

# ヒル谷における人為的排砂の イワナへのインパクト

## AN IMPACT OF SEDIMENT FLUSHING FROM A SABO DAM ON CHAR IN HIRU-DANI RIVER

木下篤彦<sup>1</sup>・水山高久<sup>2</sup>・藤田正治<sup>3</sup>・澤田豊明<sup>4</sup>・吉清守<sup>5</sup>

Atsuhiko KINOSHITA, Takahisa MIZUYAMA, Masaharu FUJITA, Toyoaki SAWADA, Mamoru YOSHIKIYO

<sup>1</sup>学生会員 農修 京都大学大学院生 農学研究科森林科学専攻 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

<sup>2</sup>正会員 農博 京都大学教授 農学研究科森林科学専攻 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

<sup>3</sup>正会員 工博 京都大学助教授 農学研究科森林科学専攻 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

<sup>4</sup>正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所 (〒506-1442 岐阜県吉城郡上宝村中尾)

<sup>5</sup>京都大学大学院生 農学研究科森林科学専攻 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

The typical indices for evaluating an impact of sediment flushing on Char (*Salvelinus leucomaenis*) are dissolved oxygen concentration, turbidity, sediment deposition depth on riverbed and spectrum of boundary profile between flow and land. The aim of this paper is to know how to determine the condition of low impact and how to predict the deposition process and the recovery process. Firstly, the relation between Stress Index due to turbidity and physiological influence strength for Char was investigated experimentally and a method for determining the condition of low impact was presented from the relation. Secondly, the impact of the sediment flushing in the previous experiments was evaluated from the indices on bed variation. Finally, a method for predicting recovery process is presented. The simulation of the experiment has shown the method can describe the recovery process in pools as well as the deposition process. As a result, we estimated the critical discharge of low impact on Char in Hiru-dani River.

**Key words :** *sediment flushing, sabo dams, river environment, habitat, fish, turbidity, deposition, bed variation, simulation*

### 1. はじめに

魚類に与える排砂の影響は、水質と河床変動の点から評価することが重要であるが、そのためにはそれらに関する指標を見出す必要がある。まず水質の点から見ると、濁度および溶存酸素濃度がイワナの生死にとって重要な指標となる。河床変動に関しては、土砂堆積が生息場所や避難場所の消失、遊泳条件の悪化につながるため、河床堆積厚、土砂堆積による河岸の水際形状の変化などが指標となる。これまで濁度の影響についてはいくつかの知見が得られている<sup>1),2)</sup>。とくに、Newcombeらはストレス・インデックスを定義し、それと魚類への影響度の関係を求めて、濁度の影響評価を行う図表を提示している。河床変動の影響は、藤田ら<sup>3)</sup>が検討し、魚類への影響を評価するための河床変動モデルを提案している。

さて、著者らは、これまで神通川上流のヒル谷において排砂実験を数回行っている。これらの実験では、排出

土砂がすべてのプールを埋め尽くしかつ河床表面を覆い尽した結果、ほとんどのイワナが下流の本川に流されてしまったが、河床形状の非一様性によって若干のイワナはヒル谷に留まることができた<sup>3)</sup>。そこで、このような実験を基礎にして、本研究ではヒル谷に唯一生息するイワナに対する排砂の影響を濁度の増加、土砂の堆積と元河床への回復という点から考え、排砂の影響が少なくなるような条件について求める方法について検討する。

### 2. 現地実験

#### (1) 試験地と実験の概要

排砂実験は1997年から2000年までの間に5回、図-1, 2に示す京都大学防災研究所附属穂高砂防観測所ヒル谷試験流域の試験ダムを砂防ダムに見立てて行われた。ヒル谷は神通川水系蒲田川の上流の足洗谷流域に位置し、その流域面積は0.85km<sup>2</sup>、比流砂量は40m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/year程度で

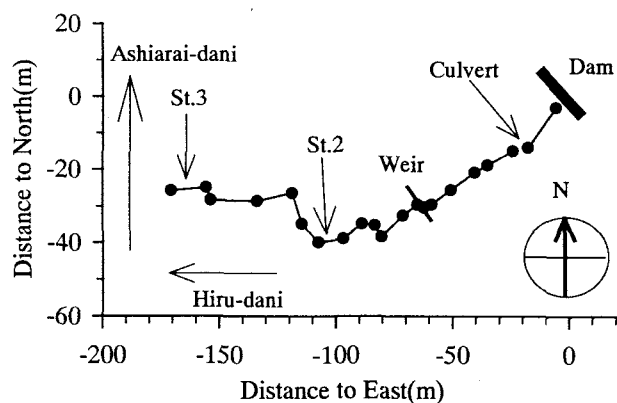


図-1 観測区間の平面図

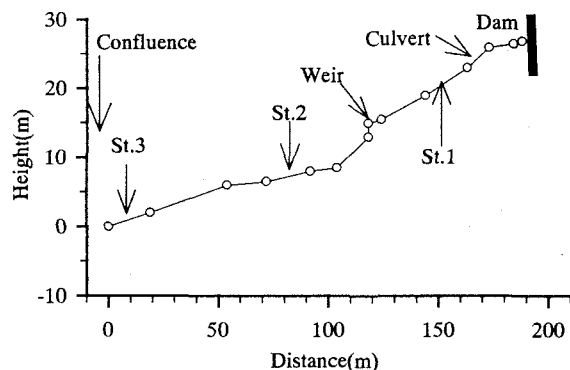


図-2 観測区間の縦断面図

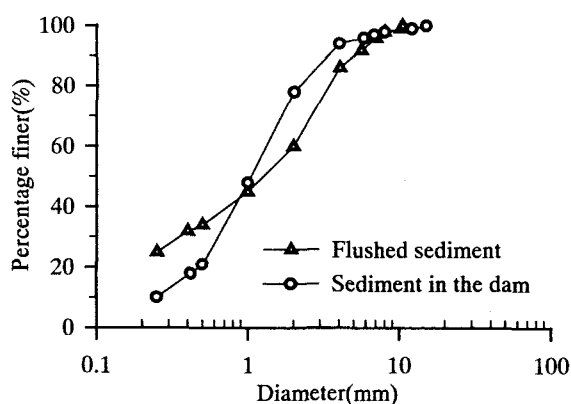


図-3 堆砂の粒度分布

ある。また、平水流量は $0.032\text{m}^3/\text{s}$ である。実験条件は表1のようである。ただし、採水ポイントに掃流砂が到達する前の浮遊物質の粒径は約 $1\text{mm}$ 以下であったので、全通過濁度物質量は粒径 $1\text{mm}$ 以下の物質の濃度と濁水の継続時間から推定された。試験ダムの高さは $4.7\text{m}$ 、幅は $7.5\text{m}$ で、堰堤の左右には排砂ゲートが2つある。観測区間は試験ダムから足洗谷合流点までの約 $190\text{m}$ の区間で、図1, 2のSt.1～3で濁度物質濃度、溶存酸素濃度、プール部での土砂堆積厚、プール部の周囲や石礫の間の奥行き長を計測した。また、St.2の直下流で河岸の水際形状の計測も行った。さらに、排砂前に体長 $20\text{cm}$ の養殖イワナを放流し、排砂後の挙動も観察した。

## (2) 河床条件と河床材料

観測区間の平均河床勾配は $0.08$ で、河床形態は階段状河床形態であるが、局所的に急勾配の箇所には大小のプールが密に存在し、緩勾配の箇所のプールとプールの間は平均勾配 $0.03$ の比較的平坦な河床となっている。澤田<sup>4)</sup>によると、土砂堆積のない平均的なプールの単位幅当たりの土砂貯留容量、すなわち土砂堆積のための空き容量の平均値は約 $0.2\text{m}^2$ である。図-3は試験ダムの堆砂の粒度分布および実験Ⅰの排出土砂の粒度分布を示したもの

表-1 実験条件

| 実験NO.                                          | I     | II    | III   | IV    | V     |
|------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )                    | 0.026 | 0.080 | 0.050 | 0.049 | 0.075 |
| 排砂時間(min)                                      | 210   | 120   | 60    | 120   | 240   |
| 排砂量( $\text{m}^3/\text{s}$ )                   | 20    | 49    | 25    | 40    | 50    |
| 単位時間排砂量( $\times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$ ) | 1.59  | 6.81  | 6.94  | 5.55  | 3.47  |
| 全通過濁度物質(1mm以下)( $\text{m}^3$ )                 | 0.23  | 1.64  | —     | —     | 2.72  |

表-2 影響度レベル

| 影響度レベル | 内容                |
|--------|-------------------|
| 14     | 致死率 80%～100%      |
| 13     | 致死率 60%～80%       |
| 12     | 致死率 40%～60%       |
| 11     | 致死率 20%～40%       |
| 10     | 致死率 0%～20%        |
| 9      | 成長率の低下            |
| 8      | 生理学的ストレスおよび組織学的変化 |
| 7      | 生息空間の中程度の損傷       |
| 6      | 生物の不健全な状態         |
| 5      | 営巣行動の低下           |
| 4      | 食餌量の低下            |
| 3      | 忌避行動、隠れ場所の放棄      |
| 2      | 警戒反応              |
| 1      | 呼吸回数の増加           |

で、 $0.1\text{mm} \sim 2\text{cm}$ の砂礫が主な成分である。ステップの部分を除いた河床材料は数 $\text{mm} \sim$ 十数 $\text{cm}$ の砂礫であるが、主な成分は $1\text{cm}$ から $10\text{cm}$ の範囲にある。したがって、排砂時には河床材料に比べて粒径の小さな砂礫がアーモークートの発達した階段状河床上を流下することになる。

## 3. 水質変化の影響

### (1) 溶存酸素濃度

図-4に実験Ⅱ, ⅣでのSt.3における排砂後の溶存酸素

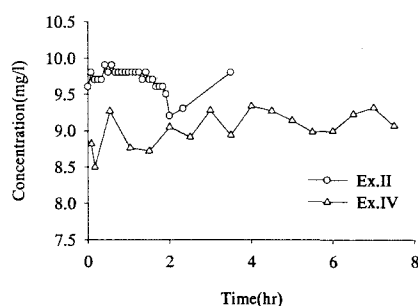


図-4 溶存酸素濃度変化

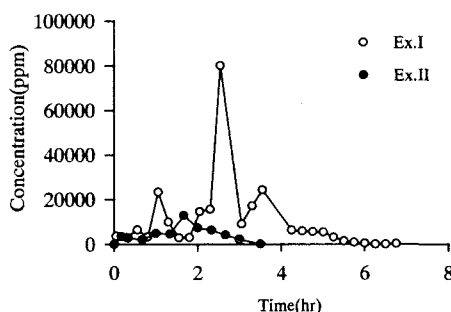


図-5 土砂濃度変化

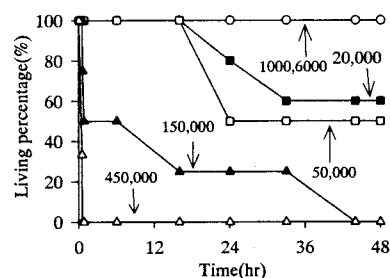


図-6 経過時間-生存率

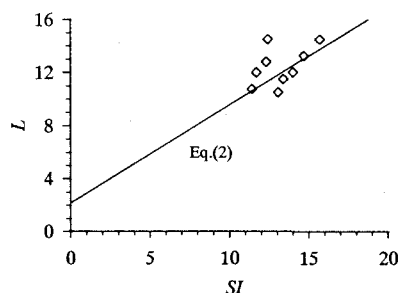


図-7 SI-L の関係

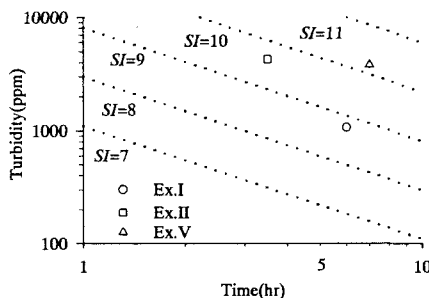


図-8 濁度-継続時間の関係

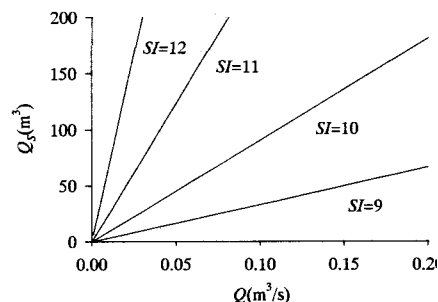


図-9  $Q_s$ - $Q_s$  の関係

濃度の変化を示す。両者を比較すると、流量が大きい実験 II の方が濃度は大きい。また、排砂後、プールの埋没に伴って下流の溶存酸素濃度が若干減少する傾向があるが、それほど低下しておらず、環境基準値の  $7.5 \text{ mg/l}$  より大きい。したがって、これらの排砂は溶存酸素の点ではイワナに大きな影響を与えていないと言える。

## (2) 濁度

### (a) 実験結果

前述のように採水中の  $1 \text{ mm}$  以下の成分を濁度物質とすると、図-3 より排出土砂のうち約 40% が濁度物質の生成源と考えられ、表 1 からその内の 8% 程度が浮遊形態で通過していることになる。実験 I, II の  $SI=1$  での濁度物質濃度の変化は図-5 のようである。

### (b) 影響評価の手法

Newcombe らは式(1)からストレス・インデックス( $SI$ )を算定し、表-2 に示す魚類への生理的な影響度レベル  $L$  と  $SI$  の関係を式(2)から求めている<sup>1)</sup>。

$$SI = \log_e (C \cdot T) \quad (1)$$

$$L = 0.738SI + 2.179 \quad (2)$$

ここに、 $C$ : SS 濃度 (ppm),  $T$ : 濁水の継続時間 (hr) である。そこでイワナに対しても式(2)が妥当かどうかを確かめるため、イワナを用いた水槽実験を行った。異なる濁度に設定した 6 個の水槽にイワナを 5 匹ずつ入れ、それぞれの水槽でイワナの生存個体数の時間変化を調べた。設定濃度は 1000, 6000, 20000, 50000, 150000, 450000 ppm である。ただし実験に用いた濁質成分はパルクレーで平均粒径  $0.009 \text{ mm}$  である。また各水槽ともエアープンプで一定の溶存酸素濃度を与えている。図-6 はその結果を示

したもので、6000 ppm までなら生存率は 100% であるが、450000 ppm ではすぐに生存率 0% になった。この図と表-2 から、 $SI$  と  $L$  を求め、両者の関係を示すと図-7 のようになる。図-7 には式(2)も描かれているが、式(2)が水槽実験の結果をよく表しており、式(2)からイワナに対する濁度の生理的な影響が評価できるものと考えられる。

### (c) 考察

濁度物質濃度が 0 から増加し再び 0 に近づくまでの時間を濁水の継続時間とすると、実験 I, II, V の濁度とその継続時間は図-8 のようにプロットされる。 $SI > 11$  がイワナの致死領域であるので、これらの実験はイワナにとって致死となる濁度ではなかったと評価される。このことは実験中に死に至るイワナが観察されなかったことと対応している。

つぎに、全排砂量  $Q_s$  に占める全通過濁度物質量の割合を  $r$ 、流量を  $Q$  とすると、式(1)は次式のように変形される。

$$r \cdot Q_s = e^{SI} \cdot Q \quad (3)$$

$r$  は流量によって変化するものと考えられるが、本実験では 1.2~5.4% であり、ほぼ一定値をとったので、平均値の 3.3% を  $r$  に用いて式(3)を描くと図-9 のようになる。この図より、イワナが死に至る ( $SI > 11$ ) 限界流量が推定される。すなわち、実験 I, II, V で 0.005, 0.015, 0.030  $\text{m}^3/\text{s}$  であり、平水流量より小さい流量でなければ致死領域にならないと言える。

## 4. 河床変動の影響

### (1) 影響度と回復度の一評価法

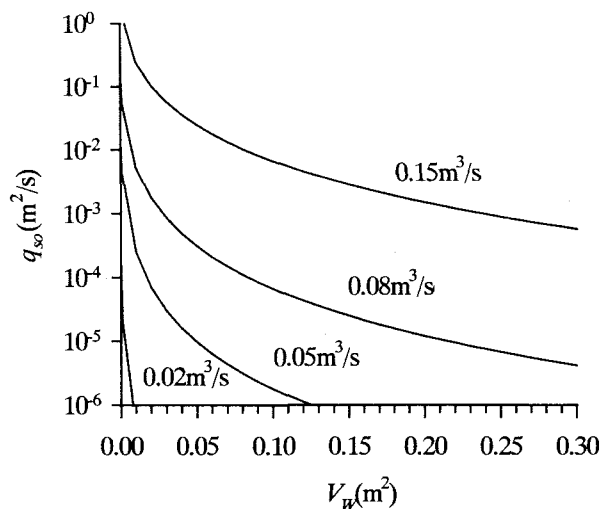


図-10  $q_{so}$ - $V_p$ の関係

澤田<sup>4)</sup>はヒル谷の平均的な大きさのプールからの流砂量式(m-s 単位)を落下水脈の河床における流速と関係付けて求め、藤田らはこの式を(4)式のように修正している<sup>3)</sup>。

$$\frac{q_{so}}{\sqrt{sgd^3}} = A \left\{ \frac{7.207\alpha^2 q^{4/3}}{sgd(0.745V_w^{1/2} + 0.37q^{2/3})} \right\}^{6.62} \quad (4)$$

ここで、 $q=Q/B_{in}$ ,  $s=\sigma/\rho-1$ ,  $Q$ :流量,  $B_{in}$ :プール入口幅,  $V_p$ :土砂貯留容量,  $d$ :粒径,  $\sigma$ :砂の密度,  $\rho$ :水の密度,  $g$ :重力加速度,  $A=2.015 \times 10^{-6}$ ,  $\alpha=0.41$ である。

この式は河床変動を計算するための重要な式の一つであるが、単位時間排砂量相当の流砂量がプールに流入する場合の平衡状態に対する  $V_p$ および土砂流入がなくなったときの  $V_p$ がこの式のみを使って概算でき、排砂の影響度と回復度を評価することができる。図-10 は  $d=3\text{mm}$ ,  $B_{in}=0.6\text{m}$ ,  $s=1.65$  に対して流量をパラメータとして流砂量と貯留容量の関係を求めたものである。たとえば、流入土砂量が  $10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$  のとき、 $Q=0.15\text{m}^3/\text{s}$  のときほとんどプール内に堆砂しないが、 $Q=0.05\text{m}^3/\text{s}$  になると  $V_p$ が90%以上減少する。したがって、この流入土砂に対しては流量が  $0.15\text{m}^3/\text{s}$  より小さくなればなるほど排砂の影響が大きくなり、 $Q=0.05\text{m}^3/\text{s}$  になると生息するイワナがほとんどプールから追い出され、流されることが予想される。つぎに、式(4)で流出土砂量が  $10\text{g/s}$  以下になったとき流砂がないものとする、 $V_p$ が初期値の0.2から0になったあと無給砂で  $Q=0.05\text{m}^3/\text{s}$  を与えても、 $V_p$ は  $0.06\text{m}^3$  までしか回復しないが、 $Q>0.08\text{m}^3/\text{s}$  では初期値にまで回復することが推測され、排砂時にはイワナが追い出されるが、その後プールが回復し、再び生息可能な河床に戻っていると推測される。ただし、生息条件は局所的な河床形状を議論しなければならないので、この基準は一つの目安と考えられる。

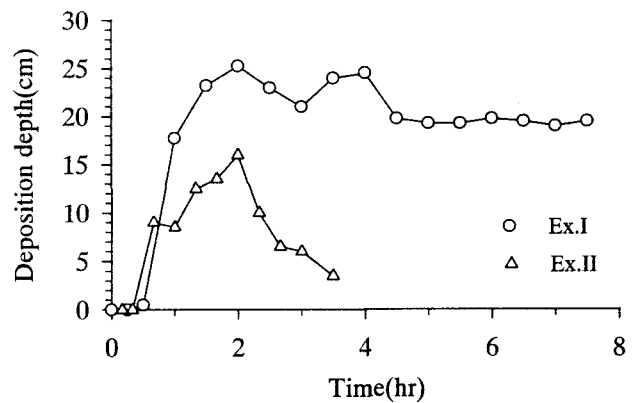


図-11 土砂堆積厚変化

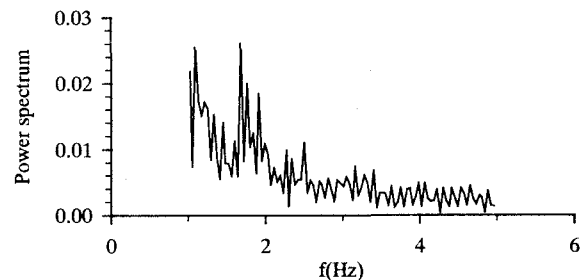


図-12(a) 排砂前のスペクトル分布

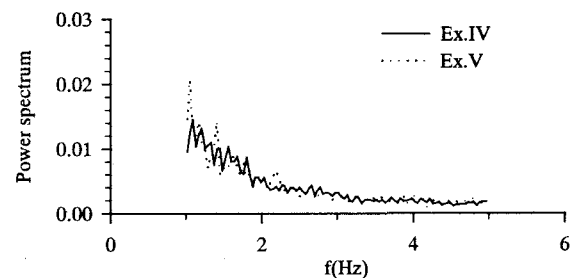


図-12(b) 排砂後のスペクトル分布

## (2) 実験結果

### (a) プール部での土砂堆積厚変化

図-11に実験 I, II の土砂堆積厚変化を示す。排砂によってプールが満杯になり、避難場所や生息場所への影響は大きかったと思われるが、実験 II は実験 I に比べプールへの土砂堆積は少なく、またその後の回復も早い。図-10によると、実験 I の条件ではプールは土砂で満砂した後、5%程しかプールが回復しないが、実験 II では、満砂するものの排砂後十分元の状態に回復する。このことは実験結果と一致する。

### (b) 河岸の水際形状の変化

図-12(a), (b)に実験 IV, Vにおける排砂前後の水際形状のスペクトル分布を示す。これによると排砂前にはいくつかの卓越周期が存在するが、排砂後はイワナの避難場

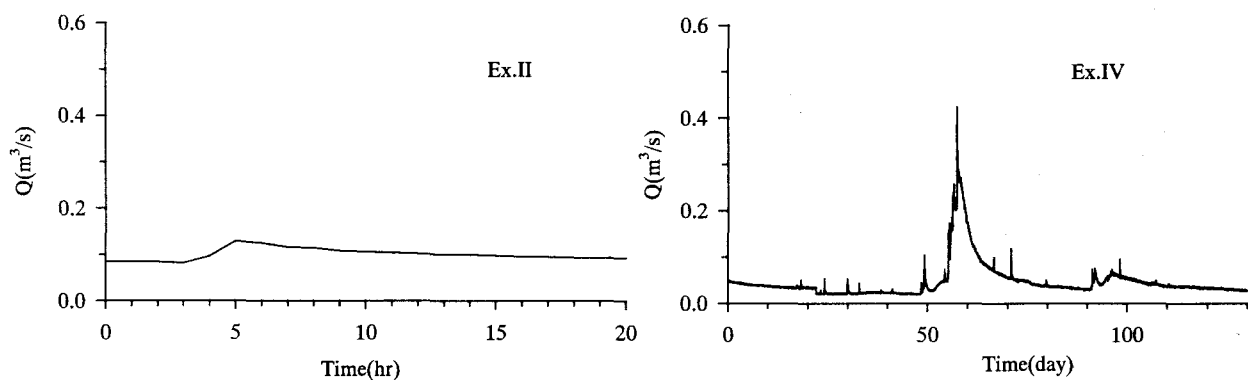


図-13 実験Ⅱおよび実験Ⅳの排砂時の流量

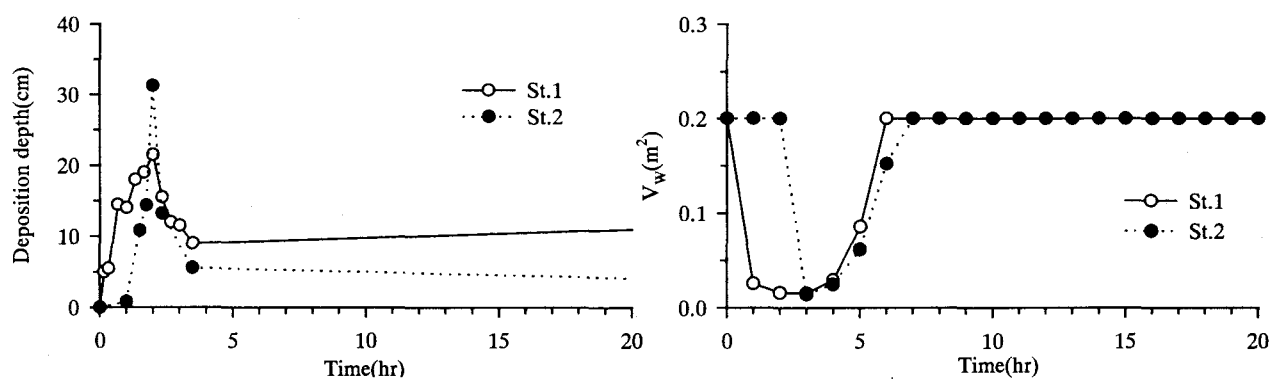


図-14 実験Ⅱの排砂時のプール内の河床変動

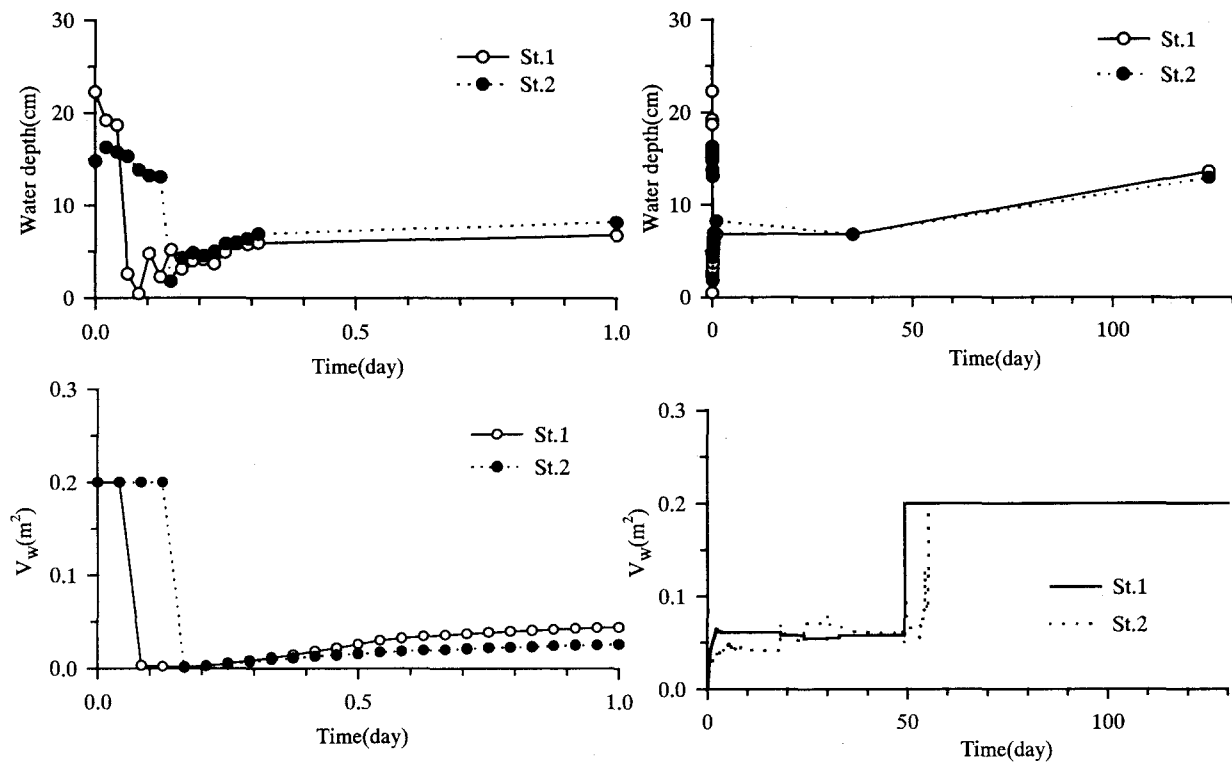


図-15 実験Ⅳの排砂時のプール内の水深変化と河床変動

所となるような河岸の水たまりやよどみに相当する部分の卓越周期が消滅しており、このことから排砂の影響が評価できる。

## 5. 土砂堆積と初期河床への回復過程のシミュレーション

### (1) 河道のモデル化

実際の河道の構造は複雑であるので、ここではプールと平坦部からなる直線河道で河道をモデル化する。まず、貯留容量  $0.2\text{m}^3$  のプールを実際の存在密度にあわせて配置し、プールが連続する急勾配の箇所では、このようなプールとプールの間に貯留容量  $0.1\text{m}^3$  の小さなプールを置いた。プールとプールの河床の勾配は  $0.03$ 、幅はレジーム則  $B_s=5Q^{0.5}$  から求める。また、河床は粒径  $10\text{cm}$  の礫からなるものとする。

### (2) 計算方法

計算は一樣粒径の掃流砂による河床変動を対象とし、排出土砂のうち  $40\%$  が浮遊砂として流出するとする<sup>3)</sup>。また、掃流砂の粒径は  $3\text{mm}$  とする<sup>3)</sup>。プールの河床変動は式 (1) でプールからの流出量を計算し、流入量は一つ上流のプールまたは平坦部下流端の流砂量を与えて計算される。ただし、プールは初期貯留容量以上には侵食されないものとする。平坦部については 1 次元河床変動計算を行うが、礫層中の掃流砂の移動や堆積が評価できるようにするために、礫層中の掃流砂量は摩擦速度に礫の遮蔽係数  $k$  をかけて有効な摩擦速度を求め、芦田・道上の掃流砂量式<sup>5)</sup>から算定した。遮蔽係数は道上・藤田・三村<sup>6)</sup>の研究を参考にして決定した。また、初期河床のマニングの粗度係数は  $0.02$  とし、礫層が砂で覆われると  $0.01$  とした。

### (3) 排砂後の土砂堆積と回復過程の計算例

計算は実験 II および実験 IV を対象とする。図-13 は実験 II および IV の排砂後の流量変化を示したものである。排砂時の流量は実験 II で  $0.08\text{m}^3/\text{s}$ 、実験 IV で  $0.049\text{m}^3/\text{s}$  である。また実験 IV では排砂 2 ヶ月後に洪水が起こっている。図-14 は実験 II の排砂後の St. 1, 2 におけるプール内の堆積厚さの実測値および  $V_p$  の計算値の変化を示したものである。排砂後、急激に上流側のプールから埋まり、その後、短時間で元の状態にほぼ回復している。このことは計算でも再現できている。図-15 は実験 IV の排砂 1 日後までと 120 日後までのプール内の水深変化の実測値および  $V_p$  の計算値を示したものである。実験では、排砂時の流量ではプールの容量がほとんど回復していないが、2

ヵ月後の洪水でかなり回復している。計算においても同様の傾向が見られ、本計算手法の妥当性が示唆される。

## 6. おわりに

本研究は排砂による魚類への影響を水質と河床変動の点から考え、影響の少ない排砂条件を決定する手法について検討した。また、排砂後の土砂堆積過程と回復過程を計算する手法を提示し、その精度を検証した。得られた主要な結果をまとめると次のようである。

- (1) 溶存酸素濃度および濁度についてのストレス・インデックスの値から判断すると過去の実験はイワナの生死に関わるような排砂ではなかった。
- (2) イワナに対するストレス・インデックスと影響度の関係を実験的に求めた結果、それは他の魚について Newcombe らの提案している関係式とよく一致した。この結果から、排砂に含まれる濁質物質の割合が分かれば、流量と排砂量の条件からイワナに与える生理学的な影響が推定できる。
- (3) ヒル谷においては、流量が  $0.15\text{m}^3/\text{s}$  より大きければプールにおける土砂堆積の影響はほとんどないこと、プールが満砂しても流量が  $0.08\text{m}^3/\text{s}$  以上であれば十分元の状態に回復することが一つの目安として推測された。これについては、実験によって確かめる必要がある。
- (4) 一次元河床変動計算を用いた河床変動のシミュレーションによってある程度排砂による影響度およびその後の回復度を再現することができた。

## 参考文献

- 1) Newcombe, C.P and Macdonald, D.D: Effects of Suspended Sediments on Aquatic Ecosystems, North American Journal of Fisheries Management 11, 1991.
- 2) 角 哲也: ダム貯水地からの排砂と排砂時の放流水質管理, ダム技術, NO. 127, pp. 30-38, 1997.
- 3) 藤田正治, 澤田豊明, 水山高久, 木下篤彦: 砂防ダムからの排出土砂の移動とそれが溪流環境に与える影響, 水工学論文集, NO. 44, 1215-1220, 2000.
- 4) 澤田豊明: 山地流域の土砂流出に関する研究, 京都大学博士論文, pp. 51-85, 1985.
- 5) 芦田和男, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第 206 号, pp. 59-69, 1972.
- 6) 道上正規, 藤田正治, 三村光太郎: 粗面河床上の平衡浮遊砂濃度分布に関する研究, 平成 4 年度土木学会中国四国支部研究発表会, II-87, pp. 264-265, 1992.

(2001. 4. 16 受付)