_p と Q_f を次式で定義した。

$$Q_p = Q (A_p / A) \quad (4)$$

$$Q_f = Q (A_f / A) \quad (5)$$

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。

$$I = (I_p L_p + I_c L_c + I_f L_f) / L \quad (6)$$

ここで、 I の単位は‰であり、 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。

ここで、流域各下水処理場からの放流水の平均溶存態窒素濃度④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 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度から0.2(mg/l)とした。また、 I_p は文献の値⑤と西川#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③から19.5(‰)とし、 I_f は文献の値⑤と西川#1の窒素安定同位体比の値から2.0(‰)とした。

これら、(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」、

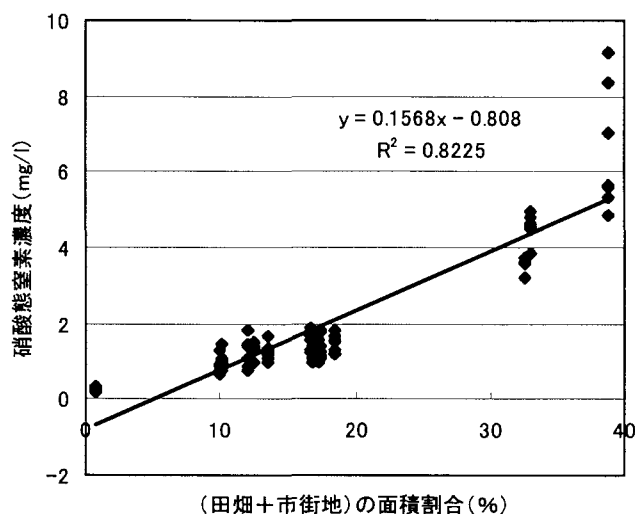


図-5 田畑+市街地の面積割合とNO₃-N濃度の関係

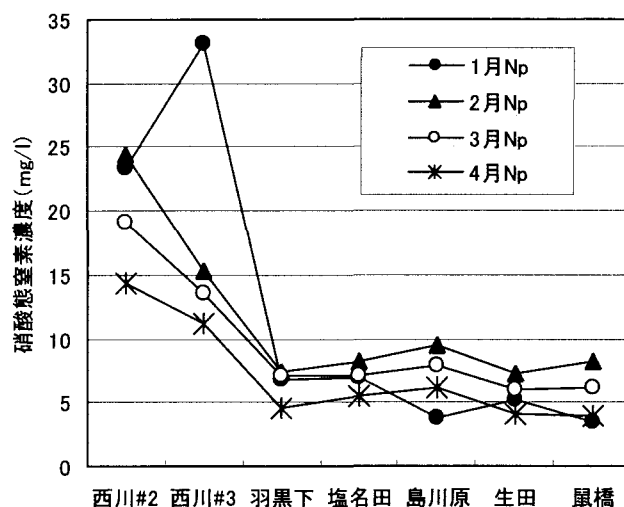


図-6 1月～4月にかけてのN_pの変化

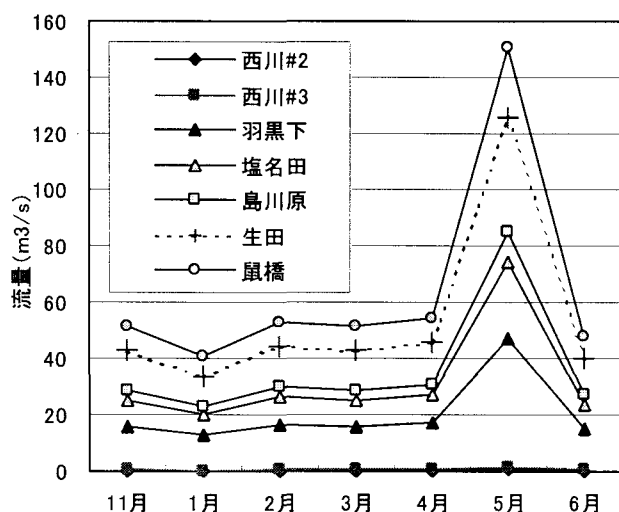


図-7 11月～6月にかけての流量の変化

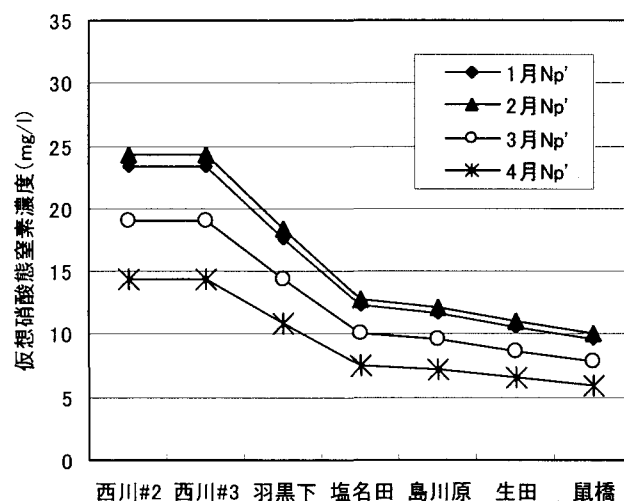


図-8 1月～4月にかけてのN_p'の変化

「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。

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

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²⁾。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。

3. 結果

(1) 流下に伴う土地利用の変化

図-1に示す14地点において集水域解析を行い、流下に伴う土地利用の割合の変化を算出したものを図-3に示す。ここでは模擬的に「西川#1」を源流と考え、「西川#4」の下流で本川が合流する、という流下形態を仮定している。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。

(2) NO₃-N濃度と土地利用の関係

図-1に示した採水地点のうち、「西川#2」～「鼠橋」におけるNO₃-N濃度の値を図-4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

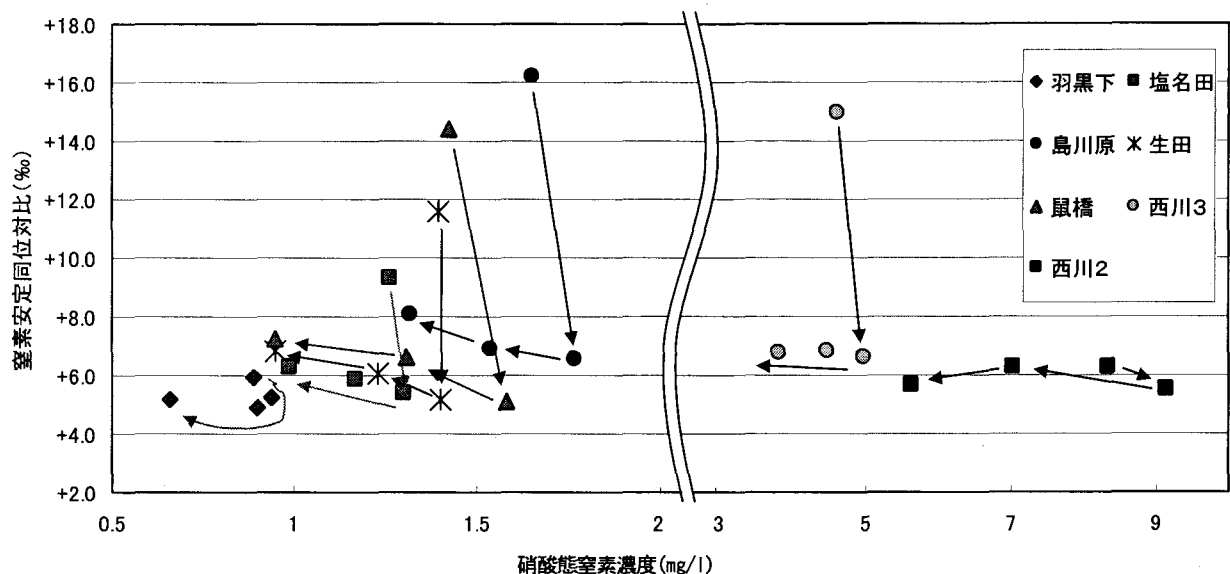


図-9 $\delta^{15}\text{N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の関係

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。また、図-5に流域に占める田、畑および市街地の面積合計の割合と $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度との関係を示す。「西川#2」の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が多少ばらついていものの、両者には高い相関が見られる。

(3) 河川任意地点における負荷流出解析

2. (4)において示された負荷流出解析手法によって算出された N_p の値の変化を図-6に示す。また、図-7に解析を行った7地点の11月～6月の推定流量を示す。図-6については「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、図-7については1月の流量が少なく、5月の流量がかなり大きくなっていることが分かる。また、比較のため、図-8に図-6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。

(4) $\delta^{15}\text{N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の関係

窒素安定同位体比 ($\delta^{15}\text{N}$) と窒素起源の関係については既往の研究で明らかにされており⁹⁾、それによると、降雨、土壌、化学肥料、都市排水の $\delta^{15}\text{N}$ はそれぞれ～3‰、+4‰～+9‰、-4‰～+4‰、+10‰～+20‰、の値を示すことが知られている。これを踏まえて、図-9に解析を行った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 $\delta^{15}\text{N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度を示す。各地点におけるプロットは矢印の向きに沿って1月→2月→3月→4月と変化しており、「西川#2」と「羽黒下」が異なる傾向を示すものの、他の地点では1月の $\delta^{15}\text{N}$ が高く、2月になると $\delta^{15}\text{N}$ が大きく減少し、2月～4月にかけて $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が低下し、 $\delta^{15}\text{N}$ が若干上昇するという逆L字

型の変化傾向を示している。また、図-3に示した土地利用割合のグラフから、市街地の面積割合が大きい地点ほど $\delta^{15}\text{N}$ が高くなる傾向を示していることがわかる。

4. 考察

(1) GISを用いた流域情報の定量化

図-3に示した結果は、流下に伴い流域の土地利用の変化過程を示したものであり、本川の合流による畑面積の減少や流下に伴う市街地や水田の面積割合の増加といったものは、土地利用図を見れば自ずと明らかになるものである。しかし、GISの集水域解析を用いればこれらの視覚的情報を定量的な情報として表現することができる。このように流域情報を定量的に表現することによって、より精度の高い流出負荷解析を容易に行うことができると考えられる。

(2) 硝酸態窒素濃度と土地利用の関係

図-4に示した結果は、田畑、市街地の面積割合が多い地点ほど $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が高くなる傾向を示している。実際、図-5に示したように田畑、市街地の面積割合と $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の間には高い相関関係があり、河川の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の値には流域の土地利用状況が大きな影響を与えていることが分かる。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、図-7に示すように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、田畑からの流出量が少ない。しかし、2月の採水時においては雪解け出水がおきた後であり、

土壤に蓄えられていた窒素負荷が河川に流出したため、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が少し上昇したと考えられる。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壤の窒素が徐々に枯渇していったため、2月から4月にかけて $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が減少したものと考えられる。5月採水時においては出水中であり、降雨によるフラッシュ効果によって土壤の窒素負荷が一気に流出し、それが原因で濃度が一時的に上昇したものと考えられる。

(3) 河川任意地点における負荷流出解析

N_p は採水地点における田畑由来の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度である。よって、上流のレタス畑を貫いて流れている「西川#2」の N_p はほぼ畑から流出したそのままの N_p の値であると考えられる。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、解析の妥当性を示している。また、「西川#2」の N_p は図-4に示した「西川#2」の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の値と同様の季節変動を示しており、畑の割合が多い「西川#2」においては N_p が河川の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度に大きな影響を与えていることが分かる。

図-6で N_p が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-8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。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たり、脱窒作用等によって減少していることによるとも考えられる。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 を使用しているため、流下に伴う $\text{NO}_3\text{-N}$ の減少を考慮しておらず、 N_p を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-4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月については図-7に示すように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。

(5) $\delta^{15}\text{N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の関係

図-9において「西川#2」と「羽黒下」以外の地点における1月の $\delta^{15}\text{N}$ が高い理由は市街地からの負荷流出の影響と考えられる。これは、市街地面積の割合が小さい「西川#2」と「羽黒下」の1月における $\delta^{15}\text{N}$ の値が他の時期とほぼ同水準であることからわかる。1月は積雪のため田畑からの流出負荷量が少なく、相対的に市街地からの流出負荷量が多くなる。しかし、雪解けと共に

$\delta^{15}\text{N}$ の低い田畑からの流出負荷量が増大し、相対的に市街地からの負荷流出量が減少するため、2月になると $\delta^{15}\text{N}$ が低下したと考えられる。また、2月～4月にかけての変化は、土壤の窒素が徐々に枯渇していくため田畑からの流出負荷量が徐々に減少し、相対的に市街地からの流出負荷量が徐々に増加していくために、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が減少し、それに伴って $\delta^{15}\text{N}$ が上昇していると考えられる。

5. 結論

本研究で得られた知見を以下に示す。

1) 標高、土地利用等のGISデータを用いて適切な解析を行うことにより、流域情報を容易に、定量的に、客観的に表現できるようになる。

また、河川の水質に大きな影響を与えていると思われる流域の土地利用状況を定量的に表現することができるため、同じく定量的な情報である水質データとの関係を容易に評価することが可能である。

2) 河川の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は流域の土地利用状況と密接に関係していることが明らかとなった。また、千曲川における流出負荷量は降雨や流域の土地利用の社会的変化によって変化しており、GISと $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度、 $\delta^{15}\text{N}$ の値を用いて田畑からの負荷流出を算出し、土地利用の変化や流下に伴う生物吸収による平面的な変化、流域の社会状況による季節的な変化について定量的に評価した。

3) 窒素安定同位体比の値は、市街地からの窒素負荷流出の割合が相対的に大きくなるほど、高くなる傾向を示し、窒素安定同位体比を用いた負荷流出解析にGISを援用することによってより深みのある解析が可能になる。

参考文献

- 1) V. Alaric Sample : 生態系管理へのリモートセンシングとGISの活用, フジ・テクノシステム, 1999.
- 2) 田淵俊雄, 高村義親 : 集水域からの窒素・リンの流出, 東京大学出版会, 1985.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) Heaton, T H E. : *Isotopic studies of nitrogen pollution in the hydrosphere and atomosphere: A review*, Chemical Geology (Isotopic Geoscience Section), pp87-102, 1986

(2004.9.30 受付)