

溪流地における浸透流出水と河道構造の関係と その水温・水質特性

RELATION BETWEEN HYPORHEIC ZONE WATER AND RIVERBED
STRUCTURE, STREAM WATER CHEMISTRY, TEMPERATURE

今泉 覚¹・白川 直樹²

Satoru IMAIZUMI, Naoki SHIRAKAWA

¹学生会員 工修 筑波大学大学院 システム情報工学研究科
(〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

²正会員 工博 筑波大学講師 システム情報工学研究科 (同上)

Hyporheic zone water is found by the water temperature characteristic and impact of micro scale riverbed structure on streamwater chemistries was examined through field measurement at mountain stream. For streamwater chemistries, water exchange between hyporheic zone and streamwater was found to be effective and causes denitrification in some locations. These results were influenced by riverbed structures. By the influence of rainfall, the concentration of NO_3^- was declined and Cl^- was increased. The exchange between soil and streamwater cause such phenomena. There were negative correlations in SO_4^{2-} and NO_3^- . Therefore the existence of hyporheic zone water was supported by this negative correlation.

Key Words : water temperature, streamwater chemistry, denitrification, hyporheic zone water, riverbed structure

1. はじめに

河川の水質は、流域の地形・地質条件、植生、土地利用など様々な影響を受けている。江種ら¹⁾は流域の土地利用や地質条件が水質に与える影響について流域規模の視点から研究し、無機イオン類の流出特性について多くの知見が得られている。また、リーチスケールのような更に狭い範囲ではこれらの条件に加えて、河床構造も水質形成に寄与していることが知られている。しかし、S. Findlay²⁾が指摘するような河川微小地形内で起こる河床間隙水の循環による水質効果などについてはまだ不明な点が多い。近年は河川の護岸化が進み自然なままの河床構造は少なくなっているが、健全な河川の水質を維持していくためには、これらの特性と河川水質との関係を明らかにしておくことが重要である。また近年河川水中の窒素濃度の上昇も危惧されているが、河床間隙水を含めた土壌水には土壌内の窒素を溶出するだけでなく、脱窒の効果もあるとされている³⁾。このシステムを正しく理解することで、窒素の渓流水への流出を正しく予測することが可能となる。

土壌水に関する研究としては平田ら³⁾が行った長期変

動に関する研究や、飯泉ら⁴⁾が行った地下水に関する研究、他にも伏流水に関するものなど様々あるが、河床微地形を考慮に入れたものはあまりない。河床間隙水を考慮に入れた研究では、土壌水だけを直接採取してきて分析することが多く、河川の流れの中で水質がどのように変化しているのかを調査した研究は行われていない。

よって、本研究では複雑な河床地形・材料からなる渓流域において細かいスケールで水質測定をすることにより、河床構造が浸透流出水を通して水質に与える影響を調べることを目的とする。その際特に硝酸イオンなどの陰イオン類について注目した。また調査地点に複数の水温計を設置することで局所的な水温変化を観察し、その水温特性から浸透流出が卓越する箇所を決定した。

2. 調査概要

(1) 調査対象地点

図-1に調査対象河川とした十王川と花貫川の概略を示す。どちらも茨城県北部に位置する二級河川で、十王川は流路長14.8km・流域面積47.2km²、花貫川は流路長19.4km・流域面積63km²である。調査地点はどちらもダ

ム（十王ダム・花貫ダム）より上流の溪流地域とした。どちらの河川の流域も大半は森林からなり、その他は住宅地や水田などが点在する。ただし十王川流域には小規模ながら酪農場が存在しており、その影響からか後に示す陰イオン類の測定結果は全体的に花貫川調査地点の結果より高い濃度が得られた。

十王川調査地点と花貫川調査地点Aではその地形と河床材料の偏りを利用して、河岸方向の河床間隙水が河川水質に与える影響について調査、検討した。花貫川合流前の調査地点Bでは淵、早瀬、平瀬と変化していく河床地形が影響して縦断方向の河床間隙水が卓越した地点であると予測し、それが河川水質に与える影響について調査、検討した。

(2) 調査方法

調査は2005年4月から2006年3月にかけて実施した。まず調査対象地点の地形を把握するためにトータルステーション（NIKON-TRIMBLE製）を用いて地形測量を行った。同時に調査地点の河床材料も調査した。また流速による河床間隙水への影響を検討するため、電磁流速計（KENEK製）を用いて地形と同じく詳細に流速を測定した。尚流速測定水深については、河床間隙水の影響が大きいであろう河床付近に注目するために、平均流速測定時に用いられる六割水深よりも深い八割水深で測定した。

水質測定は9月8日、16日に実施した。9月8日の前日には降水があり、それがどのように影響したかについても検討する。基本水質項目のpH、電気伝導度（EC）、溶存酸素（DO）、および酸化還元電位（ORP）については携帯用水質計（HORIBA製）を用いて現地で測定した。また無機イオン類（塩化物イオン、硝酸イオン、硫酸イオン）についてはガラス瓶（30ml）に採水して、実験室に持ち帰ってからイオンクロマトアナライザー（YOKOGAWA製）で分析した。尚水質測定に関しても河床間隙水の影響を強く受けていると予測する河床付近に注目し、出来るだけ河床付近での測定・採水を行った。また水温については複数の水温計（分解能0.02℃、精度±0.2℃）を河床付近に設置し、数日間の連続測定を実施した。

3. 現地調査結果

今回の調査ではまず河床付近の水温について注目した。十王川調査地点においては明らかに高い水温を示す箇所と地形の関係が示された。またその地点では硝酸イオンとpH値に特徴的な違いが得られた。花貫川調査地点においては、より局所的な箇所でも特異な水温変化を示す結果が得られた。

他の多くの測定水質項目では、実際には大きな違いが測定されなかった。特に地下水を含めた土壌水の測定には有効だとされる電気伝導度（EC）においても、今回の微小スケールではほとんど違いを得られなかった。

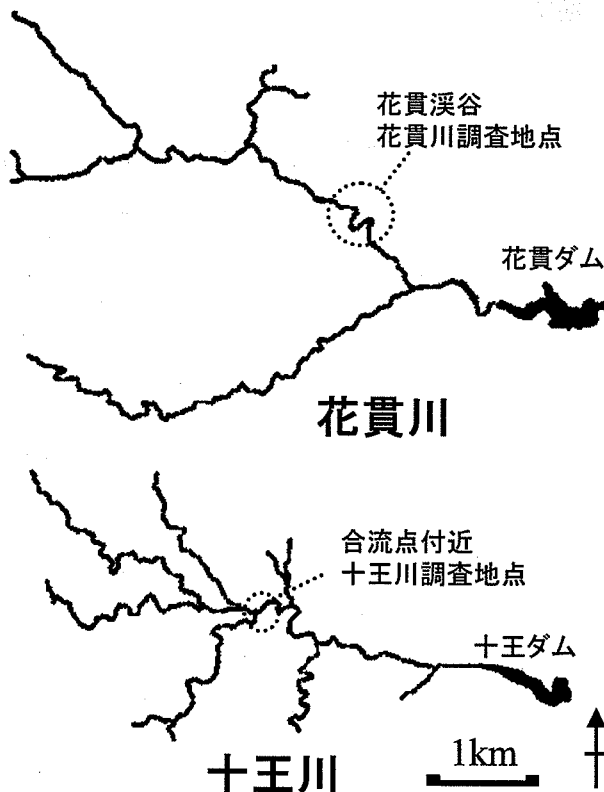


図-1 調査対象流域

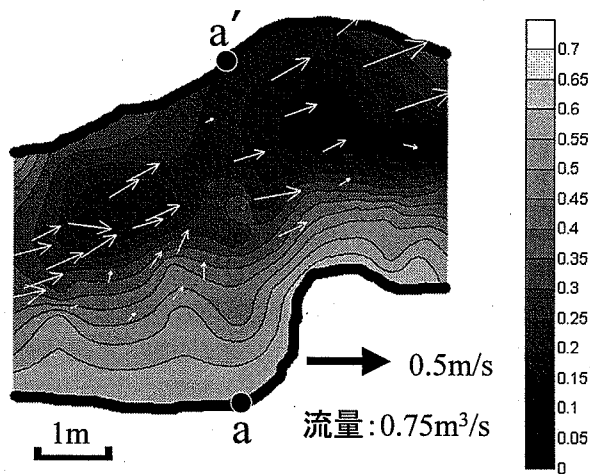


図-2 十王川調査地点の河床高と流速分布



図-3 十王川調査地点の断面図と河床構造

(1) 河道構造

a) 十王川調査地点

この地点は図-2、3で示すように右岸部で河床高が高くなっており、左岸部は深く掘り込まれた地形となつて

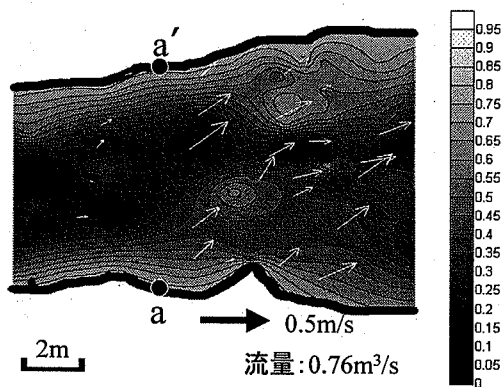


図-4 花貫川調査地点Aの河床高と流速分布

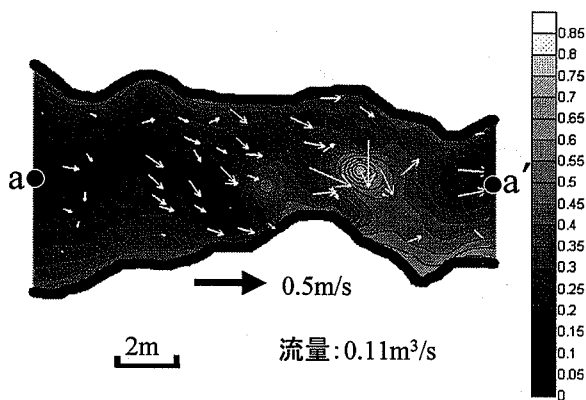


図-6 花貫川調査地点Bの河床高と流速分布

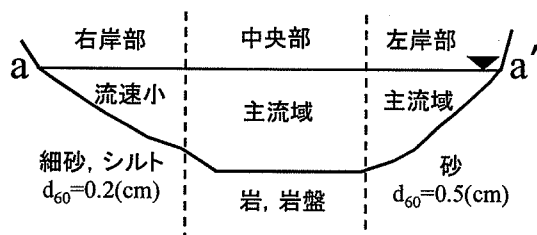


図-5 花貫川調査地点Aの断面図と河床構造

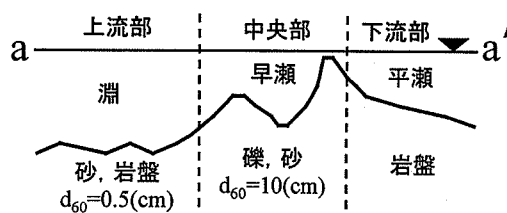


図-7 花貫川調査地点Bの縦断面図と河床構造

いる。河床材料は右岸部で d_{60} が0.2cmほどの細砂やシルトから構成されており、50cm程堆積している。左岸部に近づくにつれ砂の堆積は減少していき、河床材料は岩盤や岩に変化している。このような横断方向の河床材料・勾配の変化が、川岸方向からの浸透流出水に影響を与えると予測した。

b) 花貫川調査地点A

この地点は図-4、5で示すように中央部が深く掘り込まれており、その両岸には砂が堆積している。十王川調査地点と類似して横断方向に河岸構造が変化することから、やはり河岸方向からの浸透流出水の影響が予測される。ただしこの地点での砂の堆積は20～30cm程であり、十王川調査地点よりは少ない。

c) 花貫川調査地点B

図-6、7で示すように上流域で下流域より深くなるが、これは淵、早瀬、平瀬と変化する河床構造によるものである。この調査地点ではこのような淵から瀬に変わる地形を利用して、上下流方向に存在するであろう浸透流出水について注目した。またこの地点は中央部に礫や砂が堆積はするが、その量はその他2地点と比べてかなり少ない。全体的には河床材料は岩盤から構成されている。

(2) 水温・水質測定結果

a) 十王川調査地点

図-8で示す河床付近の最低水温分布からわかるように、河道右岸側で他より0.2～0.3℃ほど高い水温が測定された。尚この最低水温分布は、冬季に数日間連続測定したものの一部であり、日照の影響を受けない深夜に測定され

たものである。冬季において他の箇所より高い水温を示していたことより、この箇所は周囲より浸透流出水が卓越していると予測できる。この地点での水質については図-9、10で示すように右岸付近においてpHは他より0.2～0.3高い値を、硝酸イオンは他より0.5mg/l程低い値を示した。

b) 花貫川調査地点A

他の調査地点と同様に水温を測定したところ、中央部付近で数所他とは違う水温変化を示すところがあった。その結果を図-11に示す。尚この結果は昼の12時半から14時にかけての水温変化であるが、測定日の天気は曇りでほとんど日照の影響は受けていないと考えられる。多くの測定箇所では水温が上昇していく変化を示したが、温度変化が他と比べて小さい箇所や途中で水温が下がる箇所も示された。しかしながらこのような特異な箇所において、河床構造の変化や水質には大きな違いは見ることができなかった。

c) 花貫川調査地点B

この地点では水温はほとんど違いも変化も得られなかった。また水質に関しても予測していたような上下流方向の変化は測定されなかった。

4. 考察

(1) 河道構造と水温・水質特性の関係

十王川調査地点では右岸付近で高い水温を示して浸透流出水の影響が大きいと予測できた。この箇所では他より高いpH値と低い硝酸イオン濃度を示したが、この結果は土壌水がもつ脱窒と緩衝作用を表していると考えら

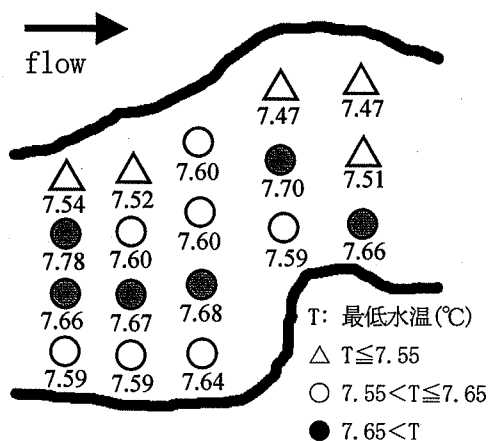


図-8 十王川調査地点の最低水温分布(2006/3/23)

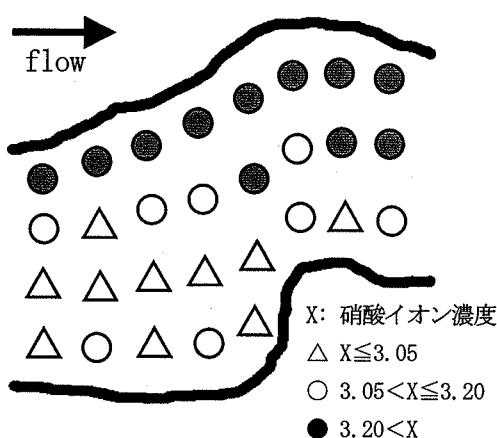


図-9 十王川調査地点の硝酸イオン分布(2005/9/16)

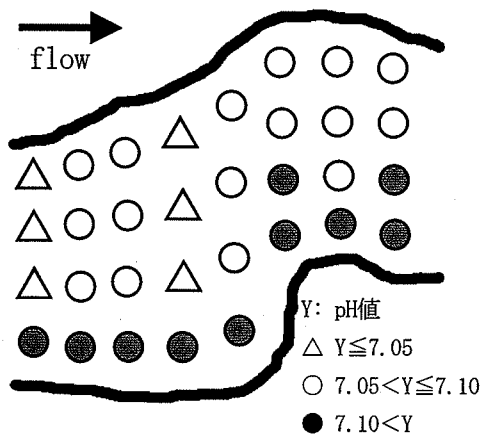


図-10 十王川調査地点のpH値分布(2005/9/16)

れ、水温分布より予測した浸透流出水の影響が大きいということに合致する。花貫川調査地点Aでは明らかに他とは違う水温変化を示した箇所があり、浸透流出水の影響が示唆されたが、硝酸イオンにまで影響を与えるほどではなかった。花貫川調査地点Bは水温、水質どちらもほとんど違いや変化を得られなかった。このような結果となった理由として砂やシルトの堆積量がまず要因として考えられる。また花貫川調査地点Bのような上下流方向の

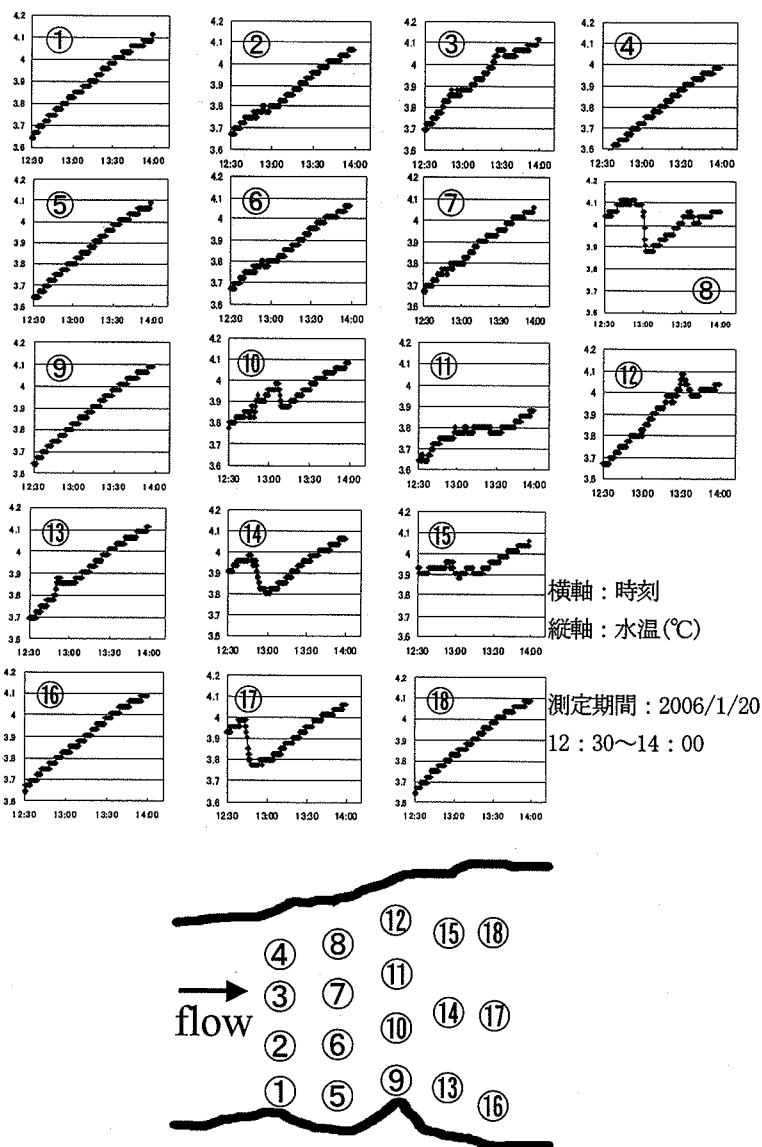


図-11 花貫川調査地点Aにおける水温変化とその測定箇所

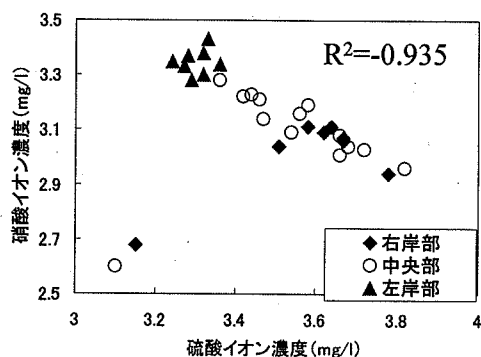
浸透流出水は、その浸透過程の違いが関係しているとも推測される。

今回の調査では測定水質項目として特に硝酸イオンについて注目した。硝酸イオンは土壌由来の物質であり、鉱物には吸着しにくく、水によって溶脱されやすい性質を持つ^{1) 5)}。よって、今回検討している河床間隙水を含めた土壌水は溶脱した硝酸イオンを多く含み、河川水よりも高い濃度を示すこととなる。しかし、S.Findlay²⁾が指摘するように土壌中の嫌気的な条件で脱窒が起きること、土壌水が河川水よりも低い硝酸濃度を示すこともある。本研究の調査地点付近には飲用可能な湧水が数ヶ所あり、そこでの硝酸イオン濃度は1.99mg/l、1.28mg/l、0.90mg/lと付近の河川水よりも低い値を示していた。地質の影響などもあり全ての湧水が低い硝酸イオン濃度を示すわけではないが、これらのように低い濃度を示すところでは脱窒が起きていると考えることができる。

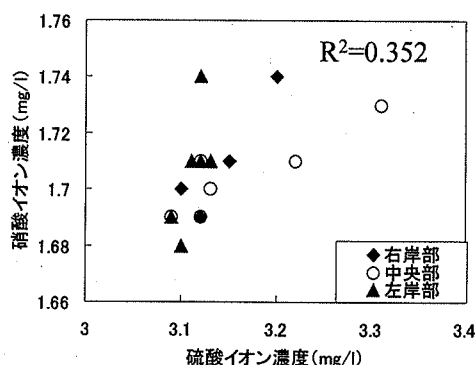
本研究の調査結果についても上記のような検討をしてみる。図-9で示される十王川右岸部での低い硝酸イオン

表-1 調査地点での無機イオン類濃度の平均値

	硝酸イオン濃度(mg/l)		塩化物イオン濃度(mg/l)		硫酸イオン濃度(mg/l)	
	9月8日 降雨あり	9月16日 降雨無し	9月8日 降雨あり	9月16日 降雨無し	9月8日 降雨あり	9月16日 降雨無し
十王川	3.38	3.13	4.15	4.52	3.45	3.48
花貫川	2.13	1.71	3.62	4.06	3.13	3.14



十王川調査地点 (2005/9/16)



花貫川調査地点 (2005/9/16)

図-11 硫酸イオンと硝酸イオンの関係

濃度は、河岸方向からの河床間隙水の影響を強く受けたものだと考えられる。この地点は右岸から緩やかに下る地形となっており、右岸付近では河岸方向からの土壤浸透水の影響を受けやすい。また降雨イベント時以外の日本の森林域では、土壤表層部は浸透能力が高く飽和地表流はほとんど見られない⁵⁾。この飽和地表流によって、降雨イベント時に河川水に高い濃度の硝酸態窒素を溶脱することになるのだが、今回の調査時のように降雨が無い場合だと河岸方向からの土壤浸透水は十分に土壤を浸透し、且つ十分に脱窒されて低い硝酸イオン濃度になったと推測する。

また図-2で示した流速分布を見てわかるように、この調査地点では主流が左岸側に偏っており、右岸側は流れの遅い死水域となっている。この死水域の影響が右岸部と左岸部でのpHや硝酸イオンの違いに関係している可能性もあるが、右岸部での死水域がほぼ無くなっている調査地点最下流部付近においても上記で述べたような水質の違いがあることから、この地点の死水域はそれほど水質に影響を与えていないと考えられる。それに加え、この死水域の溶存酸素濃度(DO)は主流域とほぼ同じであり、いわゆる湾処地形などで起こるような嫌気性の反応は起きていないと考えられる。

(2) 降雨イベントと陰イオンの相関

前日まで降雨であった9月8日と、調査前数日間降雨がなかった9月16日の水質を比較する。正確な流量のデータは無いが、降雨後の9月8日は普段に比べかなり流量が増加していた。まずpHをはじめとした基本水質項目には違いがみられなかった。ただし十王川調査地点での

pH値分布は、どちらの測定日にも図-10で示したような右岸部で高い値をとる傾向は示した。

次に測定日ごとの調査地点での無機イオン類濃度の平均値を表-1に示す。硝酸イオンは前日降雨があった9月8日に高い濃度を示している。このような降雨イベントによる流量の増減とそれに呼応した水中の硝酸イオン濃度の変化は、今まで多く報告されている。硝酸イオンのように表層土壤水で濃度を高める物質は降雨後の流量減時に降雨前のベース値を上回る³⁾とされており、今回の結果もそれを示したのだと考えられる。また全体として降雨後の硝酸イオン濃度は上昇したが、その分布の傾向はどちらの測定日も図-9で示したように右岸付近で低い濃度を示す結果となった。このことより十王川調査地点の右岸部付近に存在する流出水は、高い硝酸イオン濃度を示す表層土壤水だけとはいえず、十分脱窒されて低い硝酸イオン濃度となった土壤水も存在していると推測できる。

調査地点内での濃度分布では特徴的な偏りが得られなかった塩化物イオンであるが、降雨による濃度の変化は認められた。そもそも塩化物イオンは土壤中でも変化しない保存性の高い物質であり⁶⁾、その濃度の変化はそれほど大きくない。表-1であるように降雨後調査日の9月8日に低い濃度を示したのは、降雨時の水量上昇に伴い地表面流出成分による希釈効果が卓越し濃度が低下したからであると予測される。そして測定した降雨後流量減減時においては、硝酸イオンとは逆にベース値に戻ろうとする現象が起きる³⁾。このような現象は塩化物イオンのように循環性の低い物質において起こりやすい。硫酸イオンにおいても塩化物イオンと同様の希釈効果より、降

雨後に低い濃度を示すと予測できたがそのような結果は得られなかった。

(3) 硫酸イオンと硝酸イオンの関係

図-12で示すように十王川調査地点では、硫酸イオンと硝酸イオンの間にはっきりとした負の相関が得られた。ただし図-12で示す相関係数を求める際、左下に位置する低い濃度の二点は計算に含んでいない。また9月16日のデータしか記していないが9月8日の測定でも同じような結果が得られている。同様な研究としては果樹園地帯で測定した江種ら¹⁾の調査があるが、その結果では硝酸イオンとカリウムイオンにだけ負の相関が得られている。

硫酸イオンは岩石由来の物質であり、流速の遅い土壌水は岩石の風化や土壌からの溶脱の影響を強く受けることとなる⁷⁾。硝酸イオン濃度は先に述べたように土壌浸透水において十分脱窒され低い濃度を示すので、硝酸イオン濃度が低く硫酸イオン濃度が高いところでは土壌水の影響を強く受けていると考えられる。このような箇所が十王川調査地点の右岸部にあたり、この地点で河岸方向からの浸透流出水が強く影響していたことが裏付けられる。しかしながら硫酸イオンは土壌中の細菌により変化しやすい物質であり、その濃度変化は複雑でもある。

また花貫川調査地点では先に述べた十王川調査地点での負の相関ほどはっきりはしていないが、二つのイオン間に正の相関が表れている。上下流方向の浸透流出水は、河岸方向のものと比べて土壌を浸透する時間が短いと考えられる。このとき硝酸イオンは脱窒されることなく他の土壌、岩石由来の無機イオン類と同じように河川水に高濃度の溶脱をもたらすのではないかと推測できる。この考えが正しければ、今回得られた硫酸イオンと硝酸イオンとの関係も理解できる。

また今回の調査では陰イオン類しか測定しなかったが、この調査結果に加えて土壌や岩石由来の陽イオン類を測定することで浸透流出の特性について更に検討していきたい。

(4) 考察のまとめ

- a) 十王川調査地点では右岸付近で他より水温が0.2～0.3℃程高く、横断方向からの浸透流出水の影響が示唆された。また右岸付近ではpH値は0.2～0.3高く、硝酸イオンは0.5mg/l程低い。
- b) 砂の堆積量が多い地点ほど水温・水質の特性から浸透流出水の影響が大きいと予測できる。
- c) 測定日前日に降雨があったとき硝酸イオン濃度は高くなり、塩化物イオンは単純に希釈され濃度は低下した。
- d) 十王川調査地点では岩石由来の硫酸イオンと土壌内の嫌気的な条件で脱窒される硝酸イオンとの間に負の相関が得られた。

5. 結論

茨城県北部を流れる十王川、花貫川の溪流地区間において細かいスケールで河床構造の測量や水温・水質調査を行うことで、浸透流出水についていくつかの興味深い知見を得た。十王川調査地点においては、河床材料が細砂やシルトからなる箇所では他より高い水温を示し浸透流出水の存在が予測できた。この箇所では高いpH値、低い硝酸イオン濃度を示した。またこの調査地点では硝酸イオンと硫酸イオンが負の相関を示した。この二点より、この右岸部では河岸方向からの河床間隙水の影響を強く受けていると考えられる。花貫川調査地点では水温・水質特性より浸透流出水の影響を考察することは困難であったが、いくつかの箇所では特異な水温変化が得られた。また3地点での河道構造と浸透流出水の影響から、砂の堆積が浸透流出水には強く関係していると考えられる。最後に今回の水質調査では前日に降雨があった日と降雨がなかった日の2回について比較したが、両調査地点で硝酸イオンのように土壌由来で土壌水による循環量が多い物質は、降雨後の流量逓減時に高い濃度を示し、塩化物イオンのように土壌水による循環量が少ない物質は降雨後の流量増加による希釈効果によって低い濃度を示した。

参考文献

- 1) 江種伸之・鷲田勉・平田建正：森林及び果樹園からの無機イオン類の流出が河川水質に与える影響について、水工学論文集第46巻，pp893-898，2002。
- 2) S.Findlay：Importance of surface-subsurface exchange in stream ecosystem：The hyporheic zone，*Limnol. Oceanogr.*，Vol. 40(1)，pp.159-164，1995。
- 3) 平田健正・唐常源・村岡浩爾：筑波森林試験地における渓流水質の長期変動，水工学論文集第39巻，pp215-221，1995。
- 4) 飯泉佳子・田中智也・木内豪・田瀬則雄・深見和彦：筑波台地緩斜面における地下水の流動と硝酸イオンの濃度分布，水分・水資源学会研究発表会要旨集，pp208-209，2005。
- 5) 長谷川香織・小葉竹重機：関東平野北西縁部における窒素流出特性，水工学論文集第49巻，pp1567-1572，2005。
- 6) 片貝武史・鷲見哲也・辻本哲郎：地形の変遷から見た裸地砂州における伏流水挙動の研究，河川技術論文集第11巻，pp523-528，2005。
- 7) 竹内均監修：地球環境調査計測事典 第2巻陸域編2，第7編「陸水」第6章「化学的分析手法」，pp358-388，フジ・テクノシステム，2003。
- 8) 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。

(2006. 4. 6 受付)