

宮ヶ瀬ダムでの放流試験による 河川流下有機物の変化とその要因

EFFECTS OF EXPERIMENTAL FLOOD ON PARTICULATE ORGANIC MATTER IN RIVER WATER BELOW THE MIYAGASE DAM

対馬孝治¹・天野邦彦²・傳田正利³・時岡利和³・皆川朋子⁴

Kouji TSUSHIMA, Kunihiko AMANO, Masatoshi DENDA, Toshikazu TOKIOKA, and Tomoko MINAGAWA

¹正会員 博(農) 独立行政法人土木研究所(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²正会員 工博 独立行政法人土木研究所(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

³正会員 独立行政法人土木研究所(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

⁴正会員 博(工) 独立行政法人土木研究所(〒501-6021 岐阜県各務原市川島笠田町官有地無番地)

This study aimed to estimate the effects of experimental flood on particulate organic matter in river water below the Mayagase Dam. We classified the POM into some origins by stable isotope analysis. Terrestrial plants, POM of the dam discharge water, and periphyton in three sections were assumed as sources of carbon and nitrogen of POM in the river. Periphyton in middle-section of our study area supplied much organic carbon and nitrogen to POM in the downstream of river. Periphyton drifted down by shearing stress of around $200\text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-2}$ or more. The plan of the discharge water of the dam to flush periphyton away should pay attention to the shearing stress value of $200 \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-2}$. The frequency of the river water flux that can flush out the periphyton had decreased by the existence of the dam.

Key Words : Particulate organic matter, Periphyton, Experimental flood, Stable isotope ratio

1. はじめに

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¹⁾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变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²⁾。

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大きな影響を与える³⁾。しかし、その現象には多くの要因がからみ、未だ研究の余地がある。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だろう。

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⁴⁾。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。

本研究の対象とな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。本研究では河床の付着物が剥離して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ダム下流の河川を流下する懸濁物に対する剥離して掃流された付着物の寄与を明らかにする目的で調査を行った。

2. 方法

(1) フラッシュ放流試験の概要

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 213.9 km^2 (導水面積 112.5 km^2 を含む)を持ち、湛水面積 4.6 km^2 、有効

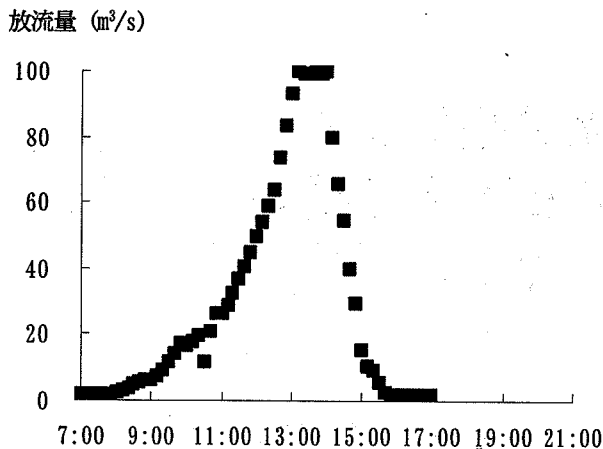


図-1 宮ヶ瀬ダム放流試験による放流量の時間変化
(2005年2月22日)

貯水容量 $18.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、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 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ だった(図-1)。

(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。また、懸濁物中の炭素と窒素の含量、及び炭素と窒素の安定同位体比($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$)は元素分析計(Thermo Eleteoron 社製, Flash EA)を接続した安定同位体比測定用質量分析装置(Thermo Eleteoron 社製, Delta Plus XL)を用いて測定した。安定同位体比は一般的な表記に基づき、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‰だった。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、 0.5 mg/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⁹⁾)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。

(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せん断力が、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せん断力を算出した。

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せん断力を式(1)で計算可能と判断した。

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

それぞれ、 τ はせん断力、 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。ダム放流量はダムが存在する現状での生起確率、ダム流入量は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。

3. 結果

(1) 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-1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 $-0.9 \pm 1.2\%$ 、中流区間5地点で $+3.0 \pm 1.4\%$ 、下流区間3地点で $+11.6 \pm 3.5\%$ だった(それぞれ平均 $\pm$ 標準偏

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	
距離		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

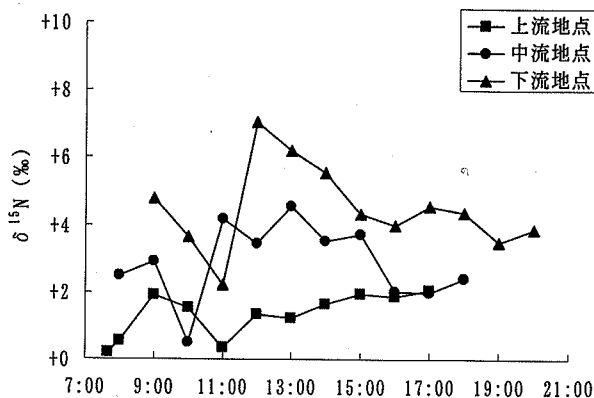


図-2 POMの窒素安定同位体比

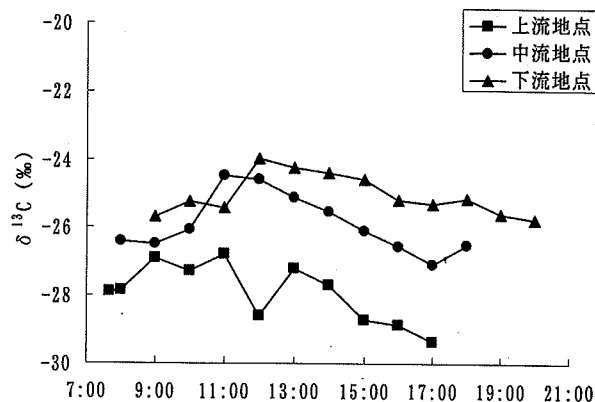


図-3 POMの炭素安定同位体比

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。本研究ではPOMの起源を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) 9.0、炭素安定同位体比-29.1‰、窒素安定同位体比+2.0‰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の採水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‰とし、同様に中流区間は6.7、-23.1‰、+4.3‰、下流区間は7.3、-24.3‰、+7.9‰を採用した。

(2) POMの窒素流下量とその起源

POMの炭素と窒素の安定同位体比の時間変化を図-2, 3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。

各地点ごとに窒素流下量 (gN/s) の変化をそれぞれの採水時における流量とPOMの窒素濃度との積として求めた。また、POMの窒素安定同位体比は各窒素源の窒素安定同位体比とそれらの混合割合を反映するため、窒素安定同位体比の測定値を用いて各地点のPOMの窒素源の混合割合を算出する。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、中流地点はダム放流水POM、上流区間付着物と中流区間付着物の3種類、下流地点はダム放流水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。上流地点においては2種類の起源の窒素安定同位体比が判明しているため2つの起源の混合モデルを用いることによって混合割合が求められる。上流地点から中流地点までには上流地点より流下するPOMと中流区間において河床の付着物から供給されたPOMとが混合する。上流地点より流下するPOMは中流区間においてその一部が沈降するが、窒素源の違いでPOMの比重には顕著な差が無いと考えられるため、流下過程による窒素安定同位体比の変化は考慮しないとした。このような仮定を用いることで中流地点を流下するPOMの起源は、POMの窒素安定同位体比 (実測値) と、上流地点を流下したPOMの窒素安定同位体比 (上流地点で算定済) 及び中流区間の付着物 (実測値) の値から混合割合が算定可能である。下流地点についても同様の算定を行うことができる。以上の結果、各地点の採水時における各窒素源の窒素流下量が得られた (図-4)。

各採水地点のPOMの窒素流下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多く、

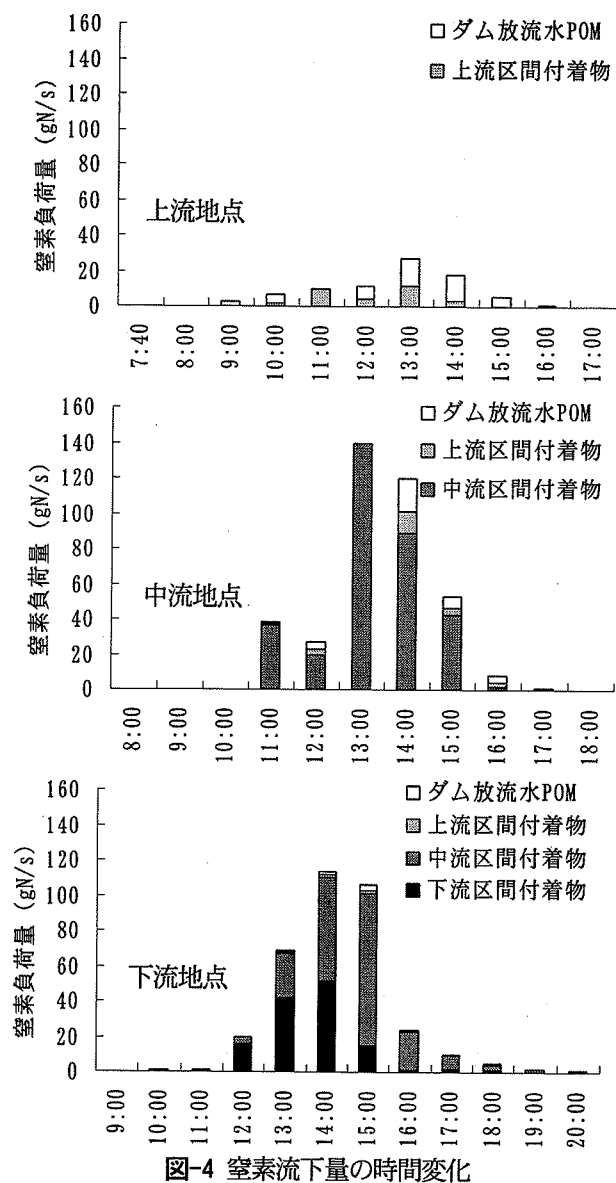


図-4 窒素流下量の時間変化

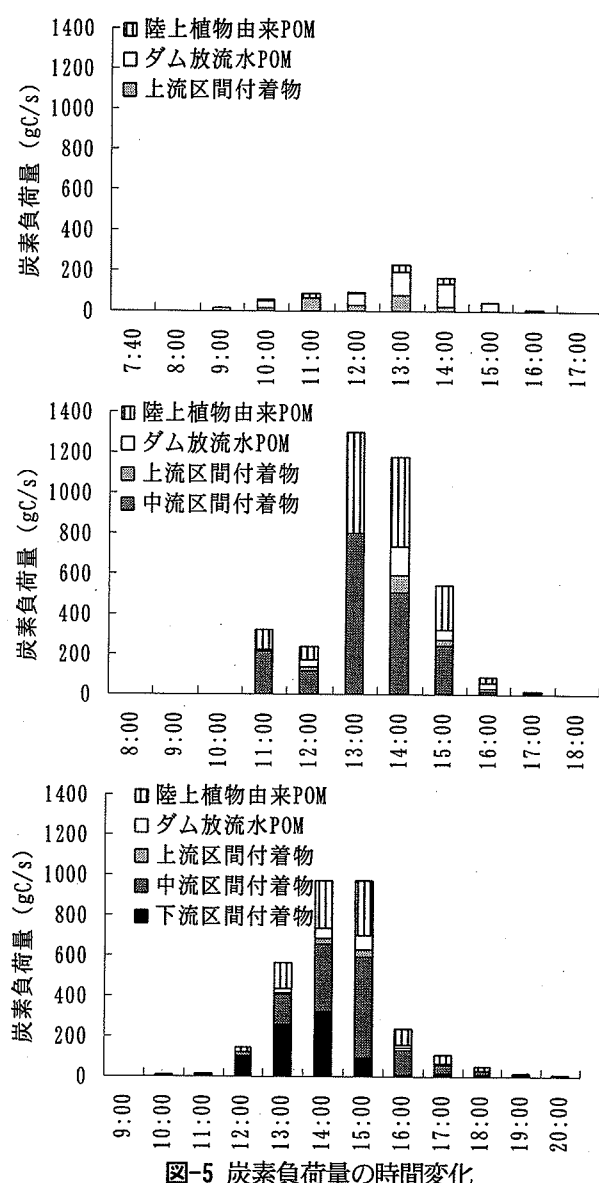


図-5 炭素負荷量の時間変化

中流地点ではクロロフィルの流下量も多かった（上流地点4.3kg, 中流地点16.0kg, 下流地点10.7kg）。

(3) POMの炭素流下量とその起源

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, それぞれの窒素流下量とC/N比の積から各起源の炭素流下量を見積もり, 総炭素流下量との差分を陸上植物由来有機物の炭素流下量とした（図-5）。

(4) 採水地点の水位と河床せん断力の変化

各地点のせん断力は, 水位データ（図-6）に加えて, 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-7）。

(5) 栄養塩の濃度の変化

各採水地点の調査開始時での硝酸態窒素濃度は下流ほど高かった（上流地点0.5mgN/L, 中流地点0.9mgN/L, 下流地点1.5mgN/L）。しかし, 中流地点と下流地点では水量ピーク時に上流地点に近い濃度に低下していた。その後は流量の減少に伴い放流開始前の濃度へ戻っていた。上流地点の濃度は水位に依存せず一定だった。

4. 考察

(1) POMの窒素と炭素の起源と流下量

上流地点では放流実験によるPOMの質的な変化が小さく, 炭素と窒素の流下量も小さかった。硝酸態窒素濃度も低く一定で, 上流区間は1.5kmと短く河床付着物も少ないため, 流量の増加によって河床から巻き上げられる

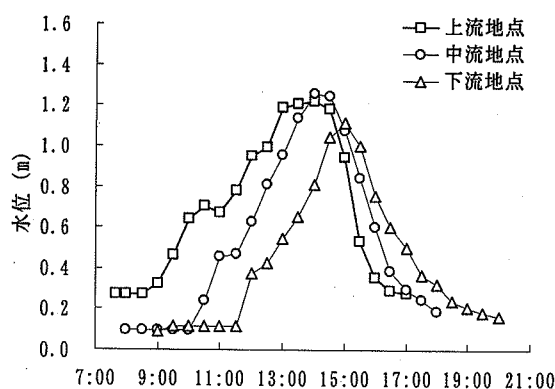


図-6 採水地点の水位の時間変化

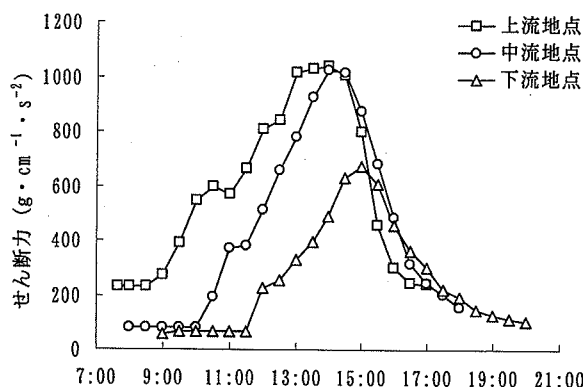


図-7 採水地点のせん断力の時間変化

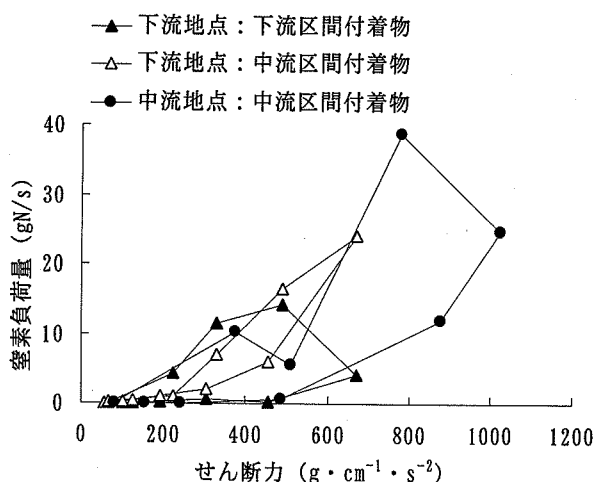


図-8 中下流地点のせん断力による付着物の窒素流下

POMの量が少なかったと考えられた。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 ($1.9 \times 10^3 \text{ kgC}$, $3.3 \times 10^3 \text{ kgN}$)。この中流区間の付着物由来の窒素は約64% ($2.1 \times 10^3 \text{ kgN}$) が下流地点まで輸送された。中流区間と下流区間では距離に差が無いが、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 ($0.8 \times 10^3 \text{ kgC}$, $1.3 \times 10^3 \text{ kgN}$) 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。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、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大のPOMの供給源となったと考えられた。

(2) せん断力と付着物由来有機物の流下量との関係

せん断力に対する付着物由来の窒素流下量の変化を、中流地点と下流地点で比較した(図-8)。せん断力と窒素流下量との関係は、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多量の窒素を供給していた。下流地点ではせん断力が $200 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ 以上で付着物の流下量が増加していた。下流地点の中流区間付着物はせん断力が約 $200 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ までは流下量が小さく、それ以上のせん断力で流下量が増加している。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 $670 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ のせん断力にもかかわらず、流下量が減少していると評価された。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細粒分など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(鉱物のシルトや砂)の流下量が $2.5 \sim 6.4 \text{ kg/s}$ 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流下量も大きくならなかったと考えられた。

(3) 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であったと考えられた(図-9)。

ダム流入量(ダムの無い場合の流量)とダム放流量(ダム建設後の流量)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-9)。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 0.25 m 、下流地点では 0.33 m 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。

5. まとめ

本研究は宮ヶ瀬ダムの放流試験の際に下流河川を流下

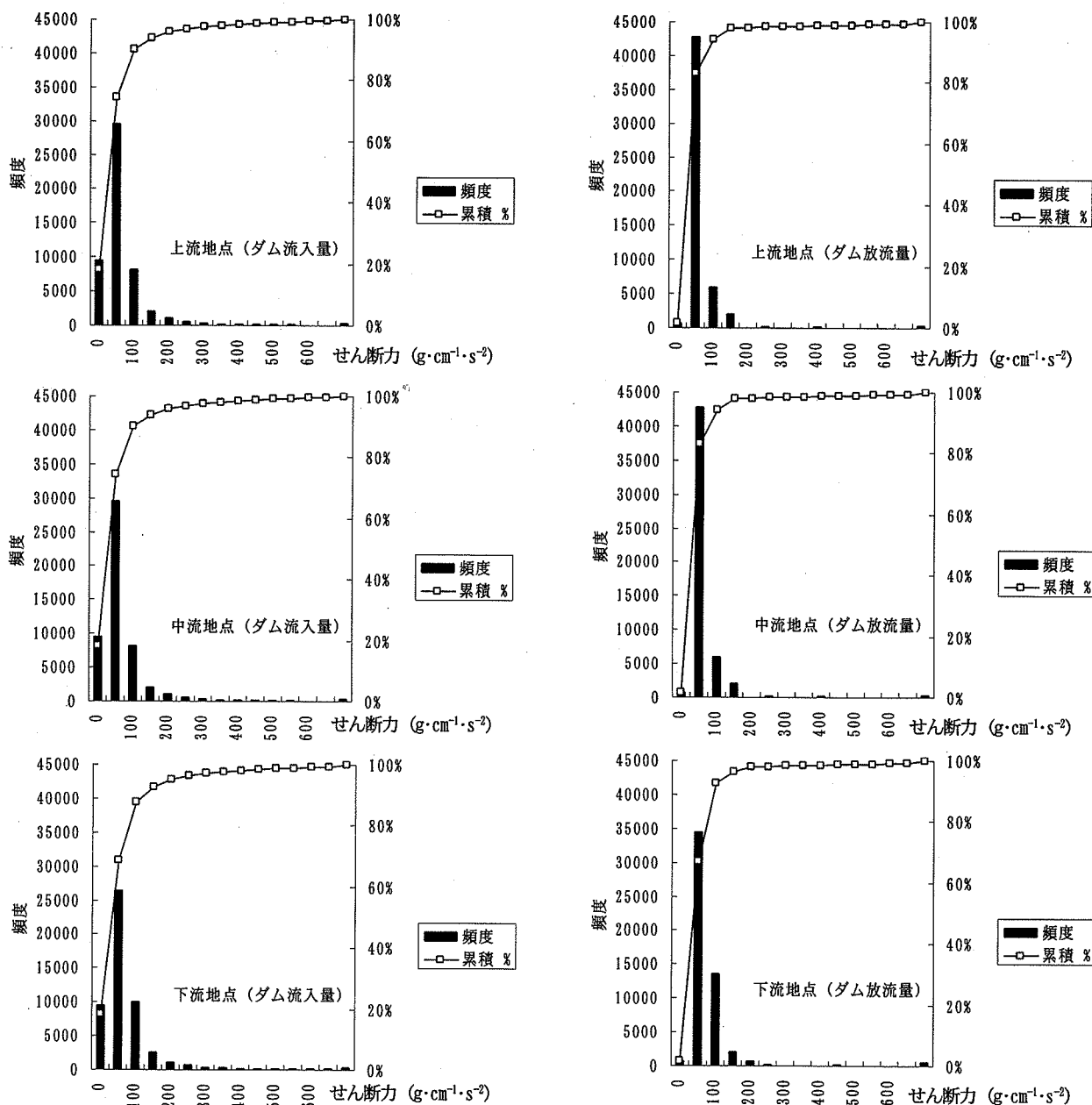


図-9 2000～2005年のダム流入および放流量によるせん断力の発生頻度と累積率（毎正時流量より）

した懸濁態有機物の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が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。

謝辞：財団法人ダム水源地環境整備センター研究第三部の小山俊氏には調査の際に、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広域水管理課の佐藤薫氏には水量観測値等の提供について、株式会社環境研究センターの一宮孝博氏には安定同位体比の測定において、多くの尽力をいただいた。ここに感謝の意を表す。

- 1) Vannote, R. L., Minshall G. W., Cummins K. W., Sedell J. R. and Cushing C. E.: The river continuum concept, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, Vol.37, pp.130-137, 1980.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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>.
- 5) 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.

(2006. 4. 6受付)

参考文献