

# 河川集水域からの栄養塩類・金属類の流出特性

對馬 育夫<sup>1</sup>・岡本 誠一郎<sup>2</sup>

<sup>1</sup>独立行政法人土木研究所 水環境研究グループ水質チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

<sup>2</sup>独立行政法人土木研究所 水環境研究グループ水質チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

河川集水域からの栄養塩類の流出機構を解明するため、印旛沼流入河川である高崎川で晴天時と雨天時の負荷量調査を行い、地点間比較や土地利用との関係から流出特性を調査した。晴天時調査の結果、集水域の畑の割合が高い地域では、河川水中のNO<sub>3</sub>-N濃度が高くなる傾向が観察され、集水域の家畜密度が高いと推察される地域では、K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>が高く、NH<sub>4</sub>-N、溶存態リンの比重負荷量が高くなる傾向が見出された。雨天時調査の結果、増水時に粒子態N、Pの濃度が上昇し、溶存態N、Pの濃度が低下した。雨天時の高崎川各地点のリンの累積比負荷量を基底流出と直接流出に分けると、それぞれ約4%、約96%となり、直接流出のうち約95%は粒子態によるものであった。

キーワード 河川集水域、流出特性、晴天時・雨天時調査

## 1. はじめに

近年、閉鎖性水域や河川において、種々の対策が行われているにも関わらず栄養塩濃度は横ばい傾向にある。これまで水質改善のために、河川管理者によるマスタープラン策定が行われているが、発生源ごとの水域への栄養塩類の流出機構は明らかにされていない。本研究では、栄養塩類の発生源別の流出機構の解明を行うことを目的とし、印旛沼流入河川である高崎川を対象に晴・雨天時の水質とその集水域の土地利用の関係について調査を行った。

## 2. 調査方法

### (1) 調査河川と水質調査地点

図-1に高崎川集水域(79 km<sup>2</sup>)と採水調査地点を示す。晴天時調査は、本流の7地点(上流から下流に向かってA~G)と、3つの支流(支流c1, c2, d1, d2, f1, f2)の計13地点で、2013年1月から2月にかけて4回実施した。雨天時調査は、本流のA, C, E, Gの4地点で、8回の流量観測と水質調査(3時間ピッチ)を2012年11月17日に実施した。なお、先行晴天日数は4日、累積降雨量は38.5 mmであった。

### (2) 土地利用情報の整理

高崎川集水域の土地利用情報はGIS(Geographic Information System)を用いて整理した。調査地点おける各集水域の範囲は、数値地図50 mメッシュ標高データ<sup>1)</sup>

から求めた各メッシュの流下方向に基づき決定した。土地利用については国土数値情報<sup>2)</sup>を利用し、100 m細分メッシュデータを水田、畑、森林、市街地、その他の5種に区分して土地利用割合を求めた。人口と家畜頭数については「地図で見る統計」<sup>3)</sup>のうち、平成17年国勢調査および農林業センサスを利用した。人口については、500 mメッシュ人口データをもとに、家畜頭数については、市町村別家畜頭数を対応する市町村の500 mメッシュに均等に配分し集計した。

### (3) 水質調査方法

本調査では、現地で水温、pH、DO、ECおよび流量を測定するとともに河川水を採水し、水質分析を行った。水質測定項目はSS、VSS、DOC( TOC-5000: 島津製作所)、T-N、T-Pおよび溶存態N、P(TRAACS2000:

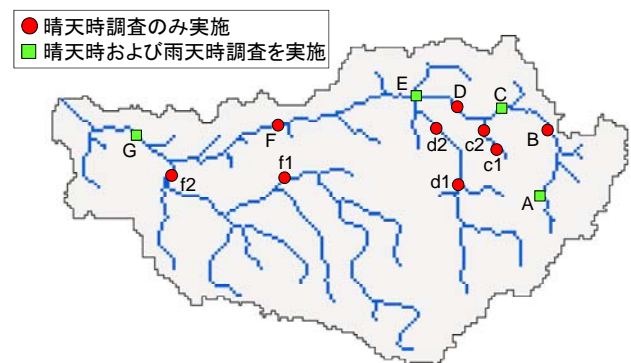


図-1 高崎川概形と調査地点

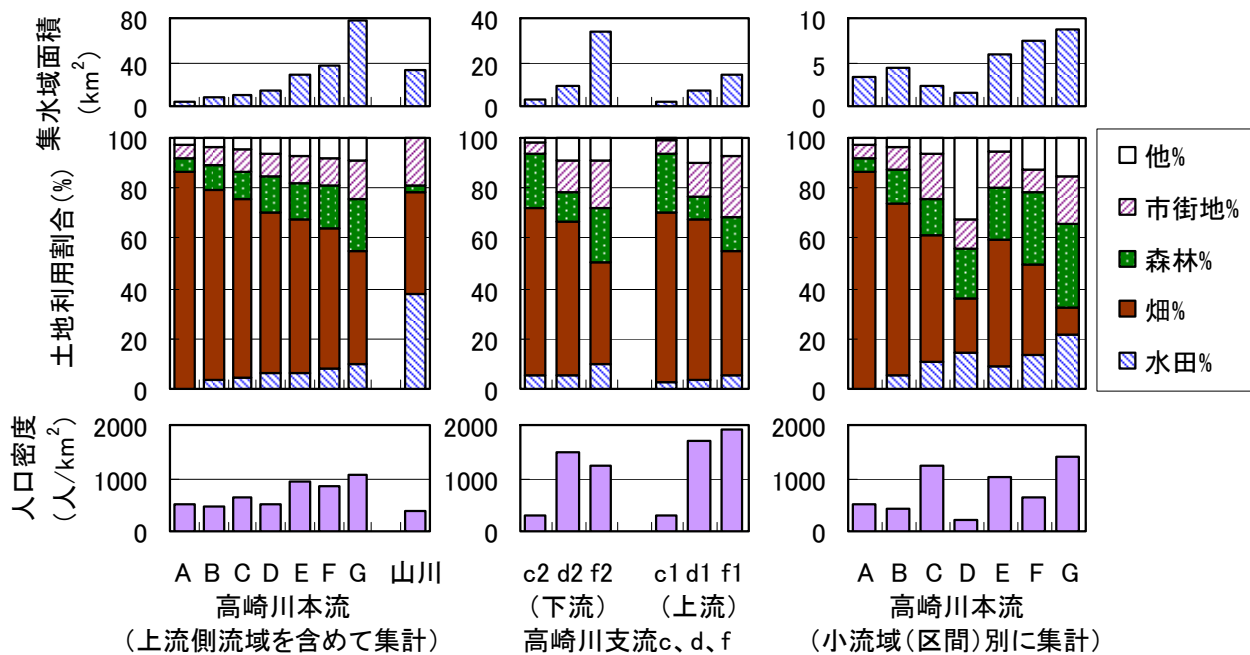


図-2a

図-2b

図-2c

図-2 各調査地点集水域の土地利用割合

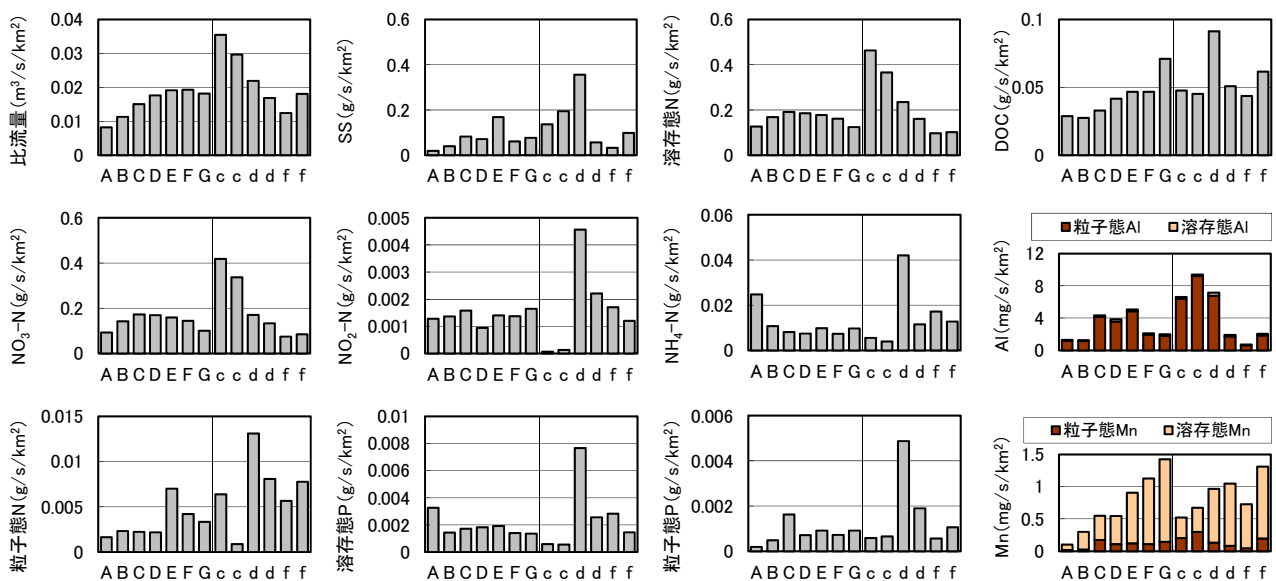


図-3 各調査地点における比流量および各物質比負荷量 (晴天時調査)

BRAN+LUEBBE),  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{N}$ ,  $\text{PO}_4\text{P}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  (イオンクロマトグラフDX-120およびICS-1100: 日本ダイオネクス)である。金属類は、総濃度と溶存態の濃度を測定した。粒子態濃度は、総濃度から溶存態の濃度を差し引いて求めた。測定項目はFe, Al, Zn, Cu, Mn, B, Ni, Co, Mo, Se (ICP-MS X7CCT: サーモフィッシャーサイエンティフィック)である。

流量観測は、河川を横断方向に適宜分割して水深と流速を測定し、流量を河川断面積と流速の積として算出した。流速は電磁流速計を用い、6割水深で測定した。ただし、地点Gの雨天時調査では水深のみの測定であった。

#### (4) 雨天時調査のデータの解析方法

雨天時調査の結果を解析するにあたり、佐倉観測所の1時間ごとの雨量データを使用した。各水質成分濃度、流量、集水域面積から比流量と比負荷量を求め、L-Q式を導出した。また、流量と負荷量について、基底流出分と直接流出分を分離し、土地利用との関係を調べた。

### 3. 結果と考察

#### (1) 集水域の土地利用特性

図-2aに高崎川本流の地点A~Gの集水域面積と土地利用割合、人口密度を示す。高崎川では、どの地点におい

でも畑が占める土地利用割合が最も高かった。特に最上流の地点Aでは、畑の割合は86%であり、地点G（高崎川全体）においても44%であった。図-2bに高崎川の3支流c, d, fの集水域面積と土地利用割合を示す。支流cは支流d, fに比べ、市街地の割合が低い地域であることがわかる。また、下流域のみと上流域のみで比較した場合も同様の傾向であった。図-2cに採水区間ごとの小流域A~Gの面積と土地利用割合を示す。畑の割合は下流に向かって減少していく傾向があるが、地点Eで一旦増加していた。また、森林の割合は市街地の割合が高い下流Gで最大となっていた。家畜頭数は、市町村別データの特長上、小流域ごとには算出できなかったが、全集水域でみると、高崎川では乳牛、肉牛、豚がそれぞれ800, 1,170, 6,250頭だった。

窒素、各態リン、DOC、Al、Mnの比負荷量である。比流量は、地点Aで低く、地点c1, c2で高かった。SSの比負荷量は、本流では地点Eで、支流では地点d1で高かった。溶存態窒素とNO<sub>3</sub>-Nの比負荷量は、比流量と同様の傾向を示し、支流cの比負荷量が高いことがわかる。NO<sub>2</sub>-Nは、地点d1で、NH<sub>4</sub>-Nは地点Aとd1で比負荷量が高かった。粒子態窒素の比負荷量は、本流では地点Eで、支流ではc2を除いた5地点で高かった。溶存態リンの比負荷量は、NH<sub>4</sub>-Nと同様の傾向を示した。粒子態リンの比負荷量は、溶存態リンと異なり、地点Aで低かった。DOCの比負荷量は、下流ほど高くなっていった。また、地点d1で高かった。Alの比負荷量は、本流では地点C, D, Eで、支流では地点c1, c2, f1で高かった。Mnの比負荷量は、本流では下流側ほど高く、支流ではd1, d2, f2で高かった。

## (2) 晴天時調査

栄養塩類の流出について、各調査地点における比負荷量を算出した。図-3は、各地点の比流量およびSS、各態

以上、晴天時調査から、家畜密度の高い集水域でNH<sub>4</sub>-N、溶存態リンが高くなる傾向がみられた。

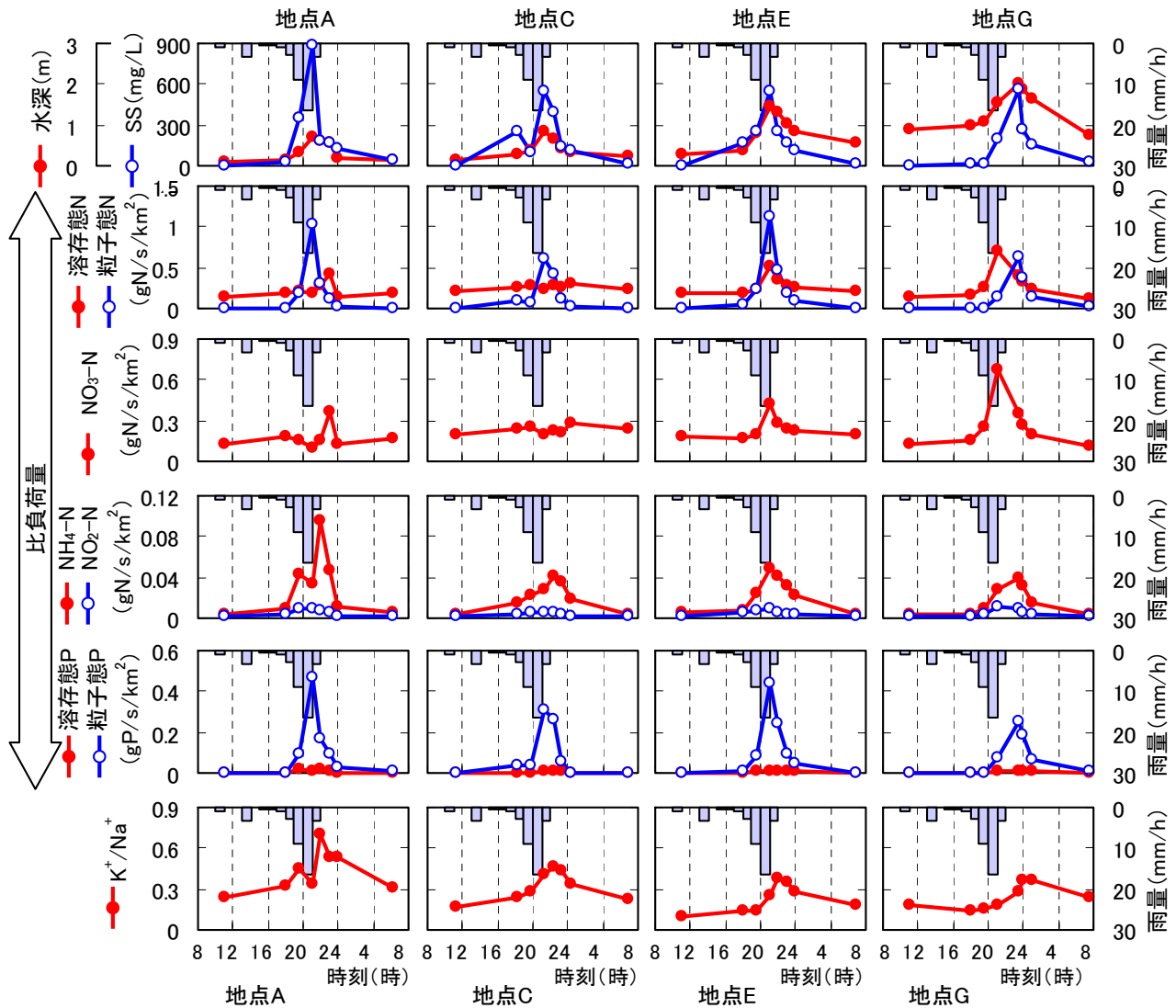


図-4 各調査地点における水深、窒素・リン負荷量、K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>比

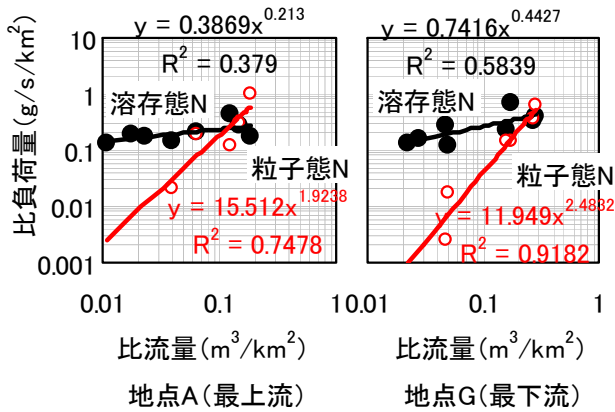


図-5 地点A, Gにおける比流量と各態窒素の比負荷量の関係

### (3) 雨天時調査

#### a) 雨天時調査の結果

図-4に各調査地点における雨量と水深、各態窒素比負荷量、各態リン比負荷量、 $K^+/Na^+$ の経日変化を示す。雨天時調査では、雨量のピークは21時ごろであった。地点A, C, Eでは水深のピークは雨量のピークの直後となったが、地点Gでは水深のピークは雨量のピークに対して約4時間遅れていた。

溶存態窒素比負荷量は、地点Aでは小さいピークを示し、Cでは概ね横ばい、地点E, Gでは増水時に上昇した。粒子態窒素はいずれの地点でも増水時に上昇した。比負荷量が最大となった時間に着目すると、地点Gの溶存態窒素のピークは粒子態窒素のピークよりも先行していた。 $NO_3-N$ の比負荷量は、溶存態窒素と同様の变化を示した。地点Gでは、他の地点と比較してピーク時の上昇が大きかった。 $NH_4-N$ と $NO_2-N$ の比負荷量は、いずれの地点でも増水時に上昇した。地点Aでは、他の地点と比較してピーク時の $NH_4-N$ の上昇が大きかった。粒子態リンの比負荷量は、粒子態窒素と同様の变化を示し、いずれの地点でも増水時に上昇した。溶存態リンの比負荷量は、粒子態リンと比較すると小さかった。 $K^+/Na^+$ は、いずれの地点でも増水時に上昇し、ピークの時間は水深のピークとほぼ一致していた。地点間で比較すると、ピーク時の $K^+/Na^+$ は、降雨前と同様地点Aで最大となっていた。雨天時においても、家畜密度が高いと推察される地点Aで、 $NH_4-N$ 比負荷量と $K^+/Na^+$ が高くなる傾向がみられた。

#### b) 雨天時の流出負荷量の解析

図-5に溶存態窒素と粒子態窒素の地点Aと地点Gにおける比流量と比負荷量の関係を示す。比流量と窒素比負荷量は、両対数グラフ上で概ね直線上にプロットされ、窒素の存在形態によって傾きが異なることがわかった。そこで、比流量と各水質成分の比負荷量の関係を、以下のL-Q式で表した。

$$L = a \cdot Q^b$$

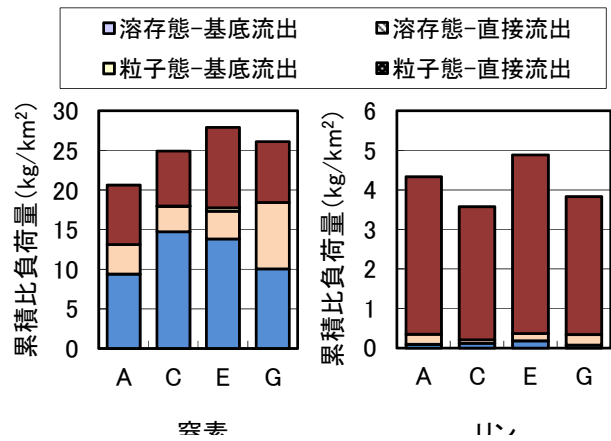


図-6 窒素とリンの累積比負荷量とその内訳

ただし、 $L$ : 比負荷量

$Q$ : 比流量

$a, b$ : 定数

定数 $a, b$ は、比流量と比負荷量をそれぞれ常用対数に変換して最小二乗法により回帰直線を求めて算出した。定数 $b$ は増水時の濃度変化を反映し、 $b < 1$ は濃度が低下する希釈型、 $b > 1$ は濃度が増加する洗い出し型、 $b = 1$ は濃度が変化しない一定型に分類される<sup>5)</sup>。定数 $b$ に着目すると、溶存態窒素、 $NO_3-N$ 、 $NO_2-N$ はいずれも希釈型であった。 $NH_4-N$ は、上流側の地点A, Cでは $b = 1$ 、地点E, Gとなった。希釈型とならなかった地点A, Cでは、雨天時に集水域から $NH_4-N$ が流出したと考えられる。粒子態窒素は、高崎川ではすべての地点で洗い出し型となった。溶存態リンは、高崎川では概ね希釈型であった。粒子態リンはいずれの地点でも洗い出し型となった。地点Cでは他の地点と比較して、粒子態リンの定数 $b$ が高かった。

L-Q式の定数 $b$ から、出水時には溶存態窒素濃度は低下し、粒子態リン濃度は増加することなど、各物質の流出特性が明らかとなった。降雨が栄養塩類の流出負荷量に及ぼす影響は、河川が増水した期間全体で評価する必要がある。そこで、地点別に累積流量と各水質成分の累積負荷量を求め、基底流出分と直接流出分に分解した。累積負荷量の計算は、1回目の調査から最後の調査までの時間範囲で行った。各調査間の濃度の变化を直線で仮定し、全体の累積負荷量を算出した。基底流出の各時間の負荷量は1回目(増水前)の負荷量と等しいと仮定して、基底流出分の累積負荷量を算出した。そして、全体から基底流出分を差し引いて直接流出分の累積負荷量を求めた。最後に、地点間の比較のため、集水域面積で割って累積比負荷量を求めた。

図-6は、各態窒素と各態リンの累積比負荷量である。全窒素の累積比負荷量は、地点Aよりも地点C, E, Gで大きかった。全窒素の累積比負荷量のうち、基底流出と直接流出はそれぞれ39~59%、41~61%となった。高崎川では、直接流出のうち48~74%は粒子態によるもので

あった。全リンの累積比負荷量は、地点別では地点Eで大きかった。リンの累積比負荷量を基底流出と直接流出に分けると、それぞれ約4%、約96%となり、直接流出のうち約95%は粒子態によるものであった。

#### 4. まとめ

河川集水域からの栄養塩類の流出機構を解明するため、印旛沼流入河川である高崎川を対象とし、晴天時と雨天時の負荷量調査を行った。濃度、負荷量、比負荷量の地点間比較や土地利用との関係から流出特性を調査した。得られた知見を以下に示す。

晴天時調査からは、

- (1) 集水域の畑の割合が高い上流の調査地点で、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が高かった。
- (2) 集水域に畜産農家が点在する最上流の調査地点では、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、溶存態リン、 $\text{K}^+$ 濃度が高く、 $\text{Na}^+$ 濃度が低かった。
- (3) 金属成分については、FeとAlは粒子態の割合が、Mn、B、Niは溶存態の割合が高かった。
- (4) 小流域ごとの比負荷量を求めると、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の比負荷量は、最上流の地点の集水域で大きかった。溶存態リンは、最上流だけでなく中流にも負荷の大きい集水域があった。

雨天時調査からは、

- (5) 溶存態窒素と $\text{NO}_3\text{-N}$ の濃度は、増水のピーク時に低下した。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は高崎川の上流側で上昇した。
- (6) 高崎川の調査では、L-Q式の定数bからは、粒子態N、Pは洗い出し型、溶存態N、Pは希釈型に分類された。また、粒子態成分は概ね洗い出し型、溶存態成分は概ね希

釈型に分類されたが、溶存態Alは洗い出し型に分類された。

- (7) 各地点の窒素の累積比負荷量を基底流出と直接流出に分けると、それぞれ39~59%、41~61%となり、直接流出のうち48~74%は粒子態によるものであった。
- (8) リンの累積比負荷量を基底流出と直接流出に分けると、それぞれ約4%、約96%となり、直接流出のうち約95%は粒子態によるものであった。
- (9) 小流域別の累積比負荷量を算出した結果、高崎川の上流では $\text{NH}_4\text{-N}$ の比負荷量が高いことがわかった。
- (10) 雨天時の直接流出分の累積比負荷量から $\text{K}^+\text{Na}^+$ を求めると、高崎川の上流と山川で高い値を示した。

#### 参考文献

- 1) 平成13年版数値地図50mメッシュ（標高）日本一II，国土地理院
- 2) 国土数値情報（平成22年度版行政界データ，平成21年度版河川流域界データ，平成18年度版土地利用細分メッシュデータ），国土交通省
- 3) 地図で見る統計（H17国勢調査ー世界測地系（500mメッシュ），2005年農林業センサスー農業（総数）），総務省統計局
- 4) 平成21年度利根川流域別下水道整備総合計画に関する基本方針策定調査報告書，利根川流域別下水道整備総合計画検討委員会（2009）
- 5) 岩田杉夫，遠藤忠嗣，井上隆信，横田久里子，大久保陽子(2013)，中小河川からの栄養塩負荷の流出特性，水環境学会誌，36(2)，39-47.