

I-15 流域や河川の形態の変化が水環境へ及ぼす影響の解明

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 14～平 17

担当チーム：河川生態チーム

研究担当者：天野邦彦、傳田正利、時岡利和、
対馬孝治

【要旨】

本課題では、流域や河川の形態が水環境へ及ぼす影響の解明を目指して、土地利用形態や流出形態が河川水質、河川生態系に与える影響や河川周辺の一時的水域が魚類などの生息域として果たす機能の解明を行った。手法としては、流域スケールから河川周辺地域スケールの地形情報を地理情報システム(GIS)を利用することで解析すると共に、安定同位体分析を行うことで、生態系における物質動態を解析した。炭素安定同位体対比解析より、調査を行った千曲川の上流部では陸上植物由来の有機物を河川の生物が取り込んでいること、中流部と下流部では河川の藻類が生産した有機物を河川の生物が利用していることが明らかになった。また窒素安定同位体対比分析から、下流部では都市域からの栄養塩負荷が河川生態系に取り込まれていることを定量的に明らかにした。さらに安定同位体対比分析を用いて、河川周辺の一時的水域が産卵場として利用されていること、ダムからの人工出水が下流の河床における付着および堆積有機物に与える影響について評価した。

キーワード：GIS、安定同位体比、河川生態系、千曲川、人工出水

1. はじめに

流域や河川の形態が生物・生態系に及ぼす影響を知るために、GISを用いて、水の流れのつながりを解析すると共に、河川水や河川の生物の安定同位体対比を計測することで、炭素と窒素という生元素が流域から河川域、さらに河川生態系をどの様に流れるのかを調査することにより、流域や河川形態の変化が河川生態系に及ぼす影響を解明しようというのが本研究課題の目的である。

生物体を構成する炭素や窒素などの元素の多くは質量数の異なる複数の安定同位体を持つ。これら安定同位体の割合は、物質の起源を推定する研究に利用されている。また、生物の炭素と窒素の安定同位体比はその餌の値を一定の関係を持って反映することが経験的に知られており^{1)、2)、3)}、生物の安定同位体比は生育した場所の特性を反映することが期待できる。

河川はその水理作用によって河道周囲に複雑な地形を形成する。河道には流水環境を好む生物が生息する一方で、河道周囲の複雑な地形によって形成された水域は止水環境を好む水生生物の良好な生息場である。このような河道周囲の止水域における魚類

による利用は多様で、採餌や休息だけでなく産卵場や稚仔魚の生育場としての利用に加えて出水時の避難場など、その生活史のある期間において決定的な役割を果たしうる可能性が考えられる⁴⁾。

この様な推定に基づき、①モデル流域における流域の土地利用特性と流出水質の関係の解明、②流域からの流出水質、流出形態の変化が魚類などに及ぼす影響の解明、③河川周辺の灌漑水路網、水田、湿地の有する、魚類などの生息域としての機能の解明という3つの達成目標を満たすべく、以下に記述する研究を実施した。

2. モデル流域における流域の土地利用特性と流出水質の関係の解明

都市への人口集中、流域の土地利用の変化に伴い、降雨流出や水利用形態の変化、水質汚染や水辺の生態系変化など、さまざまな課題が生じている。これら諸課題を解決するため、流域という視点でとらえた総合的な水管理手法を確立することが求められているが、そのための基礎的知見として、土地利用、水利用や人間活動等流域条件の変化による河川の水量、水質の変化や河川工事等による河川地形の変化

が、河川の水環境や生態系に及ぼす影響を解明する必要がある。

本研究では、千曲川上流域をモデル流域としてとりあげ、上記の変化が河川生態系に及ぼす影響について調査を行った。

2. 1 地形と土地利用

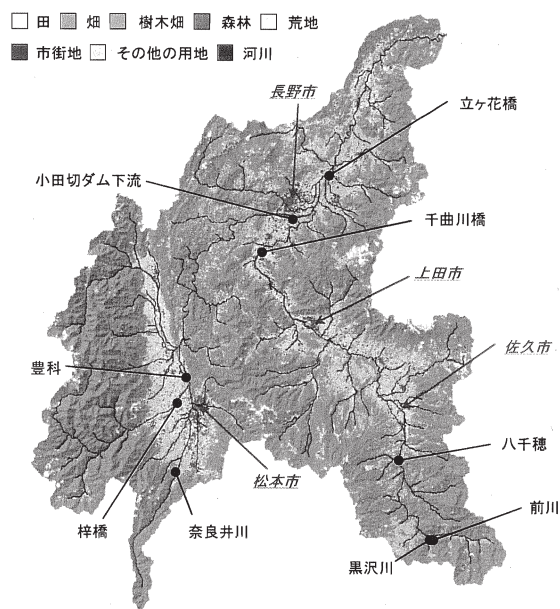
千曲川流域を対象に、国土地理院が提供している数値地図 50m メッシュ (標高) データおよび 100m メッシュの細分区画土地利用データを GIS ソフトウェアにより整理した (図一1)。流域の大部分 (約 72%) を森林が占めていること、水田面積が (9.4%) を占めることなどの定量的な評価も GIS を利用することで容易に計算可能である。流域単位での土地利用の解析は河川水質を考える上で重要な情報を提供する。

GIS を利用することで、土地利用形態の分布と地形情報とを組み合わせることも容易になる。千曲川流域における標高、傾斜角度 (図一2) とを比較すると長野、松本、上田、佐久盆地といったまとまった平地の他に上流部 (図一2 中の右下の部分) の高標高地区に傾斜の緩い場所が存在することがわかる。土地利用分布情報 (図一1) と比較すると、この場所は畑地としての利用が進んでいることが示される。実際、この地域においては高原野菜の栽培が大規模に行われている。また、上述の4盆地の分布と市街地、田畑の分布とはほぼ一致しており、流域における土地利用が地形と密接に関連していることが示されている。地形を無視した土地利用改変が行われることは少ないと考えられるため、現在の土地利用と地形情報とを比較検討することで、現在の土地利用解析が行えるだけでなく、将来の土地利用変化がどのようなものになる可能性があるかについても地形情報に基づき予測することが可能と考えられる。

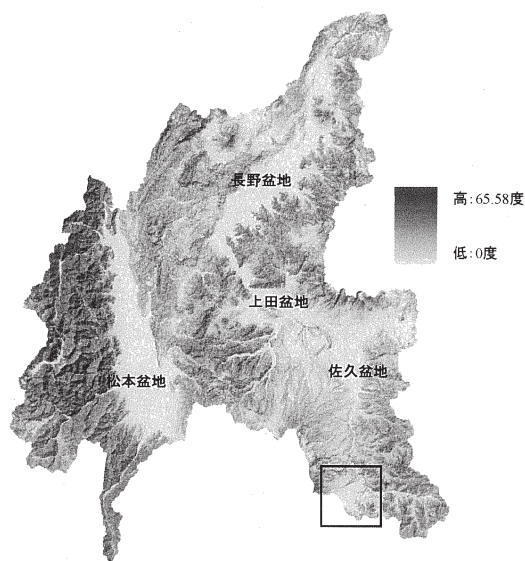
2. 2 集水域特性の解析

GIS の優れた機能の一つに標高情報を利用した流域界と河道網の抽出機能がある。GIS では流域地形を表すのに流域をメッシュに分割して、それぞれの平均標高と平面座標系上の位置を収納し、地形情報として整理している。この情報を利用して流域界と河道網を抽出することができる (この様にして作成された河道網は落水線と呼ばれている)。落水線の作成方法については、すでに確立されており⁵⁾、GIS ソフトウェアの解析ツールとして市販もされている。

落水線を作成した後は、流域内の各メッシュに落下した降水が下流に向かって流れる経路が GIS 上に展開されるため、河川の任意地点を指定すれば、そこから上流にさかのぼることで、その地点へと水が流出する流域を切り出すことができる。この機能を使用すれば、河川中の任意地点における集水域の特性を解析することが可能になる。千曲川流域についてこの手法を適用した結果を図一3～5に示す。



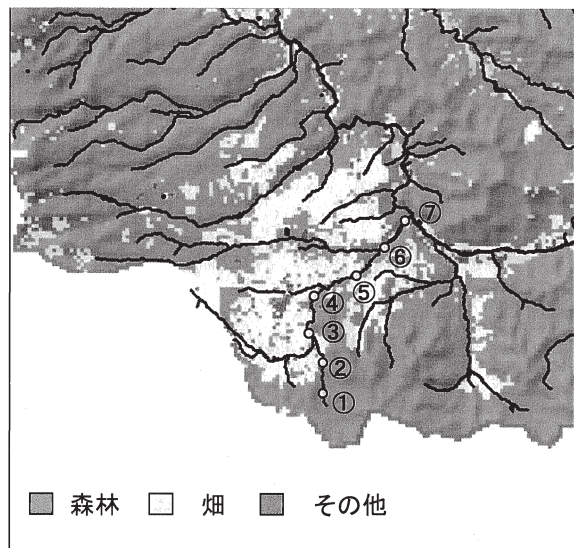
図一1 千曲川流域土地利用分布



図一2 千曲川流域土地傾斜角分布

まず、千曲川支川の一つである西川についての流域解析結果を取り上げる。西川流域 (図一2の四角枠) では、先述のように高原野菜生産が盛んに行わ

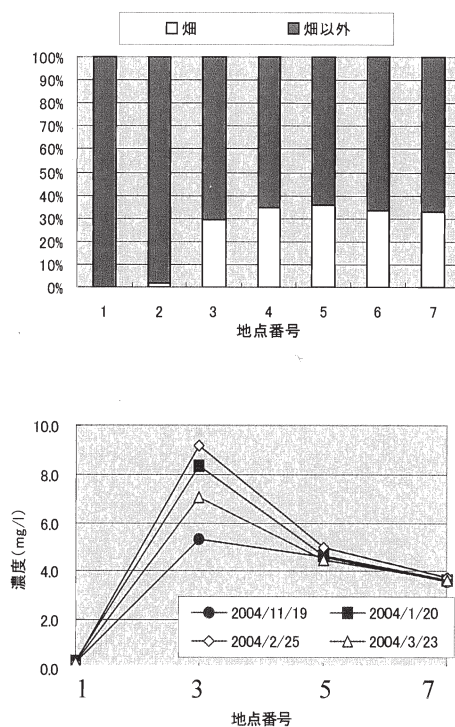
れており、西川の水質もこの土地利用による影響を強く受けていると考えられる。そこで、西川の上流から下流における本川との合流点までを対象に縦断的に流域土地利用と水質分布との比較を行った。西川において縦断的に合計7地点を設定し(図一3)、それぞれの地点における流域土地利用面積比率をGISにより求めた結果が図一4に示されている。地点番号③から流域に占める野菜畑の比率が急激に増加し、3割を超えていることが示されている。これら7地点から1地点おきに合計4地点を対象に河川水を採取し、硝酸態窒素濃度を測定した結果も図一4に示す。硝酸態窒素濃度の急激な上昇が地点番号③より下流で認められる。畑地からの流出の影響を受けていない地点①での濃度に比べて農地からの流出の影響を受ける地点③では、窒素肥料由来と考えられる硝酸態窒素濃度が一気に30倍の濃度にまで上昇している。ここで示されるとおり、西川における硝酸態窒素濃度変化は、土地利用変化に強く規定されていることが分かる。河川環境を考える上で、流域土地利用の評価が重要である所以である。また、このように土地利用が極端な流域を利用すれば、負荷の流出解析の精度向上が進むと考えられる。



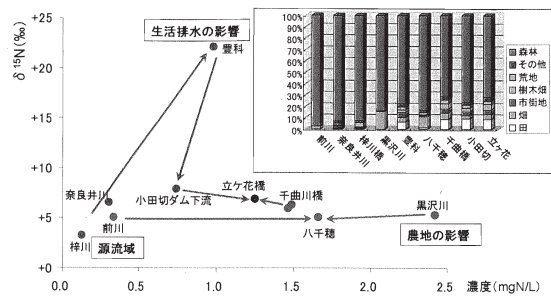
図一3 西川流域と評価地点

2003年8月に硝酸態窒素濃度と共にその安定同位体比を流域内の9地点(図一1)で測定した結果を図一5に示す。流域のほぼ全域が森林で占められている前川、奈良井川、梓橋の3地点では硝酸態窒素濃度は低レベルで、また安定同位体比も低い値を示している。西川同様に流域で高原野菜栽培が盛んに行われている黒沢川では、化学肥料由来と考えられ

る高濃度の硝酸態窒素が検出されているが、合成肥料に含まれる窒素の安定同位体比は低いため、森林からの流出成分に比べて安定同位体比は大きな違いは認められない。市街地の影響が最も大きい豊科地点では、硝酸態窒素濃度が黒沢川ほどは高くないものの、安定同位体比は+20%以上と高い値を示した。これは、この地点での硝酸態窒素の多くが、人間を含めた動物からの排泄物成分に由来していることが示されていると考えられる。河川生態系に対する影響が大きい窒素やリンなどの栄養塩類濃度の変化は、河川環境を把握する上で重要な観点であるが、河川水の栄養塩類濃度は一般的に流量変動に伴い大きく変化する。ただし、河川流量と栄養塩類濃度との関係は、負荷量と流量との単純相関で表されるL-Q式を用いた簡易な手法で取り扱われることが多く、変化の機構までを検討することはあまり行われていない。安定同位体比を水質濃度と同時に計測することで、点源負荷と考えられる生活系排水と、面源系負荷である農地からの排水が流量変動に応じて量的にどのような変化を示すかについての情報が得られると考えられる。この様な場合でも、GIS情報を援用することで、より正確な評価が可能となると考えられる。



図一4 各評価地点における集水域の土地利用割合(上図)と硝酸態窒素濃度変化(下図)



図一五 千曲川流域での硝酸態窒素濃度と安定同位体比の分布

3. 流域からの流出水質、流出形態の変化が魚類などに及ぼす影響の解明

前章では、流域土地利用と河川水質との関連性を解析するためのGISを利用した手法について述べた。本章では、さらに河川水質が河川の生物に与える影響について解析した結果について示す。前章同様に流域の形態をGIS（地理情報システム）を用いて明らかにし、さらに河川の水質と生態系の主要な構成要素である硝酸態窒素、懸濁物、付着藻類、水生昆虫の量や濃度と安定同位体比を測定して、流域と河川生態系の関係を定量的に明らかにした。

3. 1 流域からの流出水質が河川の生物に及ぼす影響の解明

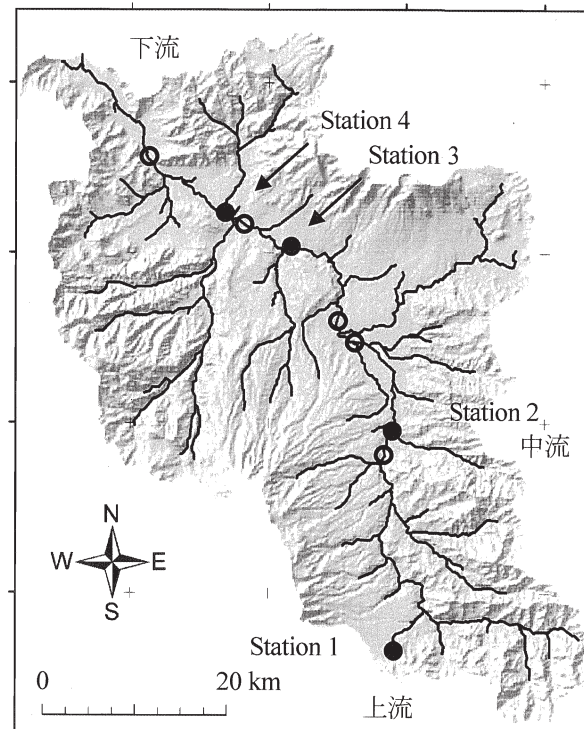
3. 1. 1 調査地概要

調査は長野県東部に位置する千曲川を対象とした。千曲川源流の支流の一つである西川から長野盆地までの千曲川上中流域のおよそ100kmの区間において、水質と河床の付着生物群集（付着物）の調査地点を9地点設定し、水生昆虫の調査を4地点で行った（図一六）。水質と付着物の調査は平成16年春季に2回、水生昆虫の調査は1回行われた。

採水は河川流心部にて5リットル容器で行った。試水のろ過にはガラス繊維ろ紙（Whatman GF/C）を用い、集積された粒子状物質を懸濁物とした。付着物は河床の礫を採取し、5cm四方をブラシで採取し集めたものを試料とした。水生昆虫は、サーバーネットを用いて河床の30cm四方の底生生物を捕獲を行った。

水質の測定項目として、主要な溶存態の栄養塩である硝酸態窒素は濃度と窒素安定同位体比が測定され、懸濁物については濃度と炭素及び窒素の安定同

位体比が測定された。河川の一次生産者である藻類を含む付着物については河床礫面上の面積あたりの乾燥重量と炭素と窒素の安定同位体比を測定した。水生昆虫は河床の面積あたりの湿重量と、代表的な



水生昆虫であるヒゲナガカワトビケラの炭素と窒素の安定同位体比を測定した。

図一六 長野県東部の千曲川流域の調査地概要。水質と付着物の調査地点（○）及び水生昆虫を含めた調査地点（Station 1～4）（●）を示す。

3. 1. 2 地形と土地利用

調査対象の千曲川流域において、国土地理院が影響している数値地図の標高データと細分区画土地利用データを基にGISソフトウェアを用いて解析を行った。流域は任意の地点で地形と標高のデータから特定し、その中での土地利用コードを積算して各土地利用の流域に占める面積比率を算出した。

3. 1. 3 水生昆虫（ヒゲナガカワトビケラ）

河川生態系の一次消費者の主要な構成要素であるヒゲナガカワトビケラ、主要な一次生産者を示す付着物、そして腐食食物連鎖からも重要な河川生態系の構成要素である懸濁物の炭素と窒素の安定同位体比の結果から、調査地域の河川生態系は3つに分類することができた。

調査地上流部のヒゲナガカワトビケラ幼虫は炭素

安定同位体比が低く (-29.3 ~ -28.4‰)、この地点では懸濁物も同様に低い値であった (図-7)。陸上植物を起源とする有機物はおよそ-28 ~ -26‰を持つことが知られ (例えば Boutton⁸⁾)、このことから上流部の河川生態系は陸上植物によって有機物が供給される物質循環系の一部であることが示された。これは上流域の河川生態系が陸上植物に依存するとする知見を裏付け、河川上流域での植生変化などの流域の土地利用の変化は河川生態系に非常に大きな影響を与えることが示唆された。また、ヒゲナガカワトビケラの窒素安定同位体比が低い値 (+4.2 ~ +5.1‰) を維持し、生活雑排水や家畜排水などを窒素起源とする値 (+10 ~ +20‰) と大きく差があったことから人間活動の影響を大きく受けていないと考えられた。

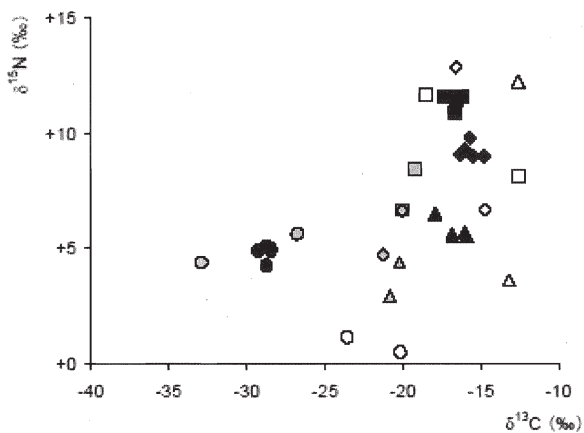


図-7 各地点 (Station 1: ○、Station 2: △、Station 3: □、Station 4: ◇) における、ヒゲナガカワトビケラ幼虫 (黒)、懸濁物 (灰色)、付着物 (白) の炭素と窒素の安定同位体比の関係。

一方中流部と下流部では、ヒゲナガカワトビケラ幼虫の炭素安定同位体比が高くなった (-17.9 ~ -14.8‰)。一般に河川などの藻類は比較的高い値 (~ -12‰) を示すことが知られている (例えば Akamatsu⁹⁾) ことから、中流部と下流部の河川生態系は河川内部で生産される藻類によって支えられていることが明らかである。一般に硝酸態窒素濃度が低く、低温条件が卓越し、河川水量の変化が大きい、樹冠によって日射がさえぎられるなど、藻類の生育条件が比較的良くない上流域と比較して、河川の中流域以降は藻類の生産が活発になることから、藻類起源の有機物が河川生態系に与える影響が大きいとされていた知見を支持した。本研究でも上流部の硝酸態窒素濃度は低く (0.2 mgN/L)、付着物の乾燥重量も少なかった (0.3 ~ 1.1 mg/cm²)。このため、河川の一

次生産者に与える影響が大きい負荷がある場合、河川生態系全体へその影響が伝播することが予想される。実際に下流部では中流部と比較して、水生昆虫・付着物・懸濁物のいずれも窒素安定同位体比が高い値を示し、中流部とは河川生態系の窒素源が異なり、人間活動に大きく影響されていることが示唆された。

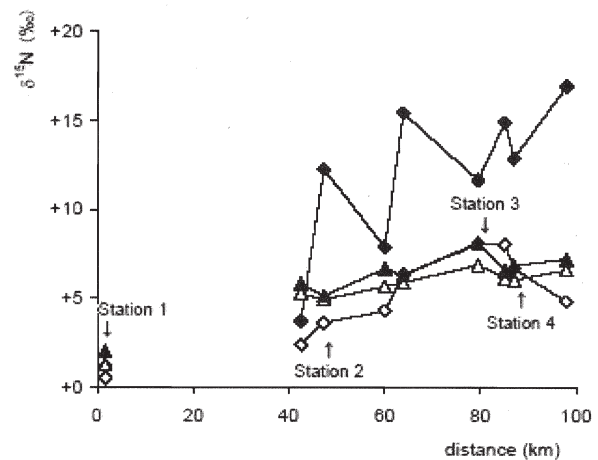
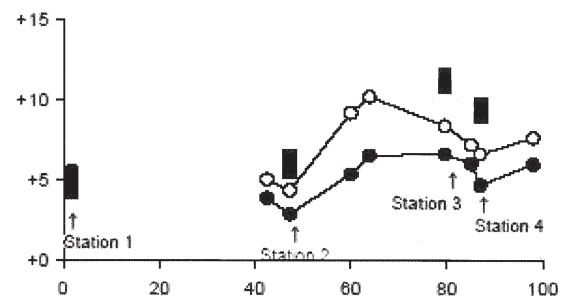


図-8 流下距離に対する窒素安定同位体比の関係。それぞれ2004年3月 (白) と4月 (黒) で、上図は懸濁物 (●) とヒゲナガカワトビケラ (■) を示し、下図は硝酸態窒素 (▲) と付着物 (◆) を示す。

3. 1. 4 硝酸態窒素の窒素安定同位体比の変化

中流部から下流部では、硝酸態窒素、懸濁物、付着物、ヒゲナガカワトビケラのいずれも窒素安定同位体比が高くなっていった (図-8)。熊沢ら¹⁰⁾ は、都市部を流れる多摩川において窒素安定同位体比が硫化に伴って増大することを報告し、都市部からの排水負荷の影響であったことを指摘した。Toda¹¹⁾ は河川の付着藻類の窒素安定同位体比が河川流域の窒素負荷源をよく反映していることを報告している。時岡ら¹²⁾ と天野ら¹³⁾ は本研究の調査地の窒素源のほとんどは農地と都市域であることを報告している。本研究では、河川への窒素負荷源を農地の肥料と都市域からの排水と仮定し、その寄与の評価に用いた。これらの窒素安定同位体比は、化学肥料

で-4 ~ +4‰と生活排水で+10 ~ +20‰であることが知られている(例えば Heaton¹⁴⁾)。これらの値と実際に本研究で測定された値から測定された試料の窒素源に対する肥料と生活排水の寄与割合を評価することができる。その結果、窒素安定同位体比から産出される硝酸態窒素に対する生活排水の寄与は Station 2 では33%だったのに対し、Station 3 では46%へと増加していた。この両地点の流域面積に占める都市面積割合はそれぞれ 1.0%と 2.8%であり、流域全体に占める都市面積比の増加が小さいにも関わらず、河川の硝酸態窒素への寄与が大きいことが示された。硝酸態窒素の窒素安定同位体比が農地からの肥料と都市域からの生活排水の割合を反映しているとすると、流域の農地面積に対する都市面積の割合(都市/農地)は硝酸態窒素の窒素安定同位体比と一定の関係があると考えられる。本研究では中流部から下流部において一定の関係が見られ(図-9)、都市域/農地の比率が0.1増加すると、硝酸態窒素の窒素安定同位体比は1.7から2.0‰増加することが明らかになった。

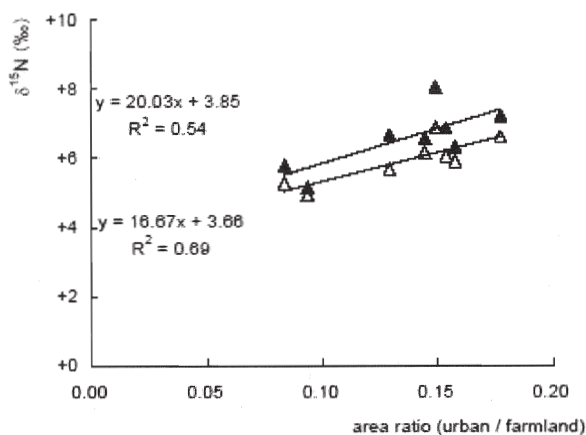


図-9 農地に対する都市域の面積比に対する硝酸態窒素の窒素安定同位体比の関係(2004年3月(△)及び4月(▲))。

3. 1. 5 懸濁物の炭素安定同位体比

Station 2 より下流では Station 1 と異なり、懸濁物の炭素安定同位体比は陸上植物の値(-28 ~ -26‰)と付着藻類の値(~ -12‰)の間であり(図-10)、懸濁物の炭素源は主にこの両者であると考えられることができる。懸濁物の炭素安定同位体比は流下に伴ってわずかに増加し、平均すると流下距離10kmで0.25‰増加し、藻類の寄与率は1.5%増加していた。流下に伴い懸濁物への藻類の寄与率が増加することは、流下に伴って藻類の窒素源である硝酸態窒素の濃度が

増加し、生産量の増加が示唆されることも矛盾がない。硝酸態窒素濃度の増加は、流域における農地と都市域の面積比の合計と相関が高かった(2004年3月、 $r=0.94$; 4月、 $r=0.95$)。すなわち、流域の農地と都市域の面積比の合計は、硝酸態窒素濃度を増加させ、河川内の藻類生産が増加するため、懸濁物の炭素安定同位体比が増加し、懸濁物への藻類の寄与が増加していたと考えられた。ここで、Station 1 の懸濁物は陸上植物を起源として藻類の影響を受けていないと考えられたことから、Station 1 での懸濁物の窒素安定同位体比の平均値である+5.0‰を藻類ではない陸上植物由来の懸濁物の値と仮定することができる。

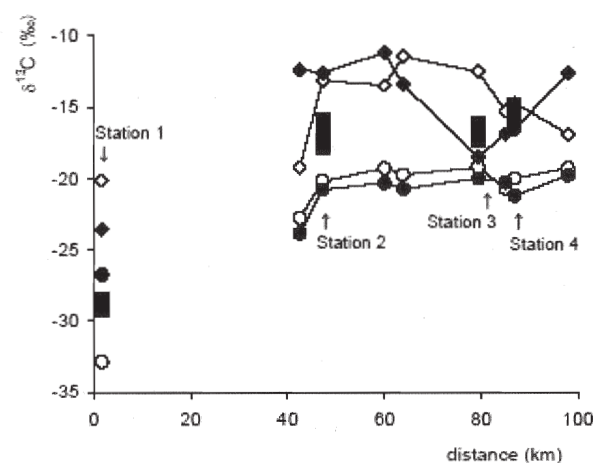


図-10 流下距離に対する炭素安定同位体比の関係。それぞれ2004年3月(白)と4月(黒)で、懸濁物(●)、ヒゲナガカワトビケラ(■)、付着物(◆)を示す。

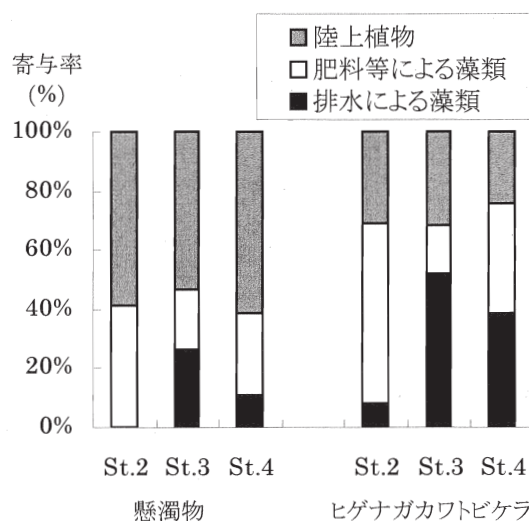


図-11 懸濁物及びヒゲナガカワトビケラの窒素源に対する陸上植物(灰色)、肥料等を窒素源とする藻

類（白色）、生活排水を窒素源とする藻類（黒色）の寄与率（%）。

また、懸濁物の炭素安定同位体比から懸濁物に占める藻類の寄与率が算出できるため、藻類由来の懸濁物の窒素安定同位体比を計算することができる。さらに、算出された藻類由来の懸濁物の窒素安定同位体比から、農地の肥料（0‰）と都市域の生活排水（+15‰）の寄与率を計算した。その結果、2004年4月における Station 2 の懸濁物の寄与率は、陸上植物 59%、生活排水由来の藻類 0%、肥料等由来の藻類 41%であり、Station 3 では、それぞれ 54、27、19%となった（図-11）。また、生物の窒素安定同位体比が餌物質よりもほぼ 3‰高くなる（例えば Wada ら¹⁵⁾、Yoshii ら¹⁶⁾）ことを考慮して、ヒゲナガカワトビケラについても同様に陸上植物、生活排水由来の藻類、肥料等由来の藻類の寄与率を算出すると、Station 2 でそれぞれ 31、8、61%であり、Station 3 では 32、52、16%となった。生活排水由来の藻類に寄与される割合に注目すると、ヒゲナガカワトビケラ幼虫は懸濁物よりもその割合が高く、Station 2 から Station 3 への増加も大きい。そのため、都市域から河川へ負荷された生活排水中の窒素は、付着藻類を通してヒゲナガカワトビケラに良く利用され、その影響が河川生態系によく反映されていることが明らかになった。ヒゲナガカワトビケラの測定された窒素安定同位体比は、計算によって求められた生活排水由来の藻類を起源とする懸濁物の窒素安定同位体比より約 1~4‰高く、生物はその餌より窒素安定同位体比が約 3‰大きい値となることとほぼ一致していた。

この様に、GIS 解析と安定同位体分析を組み合わせることで、流域土地利用が河川生態系に与えている影響について安定同位体を用いて明らかにすることができた。都市域/農地の割合は硝酸態窒素の窒素安定同位体比に、都市域と農地の面積比の合計は硝酸態窒素濃度に、硝酸態窒素の濃度と窒素安定同位体比は懸濁物の炭素と窒素の安定同位体比に、そして懸濁物はヒゲナガカワトビケラ幼虫に、それぞれ影響を与えていた。

3. 2 流出形態の違いが河川の生物に及ぼす影響

河川は陸域から流入する物質を集めながら、物質循環過程を繰り返して下流へ運ぶため、河川の生態系や物質循環は連続性を有している。河川の連続性についてはいわゆる河川連続体仮説¹⁷⁾の概念モデル

が知られている。河川連続体仮説によると、河川では源流から河口までの物理条件の連続的変化に対応して生物が分布し、物質の供給、利用、貯蔵、運搬の系が形成される¹⁸⁾。ダムは河川で運搬される水や有機物、河床材料、生物を遮断し、貯留する。そのため、河川の連続性と下流の河川環境に影響を与える¹⁹⁾。しかし、その現象には多くの要因がからみ、未解明の部分が多い。それらの要因は流域の特徴やダムの場所、ダム湖の規模、ダム管理状況などであり、その影響も多様であることが予想される。3.2 節では、ダムの存在が下流の河川の物質循環系に与えている影響を明らかにし、河川生態系を含めた影響に言及することを目的とした。

近年、国土交通省が管理するダムの一部などでは、洪水調節容量の一部を増量放流やフラッシュ放流に使用する弾力的な管理が試みられている²⁰⁾。このようなフラッシュ放流は河床堆積物の掃流や付着藻類の剥離更新を促進し、ダム下流河川の底生生物の生息環境を改善することを目的としている。宮ヶ瀬ダムにおいても、河床の堆積物や付着物を掃流し更新を促す目的で、弾力的管理の一環としてフラッシュ放流試験が実施されている。3.2 節の後半では、河床の付着物が剥離・掃流される状況を明らかにするために、2005年2月の宮ヶ瀬ダムのフラッシュ放流試験において、試験前から試験中、試験後にかけて河床付着物と河川を流下する懸濁物の安定同位体比を計測し、流況変化に伴う、河床付着物の剥離・掃流過程について検討を行った。

3. 2. 1 川俣ダム下流の河川の物質循環と生態系について

① 調査地概要

川俣ダムは日光国立公園内の栃木県塩谷郡栗山村に位置する鬼怒川上流域のダムの一つであり、上流に貯水を目的としたダムを持たず、1966年3月竣工、流域面積 179.4km²を持ち、湛水面積 2.6km²、有効貯水容量 7.3×10⁷m³、堤高 117m のダムである。

St. 1 はダムより上流の唯一の調査地点で、ダム湖から 1.50km 上流に位置する。St. 2 はダム放流口から最も近い地点で放流口から 0.38 km 離れ、St. 3 は St. 2 より約 1km 下流（放流口から 1.37km）に位置する。St. 4 の調査地を持つ支流は St. 3 の下流で流入し、St. 5 と St. 6 は、St. 4 の支流の合流後、ダム放流口からそれぞれ 1.75km、1.88km である。St. 7 は St. 2~6 から離れた下流の地点で、ダム放流口から

の距離は 4.85km である。調査は 2005 年 7 月 5～7 日、8 月 16、17 日、9 月 13、14 日、10 月 19、20 日の 4 回の日程で行った。

② 調査方法

調査現場で河川水の水温、電気伝導度、pH、溶存酸素濃度を多項目水質計 (HORIBA、U-22) を用いて測定した。河川水の採取は流心部で行い、採取した河川水は冷蔵で速やかに実験室に運搬した。河川水の一部はろ過せずに原水の試料水とし、残りは 400℃で 2 時間加熱して有機物を除去したガラス繊維フィルター (Whatman、GF/C; 平均孔径 1.2μm) でろ過した。試料水は -30℃で冷凍保存した。

硝酸態窒素濃度はろ過した試料水について Bran Luebee 社の AACS-III を用いて測定した。硝酸態窒素の安定同位体比測定のため、ろ過試料水およそ 4L を用いて硝酸態窒素の前処理を行った¹⁷⁾。

懸濁物は、河川水のろ過によって得られたフィルター上の残渣を試料とした。懸濁物の濃度はフィルター上の懸濁物を 110℃で 2 日間乾燥させ、ろ過河川水あたりの乾燥重量により求めた。乾燥後のフィルター上の懸濁物は無機炭素を除去するために塩酸と共にデシケーター内に一晩静置した。塩酸処理後の懸濁物は、フィルターごと粉砕して安定同位体比測定の試料とした。

付着物は河床の平らな礫面からブラシを用いて 5cm 四方を捕集した。捕集した付着物は、予め 400℃で 2 時間加熱したガラス繊維フィルター (Whatman、GF/C) を用いて捕捉した。フィルター上の付着物は 60℃で 2 日以上乾燥させ、面積あたりの乾燥重量を測定した。乾燥重量測定後の付着物は、フィルターごと粉砕して安定同位体比測定の試料とした。

流下物は 50cm 四方のサーバーネット (離合社、5514-C; メッシュサイズ 0.475mm) を用いて、水深を測定し 3 分間採取した。採取した流下物は 60℃で 2 日以上乾燥の後に乾燥重量を測定した。乾燥重量測定後の流下物は粉砕し、安定同位体比測定の試料とした。

水生昆虫はエレクトリックフィッシャー (スミスルート、Model LR-24; 出力電圧 500V～900V、出力電流最大 40A) を用いて、河床から剥離して流下した個体を捕集した。採取した水生昆虫は冷蔵で持ち帰り、実験室では冷凍 (-30℃) で保存した。解凍後に水生昆虫の消化管を含まない部位について、各調査回別に種ごと数匹分ずつ集めた。作成した試料は

60℃で一晩乾燥後に粉砕し、安定同位体比の測定に用いた。

魚類の採捕は 9 月と 10 月の調査で行い、エレクトリックフィッシャー (スミスルート、Model LR-24) を用いた。地点や調査時期の捕獲量を比較するため、10 分の労力で統一して行った。捕獲した魚類は冷蔵して持ち帰り、実験室では冷凍 (-30℃) で保存した。種同定と標準体長、湿重量の測定は解凍後速やかに行った。標準体長や湿重量の測定後、直ちに各個体の筋肉組織を切り出し、60℃で 2 日間以上乾燥した。一個体を一試料として粉砕した試料を安定同位体比の測定に用いた。ただし、湿重量 5g 以下の小さい個体は頭部と消化管を含む腹部を除いて試料とした。魚類の安定同位体比は各地点の魚種 (イワナ: *Salvelinus leucomaenis f. pluvius*、ヤマメ: *Salmo (Oncorhynchus) masou masou*、カジカ (大卵型): *Cottus pollux*) について、7 尾以上捕獲された場合は体長の大きい個体 3 尾と小さい個体 3 尾を選んで測定を行った。

③ 硝酸態窒素、懸濁物、付着物、流下物について

調査地の硝酸態窒素濃度は低く、4 回の調査でダム上流 (St. 1) とダム直下流 (St. 2、3) で $0.2 \pm 0.0 \text{ mgN/L}$ 、支流の St. 4 では $0.4 \pm 0.1 \text{ mgN/L}$ 、St. 5～7 では $0.3 \pm 0.0 \text{ mgN/L}$ だった。7 月から 10 月では明確な季節変化は認められず、ダムより下流では僅かに高濃度だった。硝酸態窒素は安定同位体比も低く、季節変化は認められなかった。ダム上流の St. 1 で 2 回 (8 月、+2.0‰; 10 月、-0.3‰) 比較的高かったが、この他の観測値 ($n=26$) で $-1.8 \pm 0.5\%$ と調査地の差も小さかった。

懸濁物濃度は 4mg/L 程度が 3 回測定されたが、多くの試料 ($n=23$) で 2mg/L 以下と低かった。懸濁物の窒素安定同位体比はダム直下流の St. 2 で +1.5～+5.1‰と高かった。ダム下流の St. 5～7 と支流の St. 4 で 9 月に高い値 (+2.8～+5.6‰) が見られたが、その他の時期ではダムより下流の St. 5～7 と支流の St. 4 で、St. 2 よりも低かった (-0.8～+2.5‰)。St. 3 では St. 2 と St. 4～7 の中間的な値 (+1.9±0.9‰) を示していた。炭素安定同位体比は St. 2 を除く地点でほぼ -26‰から -24‰の範囲だった。St. 2 では -29‰～-26‰と低かった。ダム上流の St. 1 では C/N 比は 9.9～13.1 と比較的高い範囲だった。一方、ダム下流の St. 2 では 7.6～8.1 と 4 回で非常に狭い範囲でほぼ一致していた。この 2 地点の他は時期的な

変動が大きく、6~12の範囲であった。

付着物の乾燥重量は St. 2 を除き、ほとんど (n=22) が 2mg/cm² 未満と低かった。St. 2 では比較的高く、3回の試料で 2~4 mg/cm² の範囲だった。付着物の炭素安定同位体比は、ダム直下流の St. 2 で -24.2‰~-19.0‰ と高かった。一方、St. 4~7 では低く、ほぼ -25‰~-27‰ の範囲だった。St. 3 では St. 2 と範囲が一致 (-23~-22‰) した時 (9、10 月) と、St. 4~7 と範囲が一致 (-25~-28‰) した時 (7、8 月) があつた。ダム湖上流の St. 1 では -25.3‰~-16.2‰ と大きく変化していた。窒素安定同位体比は St. 2 では +2.2±0.6‰ と高かった。St. 5~7 では懸濁物と似て 9 月に比較的高い値が見られた (-0.8~+2.5‰) が、その他は -1‰以下と低かった。支流の St. 4 は St. 5~7 と同様に -1~-2‰ で低かった。St. 1 では、St. 4~7 よりやや高く、-2.3~-0.6‰ だった。

流下物の窒素安定同位体比は St. 2 で -2.1‰~-6.0‰ と大きく変化していた。St. 5 で 4 回の調査の差が大きい (-2.9‰~+2.6‰) が、付着物や懸濁物と同様にダムから離れた地点で低い窒素安定同位体比を示し、概ね -3~-2‰ の範囲だった。ダム湖上流の St. 1 では -2.2~-0.6‰ とダムから離れた地点 (St. 5~7) よりもやや高かった。炭素安定同位体比は St. 2 と St. 5 で高い値 (~-25‰) になることがあつたが、全地点で低く -30‰~-27‰ の範囲であつた。流下物の C/N 比は高く、ほとんどが 15 以上だった。その変動は大幅で最大は 75 であり、明確な季節や場所の傾向は認められなかった。

④ 水生昆虫、魚類について

水生昆虫の安定同位体比は、多くの調査で採取され、測定に必要な試料量が得られたエルモンヒラタカゲロウ (*Epeorus latifolium*) について考察を行った。エルモンヒラタカゲロウの試料は 7 月の St. 2、9 月の St. 3 と St. 7、10 月の St. 2、St. 3 と St. 4 で得られなかった。エルモンヒラタカゲロウの試料が無いもしくは少ない調査地点では、摂食機能群と食性がほぼ一致する他のヒラタカゲロウ科の分類種で試料を補足し、タニガワカゲロウ属 (*Ecdyonurus* sp.) を 9 月の St. 3 で、ユミモンヒラタカゲロウ (*Epeorus nipponicus*) を 8 月の St. 4 で、ヒメヒラタカゲロウ属 (*Rhithrogena* sp.) を 9 月の St. 7 と 10 月の St. 4、7 で測定値を補足した。

水生昆虫の窒素安定同位体比は、ダム上流の St. 1 では -1.4~+0.5‰ だった (測定試料数 n=17)。ダム

直下流の St. 2 で最も高い値を示し、+2.5~+6.7‰ であつた (n=7)。ダムから遠ざかるにつれて、St. 3、5、6、7 の順に低くなり、それぞれ -2.0~+0.3‰ (n=9)、-3.0~-0.1‰ (n=17)、-3.8~-1.4‰ (n=20)、-4.5~-2.0‰ (n=17) となつていた。支流の St. 4 では最も低い値を示し、-5.4~-1.2‰ だった (n=21)。炭素安定同位体比は、ダム上流の St. 1 で最も高く、-21.8~-15.3‰ だった。St. 2 では狭い範囲で -28.3~-26.3‰ だった。St. 3 以降の St. 5、6、7 は下流ほど高い値を示し、それぞれ -29.7~-22.4‰、-28.1~-23.0‰、-29.1~-22.6‰、-26.4~-18.3‰ だった。支流の St. 4 では -30.2~-25.4‰ だった。

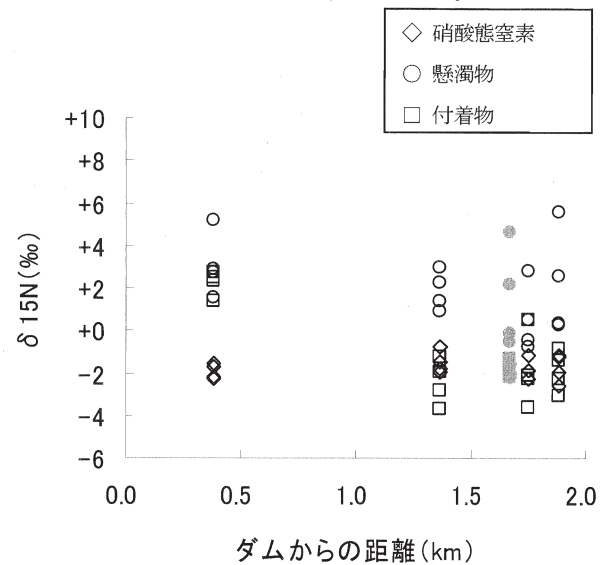


図-12 硝酸態窒素、懸濁物、付着物の窒素安定同位体比の地点変化 (支流 St. 4 は灰色で示した)。

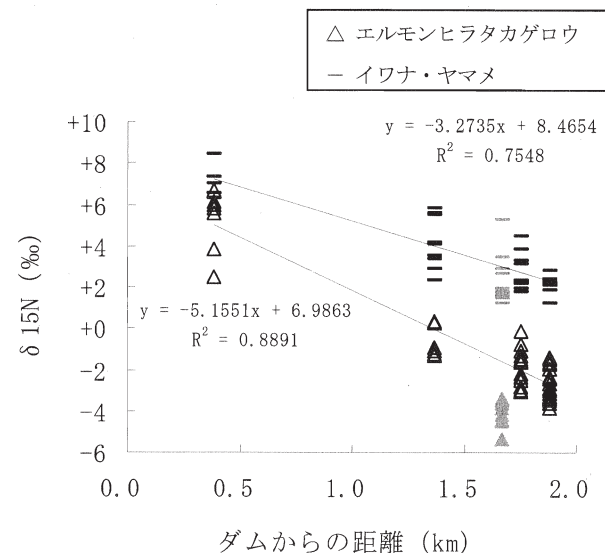


図-13 エルモンヒラタカゲロウとイワナ・ヤマメの窒素安定同位体比の地点変化 (支流 St. 4 は灰色で示した)。

魚類の総捕獲数は9月で58尾(イワナ20尾、カジカ:38尾)、10月で120尾(イワナ:52尾、ヤマメ:6尾、ウグイ *Leuciscus (Tribolodon) hakonensis*:5尾、カジカ:57尾)だった。安定同位体比を測定した魚類試料数はイワナ52尾、ヤマメ6尾、カジカ48尾だった。一般にイワナとヤマメの主な餌は流下する水生や陸生の昆虫類であり、カジカは底生の水生昆虫や甲殻類などとされている(宮地ら1989、川那部・水野1992)。そのためイワナとヤマメは区別せず、イワナ・ヤマメとして安定同位体比の考察に用いた。

ダム直下流のSt.2ではイワナ・ヤマメの窒素安定同位体比は+6.3~+8.4‰(n=5)と高かった。ダム上流のSt.1では+4.0~+8.4‰(n=6)と比較的幅広い値を示し、窒素安定同位体比の高い値の個体は体長が大きく(+6.7‰と+8.4‰で、それぞれ14.7cm、25.0cm)、この他は+4.0~+4.7‰だった。St.2から下流でダムから遠ざかるほどイワナ・ヤマメの窒素安定同位体比は低下していた(St.3,+2.3~+5.8‰、n=11;St.5,+1.7~+4.5‰、n=9;St.6,+1.2~+2.8‰、n=7;St.7,+1.4~+3.2‰、n=8)。支流のSt.4では+1.2~+5.3‰と低い個体が見られ、本調査で最も低い範囲を示した。

St.1のイワナ・ヤマメの炭素安定同位体比は、体長が大きく(14.7cm、25.0cm)窒素安定同位体比の高い個体でそれぞれ-25.0‰及び-25.6‰と低く、体長の小さい個体(7.3~10.6cm、n=4)では-18.1~-16.8‰と高かった。St.2は-24.2~-22.5‰と最も低い範囲を示した。St.2では炭素と窒素の安定同位体比はSt.1の体長の大きい個体と近く、高い窒素安定同位体比(>+6‰)と低い炭素安定同位体比(<-22.5‰)を示した。St.3ではSt.2より炭素安定同位体比が高くなり(-22.3~-19.7‰)、St.4~6は値の範囲に大きな違いは見られず、ほぼ-24~-21‰の範囲だった。St.7では炭素安定同位体比が高く、-20.7‰~-17.6‰だった。

カジカの炭素、窒素安定同位体比の範囲はイワナとヤマメの値と概ね一致していた。St.1のカジカはイワナ、ヤマメの窒素安定同位体比が低く炭素安定同位体比が高い体長の小さい個体と一致していた。ただしカジカはSt.2とSt.4で捕獲できなかった。

⑤ ダム下流の懸濁物と付着物の窒素源について

付着物に含まれる藻類は河川水中の硝酸態窒素を窒素源として一次生産を行い、付着藻類はその生育

期間の硝酸態窒素の窒素安定同位体比の平均値を示すことが知られている^{21)、22)}。しかし、ダム下流のSt.2では、付着物の窒素安定同位体比は+1.4~+2.7‰と高く、この地点の硝酸態窒素(-2.3~-1.6‰)と大きく異なっていた。そのためSt.2では付着物の主な窒素源は硝酸態窒素ではなかったと考えられる。

付着物への窒素の供給源としては懸濁物も考えられる。St.2の懸濁物の窒素安定同位体比は+1.5~+5.1‰であり、付着物とよく一致していた。St.2の懸濁物はダム湖で生産された有機物であると考えられる。ダム湖の懸濁物が下流の魚類や底生動物、糸状藻類の餌資源となっている報告がある。早明浦ダムにおいては、造網性トビケラの消化管内容物にダムから流下するプランクトン種が多く含まれていたことが報告されている²³⁾。本稿においては、ダムで生産された有機物がダム放流口に近い調査地点の付着物の窒素源であることを確実に示すデータが得られていない。しかし調査地では硝酸態窒素濃度も懸濁物濃度も全調査地点で低く、川俣ダムの一次生産が高いと考えられないが、高い安定同位体比を有する窒素源がダムで生産された有機物のみだったため、これを付着物の窒素源と推定した。付着物の窒素源のさらなる検討は今後の課題の一つである。

⑥ ダム下流の水生昆虫と魚類の窒素源について

エルモンヒラタカゲロウの窒素安定同位体比を付着物と比較すると、ダムに近い地点ほど付着物よりも高くなっていた。その差は、St.2で 3.6 ± 1.9 ‰、St.3で 1.5 ± 1.1 ‰であり、St.5とSt.6では1‰以内と小さかった。エルモンヒラタカゲロウは一般に付着藻類を摂食するとされている。エルモンヒラタカゲロウが窒素源として利用した有機物は、ダムに近い地点ほど、付着物の中でもより高い窒素安定同位体比を持っていたと考えられる。本調査の地点は硝酸態窒素濃度が低く本来貧栄養であると考えられるが、ダムから流下した有機物が河床に付着していたとすると、このような場所に生物に利用されやすい窒素を恒常的に供給することになると考えられる。そのため、ダムで生産された有機物はダム下流河川の生態系の窒素循環に大きな影響を与え、水生昆虫の窒素源をダム由来の有機物に大きく依存させたと考えられた。ダム下流2kmの範囲ではエルモンヒラタカゲロウの窒素安定同位体比は直線的に減少し、その近似式は4回の調査をまとめて、 $\delta^{15}\text{N}(\text{‰}) =$

-5.2×[距離 km]+7.0 ($R=0.94$, $n=51$) となった。St. 6 (ダムより 1.9km) では $-2.7\pm 0.7\%$ であり、支流の St. 4 ($-4.0\pm 0.6\%$) やダムから離れた (ダムより 4.9km 下流) 対照地点の St. 7 ($-3.3\pm 0.7\%$) と近い値に低下していたことからダムで生産された有機物によるエルモンヒラタカゲロウの窒素源への影響はダムの約 2km 程度下流まで及んでいたと考えられた。

イワナ及びヤマメは水生昆虫を主要な餌資源としているが、これらの窒素安定同位体比は水生昆虫の代表種であるエルモンヒラタカゲロウの値より一律で 3~4% 程度高くはならなかった。

エルモンヒラタカゲロウと同様に、イワナとヤマメでもダムからの距離と窒素安定同位体比の関係の近似直線をとると、 $\delta^{15}\text{N} (\text{‰}) = -3.3 \times [\text{距離 km}] + 8.5$ ($R=0.87$, $n=32$) となった。St. 6 ($+2.1\pm 0.5\%$) は St. 4 や St. 7 (それぞれ $+2.2\pm 1.2\%$, $+2.0\pm 0.7\%$) と同程度に低下していたため、これら魚類でも約 2km 下流でダムの影響は窒素安定同位体比に現れなくなった。これらの魚類は水生昆虫よりも行動範囲が広いと、より広い行動範囲で獲得した窒素源の平均値を示すと考えられる。しかし、ダムの影響が窒素安定同位体比に見られなくなる距離は概ね一致していた。エルモンヒラタカゲロウとイワナ・ヤマメの窒素安定同位体比の差に注目すると、より上流では差が小さい。窒素安定同位体比は食物連鎖の段階によって一般に一定の増加があると考えられている。そのためダムに近い地点と遠い地点とでは、生態系の栄養段階における両者の相対的な位置が異なっていたことも示唆される。

3. 2. 2 宮ヶ瀬ダム放流試験による懸濁物の変化について

① 放流試験の概要

宮ヶ瀬ダムは相模川水系中津川の上流部に位置し、2000年12月に運用が開始された。流域面積 213.9km² (導水面積 112.5km² を含む) を持ち、湛水面積 4.6km²、有効貯水容量 $18.3 \times 10^7 \text{m}^3$ 、堤高 156m の多目的ダムである。宮ヶ瀬ダムの運用によるフラッシュ放流試験は 2005 年 2 月 22 日 8:00 から 16:00 に行われ、放流水の最大流量は 13:00 から 14:00 の約 100m³/s だった (図-14)。

② 河川水の採取と測定項目

河川水の採取は中津川の 3ヶ所の橋で行い、ダム

から 1.5km の日向橋 (以下、上流地点) では 7:40 と 8:00 から 17:00 まで毎正時の 10 回、ダムから 7.2km の角田大橋 (以下、中流地点) では 8:00 から 18:00 まで毎正時に 10 回、ダムから 12.8km の才戸橋 (以下、下流地点) では 9:00 から 20:00 まで毎正時に 11 回行った。また各採水地点において水位を 10 分おきに計測した。

採取した河川水について、メッシュサイズ 0.99mm のネットを用いて捕捉した大きい流下物について水量あたりの乾重量 (mg/L) を測定した。大きい流下物を除いた河川水をガラス繊維フィルター (Whatman 社、GF/C) を用いてろ過して得られた懸濁物の乾燥重量と懸濁物中の有機物量 (Particulate Organic Matter : POM) を 550°C で強熱後の減量として水量あたり (mg/L) で測定した。大きい流下物は炭素窒素含量や安定同位体比の測定に必要な量に満たない試料が多く、0.5mg/L 以上の試料について測定した。

ろ過河川水と流下物や懸濁物を除いていない河川水について硝酸態窒素、アンモニア態窒素、リン酸態リン、全窒素、全リンの濃度を Bran Luebee 社の AACS-III で測定した。河川水のクロロフィル濃度も公定法 (三波長吸光法²⁴⁾) に基づいて測定した。

各採水地点の水位と流量は、国土交通省関東地方整備局相模川水系広域ダム管理事務所より提供された値を用いた。採水が流量を観測していない時刻に行われた場合は、連続計測した水位と流量の関係を近似式で求めて水量データを内挿して求めた。

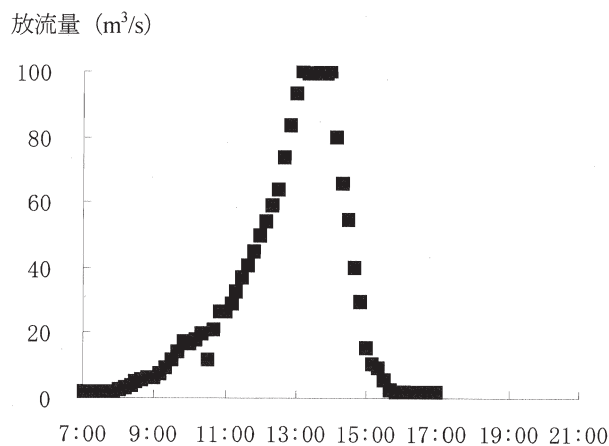


図-14 宮ヶ瀬ダム放流試験による放流量の時間変化 (2005年2月22日)

表-1 付着物の採取場所と炭素と窒素の安定同位体比とC/N比

放流口 からの 距離 (km)	2005年2月10日									2005年2月21日			2005年2月23日				
	上流 地点			中流 地点			下流 地点			上流 地点	中流 地点	下流 地点	上流 地点	中流 地点	下流 地点		
	0.8	1.2	1.5	4.5	6.2	6.5	6.8	7.2	10.0	10.9	12.8	1.5	7.2	12.8	1.5	7.2	12.8
$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	-2.1	-0.9	+0.4	+3.6	+0.8	+3.8	+2.3	+4.3	+11.8	+15.2	+7.4	+0.2	+4.2	+8.4	-0.3	+4.2	+9.0
$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	-22.1	-15.8	-19.1	-19.5	-18.9	-20.0	-19.6	-21.1	-20.5	-23.0	-22.1	-19.5	-25.1	-26.6	-18.4	-21.5	-23.4
C/N (mol)	7.3	8.4	7.4	8.1	7.6	7.1	7.2	6.8	8.1	7.1	7.9	8.3	6.6	6.6	7.6	7.4	6.8

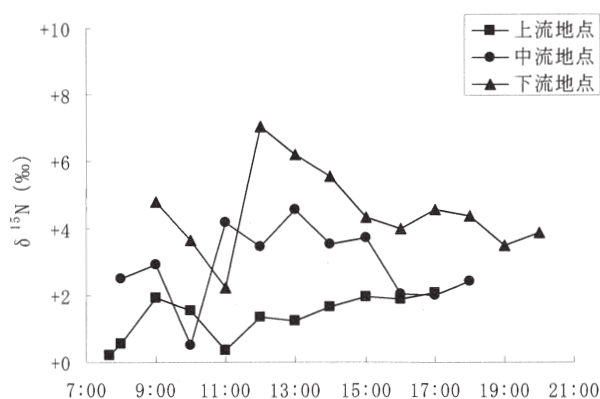


図-15 POM の窒素安定同位体比

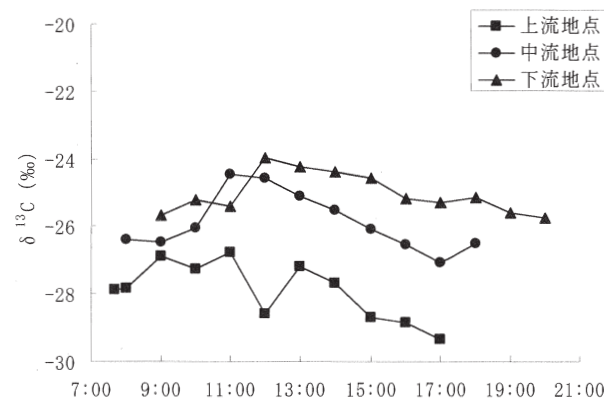


図-16 POM の炭素安定同位体比

③ 河床の石面付着物の採取と測定項目

河床付着物は、放流試験前の2005年2月10日にダムから下流地点まで1~3kmごとに11地点で、放流試験前日(2月21日)と翌日(2月23日)に各採水地点で採取した。付着物は5cm四方について、乾燥重量、炭素と窒素の含量、炭素と窒素の安定同位体比を測定した(表-1)。

④ 河床せん断力の評価方法

本研究では、対象となる河床区間の平均的な底面せん断応力が、河床からの付着物などの有機物の剥離や巻上げを平均的に評価することに適していると判断し、以下の方法で河床の底面せん断応力を算出した。

0.2kmごとの最低河床高(標高)から河床の縦断面図を作成し、調査区間の平均河床勾配を算出した。ただし、ダム放流口直後の河床標高は宮ヶ瀬ダム建設事業概要資料より135.0mを適用した。採水地点の河床横断面図の形状より、水位を用いることで底面せん断応力を式(1)で評価可能と判断した。

$$\tau = \rho g h l \quad (1)$$

それぞれ、 τ は底面せん断応力、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 h は水位、 l は河床勾配である。

⑤ 出水の頻度評価

本研究で対象の放流試験が、どの程度の生起確率の出水に匹敵するか評価するため、2000年~2005年の宮ヶ瀬ダムからの毎正時の放流量と流入量を用いて検討した。ダム放流量は現状での生起確率を、ダム流入量は宮ヶ瀬ダムが無いと想定した場合である。ダム放流口での流量と採水地点の水位の相関関係と上述の方法から各地点のせん断力を求めて、その発生頻度を比較した。

⑥ 懸濁物中有機物(POM)の炭素と窒素の起源

3回の付着物調査によって得られた17試料の付着物のC/N比と炭素と窒素の安定同位体比の結果を表-6に示す。窒素安定同位体比はダム放流口より上流地点まで(上流区間)、上流地点から中流地点まで(中流区間)、中流地点から下流地点まで(下流区間)で異なっていた。放流試験前(2月10日と21日)の付着物は上流区間3地点で $-0.9 \pm 1.2\text{‰}$ 、中流区間5地点で $+3.0 \pm 1.4\text{‰}$ 、下流区間3地点で $+11.6 \pm 3.5\text{‰}$ だった(それぞれ平均±標準偏差)。各地点の懸濁物中有機物(POM)の起源は各区間の付着物に加えて、ダム放流水に元々含まれていたPOMと付着物以外の河床や河岸の陸上植物由来有機物の2種類が考えられる。以上から本研究のPOMの起源として陸上植物由来有機物、ダム放流水POM、上流区間付着物、中流区間付着物、下流区間付着物の5つに分類可能と考えた。

陸上植物由来有機物は一般に付着藻類などと比べて C/N 比が高く、窒素含量が少ない。本研究の大きい流下物は主に陸上植物の破片で構成されており、捕捉したものの大きさの変化が乾燥重量に反映されていた。これらのうち、測定できた試料の C/N 比 (mol 比) は 30~60 と高かった。そのため、陸上植物由来有機物は炭素源としてのみ考慮した。炭素安定同位体比は -31‰ ~ -28‰ だった。

ダム放流水の POM は、付着物の影響が最も小さいと考えられた上流地点で採取した POM の値を用いた。水位ピーク後の水位が十分に低下した 16:00 と 17:00 の平均値から、C/N 比 (mol 比) の 9.0、炭素安定同位体比の -29.1‰ 、窒素安定同位体比の $+2.0\text{‰}$ をダム放流水の POM の値とした。

上流区間、中流区間、下流区間の付着物はそれぞれ上流地点、中流地点、下流地点において放流試験前に 2 回採取 (2 月 10 日、21 日) した試料の平均値から仮定した。すなわち、上流区間付着物の C/N 比 (mol 比)、炭素安定同位体比、窒素安定同位体比は 7.8、 -19.3‰ 、 $+0.3\text{‰}$ とし、同様に中流区間は 6.7、 -23.1‰ 、 $+4.3\text{‰}$ 、下流区間は 7.3、 -24.3‰ 、 $+7.9\text{‰}$ を採用した。

⑦ POM の窒素負荷量とその起源

POM の炭素と窒素の安定同位体比の時間変化を図-15、16 に示す。各地点共に水位上昇時に安定同位体比の変化が見られ、その後は緩やかにその変化を回復していた。炭素と窒素の安定同位体比は共に上流地点で低く、下流地点で高い傾向が見られた。

採水時の窒素負荷量 (gN/s) は流量と POM 濃度、POM の窒素含量から求めた。窒素安定同位体比はその窒素源の窒素安定同位体比の値とそれら混合割合を反映するため、各起源と POM の窒素安定同位体比から各起源の寄与率が算出できる。上流地点の POM の窒素源はダム放流水 POM と上流区間付着物の 2 種類、中流区間はダム放流水 POM、上流区間付着物と中流区間付着物の 3 種類、下流区間はダム放流水 POM、上流区間付着物、中流区間付着物に加えて下流区間付着物の 4 種類である。また、堆積速度については上記 4 種類の由来ごとに顕著な差が無いと考え、中流地点に負荷されるダム放流水 POM と上流区間付着物の割合は上流地点と等しいと仮定し、同様に下流地点に負荷されるダム放流水 POM、上流区間付着物、中流区間付着物の割合は中流地点と等しいと仮定した。その結果、各地点の採水時における各窒素源の

窒素負荷量が得られた (図-17)。

各採水時の POM の窒素負荷量を調査時間で積分した総窒素負荷は上流地点で 81kgN、中流地点で 387kgN、下流地点で 376kgN だった。中流地点は下流地点よりも窒素負荷量が多く、中流地点ではクロロフィルでも多かった (上流地点: 4.3kg、中流地点: 16.0kg、下流地点: 10.7kg)。

⑧ POM の炭素負荷量とその起源

POM の炭素安定同位体比は変化の幅が小さく (上流地点: -29.4‰ ~ -26.8‰ 、中流地点: -27.1‰ ~ -24.5‰ 、下流地点: -25.8‰ ~ -24.0‰)、各調査区間の付着物の差も小さい。そのため窒素で想定した 4 つの起源について、それぞれの窒素負荷量と C/N 比の積から各起源の炭素負荷量を見積もり、総炭素負荷量との差分を陸上植物由来有機物の炭素負荷量とした (図-18)。

⑨ 採水地点の水位と底面せん断応力の変化

各地点の水位上昇はそれぞれ上流地点で 8:30、中流地点で 10:10、下流地点で 11:40 であった。最高水位はそれぞれ 13:20~14:00 で 0.90m、14:00~14:30 で 1.02m、14:40~15:10 で 1.37m だった (図-19)。各地点のせん断力は、上流地点から 8.7×10^{-3} (1/115)、 8.3×10^{-3} (1/120)、 6.2×10^{-3} (1/162) の区間平均河床勾配を用いて算出した。上流地点では 13:00~14:30 に、中流地点では 14:00~14:30 に $1000 \text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ 付近の最大値となった。下流地点では 15:00 の $673 \text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ が最大だった (図-20)。

⑩ 栄養塩の濃度と負荷量の変化

各採水地点の硝酸態窒素濃度は調査開始時で異なり、下流ほど高かった (上流地点: 0.5mgN/L、中流地点: 0.9mgN/L、下流地点: 1.5mgN/L)。しかし、放流による水量の増加によって、中流地点と下流地点では水位ピーク付近で上流地点に近い濃度に低下していた。その後は放流水の減少に伴い放流開始前の濃度へ向けて戻っていた。上流地点は水位変化に依存せず、濃度変化を示さなかった。

⑪ POM の窒素と炭素の起源と負荷量

上流地点では放流実験による POM の質的な変化が小さく、炭素と窒素の負荷量も小さかった。硝酸態窒素濃度も低く、流量の増加によって河床から巻き上げられる有機物の量が少なかったと考えられた。

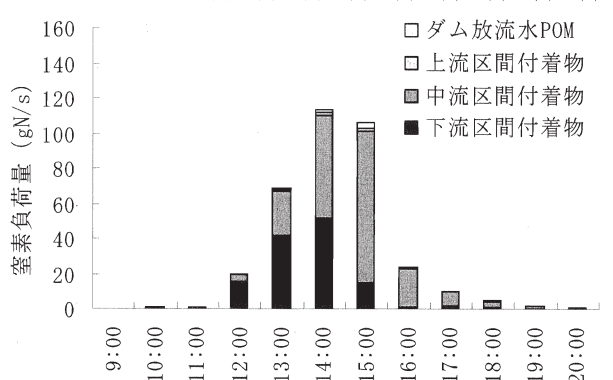
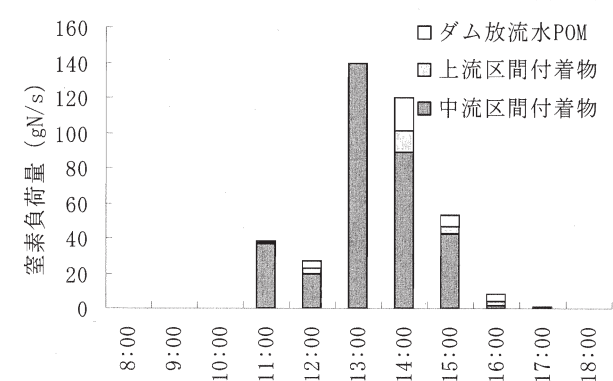
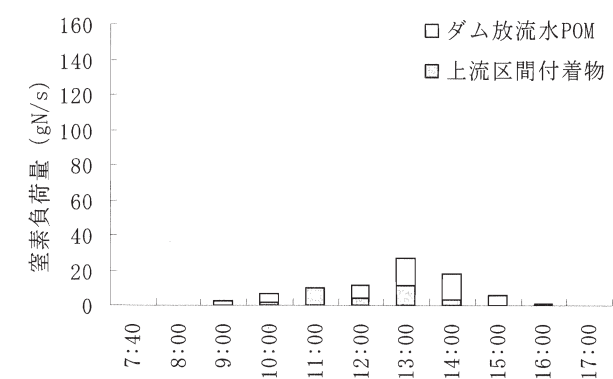


図-17 窒素負荷量の時間変化

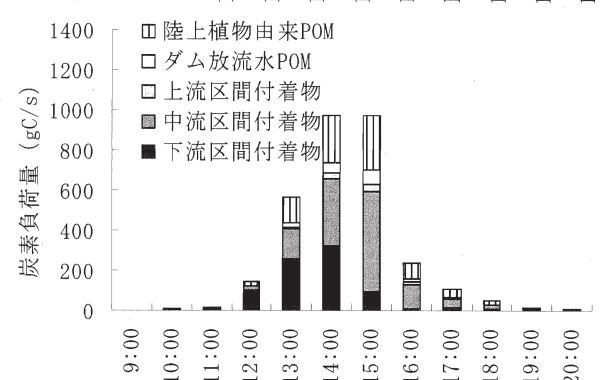
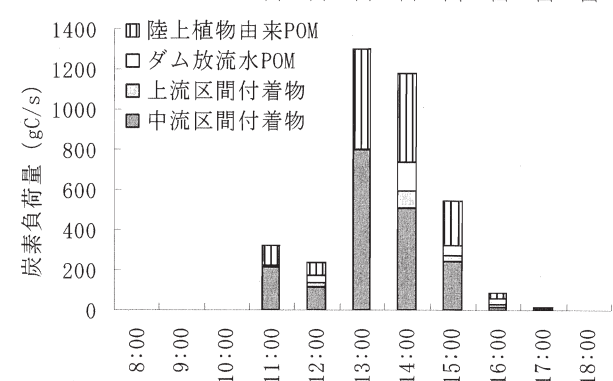
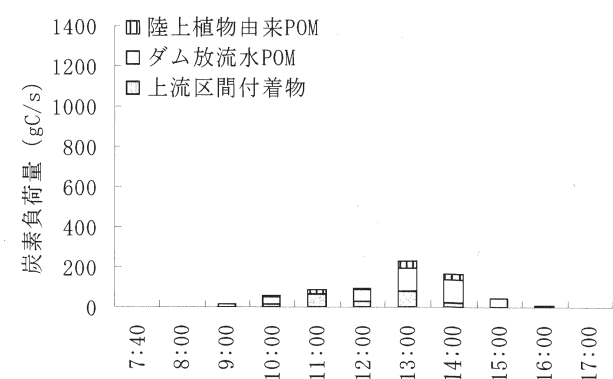


図-18 炭素負荷量の時間変化

中流地点では中流区間の付着物の寄与が大きく、炭素も窒素も共に最大だった。中流地点では 330kgN の窒素負荷量の増加が見られ、中流区間の付着物が POM の窒素源のほとんどを占めていた。この中流区間の付着物由来の窒素は約 64% (212kgN) が下流地点まで輸送されていた。中流区間と下流区間では距離は差が無いが、付着物による POM への負荷は炭素窒素共に中流区間の方が下流区間よりも 2 倍以上多い。下流では硝酸態窒素濃度が高く河床幅も広いいため、付着物の生産量は下流ほど多いと考えられる。しかし、中流地点までは河床勾配が大きく水位上昇も大幅だったために、河床の付着物を剥離させるせん断力が大きかった。そのため本研究で対象とした放流試験では中流区間の付着物が最も大きな POM の供給源と考えられた。

⑫ せん断力と付着物由来有機物の負荷量の関係

せん断力に対する付着物由来の窒素負荷量の変化を、中流地点と下流地点で比較した (図-21)。せん断力と窒素負荷量との関係は、水位ピークの前半で概ね比例的に増加し、中流地点の中流区間付着物は高いせん断力の時に大きな窒素負荷を供給していた。下流地点ではせん断力が $200\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ 以上で付着物の負荷が増加していた。下流地点の中流区間付着物はせん断力が約 $200\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ までは負荷が小さく、それ以上のせん断力で負荷が増加している。すなわち、付着物の剥離や輸送には少なくとも $200\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ 以上の作用が必要であると考えられた。ただし、下流地点では $670\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ のせん断力に達した時点で、それ以下のせん断力の時より負荷量が低下している。これは、付着物の剥離が進み、供給源が無く

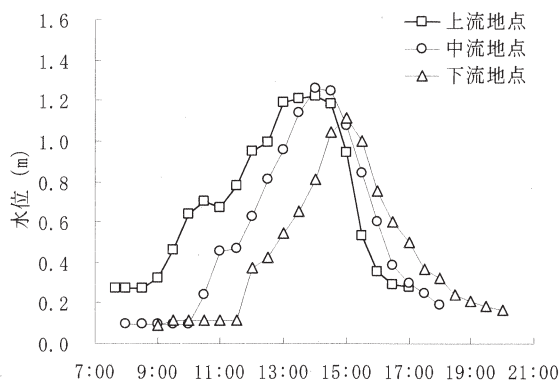


図-19 採水地点の水位の時間変化

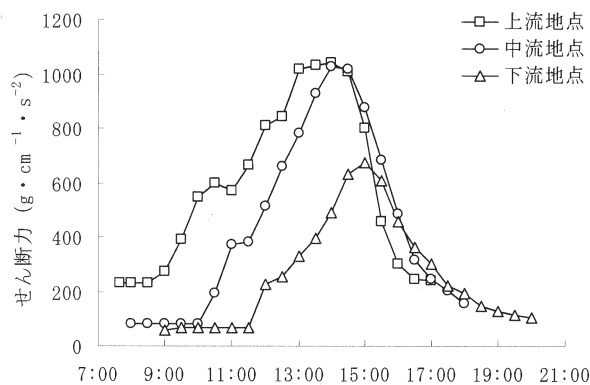


図-20 採水地点のせん断力の時間変化

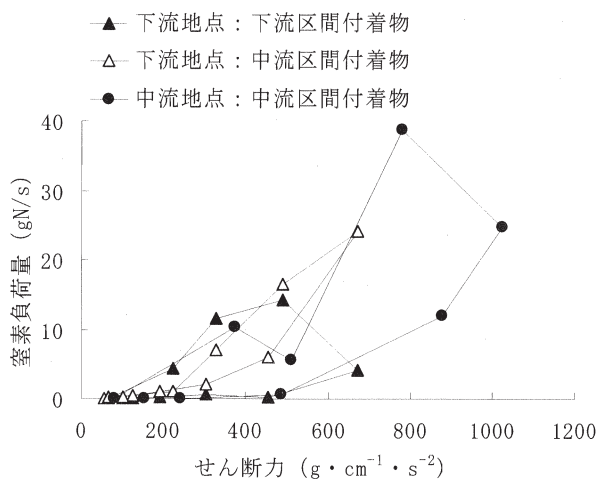


図-21 中下流地点におけるせん断力変化と付着物剥離に伴う窒素負荷量の変化

なったことによると考えられる。中流地点においても、せん断力が $400\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ を越えたところで、一旦負荷量が低下している、しかし、さらにせん断力が増加し、 $800\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ 程度にまで達した段階では、負荷量が再度飛躍的に増加している。これは付着物を剥離させる作用が流水によるせん断に加え、さらに流量が増加すると細粒土砂分などが河床に衝突することによる摩擦の少なくとも2段階であるためと

考えられた。中流地点のせん断力の大きい3回 ($780\sim 1024\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$) は、有機物分を示す強熱減量を除いた乾燥重量(無機物のシルトや砂)の負荷量が $2.5\sim 6.4\text{kg/s}$ と大きく、シルトや砂による付着物の剥離が示唆された。下流地点のせん断力は $700\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ に満たなかったため、付着物の剥離による負荷量は大きくならなかったと考えられた。

⑬ 放流試験の位置付けと環境放流への提言

本研究で対象の放流試験では、最大のせん断力が上流地点で $1041\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ 、中流地点で $1024\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ 、下流地点で $673\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ だった。これらの値はダム放流量の年最大規模相当であったと考えられた(図-22)。

ダム放流量(ダム建設後)とダム流入量(ダムなしの流量と考えられる)の流量条件を用いて各地点において生起する底面せん断応力の頻度分布を求め比較すると、 $50\sim 500\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ のせん断力を引き起こす流量がダム建設後では少ないことがわかる(図-22)。せん断力の $200\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ 以上を確保する出水は、ダム建設後に減っていることから、付着物を剥離させ輸送する機会がダムの存在によって減少していると考えられる。中流地点では水位が 0.25m 、下流地点では 0.33m の水位が付着物の剥離や輸送に必要であり、水量ピークをより高くすると共に、剥離した付着物をより遠く(相模川合流点など)まで輸送するためには水量のピーク後に、せん断力の $200\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ 以上を確保する一定の水位を維持することも必要と考えられた。

⑭ 宮ヶ瀬ダム放流試験による研究のまとめ

宮ヶ瀬ダムの放流試験の際に下流河川を流下する懸濁態有機物の負荷量について安定同位体比を用いて起源別に分類し、付着物の剥離や輸送には少なくともせん断力の $200\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ 以上が必要であると示唆した。そしてこの条件となる流量はダムの存在によって現時点では頻度が減少していることを指摘し、放流試験の際の流量設定条件についても言及を行った。

3. 2のまとめ

鬼怒川上流部の川俣ダムにおいて、ダムが有機物の流れを通して下流の河川生態系に与える影響を検討した結果、ダム下流直下では、ダム貯水池で生産された有機物が生態系に取り込まれていることが示

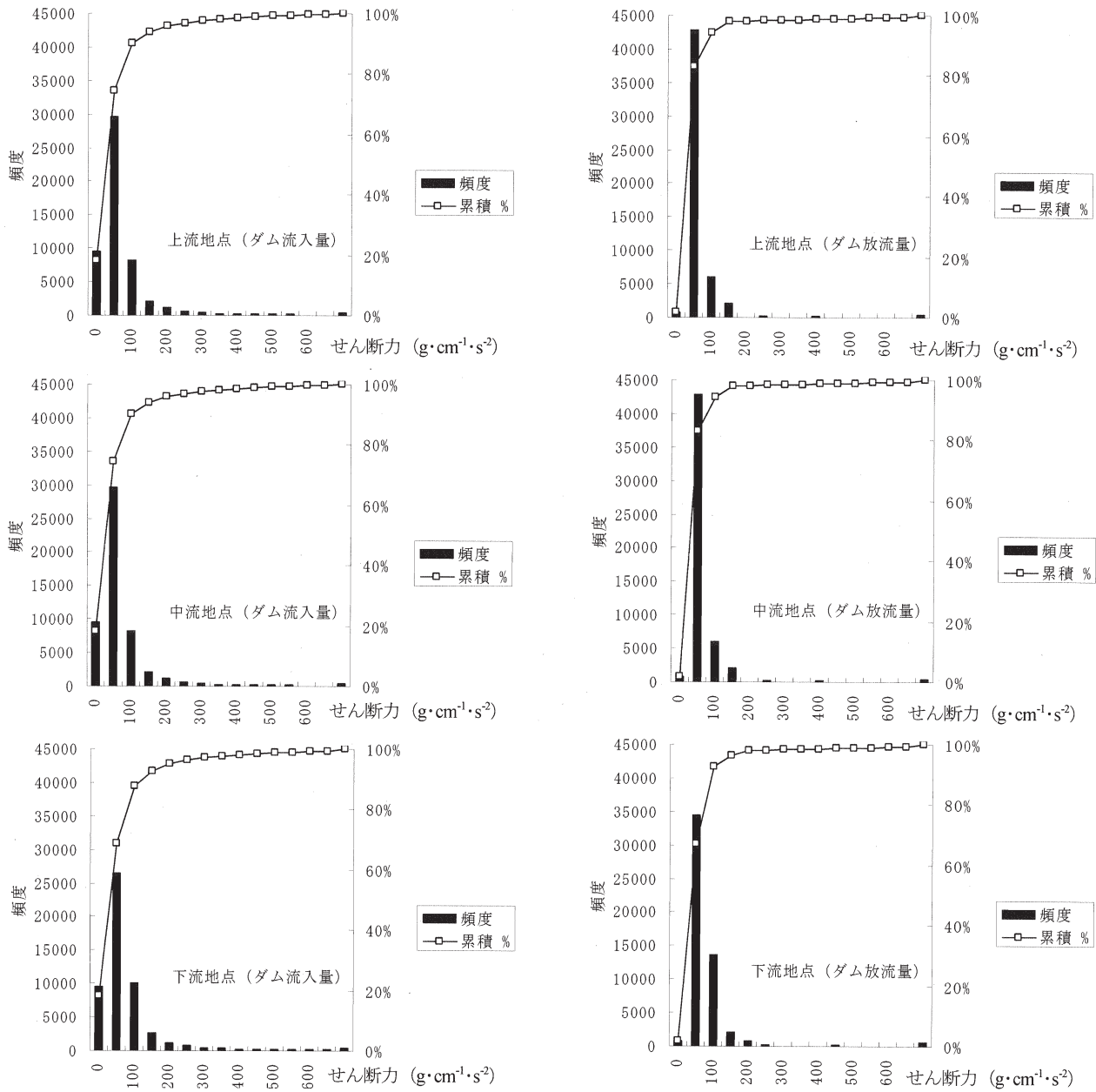


図-22 2000～2005年のダム流入および放流量によるせん断力の発生頻度と累積率（毎正時流量より）

され、下流へと流下するにつれて、河床の付着藻類により生産された有機物の影響が増加することが示された。

相模川水系中津川上流の宮ヶ瀬ダムにおける放流試験による流下有機物の変化とその要因について評価を行った結果、流量増加に伴って河床に付着する有機物の剥離が一旦増加した後に減少し、さらなる流量増加により細粒土砂の巻き上げ増加に伴うと考えられる剥離の再度増加が見られた。河床付着物を十分剥離させて下流へと運搬するためには、 $200 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ 以上の底面せん断応力が加えられるだけの流量が継続することが必要であることが示された。

4. 河川周辺の灌漑水路網、水田、湿地の有する、魚類などの生息域としての機能の解明

河川周辺の止水域に着目し、特定の魚種について炭素と窒素の安定同位体比を測定し、その値が河道周囲の止水域において本川との接続頻度を反映して異なっていることを検証する。その結果を基に、魚類の安定同位体比が生息場に特有の値を保存しており、任意の場所で捕獲された魚類に対してもその過去の生育場を特定できることを利用し、水理計算に基づく本川と各止水域の接続頻度の推定も加え、魚類の水域間の移動を明らかにすることで、河川周辺

の水域が持つ魚類の生息域としての機能の解明を試みた。

4. 1 千曲川鼠橋地区の概要

長野県埴科郡坂城町の鼠橋地区において、本川右岸（以下、本川）及び左岸の4ヶ所の止水域（ワンド1 - 4）の5ヶ所で調査を行った（図-23）。ワンド1は高水敷上に位置する水域で平水時は河川の本

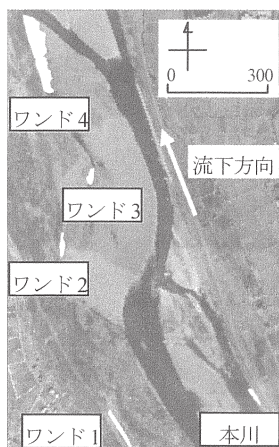


図-23 千曲川鼠橋地区と調査地点（黄色部）

流（本川）から隔離されていた。ワンド2は低水敷に位置するが平水時には本川や他の止水域から孤立していた。ワンド3は豊富な湧水によって涵養され、その湧水は水深10cm程度の小流を形成してワンド4へと流入していた。ワンド4は本川と常時接続し、河川水が停滞している止水域である。魚類の採捕調査は各水域において、その沿岸のほぼ全域について行った。

調査は2005年5月27日、6月29日、7月27日、8月4日の4回行った。7月27日の調査では千曲川の水位が高かったため、本川の調査地点では実施しなかった。

4. 2 調査項目

魚類の採捕は5月27日調査では手網にて45分・人、その他の調査日にはエレクトリックフィッシャー（スミスルート社製、Model LR-24、出力電圧500V～900V、出力電流最大40A）10分と手網（目合3mm）30分・人の労力で行った。捕獲した魚類は冷蔵で持ち帰り、冷凍（-30℃）して保存した。種同定や標準体長、湿重量の測定は解凍後速やかに行った。

標準体長や湿重量の測定後は直ちに60℃で2日間以上乾燥し、一個体を一試料として、粉碎して均一化したものを安定同位体比の測定に呈した。ただ

し、湿重量でおよそ30gを超える個体は筋肉組織を切り出して安定同位体比分析の試料とした。炭素安定同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$ 、‰）及び窒素安定同位体比（ $\delta^{15}\text{N}$ 、‰）については元素分析計（Thermo Electoron社製、Flash EA）を前処理装置として接続した安定同位体比測定用質量分析装置（Thermo Electoron社製、Delta Plus XL）を用いて測定を行った。安定同位体比の表記は一般的な方法に基づき、炭素及び窒素それぞれの国際標準物質からの千分偏差（‰）として示し、測定誤差は0.2‰であった。

安定同位体比の測定結果に対して、調査地点や調査時期、採捕種ごとの値が有意に分類できるかを検定し、その境界値を得るための統計的な手法として判別分析（線形判別関数、有意水準5%）を行った（SPSS社、SPSS Base System Ver.13）。

4. 3 水理計算による止水域の接続頻度の推定

調査地の流量を算定するため、最寄の流量観測所である生田流量観測所の水位データ（ h ）から調査地の流量（ Q' ）の $h-Q'$ 曲線を以下の手順で作成した。①2000年～2003年までの生田流量観測所の $h-Q$ （但し Q は生田流量観測所の流量）曲線を作成した。②GISにより生田流量観測所と調査地の流域面積を算出し流域面積比を算出した。③生田流量観測所の Q に流域面積比を乗じ調査地の流量 Q' とし $h-Q'$ 曲線を作成した。その後、2005年1月1日から8月4日までの流量の発生頻度を集計し後述する水理計算結果を合わせ本流との接続頻度を算出した。

調査地における止水域と本川の接続頻度の推定を行う目的で調査地内の水理計算を行った。平水時から出水時までの幅広い流量を条件として計算を行うことから、一般座標系の使用が可能で、水際部の境界条件の自由度が高く一般座標系を用いた平面2次元流解析プログラム²⁵⁾を用いて定常計算を行った。

河床形状データはレーザープロファイラによる測量による水域内の河床高測量データを基に内挿し流下・横断方向ともに6mピッチの河床高データを整備した。

これらの結果をGIS（ESRI社、ArcGIS Ver.9）を用いて図化し、空間分析ツール（ESRI社、Spatial Analyst）を用いて10mグリッドの水深を算出した。同時に各調査地点の位置もGIS上に図化し、各調査地点が出水時の水域に完全に水没した状態を本川との接続状態とし流量発生頻度と合わせ本川との接続頻度を算出した。

表-2 魚類の各調査地点による採捕個体数

場所	ワンド1				ワンド2				ワンド3				ワンド4				本川		
	5月	6月	7月	8月	5月	6月	7月	8月	5月	6月	7月	8月	5月	6月	7月	8月	5月	6月	8月
フナ属	-	-	-	-	-	-	5	16	-	-	4	-	-	7	3	7	5	15	6
オイカワ	-	-	-	-	4	121	6	22	17	130	5	2	-	-	2	-	-	7	-
ドジョウ科	-	1	3	5	-	6	10	1	7	11	2	1	-	4	-	-	-	-	1

4. 4 魚類の採捕数と体長

4回の調査での総採捕個体数は5月の調査で69尾、6月は563尾、7月は171尾、8月は146尾であった。本調査において最も採捕数の多い種はオイカワ (*Zacco platypus*) で4回の調査の総数は316尾だった。オイカワは流水性水域を好む遊泳魚であるため、オイカワを流水性遊泳魚の代表種として考察の対象種とした。オイカワはワンド1では採捕されなかったが、ワンド2とワンド3で多数(それぞれ153尾と154尾)確認された。ワンド4と本川ではこれより少なく、それぞれ2尾と7尾だった(表-2)。

比較的流速の遅い止水性水域を好む遊泳魚としてフナ属 (*Carassius* sp) 68尾、モツゴ (*Pseudorasbora parva*) 44尾、アブラハヤ (*Phoxinus lagowski*) 14尾、が確認された。止水性遊泳魚としては優占種であるフナ属魚類を代表魚種として考察の対象とした。本川及び本川と常時接続している調査地点のワンド4では、フナ属魚類はほぼ毎回の調査で採捕され、その総数はワンド4で17尾、本川で26尾であった(表-2)。一方、ワンド2とワンド3においては、5、6月の調査では採捕されなかったが7、8月には採捕され、ワンド2とワンド3でそれぞれ21尾と4尾だった。本調査ではフナ属魚類の内、種同定のできた個体は全てギンブナ (*Carassius auratus langsdorfii*) であった。

底生魚類はニゴイ (*Hemibarbus labeo*) 67尾、ドジョウ (*Misgurnus anguillicaudatus*) 35尾、シマドジョウ (*Cobitis biwae*) 17尾、カマツカ (*Pseudogobio (Pseudogobio) esocinus*) 11尾、トウヨシノボリ (*Rhinogobius* sp. OR) 9尾、それぞれ確認された。ニゴイはワンド4と本川のみで確認されたため、各調査地で採捕されたドジョウに、ドジョウと同じく堆積物中の有機物を摂取し²⁶⁾、比較的近縁種のシマドジョウを加えてドジョウ科魚類としてまとめて考察の対象とした。ドジョウ科魚類の4回の調査での採捕数は、ワンド1で9尾、ワンド2で17尾、ワンド3で21尾、ワンド4で4尾、本川で1尾であり(表-2)、止水域で多く見られた。

標準体長の測定結果によると、ドジョウ科魚類は

ワンド3、4で比較的大きな個体が採捕された(表-3)。一方フナ属魚類はワンド2とワンド3では小さく、ワンド4と本川では大きい個体が確認された。オイカワの比較的小さい個体は全調査地点で確認されたがワンド3で大きい個体が採捕されていた。

表-3 採捕魚類の標準体長の範囲(全調査日)

(mm)	ワンド1	ワンド2	ワンド3	ワンド4	本川
フナ属	-	12-29	27-39	11-136	15-198
オイカワ	-	19-75	21-128	32-35	18-58
ドジョウ科	14-27	11-75	46-94	69-159	31

表-4 ドジョウ科魚類の炭素安定同位体比(全調査日)

(‰)	ワンド1	ワンド2	ワンド3	ワンド4	本川
最大	-28.1	-21.2	-17.6	-19.1	-18.4
最小	-34.6	-29.3	-25.7	-23.9	-
平均	-30.6	-26.6	-22.5	-21.5	-18.4
標準偏差	1.9	2.5	2.1	2.0	-
試料数	9	17	21	4	1

表-5 フナ属魚類の炭素安定同位体比(全調査日)

(‰)	ワンド1	ワンド2	ワンド3	ワンド4	本川
最大	-	-28.6	-22.5	-17.6	-15.3
最小	-	-31.8	-24.2	-25.2	-24.7
平均	-	-30.4	-23.7	-21.5	-20.2
標準偏差	-	0.9	0.8	2.9	2.2
試料数	0	21	4	17	26

表-6 オイカワの炭素安定同位体比(全調査日)

(‰)	ワンド1	ワンド2	ワンド3	ワンド4	本川
最大	-	-22.9	-14.8	-19.0	-16.5
最小	-	-31.0	-24.7	-20.2	-18.3
平均	-	-26.9	-21.2	-19.6	-17.6
標準偏差	-	2.5	2.2	0.9	0.6
試料数	0	24	35	2	7

4. 5 魚類の安定同位体比

ドジョウ科魚類の炭素安定同位体比は、調査地によって大きく異なっていた(表-4)。ワンド1は非常に低い値で全ての個体が-28 ‰より低かった。ワンド2は概ねワンド1よりも高い値に分布していた。ワンド3は最も幅広く値が分布していた。ワンド4はワンド3と測定値の分布がほぼ一致していた。それぞれの調査地の平均値をみると本川から最も遠い場所に位置するワンド1からワンド4へと順に値が変化していた。ドジョウ科魚類の炭素安定同位体比は判別分析の結果、ワンド1とワンド2の間で-28.6 ‰を境に有意に分けることができた。同様にワンド2に対してワンド3、ワンド4、本川の間でそれぞれ-24.3、-24.1、-23.9 ‰を境に有意に分けら

れた。窒素安定同位体比は概ね+9 から+11 ‰の狭い範囲だった。

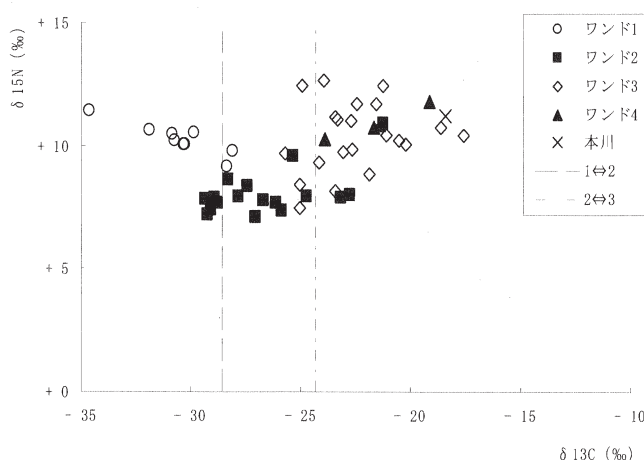


図-24 ドジョウ科魚類の炭素と窒素の安定同位体比
“1↔2”は判別分析によるワンド1とワンド2の境界値 (-28.6 ‰)を示し、“2↔3”は判別分析によるワンド2とワンド3の境界値 (-24.3 ‰)を示す。

止水性の遊泳魚としてフナ属魚類の炭素安定同位体比を採捕場所ごとに比較した(表-5)。ワンド2は低く狭い範囲に値が集まっていた。ワンド4と本川は幅広く測定値が分散していた。すなわち6、7月では-20.6から-17.6 ‰であり、8月には-25.2から-23.6 ‰と異なる範囲の値を示した。各調査地の平均値はドジョウ科魚類と同様に本川に近い調査地ほど本川の値に近づいている傾向を示した。全地点の炭素安定同位体比において40 mm以下と70 mm以上のフナ属魚類の間には判別分析による境界値(-21.5 ‰)が得られた。窒素安定同位体比はワンド2では低い値を示した(+6.6 ~ 8.1 ‰)が、ワンド3とワンド4ではやや高く(それぞれ+11.4 ~ 11.8、+10.0 ~ 12.2 ‰)、本川では幅広く値が分散した(+8.3 ~ 12.5 ‰)。

さらに、流水性の遊泳魚であるオイカワの炭素安定同位体比も採捕場所ごとに示した(表-6)。オイカワは採捕個体数が多かったため、20尾を超える場合には全ての個体について測定を行わず、調査地点と調査時期ごとに十個体程度について測定した。ワンド2とワンド3では測定値の範囲は大きく異なったが、非常に幅広く分散していた。ワンド2とワンド3のそれぞれで5、6月と7、8月で判別分析による境界値が得られ、それぞれ-26.9 ‰、-21.2 ‰だった。また、本川では高い値を示していた。窒素安定同位体比は、ワンド2では比較的低い値(+7.8 ~

10.3 ‰)を示した。ワンド3、ワンド4、本川では比較的狭い範囲(+9.2 ~ 12.6 ‰)に集中していた。

4.6 水域の接続

魚類の移動と安定同位体比との比較のため、水域の接続状況を知る必要がある。魚類の安定同位体比は数日から数十日に入れ替わることが知られている^{27)、28)}ため、水域の接続頻度について2004年冬季から現地調査最終日までの期間に着目することにした。

水理計算の結果、高水敷に位置するワンド1が本川と接続する流量条件はおおよそ1,500 m³/secと算出された。上記の期間中にこの流量を超えることは無かったのでワンド1は本川から孤立した状況が継続したと考えられた。

平水状態では孤立しているワンド2は、本川の流量がおおよそ200 m³/secを超える時に本川と接続することが分かった。2005年1月から8月4日の期間では7月4日正午から5日午前2:00にかけて、及び7月26日夜21:00から7月27日午前3:00において、ワンド2と本川が接続する流量条件を満たしていた。実際に7月27日の魚類調査においてワンド2周辺の植生や礫に灌水直後の痕跡が見られ、本研究の水理学的な検討が妥当であったことが示唆された。

ワンド3は湧水の小流によってワンド4及び本川と接続しているが、平水時に本川の河川水がワンド3へ流入することはなかった。ワンド3には本川の流量がおおよそ40 m³/secを超える条件で河川水が流入することが分かった。2005年1月から8月4日までの期間においてこのようなワンド3へ本川の河川水が流入する流量条件が1時間でも得られた日数は30日であり、ワンド2の4日より7.5倍ほど接続頻度が高かった。

4.7 止水域の接続頻度と魚類の安定同位体比の関係

ドジョウ及びシマドジョウは底泥の有機物を摂取し、遊泳力が比較的小さいため、ドジョウ科魚類の安定同位体比は捕獲された場所の有機物のそれを反映していると考えられる。

河川の水生藻類によって生産される有機物の持つ炭素安定同位体比は陸上植物よりも高いことが知られ、本調査地の既往の研究では、本川の付着藻類²⁹⁾の-17.2 ‰と造網性水生昆虫のヒゲナガカワトビケラ(*Stenopsyche marmorata*)5齢幼虫³⁰⁾の-15.7 ± 0.7 ‰(平均値 ± 標準偏差)が得られている。水理

計算の結果からワンド1が本川と接続することができる頻度は極めて少ないことが明らかであるため、このような-17から-15‰付近の高い炭素安定同位体比を持つ河川由来の有機物がワンド1に供給されることはほとんどない。一方、一般的な陸上植物の持つ炭素安定同位体比は-27‰程度として知られている⁸⁾。魚類の炭素安定同位体比が河川由来の有機物とほぼ等しい値(-17~-15‰)だった場合、その魚類は河川由来の有機物を利用して生育したと考えられる。一方、魚類の炭素安定同位体比が陸上植物の値(-27‰)と一致する場合、その魚類は陸上植物由来の有機物を餌とし、河川から離れた陸上植物のリターの影響を強く受けて生育したと考えられる。魚類の炭素安定同位体比が、河川由来と陸上植物由来の中間的な値を示した場合、両者の寄与率の推定が可能である³⁾。

ワンド1におけるドジョウ科魚類の炭素安定同位体比は陸上植物と同程度かそれよりも低く、河川由来の有機物と大きく異なる炭素安定同位体比を示した。ワンド1は水理計算から本川とほとんど接続する事のない水域であるが、ドジョウ科魚類の炭素安定同位体比からもワンド1が本川から独立した生態系だったと考えられた。

ワンド3とワンド4ではドジョウ科魚類の炭素安定同位体比の値に有意な違いは検出されなかった。ワンド3,4での値は、河川由来の有機物に近い-19‰付近から陸上植物と河川由来の有機物の寄与が同程度と考えられる-22‰程度まで幅広く分布していた。これはワンド3とワンド4は湧水の小流で常に接続されており、本川との接続が保たれて魚類の移動が可能であったためと考えられた。

ワンド2のドジョウ科魚類の炭素安定同位体比の範囲(-29.3~-21.2‰)は主要な有機物源が陸上植物であり河川由来の寄与を僅かに受けていたことを示す。これはワンド2が平水時では孤立しているが、本川と年数回程度の接続があるとする水理計算と一致する。

このようにドジョウ科魚類の炭素安定同位体比は水域の本川からの孤立性を反映し、水域の接続頻度を示す指標とも考えられる。

4. 8 止水域の産卵・生育場としての機能の検討

フナ属魚類は出水時に氾濫原など一時的に形成される水域において水面付近の植物に産卵を行うことが知られ²⁶⁾、7月上旬の出水時にはワンド2とワ

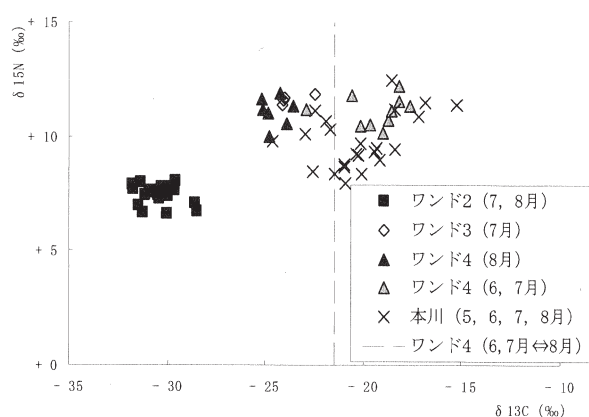


図-25 フナ属魚類の炭素と窒素の安定同位体比

“ワンド4(6,7月↔8月)”は判別分析によるワンド4の6,7月とワンド4の8月との境界値(-21.5‰)を示す。

ワンド3がフナ属魚類の産卵場となっていた可能性がある。ワンド2の7月と8月のフナ属魚類の炭素安定同位体比はその他の調査地の値と大きく異なり、非常に低く狭い範囲に集まっていた(-30.4±0.9‰、n=21)(図-25)。これは、出水後(7,8月)に採捕されたワンド2のフナ属魚類が非常に均一な炭素安定同位体比をもつ有機物を餌としていたことを示し、その餌がワンド3,4、本川と全く異なっていたことも示している。これらのフナ属魚類の体長が12~29mmと小さいこと、ワンド2においてフナ属魚類は出水前(5,6月)に採捕されなかったこと、7月上旬の出水でワンド2は本川と接続したと考えられることから、出水時にワンド2で産卵されたフナ属魚類が他の水域から隔離されたまま成長していたと考えられた。

ワンド4におけるフナ属魚類の炭素安定同位体比の判別分析によって、6,7月と8月ではワンド4に生息していたフナ属魚類は過去の餌が異なっていたことが示された(図-25)。ワンド3の7月とワンド4の8月のフナ属魚類の炭素安定同位体比は概ね一致していた(ワンド3の7月;-23.7±0.7‰、n=4、ワンド4の8月;-24.5±0.4‰、n=7)。出水の無い比較的短期間においてワンド3とワンド4の間を小型のフナ属魚類が移動した可能性を示唆し、小さな湧水の流れでも小型の魚類の移動には有効であったと考えられた。これはドジョウ科魚類においてワンド3とワンド4の値が分類できなかったこととも一致していた。

フナ属魚類を体長で40mm以下と70mm以上で分けて炭素安定同位体比を比較した(図-26)。70mm以上のフナ属魚類は本川とワンド4で採捕されてい

るが、比較的高い値を示した (-22.5~-16.8 ‰)。70mm 以上の大型のフナ属魚類は本川や本川と常に接続している水域に生息していたと考えられた。一方、本川で採捕された 40mm 以下のフナ属魚類の炭素安定同位体比は幅広く分布していた (-24.7~-18.4 ‰) ことから、多様な生息環境で生育した小型のフナ属魚類が本川に集まっていたと考えられた。

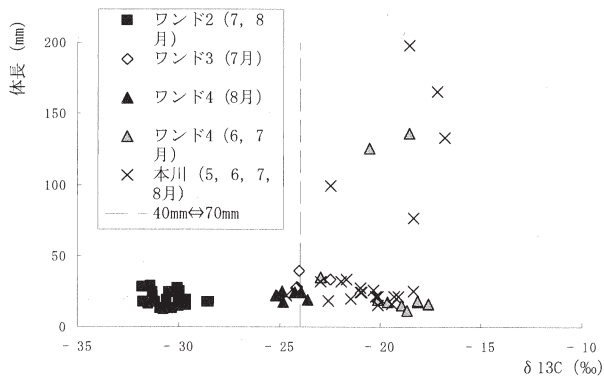


図-26 フナ属魚類の体長と炭素安定同位体比の関係

“40mm⇔70mm”は判別分析による本川の体長が 40mm 以下の個体と 70mm 以上の個体の境界値 (-24.0 ‰) を示す。

4. 9 止水域の避難場としての機能の検討

7月上旬の出水の前後でワンド2とワンド3の2ヶ所におけるオイカワの炭素安定同位体比を比較した。出水前の5、6月に比べて出水後の7、8月は、ワンド2のオイカワの炭素安定同位体比が低下していた(図-27)。しかしワンド2において、出水前(5、6月)のオイカワとドジョウ科魚類の炭素安定同位体比はほぼ一致し(オイカワ、 $-24.6 \pm 1.2\text{‰}$, $n=11$; ドジョウ、 $-24.1 \pm 2.1\text{‰}$, $n=6$)、出水後(7、8月)もオイカワとドジョウ科魚類の値はほぼ一致していた(オイカワ、 $-28.9 \pm 1.3\text{‰}$, $n=13$; ドジョウ、 $-27.9 \pm 1.4\text{‰}$, $n=11$)。そのため、ワンド2には出水によって本川と接続しても新たなオイカワの個体が本川などから供給されず、オイカワは遊泳力の低いドジョウ科魚類と共に孤立し続けたと考えられた。

ワンド3では出水後に体長 80 mm を越える大きなオイカワが採捕され、その炭素安定同位体比は出水前とは異なっていた(図-28)。これら出水後にワンド3に出現した 80 mm 以上のオイカワは本川のオイカワの値と一致し、出水時に本川から移入してきたと考えられた。

オイカワは7月上旬の出水によってワンド2には

移入しなかったがワンド3には移入していたことが明らかになった。オイカワはフナ属魚類と異なり、出水時に産卵行動をとる性質は知られておらず、出水時の行動は避難のみと考えられ、ワンド3はこれら大型のオイカワによって出水時の避難場として利用されていたと考えられた。

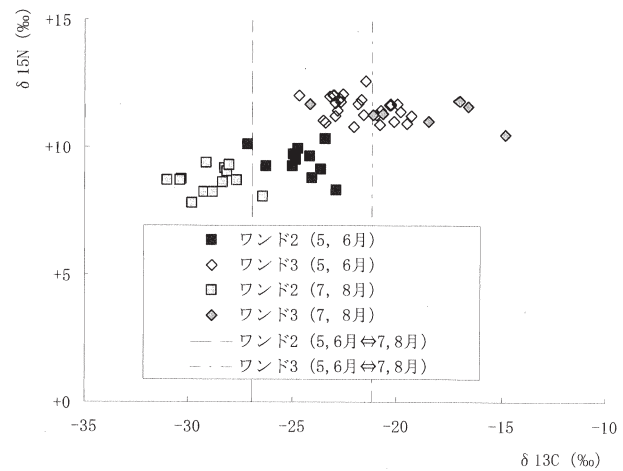


図-27 オイカワの炭素と窒素の安定同位体比

“ワンド2(5,6月⇔7,8月)”は判別分析によるワンド2の5,6月と7,8月の個体の境界値(-26.9 ‰)を示し,“ワンド3(5,6月⇔7,8月)”は判別分析によるワンド2の5,6月と7,8月の個体の境界値(-21.2 ‰)を示す。

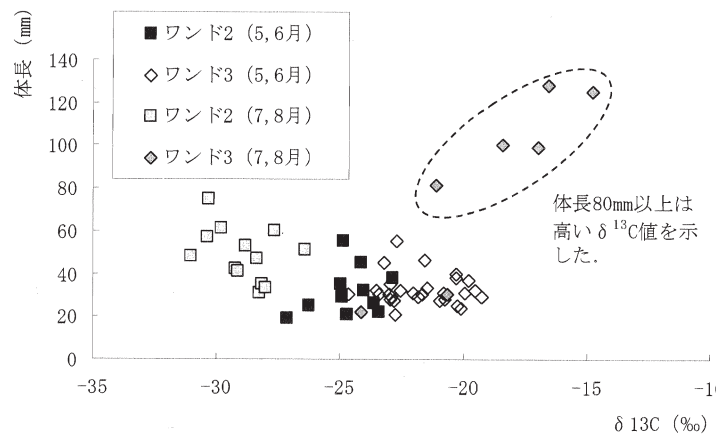


図-28 オイカワの体長と炭素安定同位体比の関係

4. 10 生物の移動についてのまとめ

本研究による魚類の安定同位体比を用いた解析によって以下のことが明らかになった。

移動能力の低い底生魚であるドジョウ科魚類の炭素安定同位体比は、その生息場の有機物源の違いを反映していた。その結果、河道周囲の止水域と本川の接続頻度を反映する指標として用いることができ

ることが示された。水域の孤立性が水生生物に反映される事は、その生息場を特定するだけでなく、水域が変動する河川において水生生物による水域の利用行動を明らかにする研究につながり、河川周囲の止水域の持つ生態的機能について考察することができた。

フナ属魚類について着目した結果、河道周囲の止水域がフナ属魚類の産卵場として利用されている事を確認し、水深10cm程度の湧水の小流でも止水域が接続していたことによって小型魚類の移動が可能だったことが示唆された。河道周囲の止水域はフナ属魚類の再生産と多様性に重要な役割を果たしていることが示された。出水前後の止水域におけるオイカワの比較から、このような止水域が本川に生息する魚類の出水時における避難場として利用されていたことが推測された。

5. まとめ

平成14年度においては、千曲川上流域を対象に水質調査を行い水質実態を把握するとともに、流域の土地利用状況等から河川水質を再現するモデルの作成を試みた結果、1) 千曲川上流域を特徴づける高濃度の窒素の流出源は畑であり、施肥等を行わない冬季においても、土中に蓄積された窒素の流出が続いていること、2) 土地利用、人間活動、污水处理施設等の流域の条件と、河川水質を結びつけるモデルを作成し、河川水質の再現計算を行ったところ、下流側の水質の変化傾向は概ね再現できたが、上流側については再現性が十分でなかった、という結果を得た。

平成15年度においては、千曲川流域を対象に安定同位体比分析を含めた水質調査を行い、水質実態を把握するとともに、GISを用いて流域の土地利用状況との関連性について検討した。また、レーザープロファイラによる地形測定と流動解析を併用して河川形状の魚類生息域としての意味についての検討を行い、以下の様な結果が得られた。1) 千曲川の縦断的水質変化は、農地、市街地からの排水の影響を受けているが、市街地からの排水等、動物の排泄物由来の排水が多く含まれる地点での窒素安定同位体比が顕著に高くなることが示された。同位体比計測と流域特性とを関連づけることで流量変動に伴う河川水質変化についての理解が深まると考えられる。2) 河川の微地形計測と、流動解析との比較から、ワンドやたまりなどの河川地形が、出水時の魚類避

難場所として利用されていることが理解できた。今まであまり考慮されてこなかった、魚類のハビタットとしての高水敷地形の重要性についても今後検討の必要があることが示された。

平成16年度においては、河川水質のみでなく、河川生態系への流域からの物質負荷の影響について評価するために、安定同位体解析をさらに広範囲に進めた結果、都市域/農地の割合は硝酸態窒素の窒素安定同位体比に、都市域と農地の面積比の合計は硝酸態窒素濃度に、硝酸態窒素の濃度と窒素安定同位体比は懸濁物の炭素と窒素の安定同位体比に、そして懸濁物は水生昆虫であるヒゲナガカワトビケラ幼虫に、それぞれ影響を与えていることが示された。特にヒゲナガカワトビケラの体を構成する窒素については、下流へ行くほど生活排水中の窒素を利用していることが示され、人間活動の河川生態系への影響が強く認められた。

平成17年度については、千曲川中流部の鼠橋地区において河道の周囲に形成される止水域と本川との間における移動について検討し、さらに止水域が魚類に提供する生息場としての機能の評価を行い、魚類の生息場として河道周囲の止水域が魚類の産卵場や出水時の避難場として機能していることを示した。また、鬼怒川上流部の川俣ダムにおいて、ダムが有機物の流れを通して下流の河川生態系に与える影響を検討した。さらに、相模川水系中津川上流の宮ヶ瀬ダムにおける放流試験による流下有機物の変化とその要因についても評価を行った。

達成目標との関連では、以下のようにまとめることができる。

達成目標①：モデル流域における流域の土地利用(森林、市街地、水田)特性と流出水質(BOD、NP、土砂など)の関係の解明

GISを用いて河川の任意地点における集水域を特定し、その範囲内の土地利用特性を解析すると共に、その地点での河川水質計測を結合することで、流域土地利用が河川水質に与える影響について評価する手法を提案した。河川水質としては、生態系に与える影響が大きい生元素である窒素に着目し、硝酸態窒素濃度、硝酸態窒素の安定同位体比を調べることで発生源の推定が可能であることを示した。

達成目標②：流域からの流出水質、流出形態の変化が魚類などに及ぼす影響の解明

河川水質、付着藻類、底生動物、魚類の窒素及び

炭素の安定同位体比計測を同時に行うことで、河川水質の生態系への影響について評価する手法を提案した。生活系負荷が増加すると生息生物の窒素安定同位体比は増加することから、これを河川生態系への生活系負荷の影響度を示す指標として提案した。また水面に日射が当たる河川においては、炭素安定同位体比計測結果から河川内で生産された有機物が生態系を支持していることが明らかとなった。また、流出形態の変化として、ダムによる流況変化による下流河川の付着物への影響緩和策として実施されるフラッシュ放流の必要流量決定手法の提案を行った。

達成目標③河川周辺の灌漑水路網、水田、湿地の有する、魚類などの生息域としての機能の解明
河川周辺の水域として、ワンド等の止水域において魚類調査を行い、周辺の有機物や魚類の窒素及び炭素安定同位体比計測を行うと共に水理条件の検討を行うことで、魚類の生息域としての機能の解明を試みた結果、本川との接続頻度が低い水域では、特異な生態系が形成されること、フナ属魚類が止水域を産卵場、稚魚の成育場として利用するほか、流水性遊泳魚が出水時に避難していることが示された。水理計算と、安定同位体比計測を行うことで、河川周辺水域が有する魚類の生息域としての機能解明を定量的（どの程度の期間、どこを利用するのか）に評価する手法として提案した。

研究期間中に発表した論文は、以下の通りである。

- ① 天野邦彦、傳田正利、時岡和利、対馬孝治：河川環境評価における流域特性や河川地形からの視点と新技術の適用、土木技術資料、v. 46, n. 5, pp. 26-31, 2004.
- ② 時岡和利、天野邦彦、傳田正利、対馬孝治：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、水工学論文集、v. 49, pp. 1597-1602, 2005.
- ③ 対馬孝治、傳田正利、時岡和利、天野邦彦：安定同位体比を用いた河道周囲の止水域が魚類に提供する生態的機能の評価、水工学論文集、v. 50, 2006.
- ④ 傳田正利、対馬孝治、時岡和利、天野邦彦、辻本：千曲川におけるギンブナの産卵行動と一時水域の物理特性との関連性評価、水工学論文集、v. 50, 2006.
- ⑤ 対馬孝治、天野邦彦、傳田正利、時岡和利、皆川朋子：宮ヶ瀬ダムの放流試験による河川流下有機

物の変化とその要因、河川工学論文集、2006.

(学会発表)

- ① 対馬、天野、傳田、時岡、福永、平林：安定同位体比を用いた千曲川における流域土地利用特性と河川生態系の変化、日本陸水学会第70回大会講演要旨集、p79, 2005.

参考文献

- 1) 和田英太郎：安定同位体は何を語るか、遺伝、Vol.47, pp10-14, 1993.
- 2) 高津文人・河口洋一・布川雅典・中村太士：炭素、窒素安定同位体自然存在比による河川環境の評価、応用生態工学、Vol.7, pp201-213, 2005.
- 3) 南川政男：安定同位体比による水圏生態系構造の解明、水環境学会誌、Vol.20, pp296-300, 1997.
- 4) Halyk, L.C., and Balon, E.K.; Structure and ecological production of the fish taxocene of a small floodplain system, *Canadian Journal of Zoology*, Vol.61, pp.2446-2464, 1983.
- 5) 朴珍赫、小尻利治、友杉邦雄、流域環境評価のためのGISベース分布型流出モデルの展開、水文・水資源学会誌、v. 16, n. 5, pp. 541-555, 2003.
- 6) 廣瀬葉子、深見和彦、金木誠、リモートセンシングを活用した河川流域情報収集、土木技術資料、v. 43, n. 1, pp. 14-19, 2001.
- 7) 皆川朋子、島谷幸宏、住民による自然環境評価と情報の影響—多摩川永田地区における河原の復元に向けて—、土木学会論文集、n.713, VII-24, pp. 115-129, 2002.
- 8) Boutton T.W. : Stable carbon isotope ratios of natural materials: II. Atmospheric, terrestrial, marine, and freshwater environments. In: Carbon Isotope Techniques (Eds D.C. Coleman & B. Fry), Academic Press, San Diego, California, USA, pp. 173- 186, 1991.
- 9) Akamatsu F., Toda H., and Okino T. : Food source of riparian spiders analyzed by using stable isotope ratios. *Ecological Research*, 19, 655- 662. 2004.
- 10) 熊沢喜久雄、山本洋司、朴光来、田村幸美：多摩川流域河川における硝酸態窒素濃度および $\delta^{15}\text{N}$ 値について、日本土壌肥科学雑誌、71, pp 216- 224, 2000
- 11) Toda H., Uemura Y., Okino T., Kawanishi T., & Kawashima H. : Use of nitrogen stable isotope ratio of periphyton for monitoring nitrogen sources in a river

- system. *Water Science and Technology*, 46, 431- 435. 2002
- 12) 時岡利和. 天野邦彦. 傳田正利. 対馬孝治. : 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、*水工学論文集*、49、1597-1602、2005
 - 13) 天野邦彦. 傳田正利. 時岡利和. 対馬孝治. : 河川環境評価における流域特性や河川地形からの視点と新技術の適用、*土木技術資料*、46、11-16、2004
 - 14) Heaton T.H.E. : Isotopic studies of nitrogen pollution in the hydrosphere and atmosphere: a review. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, 59, 87- 102. 1986
 - 15) Wada E., Terazaki M., Kabaya Y., & Nemoto T. : ^{15}N and ^{13}C abundances in the Antarctic Ocean with emphasis on the biogeochemical structure of the food web. *Deep-Sea Research*, 34, 829- 841. 1987
 - 16) Yoshii K., Melnik N.G., Timoshkin O.A., Bondarenko N.A., Anoshko P.N., Yoshioka T. & Wada E. : Stable isotope analyses of the pelagic food web in Lake Baikal. *Limnology and Oceanography*, 44, 502- 511. 1999.
 - 17) Vannote, R. L., Minshall G. W., Cummins K. W., Sedell J. R. and Cushing C. E.: The river continuum concept, *Can. J. Fish. Aqua. Sci.*, Vol.37, pp.130-137, 1980.
 - 18) 香川尚徳：河川連続体で不連続の原因となるダム貯水による水質変化、*応用生態工学*、Vol.2, No.2, pp.141-151, 1999.
 - 19) 谷田一三、竹門康弘：ダムが河川の底生動物に与える影響、*応用生態工学*、Vol.2, No.2, pp.153-164, 1999.
 - 20) 国土交通省関東地方整備局相模川水系広域ダム管理事務所：宮ヶ瀬ダムのフラッシュ放流、<http://www.ktr.mlit.go.jp/sagami/topics/2004/flash/main.htm>.
 - 21) 戸田任重：付着藻類の窒素安定同位体比から河川の汚染源を探る、*水*、Vol.45, pp1-6, 2000.
 - 22) Toda, H., Uemura, Y., Okino, T. Kawanishi, T. and Kawashima, H.: Use of nitrogen stable isotope ratio of periphyton for monitoring nitrogen sources in a river system, *Water Science and Technology*, Vol.46, pp431-435, 2002.
 - 23) 古谷八重子：吉野川における造網性トビケラ流程分布と密度の年次変化、特にオオシマトビケラ(昆虫、毛翅目)の生息域拡大と密度増加について、*陸巢医学雑誌*、Vol.59, pp429-441, 1998.
 - 24) 建設省河川局監修：河川水質試験法(案) [1997年版] 試験方法編、技法堂出版、1997.
 - 25) 土木学会水理委員会編：水理公式集、河川編、丸善、1999.
 - 26) 川那部浩哉・水野信彦：日本の淡水魚、山と溪谷社、1982.
 - 27) Bosley, K.L., Witting, D.A., Chambers, R.C., and Wainright, S.C.: Estimating turnover rates of carbon and nitrogen in recently metamorphosed winter flounder *Pseudopleuronectes americanus* with stable isotopes, *Marine ecology progress series.*, Vol.236, pp.233-240, 2002.
 - 28) 坂野博之：淡水魚2種における安定同位体回転率と濃縮係数、*日本魚類学会年会講演要旨*、pp79, 2005.
 - 29) Akamatsu, F., Toda, H. and Okino, T.: Food source of riparian spiders analyzed by using stable isotope ratios, *Ecological Research.*, Vol.19, pp.655-662, 2004.
 - 30) 対馬孝治・天野邦彦・傳田正利・時岡利和・福永八千代・平林公男：安定同位体比を用いた千曲川における流域土地利用特性と河川生態系の変化、*日本陸水学会第70回大会講演要旨集*、pp79, 2005.