

白丸調整池ダムのSS流出負荷量の変動と 濁度の底生動物への影響

CHANGES OF SS LOAD IN SIROMARU REGULATING RESERVOIR DAM AND
INFLUENCE ON THE BENTHIC ORGANISMS ABOUT TURBIDITY

河合真由美¹・土屋十圀²
Mayumi KAWAI, Mitsukuni TSUCHIYA

¹学生会員 前橋工科大学大学院 工学研究科建設工学専攻(〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町460-1)

²正会員 工博 前橋工科大学教授 工学部建設工学科(〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町460-1)

It is an important subject to manage sedimentation of dams appropriately so that the continuity of rivers may be maintained and the influence of the ecosystem on the downstream site may be made to reduce in late years. And it is necessary to examine measures of turbid water. In this study, changes of a pollutant load which sediment affects are cleared quantitatively on Siromaru Dam. Relation between turbidity and the diversity of benthic animals are clarified using a stochastic method.

The correlating equation of between turbidity and SS was obtained reliably by calculation of a pollutant load. And an annual discharge-duration curve on the turbidity has been created. A significant relation is accepted, that is between the non-exceeding probability of 355-day turbidity and the Simpson index using stochastic methods of turbidity and benthic animals. This relation is suiting a convex quadratic curve and having the maximum of diversity. Therefore, it became clear that the suitable non-exceeding probability, namely, moderate disturbance frequency exists.

Key Words : *Turbidity, Suspended Solids, sediment discharge, benthic animals, Simpson index, non-exceeding probability,*

1. 研究の背景と目的

多摩川上流部に位置する白丸調整池ダムは、3年に1度、施設の点検等のためゲートを全開にして放水を行っている。2002年12月～2003年2月には、ダム内に堆積した土砂が例年に比べ多く、上流域の小河内ダムからの放水流量が増加し、白丸ダム下流域において濁りが長期化して問題となった。この要因は、2002年から実施してきた現地調査によって放水時のダム湖底に堆積した細粒分の流出であることが明らかになった¹⁾。

そこで、河川の連続性を維持させ、下流域の生態系への影響を軽減させるためにダムの堆砂を適切に管理することは重要な課題であり、濁水の長期化を防止する対策を検討する必要がある。放水時の濁水対策としては、出水時の土砂フラッシング、ダム内の河道安定化等が考えられている。

本研究では、白丸ダムを対象に濁水の要因である土砂

流出が影響を与える濁質負荷量の変動について明らかにする。また、土砂の影響を受けやすい底生動物に着目し、濁度と底生動物の多様性との関係を確率統計的手法で明らかにすることを目的とする。

2. 対象河川流域の概要

東京都西多摩郡奥多摩町鳩の巣溪谷上流に位置する東京都交通局管轄の白丸ダムは、1963年に建設された発電専用ダムで総貯水容量893,000m³、有効貯水容量300,000m³、最大出力16,400KWのダムである。

ダム直下の白丸ダム発電所の他、御岳にある多摩川第3発電所にも導水トンネルを経由して送水する。また、ダム上流部には国内最大の水道専用ダムと呼ばれる小河内ダムが存在し、下流域の市民に良質な水を供給している。白丸ダムと小河内ダムの間には日原川が存在し、多摩川に流入し、事実上本川化している。

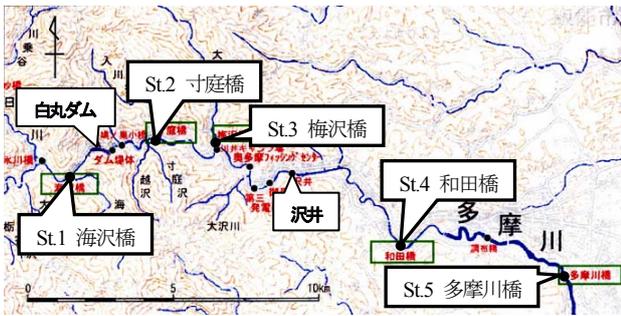


図-1 多摩川の調査地点

表-1 解析データの詳細

データ	堆砂測量	流量 濁度	SS	底生動物
地点	白丸ダム	沢井	和田橋	
期間(年)	1963～2005	1996～2005	1981,1983,1993～1996	2002～2005

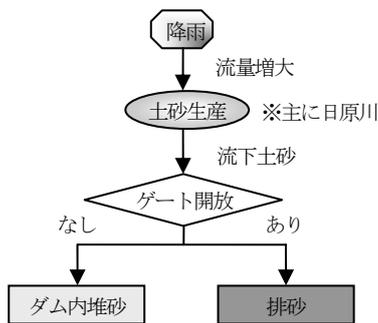


図-2 ダム堆砂量と排砂

図-1に調査地点を示す。上流からSt.1海沢橋下, St.2寸庭橋下, St.3梅沢橋下, St.4和田橋上, 及びSt.5多摩川橋上の地点とした。St.1は白丸ダムの上流地点で, St.2以下4地点は白丸ダムの下流地点である。St.1～St.5の流路延長は約23kmである。

3. 調査方法

上記の5地点で河床変動調査, 浮遊土砂量調査, 河床影響調査を行っている。

河床変動調査はダム内のナローマルチ測量を実施して, ゲート開放前後の河床材料の比較をダム内, 海沢橋, 寸庭橋地点で粒度試験を行っている。

浮遊土砂量調査は出水時のゲート開放時に採水し, ダム内, 海沢橋, 寸庭橋地点で濁度の観測を行っている。

河床影響調査はSt.1～St.5で底生動物調査, クロロフィル調査, DO調査等を行っている。底生動物調査は30cm×30cmのコドラート付サーバーネットを使用して, 底生動物を採取し, 10%のホルマリンによって固定させ同定している。クロロフィル調査は5cm×5cm×30cmの透明アクリル製筒型コドラートと改良された灯油ポンプを用いて行っている。

本研究では東京都交通局による堆砂測量データ, 東京都水道局による流量, 濁度データ, 東京都環境局による

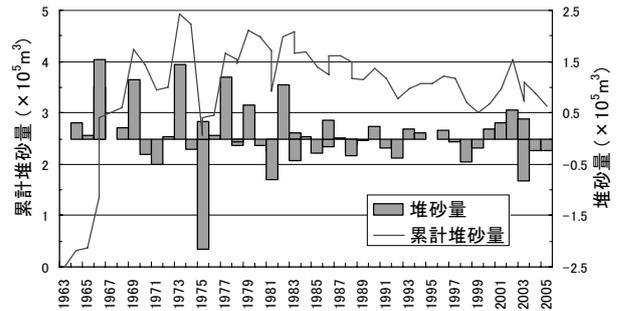


図-3 ダム堆砂量の経年変化

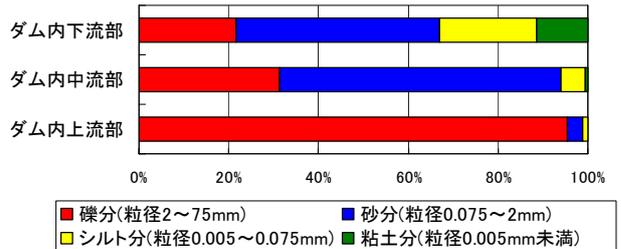


図-4 ダム内堆砂の粒度組成(2003年12月1日)

表-2 抜水前の堆砂量

測定年月	堆砂量(m ³)
1996年11月	15300
1999年10月	-19000
2002年12月	56600

SS, 底生動物データを収集して解析を行った。表-1に解析に使用した各データのみ採取地点と期間を示す。

4. ダム堆砂履歴と濁度現象

(1) ダム堆砂履歴

白丸ダムでは, 図-2に示すように上流からの流下土砂による堆砂と出水時のメインゲート開放による排砂という双方の事象が, 場所的・時間的な堆砂量の増減を生じさせている。

1963年の運用当初から2005年までの42年間の定期横断測量によるダム堆砂量の経年変化を図-3に示す。各年の堆砂量は, 前年の測量調査の差から算出している。運用開始の1963年から1969年までは右肩上がりに堆砂量が増大していることが確認できる。したがって, 上流からの流下土砂の大部分がダム堤体で堆積し, 下流域への土砂供給が少なかったことを推察することができる。一方, 1969年以降は, 大規模な出水, それに伴うゲート開放等によって堆砂量の増減が著しいことがわかる。

2003年12月11日にダム内上流部, 中流部, 下流部の3地点で実施された堆砂調査の粒度組成を図-4に示す。この図より, 上流部では粒径が粗く大部分が礫分で, 中流部では砂分が最も多く, 下流部では砂分も多いが, 次にシルト分と粘土分を合わせた泥分が多くなっている。

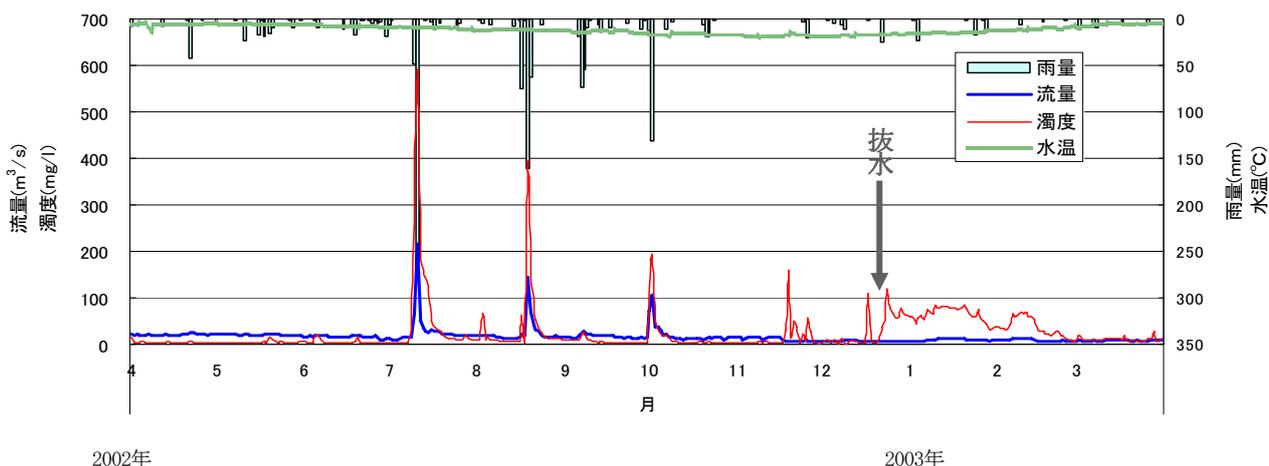


図-5 流量，濁度，雨量，水温の経時変化(平成14年度)

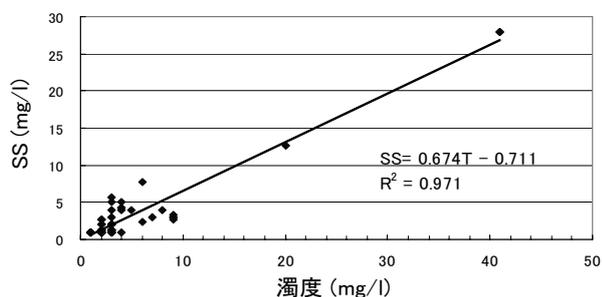


図-6 沢井地点における濁度とSSの関係

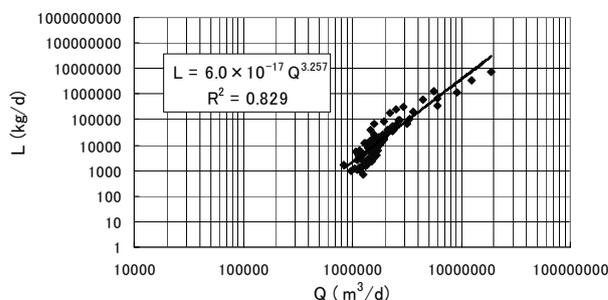


図-7 沢井地点における流量とSS負荷量の関係

(2) 濁度現象

平成8年度(1996年)，平成11年度(1999年)と平成14年度(2002年)の過去に3回の抜水(1997年1月12日～1997年4月5日，1999年11月1日～2000年3月1日，2002年12月23日～2003年2月21日)が行われている。表-2に過去3回の抜水前に実施した定期横断測量から算出した堆砂量を示した。この表より，2002年に極めて堆砂量が多かったことがわかる。そこで，平成14年度の抜水に着目した。図-5は平成14年度の流量，濁度，雨量，水温の経時変化を示したもので，データは全て日平均で表示した。また，流量，濁度，水温データは沢井地点を使用し，雨量データは白丸ダム地点を使用した。

この図の7月，8月，10月に示されるように，流量と濁度の増減に降雨レスポンスの同時性を確認することができた。この理由は，流量の増大により湖底に形成された流路で新たな洗掘が生じ，濁度を発生させたと推察することができる。また，12月23日の抜水後，濁度が急激に増加している。特に濁度が抜水後最高120mg/lまで上昇し，その年の3月まで20mg/lと高い値を保持し続け，ヤマメの放流期に影響を与えた。この要因は冬季の水温低下に伴い水温躍層が崩れ，ダム湖内の循環流の発生が起因しているものと推察することができる。

5. 濁質負荷量算定

(1) SS流出負荷量の算定

観測データを使用して沢井地点の濁質負荷量について解析を行った。その際，汚濁として濁度とSSに着目した。濁度(沢井地点)とSS(和田橋地点)の換算式は，1981年，1983年，1993年～1996年の濁度データとSSデータで，サンプル数は76個使用し，SSと濁度の関係式を推定した。その結果は(1)式として得られ，図-6に示した。

$$SS = 0.674Turb - 0.711 \quad (1)$$

ただし，SS：懸濁物質(mg/l)，Turb：濁度(mg/l)，相関係数は0.962と非常に高い値を示した。(1)式の妥当性を検討するため，濁度とSSの高い範囲で作成した梅田ら²⁾の既往研究(濁度の最大値約400mg/l)で示されている相関式(2)と比較した。

$$SS = 0.64Turb - 0.86 \quad (2)$$

年間SS流出負荷量の算定の結果，(1)式の(2)式に対する誤差は約8%であり，信頼性が高い関係式であると推察できる。したがって，沢井地点の濁度を(1)式よりSSに換算し，流量との関係を調べた。流量，濁度データは，抜水期間以外の際立ったゲート放流量が3回程度存在する期間，2002年7月8日～10月13日を対象とした。現在，流量(Q)と負荷量(L)の関係を $L = \alpha Q^\beta$ の経験式で算定する手法が広く用いられている³⁾。本研究でも，同様の手法を用いてサンプル数98個で(3)式が得られた。

表-3 SS流出負荷量と流砂量の経年変化

	1996年	1997年	1998年	1999年	2000年	2002年	2003年	2004年	2005年
SS流出負荷量 (kg/ha/y)	9286	36.10	8050.93	783.50	66.43	2336.39	513.74	6150.80	1502.14
流砂量 (m ³)	15300	7000	46300	19000	17700	56600	43800	22400	24200

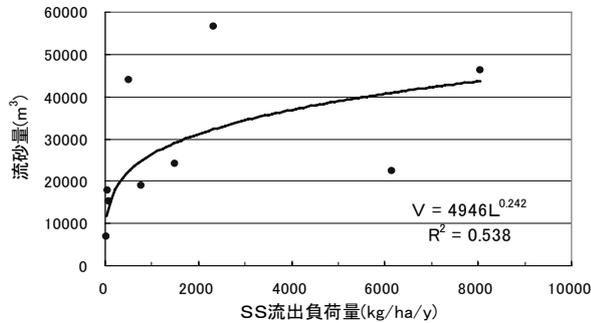


図-8 SS流出負荷量と流砂量の関係

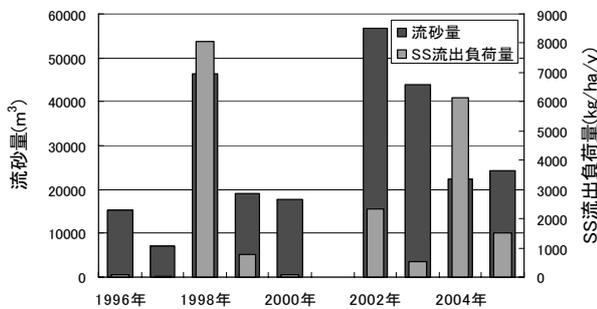


図-9 SS流出負荷量と流砂量の経年変化

$$L_{SS} = 6.0 \times 10^{-17} Q^{3.257} \quad (3)$$

ここで、 L_{SS} : SS負荷量(kg/d), Q : 流量(m³/d)として(3)式を図-7に明記した。その相関係数は0.911と非常に高い値になり、妥当性がある関係式になったと考えられる。

(2) SS流出負荷量と流砂量の関係

前述の(3)式を用いて、1996年～2005年(2001年は欠測データ多数のため除外)の年間SS流出負荷量の算定を行った。沢井の流域面積は18,438haである。また、本研究では、流砂量とはダム内の1年間の土砂の流出量と流入量の和の総量と定義した。その結果と流砂量を表-3に示す。洪水時等に、浮遊砂は土砂移動に伴う巻き上がり現象の結果発生する濁質である。また、流砂量は土砂の移動の結果を表し、ダム管理の重要な指標となるSS流出負荷量と関係づけることは重要であると考えられる。したがって、年間SS流出負荷量と流砂量の関係を検討する。年間SS流出負荷量と流砂量の関係は(4)式で示され、サンプル数9個で図-8に明記した。

$$V = 4946L^{0.242} \quad (4)$$

ここで、 V : 流砂量(m³), L : 年間SS流出負荷量(kg/ha/y)とする。その相関係数が0.733となり、値としては高い相関ではないが、ダム管理上のデータとしては貴重であるので比較的相関の良い推定式を算出することができた

表-4 既存資料⁵⁾⁶⁾による原単位

	SS(kg/ha/y)
森林	3.1～4100
畑	1.0～6900

表-5 ダム放流量が著しく増加した年月日

年月日	ダム放流量(m ³ /s)	放流理由
1998/8/28	338.0	台風4号
1998/9/15	532.0	台風5号, 8号, 7号 秋雨前線
1999/8/13	710.0	熱帯低気圧による降雨
2001/8/22	303.0	台風11号
2001/9/10	1018.0	台風15号
2002/7/11	375.3	台風6号
2002/10/1	360.0	台風21号
2004/10/8	485.0	台風22号
2004/10/19	495.0	台風23号
2005/8/26	323.3	台風11号

注) 放流量300m³/s以上を対象

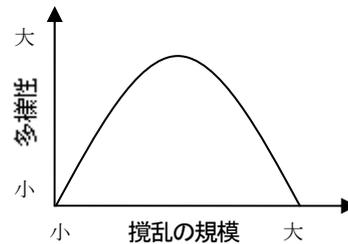


図-10 中規模攪乱説の模式図

と考えられる。

図-9にSS流出負荷量と流砂量の経年変化を示す。2002年の流砂量は、前年の2001年9月、日原川の樽沢土砂崩壊の発生に起因して、この間最大値を示したと推察することができる。

(3) SS流出負荷量の経年変化

白丸ダムの存在する奥多摩町は、町の総面積の94% (21,161ha)を森林が占めている⁴⁾。そこで、表-4に示す森林の原単位と表-3のSS流出負荷量を比較する。本研究の1998年と2004年の値は既存資料の原単位より非常に大きい値になっていることがわかる。表-5にダム放流量が著しく増加した年月日を示した。したがって、この表を参考にすると、台風時の増水に伴うダム放流量の著しい増加が起因して非常に大きなSS流出負荷量になったと推察することができる。

6. 濁度と底生動物の確率統計的検討

(1) 中規模攪乱説

河川を生息場とする底生動物、魚類、植生等の生物群集は種間の競争により限られた種のみが優先し、極相に遷移する⁷⁾。このような生息場は攪乱により極相の状態は破壊され、再び競争で排除された種が生息可能となる。あらゆる生息環境はこの過程が繰り返されることにより種の多様性が保たれている。河川は他の自然環境に比べ

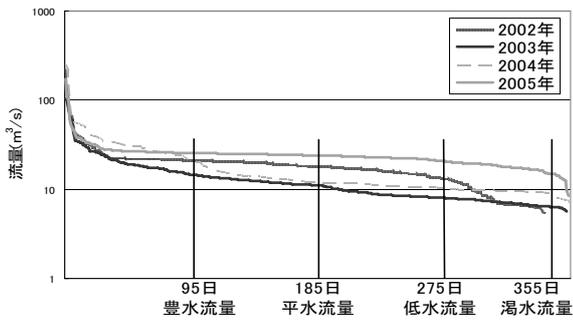
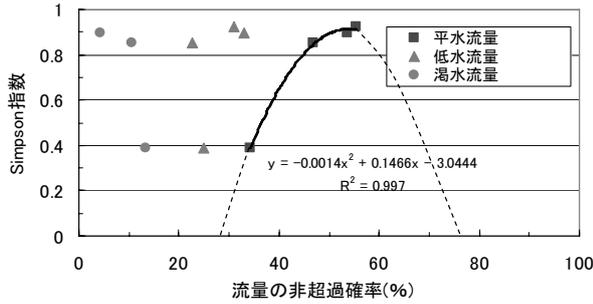
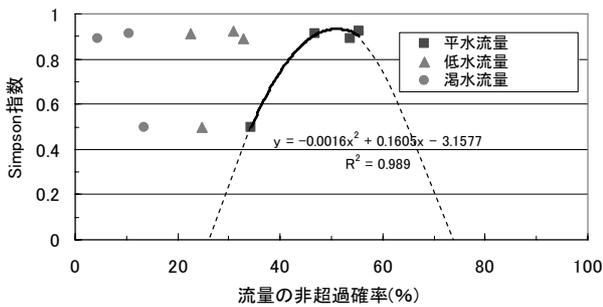


図-11 流況曲線



(a) St.3 梅沢橋



(b) St.4 和田橋

図-12 各流量の非超過確率とSimpson指数の関係

で変動性が高く、攪乱が頻繁に起こりうるものが生息場としての河川環境が持つ特徴である。

群集生態学では、攪乱の規模が大きすぎると回復に要する時間が長く、種の減少を招く場合もある。一方、攪乱の規模が小さすぎると十分に競争排除をおさえることができず、種の減少を招く場合もある⁸⁾と記述されている。即ち、多様性を保つには適度な攪乱(中規模な攪乱)が必要とされる。中規模攪乱説は植物プランクトンや陸上植物などで広く確認されている。このことを図-10の中規模攪乱説の模式図に示した。この理論をもとに後述のような確率統計的検討を行った。

(2) 流量と底生動物の確率統計的検討

沢井地点の2002年～2005年の計4年分のデータを使用し、図-11に示す流況曲線を作成した。流況曲線における185日目、275日目、355日目の日流量をそれぞれ平水流量、低水流量、濁水流量として指標化する。既往論文⁹⁾では豊水流量を洪水攪乱が起こりうる流量と仮定し、豊水流量の超過確率を攪乱規模に相当する値とした。そ

表-6 個体数とSimpson指数

地点	年月日	個体数	Simpson指数
St.1 海沢橋	2002/11/27	994	0.562
	2003/12/2	2372	0.924
	2004/12/3	3176	0.666
	2005/12/1	1153	0.924
St.2 寸庭橋	2002/11/27	719	0.854
	2003/12/2	851	0.841
	2004/12/3	253	0.748
	2005/12/1	1290	0.930
St.3 梅沢橋	2002/11/27	815	0.926
	2003/12/2	860	0.850
	2004/12/3	1135	0.388
	2005/12/1	1542	0.896
St.4 和田橋	2002/11/27	1155	0.925
	2003/12/2	1316	0.915
	2004/12/3	857	0.495
	2005/12/1	1018	0.893
St.5 多摩川橋	2002/11/27	1051	0.910
	2003/12/2	768	0.938
	2004/12/3	1462	0.587
	2005/12/1	1201	0.898

の結果、自然度の高い河川では豊水流量の超過確率とSimpson指数によって適度な攪乱頻度が存在することが明らかになった。これを応用し、平水流量、低水流量、濁水流量を超えない確率、つまり非超過確率を攪乱頻度に相当する値と仮定した。また、対数正規分布から各流量の非超過確率を求めることができる。

沢井地点の近傍であるSt.3とSt.4に着目し、図-12に攪乱規模として各流量の非超過確率と多様性を表すSimpson指数の関係を示した。横軸に各流量の非超過確率、縦軸にSimpson指数をとり、プロットされた点に対して相関が高いもののみ近似曲線を作成した。なお、Simpson指数は(5)式によって算定する。

$$SI = 1 - \sum (n_i / N)^2 \quad (5)$$

ここで、 n_i : 個々の種の湿重量、 N : 湿重量の総和である。Simpson指数は2002年～2005年の底生動物データを使用し、詳細については表-6に底生動物の個体数と計算されたSimpson指数を示した。

図-12(a) 梅沢橋は、平水流量のみ2次近似曲線との非常に高い相関が得られた。また、相関係数は0.998、近似曲線の極値の非超過確率は52.4%と算出された。

図-12(b) 和田橋は、梅沢橋と同様に平水流量のみ2次近似曲線に近似し、相関係数は0.995と非常に高い相関が得られた。その際の極値の非超過確率は50.2%となった。これらのことから、既往論文⁹⁾とは異なり平水流量の非超過確率とSimpson指数の間に二次曲線に近似する傾向が認められ、流量から底生動物の多様性を評価することができると思われる。

(3) 濁度状況曲線の作成

底生動物は河床の砂礫に生息するため濁度やシルトの影響を受けやすい。したがって、底生動物データを用いて、濁水による生態系への影響を考察するため、濁度変動の統計的手法で検討を行った。ここでは中規模攪乱説を応用し、攪乱が起こりうる濁度を特定するため、流況

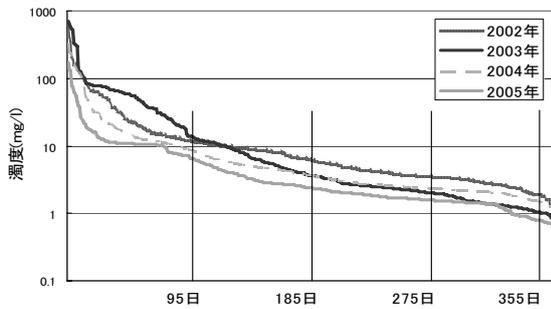
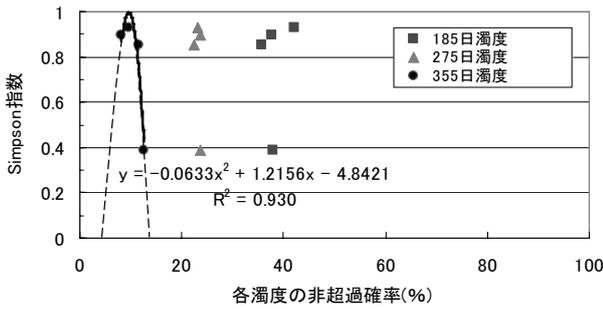
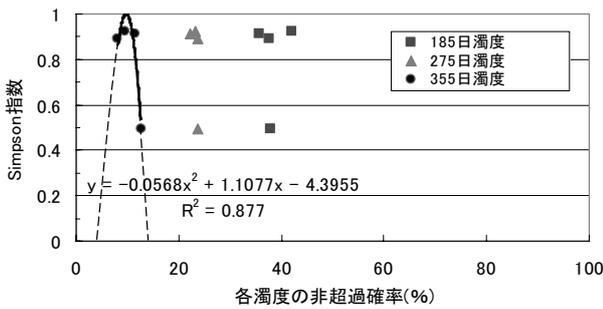


図-13 濁度状況曲線



(a) St.3 梅沢橋



(b) St.4 和田橋

図-14 各濁度の非超過確率とSimpson指数の関係

曲線の流量を濁度に置き換えて流況曲線と同様に濁度状況曲線を作成した。濁度状況曲線を図-13に示す。

(4) 濁度と底生動物の確率統計的検討

前述の流量の検討と同様に、濁度状況曲線における185日濁度、275日濁度、355日濁度を超えない確率、つまり非超過確率を攪乱頻度に相当する値と仮定した。

図-14に攪乱規模として各濁度の非超過確率と多様性を表すSimpson指数の関係を示した。

図-14(a)梅沢橋は、355日濁度のみ2次近似曲線との非常に高い相関が得られた。また、相関係数は0.964、近似曲線の極値の非超過確率は52.4%と算出された。

図-14(b)和田橋は、梅沢橋と同様に355日濁度のみ2次近似曲線に近似し、相関係数は0.936と非常に高い相関が得られた。その際の極値の非超過確率は50.2%となった。前述の流量では平水流量(185日流量)に関してSimpson指数との関係を示したが、濁度では355日濁度と同様な関係を示した。この355日濁度は、即ち、清水を意味する。ここで、流量と濁度の考察の違いは、流量で

は中規模の攪乱(185日流量)、濁度ではより濁りの少ない清水との関係を示したことである。したがって、濁りが少ないことが底生動物の多様性の指標になると推察することが出来る。

7. 結論

本研究結果を要約すると、以下の知見が得られた。

- 1) 白丸ダム下流の沢井地点の観測データをもとに、濁質負荷量の算定を行い、信頼性の高い濁度とSSの換算式が得られ、年間SS流出負荷量の経年変化を把握することが出来た。また、白丸ダム堆砂資料からSS流出負荷量と流砂量には相関性があり、推定式を算出することが出来た。
- 2) 濁度と底生動物の確率統計的検討によって、St.3とSt.4では355日濁度の非超過確率とSimpson指数の間に有意な関係が認められる。その関係は上に凸の二次曲線に適合し、底生動物の多様度には最大値を持つことである。また、このことは濁度の非超過確率が大きくても小さくても多様性が減少することを意味する。したがって、適度な非超過確率つまり適度な攪乱頻度が存在することが明らかになった。

謝辞：本研究のデータ収集に際して、東京都交通局、東京都水道局、東京都環境局にご協力頂きました。ここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 東京都交通局：平成17年度白丸調整池ダム濁水対策検討会資料，2005。
- 2) 梅田信，富岡誠司：ダム貯水池における洪水時細土砂の流下過程について，河川技術論文集，第9巻，pp.359-364，2003。
- 3) 國松孝男，松岡浩爾：河川汚濁のモデル解析，技報堂出版，pp.48-49，1989。
- 4) 東京都交通局：平成16年度白丸調整池ダム環境調査報告書，2004。
- 5) 山崎晃裕，中津川誠：積雪寒冷地流域の土地利用と水質成分負荷量について，開発土木研究所月報，No.529，1997。
- 6) 太田陽子，中津川誠：出水時を考慮して推察した水質成分負荷量と流域土地利用との関係について，北海道開発局技術研究発表会，2001。
- 7) 水野信彦，御勢久右衛門：河川の生態学補訂版，築地出版，pp.50-59，1993。
- 8) 宮下直，野田隆史：群集生態学，東京大学出版会，pp.59-61，2003。
- 9) 土屋十圓，諸田恵士：底生動物群集の多様性に及ぼす流況の確率論的特性，水文・水資源学会誌，第18巻，pp.521-529，2005。

(2006.9.30受付)