

## 15.2 冷水性魚類の自然再生産に良好な河道設計技術の開発

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 18～平 22

担当チーム：水環境保全チーム、寒地技術推進室

研究担当者：山下彰司、桑原 誠、森田茂雄、山田孝治、畠 秀樹、

出合寿勇、前田 優、市原哲也、煤孫英雄、幸田 勝、矢野雅昭

### 【要旨】

寒冷地を代表するサクラマスを指標生物とし、自然再生産に良好な河道設計技術を開発するには産卵期、幼魚期、越冬期、のサクラマスの各生活期に応じた物理的生息環境の評価手法を確立することが必要である。また、降海期、遡上期については河川横断工作物周辺においても河川の連続性が常時良好に確保されることが必要である。

本研究では、現地調査によりサクラマスの産卵床と河床地形の関係を明らかにした。越冬環境については、河川形態区分が異なる区間における越冬場の状況を把握し、その結果を踏まえた越冬場創出試験を実施し、河川工事を行なう際の影響緩和策についての知見を得た。堰堤工作物周辺での降下対策については、落下速度とプール水深が落下魚の生存率に及ぼす影響を把握し、落下速度に応じた必要プール水深を明らかにした。

キーワード：サクラマス、産卵環境、越冬環境、降下対策

### 1. はじめに

河川の生態機能は河道条件などの様々な要因により規定され、複合的に生物の生息に影響を与える。特に、河川流況（流速、水深等）や河道状況（瀬、淵、河川の連続性等）は河川環境に大きな影響を及ぼすものであるが、河川の物理的要因と河川に生息する生物の生息要因との関連は未知なものが多い。

本研究では、これらの要因間の相互作用を明らかにするため、寒冷地を代表するサクラマスを指標生物とし、その物理的生息環境の評価手法を確立し、河川環境の創出・復元のための河道設計技術の開発を行う。また、溪流河川の堰堤工作物周辺については、河川の連続性が常時良好に確保されるべく出水時の魚道周辺の流況特性の解明や、水通しより降下する落下魚の生態に及ぼす影響について解明する。

産卵期、幼魚期、越冬期、の各生活期、成長度に応じたサクラマスの生息生育評価が可能となる手法を提案、開発するため、後志利別川水系において現地調査によるデータ収集、解析を実施する。また、降海・遡上期については、堰堤工作物の水通しより降下する場合において、落下速度が落下魚の生存率に及ぼす影響を把握するため現地実験を実施する。

## 2. サクラマスの産卵場と河床地形の関係

### 2.1 調査目的

サクラマスの産卵床と河床地形との関連性をみると、淵尻から瀬に移行する部分に産卵床の多くが分布することが報告されている<sup>1)</sup>。また、産卵床が高密度に分布する河川において、河川改修等で取り扱うスケール（例えば 20m 程度の範囲）で河道を区分

した場合には、周辺よりも勾配が緩い部分をサクラマスが産卵場所として選択的に利用する<sup>2) 3)</sup>。しかし、これらの研究において、良好な産卵環境を把握するために、河道をどの程度のスケールで区分し調査すべきかについては言及されていない。

本研究では、河川整備において、良好な産卵環境を把握・保全するための調査手法に関する知見を得ることを目的とし、産卵環境を調査する際の区分する調査スケールについて検討した。

### 2.2 研究手法

#### 2.2.1 調査地点概要

本研究で対象とした左股川および利別目名川(図-1)は、道南の一级水系後志利別川の支川であり、調査区間に河床勾配が大きく異なる部分をもつ(表-1)。また、左股川は、保護水面に指定されており、すべての水産動植物の採捕が禁止されている。

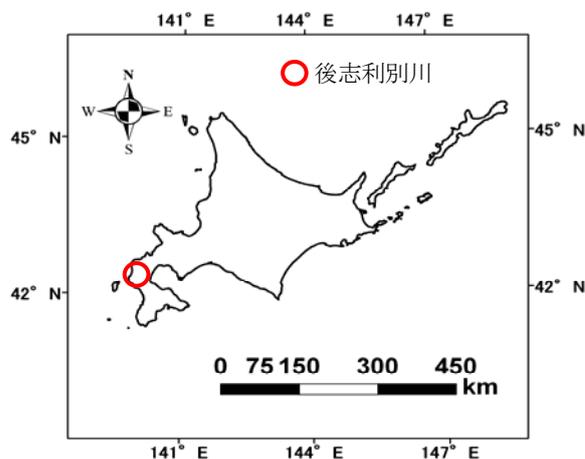


図-1 調査地点位置図

表-1 調査地点の特徴

	左股川 下流区間	左股川 上流区間	利別目名川 下流区間	利別目名川 上流区間
調査区間	200~550	550~1700	7000~7337.5	7337.5~7700
延長 (m)	350	1150	337.5	362.5
平均水面幅 (m)	9.6	10.8	10.0	10.0
平均河床勾配 (ia)	1/100	1/47	1/97	1/65

に、 $\alpha > 1/m$  のとき選択性があり、 $\alpha < 1/m$  のとき回避性があると判断される。

### 2.2.2 調査手法

急流の礫河川において淵、平瀬、早瀬の地形的区分は、川幅程度の縦断間隔データを用いることで概ね区分できることが知られている<sup>4) 5)</sup>。このことより、調査区間において、横断測量を 12.5m 毎に実施した(図-2)。さらに、調査区間に中心線を設定し(図-2)、横断測量線を左右岸均等に区分し方形区を設定した。また、方形区の横断測量線における平均水面幅(表-1 参照)以下の平均河床高さを算出した。結果については、河床勾配  $i$  で取りまとめた。

現地測量は、サクラマス産卵後にあたる 2008 年 10 月 2 日~10 月 30 日に実施した。また、産卵床調査は、サクラマスの産卵時期にあたる 2008 年 9 月 24 日~25 日に実施した。

### 2.2.3 分析手法

産卵床が多く分布する淵尻地形の特徴(図-3)を定量的に把握するにあたり、河道をどの程度で区分し調査すべきかについて検討する。このため、12.5m(ここでは川幅程度)毎の各方形区の河床勾配  $i$  と産卵場所との関係を整理した(図-2)。次に、12.5m 毎の横断測量線を 1 測線とばして 25m(ここでは一般的な河川改修で取り扱うスケール)毎とし、各方形区の河床勾配  $i$  と産卵場所との関係を整理した(図-4)。また、各調査河川の下流区間と上流区間では平均河床勾配  $ia$  が大きく異なる(表-1)。このため、相対河床勾配  $i/ia$  を用いて分析を行った。分析には、サクラマスが選択的にその環境を利用しているかどうかを調べるため Manly の選択性指数を用いた。この指数は、生息場所の頻度分布に対する選択性などの分析に一般的に用いられ次式で示される。

$$\alpha_i = (r_i / n_i) / \sum_{i=1}^m (r_i / n_i), \quad i = 1, \dots, m$$

ここで、 $\alpha_i$  は階級  $i$  に対する選択性指数、 $r_i$  は階級  $i$  に属する産卵床数が全ての地点で確認された産卵床数に占める割合、 $n_i$  は階級  $i$  に属する調査箇所数が全調査箇所数占める割合を示している。一般的

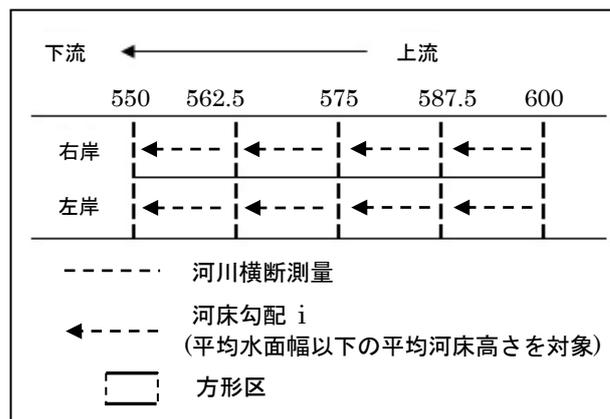


図-2 現地調査および分析手法



図-3 淵尻部分の産卵床

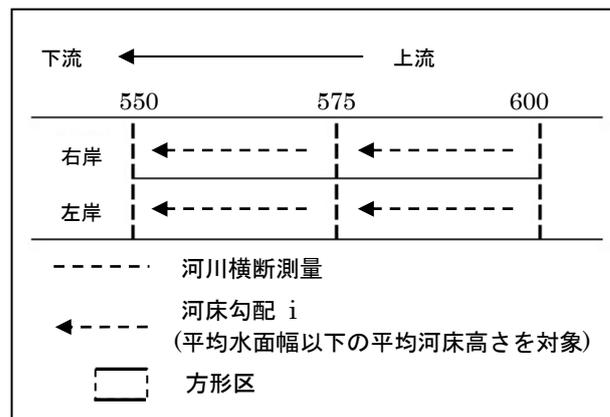


図-4 区分するスケールが異なる分析手法

2.3 調査結果

産卵床調査の結果、左股川では産卵床が 30 床確認され、産卵床分布密度は、利別目名川における産卵床分布密度に比べ約 1.8 倍の高い値を示した (図-5)。このことから、左股川は産卵床が高密度に分布する河川であり、利別目名川は、産卵床の分布密度があまり高くない一般的な河川といえる。

左股川において区分するスケールが 12.5m の場合、確認された産卵床 (30 床) のうち、 $i/ia < 1.0$  の階級に産卵床の約 93% (28 床) が集中した (表-2a)。選択性指数で整理すると、 $i/ia < 1.0$  の階級で選択性が示された (図-6 a)。また、区分する調査スケールが 25m の場合においてもほぼ同様の結果が得られた (表-2b, 図-6b)。

利別目名川において区分するスケールが 12.5m の場合、確認された産卵床 (7 床) のうち、 $i/ia < 1.0$  の階級に産卵床の約 71% (5 床) が集中した (表-3a)。選択性指数で整理すると、 $i/ia < 1.0$  の階級で選択性が示された (図-7a)。一方、区分するスケールが 25m の場合においては、 $i/ia < 1.0$  の階級に産卵床の約 71% (5 床) が集中するものの (表-3b)、選択性指数で整理すると、 $i/ia < 1.0$  の階級の一部で選択性が示されなかった (図-7b)。

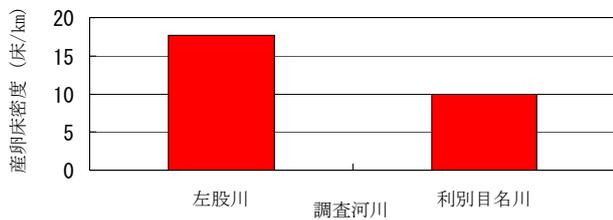
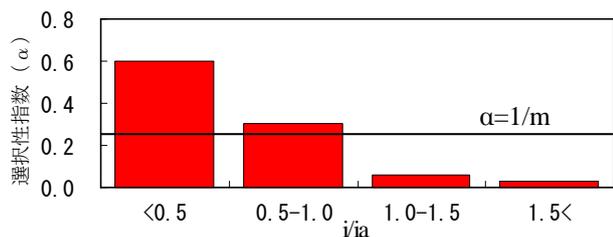
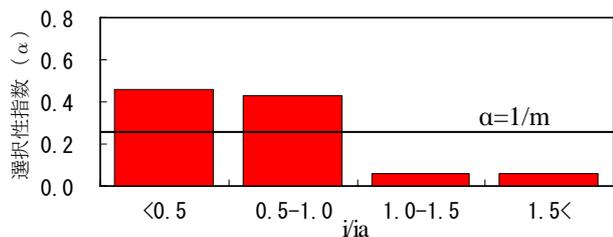


図-5 調査河川における産卵床分布密度



a) 区分するスケールが 12.5m の場合



b) 区分するスケールが 25m の場合

図-6  $i/ia$  産卵床の選択性指数 (左股川)

表-2 左股川における階級別の産卵床出現頻度

a) 区分するスケールが 12.5m の場合

階級 ( $i/ia$ )	調査箇所数 (箇所)	調査箇所数の比率	産卵床数 (床)
<0.5	88	2.4	23
0.5-1.0	38	1	5
1.0-1.5	37	1	1
1.5<	77	2.1	1

b) 区分するスケールが 25m の場合

階級 ( $i/ia$ )	調査箇所数 (箇所)	調査箇所数の比率	産卵床数 (床)
<0.5	35	1.8	15
0.5-1.0	30	1.6	12
1.0-1.5	19	1	1
1.5<	36	1.9	2

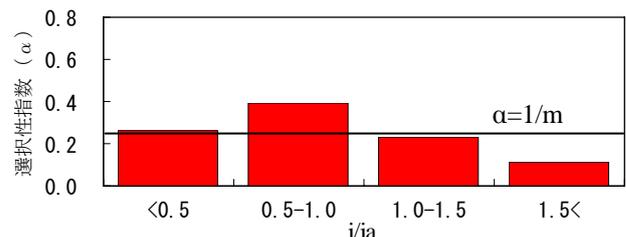
表-3 利別目名川における階級別の産卵床出現頻度

a) 区分するスケールが 12.5m の場合

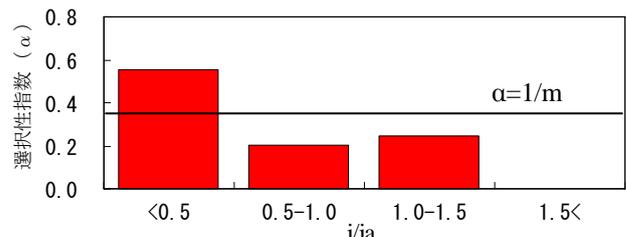
階級 ( $i/ia$ )	調査箇所数 (箇所)	調査箇所数の比率	産卵床数 (床)
<0.5	43	2.7	3
0.5-1.0	19	1.2	2
1.0-1.5	16	1	1
1.5<	34	2.1	1

b) 区分するスケールが 25m の場合

階級 ( $i/ia$ )	調査箇所数 (箇所)	調査箇所数の比率	産卵床数 (床)
<0.5	16	1.5	4
0.5-1.0	11	1	1
1.0-1.5	18	1.6	2
1.5<	11	1	0



a) 区分するスケールが 12.5m の場合



b) 区分するスケールが 25m の場合

図-7  $i/ia$  産卵床の選択性指数 (利別目名川)

## 2.4 考察

区分するスケールを 12.5m とした場合、左股川および利別目名川において、産卵床の大部分が  $i/ia < 1.0$  の階級に集中し（表-2a, 表-3a）、選択性指数で整理すると  $i/ia < 1.0$  の階級で選択性が示された（図-6a, 図-7a）。この結果は、周辺よりも勾配が緩い場所を産卵場所として利用していることを示している。また、こうした場所は淵尻地形に多く見られ、既存の知見とも一致することが確認された<sup>4)</sup>。一方、区分するスケールが 25m の場合、左股川および利別目名川において、 $i/ia < 0.5$  の階級の調査箇所数の比率の値は（表-2b, 表-3b）、区分するスケールが 12.5m の場合（表-2a, 表-3a）に比べ大きく減少した。さらに、利別目名川において、 $i/ia < 1.0$  の階級の一部では選択性が示されなかった（図-7b）。これは区分するスケールが適切でないためや調査区間において産卵床数が少ないためであると考えられる。

## 2.5 まとめ

本研究で得られた主な結果を以下にまとめる。

- (1) 河道を川幅程度（本研究では12.5m）で区分した場合、産卵床が高密度に分布する河川（左股川）や、産卵床の分布密度があまり高くはない一般的な河川（利別目名川）において、 $i/ia < 1.0$ の階級で選択性が示された。この結果は、周辺よりも勾配が緩い場所を産卵場所として利用していることを示している。また、こうした場所は淵尻地形に多く見られ、既存の知見とも一致する。
- (2) 河道を一般的な河川改修で取り扱うスケール（本研究では25m）で区分した場合、産卵床が高密度に分布する河川（左股川）においては、 $i/ia < 1.0$ の階級で選択性が示された。しかしながら、産卵床の分布密度があまり高くはない一般的な河川（利別目名川）において、 $i/ia < 1.0$ の階級の一部で選択性が示されなかった。

## 3. 越冬期のサクラマスが生息に及ぼす巨礫設置の効果

### 3.1 調査目的

近年、河川環境への関心の高まりから魚がすみやすい川づくりが進められている。このような状況で、平成 17 年には、「魚がのぼりやすい川づくりの手引き：国土交通省」が公表された。これによると、魚がすみやすい川づくりを進める上で、魚の生活史（例えば越冬期）に応じてどのような場が必要なのかを把握することが重要であると示されている。サクラマスは、積雪寒冷地域の北海道を代表する希少な魚種で、産卵のために河川渓流域に遡上する。また、孵化後 1 年以上河川で生活するため河川への依存度

が高く、特に生残率の低下する越冬期の生息場の保全・創出が重要となる。

これまで、サクラマスの越冬場については、数多くの研究が行われてきた。例えば、河川地形に着目した場合、河川渓流域の上流部では、点在する巨石の背後がサクラマスの越冬場となるが、河川渓流域の下流部では、巨石が点在しないため越冬場が少なくなる<sup>6)</sup>。一方、サクラマスの越冬場は、時期により多様に変化するため詳細に検討することが望まれている<sup>7)</sup>。

本研究では、このような実情を踏まえ、巨礫材（礫径 256mm 以上）を用いて越冬場を創出し、その効果を検証するとともに、調査時期の違いによるサクラマスの応答について検討した。

### 3.2 調査方法

現地調査は、後志利別川水系メップ川の支川である左股川で実施した（図-1）。調査区間は、左股川の下流域にあたるメップ川の合流点から上流 500m 区間内の 75m 区間 2 箇所とし、護岸工が施工されている調査区間（100～175）を護岸区間、倒木や植生が水中に沈んでいる箇所が複数見られる調査区間（275～350）を自然区間とした。

河川物理環境に着目した場合、越冬場の特徴は、水深 30cm 以上で河岸部の流速が遅いことである<sup>8)</sup>。このことより、現地巨礫材を複数組み合わせ合わせた高さ 30cm 以上の巨礫構造物（図-8）を護岸区間および自然区間の河岸部に各 2 箇所設置した。設置時期は、サクラマスの越冬前にあたる 2008 年 11 月 14 日である。

各調査区間での採捕調査は、サクラマスの越冬時期にあたる 2008 年 12 月 9 日および 2009 年 1 月 30 日に実施した。

### 3.3 結果・考察

巨礫構造物設置後に実施した採捕調査の結果を整理する（図-9）。自然区間の越冬場では、1 月調査で確認されたサクラマスの生息量は、12 月調査で確認された生息量に比べ小さい値であった。このことは、新たに発生した倒木による流速の増加箇所や、積雪重量により河床まで水没した植生が 12 月時点で観測された越冬場を消失させたためである（図-10, 11）。一方、護岸区間の巨礫構造物以外の越冬場では、1 月調査で確認されたサクラマスの生息量は、12 月調査で確認された生息量に比べ小さい値であったのに対し、巨礫構造物の越冬場では、1 月調査で確認されたサクラマスの生息量は、12 月調査で確認された生息量の 2.8 倍であった。このことは、自然区間において 12 月に観測された越冬場が消失したことにより、サクラマスが下流の護岸区間の巨礫構造物に移動したためであると考えられる。

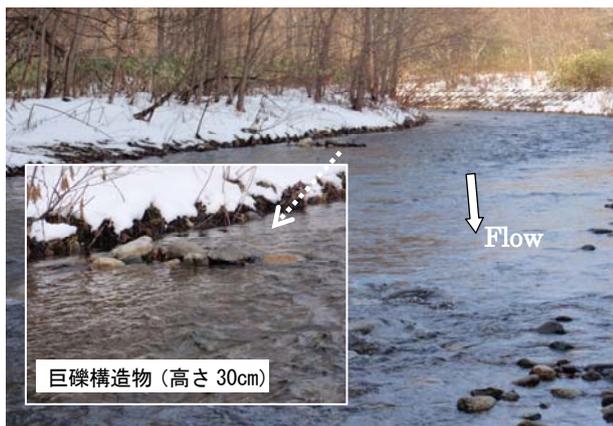


図-8 設置した巨礫構造物 (護岸区間)

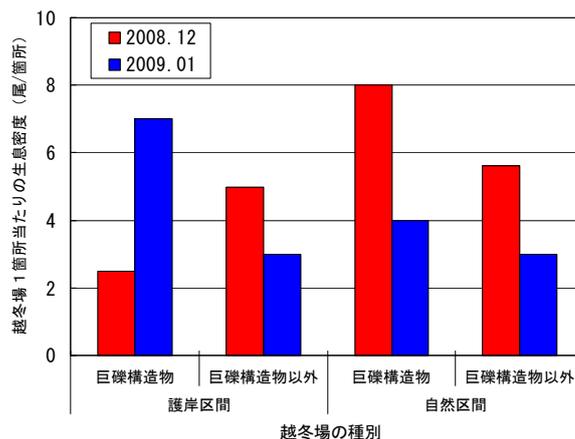


図-9 サクラマスが生息密度



図-10 調査時の状況 (倒木の背後や植生が水中に沈んだ箇所が越冬場として利用 自然区間)



図-11 調査時の状況 (新たな倒木により流速が増加・積雪重量により植生が大きく水没 自然区間)

### 3.4 まとめ

現地巨礫材を複数組み合わせさせた巨礫構造物を河岸部に設置し、巨礫構造物設置後に実施した採捕調査の結果について検討した。本研究で得られた結果は以下である。

護岸区間の巨礫構造物以外の越冬場では、2009年1月調査で確認されたサクラマスの生息量は、2008年12月調査で確認された生息量に比べ小さい値であるのに対し、巨礫構造物の越冬場では、2009年1月調査で確認されたサクラマスの生息量は、2008年12月調査で確認された生息量の2.8倍であった。今回設置した巨礫構造物は、自然区間での良好な越冬場の創出については検討の余地が残されているものの、護岸区間ではサクラマスが良好に生息できる越冬場を創出したと考える。

このことより、積雪寒冷地域における越冬場の保全・創出を考える場合、河川工事で発生する巨礫は河道外に持ち出さず、河岸部に組み合わせて配置することで河川工事の影響を緩和できると考えられる。

## 4. 堰堤工作物がサクラマスの降下環境に及ぼす影響

### 4.1 調査目的

河川流域におけるサクラマスの降下の実態としては、堰堤工作物がある場合、水通し部より降下するのが大部分であるが、堰堤工作物に設置される魚道的设计において落下対策については検討されていない<sup>9)</sup>。また、魚道の機能を考える場合、遡上ばかりではなく降下魚への対応についても重要であると指摘しており<sup>10)</sup>、降下魚に対する適切な対応が望まれている。

本研究では、サクラマスのスモルトを実験魚とし、積雪寒冷地域の河川流域における堰堤工作物周辺での良好な降下環境について把握することを目的に、現地実験によりプール水深、落下速度の違いがサクラマスの生態に及ぼす影響について検討した。さらに、現地実験の結果から特徴的なケースを抽出し、模型実験により落下高さ、落下速度をほぼ等しく再現し、プール内の状態についても検討を加える。

### 4.2 現地実験手法

#### 4.2.1 実験魚

実験魚は、北海道の道北地域の一级水系天塩川流域で飼育されたサクラマスのスモルトを用いた。また、スモルトまで飼育した場合の尾叉長は 12cm～15cm 程度となる<sup>11)</sup>。この特徴を考慮し、尾叉長 15cm 以下のものを実験魚として用いた。

#### 4.2.2 実験手法

現地実験フローを示す(図-12)。落下が実験魚の生態に及ぼす影響としては、水面および水叩きへの衝突による物理的な損傷、落下の衝撃を受けた後の病原細菌による二次的な損傷等が考えられる<sup>12)</sup>。このため、現地実験については実験魚落下後に飼育観察を 14 日間実施した。

また、比較対照用として現地実験を実施しない非落下魚についても同一条件下で飼育観察を 14 日間実施した。

実験設備は、3.0m×3.0m の仮設プールを設置し、高所作業車を用いて実施した(図-13)。現地実験場所は、輸送等による実験魚へのストレスを排除するため飼育施設近郊の岩尾内ダム下流広場で実施した。現地実験場所から飼育場所までの距離は約 2.0km 程度である。現地実験の時期は、実験魚がスモルト化する時期にあたる 2008 年 6 月中旬に実施した。

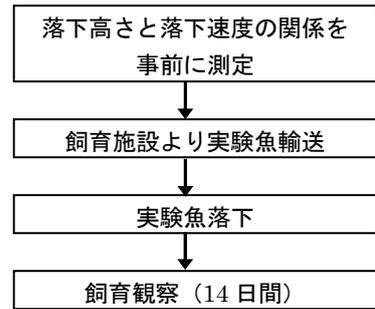


図-12 現地実験フロー図



図-13 現地実験の様子

#### 4.2.3 落下速度の測定

落下速度の測定は、比重 1.0g/cm<sup>3</sup>、長さ 15cm、幅 2cm、厚さ 1cm のポリプロピレン製の板をトレーサーとして用い、実験条件(表-4)の落下高さ毎にそれぞれ 5 回実施した。また、落下速度の算出については、ビデオカメラ (SONY DCR-HC90) を用いてそれぞれ 2 方向より撮影し 1/30 秒ごとに判読・補正することにより算出した(図-14)。

表-4 現地実験の条件

プール水深 (m)	落下高さ (m)
0.4	3.0
0.7	5.0
1.0	10.0
	15.0
	20.0
	25.0

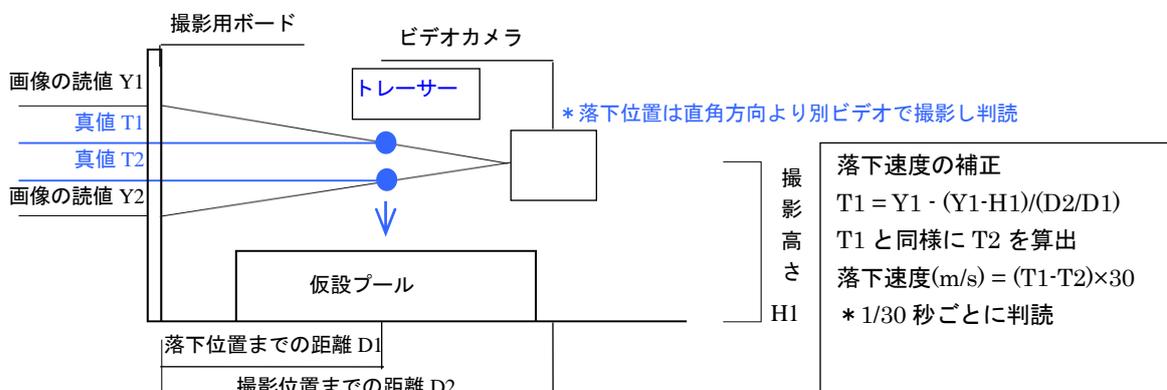


図-14 落下速度測定概略図

#### 4.2.4 実験魚落下および飼育観察

実験魚落下は、プール水深 3 ケース、落下高さ 6 ケースをそれぞれ組み合わせた合計 18 ケースで実施した(表-4)。実験魚の採捕、輸送および飼育観察は、仮設プールに落下したのものについてのみ実施し、仮設プール外に落下したのものについては飼育観察の対象外とした。飼育観察は、養魚施設の水槽(3.2m×1.6m)を2槽使用し実施した。

飼育観察の項目は、水温、遊泳状態、外観の変化について実施した。

#### 4.3 現地実験結果および考察

##### 4.3.1 落下速度の測定

落下高さと落下速度の関係を整理し(図-15)、その結果を、3m≦落下高さ≦25mの範囲(本実験の範囲)内において2次式で近似し、算出した落下高さごとの落下速度を整理する(表-5)。落下高さが15m程度以上になると落下速度は限界速度に達し、落下高さが増加しても落下速度はほとんど変化しない。このときの限界速度は16m/s程度であり(図-15)、本実験の範囲でこのような状態が確認される。これは既往の文献<sup>13)</sup>で整理されている魚が自由落下する場合の限界速度とほぼ等しく、落下高さに対応する落下速度は、魚が自由落下する場合の落下速度を再現していると考えられる。

##### 4.3.2 実験魚落下および飼育観察

落下尾数と飼育尾数の関係および実験魚の死亡率の推移を整理した(図-16, 17)。

落下尾数と飼育尾数の関係(図-16)については、実験魚へのストレスを減らすため接触を極力控え養魚場内で素早く採捕したため一定ではない。また、落下高さが高い場合(20m, 25m)については仮設プール内への落下が減少することを考慮し、他のケースと比較し落下尾数を増加させた。しかしながら、想定していた以上に仮設プール内に落下したため飼育尾数が増加した。

実験魚の死亡率の推移(図-17)については、各飼育日における実験魚の尾数をN1、各飼育日に死亡した実験魚の尾数をN2として、実験魚の死亡の推移をN2/N1で示したものである。死亡の推移の特徴としては、飼育後1日目までと飼育後6~13日目までに死亡が集中している。飼育後1日目までは外観の変化はほとんどなく、落下による直接的な衝撃により死亡したと考えられる。

##### 4.3.3 落下速度・プール水深の違いが実験魚に及ぼす影響

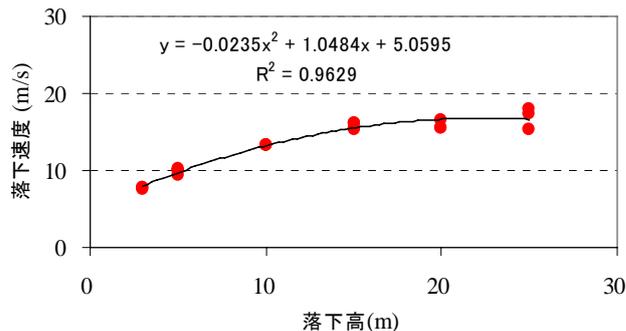
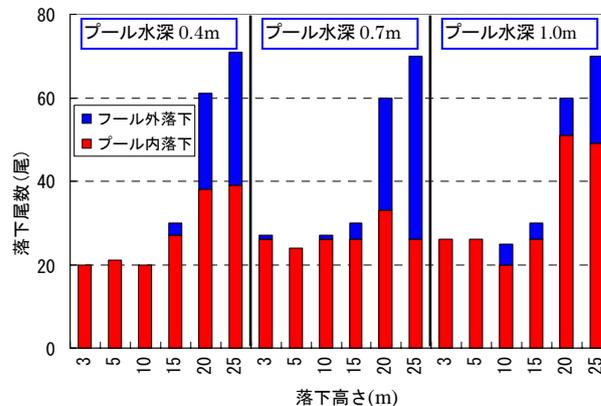


図-15 落下高さと落下速度の関係

表-5 図-15に示される回帰式より求めた落下速度

落下高さ	m	3	5	10	15	20	25
落下速度	m/s	8.0	9.7	13.2	15.5	16.6	16.6



○飼育尾数=プール内落下  
○落下尾数=プール内落下+プール外落下

図-16 落下尾数と飼育尾数の関係



図-17 飼育日数と死亡率の推移

非落下魚の生存率をPh、各ケースにおける実験魚の生存率(表-6参照)をPsとし、Ps/Phを落下速度、プール水深の関係で整理した(図-18)。また、非落下

魚における生存率と各ケースにおける生存率を Pearson のカイ 2 乗の手法により検定した結果を整理した (表-6)。

落下速度が 10m/s 程度以下の場合、プール水深を 0.4m 以上とすることで他のケースと比較して Ps/Ph の値が大きく、非落下魚の生存率と比較して有意差は生じない ( $p>0.05$ )。これは落下速度に対してプール水深が十分に確保されているために生じていると考えられる。

次に、落下速度が 15m/s 程度以上の場合、プール水深が 1.0m の場合とプール水深が 0.7m 以下の場合を比較すると Ps/Ph の値が大きく異なる。また、非落下魚の生存率に対する有意差で比較するとプール水深が 1.0m の場合、有意差は生じない ( $p>0.05$ )。これはプール水深を 1.0m とすることで、落下速度に対してプール水深が十分に確保されているために生じていると考えられる。

#### 4.4 模型実験によるプール内の状態把握

##### 4.4.1 模型実験設備および手法

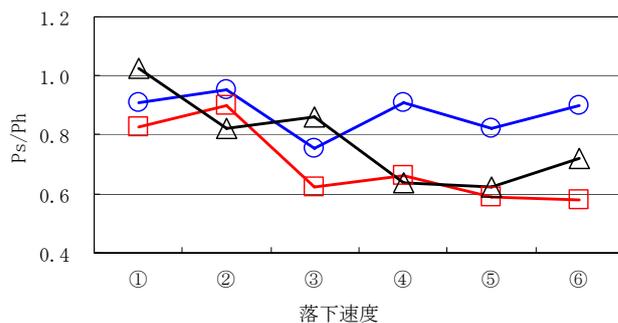
本章では、河床への衝突に着目し、落下速度とプール水深の変化により河床付近に接近する落下水脈の状態を定性的に把握するために実施した。なお、実験魚の比重は  $1.0\text{g/cm}^3$  であり、水と同程度であるため模型実験における落下水脈がプール内で河床に接近する状態は、現地実験における実験魚が仮設プール内で河床に接近する状態を概ね再現していると考えられる。

実験設備は、寒地土木研究所第 4 実験棟において高さ 2.5m の落差模型を製作した (図-19)。

模型実験手法は、現地実験から得られた落下高さ、落下速度を再現し実施した。落下速度の再現にあたっては、比重  $1.0\text{g/cm}^3$  の蛍光体のトレーサーを用いて判読した。現地実験における落下水脈の状態 (図-20) については、模型実験における落下水脈が背面に付着しない最低の越流水深 3cm とすることで再現した (図-19)。

##### 4.4.2 模型実験の条件

模型実験の条件 (表-7) は、現地実験により把握された生存率が高く非落下魚の生存率に対し、有意差が生じない落下速度 9.7m/s、プール水深 0.4m の場合、落下速度 15.5m/s、プール水深 1.0m の場合、生存率が低く非落下魚の生存率に対し、有意差が生じた落下速度 15.5m/s、プール水深 0.7m の場合で実施した。



① 8.0m/s(h= 3m) ② 9.7m/s(h= 5m) ③13.2m/s(h=10m)  
④15.5m/s(h=15m) ⑤16.6m/s(h=20m) ⑥16.6m/s(h=25m)  
△プール水深 H=0.4m □プール水深 H=0.7m ○プール水深 H=1.0m

図-18 落下速度・プール水深と実験魚の生存率

表-6 非落下魚の生存率に対する有意差検定

落下高さ m	落下速度 m/s	非落下魚に対する検定 プール水深=1.0m			非落下魚に対する検定 プール水深=0.7m			非落下魚に対する検定 プール水深=0.4m			
		飼育尾数 n	死亡尾数 n1	有意差 p	飼育尾数 n	死亡尾数 n1	有意差 p	飼育尾数 n	死亡尾数 n1	有意差 p	
非落下魚		14	1								
3	8.0	26	4	0.452	26	6	0.206	20	1	0.794	
5	9.7	26	3	0.658	24	4	0.402	21	5	0.200	
10	13.2	20	6	0.105	26	11	0.021	*	20	4	0.298
15	15.5	26	4	0.452	26	10	0.034	*	27	11	0.025
20	16.6	51	12	0.175	33	15	0.011	*	38	16	0.017
25	16.6	49	8	0.386	26	12	0.012	*	39	13	0.057

生存率については  $(n-n1)/n$  で算出される値とする

\*は非落下魚の生存率に対して有意差が生じたケース ( $p<0.05$ )

##### 4.4.3 実験結果および考察

現地実験において生存率が高く非落下魚の生存率に対し、有意差が生じない落下速度 9.7m/s、プール水深 0.4m のケース、落下速度 15.5m/s、プール水深 1.0m のケースをそれぞれ模型実験で再現し、プール内の状態を撮影した (図-21, 22)。その結果、両ケースにおける落下する水脈は、河床付近まで達しておらず、河床付近は安定した状態である。

次に、現地実験において生存率が低く非落下魚の生存率に対し、有意差が生じた落下速度 15.5m/s、プール水深 0.7m のケースを模型実験で再現し、プール内の状態を撮影した (図-23)。その結果、落下する水脈の一部は河床付近まで達しており、河床付近は不安定な状態である。

表-7 模型実験の条件と再現される値

現地実験			模型実験			模型実験が再現する値			備考
落下高さ m	落下速度 m/s	プール水深 m	落下高さ m	落下速度 m/s	プール水深 m	落下高さ m	落下速度 m/s	プール水深 m	
5	9.7	0.4	2.5	6.42	0.20	5	9.1	0.4	縮尺1/2
15	15.5	1.0	2.5	6.42	0.17	15	15.7	1.0	縮尺1/6
15	15.5	0.7	2.5	6.42	0.12	15	15.7	0.7	縮尺1/6

\* 模型実験の落下速度はフルード相似則を満足してい



図-19 落差模型の様



図-20 現地試験における落水水脈の状態



図-21 落水水脈は河床まで達しない  
落下速度 6.42m/s, プール水深 0.2m

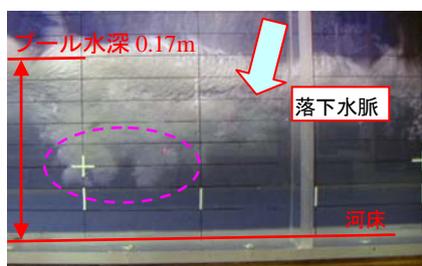


図-22 落水水脈は河床まで達しない  
落下速度 6.42m/s, プール水深 0.17m



図-23 落水水脈の一部が河床に達する  
落下速度 6.42m/s, プール水深 0.12m

#### 4.5 まとめ

サクラマス・スモルトを実験魚とし、現地実験によりプール水深、落下速度の違いがサクラマスの生態に及ぼす影響について検討した。さらに、現地実験の結果から特徴的なケースを抽出し、模型実験により落下高さ、落下速度をほぼ等しく再現し、プール内での流れの特徴についても検討を加えた。本研究で得られた主な結果を以下にまとめる。

- (1) 落下高さが 15m 程度以上になると落下速度は限界速度に達し、落下高さが増加しても落下速度はほとんど変化しない。このときの限界速度は 16m/s 程度であり、既往の文献で整理されている尾又長 15cm 以下の魚が自由落下する場合の限界速度とほぼ等しいことが確認された。
- (2) 落下速度が 10m/s 程度以下の場合、プール水深を 0.4m 以上とすることで他のケースと比較して実験魚の生存率の値は大きく、非落下魚の生存率と比較して有意差は生じない。これは落下速度に対してプール水深が十分に確保されているために生じていると考えられる。また、落下高さ・落下速度を再現した模型実験において、

落下の水脈が河床付近に達しないことをプール内の状態を撮影することにより定性的に明らかにした。

- (3) 落下速度が 15m/s 程度以上の場合、プール水深が 1.0m の場合とプール水深が 0.7m 以下の場合と比較すると、実験魚の生存率の値は大きく異なる。また、非落下魚の生存率に対する有意差で比較すると、プール水深が 1.0m の場合には有意差は生じない。これはプール水深を 1.0m とすることで、落下速度に対してプール水深が十分に確保されているために生じていると考えられる。また、落下高さ・落下速度を再現した模型実験において、プール水深が 1.0m の場合、プール水深が 0.7m の場合と比較して落下の水脈が河床付近に達しないことをプール内の状態を撮影することにより定性的に明らかにした。

今後はプール内における河床付近の流速の定量的な把握を進めていく。また、堰堤工作物に設置される魚道の設計において降下対策を考える場合は維持管理についても重要となる。このため、プール内への土砂堆積等の維持管理における検討についても実施する。

## 5. おわりに

本研究においては、寒冷地を代表するサクラマスを指標生物とし、その物理的生息環境の評価手法を確立し、河川環境の創出・復元のための河道設計技術の開発を目的としている。このためには、サクラマスの各生活期（産卵期、幼魚期、越冬期）に応じた物理的生息環境の評価手法を確立することが必要である。また、降海・遡上期については、河川横断工作物周辺においても河川の連続性が常時良好に確保されることが必要である。

本報告では、産卵期、越冬期、降海期に着目した現地調査および検討の結果を示した。本報告の主な知見は以下である。

産卵期における調査については、河道を川幅程度（本研究では12.5m）で区分した場合、産卵床が高密度に分布する河川（左股川）や、産卵床の分布密度があまり高くない一般的な河川（利別目名川）において、周辺よりも勾配が緩い場所を産卵場所として利用していることを定量的に示した。このことは、河川整備事業において、サクラマスの産卵環境を把握・保全するために有効な知見を提供するものと考えられる。

越冬期における調査については、越冬場の特徴を踏まえ、護岸区間において、現地巨礫材を複数組み合わせ合わせた巨礫構造物を設置した場合、この区間の生息密度が大きく増加することを確認した。このことより、積雪寒冷地域における越冬場の保全・創出を考える場合、河川工事で発生する巨礫は河道外に持ち出さず、河岸部に組み合わせ配置することにより河川工事の影響を緩和できると考えられる。

降海期における調査については、現地実験によりプール水深、落下速度の違いがサクラマスの生態に及ぼす影響について明らかにした。また、模型実験により、この原因の一因が河床への衝突であることを示し、この影響を軽減するための必要プール水深を明らかにした。このことは、河川渓流域における堰堤工作物周辺での良好な降下環境を創出するために有効な知見を提供するものと考えられる。

## 参考文献

- 1) 杉若圭一, 竹内勝巳, 鈴木研一, 永田光博, 宮本真人, 川村洋司: 厚田川におけるサクラマス産卵床の分布と構造, 北海道水産孵化場研報, 53, pp.11-28, 1999
- 2) 森田茂雄, 新目竜一, 山下彰司: 溪流河川におけるサクラマスの産卵環境と河床地形, 第63回年次学術講演会講演概要集2-250, pp.499-500, 2007
- 3) 森田茂雄, 桑原誠, 山下彰司: 河床地形とサクラマスの産卵環境に関する研究, 年次技術研究発表会論文報告集, 65, B-16, 2009
- 4) 野上毅, 渡辺康玄, 長谷川和義: 急流河川における生息場としての河床地形区分, 水工学論文集, 第46巻, pp.1127-1132, 2002
- 5) 野上毅, 渡辺康玄: 急流河川におけるハビタットの定量区分, 北海道開発局技術研究発表会発表概要集第46回, pp.59-66, 2003
- 6) 森田茂雄, 桑原誠, 山下彰司, 山田孝治: 河川形態の違いによるサクラマスの越冬環境, 寒地土木研究所月報, 664, 2-9, 2008
- 7) 真山紘: サクラマスの淡水域の生活および資源培養に関する研究, 北海道さけ・ますふ化場研究報告, 46, pp.1-156, 1992
- 8) 山田孝治, 桑原誠, 森田茂雄: サクラマスの越冬場所の特徴と現地越冬場所創出試験, 北海道開発技術研究発表会, 52, 環-1, 2009
- 9) 今井貴, 四戸孝治: 最新魚道の設計—魚道と関連施設, 581 pages, (株) 信山社サイテック, (財) ダム水源地環境センター編集, 1998
- 10) 水野信彦: 魚の生態から見た魚道の見方, 応用生態工学, 3, pp.209-218, 2000
- 11) 真山紘: サクラマス生態ノート パート2, さけ・ます資源管理センター技術情報, 171, pp1-13, 2005
- 12) 土居隆秀, 中村智幸: 在来水産資源生態調査研究—イワナの堰堤落下試験（平成11年度）—, 栃木県水産試験場研究報告, 44, pp.73-75, 2001
- 13) C.Gosset, M.Larinier, J.P.Porcher, F.Travade (中村俊六, 東信行監修): 魚道及び降下対策の知識と設計, 財団法人リバーフロント整備センター, 1996

## DEVELOP TECHNIQUES FOR THE DESIGN OF RIVER CHANNELS THAT PROMOTE INHABITATION BY COLD-WATER FISHES

**Abstract:** With masu salmon acting as an index organism in cold regions, the development of a river channel design technique ideal for their natural reproduction requires the establishment of a method to evaluate their physical habitat according to living periods (spawning, juvenile and wintering et al). It is also necessary to secure the continuity of favorable river conditions near river-crossing structures during periods of marine migration and of returning to rivers.

In the spawning environment, the relationship between masu salmon spawning beds and bed morphology was clarified in an on-site investigation. In the wintering environment, the conditions of wintering habitat in different sections of river morphology were ascertained in an on-site investigation. In the descending environment, the influence of the differences in pool depth and falling speed on the ecology of the masu salmon was clarified in an on-site experiment.

Key words: masu salmon, spawning environment, wintering environment, descending environment.