

15.2 冷水性魚類の自然再生産のための良好な河道設計技術の開発

研究予算：運営費交付金

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、浜本 聡、桑原 誠、矢部浩規、森田茂雄、林田寿文、
矢野雅昭、平野正則、石谷隆始、畠秀樹、渋谷直生、野村栄正、
加藤道生、稲垣達弘、牧野昌史

【要旨】

本研究は、寒冷地に生息する冷水性魚類のサクラマスを対象とし、その物理的生息環境の評価手法の確立及び河川環境の創出、復元のための河道設計技術を確立することを目的とし、産卵環境、越冬環境、堰堤工作物周辺の河川の連続性に着目して検討を行った。産卵環境、越冬環境について現地調査を行い、産卵床が平均河床勾配に対して局所的に緩やかな箇所、砂州地形に多く分布していることを確認した。また、越冬環境として、流速が遅く水深が深い箇所の生息密度が高く、下流域では倒木が、中・上流域では巨礫の周辺が主に利用されていることを確認した。さらに、越冬環境が乏しい箇所に巨礫を設置する試験を行い、その有効性を確認した。堰堤工作物周辺の河川の連続性について、堰堤上流魚道入口の堆砂に着目し、水制工設置による堆砂防止効果を模型実験により確認した。その結果、魚道の上流入口幅の 1.5 倍の距離に水制工を設置した場合、魚道上流入口に土砂が堆積しないことを明らかにした。また、堰堤落下による魚体の損傷に着目し、堰堤を模した落差からサクラマスのスマルトを落下させる実験を行い、魚体への影響が少ない落差と下流プール水深の関係を明らかにした。

キーワード：サクラマス、産卵環境、越冬環境、水制工、河川の連続性

1. はじめに

寒冷地に生息するサケ科魚類のサクラマスは、回遊性のサケ科魚類であり、その中でも河川内で過す期間が長い種である。また、サクラマスは、サケに比べ高脂肪であることや、生鮮サケ・マスの品薄な春期に沿岸漁獲の対象となるため市場価格が高く、重要な漁業資源の一つでもある。サクラマスが河川内で過す期間は、産卵床の砂礫中で卵期および仔魚期として 6-8 ヶ月間、浮上からスマルトとして降海するまでの遊泳生活期間が約 12 ヶ月、そして親魚回帰時の河川遡上から産卵までが 3-5 ヶ月間と、通常 3 年間の生涯のうちの約 2 年を淡水域で過し、河川環境との関わりがきわめて強い¹⁾。また、サクラマスの産卵親魚は、生まれた稚魚がなるべく広く降下・分散し、河川の生産力を効率よく利用できるように、主に河川の源流域で産卵する¹⁾。このため、河川が連続性を有し、良好な環境であることを必要とし、サクラマスが健全に生息できる河川であることは、良好な河川環境を有している一つの指標であると考えられる。また、漁業資源の側面からは、サクラマスの資源維持培養には、稚魚、スマルト放流だけでなく、河川内での天然繁殖保護を組み合わせる必要がある¹⁾。

しかし、河川改修などがサクラマスの減少の原因と

なっていることも指摘されており²⁾、サクラマスの健全な生息を可能とする河川改修のあり方が望まれる。

本研究では、サクラマスを対象とし、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ことを目的とするものである。なお、本研究においては、サクラマスにとって重要な河川環境として、①産卵環境、②越冬環境、③堰堤上下流での河川の連続性、に着目した。①産卵環境が良好であることは、個体群を健全に保つために必要不可欠である。②越冬環境については、越冬期間のサクラマス幼魚の生存率は、既往研究によると 52%¹⁾、9～17%³⁾と推定されており、越冬期間を生き延びることの困難さが示唆され、越冬環境の重要性が伺える。しかし一方で、この越冬環境は減少しつつあるとの指摘もあり⁴⁾、この保全・創出は、サクラマスの個体群を健全に保つために重要である。③堰堤上下流での河川の連続性については、サクラマスが源流域の産卵床として良好な箇所まで遡上するのに必要である。また、稚魚、スマルトが河川下流域に移動する際や、海に降海する際に、堰堤からの落下による、魚体への損傷が最小限であることも重要である。

本稿では、これらの点に着目した研究成果について、個々に述べていく。

2. サクラマス産卵環境

河川生態学において、河床地形と底生生物や魚類との関係は古くから調査されており、生物の生活史において、河床地形は大きな影響を及ぼすことが知られている⁵⁾。このことより、サクラマスの生活史に関わる既往研究についても河床地形と関連し多くの研究が行われてきた。例えば、生育期に関しては、蛇行区と直線区を比較した場合、蛇行区においては縦横断的に地形が変化することにより魚の餌となる水生昆虫やサクラマスの生息量が増加することが知られている⁶⁾。

一方、産卵期に関しては、粒径 2mm 通過質量百分率が 20%以下の場所を、サクラマスが産卵場所として選択的に利用することや^{7) 8)}、視覚的に見た淵尻地形の部分に産卵床が多く分布することが知られている⁹⁾。また、このような地形は川幅程度で区分した河道区間長を用いることで把握できることが報告されている¹⁰⁾¹¹⁾。しかしながら、河道内において、異なる河川地形に対応した河床の形状や河床材料がサクラマスの産卵床形成にどのような影響を与えるのかについては知見が不足している。

本研究においては、このような実情を踏まえ、良好な産卵環境を保全・創出するための河川整備手法に関する知見を得ることを目的に、河川の自律作用によって形成される砂州地形を対象とし、異なる河川地形におけるサクラマスの産卵床形成について整理したうえで、産卵環境に影響を及ぼす地形的制限要因について検討した。さらに、上記の検討結果を踏まえ、良好な産卵環境を保全創出するための河川整備手法について考察を加えた。

2. 1 研究手法

2. 1. 1 調査河川

本研究の目的は良好な産卵環境を保全・創出するための河川整備手法に関する知見を得ることである。そこで、河川整備とサクラマスの産卵床が重複しやすい溪流河川の下流域を調査対象とした。

調査は、道南の後志利別川水系の2つの支川で行った(図-1)。左股川は、後志利別川水系の2次支川であり、保護水面に指定されすべての水産動植物の採捕が禁止されている。このため、サクラマスの産卵床が高密度に分布する河川である。調査区間は、後志利別川水系の1次支川であるメップ川との合流点上流200mを起点とし、区間延長350m、河床勾配1/91であり、河床の状態は浮き石の出現頻度が高い(表-1)。利別目名川は、後志利別川水系の1次支川であり、後志利別川との合流点より上流約7kmに頭首工が建設されている

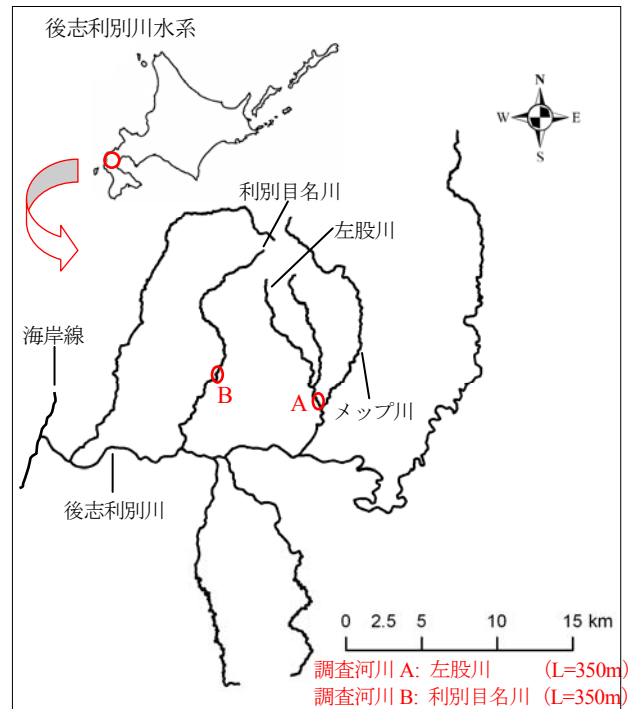


図-1 調査地点位置図

が魚道が整備されているためサクラマスの遡上は毎年確認されている。調査区間は、この頭首工の上流 200m を起点とし、区間延長 350m、河床勾配 1/128 であり、河床の状態は沈み石の出現頻度が高い(表-1)。

2. 1. 2 調査手法

良好なサクラマスの産卵環境を保全・創出するにあたっては、河川における空間スケールの区分が重要となる。河川の生物生息場を把握する調査技術としては、瀬や淵などの流路単位スケールおよび流路単位スケールが複数含まれるリーチスケールにおいて物理環境を調査する手法が試みられている^{12) 13)}。また、急流の礫河川における瀬淵構造などの地形的特長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^{14) 15)}。本研究では、急流の礫河川において瀬や淵などの流路単位スケールを川幅程度、流路単位スケールが複数含まれるリーチスケールを砂州地形および非砂州地形と捉えて調査する(図-2、写真-1)。

調査区間において、横断測量を川幅程度の 12.5m 毎に実施した。さらに、調査区間に中心線を設定し、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、12.5m 毎の横断測線と中心線によって区分された方形区の代表 1 地点および産卵床確認地点において河床材料調査を実施した(図-2)。サクラマスの産卵床の深さは最大で約 15cm 程度であり、これを構成する河床材料は大部分が粒径 75mm 以下である^{7) 8)}。また、粒径 2mm 以下の河床材料の割合が低いことが産卵に

表-1 調査地点概要

調査河川	左股川				利別目名川			
調査区間累計延長 (m)	350				350			
調査区間の河床勾配	1/91				1/128			
河床の状態	浮き石状態				沈み石状態			
平均河床勾配 i_a	1/83		1/105		1/100		1/182	
砂州の区分	固定砂州	非砂州地	交互砂州	非砂州地	固定砂州	非砂州地	交互砂州	非砂州地
調査地点	H1	H3	H2	H4	T1	T3	T2	T4
調査区間 (起点からの距離:m)	287.5-362.5	200-275	462.5-562.5	362.5-462.5	200-287.5	287.5-362.5	362.5-450	450-550
調査地点延長	75	75	100	100	87.5	75	87.5	100
川幅 (m)	7	5	15	7	7	8	18	8

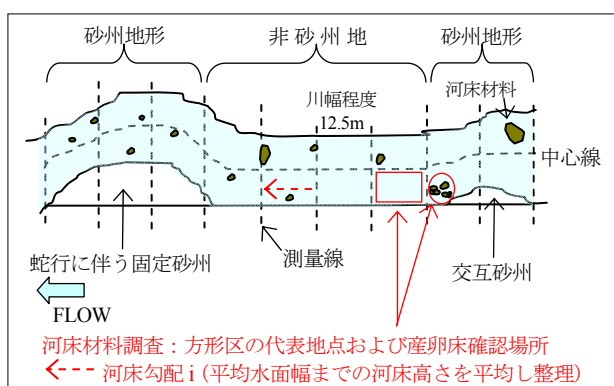


図-2 調査手法概略図



写真-1 調査地点の様子
固定砂州が形成されている調査地点 (H1 地点)

とって重要である⁷⁾⁸⁾。このことより、河床材料の採取は目合い 345 μ m、口径 25cm \times 25cm のサーバーサンプラーを用い、深さ 15cm までで実施し、採取に際しては粒径 75mm 以上のものは除外した。

現地測量および河床材料採取は、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、サクラマス産卵時期にあたる 2008 年 9 月 24 日～25 日に実施した。

2. 1. 3 研究手順

はじめに、河川地形の変化がサクラマスの産卵環境

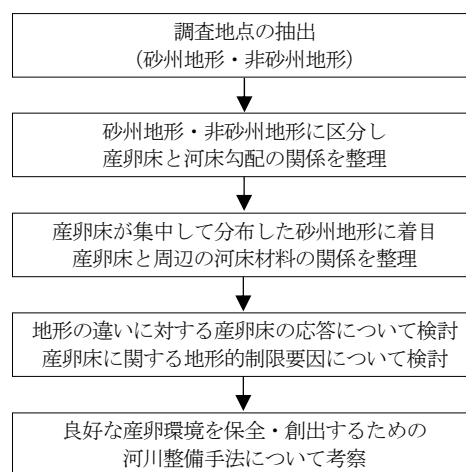


図-3 研究手順

に与える影響を把握するにあたり、砂州地形と非砂州地形を抽出し、それぞれの地形において河床勾配と産卵床の関係を整理する(図-3)。次に、上記の結果において産卵床が集中した砂州地形を対象とし、産卵床とその周辺の河床材料について整理する(図-3)。

以上の結果を踏まえ、地形の違いに対する産卵床の応答や産卵床形成に関する地形的制限要因について検討し、良好な産卵環境を保全・創出するための河川整備手法について考察する。

2. 1. 4 分析手法

サクラマスが産卵場所として選択的に利用する場所の河床勾配は、その周辺の河床勾配と対比することにより概ね把握でき、その場所は平均河床勾配より緩い場所であることが知られている¹¹⁾。このため、12.5m 毎の各方形区における河床勾配 i を算出し、各調査河川における平均河床勾配 i_a (表-1 参照) と対比した相対河床勾配 i/i_a を用い、確認された産卵床を砂州地形と非砂州地形に区分して分析した。なお、各方形区における河床勾配 i については、調査区間の平均水面幅を各測量線(図-2)から求め、方形区の上流の測量線



写真-2 確認された産卵床の様子
(周辺でサクラマス親魚も確認)

における平均水面幅までの河床高さを左右岸ごとに平均し整理することにより算出した (図-2)。

分析は、サクラマスが選択的にその環境を利用し産卵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や動物の餌資源に対する選択性などの分析に一般的に用いられ、利用可能な環境の頻度の割合に対して実際に利用した環境の比率からその環境に対する選択性を算出するものであり(1)式で示される。

$$\alpha_n = (S_n / R_n) / \sum_{n=1}^m (S_n / R_n) \quad n=1,2 \dots m \quad (1)$$

ここで、 α_n は階級 n (ここでは i/i_a) に対する選択性指数、 R_n は階級 n 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、 S_n は階級 n に属する調査箇所数が全調査箇所数に占める割合、 m は産卵床が確認された階級数 (ここでは $m=4$ 、図-4 参照) を示している。一般的に、 $\alpha > 1/m$ 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。

次に、産卵床地点の河床材料は、礫分 (礫径 2.0mm 以上) の占める割合が高いことで知られることから⁷⁾⁸⁾、上記の分析においてサクラマスの産卵床が集中して分布した砂州地形を対象に、礫分の質量百分率を算出し、これを用いて産卵床との関係について分析した。

2. 2 調査結果

2. 2. 1 河床勾配とサクラマスの産卵床との関係

産卵床調査の結果、左股川および利別目名川でそれぞれ 7 床と 6 床の産卵床が確認された (写真-2)。

全体の産卵床を砂州地形と非砂州地形に区分し i/i_a で整理した。砂州地形において確認された産卵床 (12 床) のうち、 $i/i_a < 1.0$ の階級に産卵床の約 83% (10 床) が集中した (図-4)。選択性指数で整理すると、 $i/i_a < 1.0$

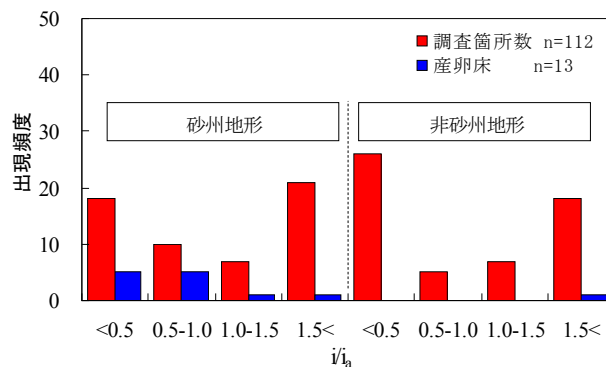


図-4 階級別産卵床出現頻度

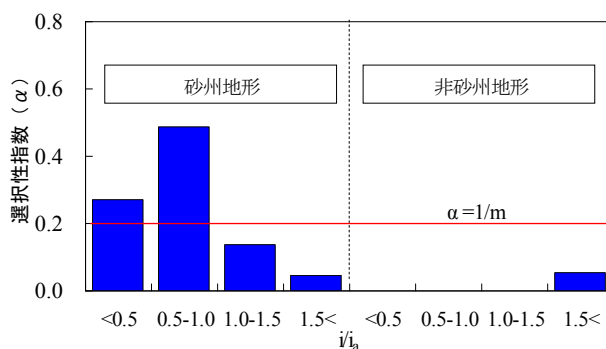


図-5 産卵床の選択性指数

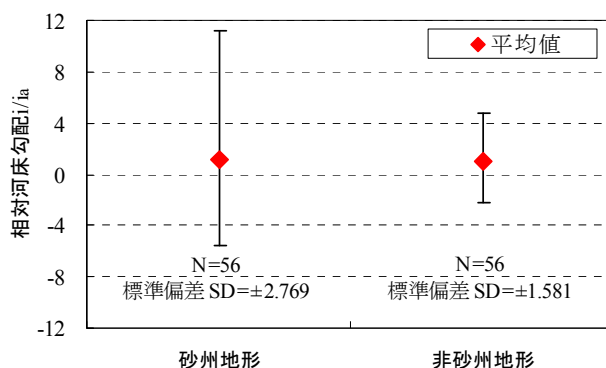


図-6 砂州地形および非砂州地形における i/i_a 散布図

の階級で選択性が示された (図-5)。一方、非砂州地形においては、確認された産卵床数も少なく全ての階級において選択性は示されなかった。

次に、砂州地形と非砂州地形における i/i_a の分布状況について整理した。砂州地形と非砂州地形の i/i_a の分布状況は大きく異なり、砂州地形における i/i_a の分布範囲は、非砂州地形より広範囲であった (図-6)。この結果は砂州地形が非砂州地形に比べ河床の凹凸が大きいことを示している。

2. 2. 2 河床材料とサクラマスの産卵床との関係

本節では、産卵床が集中的に分布した砂州地形に着目し、産卵床が確認された方形区 (図-2 参照) におい

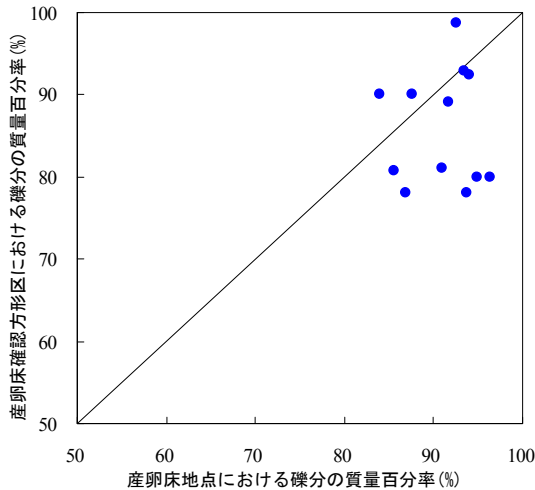


図-7 産卵床地点と産卵床確認方形区における河床材料組成

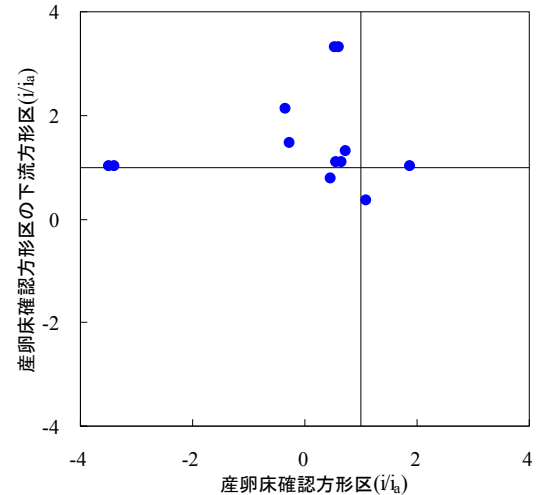


図-8 産卵床確認方形区とその下流方形区の i/a

て、産卵床地点の河床材料組成と産卵床確認方形区の代表地点における河床材料組成について比較した。

砂州地形で確認された産卵床（12床）における産卵床地点の礫分の質量百分率の値は、産卵床確認方形区の代表地点における礫分の質量百分率の値に比べ有意に大きく（Mann-Whitney U-test, $p < 0.05$ ；図-7）、既往の研究¹⁰⁾と同様の結果が確認された。

次に、産卵床確認方形区の i/a と産卵床が確認された方形区の下流方形区の i/a について検討した。産卵床が確認された方形区の大部分は $i/a < 1.0$ であった。一方、その下流の方形区については大部分が $i/a > 1.0$ であった（図-8）。

2. 3 考察

2. 3. 1 河床勾配とサクラマスの産卵床との関係

産卵床を砂州地形と非砂州地形に区分し i/a で整理した結果、産卵床の大部分は砂州地形に集中し、砂州地形の $i/a < 1.0$ の階級において選択性が示された。一方、非砂州地形においては、確認された産卵床数は少なく全ての階級において選択性は示されなかった（図-5）。 $i/a < 1.0$ の場合、その方形区の河床勾配は平均河床勾配よりも緩く、こうした場所に産卵床が多く分布する¹⁰⁾¹¹⁾。また、産卵床は淵尻地形に多く見られ、淵地形の代表的なタイプとしては①砂州型、②蛇行型、③岩型、④基底変化型がある¹⁶⁾。この内、①砂州型、②蛇行型については交互砂州や固定砂州が形成され¹⁷⁾、この砂州地形により河床の凹凸も形成される。本研究の調査地点（砂州地形）においてもこのような状況が見うけられ、この砂州地形は非砂州地形に比べ河床の凹凸が大きいことが確認された（図-6）。このことより、砂州

地形が形成されると、その河床地形は起伏に富み、これに伴い形成される局所的に緩勾配のエリア（ここでは $i/a < 1.0$ ）に産卵床が集中して分布したものと考えられる。また、非砂州地形については砂州地形に比べ河床の凹凸が少なく（図-6）、それがサクラマスの産卵にとって制限要因になっていると考えられる。

2. 3. 2 河床材料とサクラマスの産卵床との関係

砂州地形で確認された産卵床地点の礫分の質量百分率の値は、産卵床確認方形区の代表地点における礫分の質量百分率の値に比べ有意に大きかった（図-7）。また、産卵床が確認された方形区の大部分は $i/a < 1.0$ であり、その下流の方形区については大部分が $i/a > 1.0$ であった（図-8）。淵地形を淵頭（上流側）と淵尻（下流側）に区分した場合、淵頭は河床勾配が相対的に急で洪水時や平時に上流部から砂分が供給されるのに対し¹⁶⁾、淵尻は河床勾配が相対的に緩やかで下流部に河床勾配が相対的に急な瀬が隣接するため⁵⁾、淵尻では洪水時や平時に下流の瀬に砂分が流出すると考えられる。本研究の調査地点（砂州地形）における産卵床が確認された方形区周辺においてもこのような河床勾配の状況が確認された（図-8）。

サクラマスの産卵床は微環境（例えば数 m 程度の範囲）の物理量に影響を受け¹¹⁾、河床材料の粒径 2mm 通過質量百分率が 20% 以下の場所を、産卵場所として選択的に利用する^{7) 8)}。また、本研究ではこのような微環境の河床材料組成は、砂州地形によって形成される河床勾配（ここでは i/a ）の変化等、より大きなスケールの環境に影響を受けていることが示唆され、これに伴い砂州地形における産卵床地点の礫分の質量百分

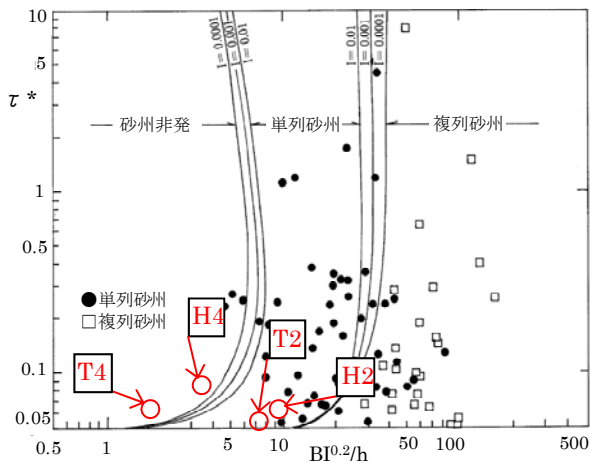


図-9 調査区間の河床形態区分 (文献 18 に加筆)



写真-3 河床形態の状態 (単列砂州の河床形態。H2 地点)

率の値は、産卵床確認方形区の代表地点における礫分の質量百分率の値に比べ有意に大きくなったと考えられる。

2.4 良好な産卵環境を保全・創出するための河川整備手法に向けて

現地調査の結果から、砂州地形を創出することにより河床地形は起伏に富み、これがサクラマス産卵場の微環境に影響を及ぼすことで産卵環境が大きく改善される可能性が示された。本章では、これらの知見を河川整備に反映させるべく調査地点で形成されていた交互砂州地形 (H2, T2; 表-1 参照) と対照用としての非砂州地形 (H4, T4; 表-1 参照) において、川幅、水深、河床材料粒径等の物理量から調査地点の地形を交互砂州の形成領域区分図^{18) 19)} に示して比較した。

その結果、調査地点の H4、T4 は砂州非発生領域に区分された (図-9)。一方、調査地点の H2、T2 は単列砂州領域に区分された (図-9、写真-3)。なお、各調査地点 (H2、T2、H4、T4) の無次元掃流力 τ^* は (2) 式で示される。

$$\tau^* = \frac{hI}{sd} \quad (2)$$

ここで、 d は河床材料の代表粒径 (60%粒径)、 h は出水時の断面平均水深 (ここでは、調査地点上流に設置した水位計が 2009 年 5 月に記録した過去 2 カ年の最高水位時の痕跡や周辺地形より推定した水位より算出)、 I は調査地点の平均河床勾配 (表-1 参照)、 s は河床材料の水中比重 1.65 である。

以上の結果より、河川の蛇行を保全することや川幅を広く確保し、河川整備箇所を交互砂州の形成領域区分図において砂州領域とする手法は、サクラマスの産卵環境を保全・創出する上で有効であると考えられる。

2.5 まとめ

本研究では、良好な産卵環境を保全・創出するための河川整備手法に関する知見を得ることを目的とし、異なる河道内地形の違いがサクラマスの産卵環境に与える影響について検討した。

本研究の特徴は、河川の自律作用によって形成される砂州地形に着目し産卵環境を評価したこと。良好な産卵環境を保全・創出するための河川整備手法について考察を加えたことである。

本研究で得られた新たな知見を以下に示す。

- 1) 産卵床を砂州地形と非砂州地形に区分し i/a で整理した結果、産卵床の大部分は砂州地形に集中し、特に砂州地形の $i/a < 1.0$ の階級に対する選択性があることが明らかとなった。一方、非砂州地形においては、確認された産卵床数は少なく全ての階級において選択性は示されなかった。また、非砂州地形は砂州地形に比べ河床の凹凸が少なく、このことがサクラマスの産卵に対して制限要因の一つになっていることが示唆された。
- 2) 産卵床が確認された方形区の大部分は $i/a < 1.0$ 、その下流の方形区については大部分が $i/a > 1.0$ であり、産卵床が確認された微生息場所の河床材料組成は、砂州地形によって形成される河床勾配 (ここでは i/a) の変化等、より大きなスケールの環境に影響を受けていることが示唆された。
- 3) 砂州区分が交互砂州である調査地点 (H2、T2) は、交互砂州の形成領域区分図において単列砂州領域に区分された。一方、砂州区分が非砂州地形である調査地点 (H4、T4) は、交互砂州の形成領域区分図において砂州非発生領域に区分された。

以上のことより、河川の自律作用によって形成される砂州地形に着目し、河川の蛇行を保全することや川幅を広く確保し、河川整備箇所を交互砂州の形成領域区分図において砂州領域とする手法は、河床の凹凸を

発達させ、これがサクラマス産卵場所の微環境に影響を及ぼし、産卵環境を保全・創出する上で有効であると考えられる。それゆえ、本研究はサクラマスの産卵環境を考慮した河川整備事業を推し進める上で、有効な知見を提供するものと考えられる。

3. サクラマスの越冬環境について

サクラマスは孵化してから1年間を河川内で過ごすため、越冬する必要がある。既往研究によると、越冬による生存率は、52%¹⁾、9~17%³⁾と推定されており、越冬期間を生き延びることの困難さと、越冬環境の重要性が伺える。しかし近年、越冬環境が減少しつつあるとの指摘もあり⁴⁾、この保全・創出は、サクラマスの個体群を健全に保つために重要である。

従来のサクラマスの越冬環境に関する研究は、物理環境（水深、流速、フルード数等）に着目して実施されている²⁰⁾²¹⁾。これらの研究によると、越冬に好適な物理環境は、流速が緩い環境、被覆度の高い環境であることが示されている。さらに、近年においては、越冬場の周辺環境に着目し、越冬場周辺のフルード数が小さい領域についてもサクラマスの越冬にとって重要であることが示されている²²⁾。しかしながら、河川形態や越冬時期の違いによる越冬場の知見は不足しており¹⁾、越冬場を保全する方法についても十分明らかにされていない。

本研究では、このような実情を踏まえ、越冬場の保全に関する知見を得ることを目的とし、河川形態の違いによる越冬場の特徴を整理し、越冬場の水深・流速とサクラマス幼魚の生息密度の関係について検討した。

3. 1 研究手法

3. 1. 1 調査地点の概要

調査は、後志利別川水系の2次支川にあたる左股川で実施した（図-10）。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。このため、サクラマスが高密度に分布する河川である。調査区域は、河川形態が異なる3区間を併せ持つ範囲とし、河川形態毎に2箇所の調査地点を設定した（表-2）。各区間の特徴としては、下流区間では流れが一般的な平瀬状の流れ、中流区間では河道内に巨礫（礫径25.6cm以上）が点在しているため、部分的に流れが落ち込んでおり、上流区間では河道内に巨礫が横断方向に点在しているため、流れがステップ&プール状である。

3. 1. 2 調査手法

採捕調査は、各調査地点の全エリアにおいて、サク

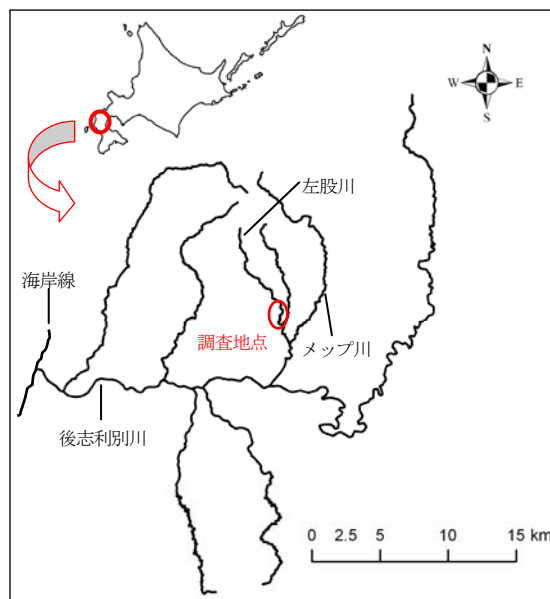


図-10 調査地点位置図

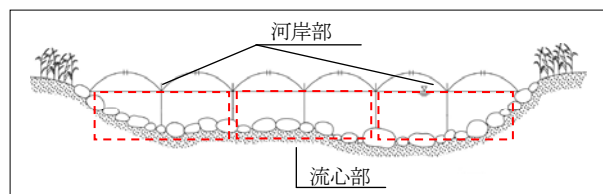


図-11 調査地点区分図

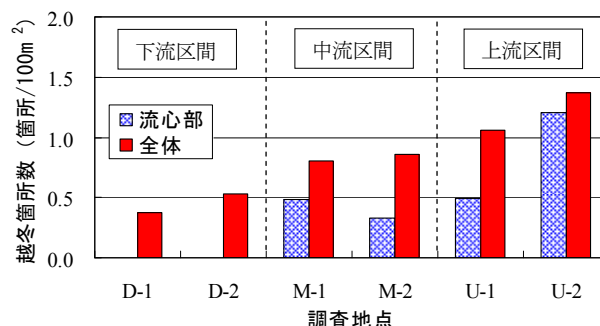


図-12 河道内における越冬場密度 (2007年12月調査)

ラマスの越冬時期にあたる2007年12月1日から12月5日にかけて行った。結果については、各調査地点において河道幅を横断方向に3等分し（図-11）、河川形態の違いによる越冬場の特徴を整理した。また、採捕場所の水深・流速と採捕尾数の関係についても整理した。

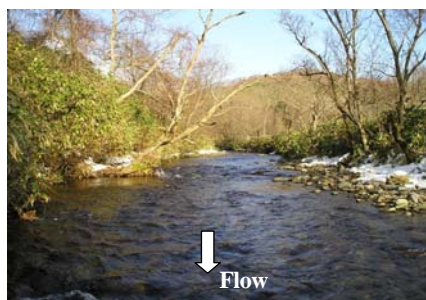
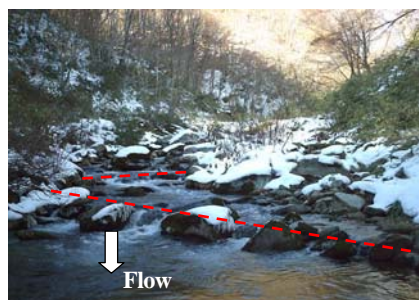
3. 2 調査結果および考察

3. 2. 1 河川形態の違いによる越冬場の特徴

河川形態がBb型の区間（河川渓流域での下流区間）においては、調査面積100m²あたりの越冬箇所数の値は他の区間と比べ低い値を示した（図-12）。これは河道内に巨礫が点在しないため（写真-4）、流心部におい

表-2 調査地点の概要

調査区域	河川渓流域での下流区間		河川渓流域での中流区間		河川渓流域での上流区間	
平均水面幅 (m)	10		11		8	
平均河床勾配	1/100		1/50		1/22	
河川形態	Bb 型		Aa-Bb 移行型		Aa 型	
調査地点	D-1	D-2	M-1	M-2	U-1	U-2
調査地点延長 (m)	75	75	75	75	75	75

写真-4 河川形態が Bb 型の下流区間
(河道内に巨礫がない状態)写真-5 河川形態が Aa-Bb 移行型の
中流区間 (河道内に巨礫が点在)写真-6 河川形態が Aa 型の上流区間
(河道内に巨礫が横断方向に点在)

て越冬場が形成されなかったことや、この区間の越冬場が倒木の背後や護岸下流端の淀んだ部分に限定されていたことによるものと考えられる。

河川形態が Aa-Bb 移行型の区間 (河川渓流域での中流区間) においては、調査面積 100m² あたりの越冬箇所数は上流区間ほどではないが高い値を示した (図-12)。これは河道内に点在した巨礫が (写真-5)、流心部においても越冬場として機能したためであると考えられる。

河川形態が Aa 型の区間 (河川渓流域での上流区間) においては、調査面積 100m² あたりの越冬箇所数は高い値を示した (図-12)。これは河道内に点在した巨礫 (写真-6) が、流心部においても越冬場として機能したためであると考えられる。

以上のことより、河道内の巨礫の存在は、河川渓流域において良好な越冬場の創出にとって重要であると考えられる。

3. 2. 2 越冬場の水深・流速

サクラマス幼魚の越冬場は、大部分が水深 20cm 以上、流速 10cm/s 以下であった (図-13)。さらに、越冬場 1箇所あたりの生息尾数が多い場合 (ここでは越冬場での確認尾数が 4尾以上) の水深および流速はそれぞれ 30cm 以上、5cm/s 以下であった。

以上のことより、河川渓流域において良好な越冬場を創出するにあたっては、水深 30cm 以上、流速 5cm/s 以下の物理環境を河道内に創出することが重要であると考えられる。

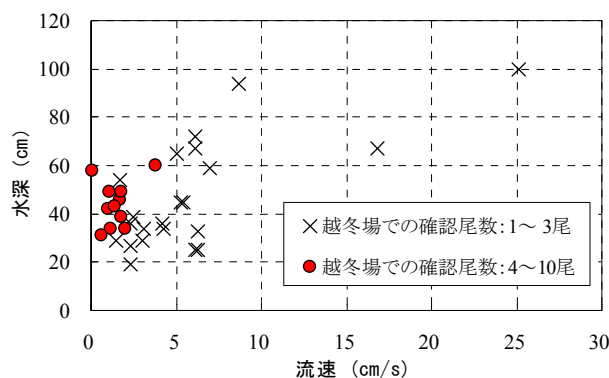


図-13 越冬場の水深・流速

3. 3 まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 河川渓流域の上中流区間では、河道内に巨礫が点在することにより多数の越冬場所が創出されたのに対し、河川渓流域の下流区間では、倒木の背後や護岸下流端の淀んだ部分に限定的な越冬場が創出されていた。
- 2) サクラマス幼魚の越冬場は、大部分が水深 20cm 以上、流速 10cm/s 以下であった。特に、生息尾数が多い越冬場の水深および流速はそれぞれ 30cm 以上、5cm/s 以下であった。

4. 巨礫を用いたサクラマスの越冬環境修復手法

前述の調査の結果、護岸などが設置してある下流区間は巨礫が河道内に点在しないため、越冬環境が上流に比べ少ない状況であった。上流の自然区間と河道状況がほぼ同じことから、こういった箇所では、自然区

表-3 調査地の概要

	護岸区間（巨礫設置試験区）	自然区間（目標区）
調査区間延長	62.5 m	75.0 m
調査区間（SP0:メップ川との合流点）	SP112.5-175	SP375-450
平均河床勾配	1/93	1/85
平均水面幅	8 m (4.5-12.0m)	7 m (5.0-11.5m)
河道内の状況	SP150-175の河岸部には護岸工が施工されている。また、河道内には巨礫があまり見られない。	河道内には巨礫が数多く点在することに加え河岸は植生で覆われている。

間を目指して越冬環境の保全、創出を行うことが望ましい。近年の魚類越冬環境に関する研究においては、水際域での石の隙間は魚類生息場にとって重要であること²³⁾、礫径の大きな石を組み合わせた場合、多くの魚類の越冬環境創出が期待できることが報告されている²⁴⁾。さらに、平成20年には「中小河川に関する河道計画の技術基準について：国土交通省河川局」が示され、寄せ土や捨て石の効果的な配置は魚類等の生息環境上重要な低流速域を作り出す効果があり、河岸・護岸・水際部の設計においては寄せ土や捨て石などの現地で調達できる河床材料を有効活用することの重要性が示されている。しかしながら、河道内のどの程度の大きさの河床材料をどこに配置すべきかの研究は不足しており、溪流河川の護岸工周辺において越冬場への配慮はあまりなされていない。

本研究では、積雪寒冷地域の護岸工周辺において、サクラムスの越冬環境の劣化を低減させる技術として、礫径の大きな河床材料を使用する場合、どのような手法が有効であるかについての知見を得ることを目的とし、礫径の大きな河床材料を利用し越冬場の創出を図る巨礫設置試験を行い、巨礫設置がサクラムスの越冬環境に及ぼす影響を把握するとともに、出水後における設置した巨礫の状態について評価した。

4. 1 研究手法

4. 1. 1 対象河川

巨礫設置試験の対象河川とした左股川は、北海道南部の今金町を南に流れメップ川に合流する一級河川後志利別川水系の2次支川であり、流路延長11.7km、流域面積は26.4km²の溪流河川である。また、流域の大部分は森林で覆われており流路のほとんどは自然河道であるが、下流域の一部は畑地として利用されているため河道の一部には護岸工が施工されている。これにより、下流域の一部においてはサクラムスの生息密度が低い区間が見受けられる。また、当河川は水産資源



写真-7 護岸区間（巨礫設置試験区）の様子

保護法により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。

4. 1. 2 調査地の設定

巨礫設置試験箇所は、河川工事と越冬場が重複しやすい溪流河川の下流域を調査地とし、護岸区間、自然区間の2つの河道区間を設定した(表-3)。護岸区間はメップ川との合流点より上流112.5mを調査起点とし、瀬と淵構造を複数含むことを基準に調査延長は62.5mとした。調査延長の設定にあたっては、急流の礫河川における瀬や淵構造などの地形的特長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²⁵⁾。このため、瀬や淵構造を把握する基準延長を川幅程度の12.5mとし、この基準延長をもとに調査延長を設定した。護岸区間の河床勾配は1/93である。また、ここは河岸の一部に護岸工が施工されており河道内には巨礫がほとんどない区間であり、巨礫を設置し越冬場の創出を図る巨礫設置試験区として設定した(写真-7)。自然区間はメップ川との合流点より上流375mを調査起点とし、護岸区間と同様に瀬と淵構造を複数含むことを基準に調査延長は75mとした。自然区間の河床勾配は1/85である。また、ここは河道内に巨礫が数多く点在することに加え、河岸は植生で覆



写真-8 自然区間（目標区）の様子

われている区間であり目標区として設定した(写真-8)。

4. 1. 3 調査手法

a) 巨礫設置

サクラマス越冬環境に関する研究は、河川の物理環境と関連させ検討されているものが多い。例えば、鈴木ら²⁶⁾は、流速が遅く倒木や植生によるカバーが形成されている微環境がサクラマスの越冬にとって重要であることを示している。中里ら²⁷⁾は、流速が10cm/s以下と遅くカバーが形成されている微環境に加え、フルード数の小さい領域がサクラマスの越冬にとって重要であることを示している。さらに、渡辺ら²⁸⁾は、微環境のような小さな空間単位の環境特性は、より大きな空間単位の環境特性から影響を受けるといった河川の階層構造に着目し、河岸部に広がるフルード数が0.125以下の領域内で特に流速の遅い微環境がサクラマスの越冬にとって重要であることを示している。このことより、護岸区間において河岸部に広がるフルード数が0.125以下の領域内にある流速が10cm/s以下の地点を選定し、サクラマスの越冬環境の劣化を低減させる一手法としての巨礫設置試験を行った。

巨礫の設置はサクラマスの越冬前にあたる2009年11月5日に行い、礫径25cm以上の材料を複数組み合わせ護岸工の対岸側に3箇所、護岸工と同じ側に1箇所の合計4箇所に設置した。設置した巨礫の構造は河道を横断する構造とし、1箇所あたり縦断流方向に2個、横断方向に4個の巨礫を使用した(図-14：幅W=0.7m、高さH=0.4m、延長L=1.4m)。

b) 物理環境調査

4箇所の巨礫設置箇所において、巨礫の設置前後で流速、フルード数がどのように変化するかを把握するため水深、流速の測定を2009年11月5日(巨礫設置の前後)と2010年2月16日(採捕調査時)に行った。流速の測定は巨礫設置箇所の下流50cmとし6割水深

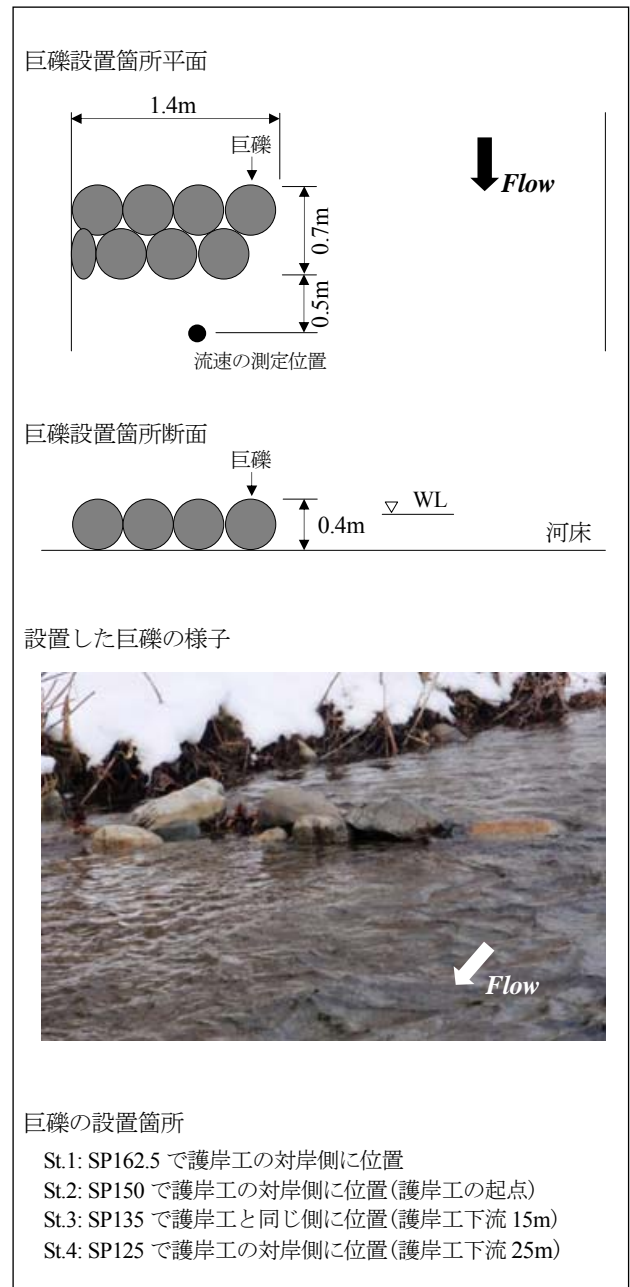


図-14 巨礫設置状況と流速の測定位置

で行った(図-14)。

c) 採捕調査

護岸区間と自然区間におけるサクラマスの生息数を把握するため、サクラマスの越冬時期にあたる2010年2月16日から2月17日にかけて護岸区間と自然区間の全エリアにおいてサクラマスの採捕調査を行った。

採捕はサデ網、タモ網、エレクトリックフィッシャー(YUASA社製：NP4)を用い下流から上流に向かって採捕を行った。あわせて、サクラマスの生息が確認された越冬場においては水深、流速の測定を行った。測定手法は前項で示した物理環境調査と同様の手法で

表-4 サクラマスの生息数と越冬場における物理環境

	護岸区間		自然区間
	巨礫設置箇所	巨礫設置箇所以外	
越冬場数 (箇所)	4	4	7
水深 (cm)	10-18 (13.8)	20-53 (31.3)	15-36 (23.0)
流速 (cm/s)	0-7.9 (2.6)	0-6.1 (2.8)	0-18.2 (4.2)
フルード数 (F_r)	0-0.06 (0.02)	0-0.04 (0.02)	0-0.15 (0.04)
生息数 (尾)	7	7	14
越冬場1箇所あたりの生息数 (尾/箇所)	1.8	1.8	2.0
生息密度 (尾/100m ²)	2.9		2.6

水深、流速、フルード数における () 内の値は平均値を示す。

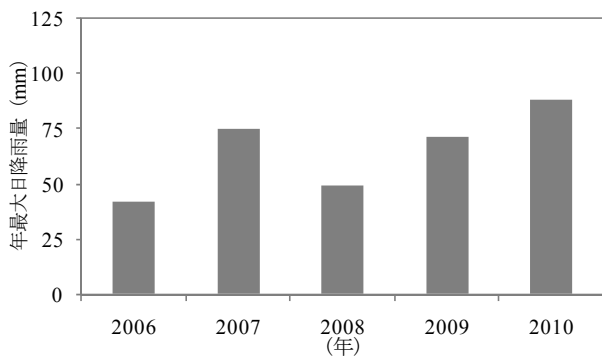


図-15 今年観測所における年最大日降雨量 (気象庁データより。2010年の値は8月11日降雨時の値である)。

あり、採捕調査時の水温は護岸区間では2℃、自然区間では1℃であった。

d) 出水後における巨礫の構造調査

出水後における巨礫の状態を評価するため、2010年8月11日降雨後の2010年9月10日にすべての巨礫設置箇所において目視による巨礫の構造確認調査を行った。また、護岸工下流地点に位置する巨礫設置箇所 St.1 と護岸工施工区間に位置する St.4 においては、横断測量、洪水痕跡水位調査をあわせて行った。また、今回生じた2010年8月11日降雨では調査地近傍の今金観測所 (気象庁) において2010年の年最大日降雨量を記録し、これは近年における最大規模の日降雨量であった (図-15)。

4. 2 結果と考察

4. 2. 1 巨礫設置箇所における物理環境

巨礫設置箇所において巨礫設置前に水深、流速を測定した結果、すべての箇所で流速は10cm/s以下の低い値であった (表-4)。これに伴い、フルード数もすべての箇所において0.125以下の低い値であった (表-4)。さらに、巨礫設置後および採捕調査時に水深、流速を

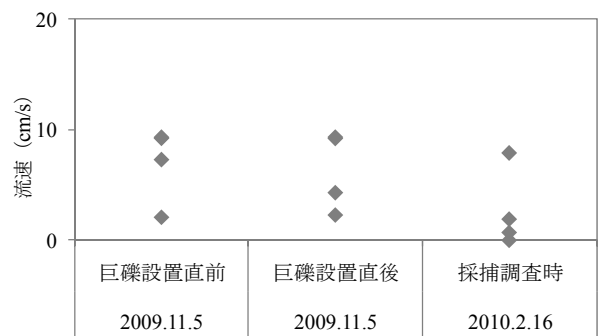


図-16 巨礫設置箇所における流速



図-17 巨礫設置箇所におけるフルード数

測定し、流速、フルード数の値を巨礫設置前と比較した結果、流速、フルード数ともに巨礫設置前と同程度の低い値であった (図-16, 17)。

4. 2. 2 巨礫設置箇所におけるサクラマスの生息数

サクラマスの採捕調査の結果、巨礫設置箇所のすべてでサクラマスの生息が確認された (表-4)。また、巨礫設置箇所1箇所あたりの生息数は、護岸区間の巨礫設置箇所以外で確認された生息場1箇所あたりの生息数の値や自然区間の生息場1箇所あたりの生息数の値と同程度であった (図-18)。

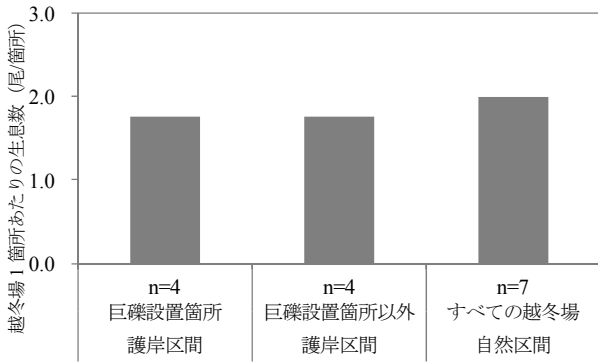


図-18 越冬場1箇所あたりの生息数

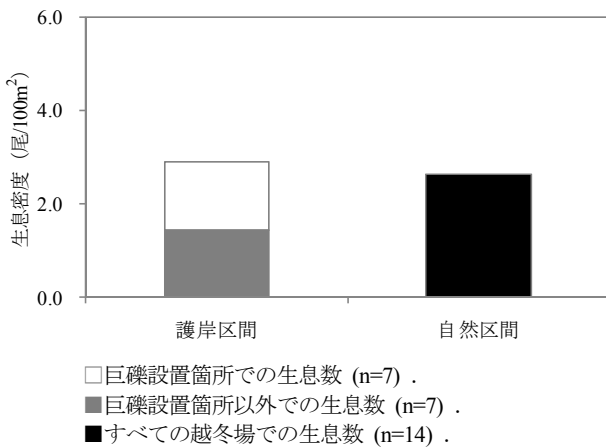


図-19 サクラマスの生息密度

4. 2. 3 巨礫設置が越冬環境に及ぼす影響

巨礫設置箇所のすべてにおいてサクラマスの生息が確認され、巨礫設置箇所1箇所あたりの生息数は、護岸区間の巨礫設置箇所以外で確認された生息場1箇所あたりの生息数の値や自然区間の生息場1箇所あたりの生息数の値と同程度であった(図-18)。また、護岸区間と自然区間の生息数を比較した結果、護岸区間では巨礫を設置したことに伴い生息数が増加し、自然区間と同程度の高い生息密度となり(図-19)、護岸区間において巨礫設置試験による越冬環境修復の効果が示された。サクラマスの越冬場を人為的に創出する場合、身を隠すカバーに加え、その周辺に流れが緩やかな遊泳空間が必要となる⁴⁾。また、このような環境は河岸部に多く見られる²⁸⁾。本研究においても巨礫を複数組み合わせることにより、巨礫間に空隙が形成され巨礫がカバーとして機能していた。また、河岸部に広がるフルード数の小さい領域内にある流速が10cm/s以下の微環境(流速が緩やかな遊泳空間)は巨礫設置直後から採捕調査時まで維持された。このように、サクラマスが身を隠すカバー、河岸部における流れが緩やかな遊泳空間(ここでは流速が10cm/s以下の微環境)は



a) 出水前 (St.4 : 2009年11月)



b) 出水後 (先端部のみが掃流, St.4 : 2010年9月)

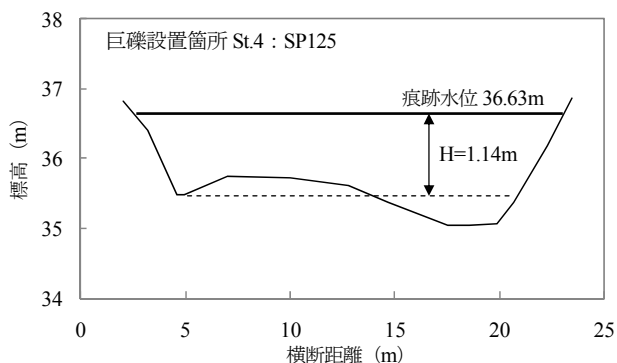
写真-9 出水前後における巨礫の状態

冬期間におけるサクラマスの生息数を規定する重要な要素であり、今回設置した巨礫がサクラマスの越冬環境に及ぼす影響は大きいと考えられる。

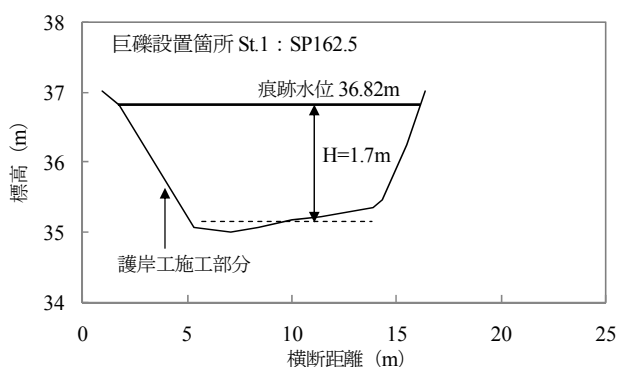
以上のことより、護岸区間の河岸部において、フルード数が0.125以下の領域内にある流速が10cm/s以下の地点を選定し、礫径25cm以上の巨礫を組み合わせ設置する越冬環境修復手法は、巨礫によるカバーの創出やサクラマスの越冬にとって必要なフルード数が0.125以下の領域内にある流速が10cm/s以下の微環境の維持に対し効果的であり、護岸工周辺で劣化しつつある越冬環境を修復する手法として有効であると考えられる。また、越冬環境を修復する範囲に対しどの程度の越冬場を創出すべきかについては今後検討する必要がある。

4. 2. 4 出水後における巨礫の状態

巨礫設置箇所において、出水後にその状態を調査した結果、設置した巨礫構造4箇所の内3箇所(St.1-3)は出水により掃流した。一方、St.4については先端部の一部に掃流が確認されたものの、延長の約7割程度は出水後も元の状態を保持していた(写真-9)。また、その掃流しなかった巨礫は粒径が40cm程度の大きな



a) St.4の横断面図 (図中の点線は平均地盤高さを示す)



b) St.1の横断面図 (図中の点線は平均地盤高さを示す)

図-20 巨礫設置箇所横断面図と出水後の痕跡水位

ものであった。

4. 2. 5 出水に対する巨礫構造の評価

出水後も元の状態を保持していたSt.4の箇所において、巨礫の多くが掃流されなかった要因を出水後の痕跡水位と横断面図を用い「護岸の力学設計法：掃流（一体性が弱い）²⁹⁾」により評価した（図-20, 21）。その結果、今回の出水はSt.4において、粒径30cm以下の巨礫を掃流する規模であった。

巨礫を河道内に配置する試みとしては、岩盤化した河床に砂礫を堆積させる河床高回復現地試験が行われており³⁰⁾、設置する巨礫径は平均年最大流量に対し巨礫が掃流されずに河道内に留まるための必要粒径を「護岸の力学設計法：掃流（一体性が弱い）」により算出している。また、洪水後においては河床高回復現地試験区間内に砂礫が堆積し、出水に対し設置した巨礫が安定し効果的に機能することが確認されている。

本研究における出水に対する巨礫構造の評価においても、St.4において粒径30cm以下の巨礫が掃流される結果となり、出水後におけるSt.4の現地の状況（掃流されなかった巨礫は粒径が40cm程度）を反映していた。このため、St.4の箇所において巨礫が掃流されなかった要因としては、St.4の川幅がSt.1に比べ広がったことにより出水中におけるSt.4の水深がSt.1より

掃流（一体性が弱い場合）で評価

$$D_m = \frac{V_0^2}{E_1^2 2g [(\rho_s/\rho_w) - 1]}$$

D_m : 流体により掃流される石の粒径 (m)

E_1 : 乱れの強さを示す実験係数 ($E_1=0.86$)

V_0 : 代表流速 (m/s)

代表流速 V_0 はマンニングの平均流量公式を利用し粗度係数 $n=0.04$ とする（河川砂防技術基準・調査編における山地流路、砂利、玉石を使用）

ρ_s : 石の密度 (kg/m^3)

ρ_w : 水の密度 (kg/m^3) 通常 ρ_s/ρ_w は 2.65

図-21 巨礫構造物の評価（護岸の力学設計法²⁹⁾より）

浅くなり（図-20）、マンニングの平均流量公式より算出される代表流速 V_0 の値が小さくなったこと（図-21）、粒径40cm程度の比較的大きな巨礫が使用されたことであると考えられる。また、St.1の箇所において設置した巨礫がすべて掃流された要因としては、巨礫設置箇所の対岸に護岸工が施工されていたことに加え、出水時の水深に対する川幅の比が10以下であったため河床部分と護岸部分によって算出される合成粗度係数が大きくなり²⁹⁾、マンニングの平均流量公式より算出される代表流速 V_0 が大きくなったことであると考えられる。

以上のことより、河道内の巨礫を用いた越冬環境修復工法の構造を決める場合、横断方向に突き出す延長には検討の余地が残されているものの、護岸工下流河道で護岸工と対岸側に位置する領域において、対象とする出水規模（例えば、護岸工部分の低水路最大流量など）を明確にし、護岸力学設計法により設置する巨礫の粒径を決める手法は、設置する巨礫の安定に対し有効であると考えられる。また、河道内の巨礫を用いた越冬環境修復工法の構造に関しては、川幅や滞筋部に点在する巨礫の最大粒径が重要となることが護岸力学設計法を用いた評価より示唆され、河道内で広範囲（例えば、自然河岸とのすり付けを含む護岸工施工範囲全体）に越冬環境の修復を考える場合は滞筋部に点在する巨礫の最大粒径から護岸工部分やすり付け部分の川幅を検討することが重要であると考えられる。

4. 3 まとめ

本研究で得られた新たな知見を以下に示す。

1) 護岸区間の河岸部において、フルード数が0.125以下の領域内にある流速が10cm/s以下の地点を選定し、礫径25cm以上の巨礫を組み合わせ設置する越冬環境修

復手法を実施した。その結果、巨礫によるカバーの創出やサクラマスの越冬にとって必要なフルード数が0.125以下の領域内にある流速が10cm/s以下の微環境の維持に対し効果的であり、護岸工周辺で減少しつつある越冬環境を修復する手法として有効であることが示唆された。

2) 護岸工下流河道で護岸工と対岸側に位置する領域において、河道内の巨礫を用いた越冬環境修復工法の構造を決める場合、横断方向に突き出す延長には検討の余地が残されているものの、護岸の力学設計法により、設置する巨礫の粒径を決める手法が有効であることが示唆された。

5. 堰堤上流魚道入口の閉塞対策について

近年、河川環境に対する関心の高まりから魚がのぼりやすい川づくりが進められている。魚がのぼりやすい川づくりを進めるにあたっては、河川の連続性が確保されることが必要であり³¹⁾、この対策として河川横断工作物に数多くの魚道が整備されている^{32) 33)}。例えば、谷瀬ら³⁴⁾が行った調査によると北海道内の魚道の総数は2,300基以上であり、その内の4割以上が砂防・治山関連の施設である。本研究対象のサクラマスにとっても、海から産卵環境として良好な上流域に遡上する際、堰堤上流に遡上できることが必要となる。

溪流河川に施工された堰堤工作物に魚道が設置された場合、洪水時における砂礫や流木の生産により魚道流入口上流端にこれらが堆積し、魚道としての機能を失う場合がある。現在の対策としては魚道流入口上流部に護岸工を設置したり、柵やスクリーンを設置するなどしているが逆に堆積を促進させてしまう場合がある(写真-10, 11)。魚道施設における維持管理費の縮減や魚道の機能維持を考えると、溪流河川の堰堤工作物に設置される魚道においては、洪水時に輸送される砂礫や流木の対策を具体的に検討することは必要不可欠である^{35) 36)}。

従来の魚道に関する研究では、通常時の流量を対象に魚道の流況特性が検討されていることが多い³⁷⁾。洪水時については、魚道断面を縦横断に台形断面とすることで砂礫が排出されやすいことは見いだされている³⁸⁾。一方で、魚道流入口上流部に関しては、土砂や流木が堆積しにくい適切な構造については把握されていない。

このような背景を踏まえ、本研究では、洪水後においても魚道機能が維持され、土砂や流木が堆積しにくい適切な魚道流入口上流部の構造を把握することを目



写真-10 砂礫が堆積した魚道流入口上流部



写真-11 流木が堆積した魚道流入口上流部

的とし、堰堤工作物袖部を貫通させ設置された魚道を対象に、護岸対策として用いられる水制工に着目し、水制工の規模や設置位置の違いによる魚道流入口上流部での砂礫の移動形態、流木の流下状況について実験的に検討した。さらに、本研究で得られた検討結果が近年、実河川でどのように応用されているかについて整理した。

5. 1 検討手法

5. 1. 1 検討手順

魚道流入口上流部における砂礫の移動形態、流木の流下状況は、魚道流入口構造 $((H-s)/h, s/h, b/B)$ 、水制工の規模や設置位置 $(L/b, (l-ba)/b)$ 、流量 (hc/b) により支配されると考えられる(記号は図-22 参照)。このため、はじめに予備実験を固定床で実施した後、その結果を踏まえ、本実験における実験条件の絞り込みを行った。次に、絞り込まれた実験条件の下で本実験を移動床で実施し、魚道流入口上流部での砂礫の移動形態、流木の流下状況について検討し土砂や流木が堆積しにくい適切な魚道流入口上流部構造を把握することとした(図-23)。

予備実験および本実験は、長さ 24.0m、幅 1.0m の直線水路を用い、半断面の堰堤工作物模型を設置し実施した(写真-12)。模型実験(1/15 縮尺)は溪流河川の

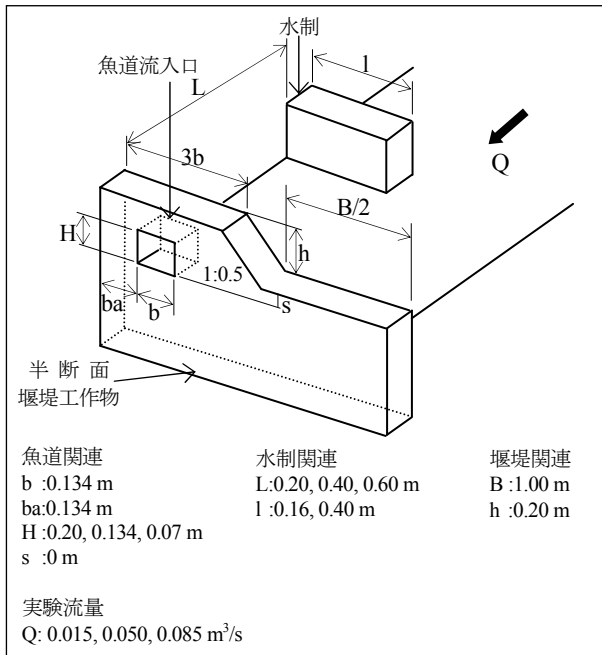


図-22 判断面の堰堤工作物模型とその条件

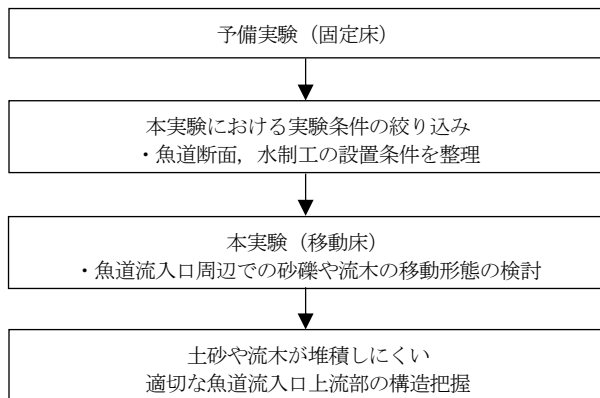


図-23 検討手順



写真-12 模型実験水路の様子

下流域における堰堤工作物を想定しており、河床勾配1/150でフルードの相似則を満足するものである。

5. 1. 2 予備実験

予備実験は固定床実験であり、本実験における実験

表-5 予備実験の実験条件

魚道流入口構造		水制設置位置	水制長	流量
(H-s)/h	s/h	L/b	(l-ba)/b	hc/b
0.33	0	1.5	0.2	0.37-0.45
0.67		3.0	2.0	0.76-0.82
1.00		4.5		0.99-1.12

・ 実験流量は図-22 に示す3 ケースである
 hc: 魚道、水通しから流出する全流量から算定される限界水深

条件の絞り込みを目的とし、直線水路にモルタルを敷均し(写真-12)、表-5 に示す実験条件および水量で①魚道流入口を通過する流量特性②水制設置位置や長さの違いによる魚道流入口上流部周辺での流況特性について整理した。

魚道流入口を通過する流量特性については、魚道流入口構造3 ケースと実験流量3 ケースを組み合わせ合わせた合計9 ケースにおいて(表-5)、魚道流入口を通過する流量を測定し整理した。実験は定常流で実施し、魚道流入口を通過する流量は三角堰を設置し測定した。

水制設置位置や長さの違いによる魚道流入口上流部での流況特性については、前述の9 ケースと水制設置位置3 ケース、水制長2 ケースを組み合わせ合わせた合計54 ケース(表-5)において、魚道流入口上流部周辺の流速を測定し整理した。流速の測定については3次元電磁流速計(アレック製)を用い6割水深で実施した。

5. 1. 3 本実験における実験条件の絞り込み

予備実験においては、以下のような流況特性が把握された。

・ 魚道流入口を通過する流量特性の変化に伴い、魚道流入口断面が水没する過程(開水路→オリフィス)で魚道を通る流量割合は大きく減少する。

・ 水制設置位置や長さの違いによる魚道流入口上流部周辺での流況特性として、水制先端で剥離した水流は堰堤袖部と水制間で形成される滞留域を回り込むように魚道流入口に接近し、その流況は $L/b=1.5$ と $L/b=3.0, 4.5$ を比較すると大きく異なる。

以上の結果を踏まえ、絞り込まれた本実験の実験条件とその概略を表-6 に示す。

5. 1. 4 本実験

本実験は移動床実験であり、実験流量については非定常とし、前節の予備実験で用いた実験流量3 ケースの内、中間のものを最大流量とするハイドログラフを作成した。作成したハイドログラフは、式(3)で表される無次元水深ハイドログラフ(図-24)であり³⁹⁾、ハイドログラフの継続時間は6時間である。なお、無次

表-6 予備実験の整理と絞り込まれた本実験の条件

◆魚道流入口を通過する流量特性
●予備実験の整理： 流量変化に伴い魚道流入口断面が水没する過程（開水路→オリフィス）で魚道流入口を通過する流量割合は大きく減少する。
●絞り込まれた本実験の実験条件： (H-s)/h=1.00, s/h=0 魚道流入口は水没しない開口構造とした。
◆水制設置位置や長さの違いによる魚道流入口上流部周辺での流況特性
●予備実験の整理： 水制先端で剥離した水流は堰堤袖部と水制間で形成される滞留域を回り込むように魚道流入口に接近しその流況は L/b=1.5 と L/b=3.0, 4.5 を比較すると大きく異なる。
●絞り込まれた本実験の実験条件： L/b=1.5, 4.5、 (l-ba)/b=0.2, 2.0 魚道流入口上流部での砂礫や流木の移動形態を考える場合、魚道流入口周辺で異なる流況特性を有する条件を比較し検討することが重要と考え、L/b=1.5 と 4.5 を実験条件として抽出した。

元水深ハイドログラフは、河川流域での流量波形（ここでは札内川ダムで2006年10月7日に観測された計画流量の80%程度の出水の流入量波形）の形状を参考とした。

$$D_0 = \left\{ \frac{\delta(\tau + \alpha)^2}{\tau^2 + \beta} - \gamma \right\}^{3/2} \quad (3)$$

なお、 D_0 : 初期水深 h_0 で無次元化した水深、 τ : ハイドログラフの継続時間 T で無次元化した時間 ($\tau = t/T$)、 $\alpha = 0.522$ 、 $\beta = 0.131$ 、 $\gamma = 1.15$ 、 $\delta = 1.796$ である。

本実験の目的は魚道直上流部周辺での砂礫や流木の移動形態を把握することである。砂礫の移動形態については、魚道直上流部での砂礫の堆積の大部分は粒径 20mm 以下であり、この粒径の移動形態を把握することが重要と考える。このことより、河床材料については平均粒径 1.46mm の均一な珪砂（実スケールでは 21.9mm）を使用し、水制設置位置 2 ケース、水制長 2 ケースを組み合わせた合計 4 ケースにおいて（表-7）、ハイドログラフに対応した流量を流下させた後（図-24）、河床コンター図を作成し検討した。河床コンター図の作成にあたってはレーザー砂面計を用いた。流木の流下状況については、出水時に流出する流木の大部分は出水のピーク流量時より約 1~2 時間前に最大となることが知られている⁴⁰⁾。また魚道直上流部での流木の堆積を検討する場合、魚道流入口幅 b （図-22 参照）より寸法が大きい流木に視点を置くことが重要と考える。このことより、魚道流入口上流部での流木の流下状況については、ハイドログラフ（図-24）にお

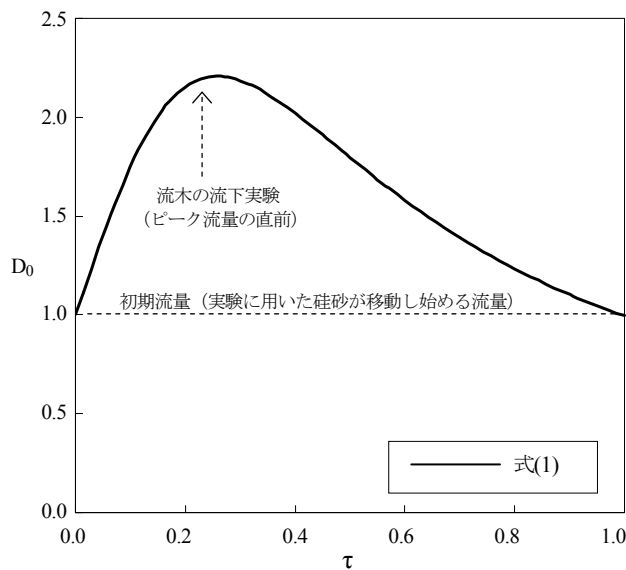


図-24 本床実験で用いた無次元水深ハイドログラフ

表-7 本実験の実験条件

魚道流入口構造			水制設置位置	水制長	流量
(H-s)/h	s/h	b/B	L/b	(l-ba)/b	hc/b
1.00	0	0.134	1.5	0.2	Case1
			4.5	2.0	

Case1: 実験流量は図-24 に示す非定常ハイドログラフである

けるピーク流量直前に流木の流下実験を実施した。流下させた流木模型は、ポリプロピレン性の材料（直径 5mm、長さ 200mm、比重 0.89）を使用し、水制先端部の上流約 2m の箇所より 3 本流下させ、魚道流入口に接近する状態について整理した。また、表面流況についても発泡スチロール球をトレーサーとして用い合わせて整理した。

5. 2 本実験結果と考察

5. 2. 1 魚道流入口上流部での砂礫の移動形態

水制設置位置 L/b 、長さ $(l-ba)/b$ の違いによる魚道流入口上流部での砂礫の移動形態について検討を行った。非定常ハイドロ（図-24）を流下させた後の魚道流入口上流部での河床コンターを図-25 に示す。

$(l-ba)/b=2.0$ の場合（図-25a, b）、 $L/b=1.5$ と $L/b=4.5$ を比較すると、魚道流入口上流部での土砂堆積状況は大きく異なる。 $L/b=4.5$ （図-25a）では、魚道流入口上流部で大きな堆砂が生じた。一方、 $L/b=1.5$ （図-25b）では、魚道流入口上流部で大きな堆砂が生じなかった。

非越流を条件とした水制の既往研究において⁴¹⁾、水制間隔と水制長の比（ここでは L/l ）を 1.0 以上とし、河床から 4 割水深で流速測定を実施したとき、水制間に形成される滞留域内において明瞭な循環流が形成さ

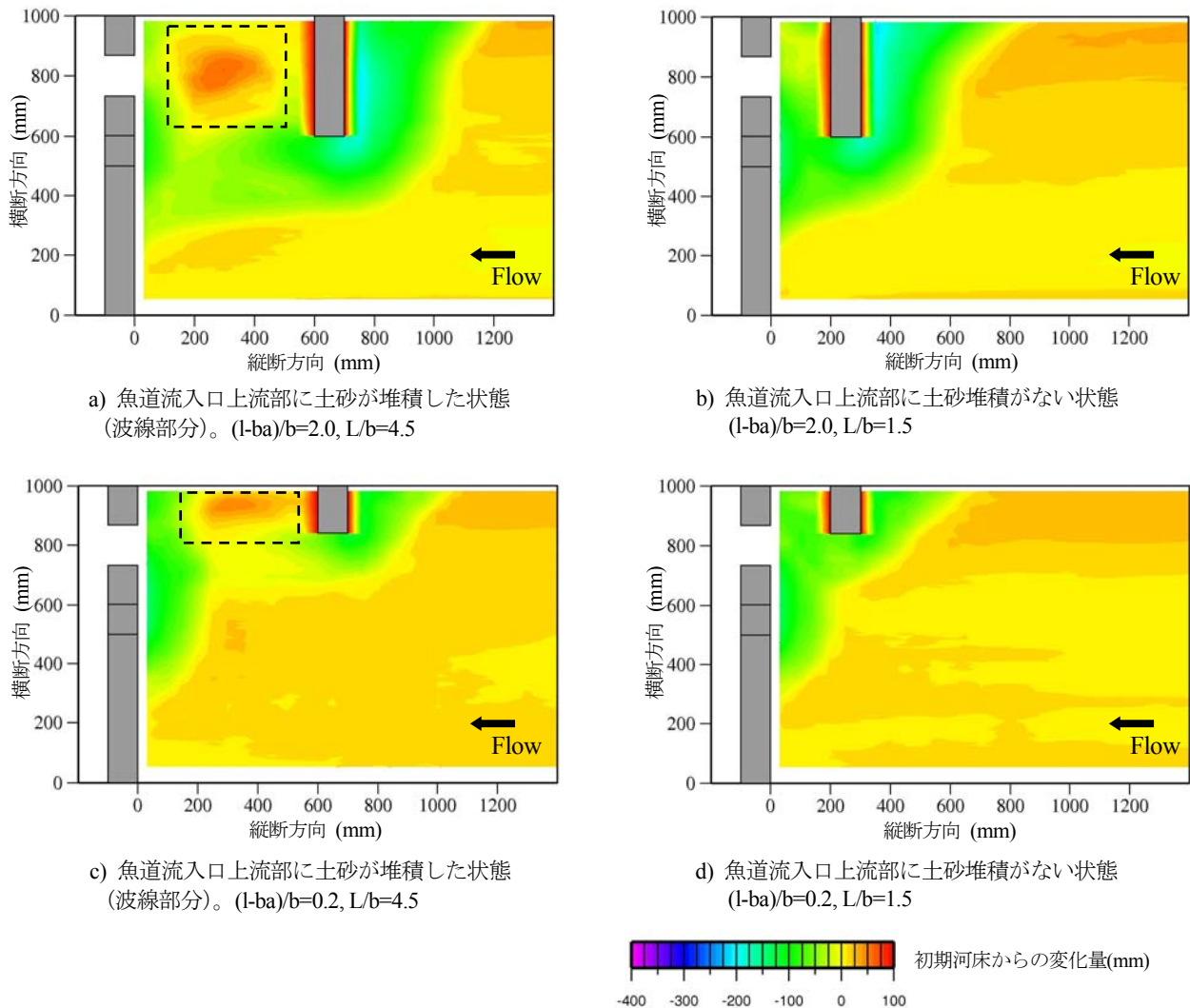


図-25 移動床実験後における河床コンター図

れることが報告されている。本実験の $L/b=4.5$ (図-25a ; L/l については 1.5) の場合においても河床付近にこのような循環流が形成されていたと考えられる。このことより、 $L/b=4.5$ の場合、循環流の形成により水制と堰堤袖部によって形成される滞留域に土砂が供給されやすくなったことに加え、水制設置位置が魚道流入口から離れていたため、魚道流入口より土砂が良好に排出されなかったため魚道直上流部に土砂が堆積したと考えられる。一方、 $L/b=1.5$ (図-25b ; L/l については 0.5) では、水制設置位置が魚道流入口に接近したため、循環流の形成も小さく、水制と堰堤袖部によって形成される滞留域に土砂が供給されにくくなったことに加え、魚道流入口から土砂が良好に排出されたため、魚道直上流部に土砂が堆積しなかったと考えられる。また、 $(l-ba)/b=0.2$ の場合 (図-25c, d) においても $L/b=1.5$ と $L/b=4.5$ を比較した際、同様の結果が確認さ

れた。

このことより、水制と堰堤袖部によって形成される滞留域の大きさを小さくする (ここでは魚道流入口の幅 b に対する相対的な水制設置位置 L/b を 1.5 程度とする) ことにより、この滞留域に土砂が供給されにくくなることに加え、魚道流入口上流部において土砂が排出されやすくなり、土砂堆積が抑制されることが確認された。

5. 2. 2 魚道流入口上流部での流木の流下状況

水制設置位置 L/b 、長さ $(l-ba)/b$ の違いによって、魚道流入口上流部での流況および接近する流木模型の状態がどのように変化するかについて検討を行った。非常常ハイドロ (図-24) のピーク流量直前時における表面流速および流木模型の流下状況を図-26 に示す。 $(l-ba)/b=2.0$ の場合 (図-26a, b), $L/b=1.5$ と $L/b=4.5$ を比較すると、魚道流入口上流部での表面流速および流木の流下状況は大きく異なる。 $L/b=4.5$ (図-26a) では、

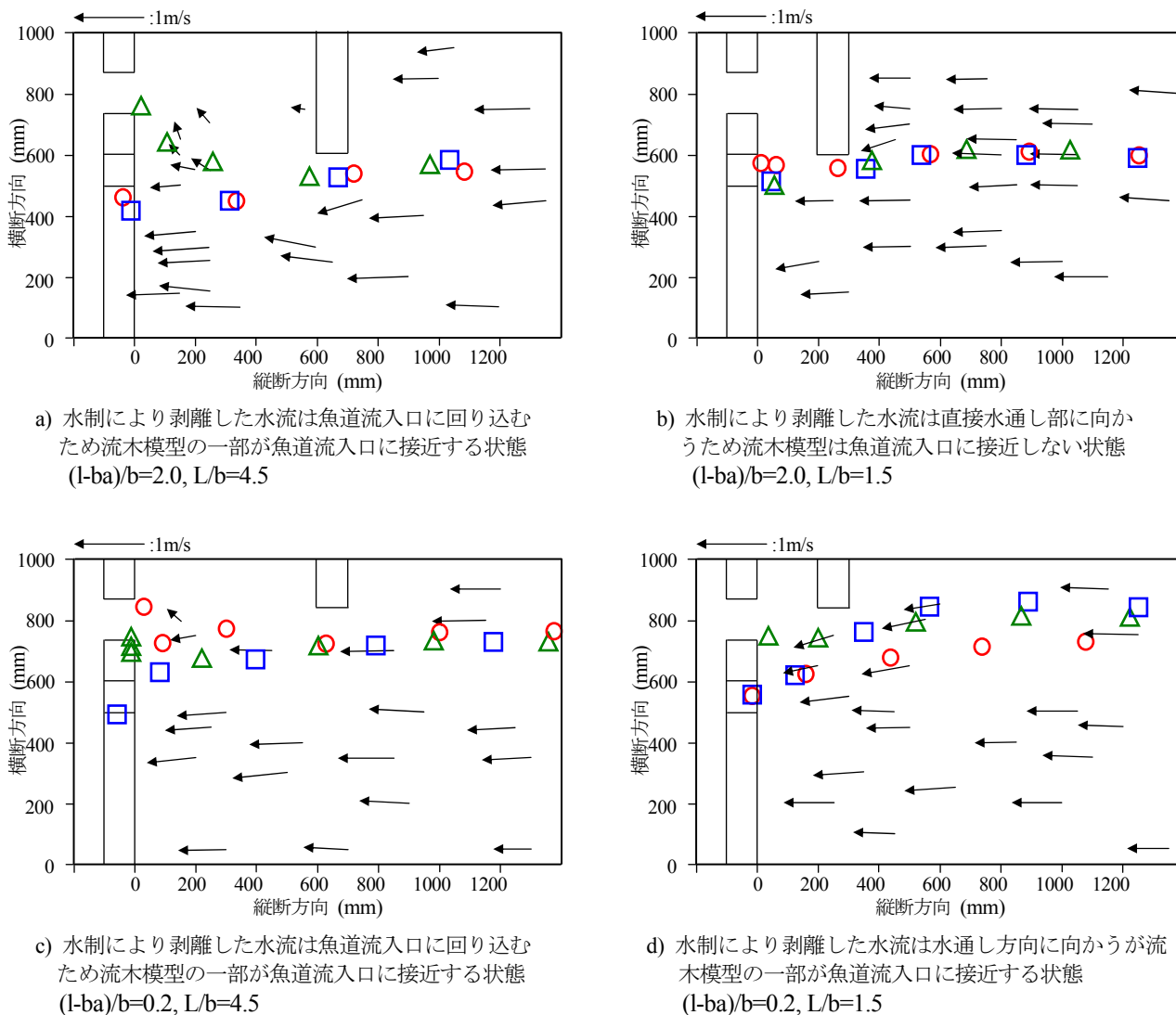


図-26 非定常ハイドロのピーク流量直前における表面流速ベクトルと流木模型の流下軌跡
(図中の○□△は流木模型の中心の軌跡を示す)

水制先端で剥離した水流は、水制が堰堤袖部から遠ざかっているため魚道流入口側に回り込む。これに伴い、流下する流木模型の一部は魚道流入口から排出された。一方、 $L/b=1.5$ (図-26b) では、水制先端で剥離した水流は、水制が堰堤袖部に接近しているため、直接堰堤水通し部に向かう。これに伴い流下する流木模型はすべて堰堤水通し部から排出された。また、 $(l-b)/b=0.2$ の場合 (図-26c, d) においても $L/b=1.5$ と $L/b=4.5$ を比較した際、表面流速については同様の結果が確認された。しかしながら、 $L/b=1.5$ の場合 (図-26d)、流木模型の一部は堰堤水通し部から排出された。これは水制先端が魚道流入口の上流部に位置したことに加え、実験時 (非定常ハイドロにおけるピーク流量直前時) に水制先端で河床が洗掘されていたことにより、水制先

端から魚道流入口に直接向かう流れが生じ、この流れに干渉されたことによるものと考えられる。

このことより、水制設置位置を堰堤袖部に接近させ (ここでは魚道流入口の幅 b に対する相対的な水制設置位置 L/b を 1.5 程度とする)、水制先端を堰堤構造物袖部の先端と同一線上に配置する (ここでは $(l-b)/b=2.0$ とする) ことにより、水制より剥離した水流は直接堰堤水通し部を流下し、魚道流入口上流部において流木の接近が抑制されることが確認された。

5.3 実河川での応用

5.3.1 魚道流入口断面の事例

魚道流入口上流部の土砂堆積防止対策として、魚道流入口断面を改良した事例を写真-13に示す。

これは魚道流入口断面をボックスカルバート型か



a) 改良前



b) 改良後

図-13 魚道流入口断面の改良事例（函館市周辺における治山堰堤）



a) 改良前（上流より撮影）



b) 改良後（上流より撮影）



c) 改良後（魚道流入口付近）

写真-14 水制工を用いた魚道流入口上流部の改良事例（増毛町周辺における治山堰堤）

ら開口型に改良した事例である。こうすることにより、魚道流入口での水位は洪水中においても開口高さ以下となる。これにより、魚道流入口周辺で流れの変化が抑制され、土砂が堆積しにくい流況が洪水中も形成されると考えられる。また、施工後の状況を見ると魚道流入口環境は良好に維持されている。

5. 3. 2 水制工を用いた魚道流入口上流部の事例

魚道流入口上流部の土砂堆積防止対策として、水制工を用い魚道流入口上流部を改良した事例を写真-14に示す。

これは2010年7月29日洪水後に滯筋が大きく変化し、魚道流入口に流水が供給されなくなった治山堰堤において、堰堤周辺に点在する巨石（径1.0m以上）を用い、これを水制工の材料として活用し魚道流入口上流部を改良した事例である。巨石（水制工）は堰堤袖部擁壁より魚道流入口幅の1.5倍の位置に設置し、先端を堰堤袖部擁壁の先端の延長線上に位置させた。こうすることにより、洪水時における魚道流入口上流部での堆砂の抑制、流木の接近防止が図れると考えられる。また、施工後の状況を見ると水制先端で滯筋が形成されつつあり、魚道流入口環境は良好に維持されている。

5. 4 まとめ

本研究で得られた主な結果を以下にまとめる。

- 1) 魚道流入口断面をボックスカルバート型から開口型に改良することにより、魚道流入口環境は良好に維持されることを示した。
- 2) 水制設置位置 L/b に対する魚道流入口上流部での砂礫の移動形態について示した。特に、 $L/b=1.5$ の場合、魚道流入口上流部において、砂礫が堆積しないことが明らかとなった。
- 3) 水制長 $(l-ba)/b$ に対する魚道流入口上流部での流況特性および流木模型の流下状況について示した。特に、 $(l-ba)/b=2.0$ （水制長が堰堤袖部長と一致）の場合、魚道流入口上流部に向かう表面流速ベクトルはほとんど確認されず、流下させた流木模型はすべて堰堤工作物水通しを流下することが明らかとなった。

以上のことより、本論で示した模型実験の研究事例は、溪流河川の堰堤工作物などに設置された魚道流入口上流部において、魚道流入口環境を維持するための構造設計の一例としての有効性を示唆するものである。

今後はこれら改良がなされた箇所において、洪水後どのように魚道流入口上流部の環境が維持されるのかを確認することが必要である。特に、水制工を用いた魚道流入口上流部の改良事例は極めて少なく、魚道流入口環境を維持するための構造設計を確立するために洪水後のモニタリング調査が必要である。

6. 堰堤降下時の損傷軽減対策について

魚が生活史を完結させるには、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³¹⁾。本研究の対象魚であるサクラマスは、春先に河川遡上を始め秋に渓流域で産卵する。生まれた幼魚は、その後約1年間以上河川生活を送り、春先にスモルト化（海洋生活に備え生態が変化）し降下する。河川渓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、水通し部より排出され落下するものが大部分であるが、堰堤工作物に設置された魚道において魚類の落下対策については検討されていない(写真-15)。また、水野⁴²⁾は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、降下魚に対する適切な対応が望まれる。水通し部からの落下による衝撃の種類としては、堰堤工作物直下の乱流内での水理的剪断、水面との衝突、河床への衝突などが挙げられる⁴³⁾。このことより、降下における適切な対応について考える場合、水面への衝突や河床への衝突の可能性を考慮し、プール水深や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把握することが重要となる。

従来の魚類落下に関する研究は、滝からの落下試験として、ニジマスを高さ55mから滝壺に落下させた試験をShirahata⁴⁴⁾が実施している。これによると、採捕後1週間累計死亡率は40%以下であると述べている。また、土居ら^{45) 46) 47)}は、イワナを用いた落下試験で堰堤の高さが8.0m以下の場合、下流プール水深を50cm以上確保することで死亡率を最小限に抑えることができると述べている。また、落下高さが増加し、水面への衝突速度が15~16m/sを超えると、水面への衝突速度上昇に伴い、水面との衝突時の損傷そして床版への衝突の可能性が高まり魚に著しい損傷が現れるといわれており⁴⁵⁾、これを改善する手法として下流プール水深を十分に確保し、床版への衝突の可能性を軽減することが必要とされる。

サクラマスの降下に関する研究は、積雪寒冷地域の河川整備において、良好な降下環境を創出するための事業へと応用されることが期待されている。この場合、落下速度に対応した必要プール水深を確保することが



写真-15 堰堤下流部において落下対策が考慮されていない状態

重要となる。

本研究においては、このような実情を踏まえ、堰堤工作物周辺におけるより良い降下環境の把握を目的に、サクラマスのスモルトを実験魚として用い、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た。

6. 1 現地実験手法

6. 1. 1 実験魚

実験魚は、北海道の道北地域の一級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、サクラマスは成長停滞が始まる10月までに9cm程度に飼育をし、翌春の降海期に尾叉長が12cm以上となるように春季に成長を促進させることで高いスモルト化率が得られることが報告されており⁴⁸⁾、スモルトまで飼育した場合の尾叉長は12cm~15cm程度となる⁴⁹⁾。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。

6. 1. 2 実験手法

落下が実験魚の生態に及ぼす影響としては、水面・

表-8 現地実験の条件

プール水深(m): 3 ケース	0.4	0.7	1.0			
落下高さ (m): 6 ケース	3.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0

*実験ケースはプール水深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 ケースである

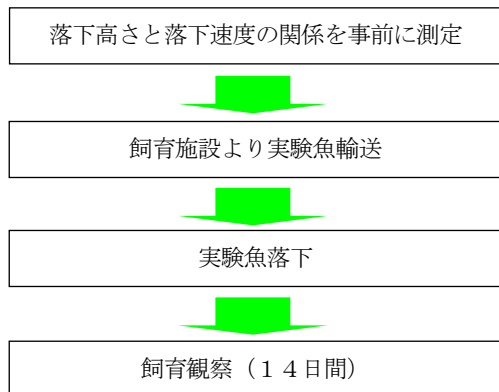


図-27 現地実験フロー図

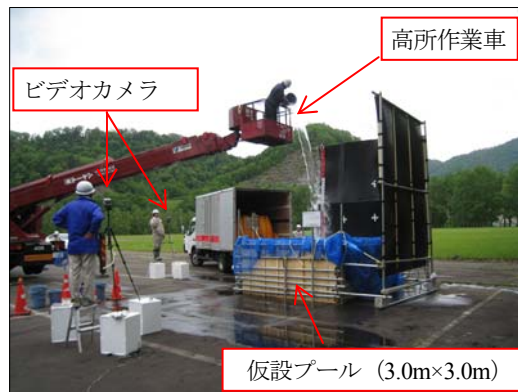


写真-16 現地実験の様子

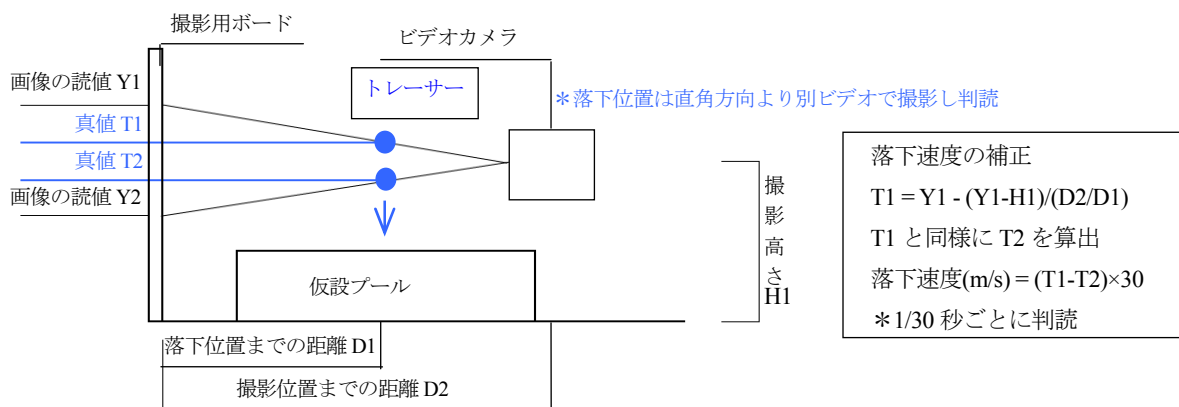


図-28 落下速度測定概略図

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⁴⁵⁾。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(図-27)。

(1) 実験設備

落下速度の測定及び実験魚落下は、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(写真-16)。

現地実験は、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、実験魚がスマルト化する時期にあたる2008年6月12日から13日にかけて実施した。

(2) 落下速度の測定

落下速度の測定は、比重 1.0g/cm³、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使い、表-8 に示される落下高さごとにそれぞれ5回実施した。また、落下速度は、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-28)。

(3) 実験魚落下及び飼育観察

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-8)。実験魚の採捕及び飼育観察は、仮設プールに落下したものについてのみ実施し、仮設プール外に落下したものについては飼育観察の対象外とした。飼育観察は、飼育施設の水槽 (3.2m×1.6m) を2槽使用し実施した。また、実験魚の飼育によるストレスを減らすため、実験魚1尾当たりの飼育スペースは極力広

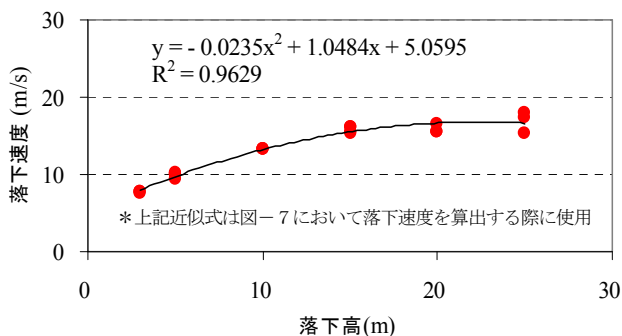


図-29 落下高さと落下速度の関係

くし、既存の実験⁴⁶⁾⁴⁷⁾で実施された飼育スペースの広さと同程度の約 4L/尾とした。このため、実験 1 ケースにおける飼育尾数は、飼育スペースの広さを考慮し 15~25 尾程度となるように落下尾数を調整した。なお、飼育場所までの輸送はエアレーションを行いながら実施した。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。

6. 2 現地実験結果及び考察

6. 2. 1 落下速度の測定

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かった。このときの限界速度は 16m/s 程度であり (図-29)、本実験の範囲でこのような状態が確認された。これは既往の文献⁴³⁾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。

6. 2. 2 実験魚落下及び飼育観察

落下尾数については、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 (図-30)。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と考え、他のケースと比較し落下尾数を増加させた結果、飼育尾数が増加した (図-30)。ただし、実験魚 1 尾あたりの飼育スペースは、既存の実験⁴⁶⁾⁴⁷⁾で実施された飼育スペースの広さと同程度の約 4L/尾を確保した。

各飼育日に生存している実験魚の尾数を N1、各飼育日に死亡した実験魚の尾数を N2 とし、実験魚の死亡の推移を N2/N1 で整理した (図-31)。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 (図-31)。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。しかしながら、飼育後 6~13 日目までに死亡した実験魚は、眼球出血や眼

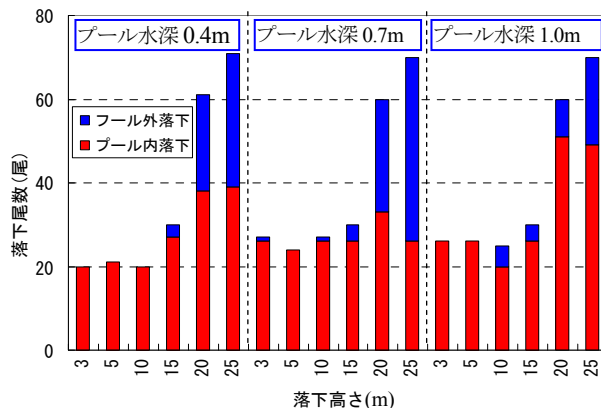


図-30 落下尾数と飼育尾数の関係

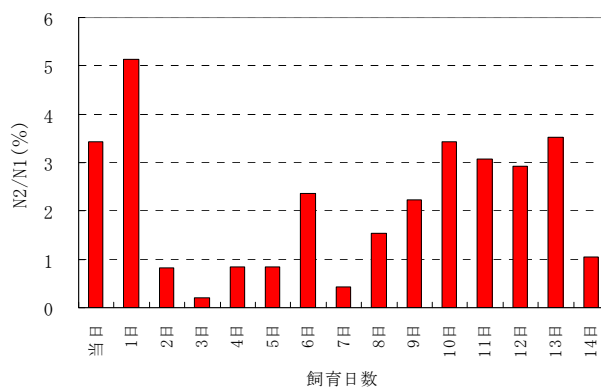


図-31 飼育日数と死亡率の推移

球周辺が白く変色するものが多く現れた。イワナの稚魚を落下させ飼育している既存の研究において飼育魚が細菌に感染し、死亡する場合の特徴としては、8 日目以降に急激に死亡数が増加 (生存していた飼育魚の 76%が死亡) している⁴⁶⁾。また、今回は飼育施設の水槽を使用し、沢水を引き込み掛け流して飼育していることを考えると、細菌に感染し死亡したとは考えにくい。このため、飼育後 6~13 日目までに死亡した原因としては、実験魚が従来から保菌していたものが落下によるストレスで免疫力が低下し発病する等の 2 次的な要因により死亡したと考えられる。また、飼育終了の 14 日目には眼球出血や眼球周辺が白く変色するものはほとんど確認されなかった。

6. 2. 3 落下速度・プール水深が実験魚に及ぼす影響

各ケースにおける飼育観察終了時の実験魚の生存率を落下速度とプール水深の関係で整理した (図-32)。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 (表

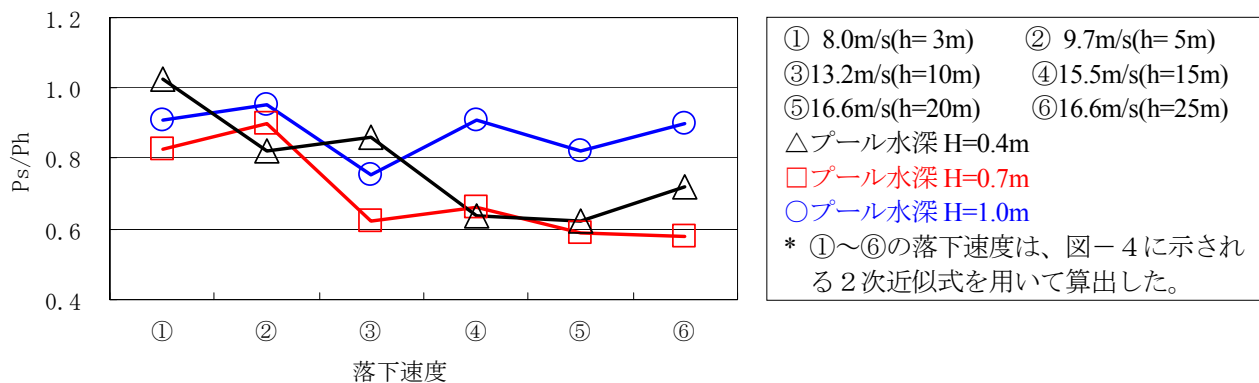


図-32 落下速度・プール水深と実験魚の生存率

表-9 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 nl	有意差 p	飼育尾数 n	死亡尾数 nl	有意差 p	飼育尾数 n	死亡尾数 nl	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)

-9)。なお、落下魚の生存率については、各ケースにおける飼育尾数が異なるため(図-31)、非落下魚の生存率 Ph と落下魚の生存率 Ps を用いて相対値で検討した。

プール水深が 1.0m の場合、落下速度が増加しても Ps/Ph の値はほとんど変化しない(図-32)。これは水面への衝突速度が増加しても実験魚の生存率はほとんど変化しないことを意味している。

落下速度が 10m/s 程度以下の場合、プール水深が 0.4m 以上のものは、他のケースと比較し Ps/Ph の値が大きく(図-32)、非落下魚の生存率と比較して有意差は生じない(表-9)。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。

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 の値は大きく異なる(図-32)。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(表-9)。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。

6.3 模型実験によるプール内の状態把握

6.3.1 模型実験設備及び手法

落下による衝撃の種類としては、堰堤工作物直下の乱流内での水理的剪断、水面との衝突、河床への衝突などが挙げられる⁴³⁾。

本研究では、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 1.0g/cm³ であり水と同程度である。

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(写真-17)。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 g/cm³ 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(写真-18)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(写真-17)。

6.3.2 模型実験の条件

模型実験の条件は、図-32 で示された Ps/Ph の値が大きく、非落下魚の生存率に対し有意差が生じないケース No1,2、Ps/Ph の値が小さく、非落下魚の生存率に対し有意差が生じたケース No3 で実施した。また、模型実験の条件及び再現される値については表-10 に示す。

6.3.2 実験結果及び考察

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(写真-19, 20)。両ケースにおける落下す

表-10 模型実験の条件と再現される値

NO	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	
1	5	9.7	0.4	2.5	6.42	0.20	5	9.1	0.4	縮尺1/2
2	15	15.5	1.0	2.5	6.42	0.17	15	15.7	1.0	縮尺1/6
3	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る

No1: 落下速度②, プール水深 0.4m (△) のケース

No2: 落下速度④, プール水深 1.0m (○) のケース

No3: 落下速度④, プール水深 0.7m (□) のケース



写真-17 落差模型の様子



写真-18 落水水脈の状態

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-21)。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。

以上の結果は、現地実験において河床への衝突の可能性の有無により落下魚の生存率が大きく変化することを示している。

6. 4 まとめ

サクラマスのスモルトを実験魚とし、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、現地実験の代表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た。

本研究で得られた主な結果を以下にまとめる。

1) プール水深が 1.0m の場合、落下速度が増加しても



写真-19 落水水脈は河床まで達しない状況 (落下速度 6.42m/s, プール水深 0.2m, 縮尺 1/2)

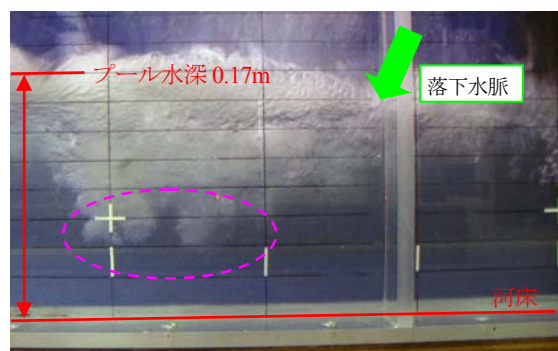


写真-20 落水水脈は河床まで達しない状況 (落下速度 6.42m/s, プール水深 0.17m, 縮尺 1/6)

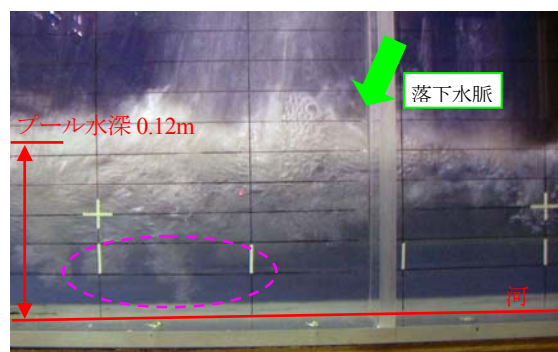


写真-21 落水水脈の一部は河床に達する状況 (落下速度 6.42m/s, プール水深 0.12m, 縮尺 1/6)

Ps/Phの値はほとんど変化しなかった。

2) 落下速度が10m/s程度以下の場合、プール水深を0.4m (本実験における最低値) 以上とすることで他のケースと比較してPs/Phの値は大きく、実験魚の生存率は非落下魚の生存率と比較して有意差は生じなかった。また、この場合における代表的なケース (模型実験No1) において、落下高さと落下速度を再現した結果、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示した。

3) 落下速度が15m/s程度以上の場合、プール水深が1.0m とプール水深が0.7m以下を比較すると、Ps/Phの値は大

大きく異なり、プール水深が1.0mでの実験魚の生存率は非落下魚の生存率と比較して有意差は生じなかった。また、この場合における代表的なケース（プール水深が1.0mの場合は模型実験No2、プール水深が0.7mの場合は模型実験No3）において、落下高さと落下速度を再現した結果、プール水深が0.7mでは落下の水脈が河床付近に達するのに対し、プール水深が1.0mでは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示した。

以上のことより、落下速度が試験魚に及ぼす影響としては河床への衝突が主な要因であり、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。また、必要プール水深が確保された実験条件では、落下水脈は河床へ到達しないことを模型実験により定性的に示した。これらの結果は、積雪寒冷地域の河川整備において、良好な降下環境を創出するための事業に有効な知見を提供するものと考えられる。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、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ついても今後検討する。

謝辞：サクラムスの落下現地実験を行うにあたり、国土交通省北海道開発局旭川開発建設部岩尾内ダム管理所には多大なる協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 真山 紘：サクラム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
- 2) 真山 紘：サクラムスのスマルト放流に関する生態学的検討-河川の自然環境とサクラムスの資源-，北海道さけ・ますふ化場 魚と卵，162，pp.9-18，1993
- 3) 宮腰靖之：北海道におけるサクラムスの放流効果および資源評価に関する研究，北海道立水産孵化場研究報告第60号，pp.1-64，2006
- 4) 真山 紘：越冬時のサクラムス幼魚の生活と河川環境，北海道さけ・ますふ化場 魚と卵，164，pp.33-40，1995
- 5) 水野信彦，御勢久右衛門：河川の生態学補訂・新装版，p.247，築地書館，1993
- 6) 釧路開発建設部標津川技術検討委員会事務局：第6回標津川技術検討委員会資料，p.14，2003
- 7) 卜部浩一，村上泰啓，中津川誠：サクラムスの産卵環境特性の評価，北海道開発土木研究所月報 No613，pp.32-44，2004
- 8) 矢部浩規，卜部浩一，村上泰啓：サクラムスの産卵環境特性の評価に関する研究，北海道開発局技術研究発表会発表論文集，48，CD-ROM 環-43，2005
- 9) 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ム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
- 10) 森田茂雄，桑原誠，山下彰司：河床地形とサクラムスの産卵環境に関する研究，北海道開発局技術研究発表会論文報告集，65，CD-ROMb-16，2009
- 11) 森田茂雄，桑原誠，山下彰司，永山滋也：河川流域におけるサクラムスの産卵場所に関する研究，河川技術論文集，Vol.15，pp.85-90，2009
- 12) 河川生態学術研究会：川の自然環境の解明に向けて，pp.14，(財)リバーフロント整備センター，1997
- 13) 島谷幸宏：自然環境に関する技術，河川 2004-1，pp.72-74，2004
- 14) 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
- 15) 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
- 16) 知花武佳：瀬一淵の地形とその低質構造，水工学に関する夏期研修会講義集(A)，第44回，pp.3.1-3.23，2008
- 17) 渡辺康玄：中規模河床形態の特徴と河川地形，水工学に関する夏期研修会講義集(A)，第44回，pp.2.1-2.17，2008
- 18) 山口甲，黒木幹男：中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究，第18回自然災害科学総合シンポジウム講演要旨集，pp.185-66，1999
- 19) 財団法人北海道河川防災研究センター：河道設計論(案)，p.221，1981
- 20) 鈴木研一・永田光博・中島美由紀・大森始：北海道北部河川におけるサクラムス幼魚の越冬時の微生息場所とその物理環境，北海道立水産孵化場研究報告，54号，pp.7-14，2003
- 21) 中里享史・巻口範人・渡辺康玄：越冬期におけるサクラムス幼魚の好適物理環境条件，河川技術論文，10，pp.441-446，2004
- 22) 渡辺恵三・中村太士・小林美樹・柳井清治・米田隆夫・渡辺康玄・丸岡昇・北谷啓幸：河川の階層構造に着目したサクラムス幼魚の越冬環境，応用生態工学，9(2)，pp.151-165，2006
- 23) 矢崎博芳，萱場祐一，佐川志朗，秋野淳一：魚類生息場としての石の隙間，多自然研究，144，pp.10-13，2007
- 24) 佐川志朗，萱場祐一，大森徹治：魚類と甲殻類による石

- の隙間の季節利用, 土木技術資料 51-8, pp.10-13, 2009
- 25) 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
- 26) 鈴木研一, 永田光博, 中島美由紀, 大森始: 北海道北部河川におけるサクラマス幼魚の越冬時の微生息場所とその物理環境, 北海道立水産孵化場研究報告, 54 号, pp.7-14, 2003
- 27) 中里享史, 巻口範人, 渡辺康玄: 越冬期におけるサクラマス幼魚の好適物理環境条件, 河川技術論文, 10, pp.441-446, 2004
- 28) 渡辺恵三, 中村太士, 小林美樹, 柳井清治, 米田隆夫, 渡辺康玄, 丸岡昇, 北谷啓幸: 河川の階層構造に着目したサクラマス幼魚の越冬環境, 応用生態工学, 9(2), pp.151-165, 2006
- 29) 国土技術研究センター: 護岸の力学設計法・改訂, p.72, 山海堂, 2007
- 30) 森僚多, 石川武彦, 長田健吾, 福岡捷二: 多摩川水系浅川における河床高回復現地試験と河道管理手法, 河川技術論文集, Vol.1, pp.113-118, 2010
- 31) 魚がのぼりやすい川づくりの手引き: 国土交通省河川局, p.155, 2005
- 32) 今井貴, 四戸孝治: 最新魚道の設計—魚道と関連施設—, 信山社サイテック, p.581, (財) ダム水源地環境整備センター編集, 1998
- 33) 安田陽一: 魚道整備における工学と生態学との連携, 日本水産学会誌, Vo73(1), pp.116-119, 2007
- 34) 谷瀬敦, 山下彰司, 矢部浩規: 北海道の魚道の特長, 土木学会北海道支部論文報告集, Vo62, CD-ROM.2-10, 2006
- 35) 原義文, 宮園正敏, 加藤英雄: 砂防施設に設置する魚道の留意点, 砂防学会研究発表概要集, Vo54, pp.392-393, 2005
- 36) 安田陽一: 多様な水生生物の遡上・降河に配慮した魚道の特長, 水利科学, No.288, pp.1-31, 2006
- 37) 安田陽一, 大津岩夫: 洪水時における河川横断耕作物周辺の流況特性に対する魚道設置の影響, 河川技術論文集, Vol.13, pp.113-118, 2007
- 38) 安田陽一, 大津岩夫, 高橋正行, 三村進二, 原口哲幸: 長崎県千綿川に設置された台形断面魚道の特徴と魚道設置の効果, 河川技術論文集, Vol.11, pp.435-440, 2005
- 39) 渡辺康玄, Tubino, M., Zollezi G: 掃流砂により形成される交互砂州の非定常下での挙動, 北海道開発土木研究所月報, No576, pp.4-12, 2001
- 40) 佐藤徳人, 渡辺康玄, 白井博彰: 橋脚周辺における流木の挙動監視調査, 河川技術論文集, Vol.13, pp.409-414, 2007
- 41) 池田俊介, 吉池智明, 杉本高: 不透水制群を有する流れ構造に関する実験的研究, 水工学論文集, Vol.43, pp.281-286, 1999
- 42) 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
- 43) 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
- 44) Shirahata S: Survival of trout dropped from a water fall, Bulletin of Freshwater Fisheries Research Laboratory, 20, pp.93-100, 1970
- 45) 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
- 46) 土居隆秀, 福富則夫, 久保田仁志, 阿久津正浩: 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~平成12年)—, 栃木県水産試験場研究報告, 45, pp.95-98, 2002
- 47) 土居隆秀, 福富則夫, 沢田守伸, 久保田仁志: イワナ等溪流魚適正増殖手法開発事業—イワナの堰堤落下試験(平成11年度~平成13年)—, 栃木県水産試験場研究報告, 46, pp.108-111, 2003
- 48) 赤石正勝: 北海道東部産サクラマス幼魚における秋季体サイズと翌春のモルト化との関係, 魚と卵, 161, pp.73-77, 1992
- 49) 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, pp.1-13, 2005