

## 10.1 流域スケールで見た物質動態特性の把握に関する研究 ②

研究予算：運営交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：水環境研究グループ（水質）

研究担当者：池田 茂、鈴木 穰、小森行也、  
平山孝浩、北村友一、柴山慶行

## 【要旨】

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、鬼怒川支流の山川で雨天時の負荷量調査を行った。そして、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。晴天時調査からは、集水域の畑の割合が高いほど河川水中の  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度が高くなる傾向がみられた。集水域の家畜密度が高いと推察される最上流の地点は、 $\text{K}^+\text{Na}^+$  が高く、比負荷量では  $\text{NH}_4\text{-N}$ 、溶存態リンが高かった。雨天時調査からは、高崎川では、増水時に粒子態  $\text{N}$ 、 $\text{P}$  の濃度が上昇し、溶存態  $\text{N}$ 、 $\text{P}$  の濃度が低下した。雨天時の高崎川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 48～74% は粒子態によるものであった。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、直接流出の約 95% は粒子態によるものであった。

キーワード：印旛沼、山川、栄養塩、土地利用、雨天時調査

## 1. はじめに

近年、閉鎖性水域や河川においては、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。閉鎖性水域においては富栄養化が常態化しており、環境基準の達成率が低い。閉鎖性水域の水質を良質に保つ必要がある。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が明確でないという問題点がある。本研究は、栄養塩類の発生源別と雨天時流出機構の解明を行うことを目的としている。H23 年度は、霞ヶ浦流域と印旛沼流域を対象に各河川水質と、その集水域の土地利用の関係について統計解析を行った。その結果、集水域の畑の割合、豚飼育密度と河川水中の  $\text{T-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度の間に有意な正の相関があることがわかった。しかし、畑の割合と豚飼育密度の寄与の程度は不明であった。本年度は引き続き、畑の割合と豚飼育密度が高い印旛沼流入河川である高崎川を対象とし、昨年度より調査地点を増やし、晴天時と雨天時の栄養塩類の流出特性を詳細に調査した。また、

畜産業が盛んである鬼怒川支流の山川で雨天時調査を行い、高崎川と比較した。

## 2. 調査方法

## 2.1 調査河川と水質調査地点

本年度は、印旛沼流入河川の鹿島川の支流である高崎川と、鬼怒川の支流である山川を対象に、集水域の土地利用情報を整理し、栄養塩類の負荷量調査を実施した。図-1 は、高崎川と山川の集水域と採水調査地点である。集水域の面積は、高崎川で  $79\text{km}^2$ 、山川で  $32\text{km}^2$  である。高崎川の晴天時調査は、平成 25 年 1 月から 2 月にかけて 4 回実施した。本流の 7

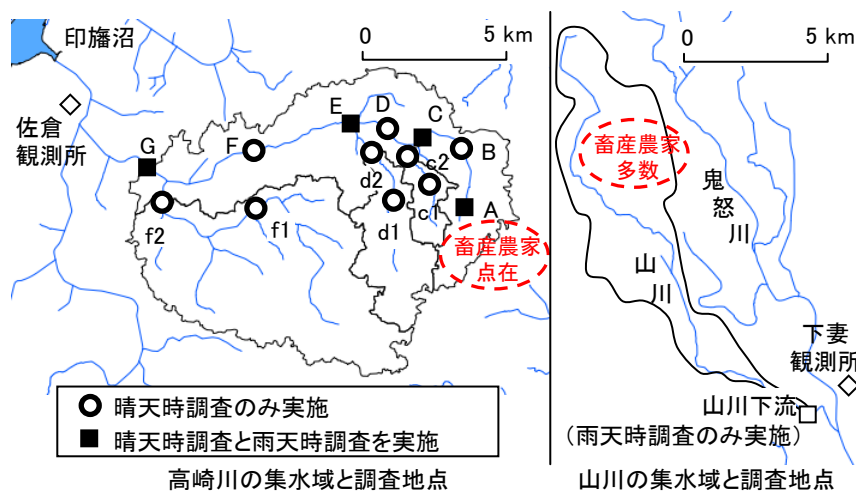


図-1 調査河川の高崎川と山川の概形および調査地点

地点（上流から下流に向かってA～Gとする）と、3つの支流（支流c、d、fとする）それぞれの上流と下流の、計13地点で調査した。

高崎川の雨天時調査は、平成24年11月17日に実施した。先行晴天日数は4日、累積降雨量は38.5mmである。降雨開始前を含め数時間おきに8回、本流のA、C、E、Gの4地点で流量観測と水質調査を行った。

山川の雨天時調査は、平成24年11月6日に実施した。先行晴天日数は5日、累積降雨量は40mmである。下流側の1地点で数時間おきに流量観測と水質調査を11回行った。

## 2.2 土地利用情報の整理

各採水地点より上流の集水域の土地利用情報を、GIS (Geographic Information System) を用いて整理した。高崎川では、数値地図50m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集水域の範囲を決定した。土地利用のデータは国土数値情報<sup>2)</sup>を利用した。人口と家畜頭数のデータは、「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。

土地利用は、平成18年度版の100m細分メッシュデータを水田、畑、森林、市街地、その他の5種に区分して集水域ごとに集計し、土地利用割合を求めた。人口は、500mメッシュ人口データをもとに、集水域ごとに集計して求めた。家畜頭数は、市町村別家畜頭数を対応する市町村の500mメッシュに均等に配分し、全集水域で集計した。

山川では、集水域の範囲、土地利用割合、人口、家畜頭数のデータは、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<sup>4)</sup>を用いた。

## 2.3 水質調査方法

晴天時、雨天時それぞれの調査では、現地でも水温、pH、DO、ECを測定するとともに河川水を採水し、流量観測を行った。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: BRAN+LUEBBE)、NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N、PO<sub>4</sub>-P、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (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。高崎川の地点Gの雨天時調査では水深のみの測定であった。

## 2.4 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、高崎川は佐倉観測所、山川は下妻観測所の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

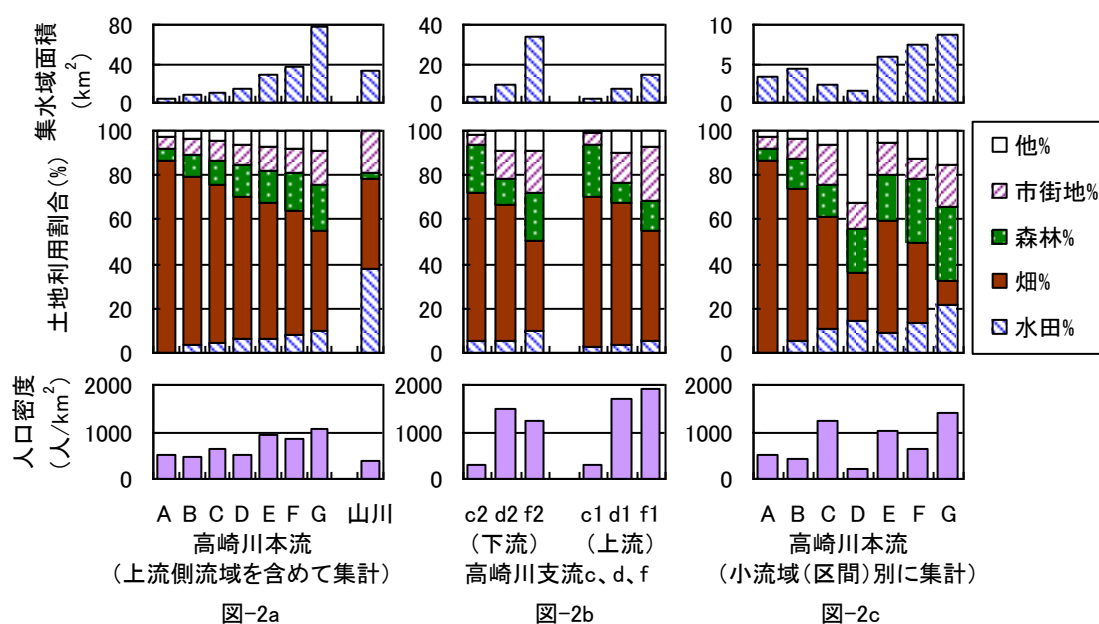


図-2 高崎川13調査地点の集水域と、山川の集水域の面積、土地利用割合、人口密度

接流出分を分離し、土地利用との関係を調べた。なお、高崎川の地点 G については雨天時の流量観測ができなかったため、流量は推定値を用いた。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 集水域の土地利用特性

図-2a は高崎川本流の地点 A～G の集水域面積と土地利用割合、人口密度である。比較のため山川のデータを合わせて示した。高崎川では、最上流の地点 A の畑の割合は 86% であり、地点 G (高崎川全体) の畑の割合は 44% である。本流では下流の調査地点ほど畑の割合が低く、水田、森林、市街地、その他の割合が高い。山川では畑と水田の割合はいずれも 40% で、森林の割合は 3% と低い。高崎川の人口密度は山川と比較して高く、地点別でみると下流側の地点 E、F、G で高い。

図-2b は、3つの支流 c、d、f の集水域面積と土地利用割合である。支流 c は他の支流と比較すると、畑の割合と森林の割合が高い。支流 f は集水域面積が最も大きい支流であり、市街地の割合が高い。各支流の上流のみで比較した場合も同様の傾向である。人口密度は支流 d と f で高い。

図-2c は、採水区間ごとの小流域 A～G の面積と土地利用割合である。小流域の面積は、D が最小、G が最大である。畑の割合は小流域 A、B で高く、森林の割合は小流域 F、G で高い。市街地の割合は他の小流域と比較すると C、G で高い。人口密度は小流域 C、E、G で高い。

家畜頭数は、市町村別データの特性上、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 頭であった。山川ではそれぞれ 119、864、17,005 頭であった。全集水域の豚の密度は高崎川で 80 頭/km<sup>2</sup>、山川で 530 頭/km<sup>2</sup> となった。なお、高崎川の現地調査から、上流の地点 A 付近に畜産農家が点在していることを確認した。

#### 3.2 晴天時調査

##### 3.2.1 晴天時調査の結果

図-3 は、各調査地点の SS 濃度、溶存態窒素、粒子態窒素、NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N、溶存態リン、粒子態リン濃度の 4 回の平均値である。SS 濃度は、本流の地点 E と支流の地点 d1 で高かった。

全窒素濃度 (溶存態+粒子態) は 6.0～15.5mgN/L の範囲であり、本流の地点 A～G では上流ほど高い値を示し、支流の地点 c1、c2 でも高かった。いずれの地点でも粒子態窒素濃度は 0.6mgN/L 以下であり、全窒素濃度の大部分は溶存態であった。

NO<sub>3</sub>-N 濃度は、概ね全窒素濃度と同様の傾向を示し、地点 A、B、C、c1、c2 で高かった。溶存態窒素濃度に占める NO<sub>3</sub>-N 濃度の割合は、いずれの地点でも 70% 以上となった。全窒素濃度と NO<sub>3</sub>-N 濃度は、畑の割合と正の相関があることがわかる。

NO<sub>2</sub>-N 濃度は本流の地点 A、B、C と支流の地点 d1、d2、f1 で高かった。

NH<sub>4</sub>-N 濃度は、最上流の地点 A で最も高い値を示した。支流では地点 d1、f1 で高かった。

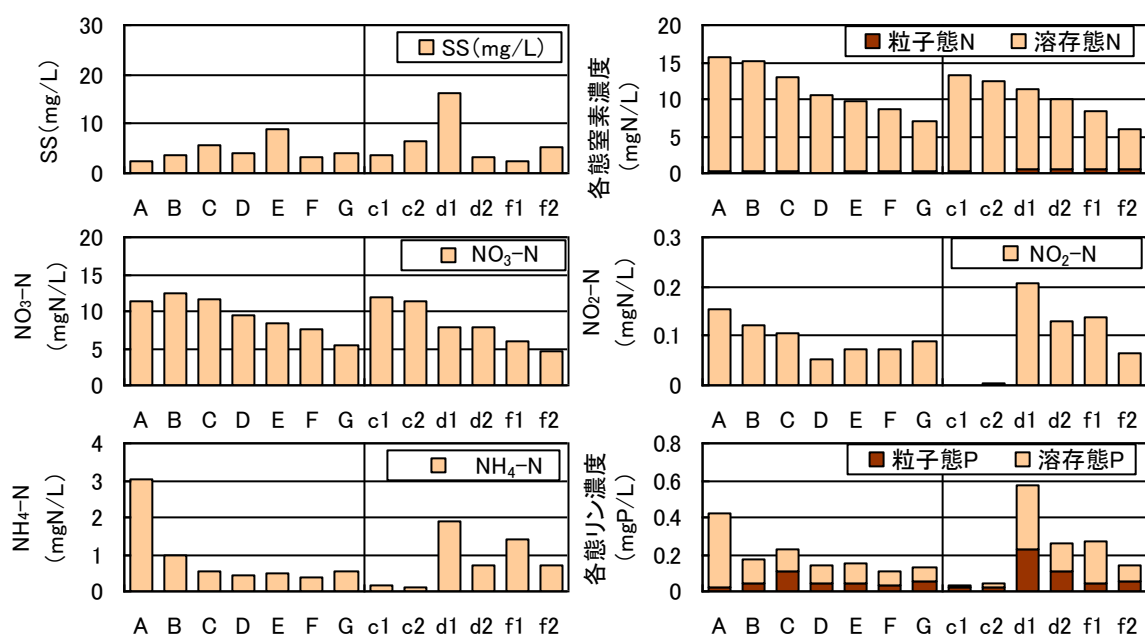


図-3 高崎川晴天時調査の SS、各態窒素、NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N、各態リン濃度の平均値

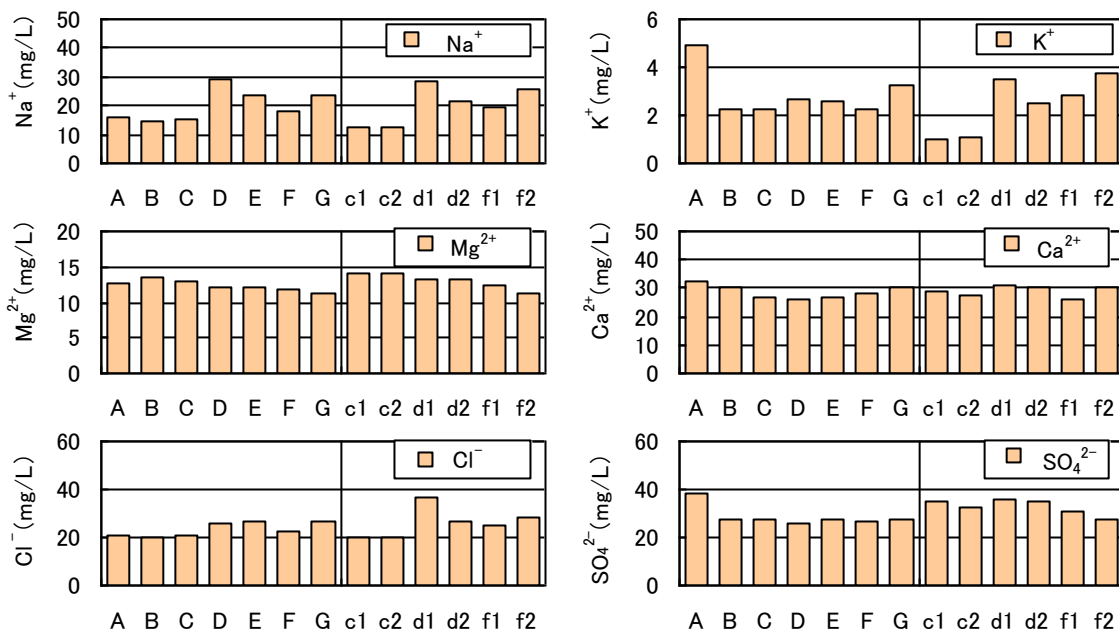


図-4 高崎川晴天時調査のNa<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度の平均値

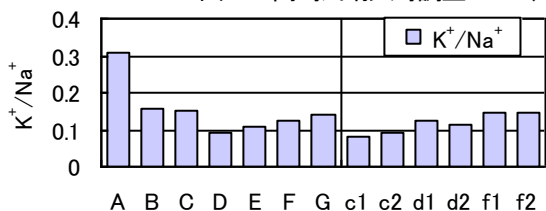


図-5 高崎川晴天時調査のK<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>

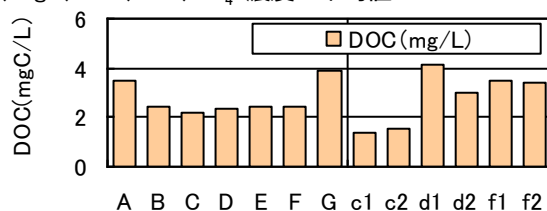


図-6 高崎川晴天時調査のDOC濃度の平均値

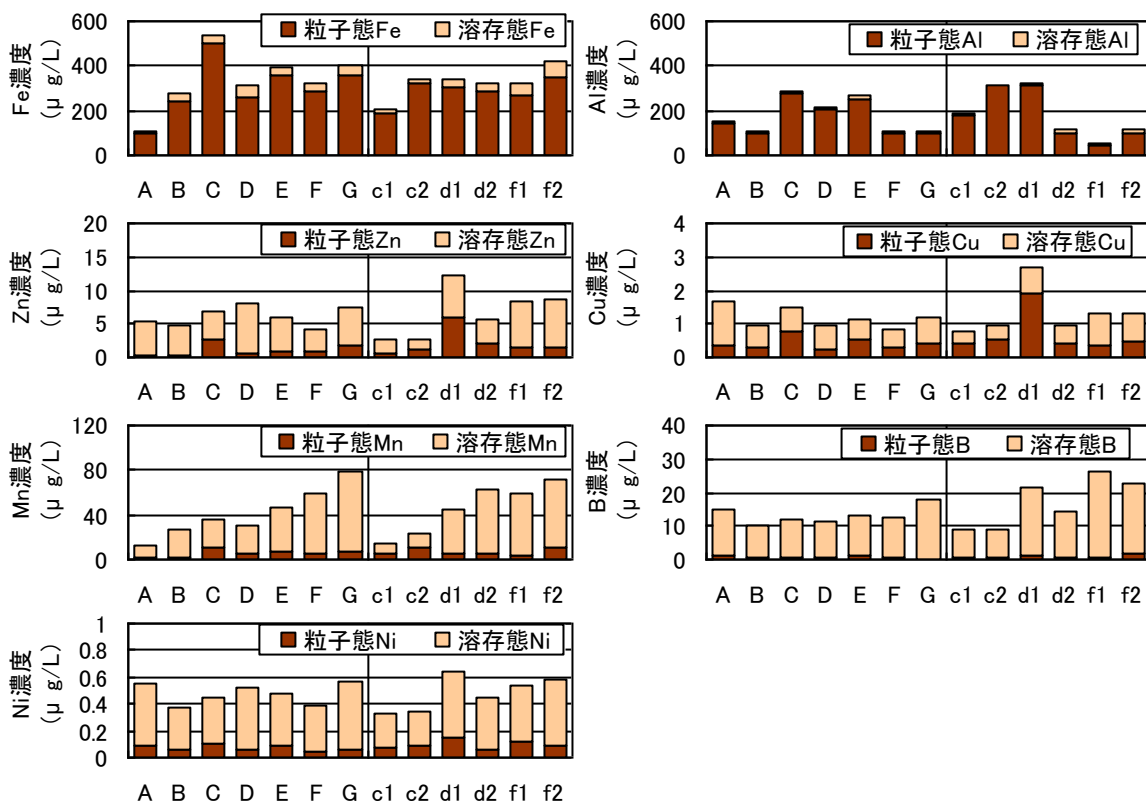


図-7 高崎川晴天時調査の粒子態と溶存態のFe、Al、Zn、Cu、Mn、B、Ni濃度の平均値

全リン濃度は、0.03~0.57mgP/Lの範囲であり、最上流の地点Aは地点B~Gと比較して高い値を示した。支流では地点d1で高かった。リンの存在形態をみると、地点Aでは大部分が溶存態リンであったが、地点d1では粒子態リンの割合が高かった。地点Gでは、全リンに対する粒子態リンの割合は約40%であった。

図4は、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度の、各調査地点の平均値である。Na<sup>+</sup>濃度は、地点A~Cで低く、地点D~Gで高かった。支流では地点c1、c2で低く、地点d1、d2、f1、f2で高かった。Na<sup>+</sup>濃度と集水域の人口密度は、地点Dを除くと概ね正の相関を示した。

K<sup>+</sup>濃度は、集水域に畜産農家の点在する地点Aで最大となった。地点B~Fでは濃度の違いは小さかった。地点c1、c2では他の地点と比較して低かった。

Mg<sup>2+</sup>濃度は、本流の上流で高くなる傾向がみられた。3つの支流を比較すると、支流cで高かった。

Ca<sup>2+</sup>濃度は、本流では地点AとGで高かった。支

流では地点による違いは小さかった。

Cl<sup>-</sup>濃度は、本流では、地点D、E、Gで高かった。支流では地点d1で高い値を示した。

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度は、地点Aで高かった。地点B~Gの値は概ね等しかった。支流cと支流dは、支流fと比較して高い値であった。

図5は、各調査地点のK<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>である。K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>は、畜産排水の流入する河川で高くなることが知られている<sup>5)</sup>。地点Aでは約0.3、他の地点はいずれも0.2以下であった。地点Aの高いNH<sub>4</sub>-N濃度とK<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>は、この集水域内の豚飼育密度が高いと推察されることから、畜産に由来するものと考えられる。

図6は、各調査地点のDOC濃度の平均値である。DOC濃度は、本流では地点A、Gで、支流ではd1で高い値を示した。

図7は、各地点の溶存態と粒子態の金属(Fe、Al、Zn、Cu、Mn、B、Ni)濃度の平均値である。河川水中の金属を粒子態と溶存態で区分すると、Fe、Alは主に粒子態、Bは主に溶存態で存在していた。Mn、

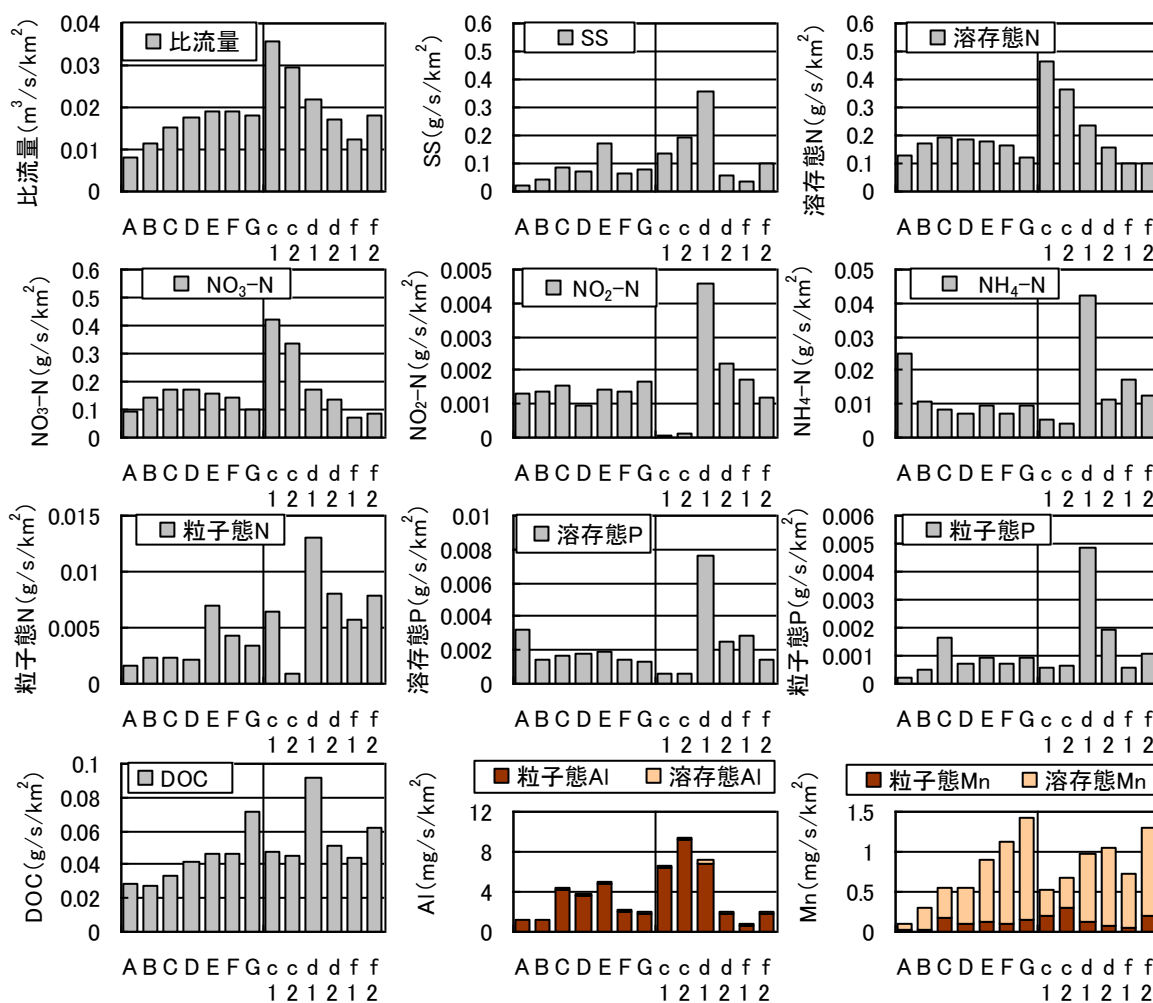


図-8 各地点の比流量と、SS、各態窒素、各態リン、DOC、Al、Mnの比負荷量

Zn、Cu、Ni は粒子態と溶存態の両方が含まれており、地点によって割合が異なった。地点別では、Mn は下流の地点ほど高くなる傾向がみられた。Fe は他の地点と比較して地点 A で低かった。Zn と Cu は、地点 d1 で高かった。Al は地点 C、c2、d1 で、B は d1、f1、f2 で高かった。Ni は、地点間で大きな違いはみられなかった。溶存態 Mn は、畑の割合と負の相関を示したものの、金属濃度と土地利用との明確な関係は見出せなかった。

### 3.2.2 晴天時の流出負荷量の解析

栄養塩類の流出についてより詳細に解析するため、負荷量と比負荷量を算出した。すなわち各水質成分の濃度について、4 回の調査の平均値を求め、平均流量を掛けて地点別の負荷量を算出し、上流側流域を含めた集水域の面積で割って比負荷量を求めた。図-8 は、各地点の比流量と、SS、各態窒素、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。

図-9 は、高崎川各調査地点の位置関係と、地点ごとの溶存態窒素の負荷量である。下流の地点ほど溶存態窒素の負荷量が增大していることがわかる。下流の負荷量と、上流の負荷量の差は、その区間の小流域からの流入負荷量を表すと考えられる。そこで、地点 A~G と支流 c、d、f について各水質成分の負荷量の差分を算出し、対応する区間の小流域の面積で割って、それぞれの小流域の比負荷量を求めた。図-10 は、各小流域別の、比流量と各水質成分

の比負荷量である。

比流量は地点 C、E、支流 c で高かった。

SS の比負荷量は、地点 E で高かった。地点 D、F では差分が負の値になっており、粒子の沈降による負荷量の減少が考えられる。

溶存態窒素の比負荷量は、地点 D では負の値、他の地点では正の値となり、地点 C と支流 c で高かった。NO<sub>3</sub>-N の比負荷量は、溶存態窒素と同様であった。NO<sub>2</sub>-N は、地点 D では負の値、他の地点では正の値となり、地点 G で高かった。NH<sub>4</sub>-N の比負荷量は、地点 A で最大となった。地点 B、C、F では 0 に近い値であった。粒子態窒素の比負荷量は、地点 E で高かった。

溶存態リンの比負荷量は、地点 A、B、D で高かった。粒子態リンの比負荷量は、地点 C で高かった。

Na<sup>+</sup>と K<sup>+</sup>は、地点 D で高かった。Mg<sup>2+</sup>は、溶存態窒素と同様の傾向を示し、地点 C と支流 c で高かった。Ca<sup>2+</sup>は、地点 A、B、D では他の地点より低い値であった。Cl<sup>-</sup>は、Na<sup>+</sup>と同様の傾向を示し、地点 D で高く、地点 A、F で低かった。SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>は Mg<sup>2+</sup>と同様の傾向を示した。DOC の比負荷量は、すべての地点で正の値となり、地点 G で高かった。

溶存態の金属では、Fe、Al、Zn が地点 D で高かった。Cu は地点 C、D、F で高かった。Mg は下流の地点ほど高くなっていた。B は地点 C、E、G、支流 f で高く、地点 A、B で低かった。Ni は地点 D、G で高かった。

粒子態の金属では、差分が負の値になる地点が多く、粒子の沈降によって負荷量が減少したものと考えられる。Fe は地点 C、E で高く、Al は地点 C、E と支流 c で高かった。Zn は地点 C、G で高く、Cu は地点 C、E で高かった。Mn は地点 C で、B は地点 E で、Ni は地点 C、E で高かった。地点 C、E では、調査回数 4 回のうち 1 回で粒子態金属濃度が高くなったため、上記の結果となった。晴天時でも金

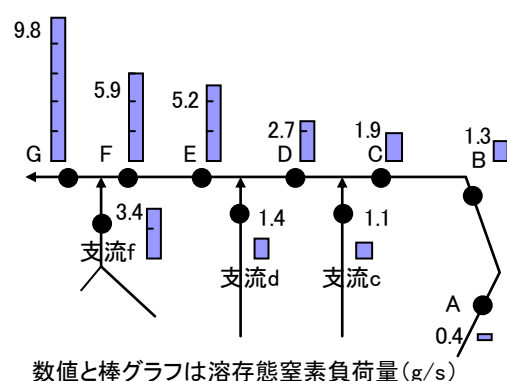


図-9 地点間の位置関係と、溶存態窒素負荷量

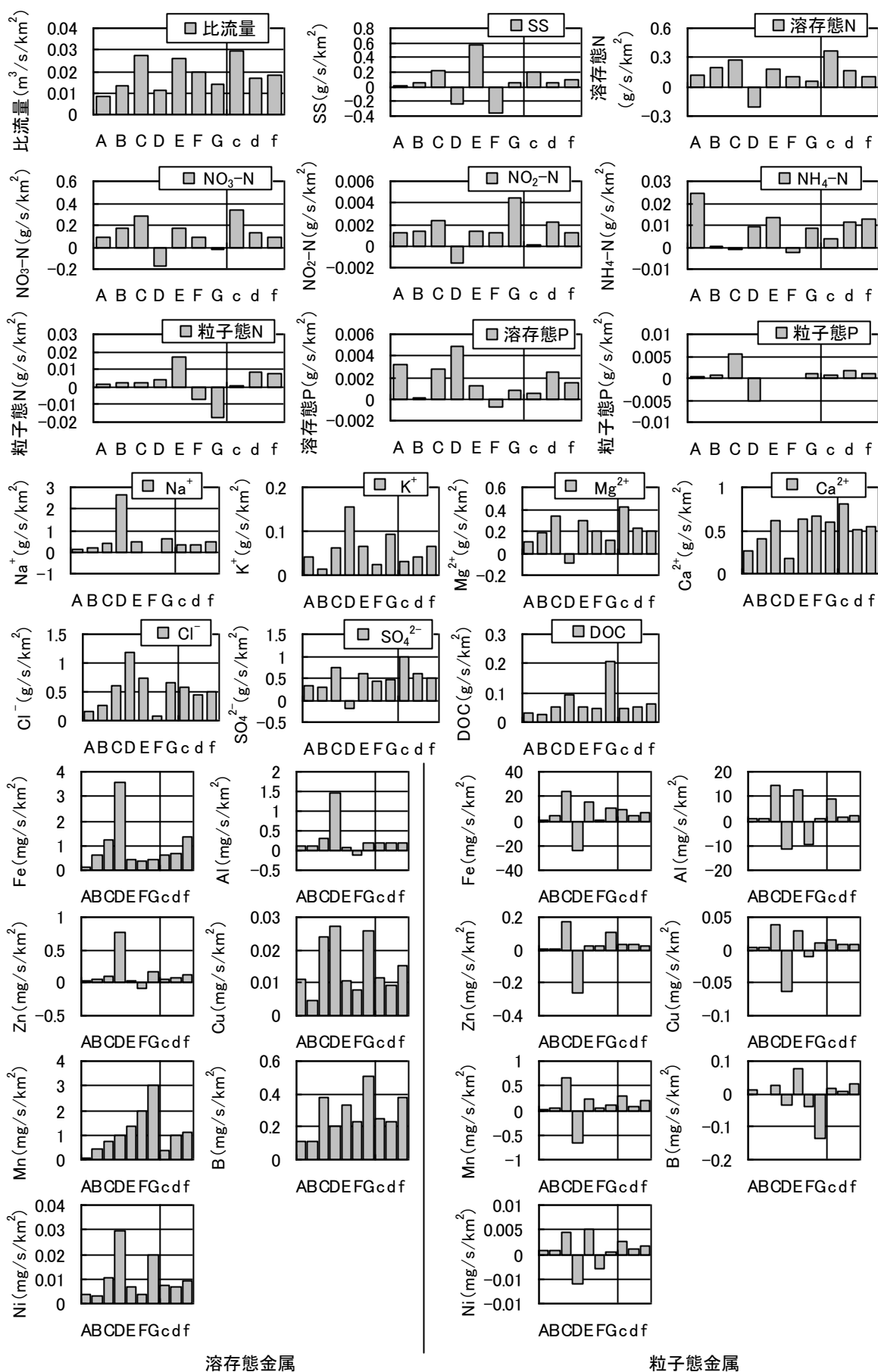


図-10 小流域 (区間) 別に求めた、比流量と、各水質成分の比負荷量

属類の流出特性は変動することが明らかになったことから、より精度の高い金属類の流出特性解析のためには、調査回数や採水ポイントを増やす必要がある。

単位面積あたりの各負荷量と土地利用の関係は明確ではなかった。これは、小流域によって比流量が異なることなどが原因と考えられる。

以上、晴天時調査から、家畜密度の高い集水域で  $\text{NH}_4\text{-N}$ 、溶存態リン、 $\text{K}^+$ 濃度が高く、 $\text{Na}^+$ 濃度が低下する傾向がみられた。必ずしも河川水質を土地利用などで説明できなかったが、より精緻な土地利用、地質、畜産、人口、下水道普及率などの集水域情報および水文情報を重ね合わせるにより栄養塩類の流出機構の解明に近づけると考えられる。

### 3.3 雨天時調査

#### 3.3.1 雨天時調査の結果

図-11 は各時間の雨量と、高崎川の各調査地点における水深、SS 濃度、各態窒素濃度、各態リン濃度、各態窒素比負荷量、各態リン比負荷量、 $\text{K}^+/\text{Na}^+$ の変化である。高崎川の雨天時調査では、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。SS濃度はいずれの地点でも上昇し、ピークの時間は水深のピークと一致していた。

溶存態窒素濃度は、いずれの地点でも増水時に低下し、水深が下がるとともに上昇した。今回調査の時間内では、開始時と同じ濃度には戻らなかった。

粒子態窒素濃度は、SS濃度と連動し、いずれの地点でも増水時に上昇したが、水深のピークが過ぎるともとの濃度に戻った。

$\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は、溶存態窒素濃度と同様の変化を示した。溶存態窒素濃度に占める  $\text{NO}_3\text{-N}$ の割合は、地点Aでは降雨前は95%であったが、高水深時には、54%まで低下した。

$\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は、地点Aでは、原因は明らかでないが一旦上昇した後、溶存態窒素濃度が最低となった21時頃に一度低下し、再び高くなる変化を示した。地点間で比較すると、濃度の上昇は上流側ほど大きかった。

$\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度は、地点Aでは降雨前に高かったが、降雨後に低下した。地点C、E、Gでも濃度の低下がみられた。

溶存態リン濃度はいずれの地点でも低いまま推移した。地点Aでは増水時に低下する傾向がみられた。

粒子態リン濃度は、SS濃度や粒子態窒素濃度と同様、増水時に上昇した。ピーク時の濃度を地点間で比較すると、上流側ほど高くなっていた。

比負荷量でみると、溶存態窒素は、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。

$\text{NO}_3\text{-N}$ の比負荷量は、溶存態窒素と同様の変化を示した。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。

$\text{NH}_4\text{-N}$ と  $\text{NO}_2\text{-N}$ 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  $\text{NH}_4\text{-N}$ 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変化を示し、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。

$\text{K}^+/\text{Na}^+$ 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  $\text{K}^+/\text{Na}^+$ 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、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 比負荷量と  $\text{K}^+/\text{Na}^+$ が高くなる傾向がみられた。

図-12 は各時間の雨量と、山川における水深、SS濃度、各態窒素濃度、各態リン濃度、各態窒素比負荷量、各態リン比負荷量、 $\text{K}^+/\text{Na}^+$ の変化である。山川の雨天時調査では、雨量は6時頃と12時頃に大きかった。調査開始時刻は8時で、降雨の最中であった。水深は、19時半まで上昇が続いた。翌7~10時には低下したが、調査開始時と比較すると高かった。SS濃度は、16時半に最大となり、翌日までには低下した。

溶存態窒素濃度は、18時までには低下し、翌日まで横ばいであった。粒子態窒素濃度は増水時でも小さく、顕著な上昇はみられなかった。

$\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は溶存態窒素と同様の変化を示した。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は8時の時点では高かったが、10時以降は低下した。 $\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度は増水時に低下した。

溶存態リン濃度はあまり変化がみられなかった。粒子態リン濃度は増水時に上昇したが、翌日までには概ね初期の濃度まで低下した。

溶存態窒素、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ および粒子



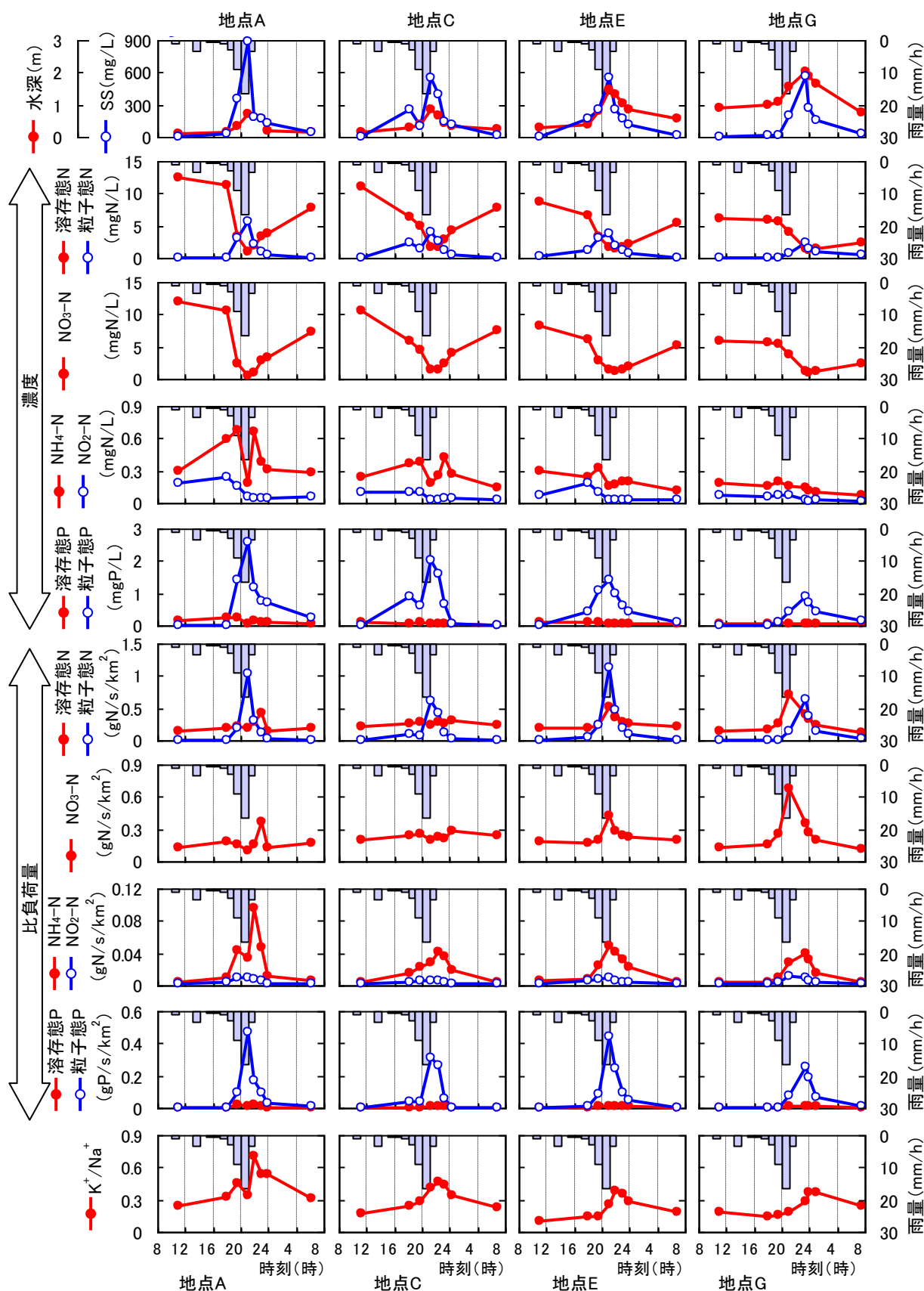


図-11 高崎川の雨天時調査の雨量、水深、SS濃度、各態窒素および各態リンの濃度と比負荷量、K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>の変化

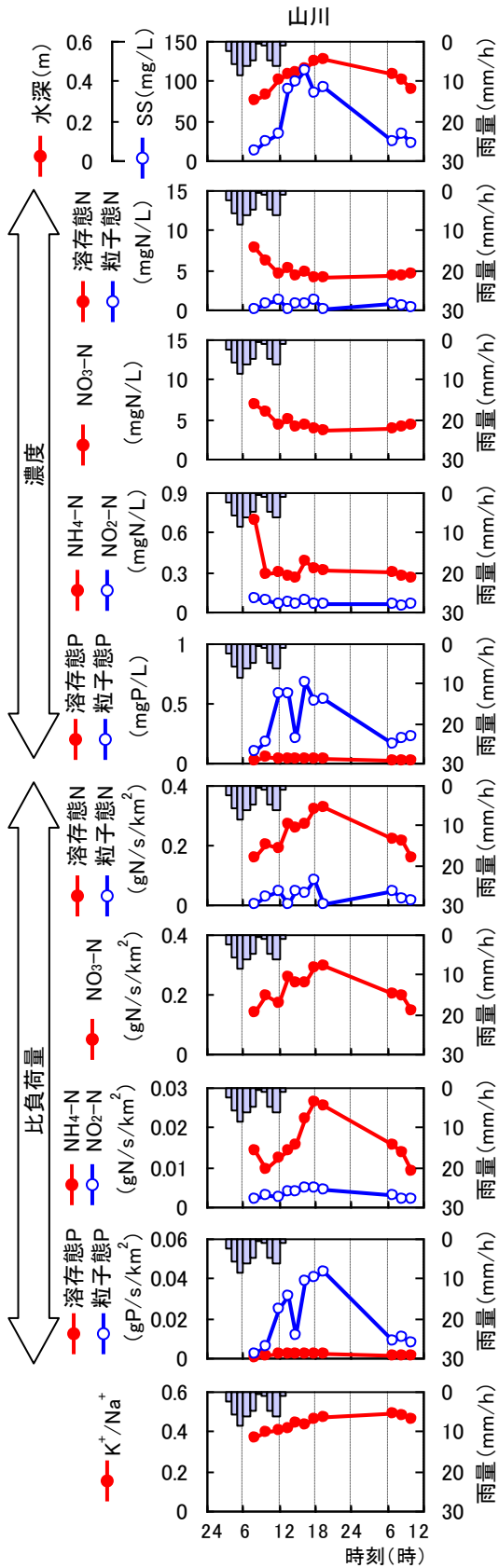


図-12 山川の雨天時調査の雨量、水深、SS濃度、各態窒素および各態リンの濃度と比負荷量、 $K^+/Na^+$ の変化

態リンの比負荷量は、増水時に上昇し、翌日には低下していた。一方、粒子態窒素と溶存態リンの比負荷量はあまり上昇しなかった。

$K^+/Na^+$ は、増水とともに上昇し、翌日も高いままであった。山川の家畜密度は、高崎川の約6倍であるが、 $NH_4-N$ 濃度や $K^+/Na^+$ は、それに見合った増加は確認されなかった。

### 3.3.2 雨天時の流出負荷量の解析

図-13は、溶存態窒素と粒子態窒素に関する、地点Aと地点Gにおける比流量と比負荷量の関係である。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。

$$L = aQ^b$$

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。表-1は、主要な水質成分の、地点別の定数と  $R^2$  である。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>9)</sup>。定数  $b$  に着目すると、SSはいずれの地点でも洗い出し型であった。

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と山川では  $b < 1$  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

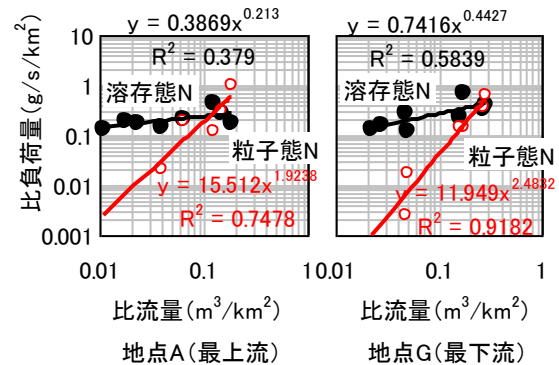


図-13 地点AとGにおける比流量と各態窒素の比負荷量の関係

表-1 主要な水質成分のL-Q式の定数a、bとR<sup>2</sup>

地点	a	b	R <sup>2</sup>	地点	a	b	R <sup>2</sup>	地点	a	b	R <sup>2</sup>			
SS	A	7038	2.45	0.92	粒子態 P	A	6.65	1.77	0.91	溶存態 Fe	A	57.7	1.32	0.99
	C	17405	2.87	0.88		C	51.87	2.86	0.66		C	42.8	1.04	0.87
	E	1797	2.17	0.82		E	2.78	1.72	0.82		E	69.4	1.08	0.91
	G	4051	2.78	0.99		G	3.36	2.13	0.98		G	82.5	1.07	0.97
	山川	8063	2.65	0.86		山川	8.86	2.12	0.73		山川	93.3	1.02	0.63
溶存態 N	A	0.39	0.21	0.38	Na <sup>+</sup>	A	1.60	0.53	0.83	溶存態 Al	A	113.3	1.47	0.97
	C	0.31	0.06	0.21		C	1.15	0.36	0.86		C	294.7	1.87	0.99
	E	0.57	0.31	0.85		E	2.75	0.43	0.60		E	111.6	1.47	0.99
	G	0.74	0.44	0.58		G	3.96	0.54	0.66		G	151.9	1.71	0.93
	山川	1.30	0.57	0.82		山川	3.42	0.62	0.94		山川	1107.4	2.38	0.95
NO <sub>3</sub> -N	A	0.18	0.04	0.01	K <sup>+</sup>	A	1.29	0.76	0.92	溶存態 Zn	A	7.49	1.06	0.90
	C	0.21	-0.02	0.02		C	1.29	0.83	0.98		C	6.39	1.04	0.90
	E	0.43	0.25	0.75		E	1.59	0.85	0.98		E	6.61	0.95	0.92
	G	0.59	0.39	0.48		G	1.70	0.80	0.95		G	7.30	1.02	0.98
	山川	1.18	0.57	0.83		山川	2.40	0.77	0.96		山川	4.99	1.02	0.79
NO <sub>2</sub> -N	A	0.02	0.56	0.56	DOC	A	2.56	0.97	0.97	溶存態 Cu	A	2.35	1.06	0.93
	C	0.01	0.55	0.51		C	2.11	0.96	0.97		C	1.79	1.07	0.88
	E	0.01	0.52	0.44		E	2.97	0.99	0.98		E	2.47	1.14	0.90
	G	0.02	0.75	0.72		G	3.12	1.02	0.99		G	2.99	1.34	0.99
	山川	0.02	0.66	0.58		山川	4.42	1.07	0.97		山川	2.69	1.13	0.99
NH <sub>4</sub> -N	A	0.38	1.00	0.83	粒子態 Fe	A	350986	2.35	0.92	溶存態 Mn	A	6.20	1.01	0.55
	C	0.29	1.03	0.81		C	1099787	2.84	0.89		C	11.51	0.95	0.35
	E	0.15	0.88	0.88		E	105783	2.21	0.89		E	3.61	0.83	0.44
	G	0.11	0.90	0.90		G	76548	2.38	0.97		G	6.74	0.63	0.80
	山川	0.11	0.65	0.53		山川	478409	2.74	0.87		山川	1.35	0.16	0.00
粒子態 N	A	15.51	1.92	0.75	粒子態 Al	A	368687	2.28	0.92	溶存態 B	A	5.84	0.86	0.93
	C	178.53	3.00	0.79		C	2036628	3.03	0.89		C	4.10	0.75	0.91
	E	4.92	1.56	0.85		E	143242	2.31	0.88		E	5.55	0.80	0.95
	G	11.95	2.48	0.92		G	144572	2.74	0.96		G	7.62	0.81	0.95
	山川	0.01	-0.30	0.01		山川	7794176	3.78	0.90		山川	12.38	0.86	0.98
溶存態 P	A	0.06	0.79	0.72	粒子態 B	A	1.16	0.57	0.27	溶存態 Ni	A	0.17	0.75	0.98
	C	0.04	0.82	0.88		C	1.08	0.69	0.28		C	0.13	0.67	0.97
	E	0.03	0.73	0.86		E	0.85	0.78	0.47		E	0.19	0.76	0.96
	G	0.04	0.92	0.92		G	0.29	0.20	0.20		G	0.29	0.84	0.90
	山川	0.04	1.16	0.66		山川	1.50	1.49	0.22		山川	0.06	0.42	0.30

※ 洗い出し型(b>1.1)は網掛け+太字で、希釈型(b<=0.9)は網掛けのみで示した。

はすべての地点で洗い出し型となった。山川では増水時に粒子態窒素の負荷量が上昇しなかったため、b<1となった。

溶存態リンは、高崎川では概ね希釈型であったが、山川では洗い出し型となった。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。

Na<sup>+</sup>とK<sup>+</sup>は希釈型であり、表中には載せていないがMg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>も希釈型であった。Na<sup>+</sup>とK<sup>+</sup>は、地点による定数bの違いは小さかった。

DOCは、いずれの地点でも定数bが1に近い一定型となり、増水時の希釈や洗い出しの作用が小さかった。

粒子態金属では、Fe、Al、Zn、Cu、Mn、Niはいずれの地点でも洗い出し型であった。粒子態のBは、高崎川では希釈型、山川では洗い出し型となった。

溶存態金属は元素種によって異なった。Feは地点Aでは洗い出し型となり、他の地点では定数bが1

に近かった。Alはすべての地点で洗い出し型となった。Znはいずれの地点でも定数bが1に近い値となった。Cuは、高崎川下流の地点E、Gと山川で洗い出し型となった。Mnは、高崎川下流の地点E、Gと山川で希釈型となった。BとNiは、いずれの地点でも希釈型となった。

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。図-14は、基底流出と直接流出の概念図である。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。各調査間の濃度の変化を直線で仮定し、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-15 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。山川は、地点 G と同程度となった。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。山川では直接流出のうち 22%が粒

子態であった。地点間で比較すると、溶存態窒素の直接流出は、地点 G と山川で、粒子態窒素の直接流出は地点 E で大きかった。

全リンの累積比負荷量は、山川と比較して高崎川で大きく、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。

累積負荷量と土地利用との関係を検討するため、地点 C、E、G について上流側の累積負荷量との差分を求めた。図-16 は、地点 A、C、E、G、山川の

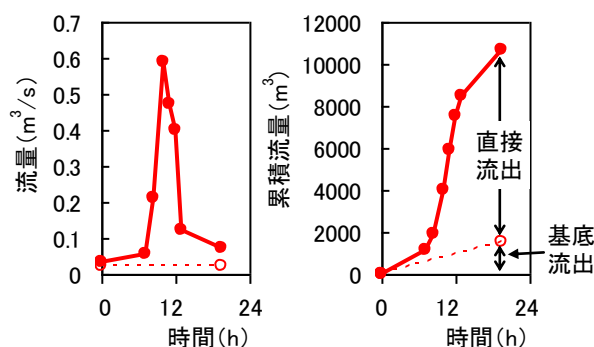


図-14 基底流出と直接流出の分解方法

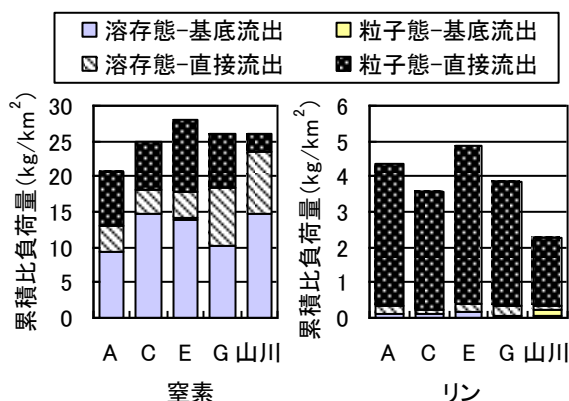


図-15 窒素とリンの累積比負荷量とその内訳

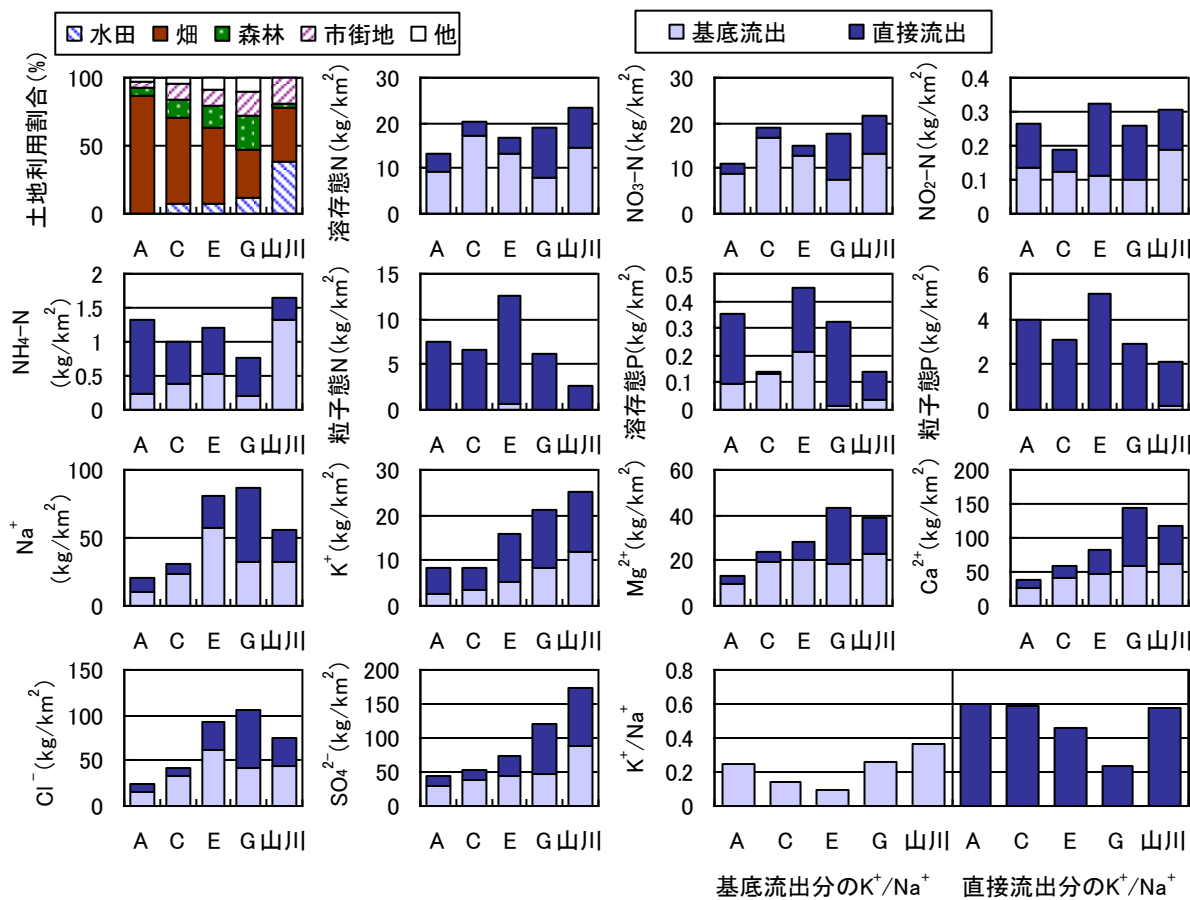


図-16 小流域(区間)別の土地利用と、各水質成分の基底流出と直接流出の累積比負荷量

土地利用割合と、各水質成分の累積比負荷量である。土地利用割合は、上流側の小流域ほど畑の割合が高くなっている。

基底流出と直接流出を含めた全体の累積比負荷量でみると、溶存態窒素は、地点 A は他の地点と比較して小さかった。直接流出のみに着目すると、地点 G と山川で大きかった。

NO<sub>3</sub>-Nは、溶存態窒素と同様であった。NO<sub>2</sub>-Nは、基底流出は山川で大きく、直接流出は地点 E で大きかった。NH<sub>4</sub>-N は、全体では地点 A と山川で大きかった。高崎川では、NH<sub>4</sub>-N の累積比負荷量に対する直接流出の占める割合は、地点 A では83%、地点 C、E、G では 55~70%であった。山川の直接流出は低い傾向を示した。

粒子態窒素は、山川よりも高崎川で大きく、特に地点 E で大きかった。粒子態窒素はほぼ全量が直接流出であった。

溶存態リンは、高崎川の地点 A、E、G で大きかった。地点 C では基底流出の割合が高く、地点 G と山川では直接流出の割合が高かった。

粒子態リンは、地点 E で最も大きく、次いで地点

A で大きかった。粒子態リンは粒子態窒素と同様、ほぼ全量が直接流出であった。

高崎川では、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>はいずれも、累積比負荷量が下流の地点ほど大きかったが、基底流出と直接流出に分けると、イオン種によって違いがみられた。Na<sup>+</sup>は、基底流出は地点 E で、直接流出は地点 G で高かった。K<sup>+</sup>は地点間で構成が以ており、直接流出の割合は地点 A で70%、他の地点で約60%となった。

Mg<sup>2+</sup>の基底流出は、他の地点と比較して地点 A で小さかった。直接流出は、地点 G で大きかった。Ca<sup>2+</sup>、は Mg<sup>2+</sup>と同様の傾向であった。

Cl<sup>-</sup>は、Na<sup>+</sup>と同様の傾向を示し、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>は Ca<sup>2+</sup>と同様の傾向を示した。

Na<sup>+</sup>と K<sup>+</sup>の累積比負荷量から、基底流出分と直接流出分の Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup>を算出したところ、地点 A、C、E と山川では、基底流出分と比較して直接流出分が高い値となった。集水域の家畜密度が高いと推察される高崎川上流と山川では、降雨時に畜産由来の負荷が流入している可能性がある。

図-17 は、溶存態と粒子態の金属の、各地点の基

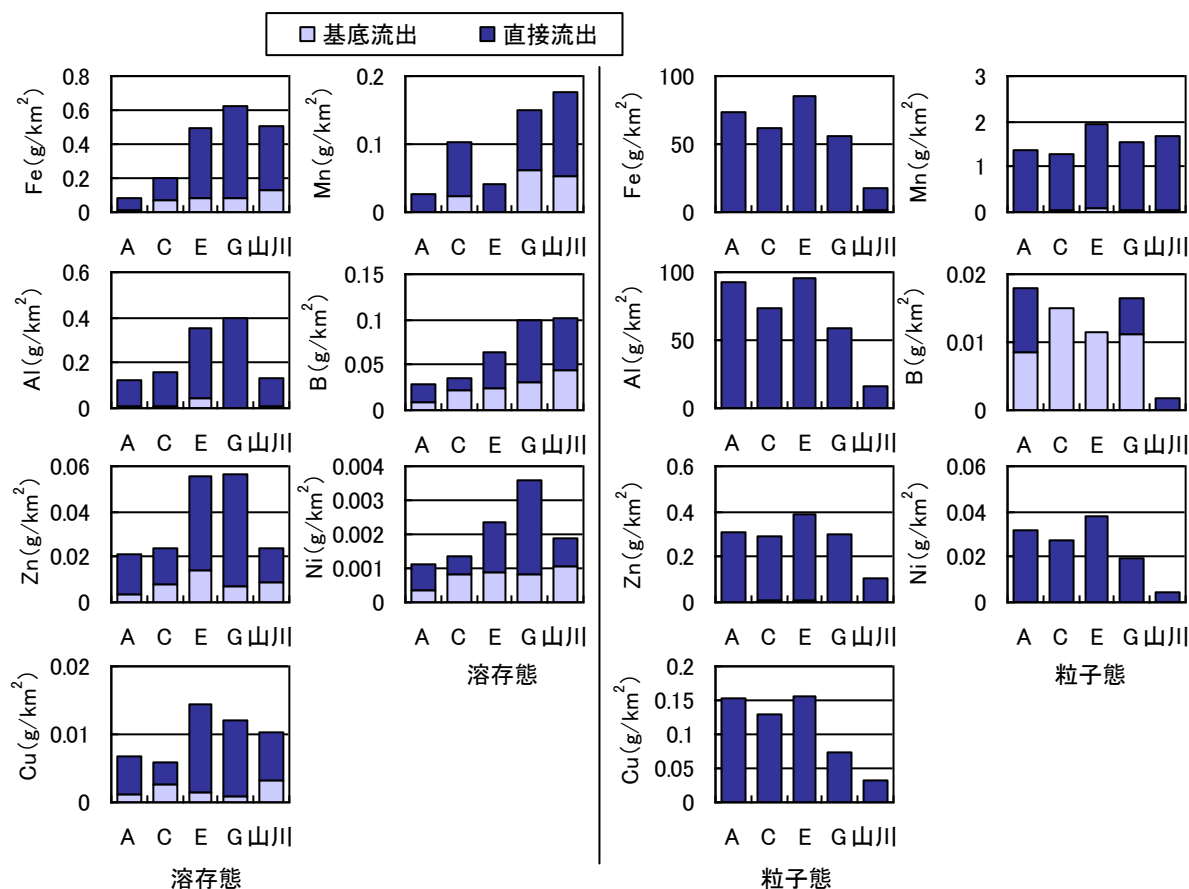


図-17 小流域（区間）別の、金属成分の基底流出と直接流出の累積比負荷量

底流出と直接流出の累積比負荷量である。溶存態金属の累積比負荷量は、Fe、Al、Zn、Cu はいずれも直接流出の割合が高く、地点間で比較すると地点 E、G で高かった。山川では Fe は高く、Al、Zn は低かった。溶存態 Mn は、地点 C、G、山川で大きかった。溶存態 B は、 $K^+$  と同様の傾向を示した。溶存態 Ni は、地点 G で大きく、地点 G では直接流出の割合が高かった。

粒子態金属では、Fe、Al、Zn、Cu、Ni は同様の傾向を示し、山川よりも高崎川で大きかった。また、大部分は直接流出であった。Mn は、大部分は直接流出であり、山川でも高崎川と同程度の値を示した。粒子態 B は、高崎川では基底流出の割合が高かった。

各水質の累積比負荷量は、土地利用（水田、畑、森林、市街地、その他）だけから傾向をつかむのは難しいが、直接流出に着目すると、畑の割合が低下すると、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$  および溶存態の Fe、Al、Zn、B、Ni の累積比負荷量が高くなる傾向がみられた。これらは、畑以外からの流出と考えられる。より精緻な土地利用、地質、畜産、人口、下水道普及率などの集水域情報および水文情報を重ね合わせるにより、雨天時の発生源別の寄与を推定できる可能性がある。

#### 4 おわりに

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。さらに、集水域内に畜産農家の多い鬼怒川支流の山川で雨天時調査を行った。そして、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。

高崎川の晴天時調査からは、

- (1) 集水域の畑の割合が高い上流の調査地点で、 $NO_3-N$  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、 $NH_4-N$ 、溶存態リン、 $K^+$  濃度が高く、 $Na^+$  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、 $NH_4-N$  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) 高崎川と山川のどちらも、溶存態窒素と  $NO_3-N$  の濃度は、増水のピーク時に低下した。 $NH_4-N$  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) 雨天時の高崎川の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、高崎川の上流と山川の集水域では  $NH_4-N$  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  $K^+/Na^+$  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 - 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 - 世界測地系 (500 m メッシュ)、2005 年農林業センサス - 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) 鈴木穰、小森行也、岡安祐司(2007)、流域における物質動態特性の解明と流出モデルの開発 (2)、平成 19 年度下水道関係調査研究年次報告書集、117-126。
- 6) 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。

## STUDY ON COMPREHENDING THE DYNAMIC CIRCULATION AND RUNOFF OF MATERIALS ON A BASIN SCALE ②

**Budget:** Grants for operating expenses (General Account)

**Research Period:** FY2011-2015

**Research Team:** Water Environment Research Group (Water Quality)

**Authors:** IKED Shigeru, KOMORI Koya, HIRAYAMA Takahiro, KITAMURA Tomakazu, SHIBAYAMA Yoshiyuki

**Abstract:** The purpose of this study was to clarify the runoff mechanism of nutrients from river watersheds. In this study, the nutrient loads of ordinary flow and rainfall flow were measured at the Takasaki River flowing into Lake Inbanuma. In the ordinary flow survey,  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentration showed a positive correlation with the proportion of upland fields in the catchment area. The concentration ratio of  $\text{K}^+$  to  $\text{Na}^+$  and the specific loads of  $\text{NH}_4\text{-N}$  and dissolved phosphorus were high at the uppermost survey point where the density of livestock in the catchment area was high. In the rainfall flow survey, the concentrations of particle nitrogen and phosphorus increased, and dissolved nitrogen and phosphorus decreased corresponding to the increase of discharge. The cumulative specific loads for nitrogen and phosphorus were separated into ordinary flow and surface runoff. The nitrogen loads of surface runoff accounted for 41–61% of total nitrogen load, and the particle nitrogen load of surface runoff accounted for 48–74% of the nitrogen load of surface runoff. The phosphorus load of surface runoff accounted for about 96% of total phosphorus load, and the particle phosphorus load of surface runoff accounted for about 95% of the phosphorus load of surface runoff.

**Key words:** Lake Inbanuma, nutrient, runoff, land use