

堰堤工作物からの落下がサクラマスの生態に及ぼす影響

The influence of the conditions of falling from dam structures on the ecology of cherry salmon

森田 茂雄¹・桑原 誠¹・真山 紘²・山下 彰司¹

Shigeo MORITA, Makoto KUWAHARA, Hiroshi MAYAMA and Shoji YAMASHITA

¹正会員 (独)土木研究所 寒地土木研究所水環境保全チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1-3)

²社団法人 北海道栽培漁業振興公社 (〒060-0003 札幌市中央区北3条西7丁目北海道第2水産ビル4F)

In mountain rivers, if the dam structure was installed, the majority of cherry salmon are discharged from the overflow section. However, measures for descending fish have not been considered in the design of fishways installed along with dam structures. In this study, the influence of differences in pool depth and falling speed on the ecology of cherry salmon was examined in an on-site experiment. As a result, in the case that the falling velocity is larger than 15 m/s, the value of the survival rate of the examination fish differed considerably comparing a pool depth of 1.0 m and a pool depth of 0.7 m. Also, in the case that a pool depth is 1.0 m, there is no significant difference if the falling fish is compared with the survival rate of non-falling fish.

Key Words : *cherry salmon, descending environment, falling velocity, pool depth*

1. はじめに

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¹⁾。積雪寒冷地域を代表する魚種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年間以上は河川生活を送り、春先にスモルト化し降下する。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る魚道の設計において落下対策については検討されていない²⁾。また、水野³⁾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。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学的剪断、水面との衝突、河床への衝突などが挙げられる⁴⁾。このことより、堰堤工作物からの落下がサクラマスの生態に及ぼす影響を考える場合、水面との衝突速度の把握、河床への衝突を考慮しプール水深、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においては、滝からの落下試験においてニジマスを下り高さ55mで滝壺に落下させた試験をShirahata⁵⁾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が、落下速度やプール水深との関係については示されていない。また、土居ら^{6) 7) 8)}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が、落下速度については示されていない。一方、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⁴⁾、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である。

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渓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。

2. 現地実験手法

(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⁹⁾、スモルトまで飼育した場合の尾叉長は12cm～15cm程度となる¹⁰⁾。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。

(2) 実験手法

図-1に現地実験フローを示す。落下が実験魚の生態に及ぼす影響としては、水面、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⁶⁾。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。

a) 実験設備

落下速度の測定及び実験魚落下は、図-2に示されるように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。

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を考慮し2008年6月中旬に実施した。

b) 落下速度の測定

落下速度の測定は、比重1.0、長さ15cm、幅2cm、厚さ

さ1cmのポリプロピレン製の板をトレーサーとして用いて表-1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-3）。

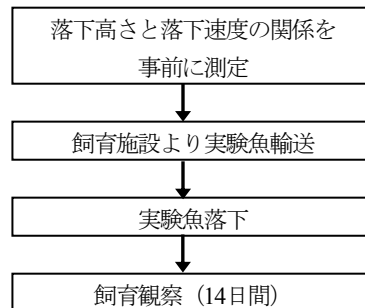


図-1 現地実験フロー図



図-2 現地実験の様子

表-1 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

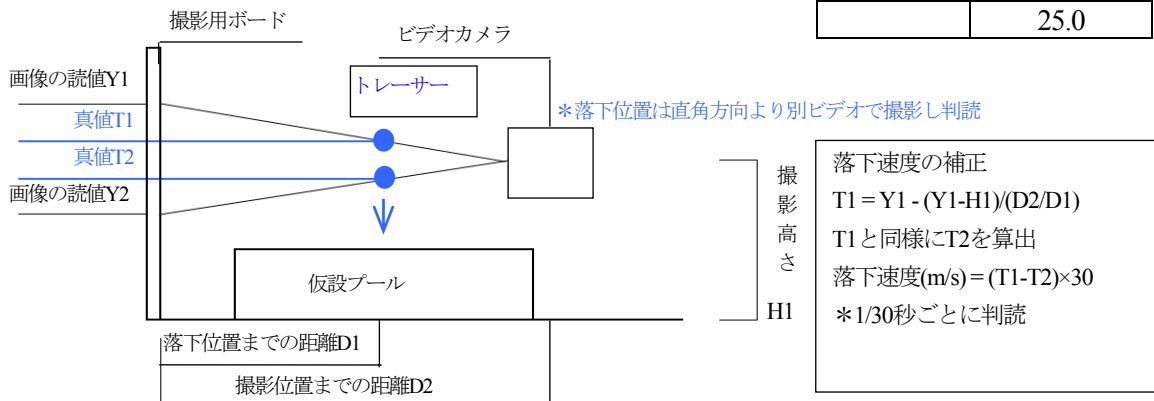


図-3 落下速度測定概略図

c) 実験魚落下及び飼育観察

実験魚落下は、表-1に示されるプール水深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。実験魚の採捕、輸送及び飼育観察は、仮設プールに落下したもののについてのみ実施し、仮設プール外に落下したもの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。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くする必要がある。ここでは、既存の実験⁷⁸⁾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ないながら実施した。

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。また、14日間の飼育観察終了後には、その後の健康状態について検討するため死亡率が高いケース、死亡率が低いケース、非落下魚についてヘマトクリット調査を実施した。なお、ヘマトクリット調査とは、血液中の赤血球の割合を示す指数であり、内部損傷等による貧血の度合いを比較するために実施した。

3. 現地実験結果及び考察

(1) 落下速度の測定

落下高さと落下速度の関係を図-4に示す。また、図-4の結果を $3\text{m} \leq \text{落下高さ} \leq 25\text{m}$ 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表-2に示す。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-4）、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⁴⁾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。

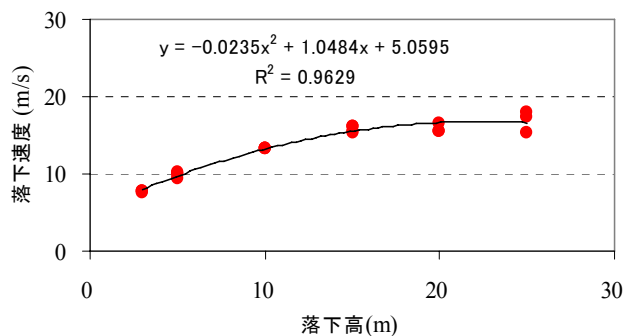
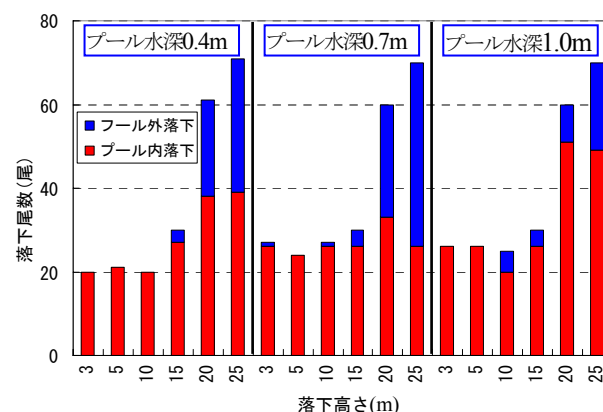


図-4 落下高さと落下速度の関係

表-2 図-4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-5 落下尾数と飼育尾数の関係

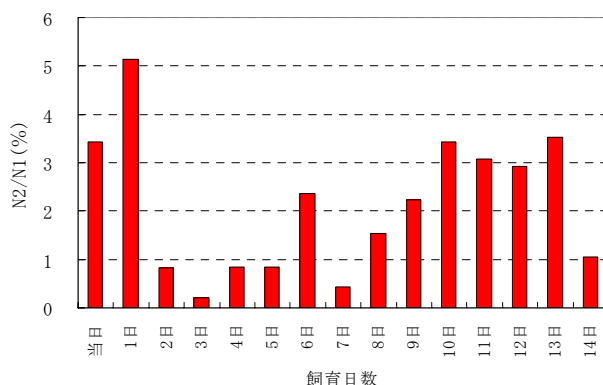


図-6 飼育日数と死亡率の推移

表-3 各ケースにおける実験魚の死亡状況

ケース		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	⑬
プール水深 m		1.0						0.7						0.4						—
落下高さ m		3	5	10	15	20	25	3	5	10	15	20	25	3	5	10	15	20	25	—
飼育尾数 尾		26	26	20	26	51	49	26	24	26	26	33	26	20	21	20	27	38	39	14
死亡総尾数 尾		4	3	6	4	12	8	6	4	11	10	15	12	1	5	4	11	16	13	1
死亡時の状態	①	3	2	4	4	9	8	4	4	8	7	10	8	1	5	4	8	11	7	1
	②	1		1		1										1				
	③		1	1		2		2		3	3	5	4				2	5	6	

状態① 外傷等がなく死亡 状態② 眼球出血があり死亡 状態③ 眼球周辺が白く変化し死亡 ケース①9 非落下魚

(2) 実験魚落下及び飼育観察

実験魚落下及び飼育観察の結果，落下尾数と飼育尾数の関係を図-5に，実験魚の死亡率の推移を図-6に，死亡状況を表-3に示す。

図-5は落下尾数と飼育尾数の関係を示したものである。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。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。ただし，実験魚1尾あたりの飼育スペースは，既存の実験⁷⁾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。

図-6は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。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⁷⁾。また，今回の飼育においては養魚施設の水槽を使用し，沢水を引き込み掛け流しで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ていない。

(3) 落下速度・プール水深の違い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（表-4参照）を落下速度，プール水深の関係で整理したものを図-7に，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表-4に示す。なお，図-7における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，非落下魚の生存率を用いて相対値で検討する。

図-7は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をPsとしてPs/Phを落下速度，プール水深の関係で整理したものである。なお，図-7に示される落下速度は，表-2で示される値を用いた。さらに，ケース⑤

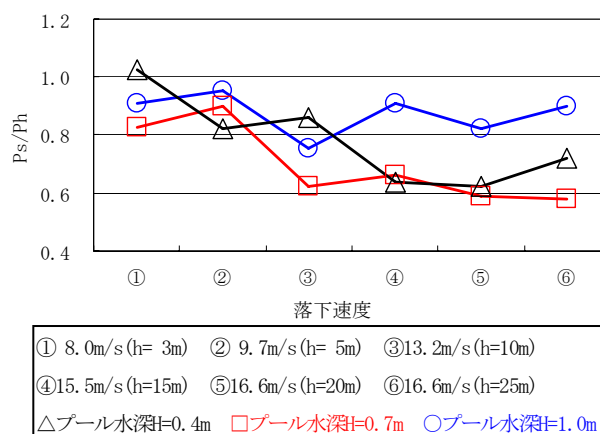


図-7 落下速度・プール水深と実験魚の生存率

表-4 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H=1.0m			非落下魚に対する検定 プール水深H=0.7m			非落下魚に対する検定 プール水深H=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
		n	n1	p	n	n1	p	n	n1	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)

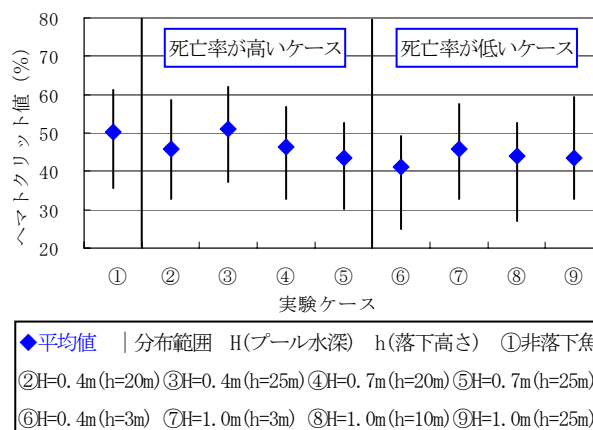


図-8 非落下魚に対するヘマトクリット値の比較

及び⑥は落下速度が等しいため同じ状態である考えられる。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。また、落下高さ25m、プール水深0.4 mにおいて、非落下魚の生存率に対する有意差が生じていない。このことについては、落下速度が同様の落下高さ20m、プール水深0.4 mなどとの対比や図-7から示される結果によりプール水深は不足していると判断する。

次に、14日間の飼育観察終了時における死亡率が高いケース、死亡率が低いケース、非落下魚についてヘマトクリット調査を実施した結果を図-8に示す。ヘマトクリット値を比較すると非落下魚に比べ、各ケースとも平均値は低い値を示しており、落下による影響が多少見られる。しかしながら、大部分の値がヘマトクリット値30%以上であり、既往の文献¹¹⁾¹²⁾で示されているサケ親魚の値と同程度であるため生態的に危険な値ではないと考える。

4. 模型実験によるプール内の状態把握

(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⁴⁾。

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であり、水と同程度であるため模型実験における落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実験棟において図-9に示される高さ2.5mの落差模型を製作した。

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-10)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-9)。

(2) 模型実験の条件

模型実験の条件は、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。模型実験の条件及び再現される値については表-5に示す。

表-5 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る

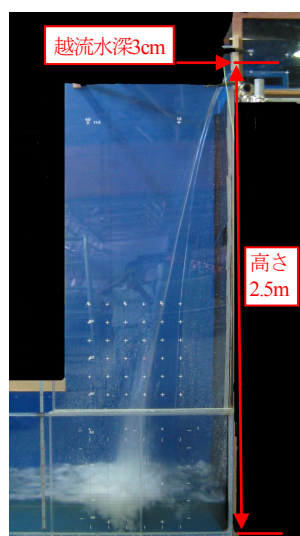


図-9 落差模型の様子



図-10 現地試験における落下水脈の状態

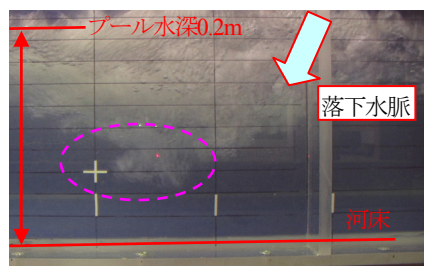


図-11 落下水脈は河床まで達しない状況
落下速度6.42m/s、プール水深0.2m、縮尺1/2

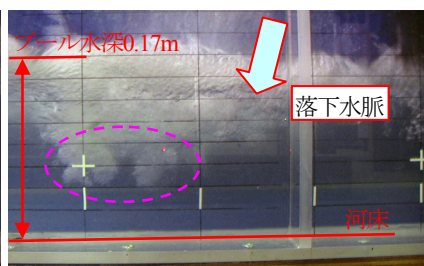


図-12 落下水脈は河床まで達しない状況
落下速度6.42m/s、プール水深0.17m、縮尺1/6

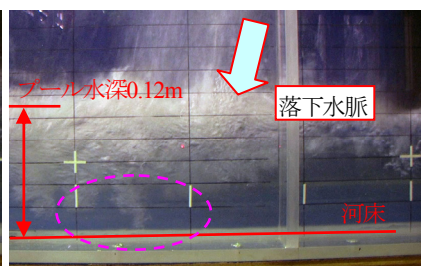


図-13 落下水脈の一部が河床に達している状況
落下速度6.42m/s、プール水深0.12m、縮尺1/6

5. 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ものを図-11、図-12に示す。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ものを図-13に示す。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。

6. まとめ

サクラマスの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、落下高さと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以下の場合を比較すると、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、落下高さと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。

謝辞：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) 国土交通省河川局：魚がのぼりやすい川づくりの手引き、155pages, 国土交通省河川局, 2005
- 2) 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) ダム水源環境センター編集, 1998
- 3) 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
- 4) 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
- 5) Shirahata S : Survival of trout dropped from a water fall, Bulletin of Freshwater Fisheries Research Laboratory, 20, 93-100, 1970
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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スモルト化との関係, 魚と卵, 161, pp.73-77, 1992
- 10) 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
- 11) 西野一彦：産卵遡上期さけの血液性状についてⅠ, 北海道さけ・ますふ化場研究報告, 20, pp.21-25, 1966
- 12) 西野一彦：産卵遡上期さけの血液性状についてⅡ, 北海道さけ・ますふ化場研究報告, 21, pp.34-47, 1967

(2008. 9. 30受付)