

河川物理環境と流量が溪流地の水質特性に 与える影響に関する現地調査

EFFECTS OF REACH SCALE TOPOGRAPHY AND FLOW REGULATION
ON WATER QUALITY IN MOUNTAIN STREAMS

今泉覚¹・武下明弘²・白川直樹³

Satoru IMAIZUMI, Akihiro TAKESHITA and 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学生会員 筑波大学 第三学群工学システム学類 (同上)

³正会員 博士 (工学) 筑波大学講師 システム情報工学研究科 (同上)

Water exchange between stream channels and adjacent aquifers has fundamental importance on stream water quality. Presence of hyporheic water is examined in a mountain stream in Ibaraki by assessing high water temperature and low nitrate ion concentration. Variance of chloride ion concentration in regulated section was higher than in continuous unregulated section. Substream flows were seemed to be enhanced in two types of streambed topography. One is a pool-type topography with a large amount of sand and another is a riffle-type topography over bedrock.

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

1. はじめに

複雑な河川物理環境を有する溪流地における河川水質の形成には、流域スケールの大規模な要因に加えてリーチスケールの河道・河床構造などの物理環境も重要な役割を果たしている。このような水質形成過程では、河川水が地中に浸透・流出する循環過程が重要となる。

また、上流域では河道内流量を大きく減少させる水力発電の取水という人為的インパクトも無視できない。水力発電の導水路を通った水と河道内を流下した水とでイオン濃度が20%ほど異なるという観測結果¹⁾もある。そこで本研究では溪流地を調査対象とし、複雑な河川物理環境と人為的インパクトをも含めて変動する流量が循環過程の効果をを通して水質特性に与える影響について、現地調査を基に考察した。

2. 調査概要

(1) 調査対象地点

調査対象河川は茨城県北部の高萩市と日立市に位置する二級河川の花貫川と十王川である。花貫川には総貯水容量2.88百万m³の花貫ダムが、十王川には総貯水容量2.86百万m³の十王ダムがある。調査地点はこれらのダム上流の溪流地であるが、花貫川には最大使用水量0.83m³/sの花貫川第二発電所があり、約2.1kmの長さにわたり減水区間を生じている。いずれの河川も調査区間周辺は大きな礫や岩盤が露出し瀬淵構造の連続が顕著にみられる河道となっている。

図-1に花貫川、図-2に十王川の対象地点周辺の概略図を示す。

(2) 調査方法

調査は2005年4月から2007年1月にかけて実施した。調査項目は、流量、水温、水質 (pH、電気伝導度、溶存酸素、酸化還元電位、Cl⁻濃度、NO₃⁻濃度、SO₄²⁻濃度)、物理環境 (河床勾配、水面勾配、河床材料、水深、八割水深流速、流れ場) である。花貫川では、流量と水質の関係に注目するため発電取水による減水区間の内部7ヶ所及びその上下流 (堰上および合流後) で流量と水質を同一日に測定した (図-3)。物理環境の調査は花貫川のと十

王川の自然流量区間で瀬や淵などの河床構造が偏らないように各8ヶ所を選んで実施した。

測定水質項目のうち、pH、電気伝導度、溶存酸素および酸化還元電位は携帯用水質計（W-23P, HORIBA）を用いて現地で測定した。無機イオン類（塩化物イオン、硝酸イオン、硫酸イオン）はガラス瓶（30ml）に採水して実験室に持ち帰ってからウルトラユニットフィルター（USY-1, ADVANTEC）を用いて有機物を除去しイオンクロマトアナライザー（IC-7000, YOKOGAWA）で分析した。水温は複数の水温計（分解能0.02℃、精度±0.1℃）を河床付近に設置し、数日間の連続測定を実施した。

3. 発電減水区間の水質特性

(1) 自然流量区間との比較

自然流量区間（合流後地点）と減水区間（⑦地点）の陰イオン濃度を、流量の異なる観測日について比較したものが図-4である。自然流量区間では塩化物イオンと硝酸イオンの濃度は流量の増加とともに低下する傾向があるが、硫酸イオン濃度はあまり変化していない。平田ら²⁾や辻村ら³⁾の観測では、これらの陰イオン濃度は一様に降雨直後、雨水による希釈効果によって低下することがわかっている。今回の調査で硫酸イオン濃度があまり変化していないのは、硫酸イオンが表層土壌よりも高濃度で存在する下層土壌⁴⁾からの基底流出が本区間の水質形成の支配要因となっているためではないかと推測される。

取水堰から合流点までの減水区間は上下流との流量の連続性が失われている。自然流量区間のような流量増加に伴う陰イオン濃度の低下傾向はみられない。図-4のうち、流量の特に大きい1ケースを除いた全ての観測日において、取水堰では全量取水が行われており堰を越流して減水区間に流入する水はなかった。そのため減水区間の流れは基底流出に全てを依存しており濃度がほぼ一定になったと考えられる。

(2) 流量減少区間内の陰イオン濃度の縦断分布

図-3の測定地点において冬季に流量と陰イオン濃度を測定した結果を図-5に示す（2006年12月2日の観測）。このとき自然流量区間では、堰上において流量が0.88m³/s、塩化物イオン濃度が3.35mg/l、硝酸イオン濃度が1.70mg/l、硫酸イオン濃度が3.32mg/lであり、合流後地点では流量が1.53m³/s、塩化物イオン濃度が3.46mg/l、硝酸イオン濃度が1.70mg/l、硫酸イオン濃度が3.43mg/lとなっていた。減水区間内には小さな支流群が左右から流入しており、区間内の流量は①地点の0.02m³/sから⑦地点の0.12m³/sまで段階的に増えている。⑤地点の下流には比較的大きな支流合流があり、⑥地点の流量は⑤地点の約2倍になっていた。各地点の濃度と

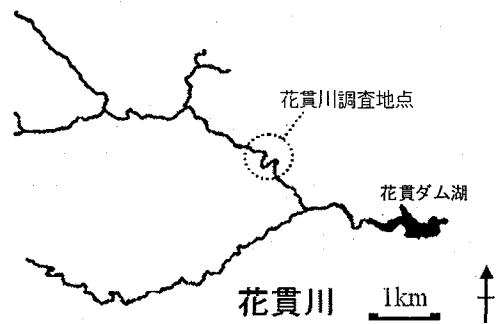


図-1 調査対象地点（花貫川）

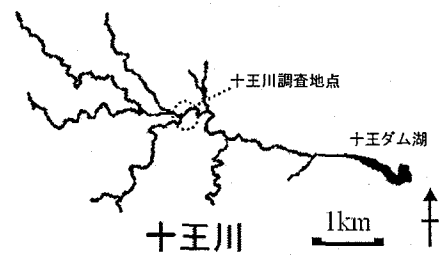


図-2 調査対象地点（十王川）

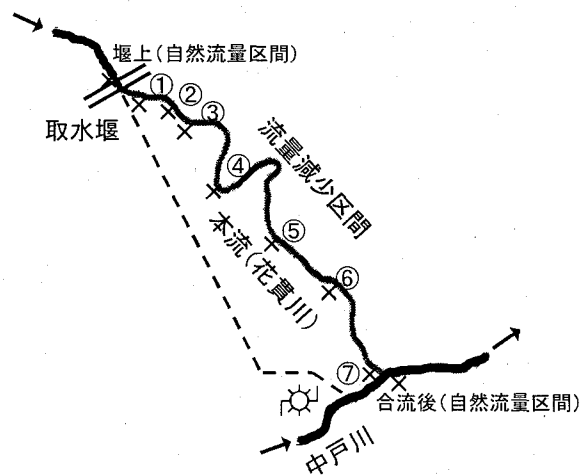


図-3 花貫川第二発電所付近の減水区間と水質及び流量の測定地点（×）

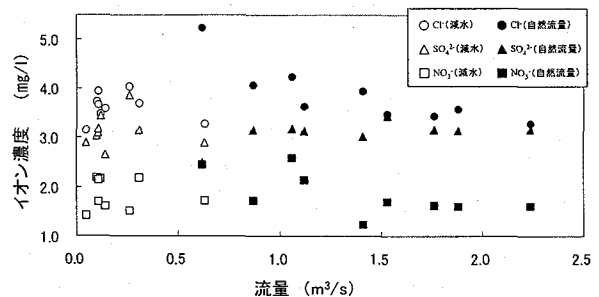


図-4 流量と陰イオン濃度の関係

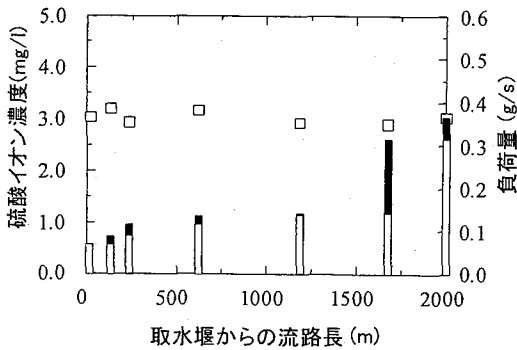
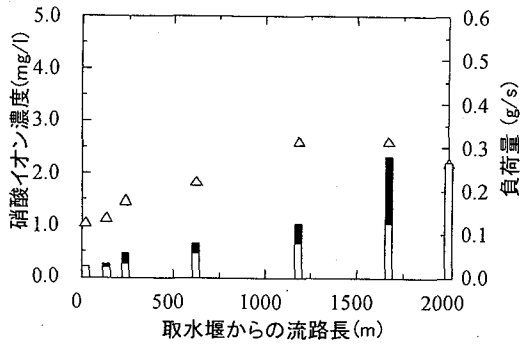
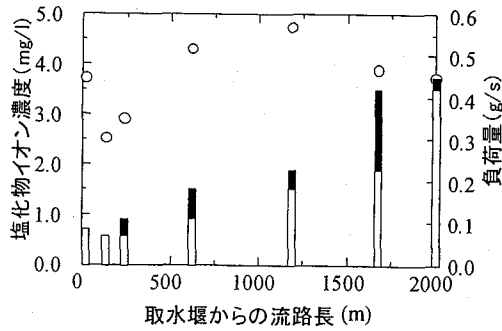


図-5 各イオン濃度と負荷量の縦断分布

流量の積をとって累積負荷量を求め、小区間ごとの負荷量分を黒く塗った棒グラフを図-5中にも書き入れた。

塩化物イオン濃度は2.5~4.8mg/lと2km程度の区間にしては大きなばらつきがあった。小支流合流の影響と考えられる。硝酸イオン濃度は単調に増加しているが、区間上流端付近の流量が少ない地点で値が小さくなっているのは、十分に脱窒された基底流出もしくは中間流の強い影響を受けているためと考えられる。しかし硫酸イオン濃度は流下方向にほとんど違いがみられないことから、硝酸脱窒は起きているが硫酸還元は起きていない土壌水の影響があると推測できる。土壌水中では嫌気的条件下で脱窒が起きた後に硫酸還元が起きる。地中での滞留時間が十分に長い地下水のような基底流出なら、脱窒と硫酸還元を経て硝酸イオン、硫酸イオンともに低い濃度を示すはずである。よってこの減水区間の堰直下では、地下水よりは滞留時間の短い中間流が卓越しているのではないかと推測される。

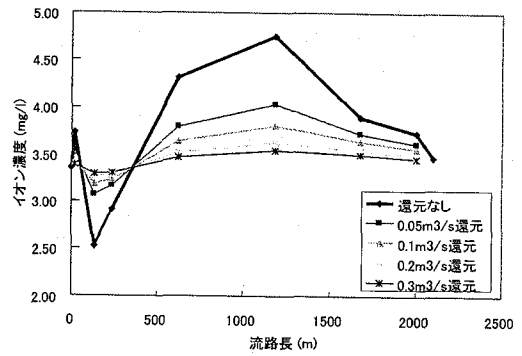


図-6 還元流量と塩化物イオン濃度

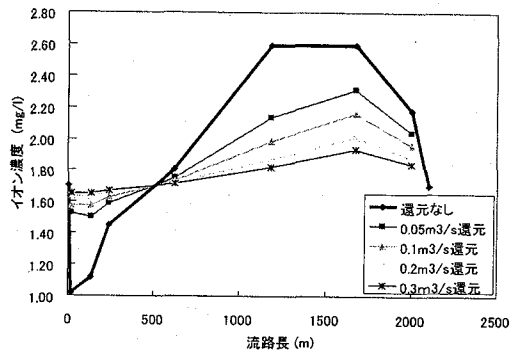


図-7 還元流量と硝酸イオン濃度

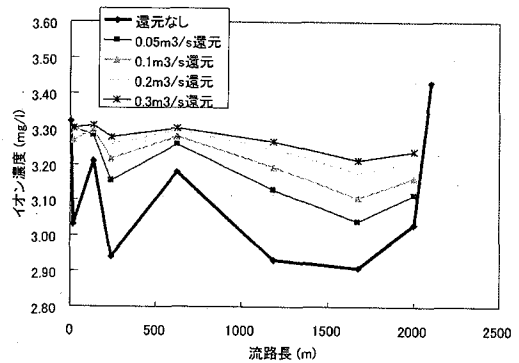


図-8 還元流量と硫酸イオン濃度

(4) 取水堰からの流量還元による減水区間の水質変化

発電用の全量取水により、この減水区間の水質は上下流との連続性が失われるとともに区間内に大きなばらつきを生じていることがわかった。減水区間に一定流量を供給すれば、区間内の濃度差は縮小し上下流の不連続性が緩和されるだろう。

各区間の流域から河道内に流入する負荷量を変わらないものとして、取水堰から0.05~0.30m³/sの維持流量を放流したときの減水区間内濃度分布を単純な希釈計算で推定した(図-6, 7, 8)。これによると、0.1m³/s、すなわち最大取水量の1割程度を還元することで、区間内の濃度変動を現状の半分以下に抑制できることがわかる。

表-1 流れ場および河床材料の分類と指標化

数量化指標	流れ場	河床材料
1	波立ちがあり、波が崩れ白波が起こる	岩盤(堆積物無し)
2	波立ちはあるが、白波は見られない	50cm以上
3	波立ちが無く、表面も滑らかだが棒などを立てると波ができる	10~50cm
4	止水域、砂などが巻き上がると濁る	1~10cm
5	二	0.1~1cm
6	二	0.1cm以下

表-2 礫による河床被覆率の定義・分類

数量化指標	1	2	3	4	5
礫の被覆率	100% 岩盤	80% 礫と岩盤	50% 砂と礫	20% 砂と礫	0% 砂のみ

表-3 流下方向に測定した水質と河川物理特性

測定地点	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	水深 (cm)	流速 (m/s)	動水勾配	河床材料	礫の 被覆率	砂の堆積深 (cm)	流れ場	河岸状況 (流出水の有無)	最低水温	平均水温
花貫1 瀬オチ	-0.131	-0.113	0.023	24	0.74	0.059	3	2	0	1	1	0.008	0.007
花貫2 瀬	-0.057	0.063	-0.009	19	0.50	0.034	1	1	0	2	0	0.002	0.004
花貫3 淵	-0.182	0.091	-0.005	37	0.41	0.040	1	1	0	3	0	0.007	0.006
花貫4 止水	0.040	-0.039	-0.002	42	0.20	0.011	6	5	30	4	0	-0.011	-0.009
花貫5 瀬オチ	0.117	-0.053	0.029	29	0.87	0.053	2	2	0	1	0	0.014	0.008
花貫6 瀬	0.252	0.086	-0.027	12	0.49	0.042	3	3	5	2	0	0.002	0.003
花貫7 淵	0.076	-0.020	0.007	23	0.30	0.029	5	4	10	3	1	-0.021	-0.017
花貫8 止水	-0.116	-0.016	-0.015	46	0.12	0.010	6	5	20	4	0	-0.001	-0.001
十王1 瀬オチ	-0.049	0.001	0.008	29	0.66	0.067	2	2	5	1	0	0.003	0.005
十王2 瀬	-0.134	-0.003	0.012	21	0.56	0.038	3	2	5	2	1	0.000	0.002
十王3 淵	0.049	0.007	-0.020	39	0.27	0.037	5	4	10	3	0	0.000	0.003
十王4 淵	0.015	0.026	-0.035	32	0.21	0.021	5	4	10	3	0	-0.007	-0.004
十王5 瀬オチ	0.123	-0.026	0.008	24	0.60	0.063	3	2	0	1	0	0.007	0.000
十王6 瀬	0.109	-0.018	-0.006	14	0.47	0.045	5	2	5	2	0	0.003	-0.003
十王7 淵	-0.023	0.007	0.008	26	0.20	0.022	5	4	5	3	0	-0.010	-0.008
十王8 淵	-0.090	0.005	0.026	39	0.26	0.017	6	5	25	3	0	0.003	0.004

4. 河川物理環境と水質に関する考察

(1) 水温及び硝酸イオン濃度との相関

発電減水を伴う溪流地の河川水質に大きな影響を与えている可能性をもつ、地下水ほど滞留時間の長くない流出成分(この先「浸透流出水」と呼ぶ)を河川物理環境との関係で調べる。

地下水は表流水よりも水温が一定しており、昼間に低く、夜間に高い。浸透流出水の水温も地下水ほど顕著でないにせよ同様の傾向があると考えられる。また、本減水区間では硝酸イオン濃度が低く硫酸イオン濃度は低くも高くもないと推測された。よって、浸透流出水の卓越する地点では夜間の水温が周囲より高く、硝酸イオン濃度が低くなっていることが予想される。

花貫川と十王川の自然流量区間において水温、水質と河川物理環境を計測し、水温および硝酸イオン濃度と他項目の相関を調べた。このとき物理環境は表-1, 2のように数量化し、水質は河川ごとの平均値を用いて基準化した(表-3)。

夏季(2006年8月3日)の河床付近における最低水温と各観測値の相関をみたものが図-9である。河床材料、礫の被覆率、砂の堆積量および流れ場が高い負の相関を示しており、これらは最低水温が高くなる箇所の河床構造が瀬に近いことを意味している。流速と動水勾配が正の相関を示しているのも同様である。しかし、硝酸イオン

濃度との相関は非常に小さく、ここからは硝酸イオン濃度と最低水温の変化が浸透流出水の影響を代表するとは断定できない。硝酸イオン濃度と各項目の相関をみたものが図-10(夏季)、図-11(冬季)である。夏季の観測値では硫酸イオン濃度と負の相関をもつことがわかるものの河川物理環境との関連は明瞭でない。冬季の観測値では、砂の堆積、河床材料、礫の被覆率及び流れ場が負の相関を示している。これは河床構造が淵に近く砂の多く堆積する箇所で、浸透流出水の影響が予測される低い硝酸イオン濃度が観測されるということである。

図-9から図-11は河道内をある程度マクロに捉えたものであるが、浸透流出水が河道内に入ってくる現象はより細かいスケールで生じる。筆者らは河道構造から浸透流出水の存在が予想される地点を数m間隔で詳細に調査し、左右岸の片方だけに水質変化が現れる現象を見出している⁹⁾。その同じ観測地点において河川物理環境を調査し、硝酸イオン濃度との相関をみたものが図-12である。水温や硫酸イオン濃度と強い負の相関をもつことがみてとれる。流速・水深ともに小さい浅瀬のような河床構造で硝酸イオン濃度が低く、また砂の堆積量が浸透流出水の存在に強く影響しているようである。

(2) 主成分分析による浸透流出水の分類

相関係数からは、浸透流出水の存在が推定される場所として瀬に近い河床構造と淵に近い河床構造という相反する結果が導かれてしまった。この相反を解釈するため

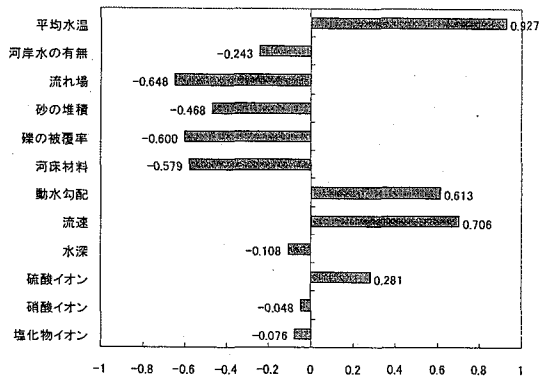


図-9 最低水温との相関係数(夏)

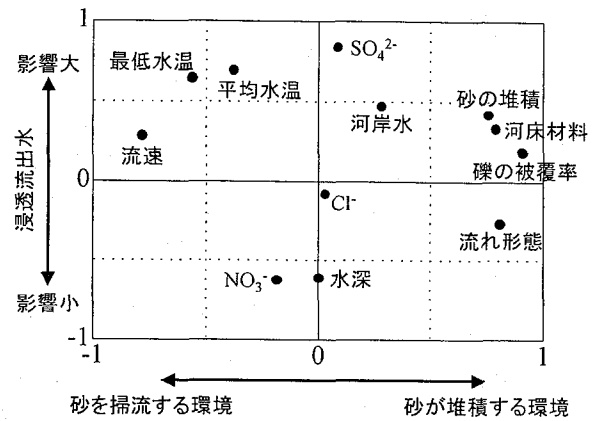


図-13 測定項目別の主成分負荷量

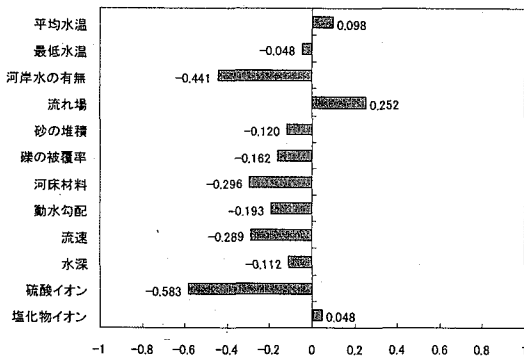


図-10 硝酸イオン濃度との相関係数(夏)

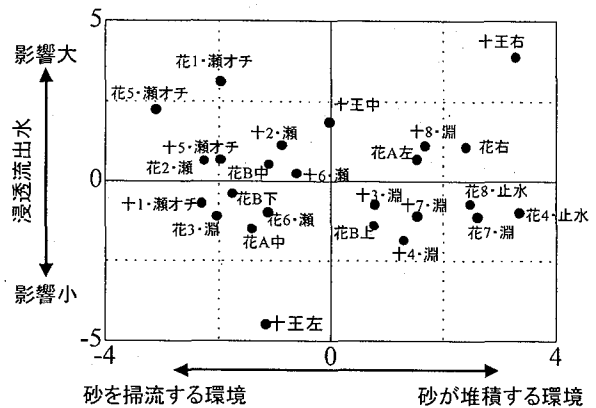


図-14 測定地点別の主成分得点の分布

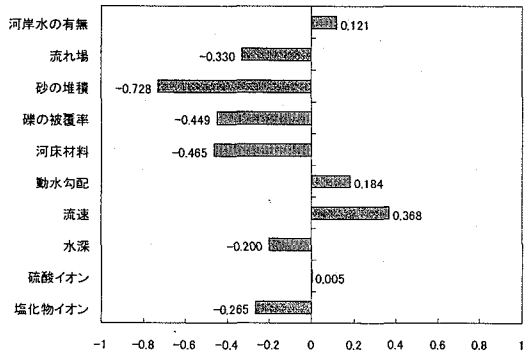


図-11 硝酸イオン濃度との相関係数(冬)

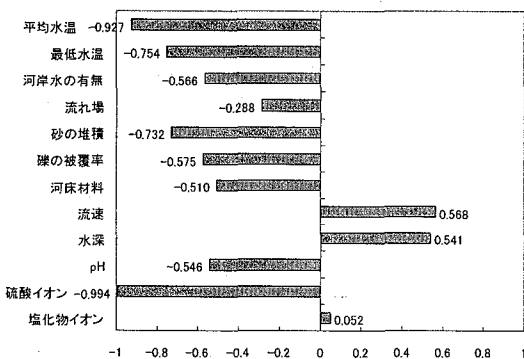


図-12 微小区間で測定した硝酸イオン濃度との相関係数

同じデータに対して主成分分析を行った。相関行列から導いた第一主成分と第二主成分の因子負荷量を図-13に示す。第一主成分と第二主成分の寄与率はそれぞれ32.3%及び25.5%であり、第三主成分の寄与率は11%であった。第一主成分は河床材料、礫の被覆率、流れ形態、砂の堆積深が大きな正の値を示している。これは砂や礫が多く堆積する環境を表す。逆に流速は負の値が大きくなっていることから、第一主成分は正方向が砂や礫の堆積しやすい物理条件を総合的に示し、負ではそれらが堆積しにくい条件を示していると解釈した。第二主成分水温と硝酸イオンも逆になっていることから、正は浸透では硝酸と硫酸イオン濃度が反対方向に位置しており、流出水の影響が大きいことを、負はその影響が小さいことを示す軸だと解釈する。

この分析結果を用いて測定地点の分布を描くと図-14のようになった。浸透流出水の影響が強くとれる点には、十王川右岸の浅瀬に代表される、砂などの堆積物が多く流速が小さい淵構造の地点と、堆積物が少なく流速が速い、瀬構造を有する地点の二種類があることがわかる。後者では特に、小さな滝の落ち込みのような地形となっている瀬オチ構造の測定地点で浸透流出水の影響が大きく表れている。

5. 結論

本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) 水力発電の取水による流量減少区間では、上下流に比べて塩化物イオンや硝酸イオンの濃度がばらつくなど縦断方向の連続性が損なわれている。
- 2) 取水堰から流量を少量（最大取水量の1割程度）還元するだけでも、流量減少区間でのイオン濃度の変化を半分以下に抑制できる。
- 3) 浸透流出水の影響が大きな測定箇所の河川物理環境としては、砂が多く堆積し流速も小さな淵構造タイプと流速が大きく岩盤地形である瀬オチ構造タイプの2通りがある。

参考文献

- 1) 小川次郎・宇都宮結樹・武下明弘・白川直樹：水路式水力発電が河川水中の陰イオン濃度に与える影響，第33回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集(CD-ROM)，2007。
- 2) 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，pp.215-221，1995。
- 3) 辻村真貴・恩田裕一・原田大路：高配したヒノキ林における降雨流出に及ぼすホートン地表流の影響，水文・水資源学会誌，第19巻1号，pp.17-23，2006。
- 4) 勝山正則・大手信人・内田太郎・浅野友子・木本秋津：降雨流出過程の相違が渓流水質形成機構に与える影響，水文・水資源学会誌，第13巻3号，pp.227-239，2000。
- 5) 今泉寛・白川直樹：渓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，河川技術論文集，第12巻，pp.347-352，2006。

(2007.4.5受付)